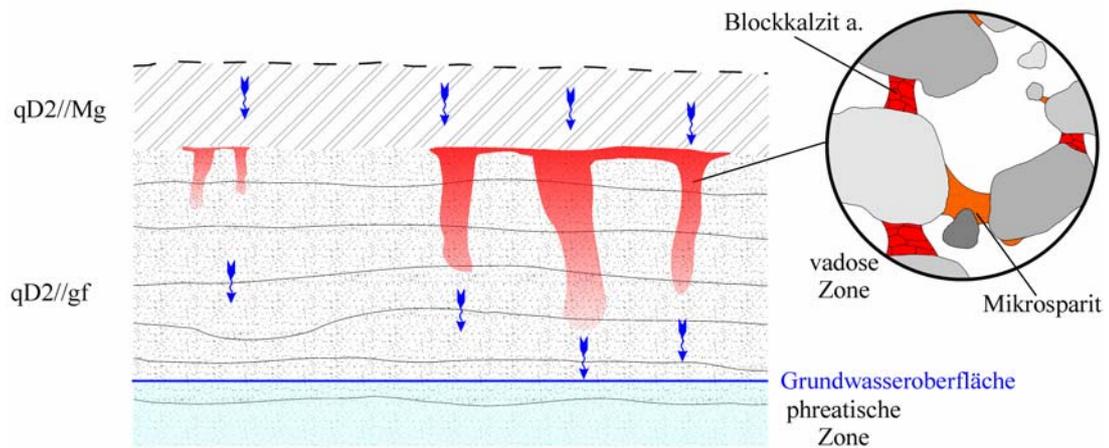


**Karbonatische Zementation
pleistozäner Lockersedimente
NW-Deutschlands**



**Dem Fachbereich Geowissenschaften und Geographie
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades
Doktor der Naturwissenschaften
Dr. rer. nat.
genehmigte Dissertation
von**

**Dipl.-Geol. Jörg Elbracht
geboren am 14.01.1965 in Hannover.**

2002

Referentin / Referent: Prof. Dr. D. Henningsen

Korreferentin / Korreferent: Prof. Dr. D. Michalzik

Tag der Promotion: 01.07.2002

ZUSAMMENFASSUNG	4
1 EINFÜHRUNG	5
1.1 Einleitung	5
1.2 Aufgabenstellung	5
1.3 Nordwestdeutschland während des Quartär - Ein Überblick	6
2 METHODIK	6
2.1 Probenentnahme / Geländearbeiten	6
2.2 Folienabzüge („peels“) und Dünnschliffe	6
2.3 Korngrößenbestimmung	6
2.4 Durchlässigkeitsbestimmung	7
2.5 Bestimmung Gesamtkarbonatgehalt	7
2.6 Röntgendiffraktometrie	7
2.7 Mikroskopie	7
2.7.1 Karbonatanfärbung	7
2.7.2 Polarisations- und Fluoreszenzmikroskopie	8
2.7.3 Kathodolumineszenzmikroskopie	8
2.7.4 Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX)	8
2.7.5 Elektronenstrahl-Mikrosonde (EMS) mit wellendispersiver Röntgenanalyse (WDS)	8
3 KARBONATZEMENTATION PLEISTOZÄNER LOCKERSEDIMENTE NW-DEUTSCHLANDS	9
3.1 Verbreitung	9
3.1.1 Dokumentationsstand	9
3.1.2 Verbreitung karbonatischer Zementation	9
4 ZEMENTATIONSKÖRPER	13
4.1 Typbeschreibung und –definition	13
4.1.1 Konkretionen	14
4.1.2 Massenzementationskörper	15
4.2 Zementationskörper in pleistozänen Lockersedimenten NW-Deutschlands	15
4.2.1 Konkretionen	15
4.2.1.1 Kugelige Konkretionen	15
4.2.1.2 Diskusförmige Konkretionen	16
4.2.1.3 Zapfen	16
4.2.1.4 Flache Zapfen	17
4.2.1.5 Stratiforme Zementationskörper	17
4.2.2 Massenzementationskörper	17
5 KARBONATZEMENT	22
5.1 Karbonatzement: Grundlagen und Aspekte	22
5.1.1 Meteorisch-vadoser Zement	23
5.1.2 Meteorisch-phreatischer Zement	24
5.1.3 Kathodolumineszenzverhalten	25
5.1.4 Pseudomatrix	26
5.2 Karbonatzement in pleistozänen Lockersedimenten NW-Deutschlands	26
5.2.1 Mikrit	27
5.2.2 Mikrospatit	27
5.2.3 Blockkalzit	27
5.2.4 Blattförmiger Zement	27
5.2.5 Syntaxiale Anwachssäume	28
5.2.6 Poikilotopischer Zement	28
5.2.7 Meniskus- und Gravitationszement	31
5.2.8 Dachzement	32
5.2.9 Zementgeochemie	33
5.2.10 Kathodolumineszenzverhalten	36
5.2.11 Pseudomatrix	36
5.3 Zementgenerationen in den untersuchten Aufschlüssen	39
6 DIAGENESEMILIEUS	46
6.1 Einleitung	46
6.2 Grundlagen und Aspekte	47
6.2.1 Bildungsbedingungen von Konkretionen	48
6.2.2 Bildungsbedingungen von Massenzementationskörpern	49

6.3	Diagenesemilieu	49
6.3.1	Zementationskeime	49
6.3.2	Karbonatquellen	50
6.3.3	Zementation bindiger Sedimente	51
6.3.4	Selbstorganisationsprozesse	52
6.3.5	Bildung hängender Zapfen	53
6.3.6	Grundwasserströmung	53
6.3.7	Das Talrand-Modell	54
6.3.8	Das Kapillarsperren-Modell	55
6.3.9	Pseudo-phreatische Zementation	60
6.3.10	Mechanische Beanspruchung kalzitisch zementierter Partien	61
6.3.11	Zementation unter warmzeitlichen Bedingungen	61
6.3.12	Zementation unter kaltzeitlichen Bedingungen	62
6.3.13	Wiederanlösung von Zementationskörpern	67
6.3.14	Anlösung von siliziklastischem Detritus	68
6.4	Zementationsphasen der untersuchten Aufschlüsse	68
6.4.1	Aufschluss Daerstorf: Zementationsphasen	70
6.4.2	Aufschluss Hittfeld: Zementationsphasen	69
6.4.3	Aufschluss Breetze: Zementationsphasen	69
6.4.4	Aufschluss Holzen: Zementationsphasen	72
6.4.5	Aufschluss Volkstorf: Zementationsphasen	72
6.4.6	Aufschluss Krankenhagen: Zementationsphasen	74
6.4.7	Aufschluss Rumbeck: Zementationsphasen	75
6.4.8	Aufschluss Helpensen: Zementationsphasen	75
6.4.9	Aufschluss Bad Münder / Hachmühlen: Zementationsphasen	77
6.4.10	Aufschluss Coppenbrügge: Zementationsphasen	77
6.4.11	Aufschluss Eime: Zementationsphasen	78
6.4.12	Aufschluss Banteln: Zementationsphasen	79
6.4.13	Aufschluss Betheln: Zementationsphasen	79
6.4.14	Aufschluss Freden: Zementationsphasen	79
6.4.15	Aufschluss Engelade: Zementationsphasen	88
6.4.16	Aufschluss Bornhausen: Zementationsphasen	88
6.4.17	Aufschluss Ödishausen: Zementationsphasen	89
7	BILDUNGSZEITEN	89
7.1	Bildungszeiten der untersuchten Aufschlüsse	89
7.2	Karbonatzementation während des Quartärs	92
7.2.1	Holstein-Warmzeit	92
7.2.2	Saale-Kaltzeit	92
7.2.3	Eem-Warmzeit	93
7.2.4	Weichsel-Kaltzeit	93
7.2.5	Holozän	93
8	KARBONATZEMENTATION PLEISTOZÄNER LOCKERSEDIMENTE NW-DEUTSCHLANDS - ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION	93
9	DANKSAGUNG	94
10	LITERATURVERZEICHNIS / VERWENDETE TOPOGRAPHISCHE KARTEN	95
10.1	Literaturverzeichnis	95
10.2	Verwendete Topographische Karten	108

Lebenslauf
Anhang

Stichwörter: Quartär, Kalkkonkretion, Kalkzementation, Frühdiagenese

Keywords: quaternary, calcareous concretion, calcareous cementation, early diagenesis

ZUSAMMENFASSUNG

Karbonatische Zementation pleistozäner Lockersedimente ist in NW-Deutschland weit verbreitet. In den 17 untersuchten Aufschlüssen besteht der Zement aus Niedrig-Mg-Kalzit. Der Stoff für die Zementbildung stammt hauptsächlich aus kaltzeitlich transportierten Sedimenten. In diesen ist karbonatischer Detritus besonders lösungsanfällig, da er saubere, meist nicht durch z.B. Fe-Hydroxide oder Biofilme verunreinigte Oberflächen hat und zudem oft fein zerrieben in der Matrix feinkörniger Sedimente (z.B. Grundmoräne) vorkommt. Nur bei einem Aufschluss deuten die Untersuchungsergebnisse darauf hin, dass Grundwasser aus mesozoischen Kalksteinschichten an der Bildung karbonatischer Zementationskörper beteiligt ist.

Die untersuchten Zementationskörper bildeten sich überwiegend mehrphasig. Die Zementation begann häufig im wasserungesättigten Milieu (vados). Der dabei entstandene Zement ist in den Zementationskörpern zwar quantitativ unbedeutend. Allerdings zeichnete er zum einen häufig die Form der Zementationskörper vor und diente zum anderen den folgenden Zementationsphasen im wassergesättigten Milieu (phreatisch) als Kristallisationskeim. Die Form karbonatisch zementierter Bereiche wird oft durch das Strömungsverhalten von Sicker- und Grundwasser bestimmt, wobei sich nicht nur Strömungsrichtung und -geschwindigkeit, sondern auch die Strömungsart (laminar, turbulent) auswirken können. Während die Zementation im gering wasserdurchlässigen Sediment überwiegend substratgesteuert ist, geben Zementationskörper im gut wasserdurchlässigen Material Hinweise auf die paläohydrogeologische Situation. Dadurch konnten z.B. schwebende Grundwasser-Stockwerke und teilweise wassergesättigte Bereiche innerhalb der vadosen Zone identifiziert werden. Außerdem fanden sich Hinweise auf Kalzit-zementation unter kaltzeitlichen Bedingungen. Dabei fand Zementation wahrscheinlich sowohl unterhalb als auch im unmittelbaren Vorfeld des Inlandeises sowie unter periglazialen Bedingungen im diskontinuierlichen Permafrost statt. Klimatische Einflüsse und die damit verbundene Änderung der Grundwasser-Neubildung sind die einzigen überregionalen Steuerungsfaktoren karbonatischer Zementation pleistozäner Lockersedimente NW-Deutschlands.

Die Zementationskörper kommen überwiegend in Elster- bis Saale-zeitlich entstandenen Sedimenten vor. Hinweise auf das Alter der Zementation ergaben sich meist nur im Zusammenhang mit der lokalen geologischen und paläohydrogeologischen Entwicklung. Die Befunde deuten darauf hin, dass sich der überwiegende Teil des Zementes während der Eem-Warmzeit bildete. Kaltzeitliche Zementation während der Saale- und der Weichsel-Kaltzeit hat nur einen geringen Anteil an den Zementationskörpern.

Abstract

Pleistocene sediments in northwest Germany are often cemented with calcareous material. In the 17 outcrops studied in this research, the cement is characterized by low-Mg calcite. The main source of the substances forming the cement is material transported by the ice sheet during the Pleistocene. The calcareous detritus in these glacial sediments is easily dissolved owing to freshly exposed surfaces and abundant fine particles (e.g., in till). In only one outcrop can the calcareous cement attributed to groundwater transport from the underlying Mesozoic limestone.

Most of the sediments were cemented in several stages. The cementation often began in the vadose zone. Although quantitative not important, this vadose cement often controlled the shape of cementation bodies and acted as nuclei for the subsequent cementation in the phreatic zone. The shape of the cemented bodies was often determined by the flow regime of the water – not only flow direction and velocity but also the type of flow (e.g., laminar or turbulent). Whereas cementation in low permeability sediments is controlled by the properties of the parent material, in highly permeable sediments it often reflects the paleo-flow regime and groundwater level, making it possible to identify, for example, areas of formerly perched groundwater. There were also indications that cementation occurred below and in front of the Scandinavian ice sheet as well as in an area of discontinuous permafrost. Climate changes and the associated changes in groundwater recharge were the only factors observed on a regional scale controlling the calcareous cementation of Pleistocene sediments in northwest Germany.

The cemented sediments were almost all within Elsterian to Saalian deposits. The time of cementation was indicated only by the local geology and paleo-hydrogeology. The results of this study show that most of the cementation occurred during the Eemian interglacial.

1 EINFÜHRUNG

1.1 Einleitung

Die Bildung von Zement im Porenraum von Sedimenten gehört zu den fundamentalen Prozessen in der Diagenese. Die Zementation betroffener Schichten kann vollständig sein oder fleckhaft verteilt bzw. in Form von Konkretionen punktuell auftreten. Die Abgrenzung dieser Zementationsformen ist unscharf: So konnten BJØRKUM & WALDERHAUG (1993) mit Hilfe von Isotopenuntersuchungen nachweisen, dass eine heute einheitliche Zementation von Sandsteinschichten des unteren Jura von Konkretionen ausgegangen ist. Zu den häufigsten Zementtypen in Sandsteinen gehört Kalzit (TUCKER 1985).

Zementation durch Karbonat ist vor allem für die Kohlenwasserstoff-Exploration von großem Interesse, da Zeitpunkt und Ausmaß der Plombierung des Porenraumes durch Zement entscheidenden Einfluss auf die Migrations- und Speichereigenschaften potentieller Reservoirgesteine haben (z.B. BJØRKUM & WALDERHAUG 1990, COLEMAN & RAISWELL 1993). In mineralischen Rohstoffen kann sich karbonatische Zementation nachteilig auf die wirtschaftliche Nutzbarkeit auswirken. Als Beispiele seien hier Karbonatkonkretionen in Ton /-steinvorkommen genannt, die oft aufwendig von benötigtem Rohstoff getrennt werden müssen, um ihn technisch verwerten zu können (LIPPMANN 1955). Ähnliche Probleme können in Sand- und Kieslagerstätten den Abbau erheblich behindern (EHLERS 1987, JERZ 1993, WERNER 2000).

1.2 Aufgabenstellung

Das Phänomen der Karbonatzementation von pleistozänen Lockersedimenten wurde in NW-Deutschland vor allem im Rahmen der geologischen Landesaufnahme häufig beobachtet (z.B. NAUMANN 1927a, MEYER, K.-D. 1982, JORDAN 1994). Gelegentlich wurden entsprechende Vorkommen auch in anderen Publikationen genannt, die sich jedoch schwerpunktmäßig mit Genese und Bildungsalter der Wirtsgesteine befassen (z.B. LÜTTIG 1954, VALETON & KHOO 1980). So erklärt sich, dass die gemachten Versuche, Genesemodelle zu entwickeln bzw. Bildungszeiten zu rekonstruieren, meist keine schlüssigen Ergebnisse lieferten. Da sich die genannten Arbeiten jeweils mit einzelnen Zementationen beschäftigten, blieb die Vielfalt dieser in pleistozänen Lockersedimenten vorkommenden Bildungen hinsichtlich ihrer Verbreitung, der mikroskopischen (z.B. Karbonatzement) bzw. makroskopischen Beschaf-

fenheit (z.B. Form, Größe) bisher weitgehend unberücksichtigt.

Die erste Untersuchung, die sich speziell mit der Erforschung von Karbonatzementation pleistozäner Lockersedimente in NW-Deutschland beschäftigte, wurde von PERSCHKE (1993) durchgeführt. Er beschrieb einige Vorkommen und entwickelte Ansätze, Genese und Bildungszeit zu rekonstruieren.

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, frühdiagenetische Karbonatzementationen in pleistozänen Lockersedimenten NW-Deutschlands zu untersuchen. Von zentraler Bedeutung sind dabei Prozesse, die zu ihrer Bildung geführt haben und die trotz einiger Ansätze bislang nur unzureichend verstanden werden. Dazu werden für die Betrachtung diagenetischer und regionaler Aspekte drei Schwerpunkte mit folgenden Teilaufgaben gesetzt:

1. **Schwerpunkt regionale Verteilung:**

- Aussagen zur Verbreitung von karbonatischer Zementation in pleistozänen Lockersedimenten NW-Deutschlands,
- detaillierte Untersuchung einer regional verteilten, repräsentativen Auswahl von Karbonatzementationen, um über die Definition von lokalen Bildungsphasen Aussagen zu möglicherweise überregional relevanten Diagenesephasen treffen zu können,
- Kombination einzelner paläohydrogeologischer Szenarien zu einem paläohydrogeologischen Gesamtkonzept.

2. **Schwerpunkt Frühdiagenese:**

- Detaillierte Dokumentation von Einzelvorkommen zur Bestimmung lokaler Zementationsphasen,
- Eingrenzung der zur Karbonatzementation notwendigen Bildungsbedingungen,
- Rekonstruktion lokaler paläohydrogeologischer und -geochemischer Milieus,
- Aussagen zur Wiederan- bzw. -auflösung zementierter Strukturen.

3. **Schwerpunkt Bildungszeit:**

- Aussagen zu möglichen Entstehungszeiträumen. Im Gegensatz zur Arbeit PERSCHKES (1993) wurden die Untersuchungen einerseits regional auf den Bereich NW-Deutschlands beschränkt, andererseits wurde die Anzahl untersuchter Vorkommen und der je Aufschluss eingesetzte Untersuchungsumfang methodisch und quantitativ erheblich erweitert. Einige der Vorkommen, die schon PERSCHKE (1993) untersuchte, wurden neu bearbeitet. Zusätzlich wurden weitere Vorkommen untersucht, so dass

Durchmesser von 200 mm verwendet. Die jeweilige Probemenge wurde nach DIN 18123 in Abhängigkeit des in einer Probe enthaltenen Größtkorns bemessen. Die Proben wurden bei 105°C getrocknet um Gewichtskonstanz zu erreichen und nach dem Abkühlen gewogen. Das so vorbereitete Material wurde mit dem oben beschriebenen Siebsatz in einer Laborsiebmaschine der Fa. Retsch des Typs 3D gesiebt. Die Siebung dauerte je Probe ca. 15 Minuten bei mittlerer Rüttelfrequenz (70 - 80 Skaleneinheiten). Anschließend wurden die einzelnen Fraktionen gewogen, wobei die Probe bei einer Differenz von mehr als 1 Gew.-% zwischen Eingangssprobe und der Summe der Korngrößenfraktionen verworfen und die Messung an einer neuen Probe wiederholt wurde. Siebanalysen wurden ausschließlich an nichtbindigem Sediment mit weniger als 10 % Ton und Schluff als Trockensiebung durchgeführt. Die Kornsummenlinie wurde mit dem EDV-Programm VAS-Unikorn (Version 1.13) der Fa. BEGUMA dargestellt.

Bei Sedimenten, für die eine Korngrößenbestimmung im Labor nicht möglich war, erfolgte die Angabe der Korngröße nach Geländeansprache.

2.4 Durchlässigkeitsbestimmung

Die Bestimmung der Gesteinsdurchlässigkeit erfolgte an 62 Proben durch Berechnung aus Kornsummenkurven und an 6 Proben an Hand von Durchflussmessungen. Bei der Berechnung aus Kornsummenkurven wurde ein Berechnungsverfahren verwendet, das BEYER (1964) für natürliche Ablagerungen entwickelte, die mit den hier untersuchten Lockersedimenten in Zusammensetzung, Lagerungsdichte und hydraulischem Verhalten vergleichbar sind. BEYER (1964) gab folgende Gültigkeitsgrenzen seines Berechnungsverfahrens an: Sofern der d_{10} -Wert kleiner als 0,06 mm oder größer als 0,6 mm oder die Ungleichförmigkeit U kleiner als 1,0 oder größer als 20 ist, kann die Durchlässigkeit nicht aus der Sieblinie ermittelt werden. Die Durchlässigkeitswerte wurden mit dem EDV-Programm VAS-Unikorn (Version 1.13) der Fa. BEGUMA berechnet.

Bei Proben, deren d_{10} -Wert kleiner als 0,06 mm ist, wurden Durchlässigkeitsbeiwerte mit Hilfe von Durchflussmessungen bestimmt. Dazu wurden möglichst ungestörte Proben in einer Durchflussmessapparatur des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung, Außenstelle Bremen (BTI), unter instationären Bedingungen untersucht. Versuchsanordnung und -durchführung werden bei HARTGE & HORN (1992: 116) besprochen.

Alle weiteren Angaben zur Gebirgsdurchlässigkeit beruhen auf Vergleichs- (MADSEN 1995) und

Erfahrungswerten und sind in der Sedimentbeschreibung entsprechend gekennzeichnet.

2.5 Bestimmung Gesamtkarbonatgehalt

Der Gesamtkarbonatgehalt (GKG) wurde an 217 Proben mit einem Verfahren bestimmt, das im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (NLfB) entwickelt worden ist und dort seit 1993 im Routineeinsatz betrieben wird (KLOSA 1994). Der bei einer Säure-Karbonat-Reaktion entstehende Gasdruck wird dabei durch Drucksensoren gemessen und mit Hilfe von Analog/Digitalwandlern von einem Messwertrechner aufgezeichnet. Der Messfehler beträgt ± 1 Gew.-% bei einem Enddruck von 100 mbar (KLOSA 1994). Die Gesamtmessdauer betrug bei einem Messintervall von 3 Sekunden jeweils 20 Minuten. Zur Eichung der Messapparatur wurde reines Kalziumkarbonat (MERCKT: „Calciumkarbonat gefällt zur Analyse“) als Prüfsubstanz verwendet und statt einer Gesteinsprobe entsprechend dem beschriebenen Verfahren vorbehandelt und gemessen. Dazu wurden an 22 Proben mit einer „Karbonat-Bombe“ (MÜLLER & GASTNER 1971) Kontrolluntersuchungen durchgeführt. Die Abweichung von den mit o.g. Verfahren ermittelten Werten betrug max. $\pm 2,5$ %, lag aber meist deutlich darunter.

2.6 Röntgendiffraktometrie

Röntgendiffraktometrische Untersuchungen wurden mit Hilfe eines Phillips-Röntgendiffraktometers PW 1830 mit Cu- α -Röntgenröhre (Röntgenstrom 20 mA, Röhrenspannung 40 kV) und Ni-Filter durchgeführt. Die in einem Achatmörser analysefein gemahlene Proben wurden jeweils im Bereich von 3 - 60° mit einer Geschwindigkeit von 1°/min untersucht. Es wurden 5 Konkretionen analysiert, deren porzellanartige, seifige Beschaffenheit auffällig war. Um ggf. wasserhaltige Karbonate nachzuweisen, wurden die Proben nach einem von TIETZ (1988) vorgeschlagenen Verfahren, erst unbehandelt geröntgt, dann 12 Stunden auf 140°C erhitzt und anschließend wieder geröntgt. Allerdings wurden neben Kalzit weder wasserhaltige (z.B. Monohydrokalzit) noch andere Karbonate (z.B. Aragonit) gefunden.

2.7 Mikroskopie

2.7.1 Karbonatanfärbung

Zur Unterscheidung von Kalzit- und Dolomitdetritus sowie der qualitativen Bestimmung von Kalzit und eisenführendem Kalzit wurden insgesamt 243 Dünnschliffe halbseitig angefärbt. Dabei wurden die von EVAMY & SHEARMAN (1962) und DICKSON (1966) entwickelten und von FÜCHTBAUER & RICHTER (1988) modifizierten

Färbeverfahren verwendet. Kalzit reagiert durch Rotfärbung, Dolomit bleibt farblos und Fe-haltiger Kalzit wird blauviolett bis blau gefärbt. Auf den stets wiederkehrenden Hinweis, dass in keinem Dünnschliff Fe-haltiger Kalzit- oder Dolomitement nachgewiesen wurde, wird bei der Beschreibung der untersuchten Aufschlüsse verzichtet.

2.7.2 Polarisations- und Fluoreszenzmikroskopie

Polarisations- und fluoreszenzmikroskopische Untersuchungen wurden mit einem Leitz Labrolux Pol 12-Mikroskop, bei letzteren zusätzlich mit einem 3-λ PLOEMOPAK und einem Lampenhaus 102Z mit einer 50W Hg-Höchstdrucklampe zur Blaulichtanregung, standardmäßig durchgeführt. Es wurden orientierte, nicht abgedeckte Dünnschliffe verwendet. Die Durchführung der Fluoreszenzmikroskopie orientierte sich an den Angaben von DRAVIS & YUREWICZ (1985) bzw. KLOTZ (1988).

2.7.3 Kathodolumineszenzmikroskopie

Das Kathodolumineszenzverhalten der Karbonatzemente wurden an 103 polierten und mit Kohlenstoff bedampften Dünnschliffen in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) mit einer Glühkathode untersucht. Dabei wurde eine Kathodenanlage der Fa. Simon Neuser eingesetzt, wobei die Anregungsspannung 14keV, der Strahlstrom 0,2 mA mit Schwankungen zwischen 0,18-0,24 mA und der Druck weniger als 10⁻³ mbar betrug. Ausführliche Angaben zur Methodik der Kathodolumineszenzmikroskopie sind NEUSER (1988) zu entnehmen.

2.7.4 Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX)

An 18 Proben wurden Untersuchungen mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) des NLFb/BGR (Hannover) vom Typ 5.25 M der Fa. Phillips durchgeführt. Die Untersuchung fand an etwa 1 cm³ großen, mit Gold bedampften (Bedampfungsdauer ca. 2,5 min.) Gesteinsstücken mit rauen Bruchflächen statt. Die REM-Anlage von NLFb/BGR ist zusätzlich mit einem EDX-System (Energiedispersive Röntgenanalyse) des Typs EDAX-DX-Detektor ausgestattet, das halbquantitative Elementanalysen ermöglicht. Die Kathodenspannung bei den Untersuchungen betrug i.d.R. 20 kV, der Durchmesser des Elektronenstrahls war 200 nm bei einer Auflösung des DX-40-Detectors von 129 eV. Bei einigen Untersuchungen wurde die Kathodenspannung auf 10 kV bei einem Elektronenstrahldurchmesser von 100 nm reduziert.

2.7.5 Elektronenstrahl-Mikrosonde (EMS) mit wellendispersiver Röntgenanalyse (WDS)

Die quantitative chemische Analyse der Karbonatzemente wurde mit der Elektronenstrahl-Mikrosonde mit WDS durchgeführt. Dabei wurden an polierten und mit Kohlenstoff bedampften Dünnschliffen Ca-, Mg-, Fe-, Mn-, Sr- und Si-Gehalte untersucht. Die Messungen wurden an 7 Proben an der TU Berlin und an 29 Proben am Mineralogischen Institut der Universität Hannover durchgeführt. In beiden Laboren erfolgte die Messung an einer CAMECA CAMEBAX-MICROBEAM-Mikrosonde mit folgenden Geräteparametern:

- Strahlstrom 5 - 22 nA,
- Beschleunigungsspannung 20 keV (Berlin) bzw. 15 keV (Hannover),
- Elementnachweisgrenze 300 ppm.
- Die Messdauer betrug bei Ca und Si 10 Sekunden, bei Mg, Fe und Mn 20 Sekunden und bei Sr 30 Sekunden.

Die Eichung der Messungen wurde mit Hilfe natürlicher Standards mit bekannter Zusammensetzung (Tab. 2) zu Beginn jedes Messtages durchgeführt. Eine Kalibrierung erfolgte zusätzlich nach jedem Probenwechsel. Die Elementkonzentrationen wurden in Gew.-% der Elemente in Oxidform ermittelt. Da ausschließlich Karbonate gemessen wurden, wurden die ermittelten Werte in Gew.-% CaCO₃ bzw. Mol-% CaCO₃ umgerechnet. Detaillierte Angaben zu Methodik und Umrechnungsverfahren werden z.B. in PAVECEVIC & AMTHAUER (2000) beschrieben.

Tab. 2: Zur Eichung der Elementmessungen verwendete natürliche Standards.

Element	Standard
Ca	Kalzit
Mg	Olivin, Dolomit
Sr	Strontianit
Fe	elementares Eisen
Mn	elementares Mangan
Si	Wollastonit

Si wurde als Indikatorelement verwendet, um die unerwünschte Erfassung von Tonmineralkontaminationen oder anderem siliziklastischen Detritus nachweisen zu können, was trotz des kleinen Messbereiches von wenigen µm vor allem bei Messungen sehr kleiner Zementkristalle oft vorkam. Um Verfälschungen bei der Berechnung der Karbonate zu vermeiden, wurden Analysen mit einem Si-Gehalt von > 0,5 Gew.-% verworfen. Daneben kann bei Karbonaten der Elektronenbeschuß durch die Mikrosonde zur Verdampfung leicht flüchtiger Bestandteile führen (z.B. CO₂), was sich in niedrigen Elementsummen ausdrückt. Da dieses Phänomen die Messwertqualität beeinträchtigt, wurden

Messungen mit einer Elementsumme von weniger 96 Gew.-% Karbonat nicht verwendet. Dazu kann eine zu große Eindringtiefe des Elektronenstrahls zu einem „Durchbrennen“ der Probe führen. Die mit diesem Vorgang einhergehenden Prozesse führen zu Elementsummen von deutlich über 100 Gew.-% Karbonat und ebenfalls nicht verlässlichen Messwerten, so dass nur Werte < 103 Gew.-% verwendet wurden. Da die genannten Phänomene vor allem bei kleinen und/oder stark verunreinigten Zementkristallen auftreten, die in den untersuchten Proben häufig sind, konnten von den knapp 1000 akquirierten Messwerten nur 648 verwendet werden (Anl. VII).

3 KARBONATZEMENTATION PLEISTOZÄNER LOCKERSEDIMENTE NW- DEUTSCHLANDS

3.1 Verbreitung

3.1.1 Dokumentationsstand

Um Aussagen zur Verbreitung karbonatischer Zementation in pleistozänen Lockersedimenten NW-Deutschlands zu machen, wurden im Rahmen einer Literaturstudie folgende Unterlagen gesichtet:

- Erläuterungshefte zur Geologischen Karte 1:25.000 Niedersachsen / Bremen (ca. 250 Stück),
- Erläuterungshefte zur Geologischen Karte 1:25.000 Hamburg und Umgebung (10 Stück),
- Erläuterungshefte zur Geologischen Karte 1:25.000 Schleswig-Holstein (23 Stück für 34 Kartenblätter),
- Berichte zur Übersichtskartierung 1:200.000 von Niedersachsen / Bremen (8 Stück),
- Erläuterungshefte zur Geologischen Karte 1:25.000 von unmittelbar anschließenden Gebieten der Bundesländer Nordrhein Westfalen, Hessen, Thüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern (ca. 60 Stück),
- sonstige quartärgeologische Literatur mit regionalem Bezug.

Die Dokumentation mit Zitaten erfolgt nur für die Quellen, in denen karbonatische Zementationen genannt werden. Ergänzend zu der Literaturstudie wurden Mitarbeiter der Staatlich Geologischen Dienste (SGD) Niedersachsen / Bremen, Hamburg und Schleswig-Holstein sowie von lagerstättenkundlich und hydrogeologisch tätigen Büros befragt. Außerdem wurden Recherchen bei vor allem geschiebekundlich interessierten Privatpersonen durchgeführt und durch eine Suchanfrage

in der Zeitschrift „Geschiebekunde Aktuell“ (1996, 12. Jahrgang, Heft 3) ergänzt.

3.1.2 Verbreitung karbonatischer Zementation

Als Ergebnis dieser Recherchen konnten in Verbindung mit eigenen Befunden insgesamt 80 Vorkommen karbonatischer Zementation in pleistozänen Lockersedimenten in NW-Deutschland lokalisiert werden (Abb. 1), die ergänzend in Anhang III jeweils kurz aufgeführt und beschrieben werden. Dabei lagen einige

Zementationsvorkommen so dicht beieinander, dass sie auf der Übersichtskarte (Abb. 1) zusammengefasst wurden. Die Aufzählung von Zementationsvorkommen ist mit den genannten 80 Vorkommen sicherlich nicht vollständig.

Zur Identifizierung von Verbreitungsmustern oder Gesetzmäßigkeiten, die Rückschlüsse auf mögliche gemeinsame Bildungsbedingungen zulassen, können folgende Aspekte herangezogen werden:

- a. die regionale Verbreitung,
- b. die Höhe, d.h. die Position im Bezug zu NN,
- c. die Lithologie der Lockersedimente und
- d. das Alter der Lockersedimente.

Die für Interpretationsansätze eigentlich naheliegende Verwendung von Angaben zu den Zementationen selber läßt die Qualität der Beschreibungen i.d.R. nicht zu.

a. Die Vielzahl der lokalisierten Zementationsvorkommen weist in Zusammenhang mit der weiten Verbreitung in NW-Deutschland darauf hin, dass es sich bei karbonatischer Zementation um einen ubiquitären Prozeß handelt. Es ist damit zu rechnen, dass weniger markante Zementationsstrukturen bei der im Rahmen der geologischen Landesaufnahme notwendigen Generalisierung von lithologischen Einheiten nicht dokumentiert wurden. Dies wird besonders in Berichten deutlich, in denen Zementationen nicht in der lithologischen Beschreibung sondern z.B. im lagerstättenkundlichen Teil im Zusammenhang mit für die Aufbereitung störenden Eigenschaften erwähnt wurden (z.B. GAGEL 1915). Außerdem fällt bei der Verteilung der lokalisierten Vorkommen auf, dass es einerseits Gebiete gibt, in denen Zementationen gar nicht dokumentiert sind und andererseits solche, in denen sie sehr häufig beschrieben werden. Die Gebiete, in denen karbonatische Zementation selten bis nicht dokumentiert ist (Ems-Hunte-Weser-Geest, Stader Geest, Verdener-Geest, Hannoversches Emsland), sind identisch mit solchen, in denen der geologische Dokumentationsstand insgesamt schlecht ist. Außerdem sind Gebiete, in denen karbonatische

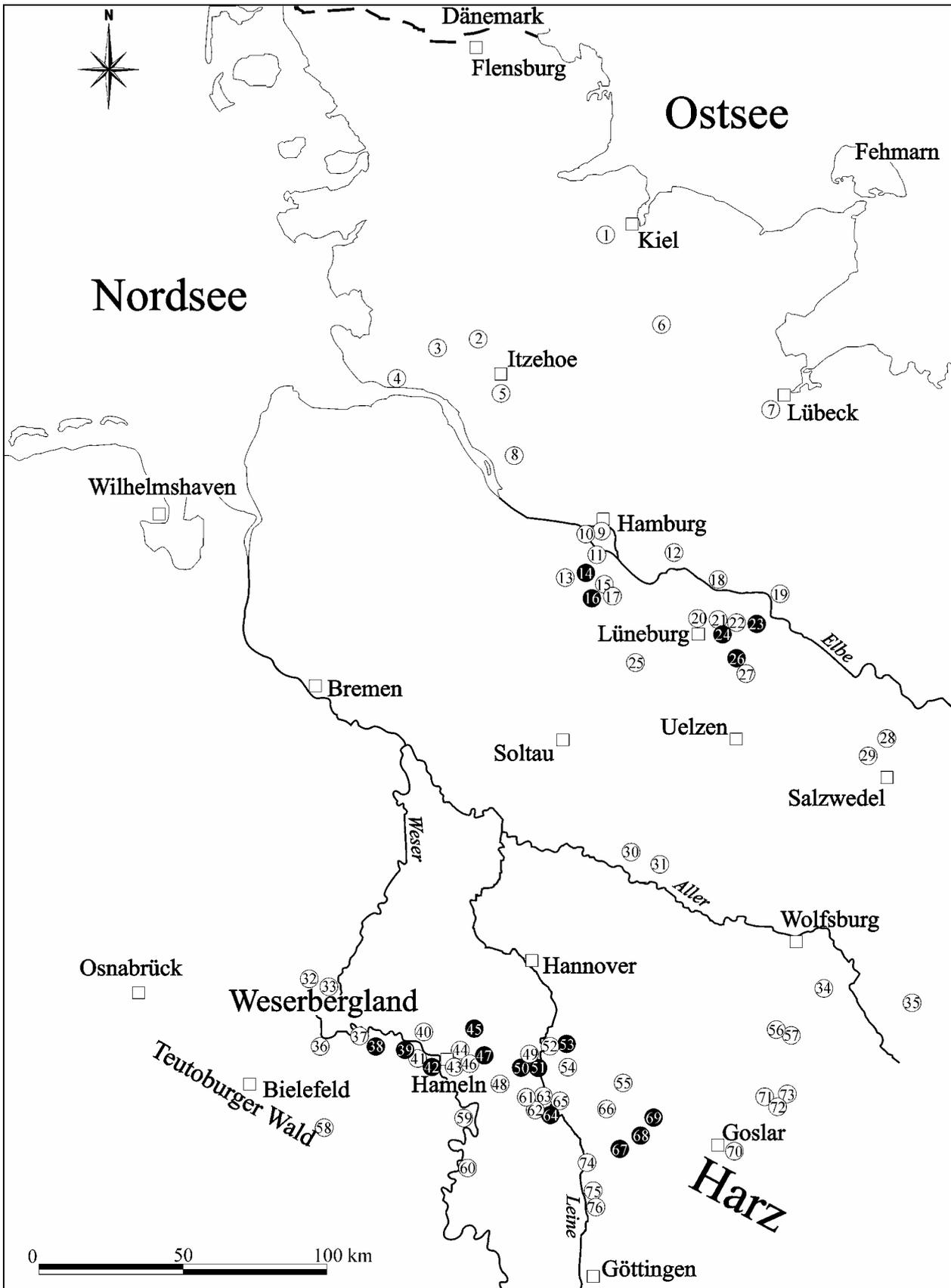


Abb. 1a: Übersichtskarte der erfassten Karbonatzementationsvorkommen in NW-Deutschland: Darstellung lokalisierter Vorkommen. Weiße Zahlen auf schwarzem Grund benennen die untersuchten Vorkommen.

Legende:

- | | |
|--|---|
| ① Sandgrube bei Schönwohld (schriftl. Mitt. STEPHAN 2000) | ④⑩ Steinbruch am Riesenberg (eigener Befund) |
| ② Bohrung/Tongrube bei Wacken (schriftl. Mitt. STEPHAN 2000) | ④① ehem. Kiesgrube bei Haverbeck (NAUMANN 1927) |
| ③ ehem. Tongrube Burg/Dithmarschen (NEUMANN 1933) | ④② Sand-/Kiesgrube bei Helpensen (NAUMANN 1927) |
| ④ Klifftrand bei Eddelak (NEUMANN 1933) | ④③ ehem. Sandgrube bei Hameln (NAUMANN & BURRE 1927) |
| ⑤ Dägeling (schriftl. Mitt. STEPHAN 2000) | ④④ Bahnanschnitt bei Rohrsen (NAUMANN & BURRE 1927) |
| ⑥ Paulsruh östlich Tarbek (schriftl. Mitt. STEPHAN 2000) | ④⑤ Sand-/Kiesgrube bei Bad Münder/Hachmühlen (eigener Befund) |
| ⑦ ehem. Tongruben im Bereich Lübeck (GAGEL 1915) | ④⑥ ehem. Sandgrube bei Hameln (NAUMANN & BURRE 1927) |
| ⑧ Bohrung bei Elmshorn (schriftl. Mitt. STEPHAN 2000) | ④⑦ Sand-/Kiesgruben bei Coppenbrügge (LÜTTIG 1954) |
| ⑨ Hamburg, Elbchausee 189 (WILKE 1981) | ④⑧ Straßenböschung bei Levedagsen (HERRMANN 1968) |
| ⑩ Sandgrube am Buchholzer Dreieck (mündl. Mitt. RABE 1999) | ④⑨ Aufschluß bei Elze (LÜTTIG 1954) |
| ⑪ Sandgrube bei Lürade (EHLERS 1987) | ⑤⑩ ehem. Kiesgrube bei Eime (eigener Befund) |
| ⑫ Aufschluß bei Börnsen (NEUMANN 1933) | ⑤① ehem. Kiesgrube bei Banteln (eigener Befund) |
| ⑬ Kiesgrube bei Grauen (MEYER 1982) | ⑤② Sand-/Kiesgrube bei Burgstemmen (PERSCHKE 1993) |
| ⑭ Sandgrube bei Daerstorf (mündl. Mitt. MEYER 1999) | ⑤③ ehem. Kiesgrube bei Betheln (eigener Befund) |
| ⑮ ehem. Sandgrube bei Eddelsen (KOERT et al. 1910) | ⑤④ ehem. Kiesgrube bei Eitzum (LÜTTIG 1954) |
| ⑯ Sand-/Kiesgruben bei Hittfeld (mündl. Mitt. MEYER 1997) | ⑤⑤ ehem. Kiesgrube bei Werder (LÜTTIG 1954) |
| ⑰ Sand-/Kiesgruben bei Helmstorf (mündl. Mitt. MEYER 1997) | ⑤⑥ ehem. Kiesgrube bei Eitzum (WOLDSTEDT & HARBORT 1931) |
| ⑱ Aufschluß bei Artlenburg (NEUMANN 1933) | ⑤⑦ ehem. Kiesgrube bei Kneitlingen (WOLDSTEDT & HARBORT 1931) |
| ⑲ ehem. Sandgrube bei Boizenburg (NEUMANN 1933) | ⑤⑧ ehem. Kiesgrube bei Hiddesen (PERSCHKE 1993) |
| ⑳ chem. Sandgrube bei Adendorf (MÜLLER & KEILHACK 1922) | ⑤⑨ ehem. Kiesgrube bei Hohe (GRUBE 1929a) |
| ㉑ Aufschluß bei Rullstorf (mündl. Mitt. LAGING 1999) | ⑥⑩ Aufschlüsse in Holzminden (u.a. PERSCHKE 1993) |
| ㉒ ehem. Sandgrube bei Neetze (mündl. Mitt. LAGING 1999) | ⑥① Steinbruch bei Brunkensen (LÜTTIG 1954) |
| ㉓ Sandgruben bei Breetze (mündl. Mitt. MEYER 1997) | ⑥② Aufschlüsse bei Imsen (LÜTTIG 1954, HARMS 1984) |
| ㉔ ehem. Sandgrube bei Holzen (MEYER 1983a) | ⑥③ Böschungen zwischen Alfeld und Limmer (JORDAN 1994) |
| ㉕ ehem. Sandgrube an der A7 (mündl. Mitt. BATHOLOMÄUS 1996) | ⑥④ Sandgruben bei Freden (PERSCHKE 1993) |
| ㉖ Sand-/Kiesgrube bei Volkstorf (mündl. Mitt. LAGING 1998) | ⑥⑤ Böschung bei Dehnsen (PERSCHKE 1993) |
| ㉗ Sandgruben bei Vasdorf (GAUGER 1978a) | ⑥⑥ ehem. Sandgrube bei Lamspringe (LÜTTIG 1954) |
| ㉘ Bohrung bei der Woltersdorfer Kirche (eigener Befund) | ⑥⑦ Kiesgrube bei Engelade (LÜTTIG 1954) |
| ㉙ Sandgrube bei Lübbow (GAUGER 1978b) | ⑥⑧ Sandgrube bei Bornhausen (PERSCHKE 1993) |
| ㉚ Bohrung bei Garßen (HARBORT et al. 1916) | ⑥⑨ Sandgrube bei Ödishausen (PERSCHKE 1993) |
| ㉛ Bohrung bei Beedenbostel (HARBORT & STOLLER 1916) | ⑦⑩ Aufschluß bei Oker (BODE & SCHROEDER 1926) |
| ㉜ Bohrung (WORTMANN 1971) | ⑦① Steinbruch bei Osterode (SCHROEDER 1919) |
| ㉝ Bohrung (WORTMANN 1968) | ⑦② Kiesgrube am Schmalenberg (BEHREND 1927) |
| ㉞ Sandgrube bei Rennau (mündl. Mitt. JORDAN 1996) | ⑦③ Aufschluß am Schmalenberg (SCHROEDER 1919) |
| ㉟ Aufschlüsse um Druxberg (KOERT 1927) | ⑦④ ehem. Kiesgrube bei Orxhausen (JORDAN 1993) |
| ㊱ Steinbruch bei Vlotho (eigener Befund) | ⑦⑤ Böschung bei Hohnstedt (JORDAN & SCHWARTAU 1993) |
| ㊲ Sand-/Kiesgrube bei Möllenbeck (eigener Befund) | ⑦⑥ Kiesgrube bei Northeim (mündl. Mitt. JORDAN 1996) |
| ㊳ Sandgrube bei Krankenhagen (eigener Befund) | |
| ㊴ ehem. Sandgrube bei Rumbeck (PERSCHKE 1993) | |

Abb. 1b: Legende mit Nennung der Quellen zur Darstellung lokalisierter Vorkommen. Weiße Zahlen auf schwarzem Grund zeigen die in dieser Arbeit untersuchten Vorkommen.

Zementation häufig beschrieben wird (Lüneburger Heide zwischen Hamburg im NW und Uelzen im SE, Niedersächsische Bergland zwischen Teutoburger Wald und Harz), geologisch gut untersucht. Damit bieten die hier dokumentierten Vorkommen keine ausreichende Basis für die Interpretation von Verbreitungsmustern.

b. Die Auswertung der Geländehöhen der 80 in NW-Deutschland lokalisierten Zementationsvorkommen ergab ebenfalls keine weiterführenden Hinweise. Die Höhenlage der zementierten Schichten streut ohne signifikanten Schwerpunkt von etwa NN bis über 300 ü.NN.

c. Aus der Lithologie der Lockersedimente lassen sich ebenfalls keine Interpretationsansätze ableiten. Karbonatische Fällungsprodukte, die zur Zementation von Lockersedimenten führen, kommen in nahezu allen Typen quartärzeitlich entstandener Sedimente NW-Deutschlands vor. Zementationskörper treten dabei häufig in Schmelzwasser- und fluviatilen Ablagerungen (Schluff, Sand, Kies), aber auch in glazilimnischen Sedimenten (Ton, Schluff) und in Geschiebemergel auf.

d. Für den überwiegenden Teil der Lockersedimente, in denen karbonatische Zementationen auftreten, liegen Alterseinstufungen vor: Es handelt sich meist um Saale-zeitliche, glazigene Ablagerungen sowohl des Drenthe- als auch des Warthe-Stadiums, seltener um Mittelterrassen-, Oberterrassen- oder Elster-zeitliche Sedimente. In Weichsel-zeitlichen Ablagerungen gibt es nur 1 Vorkommen. Dazu kommen 19 Vorkommen, bei denen die Alterseinstufung für die Lockersedimente unpräzise ist, d.h. es wird nur mitgeteilt, dass es sich um „pleistozäne Ablagerungen“ handelt. Die Zementationskörper kommen in präglazialen oder glazigenen Sedimenten vor, die sich südlich der Maximalausdehnung des Weichsel-zeitlichen Inlandgletschers befinden (z.B. Abb. 1, Nr. 30), so dass sich mit einiger Sicherheit annehmen lässt, dass sie Saale-zeitlich oder älter sind. Da diese Verteilung einen engen Zusammenhang mit der oberflächennahen Verbreitung entsprechender Sedimente im Untersuchungsgebiet bzw. deren Dokumentationsstand zeigt, lassen sich auch aus diesen Befunden keine Gesetzmäßigkeiten ableiten.

Tab. 3: Bereiche des nordeuropäischen Vereisungsgebietes mit nachgewiesenen Vorkommen karbonatischer Zementation pleistozäner Lockersedimente.

Bereich	Quelle
Mecklenburg-Vorp.	schriftl. Mitt. Dr. W. SCHULZ, Schwerin (1996)
Brandenburg	FOERSTER (1906/07), schriftl. Mitt. Dr. W. SCHULZ (1996), eigener Befund (1998)
Sachsen-Anhalt	eigener Befund (1999), mündl. Mitt. WEYMANN (1999), mündl. Mitt. MEYER (2000)
Thüringen	PERSCHKE (1993), schriftl. Mitt. Dr. W. SCHULZ, Schwerin (1996), STEINER (1996)
Nordrhein Westfalen	PERSCHKE (1993), KLOSTERMANN (1995)
Polen	PERSCHKE (1993)
Tschechei	GÁBA & PEK (1992)
Rußland	DANILOV & SUZDAL'SKII (1975)
Dänemark	NORDMANN (1941), mündl. Mitt. MEYER (1999, 2000)
Norwegen	THEAKSTONE (1981)
Schweden	KERS (1964), SAMUELSSON (1964)
Finnland	SALMI (1959)
Großbritannien	STRONG et al. (1992)
Niederlande	KOK (1973), GONGGRIP (1999)

Bei den Recherchen wurden darüber hinaus - ohne systematische Suche - immer wieder Hinweise auf Zementationsvorkommen in pleistozänen Sedimenten außerhalb des Untersuchungsgebietes gefunden. Dies sind zum einen Beispiele aus West- (z.B. HOSELMANN 1994, BERK et al. 1995) und Süddeutschland (z.B. KLEIN 1940, WEIDENBACH 1974, WERNER 2000), wo die karbonatische Zementation vor allem fluviatiler Sedimente des Pleistozäns offenkundig weitverbreitet ist. Zum anderen sind auch zahlreiche Beispiele von Zementationen in glazigenen und fluviatilen

Ablagerungen im über NW-Deutschland hinausgehenden nordeuropäischen Vereisungsgebiet dokumentiert (Tab. 3). Dieser Bereich hatte während des Quartärs eine geologische und klimatische Entwicklung, die mit der im Untersuchungsgebiet vergleichbar ist. Damit läßt auch dort vorkommende karbonatische Zementation vermuten, dass die für NW-Deutschland festgestellte weite Verbreitung auch für das übrige nordeuropäische Vereisungsgebiet zutrifft.

Die zusammenfassende Bewertung o.g. Befunde zeigt, dass karbonatische Zementation in quartären Lockersedimenten Ergebnis weitverbreiteter Prozesse ist. Hieraus ergibt sich ein direkter Widerspruch zu Aussagen, wonach diagenetische Prozesse, die zu Karbonatzementation im meteorischen Milieu führen, als quantitativ unbedeutend anzusehen seien (z.B. TUCKER 1996). Die geringe Verbreitung in fossilen Sandsteinen, auf der ein entsprechender Eindruck vermutlich basiert, ist wohl auf die geringe Erhaltungsfähigkeit solcher Bildungen im eher von Abtragung als von Akkumulation (und damit Konservierung) gekennzeichneten kontinentalem Milieu und auf spätere diagenetische Überprägung entsprechender Strukturen zurückzuführen.

4 ZEMENTATIONSKÖRPER

4.1 Typbeschreibung und -definition

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Begriffen, die für Zementationskörper verwendet werden. Im Zusammenhang mit karbonatisch zementierten pleistozänen Lockersedimenten wurden z.B. relativ unspezifisch die Begriffe „Naturbeton“ oder „Nagelfluh“ für großvolumige zementierte Bereiche verwendet (z.B. LÜTTIG 1954). Mit „Nagelfluh“ - ursprünglich eingeführt für karbonatisch zementierte, alpine Molasse und in diesem Sinn auch häufig verwendet (z.B. FÜCHTBAUER 1988, HANTKE 1989) - wurden bisweilen auch ganz allgemein karbonatisch zementierte, känozoische Sedimente (einschließlich pleistozäner Schotter) bezeichnet (FEZER 1969, HINZE et al. 1989, SCHREINER 1992, JERZ 1993). Außerdem wurden für zementierte Bereiche mit sehr großen Volumina auch die Bezeichnungen „Schollenstein“ oder „Schollengesteine“ verwendet, wobei sich die Einschätzung REICHELMS (1908), dieser Name sei „...doch so bezeichnend, dass ihn die Erd- und Landeskundigen für alle Zeiten beibehalten werden...“ nicht bestätigt hat. Karbonatkonkretionen wurden auch als „Imatrasteine“ - nach einer Ortschaft in Finnland - (WERMBTER 1891, SALMI 1959, PERSCHKE 1993) oder als „Geoden“ (z.B. NAUMANN 1927a, b, LIPPMANN 1955) bezeichnet.

In dieser Arbeit werden Zementationskörper auf Grund der äußeren Gestalt in zwei Gruppen eingeteilt:

- Zum einen kommen **Konkretionen** mit klar definierbarer äußerer Form und scharfer Begrenzung gegenüber dem umgebenden, nicht zementierten Sediment vor. Dabei stößt Porenraum, in dem sich Karbonatzement gebildet hat, meist unvermittelt auf offenen Porenraum, der frei von Karbonatzement ist (Abb. 2a). Benach-

barte Konkretionen können zu Gruppen zusammenwachsen.

- Zum anderen gibt es massige, unregelmäßig zementierte Partien (**Massenzementationskörper**) ohne klar definierbare äußere Gestalt und mit eher diffusem Übergang in unzementiertes Lockersediment (Abb. 2b).

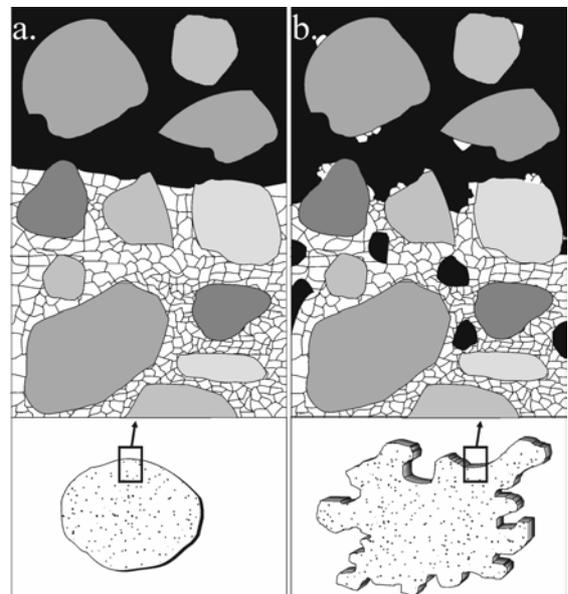


Abb. 2: Unmaßstäbliche Darstellung des Übergangs zwischen zementierten und unzementierten Partien in Lockersedimenten bei Konkretionen (a.) bzw. Massenzementationskörpern (b.). Oben: Dünnschliffzeichnung, unten: Schematische Darstellung einer Konkretion bzw. eines Massenzementationskörpers, schwarz = Offener Porenraum, grau = Detritus, weiß = Karbonatzement.

Gerade bei mehrphasig entstandenen Zementationskörpern können auch Mischformen entstehen. So kommen einerseits noch erkennbare Konkretionsrelikte vor, die durch Massenzementationskörper überwachsen sind bzw. Konkretionen, die auf Massenzementationen aufgewachsen sind.

Die Klassifizierung u.a. nach der Form zementierter Bereiche wurde auch von SELLÉS-MARTÍNEZ (1996) vorgeschlagen. Diskusförmige Konkretionen, deren Form nicht durch die Struktur des Sedimentes beeinflusst werden, bezeichnet er als „ellipsoidal“, solche, auf deren Form sich Sedimentstrukturen auswirken, als „lensoidal“. Diese Unterscheidung wird hier nicht übernommen (Tab. 4). Außerdem beschrieb SELLÉS-MARTÍNEZ (1996) den Zementationstyp „irregular“, der im Gegensatz zum Zementationstyp „unshaped“, der hier als „Massenzementation“ bezeichnet wird, durch scharfe Begrenzungen zum nicht zementierten Lockersediment charakterisiert ist. Zementationskörper, die dem Typ „irregular“ entsprechen, wurden nicht beobachtet.

Tab. 4: Vergleich der Klassifizierungskriterien für Zementationskörper von SELLÉS-MARTÍNEZ (1996) und den hier verwendeten.

Formbeschreibung nach SELLÉS-MARTÍNEZ (1996)	In dieser Arbeit verwendeter	
	Typ	Subtyp
spherical	Konkretion	kugelige Konkretion
ellipsoid		diskusförmige Konkretion
lensoidal		Zapfen
-		flacher Zapfen
-		stratiforme Zementationskörper
tabular		Gruppe aus kugeligen Konkretionen
botroidal		Gruppe aus diskusförmigen Konkretionen
-		Gruppe aus Zapfen
-		-
irregular		-
unshaped	Massenzementationskörper	

4.1.1 Konkretionen

FÜCHTBAUER & RICHTER (1988: 392) definierten Konkretionen als „...diagenetische, rundliche Anreicherungen von Karbonaten und anderen Mineralen in Gesteinen...“. Dagegen sind nach MURAWSKI & MEYER (1998) alle unregelmäßig geformten (kugelig, knollig, linsenförmig, plattig), aus Mineralaggregaten zusammengesetzten Körper im Gestein als Konkretionen zu bezeichnen. Dabei hat es sich, auch im Hinblick auf genetische Interpretation, als zweckmäßig erwiesen, verschiedene Konkretionstypen zu unterscheiden (Abb. 3). Die Konkretionstypen Zapfen, flache Zapfen und stratiforme Zementationskörper werden hier eingeführt und definiert.

kugelige Konkretion: Kugelig bis ellipsoid, knollenförmig.

diskusförmige Konkretion: Die Konkretion bildet ein zusammengedrücktes Ellipsoid. Dabei ist die Höhe deutlich geringer als Breite und Länge (etwa 1:5).

Zapfen: Zapfen- und säulenförmige Konkretionen. Sie können etwa horizontal (liegende Zapfen)

oder etwa vertikal (hängende Zapfen) orientiert, gerade oder gebogen sein. Der Querschnitt dieser Konkretionen ist kreisrund bis elliptisch und zwei Achsen sind deutlich kürzer als die dritte (< 1:5). Zu diesem Typ gehören auch vertikal stehende Zapfen, deren obere Begrenzung eben ist und die auf Grund der Ähnlichkeit mit Tropfsteinen auch als „Endostalaktiten“ bezeichnet werden können.

flacher Zapfen: Abgeplattete Zapfen. Die Höhe ist deutlich geringer als die Breite (< 1:5), die Länge dagegen deutlich größer als die

Breite (>1:5). Die Längsachse flacher Zapfen ist stets parallel zur Schichtung des umgebenden Sedimentes.

stratiforme Zementationskörper: Der Begriff „Stratiform“ wird in der Lagerstättenkunde für „...konkordant-schichtige, d.h. meist in zwei Dimensionen bevorzugt entwickelte schichtgebundene, Mineralkonzentrationen...“ verwendet (z.B. GÖRNE 1985). Da sich diese Definition zwanglos auf die entsprechenden Karbonatzementationen anwenden lässt, wurde der Begriff übernommen. Die meist scharfe obere und untere Begrenzung kann mit Schichtgrenzen zusammenfallen, parallel zu diesen verlaufen oder diese schneiden. Beobachtet wurde eine laterale Erstreckung von einigen dm bis 10er m. Dabei sind Länge und Breite des zementierten Bereiches etwa gleich aber um ein vielfaches größer als die Höhe, die meist nur einige cm beträgt.

Alle oben beschriebenen Konkretionen können bei fortschreitender Zementation zu größeren Gebilden zusammenwachsen. Dabei entstehen zunächst zementierte Areale, die einige cm³ - m³ groß sein können und in denen die Strukturen einzelner Konkretionen noch erkennbar sind. Schließlich können sich weitgehend homogen zementierte Bereiche bilden (z.B. BJØRKUM & WALDERHAUG 1993).

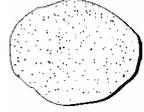
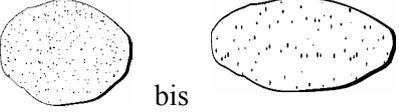
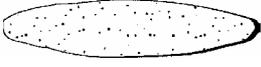
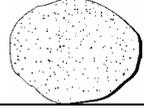
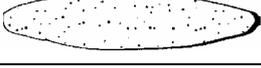
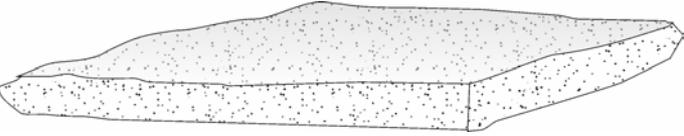
Konkretion	Verhältnis der Achsen	Querschnitt	Längsschnitt
kugelige Konkretion	$a = b \geq c$		
diskusförmige Konkretion	$a = b > c$		
Zapfen	$a \gg b = c$		
flacher Zapfen	$a \gg b > c$		
stratiformer Zementationskörper	$a = b \gg c$		

Abb. 3: Schematische, unmaßstäbliche Darstellung von Konkretionstypen.

4.1.2 Massenzementationskörper

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Konkretionen mit klar definierbarer äußerer Form und scharfer Begrenzung gegenüber dem umgebenden Sediment, sind Massenzementationskörper zementierte Partien mit unregelmäßiger Gestalt und meist diffusem Übergang in das unzementierte Lockersediment. Scharfe Begrenzungen kommen beim Zementationstyp „Massenzementation“ nur dann vor, wenn die obere Grenzfläche mit einer Schichtgrenze von grobkörnigen Ablagerungen (z.B. Schmelzwassersand) zu überlagernden feinkörnigen Ablagerungen (z.B. Grundmoräne) zusammenfällt.

Die Zementationsintensität von Massenzementationskörpern ist häufig mäßig, sie können aber auch betonähnliche Festigkeit durch nahezu vollständig mit Zement gefüllten Porenraum erreichen. In diese Gruppe gehören außerdem Zementkrusten und -säume, die lediglich durch die Verbindung von Kornkontakten zu schwacher Verfestigung führen. Dabei zeigen sich häufig Abhängigkeiten zwischen der Korngröße des Substrates und dem Zementationsgrad der zementierten Bereiche, indem feinkörnige Schichten oft vollständiger zementiert sind als grobkörnige. Dadurch werden an freiliegenden Massenzementationskörpern durch Verwitterung häufig primäre Sedimentstrukturen herauspräpariert (z.B. Schichtflächen, Verwerfungen). Massenzementationskörper können zwischen wenigen cm³ und vielen 10er m³ groß sein. Kleinere Massenzementationskörper wurden bei den Untersuchungen häufig erst beim Sieben des mutmaßlich unzementierten Sedimentes erkannt. Dagegen bilden die m³-großen Massenzementationsblöcke auffällige Strukturen und

wurden entsprechend in Aufschlussbeschreibungen und Kartierberichten wesentlich häufiger erwähnt als Konkretionen (z.B. NAUMANN 1927a, LÜTTIG 1954, JORDAN & SCHWARTAU 1993).

4.2 Zementationskörper in pleistozänen Lockersedimenten NW-Deutschlands

4.2.1 Konkretionen

4.2.1.1 Kugelige Konkretionen

Kugelige Konkretionen kommen in folgenden Aufschlüssen vor:

- Bornhausen (Horizont b.),
- Breetze (Horizonte b., d., e.),
- Coppenbrügge (Horizont a.),
- Daerstorf,
- Engelade,
- Freden (Aufschlussbereich VI),
- Volkstorf (Horizont f.).

Einzelne Konkretionen haben Durchmesser zwischen 0,5 und 5 cm. Es gibt sie in bindigem (Geschiebemergel, schluffiger Feinsand) und in nichtbindigem (Fein- bis Grobsand) Sediment. Die in bindigen Schichten vorkommenden haben oft Schrumpfungsrisse. Kugelige Konkretionen treten horizontbeständig in Massen auf, wobei es Horizonte gibt, in denen Konkretionen sowohl neben- als auch übereinander (z.B. Breetze, Horizont d) und solche, in denen sie ausschließlich nebeneinander (z.B. Daerstorf, Coppenbrügge c.) auftreten. Dabei sind sie häufig zu Gruppen (Abb. 4c, d, Taf. I/1) zusammengewachsen. In den Aufschlüssen Breetze (Horizont d.) und Daerstorf sind sie als jüngste Zementationsform auf Massenzementationskörper (Abb. 4a) und hängende Zapfen (Abb. 4b) aufgewachsen.

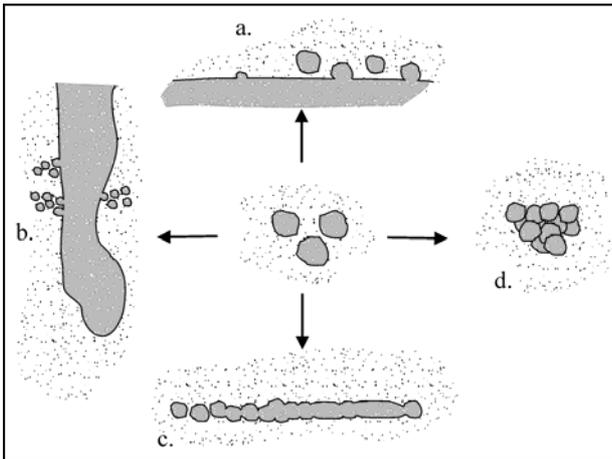


Abb. 4: Schematische, unmaßstäbliche Darstellung kugelförmiger Konkretionen: Aufwachsen auf a. Massenzementationskörper und b. Zapfen; Zusammenwachsen von Konkretionen zu plattigen (c.) oder wolkigen (d.) Zementationskörpern.

4.2.1.2 Diskusförmige Konkretionen

Diskusförmige Konkretionen kommen in folgenden Aufschlüssen vor:

- Bornhausen (Horizonte a., d.),
- Breetze (Horizont c.),
- Coppenbrügge (Horizont c.),
- Freden (Aufschlussbereiche I, V-2, V-3, VI, VII, VIII-3),
- Helpensen (Horizont c.),
- Krankenhagen,
- Volkstorf (Horizont b.).

Diskusförmige Konkretionen haben Durchmesser von 1 bis 12 cm und sind zwischen 0,5 und 5 cm hoch. Teilweise kommen sie unmittelbar unterhalb (z.B. Breetze Horizont c.) oder zwischen Schichten (z.B. Freden, Aufschlussbereich V-3) vor, die wesentlich feinkörniger als das zementierte Sediment sind, so dass ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Konkretionsbildung und hydraulischen Eigenschaften des Sedimentes wahrscheinlich ist. Häufig gibt es sie innerhalb homogener Schichten, ohne dass sich ein Zusammenhang zwischen der Korngröße des Sedimentes und der Konkretionsbildung herstellen lässt. Dabei treten sie teils horizontbeständig (z.B. Bornhausen Horizont d.) teils regellos verteilt (z.B. Helpensen Horizont c.) auf. Im Aufschluss Freden (Aufschlussbereiche VI, VIII-3) treten sie in steilstehenden Klüften auf, wobei ihre größte Erstreckung parallel zur Kluftwandung ist (Taf. I/2). Alle anderen diskusförmigen Konkretionen haben geringe Einfallswinkel bzw. lagern etwa horizontal. Nebeneinander vorkommende Konkretionen sind häufig zu Platten zusammengewachsen.

Diskusförmige Konkretionen kommen häufig zusammen mit anderen Konkretionen vor:

In den Aufschlüssen Freden (Aufschlussbereiche VII, VIII-3) und Krankenhagen treten sie zusammen mit kugelförmigen Konkretionen auf, in Coppenbrügge (Horizont c), Bornhausen (Horizont d) und Breetze (Horizont c.) gemeinsam mit flachen Zapfen. Der Übergang zwischen den jeweiligen Konkretionsformen ist dabei stets kontinuierlich. Dies deutet darauf hin, dass sich die Zementationsbedingungen während der Bildung sukzessive änderten (Kap. 6.3.6). In stratiformen Zementationskörpern im Aufschluss Freden (Aufschlussbereich I, VIII-5) sind beulige Strukturen bzw. relikthafte diskusförmige Konkretionen erkennbar, so dass anzunehmen ist, dass der stratiforme Zementationskörper bei fortschreitender Zementbildung aus nebeneinander vorkommenden Konkretionen entstanden ist.

4.2.1.3 Zapfen

Liegende Zapfen kommen im Aufschluss Freden (Aufschlussbereiche II, IV, VIII-2) in Schmelzwassersand vor. Die Zapfen sind bis zu 1,5 m lang und haben Durchmesser von 8 cm. Es gibt sie horizontbeständig in Massen, wobei sie oft zu Gruppen zusammenwachsen (Taf. I/3). Die Längsachsen von Zapfen, die innerhalb eines Horizontes auftreten, sind stets parallel zueinander. Im Aufschlussbereich VIII-2 gibt es gelegentlich Zapfen, die an Abschiebungen umbiegen und ihre ursprüngliche Richtung etwas tiefer fortsetzen (Taf. I/5). Der Zementationskörper ist dabei nicht durch die Bewegung der Abschiebung zerbrochen, sondern schließt die aus Sand bestehende Kluft mit ein. Wo Sandschichten an mit Schluff gefüllte Abschiebungen grenzen oder durch diese gegen Schluffschichten versetzt sind, enden die Zapfen an der Abschiebung und setzen sich nicht in den Schluff fort.

Außerdem gibt es in Massenzementationskörpern im Aufschluss Rumbeck Bereiche, bei denen es sich möglicherweise um Relikte liegender Zapfen handelt.

Hängende Zapfen (Endostalaktiten) kommen in folgenden Aufschlüssen vor:

- Breetze (Horizonte a., d.),
- Daerstorf,
- Eime,
- Freden (Aufschlussbereich VIII-1),
- Holzen,
- Ödishausen.

Bei hängenden Zapfen handelt es sich um Konkretionen, die meist Durchmesser von wenigen cm haben und einige dm lang sind. Häufig sind nebeneinander vorkommende Zapfen zu Gruppen zusammengewachsen. Außerdem gibt es säulenartige Zementationskörper mit einem Durchmesser

zwischen etwa 10 cm und einigen dm und einer Länge von z.T. über 4 m. Die obere Begrenzung der Zapfen ist eben. Ihre Längsachse steht – unabhängig von der Schichtung des zementierten Sedimentes, auch in schräggeschichteten Ablagerungen (Taf. I/7) – etwa senkrecht.

Hängende Zapfen kommen in nichtbindigem Sediment (Schmelzwasser- bzw. Mittelterrassensand /-kies) vor. Die ebene obere Begrenzung der Zapfen fällt meist mit der Schichtgrenze zu überlagerndem Geschiebemergel zusammen. Nur im Aufschluss Freden (Aufschlussbereich VIII-1) ist kein Zusammenhang zwischen der oberen Begrenzung der Zapfen und einem Materialwechsel erkennbar.

In einem hängenden Zapfen im Aufschluss Breetze (Horizont d.) wurde im Querschnitt ein konzentrischer Ring aus Mn-Verunreinigungen beobachtet (Tafel I / 6). Der Mn-verunreinigte Bereich verläuft parallel zur äußeren Begrenzung des Zapfens und gibt Hinweise auf die Art des Zapfenwachstums (Kap. 5.3).

Stehende Zapfen – bei denen die scharfe, ebene Begrenzung unten ist – wurden in keinem Aufschluss beobachtet.

Gebogene Zapfen gibt es nur im Aufschluss Freden (Aufschlussbereich IV). Sie kommen in Schmelzwasserablagerungen vor, sind bis zu 2,5 m lang und haben Durchmesser von einigen cm. Sie bestehen aus einem bis zu 1,5 m langen, etwa vertikal stehenden Teil, einem flach einfallenden unteren Teil sowie dem Umbiegungsbereich dazwischen (Taf. I/8). Die obere Begrenzung der Zapfen ist eben. Das über den Zapfen folgende Sediment ist nicht aufgeschlossen. Es bestand wahrscheinlich ebenfalls aus Schmelzwassersand, da im Aufschlussbereich IV keine bindigen, geringdurchlässigen Schichten (z.B. Fließmoränen) beobachtet wurden. Die Konkretionen sind meist zu m³-großen Zementationskörpern zusammengewachsen (Taf. I/8).

4.2.1.4 Flache Zapfen

Flache Zapfen kommen in folgenden Aufschlüssen vor:

- Volkstorf (Horizont e.),
- Breetze (Horizont c.),
- Coppenbrügge (Horizont c.),
- Bornhausen (Horizonte a., d.).

Ihre Höhe beträgt meist wenige cm bis max. 10 cm. Sie sind bis 50 cm lang und max. 20 cm breit. Flache Zapfen kommen horizontbeständig in Schmelzwassersand vor und sind oft zu Gruppen zusammengewachsen (Taf. II/1). Die Längsachsen von flachen Zapfen, die innerhalb eines Horizontes auftreten, sind stets parallel zueinander.

In stratiformen Zementationskörpern im Aufschluss

Coppenbrügge (Horizont d.) sind relikthaft flache Zapfen erkennbar, so dass anzunehmen ist, dass die stratiformen Zementationskörper bei fortschreitender Zementbildung aus nebeneinander vorkommenden flachen Zapfen entstanden sind.

In den Aufschlüssen Breetze, Coppenbrügge und Bornhausen sind die Zapfen durch das Zusammenwachsen von diskusförmigen Konkretionen entstanden, die innerhalb der Zapfen z.T. noch relikthaft erkennbar sind.

4.2.1.5 Stratiforme Zementationskörper

Stratiforme Zementationskörper kommen in folgenden Aufschlüssen vor:

- Helpensen (Horizont a.),
- Coppenbrügge (Horizont d.),
- Freden (Aufschlussbereiche I, VIII-5, VIII-6).

Die Höhe stratiformer Zementationskörper beträgt meist wenige cm, die laterale Erstreckung einige dm² bis 10er m². Stratiforme Zementationskörper fallen teils mit der Schichtung des Lockersedimentes ein (Aufschlüsse Helpensen, Coppenbrügge, Freden Aufschlussbereich VIII-6), teils diskordant dazu (Aufschluss Freden, Aufschlussbereiche I, VIII-5). Die zementierten Sedimente bestehen oft aus schluffigem Fein- bis Mittelsand.

Im Aufschlussbereich VIII-6 ist in kryoturbat deformierten Schmelzwasserablagerungen Sand unmittelbar oberhalb von Schluff zementiert (Taf. II/4).

In stratiformen Zementationskörpern im Aufschluss Coppenbrügge (Horizont d., Taf. II/2) sind relikthaft flache Zapfen erkennbar, so dass anzunehmen ist, dass die stratiformen Zementationskörper bei fortschreitender Zementbildung aus nebeneinander vorkommenden flachen Zapfen entstanden sind. Die stratiformen Zementationskörper im Aufschluss Freden (Aufschlussbereich VIII-5) sind nach der beuligen Beschaffenheit der Ober- bzw. Unterseiten wahrscheinlich aus diskusförmigen Konkretionen zusammengewachsen.

4.2.2 Massenzementationskörper

Massenzementationskörper gibt es in allen untersuchten Aufschlüssen. Die Größe der zementierten Bereiche reicht von Zementkrusten (z.B. Aufschluss Hittfeld, Bad Münden/Hachmühlen), mit denen nur einige Körner verbunden sind, bis hin zu vielen 10er m³-großen Massenzementationskörpern (z.B. Aufschluss Rumbeck). Sie kommen meist in Schmelzwasserablagerungen (Taf. II/5, II/6), gelegentlich auch in Geschiebemergel vor, wobei Massenzementationskörper im bindigen Sediment signifikant geringvolumiger sind, als im nichtbindigen (z.B. Aufschluss Breetze Horizont d.). Die

Zementationsintensität kann – auch innerhalb einzelner Massenzementationskörper – von mäßig bis sehr hoch variieren (z.B. Aufschluss Daerstorf).

In folgenden Aufschlüssen ist die Zementationsintensität in grobkörnigen Schichten meist signifikant besser und die laterale Erstreckung der Zementationskörper größer als im benachbarten feinkörnigen Sediment.

- Daerstorf,
- Volkstorf (Horizont a.),
- Freden (Aufschlussbereich II) und
- Bornhausen (Horizont c).

Dagegen sind in folgenden Aufschlüssen feinkörnige Schichten besser zementiert als grobkörnige:

- Breetze (Horizonte a., d.)
- Holzen,
- Krankenhagen,
- Rumbeck,
- Freden (Aufschlussbereiche V-1, VI) und
- Ödishausen

Außerdem nimmt hier die Zementationsintensität und –verbreitung von oben nach unten oft ab.

Im Aufschluss Helpensen treten Massenzementationskörper unmittelbar oberhalb von stratiformen Zementationskörpern auf (Taf. II/3). Ansonsten sind sie sehr häufig fleckenhaft im Lockersediment verteilt oder kommen im nichtbindigen Sediment (z.B. Schmelzwassersand) unmittelbar unterhalb der Grenze zu bindigem (z.B. Geschiebemergel, glazilimnischer Ton) vor. Unterhalb bindiger Schichten sind sie in folgenden Aufschlüssen mit hängenden Zapfen vergesellschaftet (Taf. II/7):

- Daerstorf
- Breetze (Horizonte a., d.)
- Holzen,
- Eime und
- Ödishausen

Die Zapfen sind meist noch relikthaft in den Massenzementationskörpern erkennbar bzw. ragen z.T. unten aus ihnen heraus (Taf. II/8).

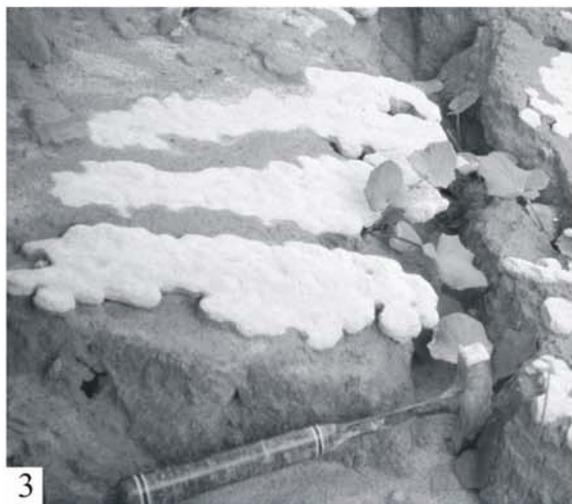
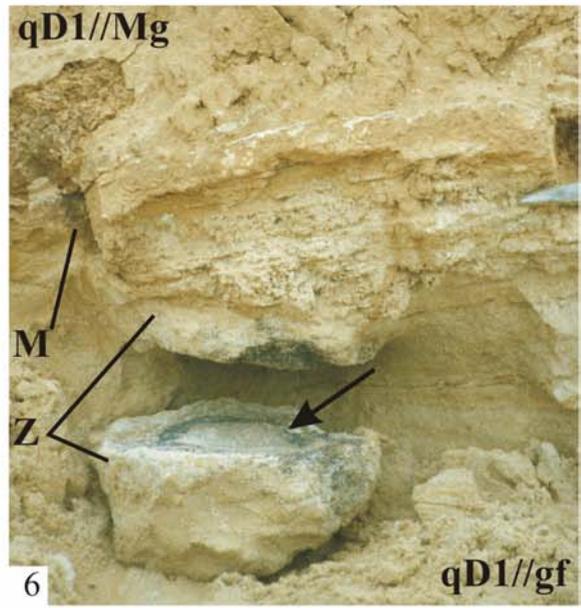
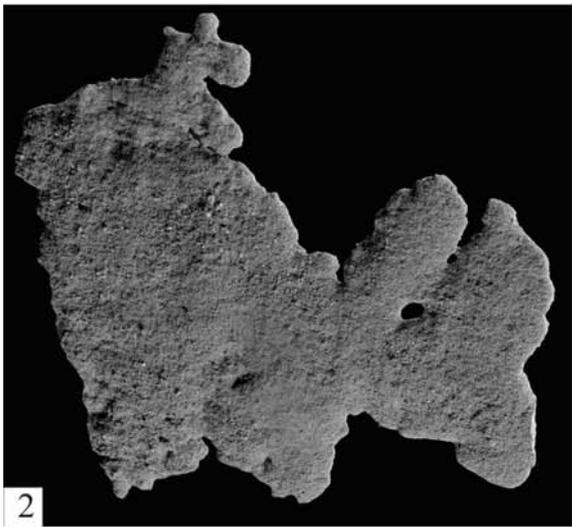
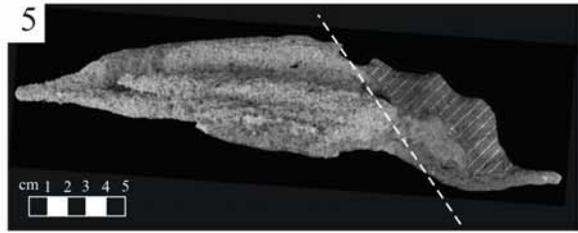
Tafel I: Übersicht verschiedener in NW-Deutschland vorkommender Zementationsformen (1):

- Tafel I/1: Zu einer knolligen Gruppe zusammengewachsene kugelige Konkretionen. Länge des Maßstabs 10 cm, Aufschluss Breetze, Horizont d.
- Tafel I/2: Diskusförmige Konkretionen, die in der aus Sand bestehenden Füllung einer steil stehenden Kluft entstanden und zu einer größeren Gruppe zusammenwuchsen. Höhe der Platte ca. 20 cm. Aufschluss Freden, Aufschlussbereich VI.
- Tafel I/3: Aufsicht auf eine freigespülte Schichtfläche mit diskusförmigen Konkretionen, die zu größeren etwa Nord-Süd-streichenden Platten zusammenwuchsen. Aufschluss Freden, Aufschlussbereich V-3.
- Tafel I/4: Liegende Zapfen, die teilweise zu Gruppen zusammengewachsen sind. Aufschluss Freden, Aufschlussbereich VIII-2.
- Tafel I/5: Gruppe aus liegenden Zapfen, die im Bereich einer Abschiebung (gestrichelte Linie) nach unten abbiegen und sich auf der anderen Seite etwas tiefer fortsetzen. Der durch Schraffur markierte Bereich besteht aus Lockersediment, das bei der Präparation durch Kunstharz zementiert wurde. Der Zapfen war SW (Bild links)-NE (Bild rechts) orientiert. Aufschluss Freden, Aufschlussbereich VIII-2.
- Tafel I/6: Hängender Zapfen mit Mn-Verunreinigungen (Pfeil). Der etwa 20 cm lange, durchgebrochenen Zapfen (Z) ragt aus einem Massenzementationskörper (M) heraus. (Bildbreite entspricht ca. 40 cm), Aufschluss Breetze, Horizont d.
- Tafel I/7: Unterer Abschnitt eines verstürzten, ehemals längeren Zapfens (Abbruchfläche ist oben). Längsachse des Zapfens und Schrägschichtung des Sedimentes stehen hier nicht senkrecht aufeinander. Länge des Maßstabs entspricht 30 cm, Aufschluss Breetze, Horizont d.
- Tafel I/8: Mittlerweile zerstörter Aufschluss einer in situ vorkommenden Gruppe zusammen gewachsener gebogener Zapfen. Der Aufschluss wurde 1997 durch das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung als Geotop anerkannt und unter Schutz gestellt. Länge des Maßstabs 2m.

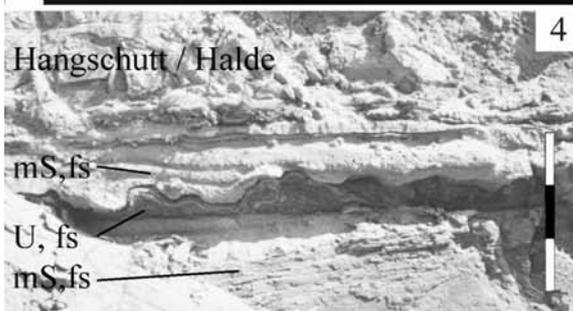
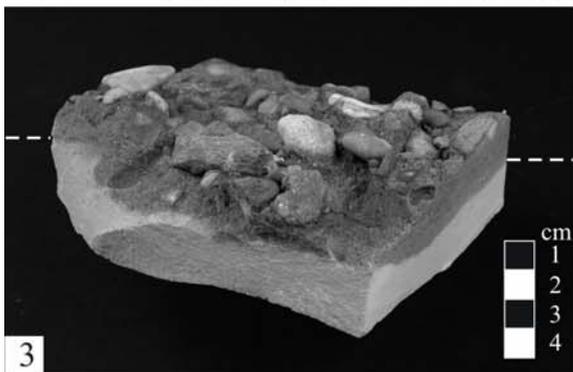
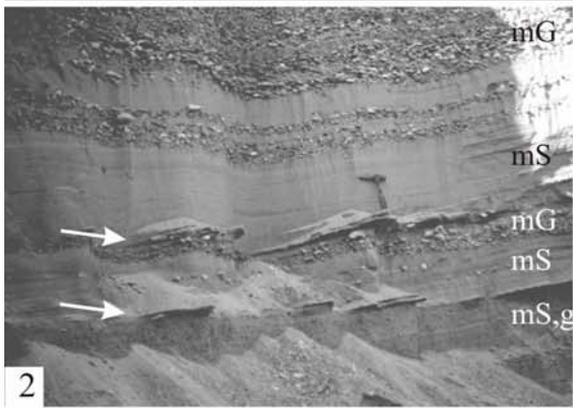
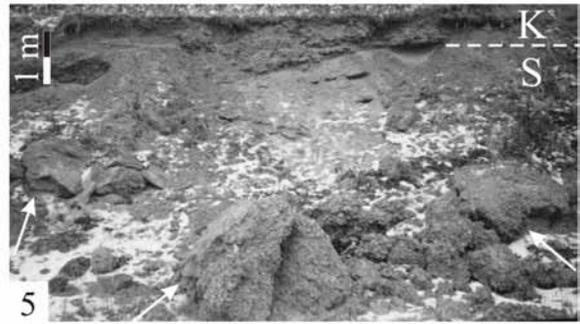
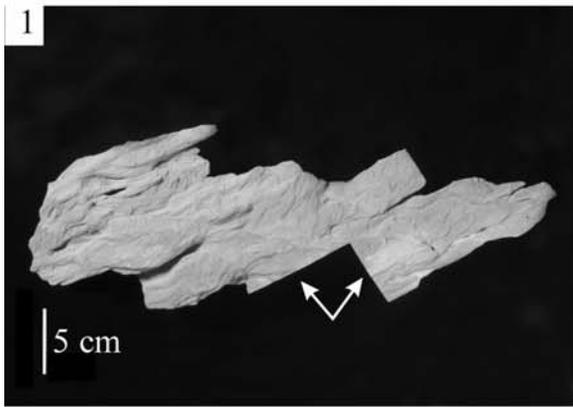
Tafel II: Übersicht verschiedener in NW-Deutschland vorkommender Zementationsformen (2):

- Tafel II/1: Gruppe aus zusammengewachsenen flachen Zapfen. Aufsicht auf die Oberseite der schichtparallel orientierten Zapfen. Dünnschliffprobenahme erfolgte senkrecht und parallel zur Zapfenlängsachse (Pfeile). Aufschluss Volkstorf, Horizont e.
- Tafel II/2: Aufschlussbild mit stratiformen Zementationskörpern (Pfeile) im feinsandigen Mittelsand (mS) unmittelbar oberhalb vom grobkiesigen, sandigen Mittelkies (mG) und stark kiesigen, grobsandigen Mittelsand (mS,g). Aufschluss Coppenbrügge, Horizont d.
- Tafel II/3: Handstück mit stratiformem Zementationskörper (heller Bereich unterhalb der gestrichelten Linie) und darüber folgendem Massenzementationskörper (dunkler Bereich oberhalb der gestrichelten Linie). Aufschluss Helpensen, Horizont a.
- Tafel II/4: Kryoturbationshorizont im Aufschlussbereich VIII: Mittelsand ist unmittelbar über feinsandigem Schluff weiträumig und intensiv zementiert. Länge des Maßstabs entspricht 30 cm, Aufschluss Freden, Aufschlussbereich VIII-6.
- Tafel II/5: Massenzementationskörper (Pfeile) in einer mit Kies gefüllten Rinne (K), die in Schmelzwassersand (S) eingeschnitten ist. Aufschluss Freden, Aufschlussbereich III.
- Tafel II/6: Massenzementationskörper, Aufschluss Daerstorf: Durch Auswaschung und Ausblasen herauspräparierte, schichtabhängig unterschiedliche Zementationsintensität.
- Tafel II/7: Übersicht des Naturdenkmals „Verkittete Sande“ bei Holzen: Um hängende Zapfen (Z) bildeten sich vor allem im oberen Bereich Massenzementationskörper (M). Länge des Maßstabsbalkens 3 m.
- Tafel II/8: Verstürzter Zementationskörper, Aufschluss Breetze, Horizont d.: Aus einem Massenzementationskörper (Schraffur, weiß), der um z.T. relikthaft erkennbare hängende Zapfen (Schraffur, grau) herumgewachsen ist, ragen unten noch gut erkennbare Zapfenteile (grau) heraus. Länge des Maßstabs entspricht 1 m.

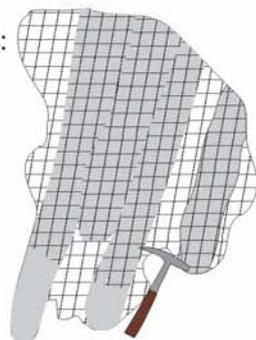
Tafel I



Tafel II



zu Taf. II/8:



5 **KARBONATZEMENT**

5.1 **Karbonatzement: Grundlagen und Aspekte**

Da Karbonatzement häufig Rückschlüsse auf die bei der Entstehung herrschenden Bildungsbedingungen zuläßt bzw. Veränderungen der primären Zementeigenschaften ggf. Aussagen zu Diagenese-szenarien ermöglichen, nimmt die Untersuchung von Karbonatzementen über die reine Dokumentation hinaus eine Schlüsselposition bei der Bearbeitung o.g. Aufgabenstellung ein. Aus diagnostischen Merkmalen von Karbonatzementen - wie u.a. den Kristalleigenschaften (z.B. Kristallform, -größe), der chemischen Zusammensetzung, der Konzentration stabiler Isotope oder dem Kathodolumineszenzverhalten - sowie aus der Abfolge von Zementgenerationen lassen sich Erkenntnisse zur Diagenese-geschichte oder zumindest zu einzelnen Diagenese-phasen ableiten (z.B. FAIRCHILD & SPIRO 1990, SUGITANI et al. 1995). Allerdings kann die Definition von Bildungsbedingungen durch die Interpretation einzelner Eigenschaften von Karbonatzementen auch widersprüchliche Ergebnisse erbringen (z.B. MELIM et al. 1995), wofür z.B. diagenetische Überprägung primärer Zementeigenschaften verantwortlich sein kann. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, Aussagen zur Diagenese, die auf der Untersuchung von Karbonatzementen beruhen, durch die Bestimmung möglichst vieler Zementeigenschaften (z.B. Kathodolumineszenzverhalten, chemische Zusammensetzung) zu untermauern.

Karbonatische Zemente wurden und werden in einer kaum überschaubaren Vielzahl von Arbeiten untersucht (Übersichtsarbeiten z.B. LONGMAN 1980, FÜCHTBAUER & RICHTER 1988, KOCH & ZINKERNAGEL 1996). Im Zusammenhang mit vorliegender Fragestellung sind dabei vor allem Untersuchungen interessant, die sich ebenfalls mit der karbonatischen Zementation von quartärzeitlich entstanden Sedimenten beschäftigten (z.B. HATTIN & DODD 1978, DRAVIS 1996, FRIEDMAN 1998). Auf Grund der weiten Verbreitung von Karbonatzement haben sich Bearbeiter verschiedener Teildisziplinen der Geologie mit Beschreibung und Deutung befasst. Die wohl intensivste Bearbeitung hat die Zementpetrographie in der Sedimentologie erfahren, wobei hier meist marin beeinflusste Milieus im Vordergrund standen (z.B. BATHURST 1959, 1975, FOLK 1965, 1974, FLÜGEL 1978, 1982). Außerdem beschäftigten sich jedoch auch zunehmend andere Forschungsdisziplinen mit Karbonatzementen, wie z.B.

- die Quartärgeologie (z.B. GASCOYNE 1981, SOUCHEZ & LEMMENS 1985, FAIRCHILD & SPIRO 1990),
- die Bodenkunde (z.B. SEHGAL & STOOPS 1972, CERLING 1984, RABENHORST et al. 1984) oder

- die Speläologie (z.B. FOLK & ASSERETO 1976, KENDALL & BROUGHTON 1978, REINHOLD 1998a).

Das bedingt, dass nicht immer eine einheitliche Terminologie verwendet wurde. Daher sind zunächst einige Begriffe zu definieren, die in dieser Arbeit rein deskriptiv - also ohne genetische Deutung - vor allem für wesentliche Kristalleigenschaften eingesetzt wurden (**Kristalltypen**, Tab. 5). **Zementtypen**, aus deren Beschaffenheit sich darüber hinaus genetische Deutungen ableiten lassen, werden in Kap. 5.1.0 und 5.1.2 beschrieben.

Ziel der Zementpetrographie ist vor allem, unter Berücksichtigung von diagenetischer Neubildung bzw. Umkristallisation auf Bildungsbedingungen zu schließen und darüber zur Identifizierung von Diagenesemilieus und -szenarien zu gelangen. Dabei ist zunächst zwischen oberflächennaher und Versenkungsdiagenese zu unterscheiden, wobei letztere in Anbetracht der geologischen Entwicklung des Untersuchungsgebietes im Quartär vernachlässigbar ist. Oberflächennahe Diagenesebereiche unterteilte LONGMAN (1980) in

- meteorisch, vados (Süßwasser, wasserungesättigte Zone),
- meteorisch, phreatisch (Süßwasser, wassergesättigte Zone),
- meteorisch-marine Mischzone, phreatisch (Brackwasser, wassergesättigte Zone),
- marin, phreatisch (Salzwasser, wassergesättigte Zone) und
- marin, vados (Salzwasser, Spritzwasserzone).

Für die untersuchten Vorkommen sind nach der geologischen Entwicklung Einflüsse von aufsteigendem salinarem Tiefen- oder Meerwasser auszuschließen. Damit reduziert sich der zu beachtende Diagenesebereich auf meteorisch-vadoses und meteorisch-phreatisches Milieu, in denen sich i.d.R. Niedrig-Mg-Kalzit (≤ 4 Mol-% MgCO_3 sensu FRIEDMAN 1964) bildet.

Der Begriff „Mikrosporit“ wurde in der Literatur für Karbonat verwendet, das u.a. durch Kristallgröße und -form definiert und als „rekristallisierter Mikrit“ gedeutet wurde (z.B. JAMES 1972, TUCKER 1985, KOCH & ZINKERNAGEL 1996). Diese Auffassung basiert auf einem Konzept FOLKS (1965, 1974). Andererseits wurde mit „Mikrosporit“ Zement bezeichnet (z.B. FLÜGEL 1978, SHARP ET AL. 1990). Mikrosporit-zement weist zwar ähnliche Kristalleigenschaften auf wie der „rekristallisierter Mikrit“ FOLKS. Es konnte jedoch an Fallbeispielen gezeigt werden, dass es sich tatsächlich um Zement handelt (z.B. LASEMI & SANDBERG 1984, MUNNECKE et al. 1997). In dieser Arbeit wird Mikrosporit im letztgenannten Sinne für **Zement** mit o.g. Eigenschaften (Tab. 5) eingesetzt.

Tab. 5: Definition der in dieser Arbeit deskriptiv eingesetzten Zementterminologie.

Kristalltyp	Beschreibung	Bemerkung
Mikrit	Kristallgröße: $\leq 4 \mu\text{m}$, Kristallform: granular, meist einschlussreiche Kristalle	ALEXANDERSSON (1972)
Mikrospatit	Kristallgröße: $> 4 - \leq 10 \mu\text{m}$, Kristallform: granular, meist einschlussreiche Kristalle	FLÜGEL (1978)
Blockkalzit	Kristallgröße: $> 10 \mu\text{m}$, Kristallform: granular, meist klare Kristalle	modifiziert nach DUNHAM (1969)
blattförmiger Zement	blattförmige Kristalle, Längen / Breitenverhältnis 1,5 - 6, c-Achse steht senkrecht zum Ausgangssubstrat	entspricht „bladed drusy cement“ (REIJERS & HSÜ 1986) bzw. „Säulenzement“ (TUCKER 1996)
syntaxialer Anwachssaum	Zement wächst mit gleicher optischer Orientierung wie das Ausgangssubstrat (meist Echinodermenbruchstücke)	Definition nach EVAMY & SHEARMAN (1965)
poikilotopischer Zement	große Zementkristalle, die verschiedene Körner umschließen	z.B. EVAMY & SHEARMAN (1965), KOCH & ZINKERNAGEL (1996)

5.1.1 Meteorisch-vadoser Zement

Der Porenraum enthält in der wasserungesättigten oder vadosen¹ Zone sowohl Bodenluft (mit Wasserdampf) als auch Wasser, wobei der Wassergehalt in diesem Bereich zwischen 4 und 90 % variieren kann (MERKEL & SPERLING 1996). Die vadoso Zone wird nach oben von der Erdoberfläche bzw. nach unten von der Grundwasser-Oberfläche begrenzt (LONGMAN 1980). Wasser kommt in diesem Bereich vor allem als

- Haftwasser (adhäsiv an Kornoberflächen gegen die Schwerkraft gebunden),
- Kapillarwasser (Haftwasser, das in Menisken auf Grund von Oberflächenspannungen gegen die Schwerkraft gehalten wird) und
- Sickerwasser (Bewegung erfolgt der Schwerkraft entsprechend überwiegend nach unten) vor.

Sickerwasser kann durch eine Kombination von Oberflächenspannung und Schwerkraft unterhalb von Geröllen Haftwassertropfen bilden, in denen es

¹ Der Begriff „vados“ wird in der Literatur in unterschiedlicher Weise benutzt. Die im Text dargestellte Definition entspricht der üblichen geologischen Terminologie (z.B. FÜCHTBAUER & RICHTER 1988, TUCKER & WRIGHT 1990) sowie der Anwendung des Begriffes in der englischen Hydrogeologie (z.B. BEAR 1972) und wird in dieser Arbeit entsprechend verwendet. Davon abweichend wird im deutschsprachigen Raum „...Grundwasser, das bereits am irdischen Wasserkreislauf teilgenommen hat...“ (HÖLTING 1996) als „vados“ bezeichnet und noch vereinzelt entsprechend benutzt (z.B. DEUTLOFF & STRITZKE 1999).

z.B. durch Verdunstung zur Kalzitfällung kommen kann. Entsprechende Zementanreicherungen unterhalb von Komponenten werden nach MÜLLER (1971) als **Gravitationszement** bezeichnet (Abb. 5). Damit handelt es sich hier um ein eindeutiges diagnostisches Kriterium für die Zementation in der vadosen Zone (JAMES & CHOQUETTE 1984, CHAFETZ et al. 1985), was von BADIOZAMANI et al. (1977) auch experimentell nachgewiesen werden konnte.

Nach DUNHAM (1971) bildet sich **Meniskuszement** ebenfalls ausschließlich in der vadosen Zone. Dabei bewegt sich in den Untergrund eindringendes Niederschlagswasser entsprechend der Schwerkraft durch den wasserungesättigten Porenraum nach unten, wobei ein Teil des Sickerwassers unter dem Einfluss von Oberflächenspannungen als Kapillarwasser in engen Porenräumen zwischen Körnern gegen die Schwerkraft gehalten werden kann (z.B. BEAR 1972). Bei der Verdunstung dieses Zwickelwassers bzw. bei Änderung von CO₂-Partialdruck oder Temperatur kann es bevorzugt in diesen Bereichen zur Ausfällung von Kalzit zement kommen (Abb. 5).

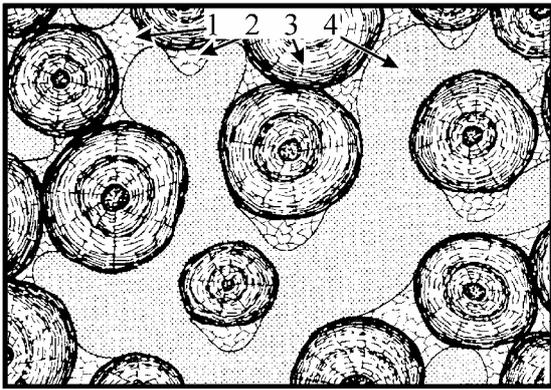


Abb. 5: Schematische Darstellung von typischem Karbonatzement der vadosen Zone. 1: Meniskuszement, 2: Gravitationszement, 3: Detritus, 4: offener Porenraum (verändert nach MOORE 1989).

Außerdem gibt es weitere Kriterien, die gute Hinweise auf die Bildung in der vadosen Zone geben bzw. die eine Entstehung in der phreatischen Zone unwahrscheinlich machen:

- In Bereichen, die zwar weitgehend, aber noch nicht vollständig zementiert sind, tritt in der vadosen Zone porenrundende Zementation auf (z.B. WARD 1975, LONGMAN 1980, JAMES & CHOQUETTE 1984, MOORE 1989), d.h. die ursprüngliche Porenform wird durch den Zement überprägt, wodurch Rundporen entstehen.
- Die Zementationsintensität, d.h. der Auffüllungsgrad des Porenraumes einer Schicht mit Zement, ist sehr ungleichmäßig. Neben Bereichen, in denen das Ausgangssubstrat gar nicht oder nur an Kornkontakten zementiert ist, kommen (im Handstück) nahezu vollständig zementierte Areale vor (YAALON 1967, HALLEY & HARRIS 1979, MOORE 1989).
- Um Detritus bilden sich keine vollständigen Zementsäume bzw. Rindenzemente (LAND 1971, LONGMAN 1980).
- Im Dünnschliff gibt es zeitgleich nebeneinander entstandene Zementtypen (z.B. Meniskuszement, Hundezahn-Zement), deren Eigenschaften auf unterschiedliche Bildungsmilieus hinweisen (WARD 1975) oder deren Kristallgröße bereichsweise oder von Pore zu Pore stark unterschiedlich ist (BUDD 1988). Obwohl zeitgleich gebildete Zementtypen, die sich hinsichtlich wesentlicher Zementeigenschaften unterscheiden, gelegentlich auch in marin-phreatischem Bereich entstehen können (z.B. GINSBURG et al., 1971, SCHROEDER, 1972, 1973), ist eine auf engem Raum heterogene Zementbeschaffenheit typisch für vadoso Entstehung.
- Im vadosen Milieu werden feinkörnige Schichten generell vollständiger zementiert als grobkörnige Sedimente (z.B. LAND 1971, WARD 1975). Auf Grund der in feinkörnigen Sedimen-

ten relativ größeren Kornoberflächen, des kleineren Porenraums und der damit verbundenen unterschiedlichen Saugspannungs-Sättigungsbeziehungen kommt es bei gleicher Saugspannung in feinkörnigen Ablagerungen zu einem höheren Wassergehalt als in grobkörnigen Sedimenten (z.B. HUDE 1991), so dass auf Grund der unterschiedlichen ungesättigten hydraulischen Eigenschaften (k_u) in ersteren ein höheres Zementationspotential vorhanden ist. Darüber hinaus nahmen TARDY & MONNIN (1983) an, dass sich die Löslichkeit einer kalzitgesättigten Lösung mit abnehmender Porengröße verringert, so dass es beim Übertritt einer entsprechenden Lösung von größeren zu kleineren Poren zur Kalzitfällung kommen kann. Durch die beginnende Zementation verringert sich das Porenvolumen, wodurch die weitere Zementation begünstigt wird.

5.1.2 Meteorisch-phreatischer Zement

Die meteorisch-phreatische Zone umfasst den Bereich unterhalb der Grundwasser-Oberfläche sowie den i.d.R. dünnen geschlossenen Kapillarsaum unmittelbar darüber. Dieser Bereich, in dem Hohlräume des Gesteins vollständig wassererfüllt sind, wird nach oben von der vadosen Zone begrenzt, während die Untergrenze üblicherweise nicht definiert wird. KOCH & ZINKERNAGEL (1996) weisen daraufhin, dass die meteorisch-phreatische Zone nach unten - bei zunehmendem Druck und Temperatur - zunächst von der flacheren, dann von der tieferen Versenkungsdiagenese erfasst wird. Dieser Bereich wurde von den hier untersuchten Gesteinen nicht erreicht.

Ein charakteristisches Merkmal für die Bildung in der meteorisch-phreatischen Zone ist nach ADAMS et al. (1986) das Auftreten von **drusigem Blockkalzit**. Es handelt sich dabei um Blockkalzit, dessen Kristallgröße vom Porenrand zum Porenzentrum hin signifikant zunimmt (FLÜGEL 1978).

Die Bildung von gleichmäßigen Säumen aus granularen oder blattförmigen Kalzitkristallen (**Isopachenzement**, Abb. 6) wurde ebenfalls der phreatischen Zone zugeordnet (z.B. LAND 1971, LONGMAN 1980, JAMES & CHOQUETTE 1984, STRASSER & DAVAUD 1986, KOCH & ZINKERNAGEL 1996). Bei blattförmigen Kristallen stehen die c-Achsen i.d.R. etwa senkrecht auf dem jeweiligen Ausgangssubstrat. Im Gegensatz zu fleckenhaft auftretendem Isopachenzement, die sich auch in der vadosen Zone bilden können, umschließen eindeutig phreatisch entstandene Zementsäume den Detritus vollständig und zeigen über größere Bereiche einheitliche Dicke (BADIOZAMANI et al. 1977, REIJERS & HSÜ 1986).

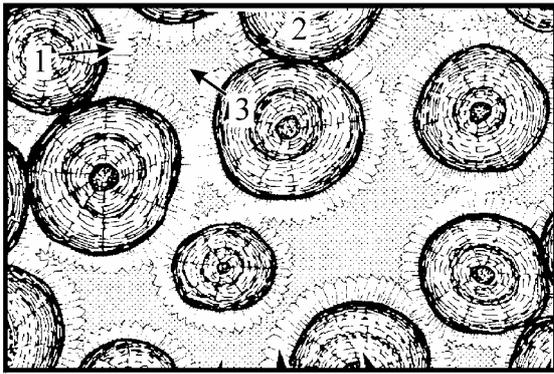


Abb. 6: Schematische Darstellung von typischem Karbonatzement der phreatischen Zone. 1: Isopachenzement, 2: Detritus, 3: offener Porenraum (verändert nach MOORE 1989).

Als **poikilotopischer Zement**² wird sehr grobkristallines, i.d.R. kalzitisches Bindemittel bezeichnet, das zahlreiche Komponenten umschließt und den Porenraum nahezu vollständig auffüllt (TUCKER & WRIGHT 1990). Die Entstehung der meist granularen Zementkristalle, die Durchmesser von einigen mm und mehr erreichen können, wird auf sehr langsames Wachstum in einer nur gering übersättigten Lösung zurückgeführt (KOCH & ZINKERNAGEL 1996). Während KOCH & ZINKERNAGEL (1996) hierfür die tiefere Versenkungsdiagenese - die für die untersuchten Bildungen nicht anzunehmen ist - als häufiges Entstehungsmilieu ansahen, bildet sich dieser Zementtyp nach ABER (1978), BUCZYNSKI & CHAFETZ (1987) und GHOSH (1997) auch oberflächennah.

Eine weitere Bildung, die üblicherweise eher der phreatischen Zone zugeordnet wird, sind **syntaxiale Anwachssäume** bzw. **syntaxiale Einkristallzemente** (EVAMY & SHEARMAN 1965, WALKDEN & BERRY 1984). Es handelt sich dabei um Rindenzement, der in optischer Kontinuität mit dem Ausgangssubstrat, bei dem es sich i.d.R. um Echinodermenbruchstücke handelt, wächst.

Syntaxiale Anwachssäume können allerdings auch im vadosen Milieu entstehen (FREEMAN 1971, WARD 1975, TUCKER & WRIGHT 1990), wobei die Anwachssäume - die im Gegensatz zu den Bildungen des phreatischen Bereiches das Ausgangssubstrat i.d.R. nicht vollständig umwachsen - in wassergesättigten Poren innerhalb der vadosen Zone gebildet werden (LONGMAN 1980). Dazu wiesen ORME & BROWN (1963) darauf hin, dass sich vergleichbare Bildungen auch durch

Neomorphose, also durch Änderung der Kristallform aber nicht der Zusammensetzung (REINHOLD 1996), aus präexistierendem feinkörnigem Zement bilden können. Sie schlugen hierfür die Bezeichnung „**syntaxialer Verdrängungssaum**“ vor.

Ferner können syntaxiale Anwachssäume auch im - hier nicht relevanten - Bereich der Versenkungsdiagenese entstehen (z.B. WALKDEN & BERRY 1984, TUCKER & WRIGHT 1990, REINHOLD 1996).

In der meteorisch-phreatischen Zone ist die Zementation im Gegensatz zur vadosen Zone eher **porenformerhaltend** (BADIOZAMANI et al. 1977, MOORE 1989), d.h. die Form des Restporenraums zeichnet die Geometrie des ursprünglichen Porenraumes nach. Dazu betonten HALLEY & HARRIS (1979), dass bei sehr unvollständiger Zementation die in der phreatischen Zone entstandenen Zemente eher zufällig im Lockersediment bzw. auf dessen Bestandteilen verteilt sind, wohingegen sich Zement in der vadosen Zone eher in bestimmten Positionen (z.B. Kornwickeln, unterhalb von Detritus) bildet.

Die Zementation in der phreatischen Zone ist insgesamt gleichmäßiger („even“ sensu REIJERS & HSÜ 1986) als im vadosen Milieu (z.B. LAND 1970, MÜLLER 1971, WARD 1975, ABER 1978, LONGMAN 1980, TUCKER & WRIGHT 1990, KOCH & ZINKERNAGEL 1996). So ist in der phreatischen Zone entstandener porenfüllender Zement insgesamt gleichförmiger (MOORE 1989) und i.d.R. klarer und größer (LONGMAN 1980, JAMES & CHOQUETTE 1984) als in der vadosen Zone gebildeter.

5.1.3 Kathodolumineszenzverhalten

Das Lumineszenzverhalten von Kalzit, der chemisch rein eine wahrscheinlich auf Gitterdefekte zurückzuführende schwach blaue (=intrinsisch) KL-Farbe zeigt (TUCKER 1996), beruht auf der Konzentration und dem Verhältnis bestimmter Spurenelemente, die als Fremdatome in das Kristallgitter eingebaut sind und die lumineszenzfördernd („**activator**“) oder -abschwächend („**quencher**“) wirken können (z.B. MACHEL 2000). Als Aktivatoren werden neben Mn^{2+} , das nach TUCKER (1996) gelbe bis rote Emissionsfarben erzeugt, u.a. auch einige Elemente der SEE-Gruppe und Pb^{2+} bzw. als Abschwächer Fe^{2+} , Co^{2+} und Ni^{2+} genannt (MACHEL et al. 1991). Fe^{2+} kann als häufigstes Abschwächer-Element zu vollständiger Auslöschung und damit zu Nichtlumineszenz führen (TUCKER 1996). Im natürlichen Kalzit wird das Lumineszenzverhalten vor allem von den Spurenelementen Mn^{2+} und Fe^{2+} bestimmt (z.B. HABERMANN et al. 1998). Da für das Lumineszenzverhalten von Karbonaten nicht nur die Konzentration lumineszenzfördernder bzw. -abschwächender

²In der Literatur wird für den beschriebenen Zementtyp neben „poikilotopisch“ auch „poikilitisch“ verwendet. Da „poikilotopisch“ gebräuchlicher ist (z.B. FÜCHTBAUER & RICHTER 1988, KOCH & ZINKERNAGEL 1996), wird er hier verwendet (s. auch Diskussion in BARTHOLOMÄUS et al. 1997).

Stoffe relevant ist, sondern zusätzlich noch das Verhältnis dieser Stoffe zueinander (z.B. RICHTER & ZINKERNAGEL 1981, MACHEL et al. 1991), hat die Bestimmung von absoluten Elementkonzentrationen über das Kathodolumineszenzverhalten bislang keine sinnvollen Ergebnisse erbracht.

Mit der Untersuchung des Kathodolumineszenzverhaltens können u.a. Kristallwachstumszonierungen und Abfolgen von Zementgenerationen erkannt werden (z.B. BRUCKSCHEN 1992, BRUCKSCHEN & RICHTER 1994, SAVARD et al. 1995, REINHOLD 1996, 1998b, KAUFMANN et al. 1999). Dazu kann das KL-Verhalten von Kalzit Rückschlüsse auf Eh-Milieus (MACHEL & BURTON 1991) und den Pauschalchemismus von Bildungs-lösungen bzw. deren Veränderung (z.B. TUCKER 1996) zulassen. MAJOR (1991) sah im lumineszierenden Zement einen Hinweis auf reduzierende Bildungsbedingungen. Danach ist für die Bildung von lumineszierendem Kalzit ein Milieu mit niedrigem Eh-Wert erforderlich, in dem einerseits zweiwertiges Mangan vorkommt und andererseits Sättigungszustände möglich sind, die zur Karbonatbildung führen können. Dagegen entstehen unter oxidierenden Bedingungen - wie bei der Bildung von Zement in der vadosen Zone und z.T. auch in der phreatischen Zone - typischerweise Kalzit-zemente, die schwache oder intrinsische Lumineszenz zeigen (z.B. KOCH & ZINKERNAGEL 1996, REINHOLD 1996). Allerdings kann schwach oder intrinsisch lumineszierender Kalzit auch im reduzierten Grundwasser ausfallen, sofern in der Lösung nicht genügend Mangan zur Verfügung steht (MACHEL & BURTON 1991).

TENHAVE & HEIJNEN (1985) stellten experimentell fest, dass die Aufnahme von Mn^{2+} in das Kristallgitter von Kalzit auch von dessen Wachstumsgeschwindigkeit beeinflusst werden kann, was bei der Interpretation des Lumineszenzverhaltens zu berücksichtigen ist. Auch RICHTER & ZINKERNAGEL (1981) wiesen darauf hin, dass alleine über die Bestimmung des Lumineszenzverhaltens von Kalzitementen nicht auf das Bildungsmilieu (marin-meteorisch, vados-phreatisch) geschlossen werden darf.

5.1.4 Pseudomatrix

Bei Pseudomatrix handelt es sich um Material, das durch diagenetische Auflösung des Kornverbandes von labilen, inkompetenten Gesteinsbruchstücken gebildet wird und in den offenen Porenraum geschlämmt wird (KAIRO et al. 1990). GESLIN (1994) wies karbonatische Pseudomatrix in sandigen Turbiditen nach, die sowohl aus siliziklastischem als auch aus karbonatischem Detritus bestehen und konnte zeigen, dass hier Pseudomatrix in Folge Zerstörung karbonatischer

Körner entstanden ist. Obwohl Pseudomatrix kein Zement im eigentlichen Sinn darstellt, ist ihre Identifikation relevant, da sie einerseits in den untersuchten Zementationen häufig vorkommt und andererseits von echtem Karbonatzement unterschieden werden muss, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

5.2 Karbonatzement in pleistozänen Lockersedimenten NW-Deutschlands

Die Ergebnisse der zementpetrographischen Untersuchungen sind aufschlusspezifisch in Anhang 6 dokumentiert. Bei eindeutig nachvollziehbarer Bildungsreihenfolge der beobachteten Zementtypen wurden sie Zementgenerationen zugeordnet, wobei sich die Definition der Zementgenerationen zunächst nur auf die Bildungsreihenfolge im jeweils untersuchten Zementationstyp eines Aufschlusses bezieht (Kap. 5.3). Bei unklarer zeitlicher Beziehung wurden die Zemente nur mit Nummern versehen. Mögliche Altersbeziehungen zwischen den Zementtypen werden in Kap. 5.3 diskutiert.

Bei den zementpetrographischen Untersuchungen zeigte sich, dass die Form von Zementationskörpern nicht auf die Beschaffenheit des Karbonatzementes zurückzuführen ist. Markante Beispiele dafür sind Zapfen und zusammengewachsene diskusförmige Konkretionen. Sowohl in flachen (z.B. Aufschluss Volkstorf, Horizont e., Taf. II/1) als auch in hängenden Zapfen (z.B. Aufschluss Breetze, Horizont d) wurden senkrecht bzw. parallel zu den Zapfenlängsachsen orientierte Dünnschliffe untersucht und keine Unterschiede der Zementbeschaffenheit oder -verteilung beobachtet. Gleiches gilt für zusammengewachsene diskusförmige Konkretionen (z.B. Aufschluss Freden, Aufschlussbereich V-3), bei denen keine Zementunterschiede zwischen den diskusförmigen Konkretionen und den zementierten Zwickeln, durch die sie zusammengewachsen sind, feststellbar waren. Daraus lässt sich ableiten, dass die Form von Zementationskörpern steuernde Faktoren (z.B. Strömungsgeschwindigkeit und -richtung der Porenlösung) zwar Einfluss auf die Position der Zementbildung, nicht aber auf die Beschaffenheit des Zementes (z.B. Kristallform, -größe, -gefüge) haben.

Hinweise für den Einfluss der Korn- bzw. Porengröße des Sedimentes auf die Kristallgröße des Zementes fanden sich in den Aufschlüssen

- Daerstorf (Grobsand – Mittelsand),
- Eime (Kies – sandiger Kies),
- Betheln (sandarmer Kies - sandreicher Kies) und
- Freden, Aufschlussbereich VIII-5 (z.T. mittel-sandiger Feinsand - schluffiger Feinsand).

Bei der Zementation der jeweils grobkörnigen Lagen bildete sich grobkristalliner Zement bzw. in den unmittelbar benachbarten feinkörnigen Lagen feinkristalliner Zement. In den meisten anderen untersuchten Zementationen ist kein Einfluss der Korn- oder Porengröße des Sedimentes auf die Zementkristallgröße erkennbar. Damit hat die Porengröße nur in den o.g. Ausnahmen steuernde Funktion auf die Größe von Zementkristallen.

5.2.1 Mikrit

Mikritzement gibt es sowohl in Massenzementationskörpern als auch in allen o.g. Konkretionstypen. Es handelt sich um an- bis subhedrale Kristalle, die durch inter- und intrakristalline Verunreinigungen braun bis dunkelbraun sind. Als verunreinigende Substanzen konnten Tonminerale (REM-Untersuchungen) und Fe-Hydroxide (Mikrosondenuntersuchungen) nachgewiesen werden. Er kommt in Zementgenerationen häufig zusammen mit Mikrosparit vor und bildet oft Meniskus-, Gravitations- und Dachzement (Kap. 5.2.7, 5.2.8). In Konkretionen, die es in Geschiebemergel gibt, erscheinen durch Mikrit zementierte Partien im Dünnschliff etwas heller und sind dichter als unzementierte Bereiche. Ansonsten sind Zement und feinkörnige Matrix des Geschiebemergels kaum voneinander zu unterscheiden. Dies beruht einerseits auf ähnlichen Eigenschaften (z.B. Kristall- bzw. Korngröße, Verunreinigungsintensität) und andererseits auf Reaktionen zwischen Karbonatdetritus, der in der schluffigen Matrix der Grundmoräne häufig vorkommt, und Karbonatzement, die die Korngrenzen des Detritus zerstören können (JAMES 1984).

5.2.2 Mikrosparit

Mikrosparit kommt wie Mikritzement sowohl in Massenzementationskörpern als auch in allen o.g. Konkretionstypen vor. Er tritt in Zementgenerationen teilweise zusammen mit Mikrit oder Blockkalzit auf. Dabei ist der Übergang zwischen Mikrit/Mikrosparit einerseits bzw. Mikrosparit/Blockkalzit andererseits sukzessive. Es gibt keine Hinweise auf die von FOLK (1965, 1974) postulierte Entstehung von Mikrosparit durch Rekristallisation von präexistierendem Mikrit. Damit ist davon auszugehen, dass sich Mikrosparit zumindest in dem hier untersuchten meteorischen Milieu zwanglos in die Zementkristallgrößenabfolge „Mikrit-Mikrosparit-Blockkalzit“ einordnen läßt. Mikrosparitzement wird von an- bis subhedralen Kristallen gebildet, die einschlussarm sein oder wie Mikrit durch inter- und intrakristalline Verunreinigungen eine braune Eigenfarbe haben können. Als verunreinigende Substanzen wurden auch hier Tonminerale (Taf. III/1) und Fe-Hydroxide (z.B. Aufschluss Engelade) nachgewiesen.

5.2.3 Blockkalzit

Blockkalzitkristalle sind meist sub- bis euhedral, selten anhedral und bis 150 µm groß. Vereinzelt gibt es – vor allem bei drusigem Mosaikzement (Taf. III/2) – Kristallgrößen bis 300 µm (Aufschlüsse Bornhausen Horizont d, Freden Aufschlussbereich II-1) bzw. bis 500 µm (Aufschlüsse Ödishausen, Freden Aufschlussbereich III). Die Kristalle sind überwiegend einschlussarm, teilweise auch einschlussführend. Vereinzelt kommt zwischen den Zementkristallen karbonatische Pseudomatrix vor (z.B. Eime, Betheln). Wenn sie gleichzeitig mit feinkristallinem Zement (Mikrit / Mikrosparit) gebildet wurden, haben sie - wie dieser - intra- und interkristalline Verunreinigungen (z.B. Aufschlüsse Breetze, Horizont d, Coppenbrügge Horizont a). Dabei gibt es Zementationen, in denen Blockkalzit sukzessive in Mikrit / Mikrosparit (z.B. Aufschluss Volkstorf, Horizont e) oder poikilotropischen Zement (Aufschluss Daerstorf) übergeht und solche, in denen die verschiedenen Kristalltypen zwar gleichzeitig entstanden, aber im Sediment jeweils getrennt nur in bestimmten, unregelmäßig fleckenhaften Bereichen (z.B. Poren) vorkommen (z.B. Aufschluss Holzen). Während im ersten Fall von sich sukzessive ändernden Zementationsbedingungen auszugehen ist, ist der zweite Fall typisch für die Bildung im vadosen Milieu, in dem partienweise wassergesättigte Bereiche vorkommen.

5.2.4 Blattförmiger Zement

Karbonatzement aus blattförmigen Kristallen kommt sowohl in Konkretionen als auch in Massenzementationskörpern vor (Taf. IV/2-4). Blattförmiger Zement ist sub- bis euhedral und meist einschlussarm. Die Kristalle sind bis 30 µm breit und zwischen 5 bis 80 µm, selten bis 100 µm lang. Auffallend große blattförmige Kristalle gibt es in den Aufschlüssen

- Eime (Kristallbreite: bis 400 µm, Kristalllänge: bis 2000 µm) und
- Ödishausen (Kristallbreite: bis 200 µm, Kristalllänge: bis 1000 µm).

Blattförmiger Zement bildet Zementsäume meist auf Detritus und vereinzelt auch auf älterem Zement (Kap. 6.3.3). Neben vollständigen Zementsäumen (Isopachenzement) bildet er häufig Teilsäume und fleckenhafte Anwachsungen mehrerer Kristalle, die keine bevorzugte Wachstumsposition haben. In unvollständigen Zementsäumen gehen blattförmige Kristalle teilweise sukzessive in granulare über (z.B. Aufschluss Volkstorf Horizont c). Neben gleichmäßig dicken Zementsäumen gibt es gelegentlich auch solche, deren Mächtigkeit schwankt, ohne dass eine bevorzugte Orientierung dickerer oder dünnerer Saumabschnitte erkennbar war (z.B. Aufschluss Volkstorf Horizont d).

Häufig sind zementierte Bereiche, in denen siliziklastischer Detritus gut ausgebildete Zementsäume, karbonatischer Detritus dagegen Zementsäume aus deutlich kleineren Kristallen oder gar keine hat (z.B. Aufschlüsse Eime, Breetze Horizont d.). Auf mikritischem Substrat, aus dem karbonatischer Detritus in den untersuchten Sedimenten häufig besteht, führte BATHURST (1975) behinderte Kristallisation von Karbonatzement auf ein Überangebot an Kristallisationskeimen zurück. Oft besteht der vorkommende karbonatische Detritus auch aus grobkristallinem Kalk (z.B. Schillkalk, Oolith), so dass wahrscheinlich eher verschmutzte Kornoberflächen für behinderte Zementbildung verantwortlich sind. Da Verunreinigungen (z.B. durch Fe-Hydroxide) in den Dünnschliffen meist nicht erkennbar waren, ist davon auszugehen, dass die Oberflächen nur zeitweilig verschmutzt waren. Fasst man diese Befunde zusammen, sind Biofilme aus organischer Substanz die wahrscheinlichste Ursache für substratabhängig unterschiedliches Wachstum von Zement. Einerseits sind organische Verunreinigungen in der phreatischen Zone geochemisch nicht sehr stabil und können dementsprechend schnell wieder zerstört werden (BOULDING 1995: 146). Andererseits ist die Aktivität von Mikroorganismen, die Biofilme um Feststoffe bilden, häufig von der chemischen Beschaffenheit des Aufwuchssubstrates abhängig (LITTLE et al. 1997, HAUSNER 1999). Die Wachstumsbehinderung von Isopachenzement auf karbonatischem Detritus wird damit auf Mikroorganismen zurückgeführt, die bevorzugt karbonatisches Substrat besiedelten. Sie blockierten potentielle Kristallisationskeime, die karbonatischer Detritus darstellt, durch Verunreinigung und behinderten bzw. unterbanden dadurch das Zementwachstum.

5.2.5 Syntaxiale Anwachsäume

In fast allen untersuchten Sedimenten gibt es detritische Echinodermenreste. Bei ihnen handelt es sich um Reste nordisch-skandinavischer Crinoidenkalksteine z.B. des Silur, die mit dem Inlandeis nach NW-Deutschland gelangten. Im Bergland sind sie vor allem Abtragungsprodukte mesozoischer Schichten (z.B. Oberer Muschelkalk) lokaler Herkunft. Echinodermenreste haben sehr häufig syntaxiale Anwachsäume.

Es handelt sich meist um einschlussarme, granulare Kristalle, die Echinodermenreste vollständig umschließen und damit Hinweise auf Entstehung

im meteorisch-phreatischen Milieu geben. Vereinzelt gibt es syntaxiale Anwachsäume, die auf Echinodermenresten fleckenhaft aufwachsen, allerdings ohne dabei bevorzugte Wachstumspositionen zu haben (z.B. Aufschluss Freden, Aufschlussbereich V-1). Dies ist möglicherweise auf verunreinigte Oberflächen des Detritus zurückzuführen, die das Zementwachstum verhinderten. Vergleichbare Bildungen beschrieb REINHOLD (1996) aus Malm-Karbonaten Süddeutschlands, wo die randliche Mikritisierung von Echinodermenresten die Bildung syntaxialer Anwachsäume unterband.

In den Aufschlüssen Holzen und Volkstorf (Horizont a) treten auch einschlussführende, syntaxiale Anwachsäume auf, die Meniskuszement bilden (Taf. III/3, III/7), was auf die Genese unter vadosen Bedingungen hinweist. Als Milieu für die Bildung von syntaxialen Anwachsäumen wurde in der Literatur bislang nur der (marin-meteorisch-)phreatische Bereich und die Versenkungsdiagenese diskutiert (z.B. KOCH & ZINKERNAGEL 1996). Syntaxiale Anwachsäume, die Ähnlichkeit mit Gravitationszement haben, wurden von GÖRÜR (1979) als submarine Bildung interpretiert, da die geologische Entwicklung der Sedimente vadoses Milieu unwahrscheinlich macht und auf den Oberseiten der Echinodermenreste Mikrit auftritt, der das Wachstum behinderte. Damit werden hier erstmals Hinweise auf die meteorisch-vadose Entstehung von syntaxialen Anwachsäumen vorgelegt.

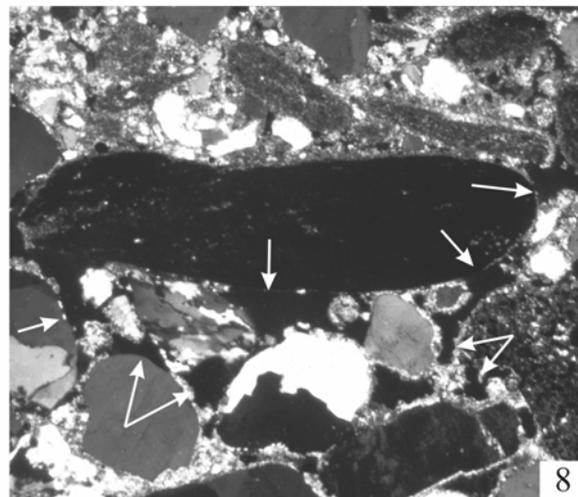
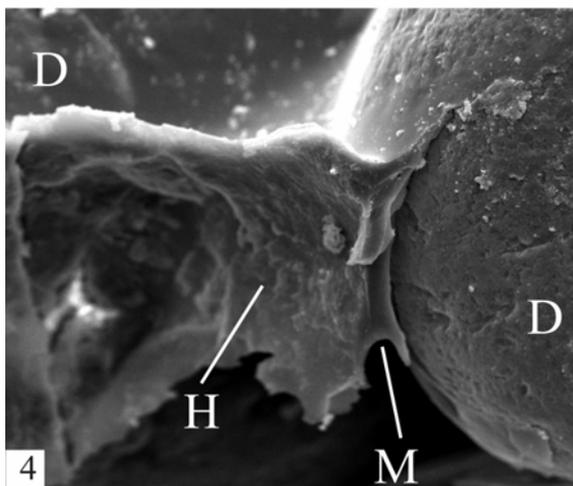
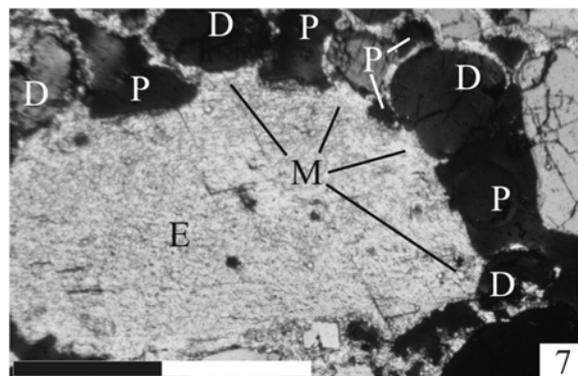
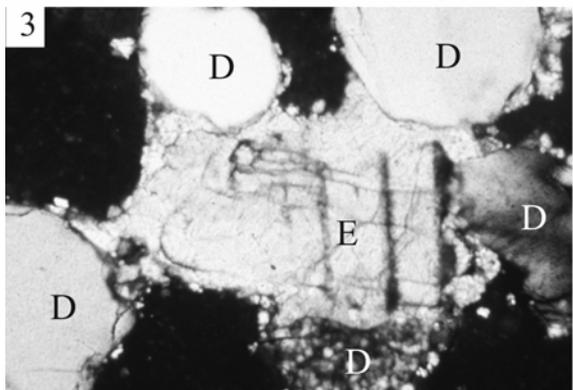
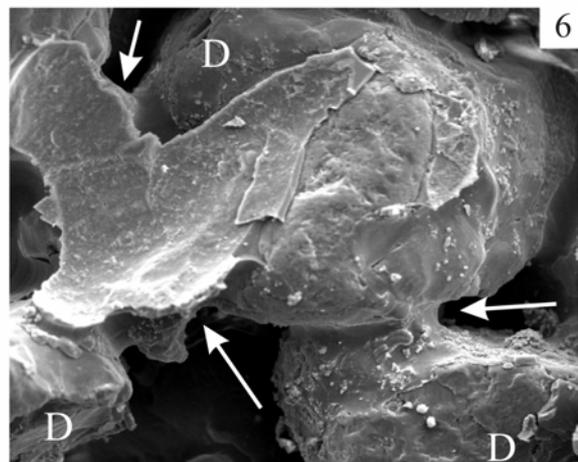
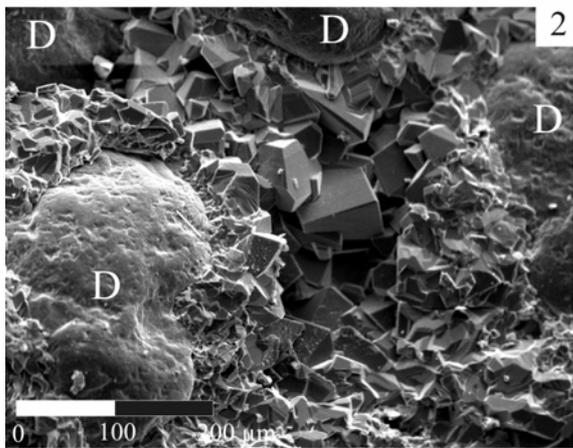
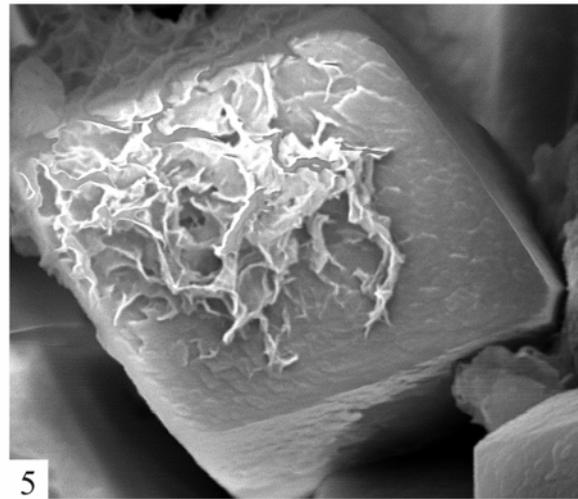
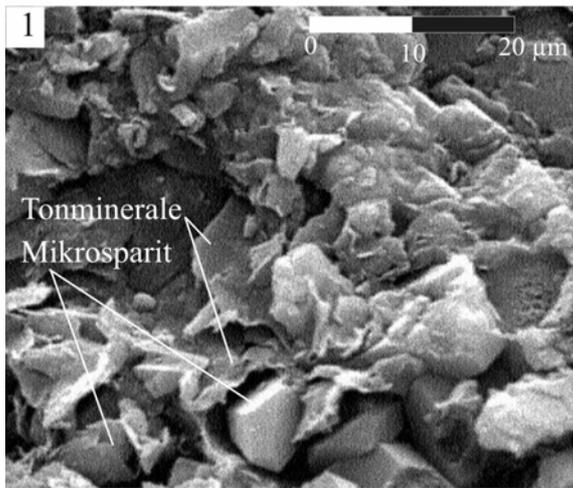
5.2.6 Poikilotopischer Zement

Poikilotopischer Zement kommt in kugeligen Konkretionen in den Aufschlüssen Daerstorf und Breetze (Horizont d, Taf. IV/1) vor. Im letzteren gibt es ihn seltener auch in hängenden Zapfen und in Massenzementationskörpern. Die einschlussarmen Kristalle sind zwischen 300 und 1500 µm, selten bis 2400 µm groß. Es fällt auf, dass poikilotopischer Zement ausschließlich in Schmelzwasserablagerungen mit sehr niedrigem Gesamtkarbonatgehalt (< 1,5 Gew.-%) auftritt. In den Sedimenten aller anderen untersuchten Aufschlüsse, mit i.d.R. wesentlich höherem Gesamtkarbonatgehalt, gibt es dagegen keinen poikilotopischen Zement. Dies weist darauf hin, dass die Armut an Kristallisationskeimen, die detritisches Karbonat darstellt, ein wesentlicher Faktor ist, der die Bildung von poikilotopischem Zement im untersuchten oberflächennahen, meteorischen Diagenesemilieu steuert.

Tafel III: Karbonatzement (1)

- Taf. III/1: Intensive Verwachsung von Mikrosparit und Tonmineralen. REM/EDX-Aufnahme, Aufschluss Holzen, Zementgeneration 1.
- Taf. III/2: REM-Aufnahme von drusigem Blockkalzit im Porenraum zwischen Detritus (D), Aufschluss Eime, Massenzementationskörper (Horizont a).
- Taf. III/3: Dünnschliffbild eines Echinodermerrestes (E), dessen syntaxialer Anwachsraum Menisken zum benachbarten siliziklastischen Detritus (D) bildet. schwarz = offener Porenraum, Länge des Maßstabs entspricht 2,5 mm. Aufschluss Betheln.
- Taf. III/4: REM-Aufnahme von Meniskuszement (M) der ursprünglich drei Körner (D) verband, von denen eines heraus gebrochen ist, so dass nur noch die Hohlform im Zement (H) erkennbar ist. Bildbreite entspricht etwa 120 µm, Aufschluss Copenbrügge, Horizont b.
- Taf. III/5: REM-Aufnahme eines groben Blockkalzitkristalls, auf dem feine Kalzitlaminae und -krusten vorkommen. Bildbreite entspricht 150 µm, Aufschluss Freden, Aufschlussbereich II-2.
- Taf. III/6: Durch Meniskuszement (Pfeile) zementierter Detritus (D). Ausschnitt eines mäßig zementierten Teils eines hängenden Zapfen. REM-Aufnahme, Bildbreite entspricht 0,4 mm, Aufschluss Breetze, Horizont d.
- Taf. III/7: Dünnschliffbild eines Echinodermerrestes (E), dessen syntaxialer Anwachsraum Menisken (M) zum benachbarten siliziklastischen Detritus (D) bildet. P = offener Porenraum, Länge des Maßstabs entspricht 3 mm. Aufschluss Volkstorf, Horizont a., Zementgeneration 1b.
- Taf. III/8: Dünnschliffaufnahme von Dachzement, der sich oberhalb eines plattigen Gerölls bildete. Während oberhalb des Gerölls kaum offener Porenraum vorkommt, ist er unterhalb nicht selten (Pfeile). Gekreuzte Nicols, Bildbreite entspricht 4 mm, Aufschluss Helpensen, Horizont b.

Tafel III



In beiden Aufschlüssen kommt poikilotopischer Zement innerhalb einzelner Poren oft gemeinsam mit Blockkalzit vor. Im Aufschluss Daerstorf wurden vor allem an den Rändern, teilweise aber auch innerhalb von poikilotopischen Kristallen, Bereiche beobachtet, in denen Verunreinigungen die Kristallgrenzen von Blockkalzit nachzeichnen. Im Aufschluss Breetze (Horizont d) vergrößert sich der Blockkalzit bereichsweise sukzessive, so dass er einzelne Körner teilweise umwächst und damit Übergangsformen zum poikilotopischen Zement bildet. Der Mangel an Kristallisationskeimen führte hier in Verbindung mit Zementation unter relativ konstanten Randbedingungen offensichtlich zu größeren Zementkristallen (Ostwald-Reifung).

KOCH & ZINKERNAGEL (1996) beschrieben für die Bildung von poikilotopischem Zement ein Milieu, in dem die Zementation langsam bei geringer Fließrate des Porenwassers abließ und nannten dafür die tiefere Versenkungsdiagenese, bei der solche Bedingungen typisch sind. Die Zementation in einem quasi störungsfreien System kann nach den hier gemachten Befunden in Übereinstimmung mit ABER (1978), BUCZYNSKI & CHAFETZ (1987) und GHOSH (1997) auch in oberflächennahen Sedimenten vorkommen, wobei die notwendigen konstanten Zementationsbedingungen in oberflächennahen Systemen jedoch eher die Ausnahme darstellen.

5.2.7 Meniskus- und Gravitationszement

Meniskus- und Gravitationszement treten in den untersuchten Zementationskörpern sehr häufig auf (Taf. III/4, III/6). Es handelt sich überwiegend um kleine, an- bis subhedrale Kristalle (Mikrit - Mikrospatit), seltener um Blockkalzit und nur vereinzelt um syntaxiale Anwachsäume (Kap. 5.2.5). Innerhalb der Zementationskörper sind Meniskus- und Gravitationszement oft in mm- bis cm-durchmessenden, fleckenhaften Bereichen häufig. Ansonsten sind sie eher selten oder fehlen ganz.

Meniskus- und Gravitationszementkristalle sind einschlussführend bis -reich und stets stärker verunreinigt als benachbarter phreatisch entstandener Zement. Dabei können auch polarisationsmikroskopisch kaum erkennbare Unterschiede in der Verunreinigungsintensität signifikant unterschiedliches Fluoreszenzverhalten verursachen, so dass Meniskus- und Gravitationszement oft erst bei den fluoreszenzmikroskopischen Untersuchungen zu erkennen waren.

In einigen Aufschlüssen (z.B. Freden Aufschlussbereich II-2, Copenbrügge Horizont d., Bornhausen Horizont a.) konnte eine Phase vadoser Zementation nur durch Verunreinigungen identifiziert werden, die im ansonsten einschluss-

armen Zement Menisken nachzeichnen (Abb. 7). Da die einschlussreichen Partien von weniger verunreinigtem Mosaikzement überwachsen wurden, müssen sie früher entstanden sein, wobei folgende Bildungsprozesse möglich sind:

1. Zementgeneration 1 entstand als stärker verunreinigter Blockkalzit im vadosen, Zementgeneration 2 im phreatischen Milieu. Die geänderten Bildungsbedingungen wirkten sich nur auf die Verunreinigungsintensität, nicht aber auf andere Kristalleigenschaften aus.
2. Blockkalzit ist durch Neomorphose aus älterem Meniskuszement entstanden, der - wie vergleichbarer Zement in vielen anderen Aufschlüssen auch - feinkristallin und einschlussreich war. Da sich die Zementeigenschaften von Meniskuszement und Mosaikzement nur hinsichtlich der Verunreinigungsintensität unterscheiden, fand die Neomorphose wahrscheinlich zeitgleich mit der Bildung des Mosaikzementes und damit im phreatischen Milieu statt.

Bei Dünnschliffuntersuchungen fand sich kein Hinweis, der einen der beiden Bildungsprozesse ausschließt. Allerdings spricht eher für die Neomorphose, dass Meniskuszement in fast allen Zementationskörpern aus feinkristallinem Zement (Mikrit-Mikrospatit) besteht.

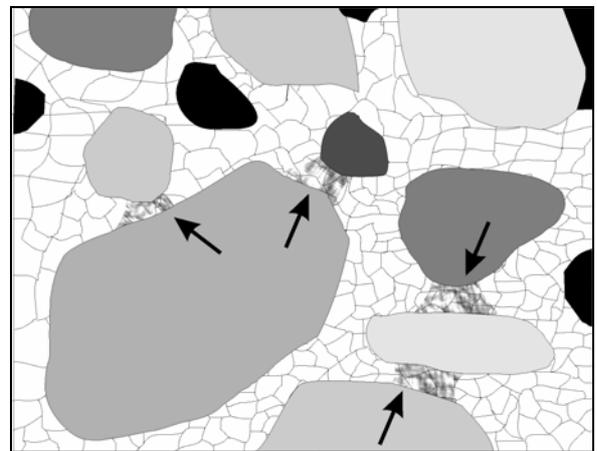


Abb. 7: Schemazeichnung eines durch Blockkalzit zementierten Bereiches. Durch vereinzelt vorkommende stärkere Verunreinigungen (Pfeile) in den ansonsten einschlussarmen Blockkalzit-Kristallen (weiß) werden Menisken zwischen Körnern (grau) nachgezeichnet (schwarz = offener Porenraum). Beispiel aus dem Aufschluss Freden, Aufschlussbereich II-2.

Zement unter Körnern bzw. in Menisken zwischen Detritus wurde auch in Bereichen beobachtet, in denen Zement ansonsten ganz überwiegend unregelmäßig fleckenhaft auf Detritus vorkommt (z.B. Aufschluss Krankenhagen). Dabei handelt es sich jedoch wahrscheinlich um zufällige Zementansammlungen, die zwar Meniskus- und Gravita-

tionszement ähneln, die aber nicht das Kriterium der bevorzugten Wachstumsposition erfüllen und dementsprechend auch nicht als vadose Bildung interpretiert wurden. In Zementationskörpern, in denen Meniskus- und Gravitationszement vorkommen, gibt es neben anderen typischen Merkmalen vadoser Entstehung (z.B. heterogenen Zementbeschaffenheit und -verteilung, poren-rundende Zementation) häufig auch Dachzement (s.u.).

5.2.8 Dachzement

In vielen der in dieser Arbeit untersuchten Zementationskörpern, in denen Gravitations- und Meniskuszement nachgewiesen wurde, traten außerdem Zementanreicherungen oberhalb plattiger Gerölle auf, für die hier der Begriff „**Dachzement**“ eingeführt wird. Es handelt sich dabei um Zementationsformen, deren Bildung auf Sickerwasser in der vadosen Zone zurückzuführen ist, dessen vertikale Abwärtsbewegung von größeren Geröllen gehemmt wurde. Oberhalb dieser Gerölle kam es durch eine Kombination von Aufstau- und Oberflächenspannungseffekten zu längeren Verweilzeiten des Wassers, während ihre Unterseite weitgehend unbenetzt blieb, da

1. entweder nicht genug Wasser zur Verfügung stand, um die genannten Aufstau- und Oberflächenspannungseffekte durch hydrostatischen Druck des nachsickernden Wassers zu überwinden, so dass die Gerölle das Ende der entsprechenden Sickerbahnen darstellen,
2. oder - bei größerer Sickerwassermenge - sich das Wasser, das über das Geröll hinaus abströmen konnte, adhäsiv an den Kornoberflächen benachbarter Körner nach unten bewegte, wodurch sich unterhalb des Gerölls eine Trockenzone bildete.

Durch Dachzement entstanden bei 1. isolierte zementierte Partien, bei denen der Detritus oberhalb eines größeren Gerölls etwa spitzdachförmig verkittet ist (Abb. 8a), während das umgebende Lockersediment weitgehend unzementiert blieb. Bei 2. blieben wenig oder nicht zementierte Bereiche unterhalb größerer Gerölle in einem ansonsten weitgehend zementierten Areal zurück (Abb. 8b, Taf. III/8). Dachzement wurde in zahlreichen untersuchten Vorkommen (z.B. Bad Mündel/Hachmühlen, Betheln, Helsen, Volkstorf) beobachtet.

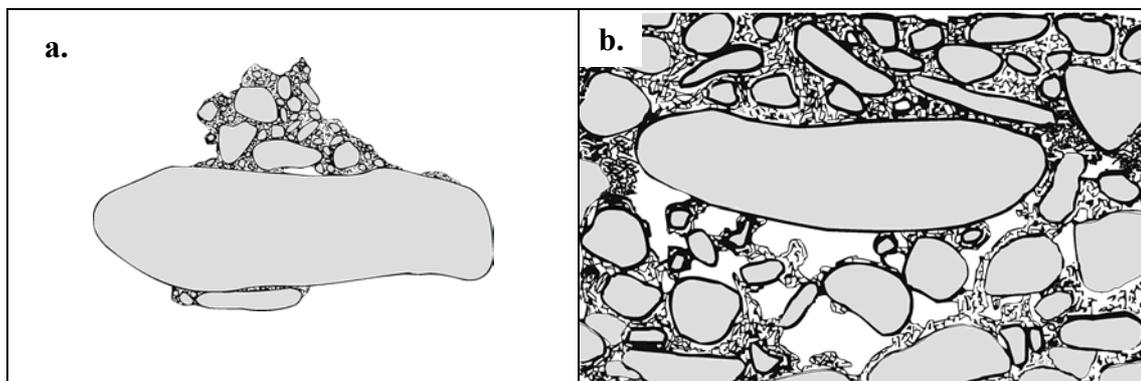


Abb. 8: Schematische, unmaßstäbliche Darstellung von Dachzement. Grau: Detritus, schwarz: Kalzitcement, weiß: Offener Porenraum.

Obwohl dieser Zementationstyp im Untersuchungsgebiet ausgesprochen häufig vorkam, finden sich relativ selten vergleichbare Beispiele in der Literatur (TAYLOR & ILLING 1969, WARD 1975). KLEIN (1939) beschrieb vergleichbare Bildungen in quartären Flussablagerungen des Alpenvorlandes. BADIOZAMANI et al. (1977) konnten im Rahmen experimenteller Karbonatzementation aber ähnliche Bildungen nachweisen. Für die seltene Erwähnung dieses Zementationstyps sind verschiedene Gründe vorstellbar:

- Die untersuchten Sedimente befinden sich in einem sehr frühen Diagenese- bzw. Zementationsstadium, in dem diese „Embryonalformen“ im Gegensatz zu Sedimenten mit fortgeschrittener

Zementation, in denen Dachzement durch jüngeren Zement überprägt sein kann, noch beobachtbar sind. Für diese Möglichkeit spricht die Nennung ähnlicher Strukturen in (sub-)rezenten „beachrock“-Sedimenten, die sich in einem vergleichbar frühen Diagenesestadium befinden, durch TAYLOR & ILLING (1969).

- Auf Grund der hier gemachten Beobachtungen wird angenommen, dass die Bildung von Dachzement nur in sehr schlecht sortierten Sedimenten stattfindet (Ungleichförmigkeitsgrad U z.T. bis > 50), in denen sich Sickerwasser auf größeren Komponenten aufstauen kann. Untersuchungen, die sich ebenfalls mit frühen Stadien der Karbonatzementation im vadosen Milieu

beschäftigten (z.B. DUNHAM 1971, MÜLLER 1971, DRAVIS 1996), enthalten zwar keine Angaben zur Sortierung der zementierten Sedimente. Die Beschreibung der jeweiligen Gesteine läßt jedoch gut sortierte Ablagerungen ohne große, stauende Komponenten vermuten, so dass sich Dachzement hier wahrscheinlich nicht bilden kann.

Dachzement gibt es in folgenden Aufschlüssen:

- Volkstorf (Horizont c),
- Krankenhagen,
- Rumbeck,
- Helpensen (Horizonte a., b),
- Bad Münder / Hachmühlen,
- Eime,
- Betheln,
- Bornhausen (Horizont a),
- Ödishausen.

5.2.9 Zementgeochemie

Die untersuchten karbonatischen Zementationen in pleistozänen Lockersedimenten NW-Deutschlands bestehen durchweg aus Niedrig-Mg-Kalzit. Der Mg-Gehalt liegt in allen untersuchten Aufschlüssen meist deutlich unter 2 Mol-%, was ebenso wie die gemessenen niedrigen Sr-Konzentrationen typisch für eine Bildung im meteorischen Milieu ist (z.B. LOHMANN 1988, TUCKER & WRIGHT 1990). Die ebenfalls überwiegend niedrigen Fe- und Mn-Konzentrationen des Kalzits lassen sich als Merkmal für die Bildung im eher oxidierenden Milieu interpretieren, in dem im Wasser gelöste Fe- und Mn-Ionen relativ schnell in Form von Oxid und Hydroxid fixiert werden (z.B. LOHMANN 1988). Sekundär gebildetes Fe- und Mn- Oxid / Hydroxid wurde in allen Aufschlüssen makroskopisch und mikroskopisch nachgewiesen.

Die geochemische Zusammensetzung der Zemente zeigt keine signifikante Abhängigkeit von Kristall- oder Zementtyp. Lediglich bei der Untersuchung der chemischen Zusammensetzung feinkristalliner Zemente (Mikrit, Mikrospatit) wurden in den Aufschlüssen Krankenhagen, Helpensen, Bad Münder / Hachmühlen, Eime, Freden, Engelage z.T. hohe Mg-, Fe- und Mn-Konzentrationen gemessen. Nach der Synopsis aller Untersuchungsbefunde handelt es sich bei den untersuchten

Partikeln wahrscheinlich einerseits um mikritische Pseudomatrix aus marinem Karbonatdetritus (z.B. Aufschluss Eime), für den z.B. hohe Mg-Konzentrationen nicht ungewöhnlich sind. Andererseits könnte es sich um Verunreinigungen durch Fe- und Mn-Hydroxid handeln, das auf Grund der geringen Partikelgröße ungewollt randlich mitgemessen wurde (z.B. Aufschluss Helpensen Horizont b.).

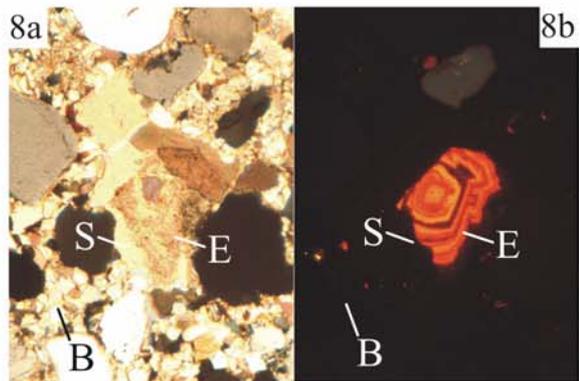
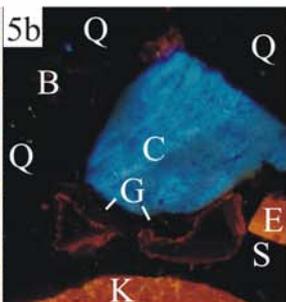
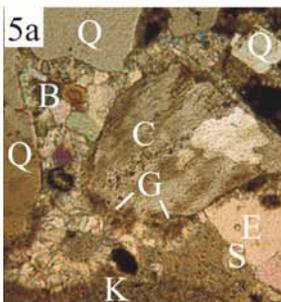
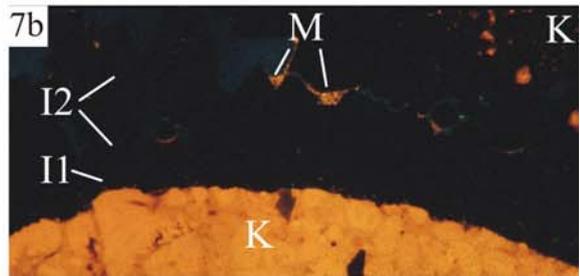
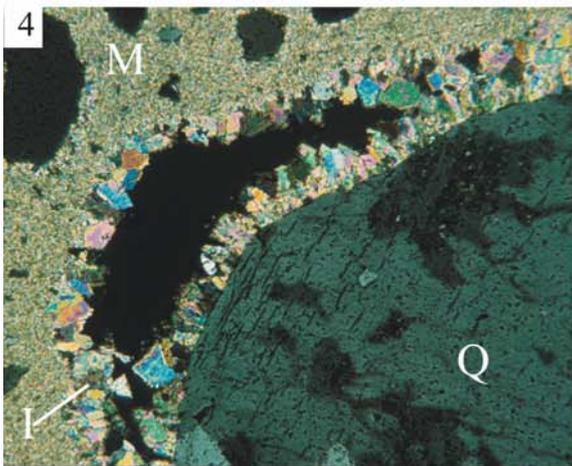
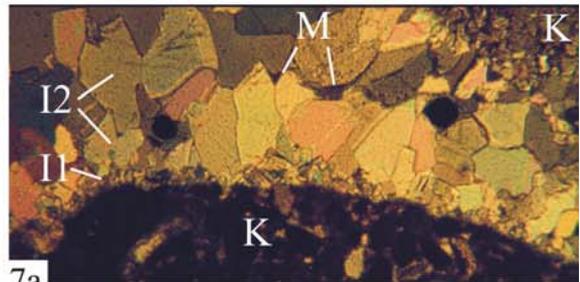
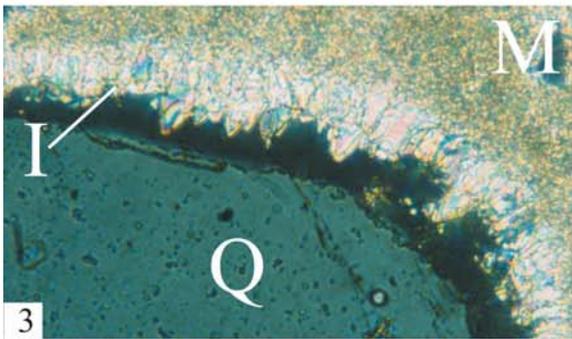
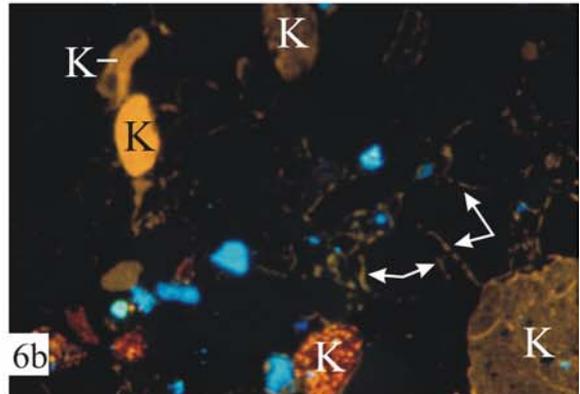
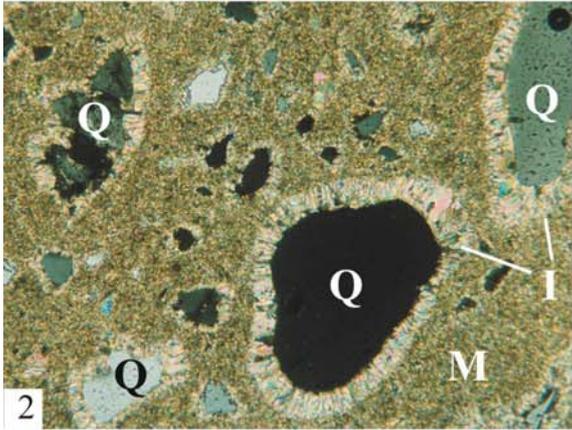
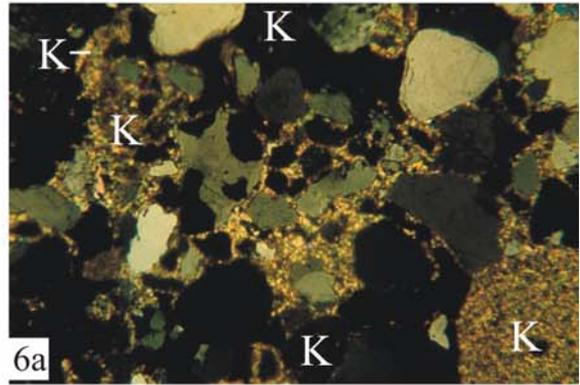
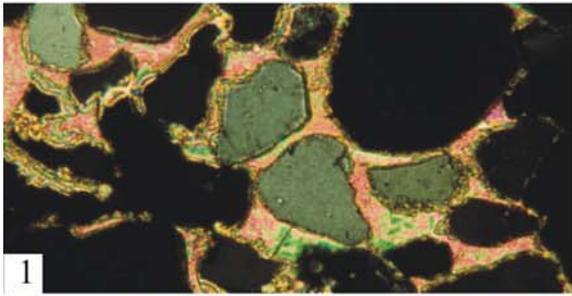
Die Zementationen im Aufschluss Helpensen haben im Vergleich zu allen anderen (Mittelwert 0,7 Mol-%) einen leicht erhöhten Mg-Gehalt (Mittelwert 1,3 Mol-%). Da dies im Aufschluss Helpensen nicht nur für phreatisch, sondern auch für vados entstandenen Zement gilt, kann Mg nicht als Lösungsfracht aus dem Untergrund stammen, der aus z.T. dolomitischen Schichten des Keupers besteht. Es ist wahrscheinlicher, dass Dolomitdetritus, der im Sediment bis über 15 Stück-% ausmachen kann (KULLE 1985), die Mg-Quelle ist. In diesem Zusammenhang fällt der niedrige Mg-Gehalt der Zementationen in Volkstorf (Mittelwert 0,6 Mol-%) auf, wo das Lockersediment Dolomit mit über 25 % (Anmerkung: wahrscheinlich Stück-%) enthalten kann (GAUGER 1978a). Dieser eher gegensätzliche Befund ist möglicherweise auf die unterschiedliche Korngröße des Detritus in den Aufschlüssen Helpensen und Volkstorf zurückzuführen. Im Aufschluss Helpensen besteht der dolomitische Detritus überwiegend aus Sand und Schluff, im Aufschluss Volkstorf hauptsächlich aus Kies. Damit sind die zur Lösung zur Verfügung stehenden Kornoberflächen im Aufschluss Helpensen erheblich größer als im Aufschluss Volkstorf.

Syntaxiale Anwachssäume gibt es in den untersuchten Zementationskörpern um detritische, paläozoische und mesozoische Echinodermenreste. Durch die Mikrosondenanalysen und die Anfärbung der Dünnschliffe zeigte sich, dass das Aufwuchssubstrat häufig signifikant höhere Konzentrationen von Nebenelementen (Fe, Mg) hat, als der jeweilige Anwachssaum (z.B. Aufschlüsse Krankenhagen, Ödishausen), der wie der übrige Zement aus Niedrig-Mg-Kalzit besteht.

Tafel IV: Karbonatzement (2)

- Taf. IV/1: Dünnschliffaufnahme eines poikilotropischen Kristalls, der siliziklastischen Detritus (schwarz, grau) umwächst. Gekreuzte Nicols, Bildbreite entspricht 2,5 mm., Aufschluss Breetze, Horizont d.
- Taf. IV/2: Dünnschliff einer Konkretion. Um überwiegend siliziklastischen Detritus (Q) kommt Isopachenzement aus meist blattförmigen Kristallen vor (I). Die braune Matrix (M) besteht aus feinkörnigem Detritus und Karbonatzement, die oft nicht voneinander zu unterscheiden sind. Bildbreite entspricht 1 mm, Aufschluss Volkstorf, Horizont f.
- Taf. IV/3: Dünnschliffbild von Isopachenzement (I), der von feinkörniger Matrix (M) aus in den Hohlraum zwischen Matrix und Detritus (Quarzkorn = Q) hinein wuchs (Kristallspitzen zeigen auf Detritus). Bildbreite entspricht 0,5 mm, parallele Nicols, Massenzementationskörper, Aufschluss Breetze, Horizont a.
- Taf. IV/4: Dünnschliffbild von Isopachenzement (I), der sowohl von der feinkörnigen Matrix (M) als auch vom Detritus (Quarzkorn = Q) aus in den Hohlraum hinein wuchs (Kristallspitzen zeigen in die Porenmitte). Konkretion aus dem untersten Horizont, Bildbreite entspricht 0,7 mm gekreuzte Nicols, kugelige Konkretionen Aufschluss Breetze, Horizont b.
- Taf. IV/5: Dünnschliffaufnahme (gekreuzte Nicols, a) bzw. Kathodolumineszenz-Aufnahme (b): Als erste Zementgeneration kommt nicht lumineszierender Gravitationszement (G) unterhalb eines siliziklastischen Kornes (C) vor. Dazu gibt es einen syntaxialen Anwachsraum (S) um ein orange lumineszierendes Echinodermenfragment (E) und Blockkalzit (B) im Porenraum zwischen dem Detritus (Q = siliziklastisch, K = karbonatisch), die teilweise schwach orange lumineszieren. Bildbreite entspricht jeweils 3 mm, Massenzementationskörper Aufschluss Betheln.
- Taf. IV/6: Unterschiedliches Lumineszenzverhalten von Zement: Dünnschliffaufnahme eines zementierten Bereiches in Mittelterrassenablagerungen (a: gekreuzte Nicols, b: KL-Aufnahme). Der vor allem aus Quarz (z.T. blau lumineszierend) und Karbonat (K, z.T. orange bis rot lumineszierend) bestehende Detritus wird durch Mikrosparit zementiert. Der Zement luminesziert lediglich an den Säumen um Körner im zentralen Bereich des Dünnschliffs (Pfeile), in allen anderen Bereichen nicht. Bildbreite entspricht 1 mm, Aufschluss Helpensen, Horizont b.
- Taf. IV/7: Dünnschliffaufnahmen (a. gekreuzte Nicols, b. KL-Aufnahme) aus dem höheren Bereich von Massenzementations-Horizont c. Auf detritischem Karbonat (K), das teilweise luminesziert, gibt es feinkristallinen (I1) und grobkristallinen (I2) Isopachenzement. Zwischen bzw. auf nicht lumineszierenden Isopachenzementkristallen befindet sich orange lumineszierende Pseudomatrix (P). Bildbreite entspricht 3 mm, Aufschluss Eime, Massenzementations-Horizont c.
- Taf. IV/8: Dünnschliffaufnahmen (a. gekreuzte Nicols, b. KL-Aufnahme) von überwiegend siliziklastischem Detritus (gekreuzte Nicols: weiß, grau, schwarz, KL-Bild: dunkelblau, schwarz) und einem detritischem Echinodermenfragment (E) mit ausgeprägter KL-Zonierung. Der aufgewachsene syntaxiale Anwachsraum (S) luminesziert ebenso wie der porenfüllende Blockkalzit (B) nicht. Bildbreite entspricht jeweils 3 mm, Aufschluss Freden, Aufschlussbereich IV.

Tafel IV



5.2.10 Kathodolumineszenzverhalten

In den Aufschlüssen Helpensen (Kap. 6.4.8, Taf. IV/6) und Betheln (Kap. 6.4.13) gibt es rot bzw. orange lumineszierenden Kalzit-zement. In allen übrigen Aufschlüssen luminesziert Kalzit-zement nicht (Taf. IV/8), was mit den Ergebnissen der geochemischen Untersuchungen korreliert und typisch für die Bildung unter oxidierenden Bedingungen ist (z.B. KOCH & ZINKERNAGEL 1996, REINHOLD 1996), die bei vadosem Zement zu erwarten bzw. bei oberflächennah gebildetem phreatischem Zement nicht ungewöhnlich sind.

Im Aufschluss Betheln kommt nicht lumineszierender Kalzit nur im obersten Horizont durchweg, in den tieferen Horizonten als erste und letzte Bildung, zusammen mit orange lumineszierendem Zement vor (Taf. IV/5). Während der Transport von atmosphärischem Sauerstoff über das Sickerwasser die wichtigste O₂-Quelle im Grundwasser darstellt, wirken die Oxidation organischer und Umsetzungsprozesse anorganischer Substanz (Oxidation, Nitrifikation, Sulfurikation) sauerstoffzehrend. Dies führt im Grundwasser üblicherweise zu mit der Tiefe zunehmender Sauerstoffzehrung und reduzierenden Verhältnissen (MERKEL & SPERLING 1996). Dieses Verhalten korreliert mit dem Kathodolumineszenzverhalten des Kalzit-zementes in den Massenzementationskörpern im Aufschluss Betheln: In den tieferen Horizonten etablierten sich durch Sauerstoffzehrung sukzessive reduzierende Bedingungen, was nach BARNABY & RIMSTIDT (1989) typisch für phreatische Frühdiagenese ist. Dabei dürften hier vor allem Umsetzungsprozesse anorganischer Substanz (z.B. umgelagerter, mesozoischer Pyrit) sauerstoffzehrend wirken, da organischer Detritus in den glazifluviatilen Sedimenten nicht beobachtet wurde. Gleichzeitig sorgte im oberen Teil des Grundwasser-Körpers zutretendes Sickerwasser für Sauerstoffzufuhr und damit für oxidierende Bedingungen. In diesem Modell dokumentiert der jüngste, wieder nicht lumineszierende Anteil von Zementgeneration 2 wahrscheinlich erneut oxidierende Bedingungen, was auf eine zwischenzeitlich wieder abgesunkene Grundwasser-Oberfläche schließen läßt.

Die eindeutige Unterscheidung von karbonatischer Pseudomatrix (s.u.), die oft orange bis rot luminesziert und kalzitischem Mikrit-/Mikrospartizement, der nicht luminesziert, gelang oft nur durch Kathodolumineszenzuntersuchungen

(z.B. Holzen, Bornhausen, Coppenbrügge, Banteln).

5.2.11 Pseudomatrix

Karbonatische Pseudomatrix ist in den untersuchten Zementationen pleistozäner Lockersedimente NW-Deutschlands weit verbreitet. Es handelt sich um braunen bis dunkelbraunen Mikrit/Mikrospart, der anders als fest aufgewachsener Kalzit-zement nur adhäsiv an Substratoberflächen gebunden ist (Taf. V/3). Weitere Unterscheidungskriterien zwischen Pseudomatrix und Zement sind

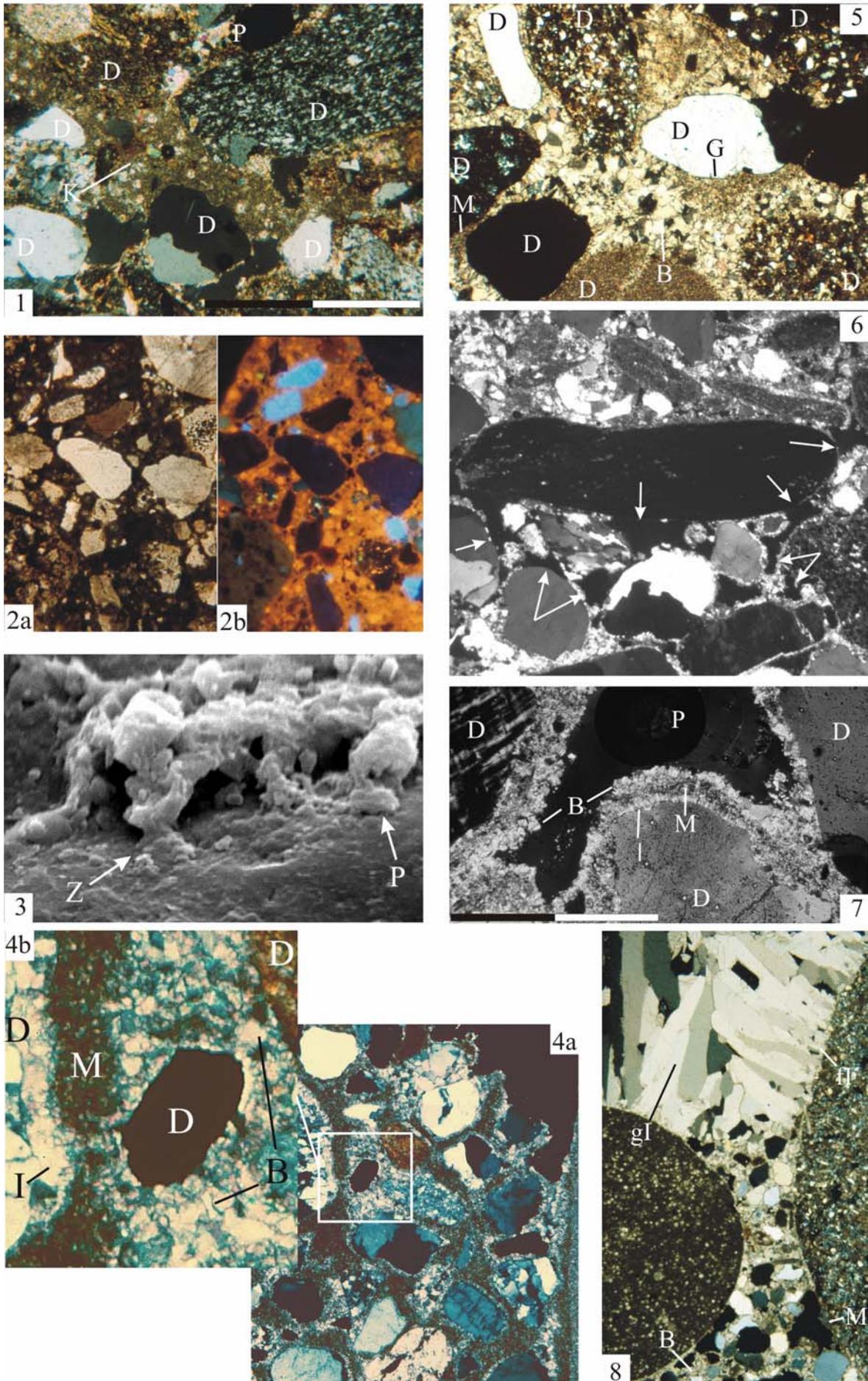
- die meist signifikant dunklere Eigenfarbe der Pseudomatrix, die auf intensiverer Verunreinigung der Kristalle beruht und
- das Kathodolumineszenzverhalten, da Pseudomatrix, im Gegensatz zum überwiegend nicht lumineszierenden Zement, meist schwach rötlich bis kräftig orange luminesziert (Taf. V/2).

In quantitativ relevanter Menge kommt karbonatische Pseudomatrix nur im Aufschluss Banteln vor, wo nahezu der gesamte Porenraum der untersuchten Partien durch Pseudomatrix plombiert wird und Kalzit-zement nur untergeordnet auftritt. Ansonsten besteht Pseudomatrix oft aus kleineren Ansammlungen von Mikrit/Mikrospart, der auf plattigen Geröllen, zwischen oder auf Zementkristallen vorkommt (Taf. IV/7). Außerdem gibt es zahlreiche Übergangsformen über wolkenartige Pseudomatrixansammlungen, die teilweise noch die ursprüngliche Form und Größe eines entfestigten Karbonatkorns erahnen lassen (Taf. V/1), bis hin zu karbonatischem Detritus, der durch noch nicht weit fortgeschrittene, randliche Entfestigung eine dünne Rinde aus Pseudomatrix hat. Während sie im nordwestdeutschen Flachland nur gelegentlich auftritt, gibt es sie in fast allen Aufschlüssen im niedersächsischen Bergland. Nach den Untersuchungsbefunden sind die im niedersächsischen Bergland weitverbreiteten Mergel bis Kalkmergel der Oberkreide („Plänerkalk“) eine bedeutende Pseudomatrixquelle. Zum einen handelt es sich bei den in der Pseudomatrix schwimmenden Mikrofossilien meist um Formen der Oberkreide (z.B. Calcsphären). Zum anderen lumineszieren noch intakte „Plänerkalk“-Gerölle ebenso wie die Pseudomatrix schwach rötlich bis kräftig orange (Taf. V/2). Weitere Pseudomatrixquellen sind sonstiger mesozoischer und paläozoischer (nordisch-skanidischer) Karbonatdetritus, feinkörnige Geschiebemergelmatrix sowie Löss.

Tafel V: Pseudomatrix und Zementationsphasen

- Taf. V/1: Dünnschliffaufnahme von Pseudomatrix (P), die vom linken oberen Bildrand diagonal durch das Bild läuft und sich zwischen siliziklastischem Detritus (D) befindet. Das ehemalige Karbonatkorn besteht aus braunem Mikrit / Mikrospatit, in dem Calcisphären schwimmen. Die Breite des Maßstabs entspricht 3 mm, Aufschluss Bornhausen, Horizont d.
- Taf. V/2: Dünnschliffaufnahme: a. Pseudomatrix als braune Grundmasse zwischen siliziklastischem Detritus (weiß-braun), b. orange lumineszierende karbonatische Pseudomatrix und teils blau, teils nicht lumineszierender, überwiegend siliziklastischer Detritus. Bildbreite entspricht jeweils 0,4 mm, Aufschluss Banteln.
- Taf. V/3: REM-Aufnahme von karbonatischer Pseudomatrix (P) und Kalzit (K) auf einem Quarzkorn. Während die Pseudomatrix (P) lediglich adhäsiv auf dem Korn klebt, ist der Kalzit aufgewachsen. Bildbreite entspricht 20 µm, Aufschluss Banteln.
- Taf. V/4: Dünnschliffaufnahmen aus einem Massenzementationskörper im oberen Teil von Weser-Mittelterrassenablagerungen (Aufschluss Rumbeck). Auf Detritus (D) kommt gelegentlich Isopachenzement (I) vor, der von teilweise porenfüllendem, braunem Mikrit / Mikrospatit (M) überwachsen wird. Der verbliebene Restporenraum wird z.T. mit Blockkalzit (B) aufgefüllt. Parallele Nicols, blau = Porenraum, der mit gefärbtem Kunstharz gefüllt ist; 4a: Übersichtsaufnahme Bildbreite entspricht 1 mm, 4b: Detail Bildbreite entspricht 0,3 mm.
- Taf. V/5: Dünnschliffaufnahme aus einem Massenzementationskörper: Meniskus- (M) und Gravitationszement (G) bilden die erste Zementgeneration. Der Porenraum zwischen Detritus (D) ist mit Blockkalzit (B) plombiert. Gekreuzte Nicols, Bildbreite entspricht 4 mm, Aufschluss Freden, Aufschlussbereich II-1.
- Taf. V/6: Dünnschliffaufnahme von Dachzement: Oberhalb eines plattigen Gerölls (Bildmitte) ist der Porenraum durch Mikrit / Mikrospatitzement fast vollständig zementiert. Dagegen ist der Porenraum seitlich und unterhalb des Gerölls weitgehend offen (Pfeile). Gekreuzte Nicols, Bildbreite entspricht 5 mm, Massenzementationskörper Aufschluss Helpensen, Horizont c.
- Taf. V/7: Neben Isopachenzement (I), der vereinzelt auf siliziklastischem Detritus (D) vorkommt, gibt es als zweite Generation einschlussreichen Mikrospatit (M). Den jüngsten Zement bildet einschlussarmer Blockkalzit (B). Länge des Maßstabs 0,5 mm, P = offener Porenraum, Massenzementationskörper in Schmelzwassersand, Aufschluss Engelade.
- Taf. V/8: Dünnschliffaufnahme (gekreuzte Nicols) eines Massenzementationskörpers (Aufschluss Eime, Horizont c.): Im unteren Teil des Bildes ist der Porenraum zwischen dem Kies mit Sand gefüllt und durch fleckenhaft vorkommenden, stark verunreinigten Mikritzement (M, Zementgeneration 1) und Blockkalzit (B, Zementgeneration 2) zementiert. Im oberen Teil gibt es keinen Sand im Porenraum zwischen dem Kies. Hier hat sich zunächst feinkristalliner (fI, Zementgeneration 1), dann grobkristalliner Isopachenzement (gI, Zementgeneration 2) gebildet. Bildbreite entspricht 3 mm.

Tafel V



5.3 Zementgenerationen in den untersuchten Aufschlüssen

Die Interpretation zementpetrographischer Befunde bildet die Grundlage für Aussagen zur zeitlichen Beziehung von Zementen und den paläohydrogeologischen Bedingungen während der Bildung. Dabei ist die Zementbildung häufig substratspezifisch oder in Aufschlüssen mit mehreren Zementationshorizonten horizontspezifisch unterschiedlich. Durch die Definition von substrat- bzw. horizontspezifischen **Zementgenerationen**, die im folgenden erläutert und in Tab. 6 zusammengefaßt wurden, wurden zunächst die relative Bildungsabfolge und das Bildungsmilieu der vorkommenden Zemente interpretiert. Zusammen mit Befunden, die sich aus der geologischen und paläohydrogeologischen Entwicklung des Aufschlusses ergeben und Aussagen zur hydrogeologischen Situation, die sich aus der Beschaffenheit von Zementationskörpern bzw. der Beziehung verschiedener Zementationskörper eines Aufschlusses zueinander ableiten lässt, bilden die zeitliche Beziehung der Zemente und der aus ihnen abgeleiteten Zementationsmilieus ein wesentliches Element für die Definition von lokalen, aufschlusspezifischen **Zementationsphasen** (Kap. 6.4).

Aufschluss Daerstorf

Mikrospatit und Blockkalzit bilden als erste Zementgeneration Teilsäume und fleckenhafte Aufwachsungen ohne bevorzugte Wachstumsposition, was auf phreatische Entstehung hinweist. Gleichmäßige syntaxiale Anwachsäume und poikilotopischer Zement sind ebenfalls in der phreatischen Zone entstanden. Der poikilotopische Zement entstand als zweite Zementgeneration, wobei der Übergang von Zementgeneration 1 zu Zementgeneration 2 für sukzessive Änderung der Zementationsbedingungen spricht. Die syntaxialen Anwachsäume lassen sich als substratspezifischer Zement keiner Zementgeneration zuordnen.

Aufschluss Hittfeld

Die im Aufschluss Hittfeld vorkommenden, bereichsweise unterschiedlichen Kristalleigenschaften gibt es auch bei Zementation im vadosen Milieu. Allerdings fehlen sonstige typische Merkmale für die Bildung in diesem Milieu (z.B. Meniskuszement). Für eher phreatische Entstehung sprechen Zementsäume, die oft vollständig und gleichmäßig sind, bzw. Zementaufwachsungen, die ohne bevorzugte Position fleckenhaft auf Detritus vorkommen. Nach Abschluss der Zementation fand der Eintrag karbonatischer Pseudomatrix statt.

Aufschluss Breetze

Horizont a.

In den Massenzementationskörpern im Sand begann die Zementation mit der Mikritbildung in der vadosen Zone und setzte sich mit der Bildung von Blockkalzit und syntaxialen Anwachsäumen im phreatischen Milieu fort. Im Übergangsbereich treten stark verunreinigter Mikrospatit und Blockkalzit auf. Die starke Verunreinigung ist wahrscheinlich auf Feinstdetritus zurückzuführen, der syngenetisch zur Kristallbildung aus dem Geschiebemergel ausgeschlämmt wurde. Im zementierten Geschiebemergel gibt es sowohl auf Detritus als auch auf Wänden von Schrumpfrissen Isopachenzement, der im phreatischen Milieu entstand. Der Isopachenzement wächst dabei meist auf der feinkörnigen Matrix auf, was darauf hinweist, dass er nach der Zementation der Geschiebemergelmatrix gebildet wurde.

Da die Zementation sowohl im Sand als auch im Geschiebemergel zweiphasig verlief, ist von zeitgleicher Bildung der jeweils gebildeten Zemente auszugehen. Dabei entstand der Zement im Sand im vadosen Milieu durch Sickerwasser, das aus dem darüber lagernden, wahrscheinlich wassererfüllten Geschiebemergel stammt.

Horizont b.

Zunächst wurde die Geschiebemergelmatrix durch Mikrit-/Mikrospatitzement zementiert (Zementgeneration 1). Zementgeneration 2 entstand als Isopachenzement sowohl auf Detritus, als auch auf der bereits zementierten Geschiebemergelmatrix im phreatischen Milieu. Die jüngste Zementgeneration ist ebenfalls phreatisch entstandener Blockkalzit, der zwischen dem Isopachenzement verbliebenen Resthohlraum auffüllt.

Horizont c.

Sowohl die im Sand als auch die im Schluff vorkommenden Zementationskörper entwickelten sich im phreatischen Milieu. Im Schluff entstand die Zementation zweiphasig, wobei Isopachenzement (Zementgeneration 2) auf bereits durch Mikrit / Mikrospatit (Zementgeneration 1) zementierten Schluff aufwuchs. Im Sand gibt es keinen Hinweis auf zweiphasige Bildung.

		Zementationsmilieu bei der Bildung von Zementgeneration		
Aufschluss		1	2	3
Daerstorf		●	•	
Hittfeld		●		
Breetze	Horizont a. (Zementation von Schmelzwasser-Sand)	○	●	
	Horizont a. (Zementation von Geschiebemergel)	?	•	
	Horizont a. (Zementation im Übergangsbereich Geschiebemergel / Schmelzwasser-Sand)	?		
	Horizont b.	?	•	•
	Horizont c. (Zementation von Sand)	●		
	Horizont c. (Zementation von Schluff)	?	•	
	Horizont d. (Zapfen)	○	●	
	Horizont d. (Massenzementationskörper in Schmelzwasser-Sand)	•	○	●
	Horizont d. (Massenzementationskörper in Geschiebemergel)	•	?	
	Horizont d. (Konkretionen in Schmelzwasser-Sand)	○	•	•
Horizont e.	?	•	•	
Holzen		○	○	●
Volkstorf	Horizont a.	○	●	
	Horizont b.	●	•	
	Horizont c.	○	●	•
	Horizont d.	•	●	
	Horizont e. (Liegende Zapfen)	•	•	
	Horizont e. (Massenzementationskörper)	•	○	
	Horizont f.	?	•	
Krankenhagen		•	○	●
Rumbeck		○	●	
Helpensen	Horizont a.	●	○	
	Horizont b.	○	•	○
	Horizont c.	•	○	
Bad Münder / Hachmühlen		•	○	?
Coppenbrügge	Horizont a. (Zementation von Ton, Schluff)	?	•	
	Horizont a. (Zementation von feinsandigem Schluff)	•	?	•
	Horizont a. (Zementation von Fein- bis Mittelsand)	•	?	•
	Horizont b.	○	•	○
	Horizont c.	●		
	Horizont d.	○		
Eime	Zapfen, Massenzementationskörper (Horizonte a., b.)	○	•	●
	Massenzementationskörper (Horizont c.) in sandigem Kies	○	●	
	Massenzementationskörper (Horizont c.) in Kies	•	●	
Banteln		○		
Betheln		○	●	•
Freden	Aufschlussbereich I	○	●	•
	Aufschlussbereich II-1	○	•	●
	Aufschlussbereich II-2	○	•	
	Aufschlussbereich II-3 (liegende Zapfen)	•	●	
	Aufschlussbereich II-3 (Massenzementationskörper)	○	•	●
	Aufschlussbereich III	○	•	●
	Aufschlussbereich IV (Zapfen im oberen Horizont)	○	•	●
	Aufschlussbereich IV (Zapfen im unteren Horizont)	○	•	●
	Aufschlussbereich V Horizont-1	○		
	Aufschlussbereich V Horizont-2	●		
	Aufschlussbereich V Horizont-3	●		
	Aufschlussbereich VI (Massenzementationskörper)	○	●	
	Aufschlussbereich VI (Konkretionen)	●		
	Aufschlussbereich VII	●		
	Aufschlussbereich VIII-1	○	●	
	Aufschlussbereich VIII-2	○	●	
	Aufschlussbereich VIII-3	•	●	•
	Aufschlussbereich VIII-4	○	●	
Aufschlussbereich VIII-5	○	○		
Aufschlussbereich VIII-6	○	○		
Engelade	Massenzementationskörper und Konkretionen im Schertill	•	?	•
	Massenzementationskörper im Schmelzwassersand	○	•	•
Bornhausen	Horizont a	○	●	
	Horizont b	?		
	Horizont c	●		
	Horizont d (diskusförmige Konkretionen, liegende Zapfen)	●		
	Horizont d (Massenzementationskörper)	•	●	
Ödishausen	Zementationskörper im ungeschichteten Kies	○		
	Zementationskörper in der Kies/Sand-Wechselfolge	●		

○	Zementation in vadosem Milieu
•	Zementation in phreatischem Milieu
●	Zementation in phreatischem Milieu, Zement dominiert quantitativ
?	Zementationsmilieu fraglich

Tab. 6: Übersicht der in den untersuchten Aufschlüssen definierten Zementgenerationen mit der Interpretation der Zementationsbedingungen.

Horizont d.

Hängende Zapfen

Die Bildung der Zapfen begann in der vadosen Zone mit der Bildung von Meniskus- und Gravitationszement, die durch stärkere Verunreinigungen des Blockkalzits erkennbar sind. Es folgte eine Phase phreatischer Zementation (Zementgeneration 2), in der sich u.a. teilweise drusiger Mosaikzement bildete. Dabei nimmt die Zementationsintensität von innen nach außen ab, was die nach außen fortschreitende Zementation belegt und in Verbindung mit konzentrischen Mangan-Verunreinigungen (Taf. I/6) für eher gleichmäßige Wachstumsfronten spricht. Der Porenraum im Kern der Zapfen wurde während der Kristallisation von Zementgeneration 2 fast vollständig aufgefüllt.

Massenzementationskörper

Im Geschiebemergel unmittelbar oberhalb des Schmelzwassersandes, der ebenfalls zementiert wurde, kommt auf Detritus phreatisch entstandener Isopachenzement vor. Die Zementation der feinkörnigen Matrix des Geschiebemergels erfolgte durch Mikrit- / Mikrosparitzement vermutlich ebenfalls im phreatischen Milieu.

Im Schmelzwassersand unmittelbar unterhalb der Grundmoräne begann die Zementation im phreatischen Milieu mit der Bildung von Isopachenzement. In einer zweiten Phase bildete sich teils phreatisch (z.B. vollständige Zementsäume), teils vados (Meniskus-, Gravitationszement) Mikritzement. Abschließend entstand als jüngste Zementgeneration Blockkalzit im phreatischen Milieu.

Kugelige Konkretionen

In den kugeligen Konkretionen gibt es relikthaft vados entstandenen Zement (Zementgeneration 1). Dieser diente möglicherweise als Kristallisationskeim für die folgende Bildung von Blockkalzit, syntaxialen Anwachs säumen und poikilotropischem Zement im phreatischen Milieu. Die unterschiedlichen Kristalleigenschaften von Blockkalzit und poikilotropischem Zement sprechen für unterschiedliche Bildungsmilieus. Der sukzessive Übergang zwischen beiden Kristalltypen deutet auf kontinuierliche Veränderung von Randbedingungen hin (z.B. Temperatur, Höhe der Übersättigung). Wahrscheinlich bildete sich der poikilotropische Zement vor dem Blockkalzit.

Horizont e.

Für das Bildungsmilieu des feinkristallinen Zementes gibt es keinen Hinweis, Isopachenzement und Mosaikzement entstanden im phreatischen Milieu. Da der Isopachenzement auf der bereits durch Mikrit- / Mikrosparitzement zementierten Geschiebemergelmatrix aufwuchs, muss er jünger als der feinkristalline Zement (Zementgeneration 1) sein. Der Blockkalzit wuchs auf den Zementgene-

rationen 1 und 2 auf und stellt somit die jüngste Zementgeneration (3) dar.

Aufschluss Holzen

Die Kalzit-zementation begann zunächst mit der Bildung von Mikrosparit als erster Zementgeneration in der vadosen Zone. Danach bildete sich Blockkalzit (2. Zementgeneration), der nach den festgestellten Merkmalen (z.B. Meniskuszement) ebenfalls Produkt der vadosen Zone ist. Es wurden weder Übergangsformen zwischen beiden Zementtypen beobachtet, die auf eine kontinuierliche Milieuänderung schließen lassen, noch Hinweise für eine Umbildung von Mikrosparit zu Blockkalzit, was für eine Rekristallisation in der phreatischen Zone sprechen würde. Damit ist davon auszugehen, dass mit den beiden Zementgenerationen zwei Bildungsphasen dokumentiert sind, die durch eine Periode getrennt wurden, in der keine karbonatische Zementation stattfand. Obwohl sich beide Zementgenerationen in der vadosen Zone bildeten, deutet deren unterschiedliche Beschaffenheit auf zwischenzeitlich geänderte Umweltbedingungen (z.B. Temperatur, Niederschlags- bzw. Sickerwassermenge) hin. Die letzte Phase karbonatischer Zementation fand in der phreatischen Zone mit der Bildung von Blockkalzit statt (3. Zementgeneration). Syntaxiale Anwachs säume entwickelten sich sowohl im vadosen als auch im phreatischen Milieu (u.a. Meniskuszement!). Für eine Zuordnung der vados entstandenen syntaxialen Anwachs säume zu Zementgeneration 1 oder 2 fanden sich keine Hinweise. Phreatisch entstandener syntaxialer Zement dürfte sich zeitgleich zu Zementgeneration 3 gebildet haben. Neben dem eigentlichen Kalzit-zement gibt es noch karbonatische Pseudomatrix.

Aufschluss Volkstorf

Horizont a.

Als erste Zementgeneration entstand in den wenigen cm großen Massenzementationskörpern Meniskuszement aus Blockkalzit und syntaxialen Anwachs säumen, was für Zementation in der vadosen Zone spricht. Die porenformerhaltende Bildung von Blockkalzit, sowie syntaxiale Anwachs säume, die Fossilreste gleichmäßig umschließen, sprechen für phreatisches Milieu während der Bildung von Zementgeneration 2.

Horizont b.

In den diskusförmigen Konkretionen entstanden durch zwei Zementgenerationen im phreatischen Milieu Blockkalzit/syntaxiale Anwachs säume (Zementgeneration 1) und Isopachenzement (Zementgeneration 2).

Horizont c.

Die Zementation der Massenzementationskörper begann zunächst mit der Bildung von vadosen Meniskuszement (Zementgeneration 1) und setzte

sich im phreatischen Milieu fort (Zementgeneration 2). Die vadose Zementation hat nach der geringen Menge des gebildeten Zementes nicht lange gedauert und wurde ohne signifikante Änderung der Kristalleigenschaften - also wahrscheinlich mit kontinuierlichem Übergang - von phreatischem Milieu abgelöst. Für einen kontinuierlichen Übergang spricht auch die einheitliche geochemische Zusammensetzung des Niedrig-Mg-Kalzites. Blockkalzit (Zementgeneration 3) bildet die jüngste Zementgeneration und entstand nach dem beobachteten Mosaikzement in der phreatischen Zone.

Horizont d.

Als erste Zementgeneration entstand Isopachenzement im phreatischen Milieu. Die zweite Zementgeneration ist einschlusreicher Mikrospatit. Er bildet ebenfalls phreatisch entstandene gleichmäßige Säume um Detritus und kommt vereinzelt auf Isopachenzement vor. Die signifikanten Unterschiede zwischen Isopachenzement und einschlusreichem Mikrospatit macht eine zweiphasige Zementation wahrscheinlich.

Horizont e.

Der in den flachen Zapfen vorkommende Zement entstand nach der homogenen und oft porenformhaltenden Verteilung von Mikrospatit / Blockkalzit und der Beschaffenheit der syntaxialen Anwachs-säume phreatisch. Unterschiedliche Kristalleigenschaften von Mikrospatit und Blockkalzit sprechen für unterschiedliche Bildungsbedingungen, der kontinuierliche Übergang zwischen beiden Zementtypen für allmähliche Milieuänderung. In den Massenzementationskörpern, die sich zwischen übereinander vorkommenden Zapfen befinden, bildet Blockkalzit u.a. Meniskuszement, was darauf hinweist, dass sich der Blockkalzit in den Massenzementationskörpern unter vadosen Bedingungen bildete.

Horizont f.

Für das Bildungsmilieu des Mikrit- / Mikrospatitzementes (Zementgeneration 1) in der Geschiebemergelmatrix gibt es keinen Hinweis. Der phreatisch entstandene Isopachenzement (Zementgeneration 2), der in Schrumpfrissen in den Konkretionen vorkommt, muss nach der Bildung des feinkristallinen Zementes entstanden sein, da er auf dem bereits zementierten Bereich aufwuchs.

Aufschluss Krankenhagen

Die erste Zementgeneration entstand wahrscheinlich in der phreatischen Zone, da der Zement fleckenhafte Anwachsungen bis unvollständige Säume ohne bevorzugte Aufwuchsposition bildet. Die zweite Zementgeneration bildete sich auf Grund des gebildeten Meniskus-, Gravitations- und Dachzement im

vadosen Milieu. Der als letzte Zementgeneration entstandene Zement (z.B. drusiger Mosaikzement, vollständige syntaxiale Anwachs-säume) zeigt Merkmale, die auf eine Entstehung im phreatischen Milieu hinweisen.

Aufschluss Rumbeck

Die Zementmerkmale von Zement 1 (Isopachenzement) und 2 (syntaxiale Anwachs-säume) weisen auf phreatische Entstehung hin. Es fällt jedoch das unregelmäßige, fleckenhafte Vorkommen auf, so dass auch eine Bildung unter pseudo-phreatischen Bedingungen im ansonsten vadosen Milieu und damit die Bildung zusammen mit Zement 3 möglich ist. Mikrit / Mikrospatit (Zement 3) entstanden in den höheren Teilen der Mittelterrassenablagerungen unter vadosen Bedingungen (Taf. V/4). Die zwischen dem Zement vorkommenden schwach orange lumineszierenden Partikel sind Reste von verwittertem karbonatischem Detritus (Pseudomatrix). Zement 4, der aus z.T. drusigem Blockkalzit besteht, ist der quantitativ bedeutendste Zementtyp und bildete sich wieder unter phreatischen Bedingungen (Taf. V/4).

Aufschluss Helpensen

Horizont a.

Die Merkmale des Zementes in den stratiformen Zementationskörpern (u.a. gleichmäßige Zement-säume) sprechen für Bildung im phreatischen Milieu. Über den stratiformen Zementationskörpern gibt es Massenzementationskörper (Taf. II/3), die durch Mikrit- / Mikrospatitzement zementiert sind, die sich im vadosen Milieu bildeten.

Horizont b.

Zement 1 (u.a. Meniskus-, Dach-, und Gravitationszement) entstand zumindest teilweise im vadosen Milieu. Die syntaxialen Anwachs-säume (Zement 2) zeigen zwar Merkmale phreatischer Entstehung, wurden aber nach der Beziehung zu Zement 1 z.T. zeitgleich mit diesem gebildet. Dies lässt sich als Bildung innerhalb von wassergesättigten Bereichen in der vadosen Zone (pseudo-phreatisch) deuten. Dazu gibt es, vereinzelt und fleckenhaft vorkommend, drusigen Mosaikzement, der auf Grund der Kristalleigenschaften zu Zement 1 zu rechnen ist. Wahrscheinlich bildete er sich, wie auch Teile der syntaxialen Anwachs-säume (Zement 2), unter pseudo-phreatischen Bedingungen (Kap. 6.3.9). Dementsprechend können die Zemente 1 und 2 als Zementgeneration 1 interpretiert werden. Zement 3 besteht aus Isopachenzement. Er ist zwar ebenso wie der drusige Mosaikzement selten, kommt jedoch im Gegensatz zu diesem in den Massenzementationskörpern nicht fleckenhaft sondern gleichmäßig verteilt vor, was auf die Bildung im phreatischen Milieu hinweist. Da er auf Zement 1 aufwuchs, ist er jünger als dieser (Zementgeneration 2).

Zement 4 zeigt Merkmale vadoser Zementation, kommt fleckenhaft innerhalb der Massenzementationskörper und unterscheidet sich von nicht lumineszierendem Zement 1 nur durch das Kathodolumineszenzverhalten. Zement 4 luminesziert orange bis rot, was bei einem vados gebildeten Zement, der wahrscheinlich nicht unter reduzierenden Bedingungen entstand, auf ungewöhnliche Bildungsbedingungen hinweist. Da er nicht von Isopachenzement überwachsen wird, entstand er später als dieser (Zementgeneration 3). Neben dem eigentlichen Kalzitzement gibt es noch karbonatische Pseudomatrix.

Horizont c.

Syntaxiale Anwachsäume und Isopachenzement entwickelten sich als erste Zementgeneration unter phreatischen Bedingungen (Zementgeneration 1). Zementgeneration 2 bildete sich nach dem gebildeten Meniskus-, Gravitations- und Dachzement (Taf. V/6) im vadosen Milieu.

Aufschluss Bad Münder / Hachmühlen

Die Zementation begann im Aufschluss Bad Münder mit der Kristallisation von Isopachenzement und syntaxiale Anwachsäumen und damit im phreatischen Milieu (Zementgeneration 1). Als zweite Zementgeneration entstand u.a. Meniskus-, Gravitations- und Dachzement, was auf vadose Zementation hinweist. Zementgeneration 3 bildete sich als einschlussreicher Blockkalzit wahrscheinlich – zumindest teilweise – durch Umbildung von präexistierendem Mikrit, wobei es keine Hinweise auf das Bildungsmilieu gibt. Wahrscheinlich nach Abschluss der Kalzitzementation kam es zum Eintrag karbonatischer Pseudomatrix.

Aufschluss Copenbrügge

Horizont a.

In den kugeligen Konkretionen, durch die in einer Fließmoräne (flow-till) Lagen verschiedener Korngrößenzusammensetzung zementiert sind, ist die Beschaffenheit des Zementes substratabhängig unterschiedlich:

Lockersediment: Ton, Schluff

Ton und Schluff sind durch Mikrosparit zementiert, der kein Merkmal aufweist, das Hinweise auf das Bildungsmilieu gibt.

Lockersediment: feinsandiger Schluff

Im feinsandigen Schluff gibt es eine erste Zementgeneration aus blattförmigem Isopachenzement, der als phreatische Bildung interpretiert wird. Wahrscheinlich nach dem Isopachenzement wurde in der feinkörnigen Fließmoränenmatrix Mikrosparitzement gebildet. Für dessen Bildungsmilieu gibt es keinen Hinweis.

Lockersediment: Fein- bis Mittelsand

Die erste Zementgeneration entstand phreatisch (Isopachenzement). Die vereinzelt vorkommende porenformerhaltende Zementation durch Mikrit bis

Blockkalzit lässt sich ebenfalls eher als phreatische Bildung interpretieren. Allerdings sind die bereichsweise unterschiedlichen Kristalleigenschaften typisch für Bildung im vadosen Milieu.

Als jüngste Zementgeneration tritt in allen Substraten Isopachenzement auf, der sich in den schon zementierten Konkretionen im phreatischen Milieu bildete (Tab. 7).

Tab. 7: Übersicht der in den Konkretionen im Horizont a. vorkommenden Zementtypen.

Ton, Schluff	feinsandiger Schluff	Fein- bis Mittelsand
1. Mikrosparit	1. Mikrosparit- säume 2. Mikrosparit	1. Isopachenzement 2. Mikrit bis Blockkalzit
blattförmiger Isopachenzement (in Schrumpfrissen)		

Horizont b.

In den Massenzementationskörpern entwickelte sich Mikrit als erste Zementgeneration im vadosen Milieu. Später entstandener Isopachenzement und syntaxiale Anwachsäume sind typische Kennzeichen für Zementation im phreatischen Milieu. Die jüngste Zementgeneration wird von Meniskus- und Gravitationszement aus Blockkalzit gebildet, was wieder auf Entstehung im vadosen Milieu hindeutet. Während der Zementation bildete sich außerdem karbonatische Pseudomatrix.

Horizont c.

Im Horizont c. ist das Lockersediment durch Blockkalzit und syntaxiale Anwachsäume zementiert. Die auftretenden Zemente sind einphasig entstanden, wobei ihre Charakteristika (z.B. drusiger Mosaikzement) auf Bildung im phreatischen Milieu hinweisen.

Horizont d.

In den stratiformen Zementationskörpern des Horizontes d. gibt es Blockkalzit, Isopachenzement und syntaxiale Anwachsäume. Dabei wechseln Bereiche, in denen die Zementmerkmale (z.B. Meniskuszement) auf vadose Zementation hinweisen, so engräumig und häufig mit solchen, in denen der Zement Merkmale phreatischer Entstehung zeigt (z.B. Isopachenzement), dass das Gesamtbild eher für Bildung in der vadosen Zone mit fleckenhaft wassergesättigten Bereichen (pseudo-phreatisch) als für Bildung unter mehrphasig wechselnden hydrogeologischen Bedingungen spricht. Die abgerundeten Oberflächen von Blockkalzit- und Isopachenzementkristallen sind auf spätere Korrosion durch kalkaggressives Wasser zurückzuführen.

Aufschluss Eime

Im Zapfen und in den höheren Massenzementations-Horizonten (a., b.) begann die Zementation

mit der Bildung von Meniskus-, Dach- und Gravitationszement im vadosen Milieu. Danach entstanden als Zementgenerationen 2 und 3 Isopachenzement bzw. drusiger Mosaikzement in der phreatischen Zone. Dabei weisen die unterschiedlichen Zementeigenschaften auf zwischenzeitlich geänderte Zementationsbedingungen hin.

Im tieferen Teil des Massenzementations-Horizontes c. fand die Zementation der ersten Zementgeneration ebenfalls im vadosen Milieu statt. Durch den danach in der phreatischen Zone gebildeten Blockkalzit wurde der Porenraum fast vollständig aufgefüllt. Der darüber folgende Teil des Massenzementations-Horizontes c. wird durch zwei Generationen von Isopachenzement zementiert. Dabei besteht die erste Generation aus relativ kleinen, die zweite dagegen aus ungewöhnlich großen Kristallen (Taf. V/8).

In den Zementationskörpern ist Pseudomatrix häufig, bei der es sich nach Lumineszenzverhalten, Beschaffenheit und Fossilführung um zerstörte Oberkreide-Kalk- / Mergelstein – Gerölle handelt. Möglicherweise besteht die Pseudomatrix auch teilweise aus feinkörniger Geschiebemergelmatrix, die in die Mittelterrassensedimente eingeschlämmt wurde.

Aufschluss Banteln

In den Massenzementationskörpern im Aufschluss Banteln ist der Porenraum überwiegend mit Pseudomatrix gefüllt (Taf. V/2, V/3). Außerdem gibt es Mikrit-/Mikrospatit, der u.a. Meniskuszement bildet und als Produkt vadoser Zementation interpretiert wird.

Aufschluss Betheln

Als erste Zementgeneration entwickelte sich Mikritzement im vadosen Milieu (u.a. Meniskus-, Gravitations-, Dachzement). Danach entstanden in der quantitativ dominierenden Zementgeneration 2 Blockkalzit und syntaxiale Anwachssäume, deren Zementeigenschaften auf Zementation im phreatischen Milieu schließen lassen. Als jüngste Zementgeneration 3 bildete sich Isopachenzement in Spalten des bereits zementierten Sedimentes. Während der Zementation wurde karbonatische Pseudomatrix eingetragen.

Aufschluss Freden

In den Schmelzwassersedimenten, die im Aufschluss Freden durch zahlreiche kleinere Gruben und Abbaubereiche aufgeschlossen sind, kommen kalzitisch zementierte Partien in großer Vielzahl und Formenvielfalt vor. Es wurden 8 Aufschlussbereiche untersucht (Anh. IV).

Aufschlussbereich I:

Die im Aufschlussbereich I vorkommenden diskusförmigen Konkretionen und stratiformen Zementationskörper unterscheiden sich zementpetrographisch nicht. Dabei bilden stärkere Verunreinigungen von Zementkristallen im Bereich von Kornzwickeln (Meniskuszement) einen Hinweis auf zunächst vadosen Zementation. Der weitaus größte Teil des Zementes zeigt jedoch Merkmale phreatischer Entstehung (z.B. drusiger Mosaikzement). Neben porenfüllendem Zement gibt es Kristallsäume auf Risswandungen, was für Mehrphasigkeit der phreatischen Zementation spricht. Zeitgleich zur Zementation entstand karbonatische Pseudomatrix.

Aufschlussbereich II:

Im Aufschlussbereich II gibt es in drei Zonen kalzitisch zementierte Schmelzwasserablagerungen (II-1 – II-3). Im Bereich II-1 besteht die erste Zementgeneration innerhalb der Massenzementationskörper u.a. aus Meniskuszement und wird demnach als vadosen Bildung interpretiert (Taf. V/5). Zementgeneration 2 besteht aus Isopachenzement, Zementgeneration 3 aus Blockkalzit (Taf. V/5), der in unvollständig aufgefüllten Poren porenformerhaltend ausgebildet ist und teilweise drusigen Mosaikzement bildet. Die Zementmerkmale weisen bei den Zementgenerationen 2 und 3 auf Bildung im phreatischen Milieu hin.

Im Bereich II-2 gibt es in Massenzementationskörpern blattförmigen Zement (Zement 1), der überwiegend auf und gelegentlich unter größeren Geröllen vorkommt, so dass anzunehmen ist, dass er sich durch Stau- bzw. Haftwasser in der vadosen Zone bildete (Dach-, Gravitationszement). In den ansonsten einschussarmen bis -führenden Zementen 2 und 3 gibt es stärker verunreinigte Bereiche, die Meniskus- und Gravitationszement nachzeichnen. Diese Teile von Zement 2 und 3 lassen sich als vadosen Bildung interpretieren und sie entstanden wahrscheinlich gleichzeitig mit Zement 1. Nach der vadosen Phase setzte sich die Zementation wahrscheinlich im phreatischen Milieu fort, worauf der z.T. drusige Habitus der Zemente 2 und 3 hinweist. Die Unterschiede der Kristalleigenschaften zwischen Zement 2 und 3 korrelieren mit den unterschiedlichen Korngrößen des Lockersedimentes. In Schichten, in denen Feinsand vorkommt oder dominiert, bildete sich Mikrospatit, im grobkörnigeren Sediment Blockkalzit. Filigrane Kalzitlaminae und -krusten, die auf den Zementkristallen vorkommen, entstanden nach der großen Ähnlichkeit mit mikrobiell gebildetem Kalzit (z.B. NEUMEIER 1999) wahrscheinlich ebenfalls im Zusammenhang mit der Lebenstätigkeit von Organismen. Es liegt nahe, einen Zusammenhang mit den Bildung von Rhizokonkretionen

herzustellen, die im gesamten Aufschluss Freden häufig vorkommen.

In liegenden Zapfen im Bereich II-3 entstanden Isopachenzement als erste bzw. Blockkalzit als zweite Zementgeneration. Wahrscheinlich parallel zur Bildung beider Zementgenerationen wuchsen syntaxiale Anwachsäume. Die Merkmale der Zemente weisen für beide Zementgenerationen auf Zementation im phreatischen Milieu hin. In Massenzementationskörpern im Bereich II-3 kommt zusätzlich zu den Zemententypen bzw. -generationen, die in den liegenden Zapfen vorkommen, als erste Zementgeneration Mikrosparit vor, der u.a. Meniskuszement bildet und damit als vadoser Zement interpretiert wird.

Aufschlussbereich III:

Die Kristallisation der ersten Zementgeneration fand im vadosen Milieu statt (Meniskus-, Gravitationszement). Zementgenerationen 2 (Isopachenzement) und 3 (Blockkalzit) bildeten sich in der phreatischen Zone, wobei die unterschiedlichen Kristalleigenschaften auf zwischenzeitlich geänderte Bildungsbedingungen schließen lassen. Wahrscheinlich zeitgleich zur Bildung der Zementgenerationen 2 und 3 entstanden syntaxiale Anwachsäume und Pseudomatrix.

Aufschlussbereich IV:

Im Aufschlussbereich IV gibt es in zwei übereinander liegenden Horizonten Zapfen. Sowohl im oberen als auch im unteren Horizont bildeten sich drei Zementgenerationen, wobei jeweils nach einer ersten Phase vadoser Zementation zwei Zementgenerationen entstanden, die Merkmale phreatischer Entstehung zeigen (Isopachenzement, drusiger Mosaikzement). Die unterschiedlichen Kristalleigenschaften zwischen Zementgeneration 2 und 3 deuten auf zwischenzeitlich geänderte Bildungsbedingungen hin. Außerdem gibt es in beiden Horizonten syntaxiale Anwachsäume, die wahrscheinlich zeitgleich zur Bildung der beiden Zementgenerationen entstanden sowie karbonatische Pseudomatrix.

Aufschlussbereich V

Im Aufschlussbereich V gibt es kalzitisch zementierte Partien in drei Horizonten.

Im Horizont V-1 bildeten sich alle drei vorkommenden Zementtypen im vadosen Milieu. Dafür sprechen Meniskus- und Gravitationszement (Zement 1, 2), die unregelmäßige Ausbildung der syntaxialen Anwachsäume (Zement 3), die heterogene Verteilung des Zementes (Zement 2) und eher porenrundende Zementation (Zement 2). Die unterschiedliche Beschaffenheit von Zement 1 (Mikrosparit) und 2 (Blockkalzit) wird eher auf fleckenhaft unterschiedliche Zementationsbedingungen, die typisch für Zementation im vadosen Milieu sind, als auf mehrphasige Bildung zurück-

geführt. In den Horizonten V-2 und V-3 gibt es Blockkalzit und syntaxiale Anwachsäume, die einphasig im phreatischen Milieu entstanden.

Aufschlussbereich VI:

Die Zementation der Massenzementationskörper begann mit der vereinzelt Bildung von Meniskuszement im vadosen Milieu (Zementgeneration 1). Zementgeneration 2 besteht hauptsächlich aus Blockkalzit, der den dominierenden Zementtyp in den Massenzementationskörpern bildet und der Merkmale phreatischer Entstehung zeigt (z.B. drusiger Mosaikzement). Außerdem gibt es seltener syntaxiale Anwachsäume. In den im Aufschlussbereich VI vorkommenden Konkretionen wurde kein vados entstandener Zement nachgewiesen. Sie sind durch Blockkalzit und syntaxiale Anwachsäume gekennzeichnet, die gleiche Merkmale wie Zementgeneration 2 der Massenzementationskörper haben und dementsprechend ebenfalls als phreatischer Zement interpretiert werden.

Aufschlussbereich VII:

In diskusförmigen bis kugeligen Konkretionen gibt es Blockkalzit und syntaxiale Anwachsäume. Die Merkmale des Zementes – die Beschaffenheit der Zementsäume, die eher porenformerhaltende Zementation sowie das allseitige Wachstum der syntaxialen Anwachsäume – sprechen für die Bildung im phreatischen Milieu.

Aufschlussbereich VIII

Hier wurden karbonatische Zementationskörper in 6 Zonen untersucht (V-1 – V-6).

Die in hängenden Zapfen (Bereich V-1) vorkommenden Zemente sind substratabhängig unterschiedlich groß: In feinkörnigen Schichten (z.B. schluffiger Feinsand) sind die Zementkristalle kleiner, in grobkörnigen (z.B. Mittelsand) sind sie entsprechend größer. Die erste Zementgeneration bildete sich im vadosen Milieu (Meniskus-, Gravitationszement). Als quantitativ bedeutendster Zement entstand die Zementgeneration 2 entsprechend der Zementmerkmale (z.B. porenformerhaltende Zementation) im phreatischen Milieu. Die Zementationsintensität ist an den Zapfenrändern oft höher als im Kern. Außer dem eigentlichen Kalzit zement gibt es noch karbonatische Pseudomatrix, die gleichzeitig zur Zementbildung entstand.

Im Bereich V-2 gibt es in liegenden Zapfen Mikrit / Mikrosparit, der die erste Zementgeneration bildet und Merkmale zeigt (Meniskus-, Gravitationszement), die auf vadose Entstehung hinweisen. In einer zweiten Zementgeneration entstanden Blockkalzit und syntaxiale Anwachsäume unter phreatischen Bedingungen.

Die kugeligen bis diskusförmigen Konkretionen des Bereichs V-3 entstanden dreiphasig im phreatischen Milieu. Nach einer Frühphase, in der sich die

quantitativ eher unbedeutende Zementgeneration 1 bildete, entstand als dominierender Zement Mikrospatit / Blockkalzit (Zementgeneration 2). In später gebildeten Rissen entwickelte sich Blockkalzit als jüngste Zementbildung (Zementgeneration 3).

Im Bereich V-4 sind die Schmelzwasserschichten zu Massenzementationskörpern zementiert. Die Zementation fand zunächst im vadosen Milieu statt, wobei vereinzelt entstand. In der dominierenden Zementgeneration 2 bildeten sich Isopachenzement, drusiger Mosaikzement und syntaxiale Anwachsäume unter phreatischen Bedingungen.

Die Bildung von stratiformen Zementationskörpern in den Bereichen V-5 und V-6, begann mit der Kristallisation von Mikrit im vadosen Milieu. Die Zementgeneration 2 zeigt sowohl Merkmale vadoser als auch phreatischer Entstehung. Auf Grund der heterogenen Verteilung entsprechender Merkmale in den Dünnschliffen wird Zementgeneration 2 als Bildung einer vadosen Zone interpretiert, in der wassergesättigte Bereiche häufig waren.

Aufschluss Engelade

Im Aufschluss Engelade gibt es in einem Schertill kugelige Konkretionen und Massenzementationskörper. Da der vorkommende phreatisch entstandene Isopachenzement nur auf Detritus und nicht auf der Matrix vorkommt, hat er sich wahrscheinlich als erste Zementgeneration vor matrixzementierendem Mikrospatit (Zementgeneration 2) gebildet. Zementgeneration 2 zeigt keine Merkmale, die auf das Bildungsmilieu schließen lassen. Die jüngste Zementgeneration (3) besteht aus Blockkalzit, der Risse und Spalten in den Zementationskörpern plombiert.

Durch die Massenzementationskörper sind, wie oben beschrieben, Bereiche eines Schertills und des darunter liegenden Schmelzwassersandes zementiert. Die Zementation im Sand fand ebenfalls in drei Zementgenerationen statt (Taf. V/7), wobei hier alle drei Merkmale phreatischer Entstehung zeigen. Die unterschiedlichen Zementeigenschaften der vorkommenden Zementgenerationen lassen auf die Änderung von Umweltbedingungen (z.B. Temperatur, Niederschlag) während der Zementation schließen.

Aufschluss Bornhausen

In flachen Zapfen und diskusförmigen Konkretionen des Horizontes a. treten relikthaft Meniskus-, Dach- und Gravitationszement in Form stärkerer Verunreinigung des ansonsten nahezu einschussfreien Blockkalzits auf und werden als vados entstandene Zementgeneration 1 interpretiert. Sowohl einschussfreier Blockkalzit als auch syntaxiale Anwachsäume der Zementgeneration 2

zeigen Merkmale, die für eine Entstehung im phreatischen Milieu typisch sind.

In den Horizonten b. und c. sind Konkretionen bzw. Massenzementationskörper durch Blockkalzit und syntaxiale Anwachsäume zementiert, wobei die Zementmerkmale auf jeweils einphasige Kristallisation im phreatischen Milieu hinweisen.

Im Horizont d. gibt es Konkretionen, liegende Zapfen und Massenzementationskörper. In den Konkretionen zeigen Blockkalzit und syntaxiale Anwachsäume Merkmale für einphasige Entstehung im phreatischen Milieu. In den Massenzementationskörpern bildete sich als erste Zementgeneration einschussreicher Blockkalzit im phreatischen Milieu. In einer zweiten, ebenfalls phreatischen Phase, entstand einschussarmer Blockkalzit. Neben dem eigentlichen Kalzitement gibt es in Konkretionen, Zapfen und Massenzementationskörpern karbonatische Pseudomatrix.

Aufschluss Ödishausen

Die in den Zapfen und den Massenzementationskörpern im ungeschichteten Kies vorkommenden Kristall- bzw. Zementtypen sind auffallend vielgestaltig. Es gibt sowohl Hinweise auf vados (Meniskus-, Gravitations- und Dachzement) als auch auf phreatische Bildung (Isopachenzement, drusiger Mosaikzement). In der Synopsis deutet die große Variationsbreite sehr heterogen verteilter Zemente auf ein insgesamt eher vados dominiertes Milieu hin. Die phreatischen Zementtypen entwickelten sich möglicherweise in nahezu wassergesättigten Bereichen (pseudo-phreatisch) innerhalb der vadosen Zone, wobei der Wasseranstau z.B. durch bereits vados zementierte Areale verursacht worden sein kann. Vados entstandene Zementtypen sind vereinzelt entlang vertikal stehender Bahnen angereichert, was darauf hinweist, das hier ehemalige Sickerbahnen nachgezeichnet wurden. Die in den Massenzementationskörpern der Sand-Kies-Wechselfolge vorkommenden Zemente (Blockkalzit, syntaxiale Anwachsäume, Isopachenzement) zeigen durchweg Merkmale phreatischer Entstehung. Gleichzeitig mit dem Kalzitement entstand karbonatische Pseudomatrix.

6 DIAGENESEMILIEUS

6.1 Einleitung

Ziel dieser Arbeit ist es, **frühdiaenetische Karbonatzementation** zu untersuchen. Dabei ist die Abgrenzung von (Früh-) Diagenese und Bodenbildung oft problematisch und wird in der Literatur uneinheitlich vorgenommen. Da die Unterscheidung zwischen pedogenen und frühdiaenetisch entstandenen Karbonaten auf Grund oft großer Ähnlichkeit schwierig ist, werden Frühdiaenese

und Bodenbildung in dieser Arbeit prozessorientiert unterschieden. Dazu wird auf die Definition von BECKNER & MOZLEY (1998) zurückgegriffen, wonach **pedogene Karbonate** in einem **aktiven Boden** entstehen. Im aktiven Boden ist Karbonatbildung vor allem auf Prozesse wie Verwitterung, Evapotranspiration oder biologische Aktivität zurückzuführen. Zu pedogenen Karbonaten sind Ansammlungen von lockerem, weißem Kalzitpulver sowie Rhizokonkretionen um teilweise noch erkennbare Wurzeln zu rechnen (KLAPPA 1980), die in den Aufschlüssen Breetze und Freden in oberflächennahen Bereichen vorkommen (Abb. 9).

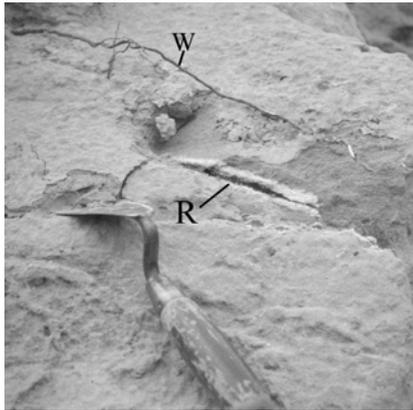


Abb. 9: In einer Rhizokonkretion (R) kommt Kalzit als weißer Saum um eine abgestorbene Wurzel vor, die als schwarzer Zentralkanal erkennbar ist. Daneben gibt es auch noch lebende Wurzeln (W). Aufschluss Breetze.

Dagegen bildeten sich die hier untersuchten frühdiagenetischen Zementationen nicht in einem aktiven Bodens und damit ohne relevanten Einfluss von z.B. Evapotranspiration und biologischer Aktivität.

6.2 Grundlagen und Aspekte

Die Löslichkeit von Karbonat in reinem Wasser ist relativ gering und wird erst durch die Anwesenheit anderer gelöster Wasserinhaltsstoffe relevant erhöht. Ein ganz wesentlicher Einflussfaktor auf die Mobilität von Karbonaten ist dabei die Konzentration von gelöstem CO_2 . Der Gleichgewichtszustand zwischen den maßgeblich an der Reaktion beteiligten Konzentrationen an CaCO_3 und CO_2 wird als **Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht** bezeichnet und durch eine Reihe von Karbonat-Kohlendioxid-Wasser-Reaktionen und -Gleichgewichtszuständen gesteuert (z.B. MATTHEß 1990, SCHILLINGS 1994). Ein wesentlicher Prozeß ist die Reaktion eines geringen Teils des gelösten CO_2 zu schwacher Kohlensäure (H_2CO_3) aus der sich in zwei Dissoziationsstufen u.a. HCO_3^- und CO_3^{2-} bilden (z.B. HÖLTING 1996). Eine Lösung, die sich hinsichtlich der o.g. Wasserinhaltsstoffe im Gleichgewicht befindet, reagiert auf eine Erhöhung des

CO_2 -Gehaltes mit Karbonatlösung, auf eine Verringerung mit Karbonatfällung. Wesentliche Faktoren, die zu einer Anreicherung von CO_2 führen können, sind der Eintrag von atmosphärischem CO_2 mit dem Niederschlag, Wurzelatmung und die Lebenstätigkeit anaerober Organismen. Als weitere mögliche CO_2 -Quellen werden z.B. die thermische Zersetzung von Karbonaten in größerer Tiefe oder der Aufstieg im Rahmen postvulkanischer Exhalation genannt (HÖLTING 1996). Dagegen können Entgasung, Assimilation durch Pflanzen oder Temperaturerhöhung eine Verringerung des CO_2 -Gehaltes im Untergrund bewirken.

Während einige der Faktoren biologische Aktivität voraussetzen, die im relevanten Umfang auf Warmzeiten beschränkt ist, wird der CO_2 -Haushalt im Untergrund in Kaltzeiten im Wesentlichen durch anorganisch-physikalische Faktoren also vor allem durch CO_2 -Eintrag aus der Atmosphäre, durch Temperaturschwankungen oder Entgasung gesteuert.

In **Warmzeiten** stellen biochemische und mikrobiologische Vorgänge im Boden bei der Anreicherung von CO_2 eine gegenüber dem Eintrag durch Niederschläge quantitativ relevantere CO_2 -Quelle dar (z.B. MERKEL & SPERLING 1996). Dabei führen neben der Wurzelatmung die Atmung von Bodentieren sowie Stoffwechselfvorgänge aerober und anaerober Mikroflora zur Anreicherung von CO_2 im Boden (HARTGE & HORN 1991). Trotz der CO_2 -Abreicherung durch Assimilation von Pflanzen und Entgasung durch einen Konzentrationsgradienten vom Boden zur Atmosphäre kann die CO_2 -Konzentration in der Bodenluft um das 100-fache höher sein als in der Atmosphäre (FISCHBECK 1976). Damit kann Karbonat im Rahmen der Bodenbildung in der Bodenzone mobilisiert und bei entsprechendem geochemischem Milieu dort auch wieder abgeschieden werden (z.B. MAGARITZ et al. 1981, MACK & JAMES 1992). Der Stofftransport findet mit dem Sickerwasser vor allem in vertikaler Richtung statt, wobei die Verlagerung von oben nach unten (deszendend) oder von unten nach oben (aszendend) stattfinden kann. Sofern es nicht schon im Boden zur Wiederausfällung von gelöstem Karbonat kommt, gelangt es als Lösungsfracht mit dem Sickerwasser zunächst in tiefere Bereiche der wasserungesättigten Zone und schließlich ins Grundwasser und bildet damit ein wesentliches Potential für im Rahmen der Frühdiagenese stattfindende karbonatische Zementation.

Es gibt jedoch auch zahlreiche Beispiele für Karbonatmobilisierung und -neubildung unter Bedingungen, wie sie wahrscheinlich während der pleistozänen **Kaltzeiten** in NW-Deutschland herrschten (KLEIN 1940, BAUER 1958, SALMI 1959, SAMUELSSON 1964, CAILLEUX & DIONNE 1972,

MACNAMARA & USSELMAN 1972, SWETT 1974, LEMMENS et al. 1982, SOUCHEZ & LEMMENS 1985, FAIRCHILD & SPIRO 1990, SHARP et al. 1990, VOGT 1991, FAIRCHILD et al. 1994). So zeigte z.B. HALLET (1976), dass es unter warmen Gletschern aktiven chemischen Austausch gibt, der zur Bildung chemischer Sedimente führen kann. SLETTEN (1988) wies auf Spitzbergen sowohl Kalzit- als auch Aragonitneubildungen nach, die u.a. als Krusten auf Geröllen vorkommen und die sich bei Jahresmitteltemperaturen von $-5,8^{\circ}\text{C}$, Julimitteltemperaturen von $+5,2^{\circ}\text{C}$ und einer Niederschlagsmenge von 385 mm, die meist als Schnee fällt, gebildet haben. Auf Grund fehlender oder stark reduzierter biologischer Aktivität ist hier Niederschlagswasser, dessen CO_2 -Löslichkeit mit abnehmender Temperatur zunimmt (z.B. MATTHEß 1990, HÖLTING 1996), eine wesentliche Quelle von

CO_2 . Nach PAGE (1971) wird CO_2 beim Gefrieren von Wasser in Gasblasen, die im Eis enthalten sind, angereichert und kann durch Schmelzwasser in den Untergrund eingetragen werden. Dazu zeigten SCHOLANDER et al. (1961), dass im grönländischen Gletschereis Gaseinschlüsse enthalten sind, die bis über 15 % CO_2 enthalten. Die CO_2 -Entgasung - als abreichernder Faktor - kann z.B. durch eine dichte Schneedecke unterbunden werden und wenn diese dazu noch das Absinken der Bodentemperatur verhindert, ist sogar ein Anstieg der CO_2 -Konzentration möglich (SOLOMON & CERLING 1987). CERLING (1984) sah im Gefrieren von Wasser im Untergrund einen wichtigen Mechanismus für Karbonatbildung. Weitere Faktoren, die die Lösung und Fällung von Karbonat im glazialen System beeinflussen, wurden von FAIRCHILD et al. (1994) zusammengefasst (Abb. 10).

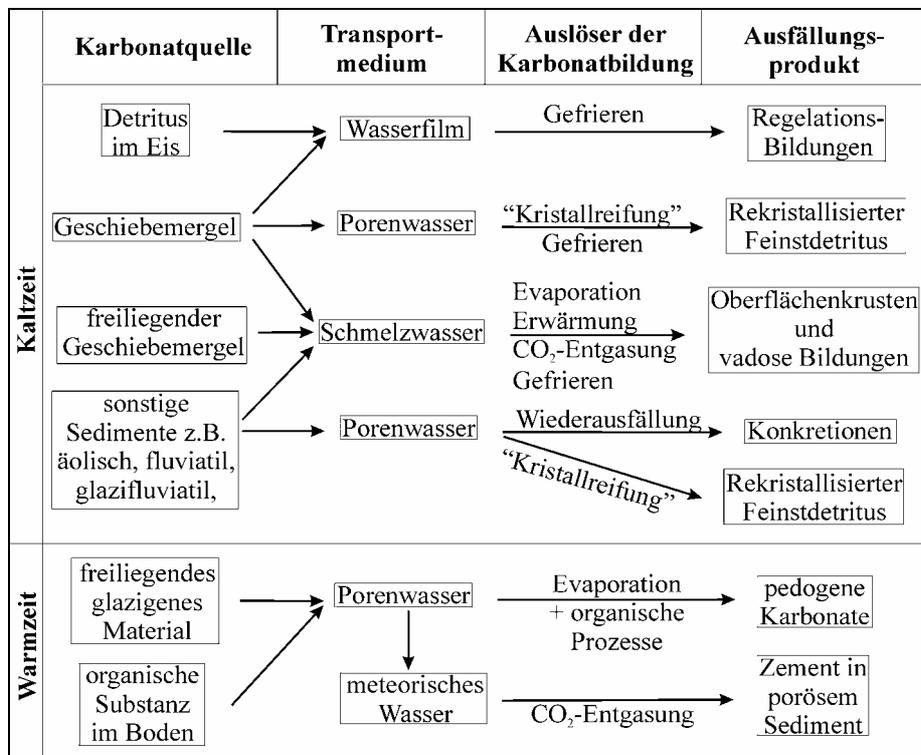


Abb. 10: Zusammenfassendes Übersichtsdiagramm zu Karbonatmobilisierung und -neubildung in Kalt- und Warmzeiten. Verändert nach FAIRCHILD et al. (1994).

6.2.1 Bildungsbedingungen von Konkretionen

Die möglichen Ursachen für die unterschiedlichen Formen von Konkretionen sowie deren Verteilung im Substrat waren Gegenstand intensiver Diskussion (zusammengefasst z.B. in MCBRIDE et al. 1994). Wesentliche Einflussfaktoren auf die Konkretionsform sind

- die Lithologie des Sediments (und damit zusammenhängend dessen Permeabilität),
- die Strömungsart des Porenwassers und
- sonstige Faktoren (z.B. Kompaktion).

WILKINSON (1989) wies auf den Zusammenhang zwischen Konkretionsform und der Art des Stoff-

transportes hin. Dabei kann der Stofftransport, der zur Bildung von Konkretionen führt, entweder durch Diffusion oder durch Strömung einer Porenflüssigkeit stattfinden (WILKINSON & DAMPIER 1990).

Kugelige Konkretionen entstehen durch Lösungstransport, bei dem Ionen allseitig in gleicher Menge zur wachsenden Konkretion befördert werden (WILKINSON 1989, Abb. 11). Dies ist nach BERNER (1968) im (quasi-) strömungsfreien Zustand der Fall, wobei Stofftransport in diesem Milieu ganz überwiegend diffusiv stattfindet. Stofftransport durch Lösungsströmung

ist in Ton / -stein auf Grund der materialbedingt äußerst geringen Durchlässigkeit vernachlässigbar langsam, so dass hier durch Diffusion entstandene, kugelige Konkretionen häufig sind. Im gut durchlässigen Sand /-stein ist diffusionsdominierter Stofftransport dagegen – zumindest im kontinentalen Milieu - auf hydrogeologische Sonderbedingungen beschränkt (WILKINSON & DAMPIER 1990).

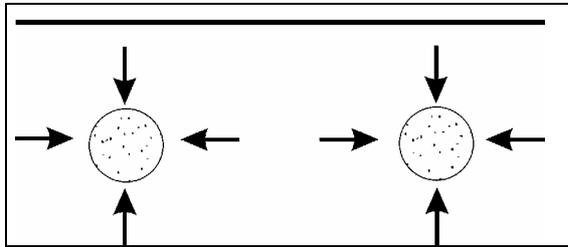


Abb. 11: Schematische Darstellung von diffusivem Lösungstransport, der zum Wachstum von kugeligen Konkretionen führt (nach BERNER 1968, WILKINSON 1989).

Die Auffassung SEILACHERS (2001), dass schon die Isotropie eines Sedimentes als Voraussetzung für die Bildung kugeliger Konkretionen ausreicht, widerspricht der älteren Literatur (z.B. BERNER 1968, 1980, THEAKSTONE 1981, WILKINSON & DAMPIER 1990, MCBRIDE et al. 1995).

Die Bildung von **diskusförmigen Konkretionen** wird durch Anisotropie der Permeabilität gesteuert. Dabei führt höhere Strömungsgeschwindigkeit in Schichten, die im Vergleich zu

benachbarten besser durchlässig sind, zu intensivem Lösungstransport und damit zu schnellerem Konkretionswachstum parallel zur Schichtung (DEEGAN 1971, RAISWELL 1971, GLUYAS 1984, DIX & MULLINS 1987, WALDERHAUG & BJØRKUM 1998). THEAKSTONE (1981) belegte diesen Zusammenhang an diskusförmigen Konkretionen und flachen Zapfen, die in pleistozänen Schmelzwasserablagerungen in Norwegen vorkommen. Dazu wiesen MOZLEY & DAVIS (1996) darauf hin, dass Sedimentanisotropie die Grundwasserströmungsrichtung nur dann kontrollieren kann, wenn sie im Vergleich zum hydraulischen Gradienten sehr groß ist.

In gut durchlässigem Substrat, wie z.B. Sand /-stein findet Lösungstransport – vor allem unter kontinentalen Bedingungen - im Wesentlichen über (Grundwasser-) Strömung statt (BERNER 1980). Strömende Lösung ermöglicht schnelleres Konkretionswachstum als diffusionsdominierte Bildung (WILKINSON 1991). Im strömungsdominierten Milieu entstehen zapfenförmige Konkretionen, was THEAKSTONE (1981), MCBRIDE et al. (1994), MOZLEY & DAVIS (1996) und MCBRIDE & PAREA (2001) mit verschiedenen Beispielen dokumentierten. Dabei zeigten

MCBRIDE et al. (1994) dass die Längsachsen **liegender Zapfen** parallel zur Grundwasserströmung orientiert sind bzw. MCBRIDE & PAREA (2001), dass sich **vertikale Zapfen** im vadosen Milieu durch etwa senkrecht versickerndes Wasser bilden.

6.2.2 Bildungsbedingungen von Massenzementationskörpern

Im Gegensatz zu Konkretionen fehlt Massenzementationskörpern eine klar definierbare äußerer Form, so dass eine Beziehung zwischen Form und Bildungsbedingungen nur schwerlich herzustellen ist. PERSCHKE (1993) versuchte unregelmäßige Formen mit Wachstum in wechselnden Richtungen zu erklären.

6.3 Diagenesemilieu

6.3.1 Zementationskeime

In den Aufschlüssen Hittfeld, Copenbrügge und Engelage kommen kleinere Massenzementationskörper bzw. kugelige Konkretionen häufig auf verwitterten „Toneisensteingeoden“ und Kalkmergelsteingeröllen vor (Taf. VI/8). Wahrscheinlich kam es in den Geröllen zu Lösungs-/Oxidations-Reaktionen und damit zur CaCO_3 -Mobilisierung. Durch Kontakt der Porenlösung mit dem umgebenden Grundwasser änderten sich die Gleichgewichtsbedingungen durch Lösungsmischung und im unmittelbaren Umfeld der Gerölle kristallisierte Kalzit. Bei den „Toneisensteingeoden“, die i.d.R. überwiegend aus Siderit und Kalzit bestehen (z.B. LIPPMANN 1955), setzten die Umwandlung von Siderit zu Fe-Hydroxiden und die Lösung von Kalzit CaCO_3 frei. Kalklösung fand auch in den Kalkmergelsteingeröllen statt. Dies wird durch das Vorkommen von karbonatischer Pseudomatrix bestätigt, die in den Aufschlüssen nachgewiesen wurde und durch Auflösung von karbonatischem Detritus entstand. Ein Zusammenhang mit kalzitgesättigtem Sickerwasser, das aus einer bindigen Schicht (z.B. Geschiebemergel) in liegende Schmelzwasserablagerungen übertritt, wie dies bei Massenzementationskörpern (z.B. Daerstorf, Holzen) häufig zu beobachten ist, ist im Aufschluss Hittfeld auszuschließen, da der Abstand zum hangenden Geschiebemergel über 30 m beträgt.

Im Aufschluss Volkstorf (Horizont b.) kommen phreatisch entstandene, diskusförmige Konkretionen in Fein- bis Mittelsand vor. Im Kern der Konkretionen gibt es häufig einige mm durchmessende Partien, die aus Schluff bestehen, in dem größerer Detritus schwimmt. Der Schluff ähnelt nach Zusammensetzung und Habitus Geschiebemergel, der ebenfalls in diesem Aufschluss vorkommt (vgl. Horizont f). Die Schluffpartien

werden als aufgearbeitete Geschiebemergelgerölle gedeutet, die in gefrorenem Zustand transportiert wurden. Der Prozess von CaCO_3 -Mobilisierung und Zementbildung um die Gerölle verlief wie bei den o.g. Mergelsteingeröllen.

In sehr vielen Zementationskörpern bildet quantitativ unbedeutender, vadoser Zement die erste Zementgeneration (Tab. 6). Das bevorzugte Vorkommen von Zementationskörpern, die überwiegend phreatisch entstanden, in Bereichen, in denen es bereits vadosen Zement gab, weist auf einen direkten Zusammenhang hin. Dabei wirkte vadoser Zement wahrscheinlich als Kristallisationskeim für folgende phreatische Zementationsphasen.

In jüngerer Zeit weisen Untersuchungen zunehmend auf die Bedeutung mikrobieller Aktivität bei der Karbonatproduktion hin (COLEMAN & RAISWELL 1993, CAMOIN 1999). Dabei gelang z.B. der experimentelle Nachweis mikrobieller Beteiligung an der „beachrock“-Bildung (NEUMEIER 1999). HILLGÄRTNER et al. (2001) diskutieren die mikrobielle Karbonatproduktion

in Kornwickeln und stellen dabei in Frage, dass mikritischer Meniskuszement einen guten Indikator für vadoses Milieu darstellt. In den untersuchten Aufschlüssen gab es folgende Beispiele von biogen gebildetem Kalzit:

- Rhizokonkretionen in den Aufschlüssen Volkstorf, Breetze und Freden, die subrezent entstanden,
- kalzitische Mikroröhrchen, die sich möglicherweise unter mikrobieller Beteiligung bildeten und als Aufwachsungen auf anorganisch gebildetem Kalzit in Freden (Aufschlussbereiche I, II-2) vorkommen (Taf. III/5).

Dabei sind sowohl Rhizokonkretionen als auch Mikroröhrchen deutlich jünger als der anorganisch gebildete Kalzit in den Zementationskörpern. Ansonsten wurden weder durch REM- noch durch Dünnschliffuntersuchungen Hinweise auf biologische Beteiligung an der Zementproduktion gefunden. Dies deutet daraufhin, dass biogene Karbonatbildung die untersuchte Zementation weder auslöste noch relevant an der Bildung von Zementationskörpern beteiligt war.

6.3.2 Karbonatquellen

In den untersuchten Zementationskörpern gibt es vados und phreatisch gebildeten Zement. Der vados Zement wurde durch Sickerwasser gebildet. Der Stoff stammt dementsprechend aus der Auflösung von karbonatischem Detritus aus höher liegenden Schichten. Für die Bildung von phreatischem Zement sind folgende Quellen denkbar:

1. Mesozoischer Kalkstein, der im Niedersächsischen Bergland oft oberflächennah ansteht, kann eine wesentliche Karbonatquelle für Kalzit sein. Allerdings sprechen die geologische und/oder hydrogeologische Situation der meisten Aufschlüsse gegen deszendenden Lösungstransport aus Kalksteinschichten (Anh. IV). Lediglich im Aufschluss Freden machen Lagerung und Position mesozoischer Kalksteinschichten im Umfeld des Kiessandkörpers die signifikante Beteiligung von karbonatreichem Grundwasser aus dem Festgestein an der Bildung von phreatischem Zement wahrscheinlich (Kap. 6.4.14).
2. Die Lösung von Gips und Anhydrit führt zu hoher Ca-Konzentration im Grundwasser (SAVELLI & WEDEPOHL 1969). Das zur Kalzitbildung notwendige Karbonat gibt es in oberflächenflächennähe durch Umsetzung von atmosphärischem oder biogen erzeugtem CO_2 (Kap. 6.2).
Lösung von Gips und Anhydrit gibt es in NW-Deutschland vor allem im Bereich oberflächennaher Salzstrukturen. Deren Residualgestein reicht häufig bis dicht unter die Oberfläche (z.B. LEPPER 1984) bzw. steht an der Oberfläche an (z.B. ROSS 1985). Es gibt jedoch weder einen erkennbaren Zusammenhang zwischen dem Vorkommen von Salzstrukturen (z.B. JARITZ 1973) und dem Auftreten von Karbonatzementation. Ebenso gibt es karbonatische Zementation nicht generell bevorzugt im Bereich oberflächennah anstehender Salinarfolgen (z.B. Röt, Mittlerer Muschelkalk), die im Niedersächsischen Bergland nicht selten sind (Anh. IV).
Außerdem sind für Kalzit, das über o.g. Prozess gebildet wurde, hohe Sr-Konzentrationen typisch. Dabei geben SAVELLI & WEDEPOHL (1969) bei Sinterkalk Sr-Gehalte von 0,1 – 0,2 Gew.-% angeben. Die hier untersuchten Zementationskörper enthalten meist deutlich unter 0,1 Gew.-% Sr.
3. Der Stoff für die Bildung von phreatischem Kalzit stammt aus der Lösung von detritischem Karbonat pleistozäner Lockersedimente. Dafür spricht zum einen, dass andere Karbonatquellen meist auszuschließen sind (s.o.). Zum anderen hat eiszeitlich transportiertes Sediment nach FAIRCHILD et al. (1994) überwiegend Kornoberflächen, die nicht z.B. durch Fe-Hydroxide oder Biofilme verunreinigt sind, was die Lösung von Karbonatdetritus begünstigt.

Dabei zeigte sich, dass sich die untersuchten Zementationskörper häufig unterhalb feinkörniger, gering wasserdurchlässiger Schichten bildeten (z.B.

Aufschlüsse Daerstorf, Holzen). Die Karbonatlösung ist in feinkörnigen Schichten besonders effektiv, da

1. detritisches Karbonat auf Grund der geringen Korngröße und damit verbundenen großen Oberflächen besonders lösungsanfällig ist und
2. das Durchströmen des Sedimentes durch die geringe Wasserdurchlässigkeit langwierig ist und so die Wechselwirkung Porenwasser-Karbonat intensiv ist.

Dass für die Intensität von Karbonatlösung nicht in erster Linie hohe absolute Konzentrationen von detritischem Karbonat entscheidend sind, sondern vielmehr Korngröße und hydraulische Eigenschaften zeigt das Beispiel des Aufschlusses Eime. Obwohl die Mittelterrassensedimente bis zu 60 Stück-% Kalkgerölle enthalten, wurden sie hauptsächlich durch Sickerwasser aus der überlagernden Grundmoräne zementiert, deren Kalkgehalt nach Vergleichsuntersuchungen auch vor beginnender Entkalkung wahrscheinlich deutlich geringer war. Dagegen wurde Zementation, die auf die Lösung der Kalkgerölle zurückgeführt werden kann, auch in tieferen Aufschlussbereichen nicht beobachtet.

6.3.3 Zementation bindiger Sedimente

Kalzitisch zementierte Partien in bindigen, für Wasser geringdurchlässigen Schichten gibt es in den Aufschlüssen Breetze, Volkstorf, Coppenbrügge und Engelade. Sie zeigen in der Art der Zementation auffällige Gemeinsamkeiten: Die feinkörnige Matrix ist durch einschlussreichen Mikrit / Mikrospatit zementiert und in Hohlräumen zwischen Matrix und größeren darin schwimmenden Körnern gibt es Zementsäume aus meist blattförmigen Kristallen, die sowohl auf der zementierten Matrix als auch auf den Körnern auftreten können (s.u.). Teilweise gibt es außerdem eine dritte Zementgeneration aus Blockkalzit in Resthohlräumen (z.B. Aufschluss Breetze Horizonte b, e). Dieser Zementationstyp ist unabhängig

a. von der geologischen oder hydrogeologischen Entwicklung des Aufschlusses. Er kommt sowohl in Aufschlüssen des Flach- als auch des Berglandes vor.

b. vom Alter oder der Genese des zementierten Substrates. Er kommt in übereinander liegenden Geschiebemergel-Horizonten unterschiedlichen Alters vor, die durch Schmelzwassersand getrennt werden. Es gibt ihn sowohl in Grundmoräne (z.B. Aufschluss Breetze Horizonte b, e), in Fließmoräne (Aufschluss Coppenbrügge Horizont a.) und im schluffigen Feinsand / Schluff in Schmelzwasserablagerungen (z.B. Aufschlüsse Breetze, Horizont c., Volkstorf Horizont b.).

c. von der Art der Zementation. Es gibt ihn sowohl in kugeligen und diskusförmigen Konkretionen, in flachen Zapfen (z.B. Aufschluss Volkstorf Horizont b.) oder in Massenzementationskörpern (z.B. Aufschluss Breetze a.).

d. vom Diageneseverlauf, der in Zementationskörpern benachbarter nichtbindiger Schichten dokumentiert ist (z.B. Aufschluss Breetze).

Diese Befunde zeigen, dass die Zementation gering wasserdurchlässiger Sedimente von substratspezifischen Prozessen gesteuert wird. Dafür sind vor allem deren hydraulische Eigenschaften verantwortlich: Die geringe (Wasser-) Durchlässigkeit führt dazu, dass sich Wechsel zwischen vadosen und phreatischen Bedingungen erheblich zeitverzögert auf die Porenwasserführung auswirken. Außerdem kann es im ansonsten vadosen Milieu oberhalb bindiger Schichten zum Anstau von Sickerwasser kommen, wenn die Sickerwassermenge die Wasserleitfähigkeit sehr gering durchlässiger Schichten übersteigt. Deshalb geben in bindigen Schichten dokumentierte Zementationsphasen keine Hinweise auf die jeweilige hydrogeologische Gesamtsituation.

In kalzitisch zementierten Partien bindiger Sedimente gibt es häufig sternförmige oder senkrecht zur Schichtung orientierte Schrumpfrisse. Die Rissbildung muss in einem frühen Zementationsstadium stattgefunden haben, da ein Zerreißen der vollständig zementierten Partien auszuschließen ist. Unter Berücksichtigung der Ablagerungsbedingungen und der klimatischen Entwicklung der untersuchten Sedimente sind für die Entstehung der Risse folgende Prozesse möglich:

- Sie entstehen durch Interaktionen von Porenwasserdruck-Gradienten und Haftspannungen des Porenwassers, die zu Zugspannungen und damit zum Zerreißen des Gesteinsverbandes führen können (BAUMGARTL & HORN 1995). Dabei bilden sich Schrumpfrisse senkrecht zur maximal auftretenden Zugspannung. Porenwasserdruck-Gradienten können durch azendenten, kapillaren Wassertransport verursacht werden. Dieser Prozess tritt bei Austrocknung bindiger Schichten auf (Trockenrisse), z.B. wenn Wasser an der Oberfläche verdunstet (z.B. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998).
- Durchflusswirksamer Porenraum wird in den Konkretionen durch Zementbildung verringert. In Verbindung mit hydrostatischem Druck und Kompaktionsströmung erzeugt dies Porenwasserdruck-Gradienten zwischen Konkretionen und nicht zementiertem Sediment. Ausreichend hoher hydrostatischer Druck bzw. starke Kompakti-

onsströmung führen in Verbindung mit Haftspannungen zum Zerreißen (Kompaktionsrisse).

Nach HOUNSLOW (1997) kann eine ausreichend große Kompaktionsströmung schon durch eine Versenkungstiefe von etwa 10 m erzeugt werden, was bei den untersuchten Zementationen entweder noch vorkommt (z.B. Aufschluss Breetze Horizont b.) oder nach der geologischen Situation zum Zeitpunkt der Konkretionsbildung (z.B. Volkstorf Horizonte b., f.) nicht auszuschließen ist.

- Das Sediment reißt durch thermische Kontraktion auf (z.B. LACHENBRUCH 1962). Dabei führen rasche Temperaturstürze zum Zusammenziehen von Eis, was WEISE (1983) als Tieffrost-Schwund bezeichnet. Auch die Entstehung von Eiskeilen wird auf thermische Kontraktion zurückgeführt (SCHREINER 1992).

Allerdings fanden sich weder bei den untersuchten Zementationskörpern noch im umgebenden Lockersediment Kriterien, mit denen sich die vorkommenden Risse einem der o.g. Prozesse eindeutig zuordnen ließen.

Außer Schrumpfrissen gibt es zwischen der feinkörnigen Matrix und häufig darin vorkommendem gröberem Detritus (Sand, Kies) Hohlräume, die sich im Dünnschliff als beulenförmige bis mehr oder weniger parallele Spalten zwischen Matrix und gröberem Detritus zeigen (Taf. IV/2-4). In diesen Hohlräumen treten Zementsäume aus meist blattförmigem Isopachenzement auf, die entweder auf gröberem Detritus (Taf. IV/2), auf der durch Mikrit/Mikrospart zementierten, feinkörnigen Matrix (Taf. IV/3) oder auf beidem aufwachsen (Taf. IV/4). Dies gibt folgende Hinweise zur relativen Zementationsabfolge:

- Blattförmige Kristalle wuchsen nur auf Detritus auf, da die feinkörnige Matrix noch nicht zementiert war und keine Basis für die Bildung von Zementkristallen bot. Sie entstanden somit vor dem Mikrit/ Mikrospartzement.
- Blattförmige Kristalle wuchsen auf Detritus und bereits zementierter Matrix auf. Sie entstanden somit nach dem Mikrit/ Mikrospartzement.
- Blattförmige Kristalle wuchsen nur auf bereits zementierter Matrix auf und entstanden ebenfalls nach dem Mikrit/Mikrospartzement. Möglicherweise verhinderten Verunreinigungen auf dem gröberem Detritus die Bildung von Zementkristallen, was allerdings ebensowenig nachgewiesen werden konnte, wie mögliche andere Ursachen.

Die Genese der Hohlräume, in die die blattförmigen Zementkristalle hinein wuchsen, ist ungeklärt. Eine

Verdrängung der feinkörnigen Matrix durch blattförmigen Zement ist auf Grund der oft euhedralen Kristalle und des offenen Restporenraums auszuschließen. Möglicherweise handelt es sich um Schrumpfrisse, die sich allerdings signifikant von den auch makroskopisch erkennbaren Schrumpfrissen unterscheiden, die die Konkretionen vertikal oder sternförmig durchziehen (s.o.). Im Weichsel-zeitlich entstandenen Geschiebemergel gibt es ähnliche, mit Mikrit gefüllte ehemalige Hohlräume, die KRIENKE (2001) auf synsedimentäre Rotation größerer Geschiebe zurückführt. Allerdings treten mit Zement gefüllte Hohlräume in den untersuchten Zementationen auch in Schlufflagen auf, die in Schmelzwassersedimente eingeschaltet sind (z.B. Breetze Horizont c.) und in denen durch Eisvorschub bedingte Rotation von Detritus wenig wahrscheinlich ist. Möglicherweise entstanden die Hohlräume durch Eis, das sich an gröberem Detritus anlagerte und Eislinsen bzw. -säume zwischen Grobdetritus und Matrix bildete. Es fanden sich zwar keine Literaturhinweise auf vergleichbare Bildungen. Allerdings wurden solche Eissäume bei Geländeaufnahmen im Winter im wassergesättigten, tonigen Geschiebemergel im Aufschluss Helpensen beobachtet.

6.3.4 Selbstorganisationsprozesse

In folgenden Aufschlüssen gibt es drei oder mehr übereinander vorkommende Konkretionshorizonte, die durch wenige dm-mächtige konkretionsfreie Bereiche getrennt werden:

- Copenbrügge (Horizont c.),
- Freden (Aufschlussbereiche I und VII),
- Bornhausen (Horizonte a., d.).

Das lagenweise Vorkommen von Konkretionen kann auf Prozessen oder Faktoren beruhen, die horizontbeständig sind (z.B. FÜCHTBAUER & RICHTER 1988). So wiesen BJØRKUM & WALDERHAUG (1990a) lagenweise angereicherte organische Substanz nach, deren mikrobielle Umsetzung ein geochemisches Milieu schuf, das die Konkretionsbildung auslöste. In den Aufschlüssen Freden (Aufschlussbereich I) und Bornhausen (Horizont a.) bildete vadoser Zement wahrscheinlich Kristallisationskeime für die phreatische Hauptzementationsphase. Allerdings findet Zementation in der vadosen Zone nicht horizontbeständig statt, so dass vadoser Zement die Konkretionsbildung zwar verursacht haben, aber nicht für deren Verteilung verantwortlich sein kann. Horizontweise angereicherte, potentielle Zementationsauslöser wurden in keinem der untersuchten Aufschlüsse beobachtet.

JOHNSON & SWETT (1974) führten das horizontbeständige Vorkommen von Konkretionen auf die

Bildung unterhalb einer Grundwasser-Oberfläche zurück. Auf zahlreiche übereinander vorkommende Konkretionshorizonte angewendet, setzt diese Annahme eine Grundwasser-Oberfläche voraus, die so lange ortsfest war, bis sich ein Konkretionshorizont bildete. Anschließend musste sie wenige dm angestiegen bzw. abgefallen sein, um den nächsten Horizont zu bilden. Da die Konkretionen in den Horizonten alle etwa gleich groß sind, müssten die Phasen mit ortsfester Grundwasser-Oberfläche etwa gleich lang gedauert haben. Dies ist unter Berücksichtigung der geologischen und klimatischen Entwicklung der untersuchten Bereiche kein plausibles Modell.

Eine Modellvorstellung, die sich zwanglos auf die beobachteten Konkretionshorizonte anwenden lässt, ist das Konzept der „Selbstorganisation“ (ORTOLEVA 1994, ABDEL-WAHAB & MCBRIDE 2001). In diesem Modell bilden sich in Systemen, die quasi-homogen sind und sich nicht im Lösungs-gleichgewicht befinden, geordnete Strukturen durch das Zusammenspiel von Konzentrationsänderungen von einem oder mehreren chemischen Parametern und einer Reaktions-Transport-Rückkopplung (ORTOLEVA 1994). Dabei erzeugt die Entstehung von Konkretionen durch Lösungskonzentrations-gefälle in ihrer unmittelbaren Umgebung ein Milieu, das die Bildung anderer Konkretionen ausschließt (z.B. PIRRIE 1987, BJØRKUM & WALDERHAUG 1990b). Konzentrationsgefälle der Lösung und die damit verbundene Größe des Bereiches in dem keine anderen Konkretionen entstehen, werden dabei im Wesentlichen von der Strömungssituation, der Beschaffenheit des Grundwassers und geochemischen Eigenschaften der umgebenden Sedimente gesteuert.

Zusammenfassend betrachtet, erscheint die Modellvorstellung schlüssig, dass Selbstorganisationsprozesse die Bildung der Konkretionshorizonte in den Aufschlüssen Copenbrügge, Freden und Bornhausen gesteuert haben.

6.3.5 Bildung hängender Zapfen

Der Transport von Sickerwasser in der wasserunge-sättigten Zone wird ganz wesentlich von Heterogenitäten des Sedimentes beeinflusst (z.B. HINZ et al. 1996). Diese können im wassergesättigten Bereich zu vorauseilenden Reaktionsfronten (WEI & ORTOLEVA 1990) und in der vadosen Zone zu Bahnen bevorzugter Versickerung (BUCHTER et al. 1995) führen.

Die Untersuchung hängender Zapfen in den Aufschlüssen Breetze (Horizonte a., d.), Daerstorf, Eime und Holzen zeigte, dass vadoser Zement in bevorzugten Sickerbahnen gebildet und dadurch die Form der Zapfen vorgezeichnet wurde. Die

Entstehung der Zapfen in o.g. Aufschlüssen begann unmittelbar unterhalb der Grundmoräne. Sie wurde von Sickerwasser ausgelöst, das sich bei langwieriger Passage durch den geringdurchlässigen Geschiebemergel mit Kalzit aufsättigte. Zur Ausfällung des Kalzits kam es durch veränderte Gleichgewichtsbedingungen (z.B. CO_2 -Partialdruck, Temperatur). Die Bildung hängender Zapfen (Endostalaktiten) durch Sickerwasser in der vadosen Zone bestätigt entsprechende Befunde von MCBRIDE & PAREA (2001). Dagegen wurden andere Ursachen für die Zapfenbildung (z.B. Zementbildung um Pfahlwurzeln) bei keinem der untersuchten Zementationskörper beobachtet.

Bei hängenden Zapfen ändern sich gelegentlich die Einfallswinkel der Zapfenlängsachsen, indem sie in grobkörnigen Schichten etwas flacher bzw. in feinkörnigen Schichten wieder steiler werden. Die Änderung der Strömungsrichtung, auf der die Orientierung der Zapfenlängsachse beruht, wurde offensichtlich durch die Korngrößenunterschiede verursacht. Dabei korreliert die Orientierung der jeweiligen Zapfenabschnitte mit Sickerwasserlinien, wie sie bei der Passage unterschiedlich durchlässiger Schichten zu erwarten sind (Abb. 12).

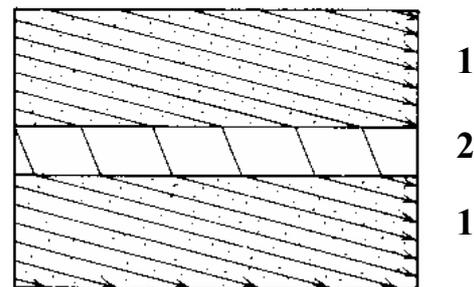


Abb. 12: Richtungsänderung von Stromlinien (Pfeile) in geschichteten Systemen: Die Durchlässigkeit von Schicht 1 ist um den Faktor 10 größer als von Schicht 2 (verändert nach HUBBERT 1940, in FREEZE & CHERRY 1979).

Außerdem war gelegentlich zu beobachten, dass der Zapfendurchmesser beim Übergang von grob- zu feinkörnigen Schichten ansteigt. Die Erhöhung der Zapfendurchmesser in feinkörnigen Schichten wird auf Aufstau-effekte beim Übertritt aus grobkörnigen Schichten zurückgeführt, die zusätzlich zur vertikalen eine horizontale Bewegungskomponente verursachen.

6.3.6 Grundwasserströmung

Die Form von Konkretionen ist vor allem von der Intensität des Lösungstransports und damit im phreatischen Milieu von der Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit abhängig (Kap. 6.2.1). Das gemeinsame Vorkommen unterschiedlicher Konkretionstypen weist auf syngenetische

Änderung der Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit hin. Dabei gibt es in den in den Aufschlüssen Breetze (Horizont c.), Copenbrügge (Horizont d.) und Bornhausen diskusförmige Konkretionen, die relikthaft in flachen Zapfen vorkommen bzw. in den Aufschlüssen Freden (Aufschlussbereiche VII, VIII-3) und Krankenhagen kugelige in diskusförmigen Konkretionen. Aus dem Befund, dass die Beschaffenheit des Kalzitementes in den Konkretionstypen jeweils gleich ist, lässt sich schließen, dass sich während der Konkretionsbildung nur die Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit erhöhte. Alle anderen Einflussfaktoren (z.B. Beschaffenheit des Grundwassers) blieben gleich. Die signifikante Erhöhung der Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit während der Konkretionsbildung steht im Zusammenhang mit der paläohydrogeologischen Entwicklung in o.g. Aufschlüssen. Dabei führte das Einschneiden des jeweiligen Vorfluters zu höheren hydraulischen Gradienten und damit zu stärkerer Grundwasser-Strömung (Kap. 6.4).

In den Aufschlüssen Daerstorf, Volkstorf (Horizont a.), Freden (Aufschlussbereich II) und Bornhausen (Horizont c.) sind grobkörnige Schichten meist vollständiger zementiert und die laterale Erstreckung zementierter Bereiche ist größer als in benachbarten feinkörnigen Schichten. Nach BERNER (1968) wird die Wachstumsrate von Zement durch die Strömungsgeschwindigkeit der Bildungslösung gesteuert. Da bei größerem Stofftransport mehr Zement gebildet werden kann, sind im Vergleich zu benachbarten feinkörnigen Schichten besser zementierte grobkörnige als Hinweis auf Bildung im strömungsdominierten, phreatischen Milieu zu werten.

Im Aufschluss Freden gibt es darüber hinaus Hinweise, dass sich neben der Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit und -richtung auch die Art der Grundwasser-Strömung auf die Form zementierter Bereiche auswirkt. Im Aufschlussbereich II-3 fällt auf, dass in unmittelbar aneinandergrenzenden Schichten im Sand liegende Zapfen und im Kies Massenzementationskörper entstanden. Dabei gibt es auch Zapfen, die auf Massenzementationskörpern aufwuchsen. (Taf. VI/5). Die Art von Grundwasser-Strömung hängt ganz wesentlich vom Verhältnis von Trägheits- zu Reibungskräften einer Flüssigkeit im durchströmten Medium ab (z.B. LANGGUTH & VOIGT 1980). In Porengrundwasserleitern bewegt sich Grundwasser meist laminar (wirbelfrei). Erst bei sehr hoher Fließgeschwindigkeit können die Trägheitskräfte des Wassers so groß oder größer als die Reibungskräfte werden, was zu turbulenter Strömung führt (BUSCH et al. 1993). Damit lässt sich zwanglos ein Zusammenhang zwischen der Korngrößenabhängig

unterschiedlichen Form von zementierten Bereichen und dem Strömungsverhalten des Grundwassers herstellen. Die Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit war im sehr gut wasserdurchlässigen Kies (k_f -Wert geschätzt: 10^{-2} m/s) groß, so dass hier turbulente Strömung herrschte (Abb. 13). Beim Eintritt in den angrenzenden, geringer wasserdurchlässigen Sand (k_f -Wert geschätzt: 10^{-4} m/s) verringerte sich die Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit und es bildeten sich liegende Zapfen bei laminarer Strömung.

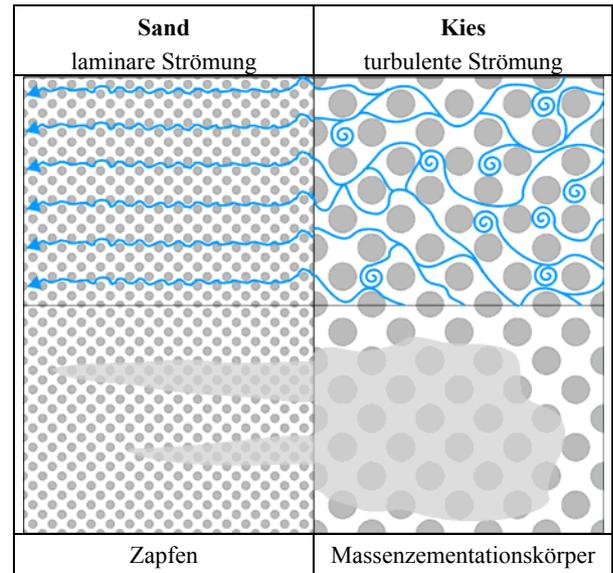


Abb. 13: Idealisertes, unmaßstäbliches Genesemodell von Zapfen und Massenzementationskörpern im Aufschluss Freden, Aufschlussbereich II-3 (unten, grau unterlegt) durch laminare Strömung im Sand bzw. durch turbulente Strömung im Kies (oben, blaue Linien = idealisierte Strömungsbahnen).

Das Modell der Bildung von Massenzementationskörpern durch turbulente Grundwasser-Strömung ist allerdings nur eine Möglichkeit ihrer Entstehung. Außerdem gibt es Massenzementationskörper, die sich ausschließlich im vadosen Milieu (z.B. Aufschluss Freden, Aufschlussbereich V-1) oder phreatisch im feinkörnigen Sediment bildeten, in dem nur laminare Strömung möglich ist (z.B. Aufschluss Volkstorf Horizont a.).

6.3.7 Das Talrand-Modell

Nach Übertragung von Beobachtungen an karbonatisch zementierten, pleistozänen Lockersedimenten des Alpenvorlandes (z.B. SCHREINER 1992, JERZ 1993) auf eigene Untersuchungsergebnisse (z.B. Holzen, Ödishausen, Rumbeck) diskutierte PERSCHKE (1993) ein Genesemodell, bei dem die Hangposition des Zementationsbereichs eine entscheidende Rolle spielt („Talrand-Modell“

Genesemodell Typ A). Dabei nahm er an, dass die Unterschneidung eines Porengrundwasserleiters (Hangposition) ursächlich für vadose Bedingungen ist, in denen Sickerwasser aus der überlagernden bindigen Schicht zur Zementation führte.

In den Aufschlüssen Daerstorf und Breetze, die weitab von Hängen, mitten in der Geest liegen, gibt es Zementationskörper, die denen in Holzen, die PERSCHKE (1993) als typisches Beispiel für das Talrand-Modell anführte, qualitativ und quantitativ vergleichbar sind. Dies deutet darauf hin, dass die Zementationskörper im Aufschluss Holzen nur zufällig in einer talrandnahen Position vorkommen. Darüber hinaus haben vor allem zementpetrographische Untersuchungen ergeben, dass die Bildungsprozesse der Zementationskörper in den Aufschlüssen Breetze (Horizonte a., d.), Daerstorf, Holzen und auch Eime, wo es vergleichbare Zementationskörper gibt, wesentlich komplexer sind. In der Phase vadoser Zementation wurde zwar die Form der Zapfen durch entsprechenden Zement vorgezeichnet. Allerdings spielt der vados entstandene Zement innerhalb der Zementationskörper gegenüber Zement mit phreatischen Merkmalen quantitativ keine Rolle (Abb. 14a, b). Die Menge des vadosen Zementes reicht auch nicht aus, um durch Sickerwasseranstau im Bereich der Zapfen pseudo-phreatische Bedingungen für spätere Zementationsphasen zu schaffen. Damit muss der überwiegende Teil des Zementes in den Zementationskörpern im phreatischen Milieu durch kalzitreiches Sickerwasser entstanden sein, das aus dem Geschiebemergel in die grundwassererfüllten Schmelzwasserablagerungen gelangte. So wurde der Restporenraum in den Zapfen aufgefüllt und es entstanden Massenzementationskörper (Abb. 14c), wobei Durchmischung von Wässern unterschiedlicher Zusammensetzung (RUNNELS 1969, WIGLEY & PLUMMER 1976) und / oder Temperaturerhöhung zur Kalzitfällung führten. Die in der vadosen Zone entstandenen Zementkristalle wirkten als Kristallisationskeime.

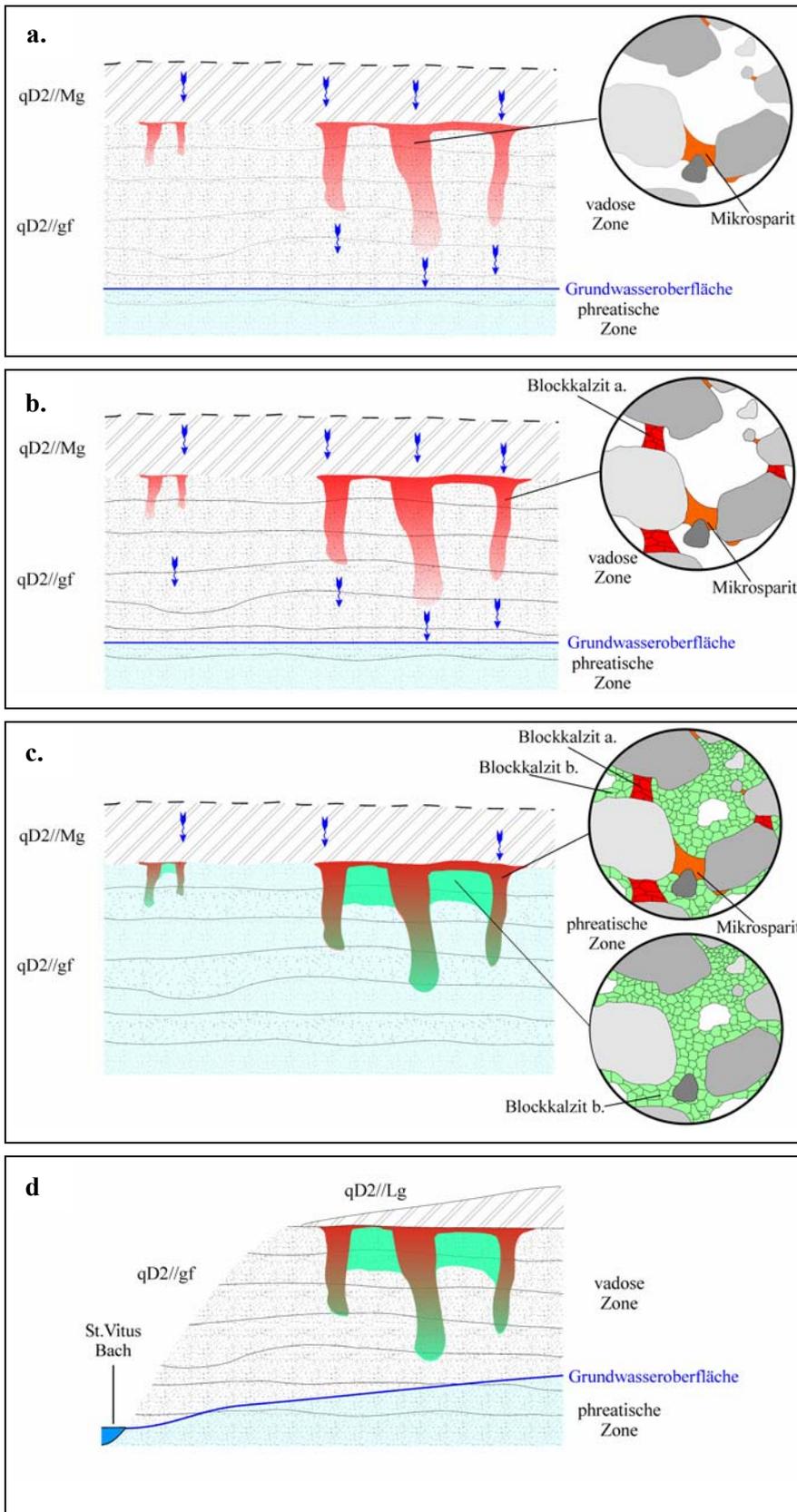
Das Talrand-Modell PERSCHKES (1993) kann als Diagenesemodell lediglich für einen Teil der im

Aufschluss Ödishausen vorkommenden Zementationskörper angewendet werden. Für deren Bildung im vadosen Milieu spricht die morphologische Position in Verbindung mit der hydrogeologischen und geologischen Situation des Aufschlusses (Anh. IV) sowie zementpetrographische Befunde (Kap. 5.3).

6.3.8 Das Kapillarsperren-Modell

In der vadosen Zone wird der Sickerwassertransport hauptsächlich durch Kapillar- und Schwerkraft, Wassergehalt und -spannung bzw. die Wechselwirkung dieser Kräfte gesteuert (MELCHIOR et al. 1996). Die wasserungesättigte Leitfähigkeit ist gesteinspezifisch und ganz wesentlich von Korngröße und Porenverteilung abhängig. Sie ist z.B. bei Mittelsand höher als bei Feinkies. Dieser Umstand wird im Deponiebau zur Anlage von Oberflächenabdichtungen durch Kapillarsperrensysteme genutzt (z.B. HUDE 1991, MELCHIOR et al. 1996, 1997). Ein Kapillarsperrensystem besteht aus einer grobkörnigen Schicht mit relativ niedriger wasserungesättigter Leitfähigkeit, die als Kapillarsperre („Kapillarblock“ oder „kapillarbrechende Schicht“ sensu MELCHIOR et al. 1996, Abb. 15) fungiert. Darüber gibt es eine feinkörnige Entwässerungsschicht („Kapillarschicht“ oder „kapillare Leitschicht“ sensu MELCHIOR et al. 1996, Abb. 15), in der Sickerwasser durch Kapillarkräfte zunächst gehalten und am vertikalen Transport in die tiefer liegende Kapillarsperre gehindert wird.

Das Kapillarsperrensystem besteht nach MELCHIOR et al. (1996) aus Schichten, die im wasserungesättigten Zustand hoch durchlässig sind (Entwässerungsschicht: Fein- bis Grobsand, Kapillarsperre: Grobsand bis Kies). Steigender Wassergehalt führt in wasserungesättigten Schichten zu geringeren Wasserspannungen (Abb. 15 unten, linke Seite) und schließlich zum Durchbruch von Sickerwasser aus der Entwässerungsschicht in die Kapillarsperre (MELCHIOR et al. 1996).



a., b. Die Form hängender Zapfen wird von vadosem Zement nachgezeichnet, der zweiphasig gebildet wurde (a: Mikrosporit, b: Blockkalzit a.). Der Zement entstand in der vadosen Zone entlang bevorzugter Sickerbahnen durch kalzitreiches Sickerwasser, das aus dem Geschiebemergel in die Schmelzwasserablagerungen gelangte.

c. In der phreatischen Hauptzementationsphase bildeten sich Massenzementationskörper zwischen den Zapfen und der Restporenraum in den Zapfen wurde zementiert (Blockkalzit b.). In dieser Phase wurde der überwiegende Teil des Zementes in den Zementationskörpern gebildet.

d. Die Zementationskörper im Aufschluss Holzen befinden sich heute am Talrand des Sankt-Vitus-Baches. Durch das Einschneiden des Baches gelangten die Zementationskörper erneut in vadose Milieu. Da die Grundmoräne entkalkt und weitgehend abgetragen wurde, findet in dieser Phase keine Zementbildung mehr statt.

Abb. 14: Diagenesemodell zur Entstehung von hängenden Zapfen und Massenzementationskörpern am Beispiel des Aufschlusses Holzen. Links jeweils die schematischen geologisch / hydrogeologischen Schnitte, rechts die schematische Darstellung zementpetrographischer Befunde. Rot / Orange = Produkte vadoser Zementation, Grün = Produkte phreatischer Zementation, blaue Pfeile = Sickerwasser.

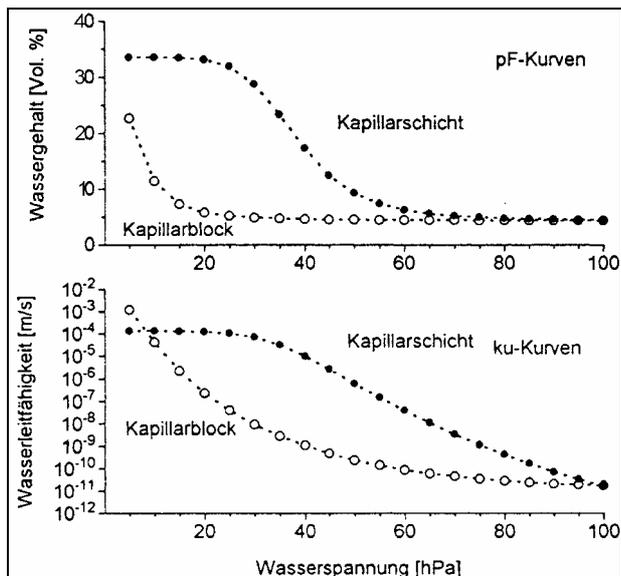


Abb. 15: Wassergehalts-Wasserspannungs-Charakteristiken (pF-Kurven, oben) und ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen (ku-Kurven, unten) von Entwässerungsschicht (= Kapillarschicht) und Kapillarsperre (= Kapillarblock, aus MELCHIOR et al. 1996).

Daher müssen die Schichten in Kapillarsperrensystemen ein ausreichendes Gefälle haben, damit das Sickerwasser in der Entwässerungsschicht, die mit k_f -Werten von $\geq 1 \times 10^{-4}$ m/s ausreichend wasserdurchlässig sein muss, oberhalb der Kapillarsperre abfließen kann. Die Kapillarsperre bleibt relativ trocken. Wasser kommt hier oft nur noch in Zwickeln der Kornkontaktpunkte vor (MELCHIOR et al. 1996).

Hinweise auf die Bildung nach dem Kapillarsperren-Modell gibt es in den Aufschlüssen Volkstorf (Horizont e.), Coppenbrügge (Horizont d.) und Ödishausen. Im **Aufschluss Volkstorf (Horizont e.)** gibt es Zementationskörper in einer mit geringem Winkel nach Osten einfallenden Wechselfolge aus Fein- bis Mittelsand und Grobsand. In den z.T. schluffigen Fein- bis Mittelsandschichten kommen flache Zapfen (Taf. II/1), in den Grobsandschichten kleinere Massenzementationskörper vor. Nach den Zementtypen fand die Zementation im Grobsand im vadosen und im Fein- bis Mittelsand im phreatischen Milieu statt. Die unterschiedlich zementierten Bereiche verzahnen sich mikroskopisch, so dass gleichzeitige Bildung wahrscheinlicher ist als mehrphasige. Damit müssen bei ihrer Bildung wassergesättigte und – ungesättigte Bereiche unmittelbar übereinander bestanden haben. Zu ihrer Entstehung führte kalzitreiches Sickerwasser, das aus einer Grundmoräne in die unterlagernden, vadosen Schmelzwasserschichten gelangte. In den schwach nach Osten einfallenden Feinsand- bis Mittelsandschichten, die die Funktion der Entwässerungsschicht

übernahmen, führt steigender Sickerwassergehalt nach Erreichen von quasi wassergesättigten Bedingungen zum lateralen Abströmen des Wassers. In diesem Milieu bildeten sich flache Zapfen, wobei die Zapfenlängsachsen parallel zur Strömungsrichtung des Wassers, also Ost-West orientiert sind. Ein Teil des zutretenden Sickerwassers, der nicht in der Entwässerungsschicht gehalten werden konnte, versickerte in die Kapillarsperre, die aus Mittel- bis Grobsandschichten besteht und führte hier zur Bildung der Massenzementationskörper im vadosen Milieu.

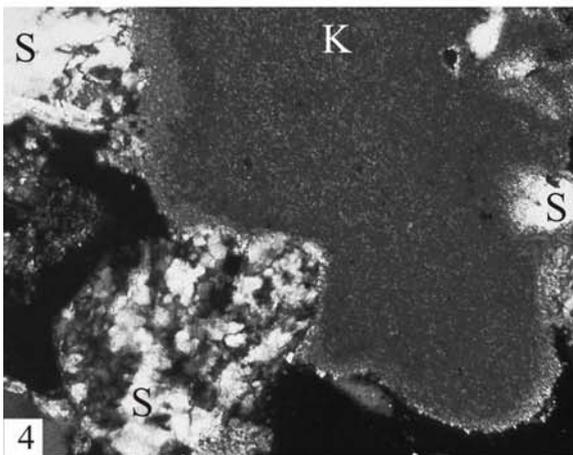
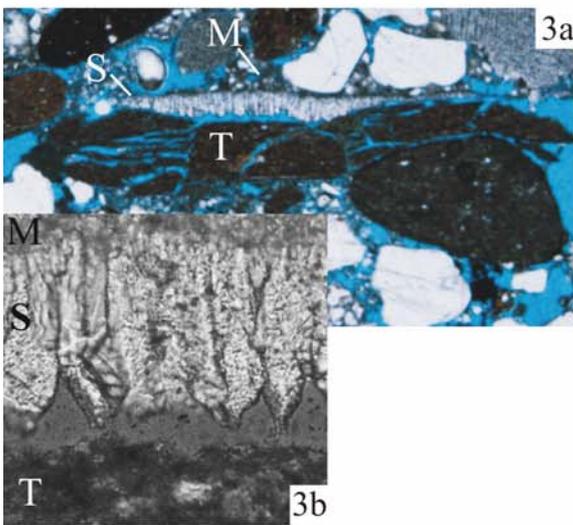
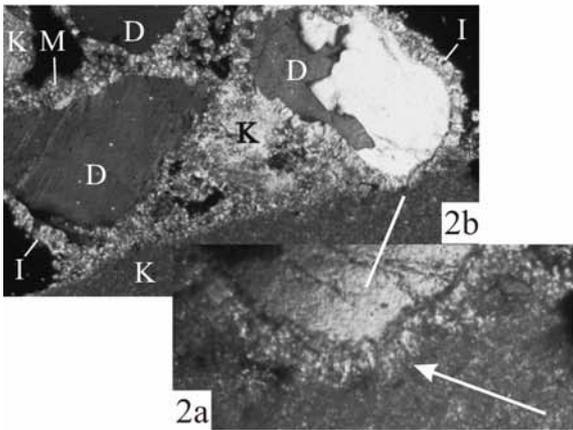
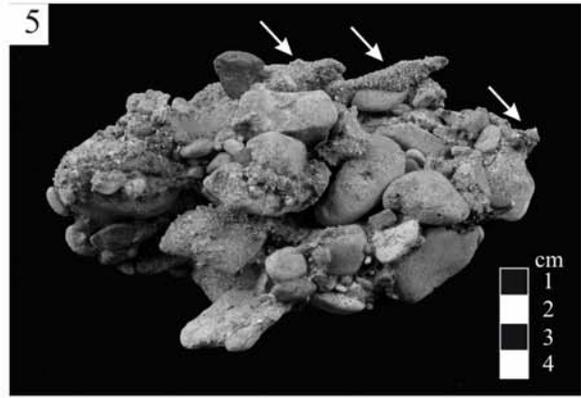
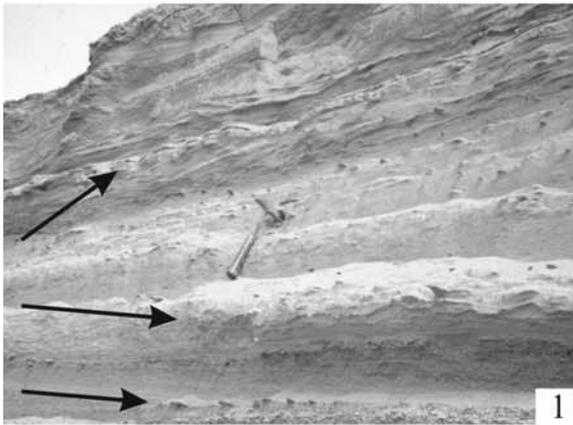
Im **Aufschluss Coppenbrügge (Horizont d.)** gibt es im feinsandigen Mittelsand stratiforme Zementationskörper unmittelbar über der Grenzfläche zu tieferliegendem grobsandigen, stark kiesigen Mittelsand. Die Schichten fallen mit etwa 15° nach Westen ein. Der Zement entstand überwiegend vados. Fleckhaft vorkommender Zement mit Merkmalen phreatischer Entstehung bildete sich wahrscheinlich in wassergesättigten Bereichen innerhalb der vadosen Zone (pseudophreatisch, Kap. 6.3.9). Diese Befunde weisen darauf hin, dass die feinkörnigen Sedimente als Entwässerungsschicht und die grobkörnigen als Kapillarsperre fungierten. Das Sickerwasser gelangte zunächst in die mit 15° einfallende Entwässerungsschicht und strömte dort ab.

Im **Aufschluss Ödishausen** gibt es im ungeschichteten, mehrere m mächtigen Kies hängende Zapfen (Taf. VI/6). Unter dem Kies folgt eine mit 20° – 24° nach Westen einfallende Sand-Kies-Wechselfolge. Beim Übergang von ungeschichtetem Kies in die Wechselfolge gehen die hängenden Zapfen sukzessive in Massenzementationskörper über, durch die vor allem Sand der Wechselfolge zementiert ist (Taf. VI/7). Während der Zement in den Zapfen im vadosen Milieu entstand, zeigt der Zement in den Sandschichten Merkmale phreatischer Entstehung. Es ist zwar denkbar, dass die Grenzfläche zwischen vados zementiertem, ungeschichtetem Kies und der phreatisch zementierten, mit etwa 20° – 24° einfallenden Wechselfolge zufällig mit einer während der Zementbildung bestehenden Grundwasser-Oberfläche zusammenfiel. Dagegen spricht vor allem die exponierte morphologische Position, in der eine so hohe Grundwasser-Oberfläche für den Zeitraum seit der Ablagerung der Sedimente nach der paläohydrogeologischen Situation nicht zu erwarten ist. Wahrscheinlicher ist vielmehr, dass die Sandschichten in der Wechselfolge als Entwässerungsschichten bzw. der darunter liegende Kies als Kapillarsperre wirkten. Das Einfallen der Schichten ermöglichte das Abströmen des Wassers in der Entwässerungsschicht oberhalb der Kapillarsperre (Abb. 16).

Tafel VI: Diagenesmilieus I

- Taf. VI/1: Aufschluss mit Schmelzwasserablagerungen, in denen horizontweise diskusförmige Konkretionen bis flache Zapfen (Pfeile) vorkommen, die durch Verwitterung aus dem Lockersediment herauspräpariert sind. Westwand Aufschluss Copenbrügge, Horizont c.
- Taf. VI/2: Mechanische Deformation und mehrphasige Zementation. Dabei wurde siliziklastischer Detritus (D) mit Isopachenzement (I) in ein Karbonatkorn eingedrückt (Detail: 2a). Als jüngster Zement entstand Mikrit (M). K = karbonatischer Detritus, Dünnschliffaufnahmen, Bildbreite 2a = 0,2 mm, 2b = 1 mm (Übersichtsaufnahme). Aufschluss Volkstorf, Horizont c.
- Taf. VI/3: Dünnschliffaufnahmen (parallele Nicols) mit einem Hohlraum zwischen einem zerbrochenen Tonstein-Geröll (T) und Mikrosparitzement (M), in den – vom Zement aus - Saumzement (S) hinein wuchs. 3a. Übersicht: im Restporenraum befindet sich blau gefärbtes Kunstharz, Bildbreite entspricht 3 mm; 3b. Detail des Saumzementes: Bildbreite entspricht 0,3 mm. Aufschluss Helpensen, Horizont b.
- Taf. VI/4: Dünnschliffaufnahme eines mikritischen Karbonatkorns (K), in das siliziklastische Körner (S) hinein gedrückt sind. Der helle Saum des Karbonatkorns entstand durch randliche Verwitterung und stellt ein Anfangsstadium von Pseudomatrix-Bildung dar. Gekreuzte Nicols, Bildbreite entspricht 2 mm, Aufschluss Helpensen, Horizont c.
- Taf. VI/5: Aufschluss Freden, Aufschlussbereich II. Handstück eines Massenzementationskörpers im Kies und kleinen, z.T. abgebrochenen Zapfen (Pfeile), die vom Massenzementationskörper aus in den benachbarten Sand hinein wuchsen. Ursprünglich befand sich der Kies östlich der Zapfen, deren Längsachsen West - Ost streichen, Aufschluss Freden, Aufschlussbereich II-3.
- Taf. VI/6: Karbonatische Zementation von ungeschichtetem Grobkies in Form von Zapfen im tieferen Teil (a) und Massenzementationskörper (b) unmittelbar unterhalb der Grenze (c) zum ehemals überlagernden Geschiebemergel. Länge des Maßstabs 3 m, Aufschluss Ödishausen.
- Taf. VI/7: Übergang zwischen ungeschichtetem Kies mit der Basis von Zapfen (a) oben und Massenzementationskörpern in der Sand-Kies-Wechselfolge (b) unten. Länge des Maßstabsbalkens 1 m, Aufschluss Ödishausen.
- Taf. VI/8: In den Aufschlüssen Hittfeld, Copenbrügge und Engelade waren verwitterte „Toneisensteingeoden“ (Bild Links: Aufschluss Copenbrügge) und Kalkmergelsteingerölle (Bild Mitte: Aufschluss Engelade, Bild rechts: Aufschluss Hittfeld) bevorzugte Aufwuchssubstrate, um die sich kleinere Massenzementationskörper (Bild Links) und Zementkrusten (Bilder Mitte, Rechts) bildeten.

Tafel VI



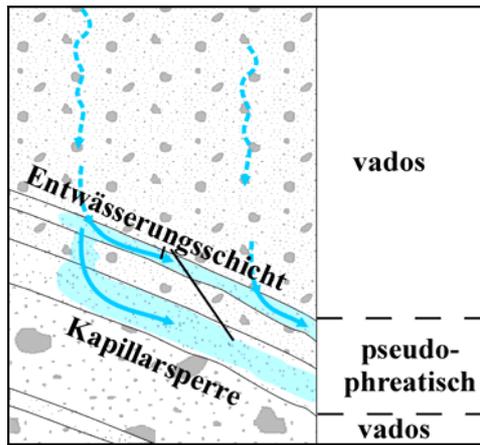


Abb. 16: Schematisches, unmaßstäbliches Genesemodell für die Zementationskörper im Aufschluss Ödishausen. Unterhalb der vadosen Zone in der sich Sickerwasser etwa vertikal bewegte (gepunktete Linie), folgte die Entwässerungsschicht mit pseudo-phreatischen Bedingungen (blau), in der Wasser entsprechend des Schichteinfallens oberhalb der Kapillarsperre abströmte (durchgezogene Linie).

In den Aufschlüssen Holzen, Krankenhagen, Rumbeck und Freden (Aufschlussbereich V-1, VI) sind feinkörnige Schichten meist besser zementiert als benachbarte grobkörnige. Dieser Befund spricht zunächst für Zementation im vadosen Milieu, in dem die Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Sickerwasser und damit die Möglichkeit der Zementation in feinkörnigen Schichten höher ist. Allerdings diskutierten TARDY & MONNIN (1983), dass der Sättigungszustand einer Lösung auch durch die Größe des Porenraumes beeinflusst werden kann. Dabei nimmt die Löslichkeit von Salzen in kleineren Porenräumen gegenüber größeren ab. Da in o.g. Zementationskörpern weitere Hinweise auf Zementation nach dem Kapillarsperren-Modell (z.B. bevorzugte Zementation feinkörniger Schichten unmittelbar oberhalb grobkörniger) fehlen, stellt allein die vollständigere Zementation feinkörniger Schichten keinen Hinweis auf Bildung im vadosen Milieu dar.

6.3.9 Pseudo-phreatische Zementation

Für Zementation, die in wassergesättigten Bereichen innerhalb der vadosen Zone stattfand, wird hier der Begriff pseudo-phreatisch eingeführt. Dabei weisen die Merkmale von pseudo-phreatisch entstandenem Zement auf phreatische Bildung hin, während andere Untersuchungsbefunde (z.B. Art und Position der Zementationskörper, paläohydrogeologische Situation des Aufschlusses) für Zementation im vadosen Milieu sprechen. Dabei konnte in folgenden hydrogeologischen Milieus pseudo-phreatische Zementation nachgewiesen werden:

1. Fleckhaft wassergesättigte Bereiche innerhalb der vadosen Zone

In der vadosen Zone sind fleckhafte Bereiche, in denen der Porenraum wassergesättigt ist, nicht selten (z.B. HÖLTING 1996). Diese Bereiche sind das Bildungsmilieu für Zement mit phreatischen Merkmalen, der fleckhaft in vados gebildeten Zementationskörpern vorkommt. Sie sind meist einige mm^3 bis cm^3 groß (z.B. Aufschlüsse Breetze, Horizont d., Helpensen, Horizont b.). Außerdem gibt es in den Aufschlüssen Bad Münder/Hachmühlen und Eime (Massenzementations-Horizont c., oberer Teil, Kap. 6.4.9, 6.4.11) Hinweise, dass die Plombierung von Porenraum durch älteren Zement zu fleckhaft wassergesättigten Bereichen und in diesen zu pseudo-phreatischer Zementation führte.

2. Kapillarsperren-System

Bei Zementation nach dem Kapillarsperren-Modell bildet sich der Zement unter pseudo-phreatischen Bedingungen in der Entwässerungsschicht (Kap. 6.3.8).

3. Schwebende Grundwasser-Stockwerke

Im Aufschluss Freden (Aufschlussbereich V) gibt es in zwei Horizonten (V-2 und V-3) diskusförmige Konkretionen, die sich nach den Untersuchungsbefunden (Kap. 5.3) gleichzeitig bildeten. Der obere Konkretionshorizont befindet sich in dünnen Feinsandschichten einer insgesamt gering wasser-durchlässigen Schluff-Feinsand-Wechselfolge (k_f -Wert geschätzt: $10^{-5} - 10^{-7}$ m/s). Der untere Horizont befindet sich in Mittelsandschichten (k_f -Wert: $1,5 - 4,6 \times 10^{-4}$ m/s). Die Konkretionen kommen im unteren Horizont im homogenen Sediment horizontbeständig vor, was nach JOHNSON & SWETT (1974) auf die Bildung unterhalb einer Grundwasser-Oberfläche zurückzuführen ist. Diese Befunde deuten darauf hin, dass sich die Konkretionen im höheren Horizont in einem schwebenden Grundwasser-Stockwerk bildeten. Dabei führten die hydraulischen Eigenschaften der Feinsand-Schluff-Wechselfolge zum Aufstau von Sickerwasser und zu phreatischen Bedingungen im ansonsten vadosen Milieu. Die Oberfläche des Haupt-Grundwasser-Stockwerks befand sich entsprechend der Position der Konkretionen im unteren Horizont einige m tiefer (Abb. 17).

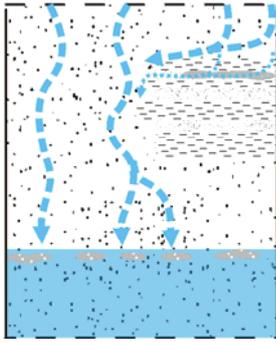


Abb. 17: Schematische Darstellung der hydrogeologischen Situation, die zur Bildung der Konkretionshorizonte V-2 und V-3 im Aufschlussbereich V, Aufschluss Freden führten. Im oberen, schwebenden Grundwasser-Stockwerk fand die Zementation unter pseudophreatischen Bedingungen statt.

Wahrscheinlich ebenfalls in einem schwebenden Grundwasser-Stockwerk bildeten sich stratiforme Zementationskörper im Aufschluss Freden, Aufschlussbereich VIII-6. Die stratiformen Zementationskörper kommen in einer Sandschicht oberhalb von Schluff vor (Taf. II/4). Der Zement hat sowohl Merkmale vadoser als auch phreatischer Entstehung, wobei letztere als pseudo-phreatisch interpretiert werden.

6.3.10 Mechanische Beanspruchung kalzitisch zementierter Partien

Hinweise auf mechanische Beanspruchung kalzitisch zementierter Partien gibt es in den Aufschlüssen Volkstorf (Horizont c.), Helpensen (Horizont b.) und Bad Münder/Hachmühlen.

In den Aufschlüssen Volkstorf (Horizont c.) und Bad Münder/Hachmühlen bildete sich in einer frühen Zementationsphase Isopachenzement um siliziklastischen Detritus (z.B. Quarz). Durch mechanische Beanspruchung wurden Detritus und Isopachenzement in weichere Körner (z.B. Tonstein, Kalk) eingedrückt (Taf. VI/2). Als Ursache für die Deformation ist zunächst Sedimentauflast in Betracht zu ziehen. In beiden Aufschlüssen betrug die Mächtigkeit überlagernder Schichten unter Berücksichtigung möglicher späterer Abtragung allerdings maximal nur etwa 10 bis 15 m. Die dadurch verursachte Kompaktion reicht sicher nicht aus, um die beobachtete Korndeformation zu verursachen. Ein wesentlich plausibleres Genesemodell ergibt sich, wenn man die geologische Entwicklung des Untersuchungsgebietes berücksichtigt. Dabei bildet Inlandeis, das in NW-Deutschland bis mehrere 100 m mächtig war (z.B. EHLERS 1994), eine zusätzliche Auflast, die o.g. Kompaktion verursacht haben kann.

Im Aufschluss Helpensen (Horizont b.) gibt es in gut zementierten Arealen häufig Hohlräume

zwischen plattigen Geröllen und dem umhüllenden Zement. Dabei zeichnet die Zementhülle i.d.R. die Form des jeweiligen Kornes nach. Vereinzelt kommen zerbrochene plattige Gerölle vor, deren ursprüngliche Form durch Zement nachgezeichnet wird (Taf. VI/3). Die Trennung von Detritus und Zement bzw. das Zerbrechen der Gerölle fand also nach der Bildung des Zementes statt. Die Hohlräume und Spalten könnten durch Schrumpfung, z.B. durch Dehydratation von Ton- oder Mergelsteingeröllen, das Zerbrechen von Geröllen durch Überlagerungsdruck oder durch Frostsprengung entstanden sein. Gegen Entwässerung spricht, dass auch Detritus betroffen ist, bei dem mit Schrumpfung verbundene Entwässerung auszuschließen ist (z.B. Kalkstein). Kompaktion durch Überlagerungsdruck ist unwahrscheinlich, da die Entstehung von Hohlräumen zwischen Detritus und Zement nicht mit der für Kompaktion typischen Abnahme von Porenraum vereinbar ist. Außerdem ist die Hauptspannungsrichtung bei Kompaktion meist vertikal und das Deformationsbild zerbrochener Gerölle (Taf. VI/3) weist eher auf S gerichtete Schubspannungen hin. Wenn es sich um die Auswirkung von Frostsprengung handeln würde, müssten vergleichbare Phänomene auch in anderen Schichten auftreten, die entweder Saale- oder Weichsel-zeitlich tiefgründig gefroren waren. Da dies nicht der Fall ist, kann auch Frostsprengung als Ursache weitgehend ausgeschlossen werden. Wesentlich wahrscheinlicher sind dagegen Schubspannungen, die durch vorrückendes Inlandeis ausgelöst wurden und die sowohl zum Herausquetschen von Detritus aus der Zementumhüllung als auch zum Zerbrechen plattiger Gerölle geführt haben können. Der Drenthe-zeitliche Gletscher reichte bei Helpensen mindestens bis etwa 205 m ü.NN (KALTWANG 1992), womit das Inlandeis, das für die erforderlichen Schubspannungen verantwortlich gemacht werden muss, über 130 m mächtig war.

6.3.11 Zementation unter warmzeitlichen Bedingungen

Eine zementpetrographische Unterscheidung zwischen warm- und kaltzeitlich gebildetem Zement ist nicht möglich. Generell nimmt zwar mit abnehmender Bildungstemperatur die Kristallgröße des Zementes ab (z.B. FAIRCHILD et al. 1994). Da die Kristallgröße aber auch von zahlreichen anderen Faktoren gesteuert wird, sind große Kristalle kein Nachweis warmzeitlicher Bildung. So beschrieben SHARP et al. (1990) bei subglazial gebildetem Kalzitement neben Mikrit auch große Blockkalzitkristalle und blattförmigen Zement.

Ein guter Hinweis auf warmzeitliche Zementation ergibt sich dagegen bei prozessorientierter Betrachtung. Zum einen ist die potentielle

Karbonatmobilisierung durch biogene CO_2 -Produktion unter warmzeitlichen Bedingungen deutlich höher als im kaltzeitlichen Milieu (Kap. 6.2). Damit ist auch das Potential für Karbonatneubildung in Warmzeiten größer (z.B. FAIRCHILD et al. 1994). Zum anderen ist die Grundwasser-Neubildung in Warmzeiten nach Modellierung von WEERT et al. (1997) größer als in eisfreien Bereichen während der Kaltzeiten. Dies führte zu ansteigenden Grundwasser-Oberflächen zu Beginn von Warmzeiten. Bei Verbindung o.g. Randbedingungen mit den zementpetrographischen Befunden wird hier postuliert, dass phreatische Zementationsphasen, in denen besonders viel Zement gebildet wurde (Hauptzementationsphasen) warmzeitlich stattfanden.

6.3.12 Zementation unter kaltzeitlichen Bedingungen

In den Aufschlüssen Daerstorff, Breetze (Horizont d.), Volkstorff (Horizont c.), Krankenhagen, Eime und Freden (Aufschlussbereiche II, IV, VIII-1, VIII-5) gibt es Hinweise auf Kalzitzementation unter kaltzeitlichen Bedingungen.

Aufschlüsse Daerstorff, Breetze (Horizont d.)

In den Aufschlüssen Daerstorff und Breetze (Horizont d.) kommen kugelige Konkretionen im gut wasserdurchlässigen Sand (k_f -Wert: $2,1 - 3,9 \times 10^{-4}$ m/s) vor. Die kugelige Form der Konkretionen geht auf die Bildung im nahezu strömungsfreien Grundwasser zurück, in dem Stofftransport überwiegend diffusiv stattfand. Eine den rezenten hydrogeologischen Bedingungen vergleichbare Situation mit nördlich bzw. nordöstlich gelegenen Vorfluter existierte wahrscheinlich schon während der Saale-zeitlichen Ablagerung der zementierten Lockersedimente (Anh. IV). Dabei ist auf Grund der hydrogeologischen Situation von nach Norden bzw. Nordosten gerichtetem Grundwasser-Abstrom auszugehen. Da sich die Konkretionen jedoch bei praktisch fehlendem Grundwasser-Abstrom bildeten, muss es während ihrer Bildung zu einer signifikanten Störung des hydrogeologischen Systems gekommen sein. Bei der geologischen und hydrogeologischen Entwicklung dieses Bereiches, gibt es zwei plausible Prozesse, die einen Grundwasser-Aufstau verursacht haben können:

1. Ein vorrückender Gletscher plombiert das Elbe-Tal, das damit seine Vorflutfunktion verliert. Da das Inlandeis der Weichsel-Kaltzeit den Untersuchungsraum nicht mehr erreichte, käme für die Plombierung nur der Gletscher des Warthe-Stadiums in Frage. Im Aufschluss Daerstorff sind Vorschüttimente des jüngeren Drenthe-Vorstoßes zementiert. D.h. die m^3 -großen Zementationskörper, die sich vor den kugeligen Konkretionen bildeten, müssten sich bis zum Vorstoß des Warthe-Inlandeises

gebildet haben. Im Aufschluss Breetze sind die Konkretionen jünger als ebenfalls vorkommende Zapfen, die sich zumindest teilweise post-Drenthe-2-zeitlich bildeten (Kap. 7.1). Damit müsste die Bildung der mehrphasig entstandenen, großen Zementationskörper im Aufschluss Breetze (Horizont d.) in dem relativ kurzen Zeitraum zwischen Überföhrung durch den jüngere Drenthe- Gletscher und dem Warthe-Vorstoß stattgefunden haben. Dieses Modell ist unter Berücksichtigung der Bildungsgeschwindigkeit von Kalzitzement für beide Aufschlüsse auszuschließen.

2. Wesentlich wahrscheinlicher ist die Veränderung der Abstromsituation durch diskontinuierlichen Permafrost, den es im Untersuchungsbereich auch in der Weichsel-Kaltzeit gab (z.B. KELLER 1998). Im diskontinuierlichen Permafrost verbleiben im überwiegend gefrorenen Untergrund grundwasser-erfüllte Bereiche (Taliki), in denen Karbonatzementation stattfinden kann (Abb. 18). Dabei führt das teilweise Gefrieren von Wasser zur Konzentration gelöster Stoffe im noch nicht gefrorenen Wasser (SOUCHEZ & LEMMENS 1985), was die Kalzitzementation in Taliki begünstigt. Karbonatzementation im diskontinuierlichen Permafrost diskutierte z.B. auch KNIGHT (1998).

Im Aufschluss Bornhausen (Horizont b.) gibt es zwar auch kugelige Konkretionen im gut wasserdurchlässigen, Drenthe-zeitlichen Schmelzwassersand (k_f -Wert: $1,7 \times 10^{-4}$ m/s). Hier wurde signifikanter Grundwasser-Abstrom jedoch wahrscheinlich erst durch das Weichsel-zeitliche Einschneiden des Vorfluters ausgelöst. Damit fehlen vergleichbare hydrogeologische Randbedingungen, so dass es hier keine Hinweise für Konkretionsbildung im diskontinuierlichen Permafrost gibt.

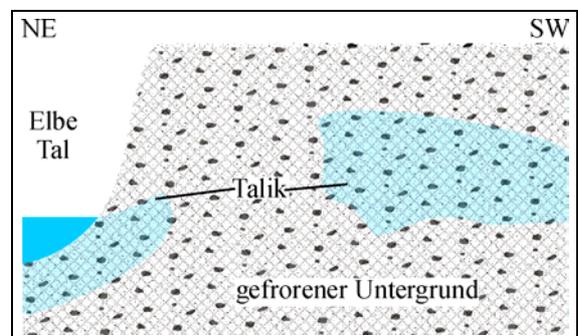


Abb. 18: Schematisches Modell einer hydrogeologischen Situation, in der sich die kugeligen Konkretionen im diskontinuierlichen Permafrost in einem Taliki (blau) gebildet haben können, der keinen hydraulischen Kontakt zum Vorfluter (Elbe) hatte.

Die Zementation in phreatischen Taliki im diskontinuierlichen Permafrost ist auch als Bildungsmilieu für phreatische Hauptzementationsphasen (Kap. 6.3.12) denkbar. Allerdings ist diskontinuierlicher Permafrost ein sehr instabiles hydrogeologisches System. Für die Bildung von Zementationskörpern, die z.T. viele m³ groß sind (z.B. Daerstorf, Breetze, Rumbleck), sind jedoch über einen längeren Zeitraum relativ konstante Zementationsbedingungen erforderlich. Damit bietet Bildung im diskontinuierlichen Permafrost für die phreatischen Hauptzementationsphasen kein plausibles Genesemodell.

Aufschluss Volkstorf (Horizont c.)

Im Aufschluss Volkstorf (Horizont c.) gibt es neben kleineren Massenzementationskörpern häufig dünne Zementkrusten vor allem an der Unterseite von Geröllen. FAIRCHILD et al. (1994) beschrieben ebenfalls fleckenhafte Kalzit-zementation und Zementkrusten unter Geröllen, wobei sie postglaziale Entstehung im vadosen Milieu diskutierten. CAILLEUX & DIONNE (1972) interpretierten vergleichbare Zementkrusten nach Beobachtung rezenter Kalzitkrusten in der Antarktis als kaltklimatische Bildungen. Folgt man beiden Vorschlägen, sind Zementkrusten als vadose Bildung im periglazialen Milieu zu deuten.

Aufschluss Krankenhagen

Die Zementationskörper im Aufschluss Krankenhagen (diskusförmige Konkretionen, Massenzementationskörper) bildeten sich in Drenthezeitlichen Schmelzwasserablagerungen dreiphasig. Die erste Zementationsphase fand im phreatischen Milieu, die zweite im vadosen statt. Der jüngste Zement entstand während der phreatischen Hauptzementationsphase (Zementationsphase 3) wahrscheinlich warmzeitlich (Kap. 6.3.11). Der Grundwasser-Abstrom wird hier durch den Wembke-Bach bestimmt, dessen Aue sich heute etwa 4 m unterhalb der Zementationskörper befindet (Anl. IV). Dabei wurde die Grundwasser-Absenkung, die zu den heutigen vadosen Bedingungen führte, durch die wahrscheinlich früh-Weichsel-zeitliche Einschneidung des Wembke-Baches verursacht (Abb. 19d). Auf Grund dieser Befunde fand die Hauptzementationsphase wahrscheinlich Eem-zeitlich statt. Der Wechsel von vadosen zu phreatischen Zementationsbedingungen zwischen den Zementationsphasen 2 und 3 lässt sich zwanglos durch höhere Grundwasser-Neubildung während Warmzeiten (WEERT et al. 1997) erklären (Abb. 19c). Damit ist für die Zementationsphasen 1 und 2 der Zeitraum zwischen der Drenthe-zeitlichen Sedimentation der zementierten Schmelzwasserablagerungen und dem früh-Eem-zeitlichen Anstieg der Grundwasser-

Oberfläche anzunehmen. Für einen noch Saalezeitlichen Wechsel von phreatischen zu vadosen Zementationsbedingungen während der Zementationsphasen 1 und 2 kann nach der hydrogeologischen Situation des Aufschlusses Grundwasser-Aufstau durch Inlandeis postuliert werden (Abb. 19a). In diesem Modell verursachte Schmelzwasser und wahrscheinlich aufgestautes Weserwasser im nicht gefrorenen Lockersediment zwischen dem stagnierenden Drenthe-Gletscher und dem Lippischen Keuperbergland phreatische Bedingungen. Nach Abschmelzen des Inlandeises gelangten die Schmelzwasserablagerungen in vadoses Milieu, in dem sich Zementationsphase 2 bildete (Abb. 19b).

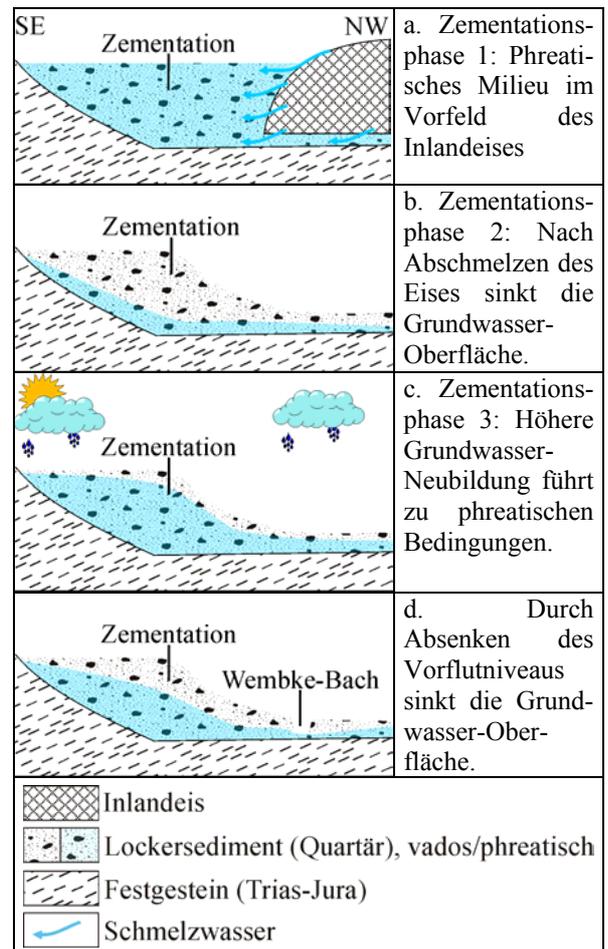


Abb. 19: Unmaßstäbliches, stark vereinfachtes paläohydrogeologisches Modell zur Bildung der Zementationskörper im Aufschluss Krankenhagen (a.: stark verändert nach WELLMANN 1998).

Schwankungen der Grundwasser-Oberfläche, wie sie zur Bildung der Zementationskörper im Aufschluss Krankenhagen führten, sind allerdings auch während Warmzeiten möglich. Dazu wiesen KLEINMANN et al. (1997, 1998) Seespiegelschwankungen von mehreren m an einem Grundwasser-gespeisten See nach. Diese fanden zu Beginn des Holozän (Präboreal) innerhalb weniger

100 Jahre in einem Milieu statt, das nach EHLERS (1994) durch Wiederbewaldung und raschen Temperaturanstieg gekennzeichnet war. In dieser kurzen Periode, die insgesamt nur etwa 1000 Jahre dauerte (EHLERS 1994), ging mit der Erwärmung der Wechsel von geringer zu hoher Grundwasser-Neubildung (WEERT et al. 1997) und damit die Umstellung des hydrogeologischen Milieus einher (Abb. 19b-c).

Die einzelnen Phasen mit hoher bzw. niedriger Grundwasser-Oberfläche waren unter Berücksichtigung der in diesem Milieu anzunehmenden Zementationsgeschwindigkeit wahrscheinlich zu kurz, um den phreatischen bzw. vadosen Zement im Aufschluss Krankenhagen zu bilden. Zusammenfassend ist die ausschließlich warmzeitliche Zementation im Aufschluss Krankenhagen zwar nicht vollständig auszuschließen. Das o.g. Konzept von kalt- und warmzeitlicher Bildung der Zementationskörper ist jedoch in sich schlüssiger.

Aufschluss Eime

Im Aufschluss Eime gibt es im Mittelterrassenkies drei Massenzementations-Horizonte, die schichtparallel-fingerförmig in das Lockersediment hinein reichen. Der oberste Horizont bildete sich unmittelbar unterhalb einer Grundmoräne, durch Sickerwasser, das dem Kies flächenhaft zutrat. Dagegen deuten Position und Beschaffenheit der tieferen Horizonte auf Bildung in Bereichen hin, in denen Sickerwasser aufgestaut wurde. Da eine unmittelbare Ursache für den Aufstau bei den Untersuchungen nicht nachweisbar war, sind folgende Prozesse zu diskutieren: Möglicherweise führte ein größerer Sandanteil im Kies zu horizontweise höherer wasserungesättigter Leitfähigkeit. Dadurch würde Sickerwasser eher in der sandführenden Schicht gehalten als vertikal in den Kies zu gelangen (Kap 6.3.8). Allerdings war bei den Untersuchungen kein signifikanter Korngrößenunterschied zwischen zementiertem und nicht zementiertem Sediment feststellbar. Wahrscheinlicher ist, dass die horizontbeständige Behinderung des vertikalen Sickerwassertransportes einen Grund hatte, der nur temporär auftrat und damit heute nicht mehr erkennbar ist. Bei der geologischen Entwicklung des Aufschlusses sind die plausibelste Ursache für den Sickerwasseraufstau Eispartien im Untergrund, wie sie z.B. bei diskontinuierlichem Permafrost vorkommen.

Aufschluss Freden, Aufschlussbereich II

Im Aufschluss Freden (Aufschlussbereich II) fällt auf, dass sich zementierte Partien ausschließlich in glazitektonisch beanspruchten Bereichen befinden. Unmittelbar benachbarte, nicht deformierte Sedimente sind trotz vergleichbarer Beschaffenheit nicht zementiert. Das Volumen der Zementationskörper nimmt mit der Intensität der

glazitektonischen Deformation der Schichten zu, was auf einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen Zementation und Deformation hinweist. Materialbedingte Ursachen - z.B. dünne Schlufflagen, die den Wassertransport behindern - gibt es nicht. Damit ist die selektive Zementation von glazitektonisch beanspruchten Schmelzwasserablagerungen auf Ursachen zurückzuführen, die im Zusammenhang mit der glazitektonischen Situation standen, temporär auftraten und damit heute nicht mehr nachweisbar sind. Ein denkbarer Prozess ist die Zementation in wassererfüllten Partien im ansonsten gefrorenen Untergrund, ein Prozess der auch von KNIGHT (1998) diskutiert wird. BOULTON & CABAN (1995) wiesen darauf hin, dass es durch hohen Druck, der von glazitektonischer Deformation verursacht wird, zur Verflüssigung von Poreneis und damit zu phreatischen Bedingungen im ansonsten gefrorenen Untergrund kommen kann. Da ein solches Szenario relativ kurzlebig ist, bildete sich in diesem Milieu wahrscheinlich nur der in den Bereichen II-1 und II-3 auftretende, quantitativ unbedeutende Isopachenzement, der Zementationskeim für die jüngere Hauptzementationsphase war.

Aufschluss Freden, Aufschlussbereich IV

Im Aufschlussbereich IV treten gebogene und liegende, gerade Zapfen auf. Das Diagenesemodell beruht auf folgenden Untersuchungsbefunden:

1. Beschaffenheit des Lockersedimentes,
2. Zementationsphasen,
3. Verbreitung gebogener Zapfen,
4. Verbreitung liegender, gerader Zapfen.

1. Beschaffenheit des Lockersedimentes

Die Zapfen im Aufschlussbereich IV kommen im ca. 20 m mächtigen, homogenen Schmelzwassersand vor. Die Schichten fallen mit weniger als 10° nach Südosten ein. Es handelt sich um Mittelsand, der geringfügige Variationen beim Fein- bzw. Grobsandgehalt hat. Die ermittelten k_f -Werte schwanken im relativ engen Bereich von 2,0-6,3 $\times 10^{-4}$ m/s. Es gibt keine signifikanten Korngrößenunterschiede an der Oberkante der gebogenen Zapfen bzw. zwischen den geraden und den gebogenen Zapfen.

2. Zementationsphasen

Liegende, gerade und gebogene Zapfen unterscheiden sich zementpetrographisch nicht signifikant voneinander. Die Zementation fand in drei Phasen statt. Der vadosen Zementationsphase 1 folgten die phreatische Zementationsphase 2 und schließlich die ebenfalls phreatische Hauptzementationsphase (Zementationsphase 3).

3. Verbreitung gebogener Zapfen

Neben einem großen Vorkommen aus zusammengewachsenen Zapfen, das während der

Untersuchungen noch in situ war (Taf. I/8), gibt es zahlreiche Zapfengruppen, die dem in situ Vorkommen gleichen und auf Halde lagern. Nach Aussagen eines Arbeiters kamen die beim Abbau angefallenen, auf Halde lagernden Zapfengruppen etwa südlich bzw. südöstlich des in situ-Vorkommens vor (Abb. 20, grau). Auf Grund der Orientierung der in situ Zapfen (Anh. V), strömte das Grundwasser bei der Zapfenbildung Richtung SSE (blauer Pfeil Abb. 20), also etwa senkrecht zur rekonstruierten Verbreitung der Zapfen.

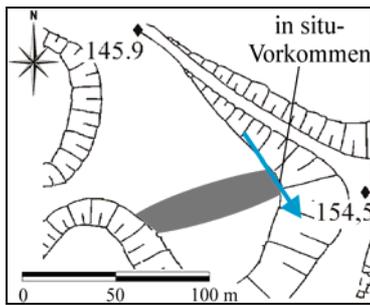


Abb. 20: Aufschluss Freden, Aufschlussbereich IV: Zusammenfassende Darstellung der wahrscheinlichen ehemaligen Verbreitung von Zapfengruppen (grau), die beim Abbau anfielen und der Grundwasser-Abstromrichtung (blauer Pfeil), die am in situ-Vorkommen rekonstruiert wurde.

4. Verbreitung liegender, gerader Zapfen

Etwa 1,0 – 1,5 m über den gebogenen Zapfen gibt es liegende, gerade Zapfen. Sie haben etwa die gleiche Einfallsrichtung wie die liegenden Bereiche der gebogenen Zapfen (Anh. V) und bildeten sich damit auch durch Grundwasser, das nach Südsüdost abströmte. Dies deutet zusammen mit dem zementpetrographischen Befund auf gleichzeitige Bildung hin.

Daraus lässt sich für die Bildung der Zapfen im Aufschlussbereich IV folgendes Diagenesemodell entwickeln: Das gehäufte Vorkommen von Zapfen setzt einen Prozess voraus, bei dem im homogenen Sediment nur im o.g. NE-SW streichenden Bereich Zement durch schnell strömendes Wasser gebildet wurde (Abb. 20). Eine materialbedingte Ursache war bei den Untersuchungen nicht zu erkennen. Damit liegt es in dem hier diskutierten Umfeld nahe, teilweise gefrorenen Untergrund für heterogene hydraulische Eigenschaften des Untergrundes verantwortlich zu machen. Wahrscheinlich führten Saale-zeitliche Klimabedingungen zu den postulierten gefrorenen Partien im Untergrund, da die jüngste Zementationsphase 3 als phreatische Hauptzementationsphase wahrscheinlich Eemzeitlich stattfand (Kap. 7.1). Damit bildeten sich die Zementationsphasen 1 und 2 zwischen der Drenthezeitlichen Ablagerung der Schmelzwassersedimente und der Eem-zeitlichen Hauptzementationsphase.

Zapfenförmige Konkretionen zeichnen die Bewegungsbahn der Bildungslösung nach (Kap. 6.2.1). Im hier diskutierten Milieu müssen die Stromlinien des Grundwassers durch gefrorene Partien abgelenkt worden sein, so dass die Form der gebogenen Zapfen etwa die Kontur des gefrorenen Sedimentes nachzeichnet (Abb. 21). Wahrscheinlich führte gefrorenes Sediment auch zur Bildung von zwei Grundwasser-Stockwerken, wobei sich die liegenden, geraden Zapfen oberhalb der gefrorenen Bereiche bildeten (Abb. 21).

Dabei sprechen folgende Aspekte für Zapfenbildung durch Schmelzwasser des Inlandeises (Abb. 21) als für gletscherferne Bildung z.B. durch Niederschlag oder Schneeschmelze:

1. Durch den Wärmetransport des versickernden Schmelzwassers sind die Bedingungen für die Bildung von Taliki unmittelbar vor dem Gletscherend besonders günstig.
2. Die Bildung der zahlreichen, großen Zementationskörper im Aufschlussbereich IV erfordert eine große Menge an Bildungslösung, die mit dem Schmelzwasser zur Verfügung gestellt wird.
3. Im Porenraum innerhalb der Zapfen ist sehr viel Kalzit gebunden. Allein über die Lösung von karbonatischem Detritus der Schichten oberhalb der Zapfen kann die notwendige Stoffmenge wahrscheinlich nicht bezogen werden. Das Schmelzwasser des Inlandeises kann jedoch zusätzlich gelöstes Karbonat durch Lösung von Geschiebefracht enthalten.
4. Entsprechend der Orientierung der Zapfen entstanden sie durch nach SE gerichteten Grundwasser-Abstrom. Da das Inlandeis nach LATZKE (1996) aus NW kam, stimmt die Verbreitung der Zapfen etwa mit dem Verlauf des Gletscherrandes und die Grundwasser-Abstromrichtung mit der wahrscheinlichen Abflussrichtung des Schmelzwassers überein.

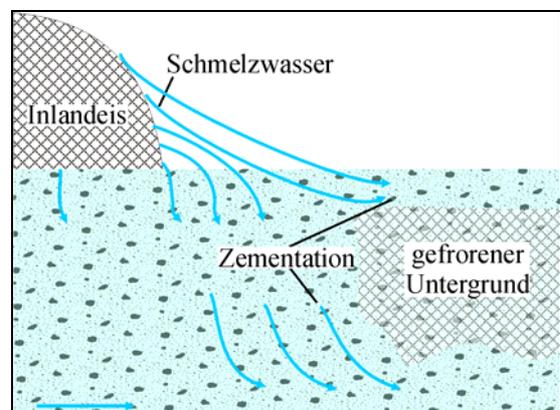


Abb. 21: Unmaßstäbliches hydrogeologisches Modell. Im Aufschluss Freden (Aufschlussbereich IV) zeichnen liegende und gebogene Zapfen Strömungslinien des Grundwassers nach, dass oberhalb gefrorener Partien abströmte bzw. vor ihnen nach unten abgelenkt wurde.

Aufschluss Freden, Aufschlussbereich VIII-1

Im Aufschlussbereich VIII-1 gibt es hängende Zapfen in ebenfalls Drenthe-zeitlichen Schmelzwasserablagerungen (Taf. VII/4). Die Form der Zapfen wurde in einer ersten, vadosen Zementationsphase vorgezeichnet. Im Restporenraum entstand Zement während der phreatischen Hauptzementationsphase. Die obere Begrenzung der Zapfen befindet sich ca. 10 – 50 cm unter einer bindigen, gering durchlässigen Schicht (Taf. VII/4), die bei vergleichbaren Zementationskörpern (Kap. 6.3.5) den Ausgangspunkt der Zapfenentstehung bildet. Da innerhalb des Schmelzwassersandes keine lithologischen Eigenschaften erkennbar sind, die die Zapfenbildung ausgelöst haben könnten, ist auch hier die Bildung unter kaltzeitlichen Bedingungen mit teilweise gefrorenem Sediment wahrscheinlich. In diesem Genesemodell war Lösungs-transport nur über Sickerbahnen möglich, die zwischen gefrorenen Partien bestanden (Abb. 22). Beim Übertritt in die wasserungesättigte Zone, die sich unter dem gefrorenen Sediment befand, bildete sich vadoser Zement.

Aufschluss Freden, Aufschlussbereich VIII-5

Der stratiforme Zementationskörper (Taf. VII/5) entstand im vadosen Milieu. Dabei ist auffällig, dass es keine lithologischen Merkmale gibt, auf die die horizontbeständige Zementation zurückgeführt werden kann. Die Form des zementier

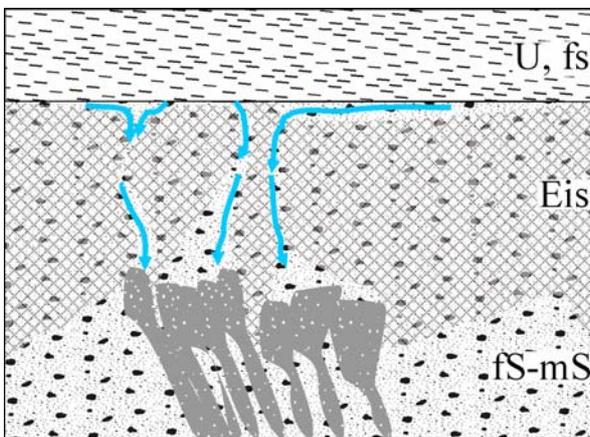


Abb. 22: Schematisches Genesemodell zur Zapfenbildung im Aufschlussbereich VIII-1 (Aufschluss Freden). Zwischen Partien, in denen der Porenraum eiserfüllt ist, bewegt sich Sickerwasser über Diskontinuitäten im Bodeneis nach unten und führt zu Zementation in der vadosen Zone.

ten Bereiches und die Zementeigenschaften weisen daraufhin, dass Sickerwasser in diesem Horizont an der weiteren Abwärtsbewegung gehindert wurde. Dafür müssen hydraulische Eigenschaften angenommen werden, die nur periodisch bestanden, wobei auch hier die Plombierung von Porenraum

durch Eis die wahrscheinlichste Erklärung ist. Nach Position und Beschaffenheit der stratiformen Zementationskörper bildeten sie sich auf einer gefrorenen Partie im Untergrund, wo aus dem Sickerwasser in Folge längerer Verweilzeiten Kalzit ausfiel. Dabei dürfte neben CO₂-Entgasung auch Verdunstung eine Rolle gespielt haben. Der Zement bildete sich in einem Milieu, das von wechselnden Wassersättigungs-Bedingungen geprägt war, was typisch für die vadosen Zone ist, in der fleckhaft wassergesättigte Partien auftreten können (z.B. HÖLTING 1996). Auf Grund der hydrogeologischen Beschaffenheit des Aufschlussbereiches bewegte sich Wasser bevorzugt über steilstehende Abschiebungen in den Untergrund. Die Plombierung durch Poreneis blockierte den weiteren vertikalen Wassertransport, so dass das Sickerwasser auf dem gefrorenen Bereich lateral abströmen musste (Abb. 23).

Der Wärmetransport durch Sickerwasser kann ein partielles Abschmelzen des Bodeneises bewirkt haben. Das verstärkte Abschmelzen in der bevorzugten Abstromrichtung könnte den von der Verwerfung ausgehenden, nach Westsüdwest gerichteten treppenartigen Versatz erklären (Taf. VII/5).

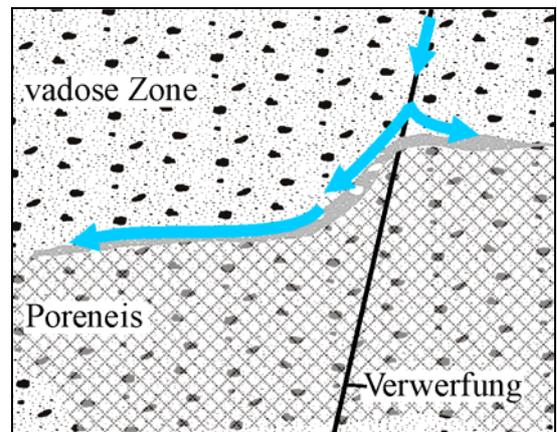


Abb. 23: Modell zur Bildung stratiformer Zementationskörper (grauer Bereich) über einem Bereich, in dem der Porenraum durch Eis plombiert ist. Der Wassertransport erfolgte bevorzugt über steilstehende Abschiebungen.

Für Kalzit-zementation unter kaltzeitlichen Bedingungen gibt es neben den o.g. auch zahlreiche Beispiele in der Literatur (LEMMENS et al. 1982, SOUCHEZ & LEMMENS 1985, FAIRCHILD & SPIRO 1990, SHARP et al. 1990, VOGT 1991, FAIRCHILD et al. 1994). Damit wird die häufig geäußerte Annahme widerlegt, karbonatische Zementation sei auf Warmzeiten beschränkt (z.B. LÜTTIG 1954). Außerdem weist das Vorkommen kaltzeitlicher Kalzit-zementation darauf hin, dass auch Entkalkung, über die der Stoff für die Zementation zur Verfügung gestellt wird, nicht auf Warmzeiten

beschränkt ist. Damit sind Aussagen zu klimatischen Bedingungen die auf der Beobachtung von Entkalkung beruhen (z.B. LÜTTIG 1960) wie auch deren Verwendung als stratigraphisches Hilfsmittel problematisch.

6.3.13 Wiederanlösung von Zementationskörpern

Hinweise auf Wiederanlösung wurden vereinzelt bei Konkretionen beobachtet: Ein wesentliches Merkmal der untersuchten Konkretionen ist der scharfe Kontakt zwischen zementiertem und nicht zementiertem Sediment, wodurch sie i.d.R. relativ glatte und kompakte Oberflächen haben. Vor allem auf Halden und in länger exponierten Aufschlussbereichen, gelegentlich auch in frischen Aufschlüssen, gibt es auch Konkretionen mit rauen, leicht absandenden Oberflächen. Die vergleichende REM-Untersuchung ergab, dass die Kristallmorphologie der Zementkristalle von Konkretionen mit relativ glatten Oberflächen durch ebene Flächen und scharfe Kristallkanten geprägt ist. Bei Konkretionen mit rauen Oberflächen dagegen gibt es fast keine erkennbaren Kristallflächen bzw. -kanten, die Kristallmorphologie ist rundlich und stumpf (Abb. 24).

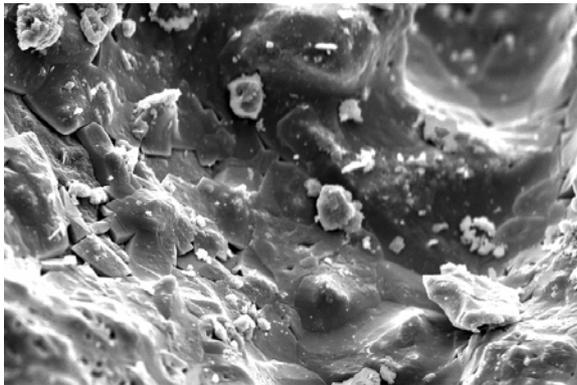


Abb. 24: REM-Aufnahme von Isopachenzement, bei dem die Kristallkanten durch Anlösung rundlich, stumpf korrodiert sind. Bildbreite entspricht etwa 40 μm , Aufschluss Coppenbrügge (Horizont d).

In diesem Zusammenhang wurde das Verwitterungsverhalten einiger Probestücke (liegende Zapfen) mit glatter, kompakter Oberfläche aus dem Aufschluss Freden, über mehrere Jahre beobachtet. Es hat sich gezeigt, dass die ehemals glatten und kompakten Oberflächen dieser Konkretionen durch Verwitterung und Korrosion ebenfalls rau und leicht absandend wurden. Damit ist entsprechende Oberflächenbeschaffenheit von Konkretionen wahrscheinlich durch nachträgliche Anlösung entstanden. Konkretionen mit rauen, leicht absandenden Oberflächen wurden in folgenden Aufschlüssen gefunden:

- Coppenbrügge (Horizont c.) ca. 7 m u.GOK,
- Freden: Aufschlussbereich IV ca. 6 m u.GOK, Aufschlussbereich V-2 ca. 5 m u.GOK, Aufschlussbereich VII ca. 3 m u.GOK und Aufschlussbereich VIII-2 ca. 10 m u.GOK,
- Bornhausen: Horizont b. ca. 4,5 m u.GOK, ca. 12,5 m u.GOK.

Im Aufschluss Freden, Aufschlussbereich IV kommen in zwei Horizonten Zapfen vor. Das Lockersediment besteht aus Mittelsand mit k_f -Werten $3,4 - 6,3 \times 10^{-4}$ m/s. Dabei weist die Oberflächenbeschaffenheit nur bei den Zapfen im oberen Horizont auf Anlösung hin (Abb. 25).

Im Aufschlussbereich V (Aufschluss Freden) gibt es ebenfalls in zwei Horizonten Konkretionen. Im oberen Horizont besteht das Lockersediment aus einer Wechselfolge aus schluffigem Feinsand (k_f -Wert geschätzt: 10^{-5} m/s), in dem die Konkretionen vorkommen, und feinsandigem Schluff (k_f -Wert geschätzt: $10^{-6} - 10^{-7}$ m/s). Im unteren Horizont kommen die Konkretionen in Mittelsandschichten mit unterschiedlichem Feinsandgehalt vor (k_f -Wert $1,5 - 4,6 \times 10^{-4}$). Anlösungsmerkmale wurden hier nur bei den Konkretionen im tieferliegenden Horizont beobachtet.



Abb. 25: Zapfen mit rauen, leicht absandenden Oberflächen (Bild links) bzw. mit relativ glatten, kompakten Oberflächen (Bild rechts). Aufschluss Freden, Aufschlussbereich IV, links: oberer Horizont, rechts: unterer Horizont.

Im o.g. Aufschlussbereich IV wird das homogene, durchlässige Sediment durch Sickerwasser von oben nach unten fortschreitend entkalkt. Im Aufschlussbereich V dagegen behindert die gering durchlässige Feinsand/Schluff-Wechselfolge den Transport des Sickerwassers und damit die Entkalkung der oberflächennäheren Konkretionen. Kalkaggressives Sickerwasser wird auf den bindigen Schichten überwiegend lateral abgeleitet und führt erst im tieferen Horizont zu signifikanter Wiederanlösung der Konkretionen (Abb. 26).

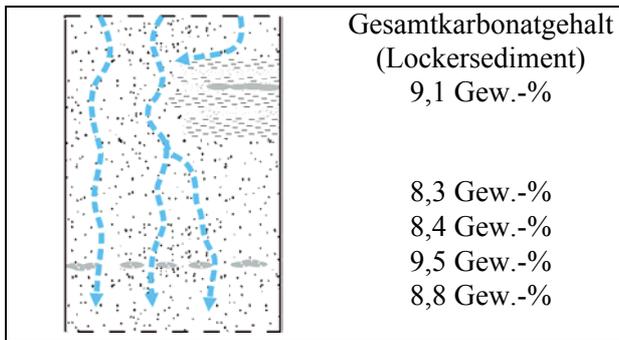


Abb. 26: Schematische, unmaßstäbliche Darstellung des Sickerwassertransportes, der zur Wiederanlösung der Konkretionen im Aufschlussbereich V (Aufschluss Freden) führte. Angegeben sind ermittelte Gesamtkarbonatgehalte des Lockersedimentes.

Dabei scheint der Karbonatzement der Konkretionen bevorzugt von Lösung durch das Sickerwasser betroffen zu sein, da sich aus dem Gesamtkarbonatgehalt des Lockersedimentes keine signifikante Karbonatlösung ablesen lässt. Es ist anzunehmen, dass der karbonatische Detritus durch z.B. mit Fe-Hydroxiden oder organischer Substanz verunreinigte Oberflächen lösungsresistenter ist als die relativ sauberen Zementkristalle.

Auch in den Aufschlüssen Coppenbrügge und Bornhausen wurde Wiederanlösung zementierter Bereiche nur im durchlässigen Mittelsand (k_f -Wert von $1,7 - 7,9 \times 10^{-4}$ m/s) beobachtet. Im Aufschluss Bornhausen lässt sich die Entkalkung auch an den Gesamtkarbonatgehalten des Lockersedimentes ablesen, die von über 30 Gew.-% im tiefsten bis auf unter 20 Gew.-% im höchsten abnehmen.

Auf Massenzementationskörper, bei denen die Zementationsintensität zwischen dem mehr oder weniger fest zementierten Kernbereich und dem unzementierten Sediment schon primär kontinuierlich abnimmt, ist das Kriterium der Oberflächenbeschaffenheit allerdings nicht anwendbar. Hier lässt sich Wiederanlösung nur durch REM-Untersuchungen (z.B. Aufschluss Holzen) nachweisen.

6.3.14 Anlösung von siliziklastischem Detritus

In vielen untersuchten Sedimenten (z.B. Aufschlüsse Holzen, Coppenbrügge, Freden) zeigen hauptsächlich Quarz und Feldspat sowie gelegentlich anderer siliziklastischer Detritus Anlösungsspuren, die postsedimentär entstanden und mit Karbonatzement gefüllt sind. Der Prozess ist im Wesentlichen pH-Wert gesteuert. KASHIK (1965) stellte fest, dass die Verdrängung von Quarz durch Kalzit bis in den schwach sauren Bereich (pH 4) stattfinden kann und ein Reaktionsoptimum bei pH 9,8 hat. Nach HÖLTING (1996) hat Grundwasser in

karbonatgepufferten Systemen, um die es sich auch in den untersuchten Sedimenten handelt, einen pH-Wert in der Größenordnung zwischen 5,5 und 8,0. Damit stimmen der von KASHIK (1965) genannte Reaktionsbereich mit dem, der für die untersuchten Sedimente anzunehmen ist, gut überein. Syngenetisch zur Bildung von Kalzitzement stattfindende Anlösung von Quarzdetritus wird auch häufig in der Literatur beschrieben (z.B. CAROZZI 1967, GAVISH & FRIEDMAN 1969, AMIEL 1975, BUCZYNSKI & CHAFETZ 1987, BARTHOLOMÄUS et al. 1997).

6.4 Zementationsphasen der untersuchten Aufschlüsse

Die Bestimmung lokaler, aufschlusspezifischer Zementationsphasen basiert auf folgenden Untersuchungsergebnissen:

- Zementpetrographische Befunde und die daraus abgeleiteten Zementgenerationen (Tab. 6),
- Beschaffenheit der Zementationskörper (Anh. V),
- Beschaffenheit des Lockersedimentes (Anh. IV),
- Geologische und paläohydrogeologische Situation des Aufschlusses (Anh. IV),
- Diagenesemilieu (Kap. 6.3).

Die Zementationsphasen, die zur Bildung der untersuchten Zementationskörper führten, werden in Tab. 8 zusammenfassend dargestellt.

6.4.1 Aufschluss Daerstorf: Zementationsphasen

Die Beziehung zwischen den Zementationskörpern im Aufschluss Daerstorf zeigt, dass sich zunächst hängende Zapfen, dann Massenzementationskörper und schließlich kugelige Konkretionen bildeten. Die Interpretation der Zementationsformen und der Zementuntersuchungen liefern zunächst widersprüchliche Befunde. Obwohl die Form hängender Zapfen durch etwa vertikal strömendes Sickerwasser in der vadosen Zone entsteht, zeigt der Kalzitzement (Zementgeneration 1: Mikrosparit/Blockkalzit, Zementgeneration 2: poikilotopischer Zement) nur Merkmale phreatischer Entstehung. Für die makroskopischen Hinweise auf eine vadosen Zementationsphase, die die Zapfen liefern, fehlen also entsprechende mikroskopische Befunde. Entweder unterscheidet sich vados entstandener Zement hinsichtlich der Kristalleigenschaften nicht vom phreatischen Zement oder vadoser Zement mit ursprünglich anderen Zementeigenschaften wurde durch Neomorphose im phreatischen Milieu überprägt und ist dadurch nicht mehr erkennbar.

Nach Anstieg der Grundwasser-Oberfläche bildeten sich im phreatischen Milieu um präexistierende Zapfen Massenzementationskörper. Dabei kristallisierte der im Aufschluss Daerstorf

quantitativ dominierende Mikrospatit/Blockkalzit (Hauptzementationsphase) sowohl im Bereich der Massenzementationskörper als auch im noch offenen Porenraum in den Zapfen. In der dritten Zementationsphase entstanden kugelige Konkretionen durch Bildung von poikilotropischem Zement, der außerdem im noch offenen Porenraum in Zapfen und Massenzementationskörpern kristallisierte. Die Konkretionen entwickelten sich im phreatischen Milieu bei geringer bis fehlender Grundwasser-Strömung unter periglazialen Bedingungen (Kap. 6.3.12).

6.4.2 Aufschluss Hittfeld: Zementationsphasen

Im Aufschluss Hittfeld gibt es kleinere Massenzementationskörper. Die Merkmale des Kalzit-zementes weisen auf Entstehung im phreatischen Milieu hin, wobei z.T. hohen Fe-Konzentrationen (bis 0,69 Mol-%) für die Bildung unter reduzierenden Bedingungen spricht.

6.4.3 Aufschluss Breetze: Zementationsphasen

Horizont a.

Im Horizont a. gibt es zementierte Partien im Geschiebemergel, im Schmelzwassersand sowie im glazitektonisch deformierten Übergangsbereich zwischen beiden. Der Sand ist zu Massenzementationskörpern und hängenden Zapfen zementiert. Zunächst wurde die Form der hängenden Zapfen durch vadosen Zement vorgezeichnet. Dabei fand die vadose Zementationsphase 1 nach der glazitektonischen, Drenthe-2-zeitlichen Deformation statt, da die Zapfen unterhalb von verstellten Schichten etwa vertikal hängen, also nicht nachträglich verstellt sind. Die quantitativ dominierende, wahrscheinlich warmzeitlich entstandene Zementgeneration 2 (Hauptzementationsphase) bildete sich im phreatischen Milieu.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados

Zementationskörper: hängende Zapfen

Zement: u.a. Meniskus-, Gravitationszement

Zementationsphase 2 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch

Zementationskörper: Massenzementationskörper, Restporenraum in Zapfen

Zement: u.a. porenformerhaltende Zementation

Horizont b.

Die dreiphasig im phreatischen Milieu entstandenen, kugeligen Konkretionen kommen in der Drenthe-Haupt-Moräne ausschließlich entlang von Trennflächen vor, die den Geschiebemergel parallel zur Schichtung durchziehen. Die zwischen den Trennflächen liegenden Klüfte stellen Bahnen bevorzugter Wasserbewegung im ansonsten sehr gering durchlässigen Sediment dar. Gegen strömungsdominierten Lösungstransport spricht die

kugelige Form der Konkretionen, die bei fehlender Lösungsströmung und bei diffusivem Stofftransport entsteht. Dies weist daraufhin, dass das Konkretionswachstum von den Kluftgrenzen ausging, an denen sich das Porenwasser des Geschiebemergels und das Kluftwasser durchmischten. Die Lösungsmischung führte in diesem Modell zur Übersättigung und zur Bildung erster Zementkristalle. Von diesen Kristallisationskeimen aus setzte sich das Konkretionswachstum fort. Wesentliche Quelle des gebildeten Kalzits ist bei diesem Genesemodell nicht das Kluftwasser, das zwar Auslöser der Kristallbildung war, sondern das CaCO_3 -gesättigte Porenwasser des Geschiebemergels.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: phreatisch

Zementationskörper: kugelige Konkretionen

Zement: Zementation der Geschiebemergel-Matrix

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: phreatisch

Zementationskörper: kugelige Konkretionen

Zement: Isopachenzement in Schrumpfungsrissen

Zementationsphase 3

Zementationsmilieu: phreatisch

Zementationskörper: kugelige Konkretionen

Zement: drusiger Mosaikzement auf Isopachenzement

Horizont c.

Im Horizont c. gibt es phreatisch entstandene diskusförmige Konkretionen bis flache Zapfen. Die diskusförmigen Konkretionen bildeten sich bei sehr niedriger bis fehlender Grundwasser-Strömung, die flachen Zapfen, bei stärker strömendem Grundwasser. Da es zahlreiche Übergangsformen gibt, lässt sich aus diesem Befund schließen, dass sich die Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit während der Konkretionsbildung änderte. Wie sich der Wechsel der Strömungsgeschwindigkeit vollzog (von langsam zu schnell oder umgekehrt) war nicht zu belegen.

Während der Bildung der flachen Zapfen war die Grundwasser-Abstromrichtung nach der Orientierung der Zapfenlängsachsen Nordosten, in Richtung der Elbe-Niederung. Aus der Position der Konkretionen unmittelbar unterhalb von Schlufflagen kann abgeleitet werden, dass die Kristallisation ursächlich mit Porenwasser zusammenhängt, das aus dem Schluff in den Sand übertrat. Bei der langwierigen Passage des geringdurchlässigen Schluffes konnte das Porenwasser CaCO_3 intensiv lösen. Beim Übertritt in das im Sand strömende Grundwasser führte die Änderung der Gleichgewichtsbedingungen zur Kristallbildung (Abb. 27).

Aufschluss	Zementationsphase		Zementationskörper	6.5 Zement
		hydrogeologische Situation		
Daerstorf	1	vados	Zapfen	nicht nachweisbar
	2	phreatisch	Massenzementationskörper	u.a. porenformerhaltende Zementation
	3	phreatisch	kugelige Konkretionen	poikilotopischer Zement
Hittfeld	1	phreatisch	Massenzementationskörper	u.a. porenformerhaltende Zementation
Breetze	1	phreatisch	Zapfen (?), Massenzementationskörper (Horizont d.)	Isopachenzement
	2	vados	hängende Zapfen (Horizont a., d.)	u.a. Meniskus- und Gravitationszement
	3	phreatisch	Restporenraum in Massenzementationskörpern und Zapfen (Horizonte a, d), flache Zapfen, diskusförmige Konkretionen (Horizont c.)	u.a. porenformerhaltende Zementation, Mosaikzement
	4	phreatisch	kugelige Konkretionen	poikilotopischer Zement
Holzen	1	vados	Zapfen, Massenzementationskörper	u.a. Meniskuszement
	2	vados	Zapfen, Massenzementationskörper	u.a. Meniskuszement
	3	phreatisch	Restporenraum in Massenzementationskörpern und Zapfen	u.a. drusiger Mosaikzement
Volkstorf	1	vados	Massenzementationskörper (Horizonte a., c.), Zementkrusten (Horizont a.)	u.a. Meniskus-, Dachzement
	2	phreatisch vados (?)	Restporenraum in Massenzementationskörpern (Horizont a.) Massenzementationskörper (Horizont c.)	u.a. porenformerhaltende Zementation u.a. Meniskus-, Dachzement
	3	phreatisch	Massenzementationskörper	Isopachenzement
	4	phreatisch	Restporenraum in Massenzementationskörpern (Horizonte a, d)	u.a. porenformerhaltende Zementation
Krankenhagen	1	phreatisch	Massenzementationskörper, kugelige bis diskusförmige Konkretionen	Zement ohne bevorzugte Wachstumsposition
	2	vados	Massenzementationskörper, kugelige bis diskusförmige Konkretionen	u.a. Meniskus-, Gravitationszement
	3	phreatisch	Restporenraum in Massenzementationskörper, kugelige bis diskusförmige Konkretionen	u.a. drusiger Mosaikzement
Rumbeck	1	vados / pseudo-phreatisch	Massenzementationskörper	u.a. Meniskuszement, Isopachenzement
	2	phreatisch	Massenzementationskörper	u.a. drusiger Mosaikzement
Helpensen	1	phreatisch	stratiforme Zementation (Horizont a.)	u.a. porenformerhaltend-porenfüllend
	2	vados / pseudo-phreatisch	Massenzementationskörper (Horizont b.)	u.a. Meniskus- und Dachzement
	3	phreatisch	Massenzementationskörper (Horizont b.), diskusförmige Konkretionen (Horizont c.)	Isopachenzement
	4	vados / pseudo-phreatisch	Massenzementationskörper (Horizont a.), diskusförmige Konkretionen (Horizont c.)	u.a. Meniskuszement
	5	vados	Massenzementationskörper (Horizont b.)	u.a. Meniskuszement (orange lumineszierend)
Bad Münder/ Hachmühlen	1	phreatisch	Massenzementationskörper	u.a. Isopachenzement
	2	vados	Massenzementationskörper	u.a. Meniskuszement
	3	vados / pseudo-phreatisch	Massenzementationskörper	fleckenhaft unterschiedliche Zementationsintensität
Coppenbrügge	1	vados	Massenzementationskörper (Horizont b.), stratiforme Zementation (Horizont d.)	u.a. Meniskuszement
	2	phreatisch	Massenzementationskörper (Horizont b.), diskusförmige Konkretionen (Horizont c.)	u.a. Isopachenzement
	3	vados	Massenzementationskörper (Horizont b.)	u.a. Meniskuszement
Eime	1	vados	Zapfen, Massenzementationskörper a, b, c (unterer Teil)	u.a. Meniskuszement
	2	phreatisch	Restporenraum in Zapfen, Massenzementationskörper a, b, c (unterer Teil)	Isopachenzement
	3	phreatisch	Restporenraum in Zapfen, Massenzementationskörper a, b, c (unterer Teil)	u.a. drusiger Mosaikzement
	4	pseudo-phreatisch	Massenzementationskörper c (oberer Teil)	Isopachenzement
Banteln	1	vados	Massenzementationskörper	u.a. Meniskuszement
Betheln	1	vados	Massenzementationskörper	u.a. Meniskuszement
	2	phreatisch	Massenzementationskörper	u.a. porenformerhaltend
	3	pseudo-phreatisch (?)	Massenzementationskörper	Isopachenzement
Freden	1	vados	Kristallisationskeime in kugeligen und diskusförmigen Konkretionen, Zapfen, stratiformer Zementation, Massenzementationskörpern	u.a. Meniskus-, Dachzement
	2	phreatisch	Zapfen, Massenzementationskörper	Isopachenzement
	3	phreatisch	kugelige und diskusförmige Konkretionen, Zapfen, stratiforme Zementation, Massenzementationskörper	u.a. drusiger Mosaikzement
Engelade	1	phreatisch	Massenzementationskörper	u.a. porenformerhaltend
	2	phreatisch	Massenzementationskörper	Zement ohne bevorzugte Wachstumsposition
	3	phreatisch	Massenzementationskörper	u.a. porenformerhaltend
Bornhausen	1	vados	diskusförmige Konkretionen bis flache Zapfen (Horizont a.)	u.a. Meniskus-, Dachzement
	2a	phreatisch	kugelige Konkretionen (Horizont b.)	u.a. drusiger Mosaikzement
	2b	phreatisch	diskusförmige Konkretionen bis flache Zapfen (Horizonte a., d.)	u.a. drusiger Mosaikzement
Ödshausen	1	vados, pseudo-phreatisch	hängende Zapfen, Massenzementationskörper	u.a. Meniskus-, Dachzement, Isopachenzement

Tab. 8: Übersicht der aufschlusspezifischen Zementationsphasen.

Fett hervorgehoben = phreatische Hauptzementationsphase

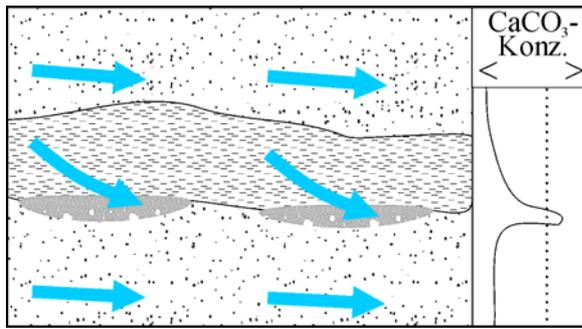


Abb. 27: Schematisches, hydraulisches Modell der Grundwasser-Strömungs-Verhältnisse, die zur Bildung von diskusförmigen Konkretionen und flachen Zapfen führten (blaue Pfeile = Grundwasser-Stromlinien, schematisch). Rechts: Hypothetische Kurve der Lösungskonzentration, gepunktete Linie: Sättigungskonzentration in Bezug auf CaCO_3 .

Nach den makroskopischen Befunden und den Eigenschaften des im Sand vorkommenden Zementes bildeten sich die Zementationskörper einphasig. In zementierten Schluffpartien innerhalb der Zementationskörper gibt es dagegen 2 Zementgenerationen, die Produkte substratspezifischer Prozesse sind (Kap. 6.3.3), die zeitgleich zur Zementation des Sandes stattfanden. Damit ergeben sich für die Zementation im Horizont c. folgende Bildungsbedingungen:

Zementationsphase 1

- Zementationsmilieu: phreatisch
- Zementationskörper: diskusförmige Konkretion, flache Zapfen
- Zement im Sand: porenformerhaltende Zementation
- Zement im Schluff: Mikrosparit im Porenraum, Isopachenzement in Hohlräumen

Horizont d.

Im Horizont d. entstanden zunächst Zapfen, dann Massenzementationskörper und schließlich kugelige Konkretionen in einem hochkomplexen System aus sowohl räumlich als auch zeitlich wechselhaften Wassersättigungs- und Wasserströmungs-Bedingungen sowie unterschiedlichen Kristallwachstumsbedingungen.

Die Zementation begann zunächst mit der Bildung von Isopachenzement in der phreatischen Zone (Zementationsphase 1). Die Bildung des Isopachenzementes unmittelbar unterhalb der Grundmoräne deutet darauf hin, dass sie durch Mischung von Sickerwasser aus der Grundmoräne mit Grundwasser im Schmelzwassersand ausgelöst wurde. Diese Zementgeneration wurde nur in den Massenzementationskörpern beobachtet. Das hier entwickelte Genesemodell geht davon aus, dass der Isopachenzement unterhalb der Grundmoräne weiträumig verbreitet ist und dementsprechend auch im höchsten Teil der Zapfen vorkommt. Das

Fehlen in den Zapfendünnschliffen ist wahrscheinlich auf Beobachtungslücken zurückzuführen. Sowohl in den Massenzementationskörpern als auch in den hängenden Zapfen (Endostalaktiten) gibt es einschlussreichen Meniskus- und Gravitationszement, der in der vadosen Zone entstand (Zementationsphase 2). In der Zementationsphase 2 gelangte Sickerwasser aus dem Geschiebemergel in den wasserungesättigten Schmelzwassersand. Während sich im Bereich der Massenzementationskörper in dieser Phase durch flächenhaft einsickerndes Wasser unregelmäßig verteilt Zement bildete, zeichnete Zement entlang bevorzugter Sickerbahnen die Form der hängenden Zapfen vor. Unmittelbar unterhalb der Grundmoräne gab es in der vadosen Zone durch Haftwasser- und Aufstaueffekte fleckenhafte wassergesättigte Bedingungen (pseudo-phreatisch), wodurch in einigen Bereichen Zement mit phreatischen Merkmalen entstand. Da die Längsachsen der Zapfen auch in glazitektonisch verstellten Partien etwa vertikal stehen, muss Zementationsphase 2 jünger als die durch den Drenthe-2-Gletscher verursachte Schichtverstellung sein. Die Zementation setzte sich nach Anstieg der Grundwasser-Oberfläche im phreatischen Milieu fort (Zementationsphase 3), wobei der vormals gebildete Zement in Massenzementationskörpern und Zapfen als Kristallisationskeim fungierte. Auch die letzte Zementationsphase (4) fand im phreatischen Milieu statt. Dabei entwickelten sich kugelige Konkretionen wahrscheinlich unter periglazialen Bedingungen (Kap. 6.3.12) um Kristallisationskeime aus älterem Zement.

Zementationsphase 1

- Zementationsmilieu: phreatisch
- Zementationskörper: Massenzementationskörper, Zapfen (?)
- Zement: Isopachenzement

Zementationsphase 2

- Zementationsmilieu: vados
- Zementationskörper: Zapfen, Massenzementationskörper
- Zement: u.a. Meniskus-, Gravitationszement, in pseudo-phreatischen Partien Isopachenzement

Zementationsphase 3

- Zementationsmilieu: phreatisch
- Zementationskörper: Restporenraum in Massenzementationskörpern, Zapfen
- Zement: u.a. Mosaikzement

Zementationsphase 4

- Zementationsmilieu: phreatisch
- Zementationskörper: Konkretionen
- Zement: u.a. poikilotopischer Zement

Horizont e.

Im Horizont e. gibt es im Geschiebemergel kugelige Konkretionen, die sich dreiphasig im phreatischen Milieu bildeten.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: phreatisch

Zementationskörper: Konkretion

Zement: Zementation der Geschiebemergel-Matrix

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: phreatisch

Zementationskörper: Konkretion

Zement: Isopachenzement in Schrumpfungsrissen

Zementationsphase 3

Zementationsmilieu: phreatisch

Zementationskörper: Konkretionen

Zement: drusiger Mosaikzement

Zusammenfassung Aufschluss Breetze

Zur Interpretation der Bildungsbedingungen kalzitischer Zementation im Aufschluss Breetze können die Befunde der Horizonte a, c und d herangezogen werden. Die Prozesse, die zur Bildung der Konkretionen im Geschiebemergel (Horizonte b, e) führten, sind substratspezifisch (Kap. 6.3.3) und geben damit keine Hinweise auf die paläohydrogeologische Entwicklung. Einen Ansatz zur zusammenfassenden Auswertung der Zementationsphasen im Aufschluss Breetze bieten hängende Zapfen, die zusammen mit entsprechendem vadosen Zement, in den Horizonten a. und d. unmittelbar unterhalb von Geschiebemergel vorkommen. Auf Grund der großen Ähnlichkeit der Zementationskörper, vergleichbarer Position und Entstehung kann gleichzeitige Bildung postuliert werden. Darauf baut folgende Zusammenfassung der horizontspezifischen Zementationsphasen auf:

1. Zementationsphase Aufschluss Breetze

Die Zementation beginnt mit der Bildung von Isopachenzement im Horizont d.

2. Zementationsphase Aufschluss Breetze

Im vadosen Milieu bildet sich u.a. Meniskus- und Gravitationszement. Entlang bevorzugter Sickerbahnen wird die Form hängender Zapfen in den Horizonten a. und d. vorgezeichnet. Die Grundwasser-Oberfläche lag während dieser Phase unterhalb des tiefsten Zapfens, der sich bei ca. 36 m ü.NN befindet.

3. Zementationsphase Aufschluss Breetze

Im Horizont a. wird in der Hauptzementationsphase bzw. im Horizont d. in der Zementationsphase 3 Restporenraum im Bereich von Massenzementationskörpern und Zapfen aufgefüllt. Wahrscheinlich gleichzeitig entstanden flache Zapfen und diskusförmige Konkretionen im Horizont c.

4. Zementationsphase Aufschluss Breetze

Als jüngste Zementationskörper entstanden im Horizont d. kugelige Konkretionen durch die

Bildung von poikilotropischem Zement unter periglazialen Bedingungen.

6.5.1 Aufschluss Holzen: Zementationsphasen

Die im Aufschluss Holzen vorkommenden Massenzementationskörper und die von ihnen überwachsenen hängenden Zapfen (Taf. II/7) haben eine scharfe, etwa horizontal orientierte obere Begrenzung, die - nach Beobachtungen an vergleichbaren Vorkommen (z.B. Breetze) - als Grenzfläche zwischen der ehemals überlagernden Grundmoräne und den Schmelzwasserablagerungen interpretiert wird. Dabei war die Kalzit-zementation Drenthe-stadialer Schmelzwasserablagerungen dreiphasig: Die Produktion von Kalzit-zement fand nach zementpetrographischen Befunden in zwei Phasen mit unterschiedlichen Umweltbedingungen (z.B. Temperatur, Niederschlags- bzw. Sickerwassermenge) im vadosen Milieu statt. Auf Grund der signifikanten Unterschiede der dabei entstandenen Kristalltypen und fehlender Übergangsformen, ist von einer Zementationsunterbrechung durch einen Zeitraum ohne Zementbildung auszugehen. Durch den Anstieg der Grundwasser-Oberfläche gelangten die in der vadosen Zone schwach zementierten Schmelzwasserablagerungen in phreatisches Milieu. Hier fand die abschließende Hauptzementationsphase statt (Abb. 14).

6.5.2 Aufschluss Volkstorf: Zementationsphasen

Horizont a.

Die Obergrenze der Massenzementationskörper im Horizont a. ist relativ eben und fällt mit der Schichtgrenze zwischen zwei Sandlagen zusammen. Die Unterschiede der Wasserdurchlässigkeit zwischen den beiden Sandschichten sind mit $1,2 \times 10^{-4}$ m/s in der oberen bzw. $4,3 \times 10^{-4}$ m/s in der unteren Schicht so gering, dass ein ursächlicher Zusammenhang zwischen Korngrößenunterschied und Zementation nicht anzunehmen ist. Wahrscheinlicher ist, dass die relativ ebenen und scharfen oberen Grenzen der Massenzementationskörper, die sich alle unterhalb einer gemeinsamen Ebene befinden, eine fossile Grundwasser-Oberfläche nachzeichnen.

Die Bildung der Massenzementationskörper begann zunächst mit Zementbildung im vadosen Milieu (Zementationsphase 1). Nach Anstieg der Grundwasser-Oberfläche, die bei etwa 77,5 m ü.NN durch die obere Begrenzung der Massenzementationskörper nachgezeichnet wurde, setzte sich die Zementation im phreatischen Milieu fort, wobei der quantitativ unbedeutende vadosen Zement als Kristallisationskeim wirkte. Dabei führte die Mischung von Sickerwasser aus der vadosen Zone mit Grundwasser zu Übersättigung und Ausfällung von Kalzit.

Der Gesamtkarbonatgehalt des Lockersedimentes ist oberhalb der postulierten Grundwasser-Oberfläche signifikant niedriger (2,7 Gew.-%) als darunter (13,1 Gew.-%). Da derart unterschiedliche primäre Karbonatgehalte benachbarter Schichten, die sich ansonsten nicht erkennbar unterscheiden, untypisch sind, deutet dieser Befund auf sekundäre Entkalkung hin. Dabei wurde in der vadosen Zone gelöstes Karbonat mit dem Sickerwasser nach unten transportiert und beim Eintritt ins Grundwasser wieder ausgefällt. Dementsprechend entstanden die Massenzementationskörper durch Lösung von Karbonatdetritus in den höher liegenden, wasserungesättigten Schmelzwasserablagerungen und der Fällung im wassergesättigten Bereich unmittelbar darunter (Abb. 28).

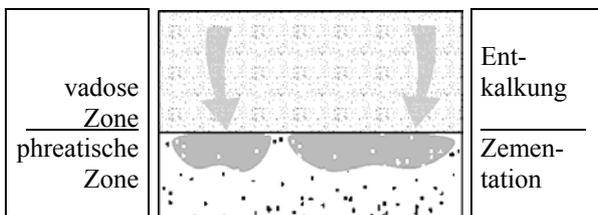


Abb. 28: Schematisches Modell zur Bildung von Massenzementationskörpern in phreatischem Milieu (Legende s. Anh. 2.).

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
 Zementationskörper: Massenzementationskörper
 Zement: u.a. Meniskuszement

Zementationsphase 2 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: Massenzementationskörper
 Zement: u.a. porenformerhaltende Zementation

Horizont b.

Im Horizont b. gibt es im schluffigen Fein- bis Mittelsand diskusförmige Konkretionen, die sich zweiphasig im phreatischen Milieu bildeten. Die Prozesse, die zur Bildung der Konkretionen führten, sind substratgesteuert (Kap. 6.3.3).

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: diskusförmige Konkretion
 Zement: Zementation der Porenraums

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: diskusförmige Konkretion
 Zement: Isopachenzement in Hohlräumen

Horizont c.

Kleinere Massenzementationskörper und Zementkrusten gibt es im Horizont c. ober- und unterhalb größerer Gerölle, was als vadoso Bildung im periglazialen Milieu interpretiert werden kann (Kap. 6.3.12). Dies korreliert mit der vadosen Entstehung, auf die die Merkmale von Zementgeneration 1 hinweisen (Zementationsphase 1). In der Zementa-

tionsphase 2 entstand Isopachenzement phreatisch sowohl auf der insgesamt selten und nur fleckenweise vorkommenden Zementgeneration 1 als auch direkt auf Detritus. Dabei wurden Quarzkörner mit Isopachenzement wahrscheinlich durch die Auflast des Warthe-Inlandeises in weicheren Karbonatdetritus eingedrückt (Kap. 6.3.10). Zusammen mit Hinweisen auf periglaziale Bedingungen während der Zementationsphase 1 führt dies zu der Interpretation, dass die ersten beiden Zementationsphasen zwischen der Ablagerung der Drenthe-stadialen Vorschütt-sedimente bis zum Vorrücken des Warthezeitlichen Inlandeises gebildet wurden, wofür ein maximaler Zeitraum von wenigen 1000 Jahren anzunehmen ist (mündl. Mitt. K.D. Meyer 2002). Die phreatische Hauptzementationsphase (Zementationsphase 3) fand nach Abschmelzen des Warthe-Inlandeises unter warmzeitlichen Bedingungen statt (Kap. 6.3.11), wobei die durch die Zementationsphase 1 und 2 zementierten Partien als Kristallisationskeime dienten.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
 Zementationskörper: Massenzementationskörper, Zementkrusten
 Zement: u.a. Meniskus-, Dachzement

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: Massenzementationskörper
 Zement: Isopachenzement

Zementationsphase 3

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: Massenzementationskörper
 Zement: u.a. Mosaikzement

Horizont d.

Massenzementationskörper treten im Lockersediment des Horizontes d. fleckenhaft auf. Sie entstanden zweiphasig in der phreatischen Zone, wobei unterschiedliche Kristalleigenschaften auf geänderte Zementationsbedingungen (z.B. Temperatur) hinweisen. Der in der Zementationsphase 2 gebildete Zement dominiert quantitativ (Hauptzementationsphase).

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: Massenzementationskörper
 Zement: Isopachenzement

Zementationsphase 2 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: Massenzementationskörper
 Zement: u.a. porenformerhaltende Zementation

Horizont e.

Im Horizont e. gibt es flache Zapfen im Fein- bis Mittelsand und Massenzementationskörper im Mittel- bis Grobsand. Die Massenzementationskörper verbinden übereinander vorkommende

Zapfen. Dabei fand die Zementation auf Grund der vorkommenden Zementtypen im gut wasserdurchlässigen Mittel- bis Grobsand im vadosen Milieu bzw. im schlechter wasserdurchlässigen Fein- bis Mittelsand im phreatischen Milieu statt, was auf Bildung nach dem Kapillarsperren-Modell hinweist (Kap. 6.2.8) Die flachen Zapfen bildeten sich in vadosem bzw. pseudo-phreatischen Milieu (Zementationsphase 1a), wobei die unterschiedlichen Eigenschaften der Zementgenerationen 1 (Mikrospatit) und 2 (Blockkalzit) für sukzessive Änderung der Bildungsbedingungen (z.B. Temperatur) während der Zementation sprechen. Ein Teil des zutretenden Sickerwassers, der nicht in der Entwässerungsschicht gehalten wurde, versickerte in die Kapillarsperre, die aus Mittel- bis Grobsandschichten besteht und führte hier zur Bildung der Massenzementationskörper im vadosen Milieu (Zementationsphase 1b).

Zementationsphase 1a

Zementationsmilieu: vados, pseudo-phreatisch

Zementationskörper: flache Zapfen

Zement: u.a. Meniskuszement

Zementationsphase 1b

Zementationsmilieu: vados

Zementationskörper: Massenzementationskörper

Zement: u.a. Meniskuszement

Horizont f.

Kugelige Konkretionen bildeten sich im Geschiebemergel in zwei Zementationsphasen im phreatischen Milieu.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: phreatisch

Zementationskörper: Konkretion

Zement: Zementation der Geschiebemergelmatrix

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: phreatisch

Zementationskörper: Konkretion

Zement: Isopachenzement auf zementierter Matrix und Detritus

Zusammenfassung Aufschluss Volkstorf

Da die Zementation in den Horizonten b. und f. substratgesteuert war (Kap. 6.3.3), geben sie keine Hinweise auf die paläohydrogeologische Entwicklung des Aufschlusses Volkstorf. Die Interpretation der Untersuchungsbefunde der übrigen Horizonte macht folgende Korrelation der horizontspezifischen Zementationsphasen wahrscheinlich:

1. Zementationsphase Aufschluss Volkstorf

In den bei ca. 77 bzw. 79 m ü.NN liegenden Horizonten a. und c. entstand Kalzitzement im vadosen Milieu. Es bildeten sich Massenzementationskörper und im Horizont c. zusätzlich Zementkrusten wahrscheinlich unter kaltzeitlichen Bedingungen.

2. Zementationsphase Aufschluss Volkstorf

Die Zementation der Massenzementationskörper setzte sich im Horizont a. im phreatischen Milieu fort. Die Grundwasser-Oberfläche befand sich nach der Höhenlage der Zementationskörper bei ca. 77,5 m ü.NN. Möglicherweise bildete sich auch noch ein Teil des vados entstandenen Zementes des Horizontes c. in dieser Phase.

3. Zementationsphase Aufschluss Volkstorf

In den Horizonten c. (Zementationsphase 2) und d. (Zementationsphase 1) kristallisierte Isopachenzement. Ähnliche Kristalleigenschaften machen gleichzeitige Bildung wahrscheinlich. In dieser Phase stieg die Grundwasser-Oberfläche nach der Höhenlage der Zementationskörper bis auf mindestens 80,5 m ü.NN an.

4. Zementationsphase Aufschluss Volkstorf

Im Horizont c. fand die Hauptzementationsphase nach Bildung des o.g. Isopachenzementes im phreatischen Milieu statt. Der im Horizont c. (Zementationsphase 3) vorkommende Zement entstand wahrscheinlich ebenfalls in dieser Phase. Die Grundwasser-Oberfläche befand sich auch zu dieser Zeit bei mindestens 80,5 m ü.NN.

Im Horizont e. bildeten sich bei ca. 82 m ü.NN Massenzementationskörper und flache Zapfen im vadosen bzw. pseudo-phreatischen Milieu. Es gibt keinen Hinweis auf eine zeitliche Beziehung zu einer der o.g. Zementationsphasen.

6.5.3 Aufschluss Krankenhagen: Zementationsphasen

Die im Aufschluss Krankenhagen vorkommenden Massenzementationskörper und kugelige bis diskusförmige Konkretionen unterscheiden sich hinsichtlich der Art und Abfolge der Zemente nicht. Sie bildeten sich wahrscheinlich gleichzeitig, womit die unterschiedliche Form der Zementationskörper auf die jeweils von den hydraulischen Eigenschaften des Sediments abhängige hydrogeologische Situation zurückzuführen ist. Zementationsphase 1 entstand wahrscheinlich im phreatischen Milieu und ist quantitativ eher unbedeutend. Die Massenzementationskörper befinden sich im Mittelsand unmittelbar unterhalb einer Feinsand-Schluff-Wechselfolge, bei deren Durchströmen Grundwasser relativ viel Zeit hatte detritisches Karbonat zu lösen. Beim Übertritt in den liegenden, wassergesättigten Mittelsand kam es bei der Mischung unterschiedlicher Wassertypen zu Kalzitfällung. Während der Zementationsphase 1 entstand Isopachenzement auch in den Konkretionen im feinsandigen Mittelsand ca. 0,5 m unterhalb der Massenzementationskörper. Auslöser für die Zementation in diesem Bereich waren nicht zu erkennen. Zementationsphase 2 fand nach

Absenkung der Grundwasser-Oberfläche im vadosen Milieu, Zementationsphase 3 wieder im phreatischen Milieu statt. Der in der letzten Zementationsphase (Hauptzementationsphase) entstandene Zement ist der quantitativ bedeutendste, die älteren Zementgenerationen 1 und 2 fungierten wahrscheinlich als Zementationskeime.

6.5.4 Aufschluss Rumbeck: Zementationsphasen

Die kalzitisch zementierten Mittelterrassen-sedimente enthalten vier unterschiedliche Zementtypen. Zement 1 hat Merkmale phreatischer (Isopachenzement), Zement 2 vadoser (u.a. Meniskuszement) Entstehung. Beide Zemente kommen nur fleckenhaft und nie gemeinsam vor. Wahrscheinlich bildeten sie sich in der vadosen Zone, wobei Isopachenzement in fleckenhaften, wassergesättigten Bereichen entstand (pseudo-phreatisch). Zement 4 (Blockkalzit) ist quantitativ der bedeutendste und bildete sich phreatisch (Hauptzementationsphase) nach den Zementen 1 und 2. Syntaxiale Anwachssäume (Zement 3) entstanden wahrscheinlich gleichzeitig zu den Zementen 1 und 4 im phreatischen Milieu.

6.5.5 Aufschluss Helpensen: Zementationsphasen

Horizont a.

In Mittelterrassenablagerungen der Weser, ca. 3,5 m unter der Basis der „Beckenablagerungen“ bzw. ca. 1 m unterhalb eines Kryoturbationshorizontes gibt es stratiforme Zementationskörper. Der Zement zeigte Merkmale, einphasiger, phreatischer Entstehung und die Zementationsintensität ist auffallend hoch, ohne dass eine Ursache für die nahezu vollständige Zementation gerade dieser Schicht erkennbar war. Auf stratiformen Zementationskörpern gibt es Massenzementationskörper, in denen Zement überwiegend Merkmale vadoser Entstehung hat. Nach der Beziehung der beiden Zementationstypen zueinander und den Bildungsbedingungen der zementierten Bereiche entstanden die Massenzementationskörper auf der bereits bestehenden stratiformen Zementationskörpern durch Sickerwasser, das auf den stratiformen Zementationskörpern aufgestaut wurde.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: phreatisch

Zementationskörper: stratiforme Zementationskörper

Zement: porenformerhaltend-porenfüllend

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: vados

Zementationskörper: Massenzementationskörper

Zement: u.a. Meniskuszement

Horizont b.

Der in Massenzementationskörpern im Horizont b. während der Zementationsphase 1 gebildete Zement zeigt sowohl Merkmale vadoser (u.a. Meniskuszement) als auch phreatischer Entstehung (u.a. drusiger Mosaikzement). Wahrscheinlich fand die Zementbildung in einer vadosen Zone statt, in der es wassergesättigte Teilbereiche (pseudo-phreatisch) gab. Nach Zementationsphase 1 wurden vor allem plattige Gerölle aus der umgebenden Zementhülle heraus gequetscht, wobei Hohlräume und Spalten zwischen Detritus und Zement entstanden. Einige Körner wurden dabei zerbrochen (Taf. VI/3), was auf Deformation durch das vorrückende Drenthe-Inlandeis zurückgeführt wird (Kap. 6.3.10). Zementationsphase 2 fand nach der Drenthe-stadialen Deformation der Zementationskörper im phreatischen Milieu statt, wobei die Grundwasser-Oberfläche oberhalb der bei 74 m ü.NN liegenden kalzitementierten Mittelterrassenablagerungen lag. Der während der Zementationsphase 3 gebildete Zement zeigt Merkmale vadoser Entstehung.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados, pseudo-phreatisch

Zementationskörper: Massenzementationskörper

Zement: u.a. Meniskus- und Dachzement

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: phreatisch

Zementationskörper: Massenzementationskörper

Zement: Isopachenzement

Zementationsphase 3

Zementationsmilieu: vados

Zementationskörper: Massenzementationskörper

Zement: u.a. Meniskus- und Dachzement

Horizont c.

Die Zementation der diskusförmigen Konkretionen im Horizont c. ereignete sich nachdem härterer Detritus (z.B. Siliziklastika, Taf. VI/4) in weicherem (z.B. Kalk- / Kalkmergelstein) gedrückt wurde, was wahrscheinlich durch Überführung durch das Drenthe-Inlandeis geschah (Kap. 6.3.10). Dabei entstand während der Zementationsphase 1 im phreatischen Milieu quantitativ eher unbedeutender Zement. Die Form der diskusförmigen Konkretionen weist zwar auf Entstehung im phreatischen Milieu hin. Sie kann sich jedoch nicht in der ersten Zementationsphase gebildet haben, da die Menge des phreatisch entstandenen Zementes dafür nicht ausreicht. Die Form der Konkretionen wurde in erster Linie durch Zementgeneration 2 bestimmt, die sich überwiegend im vadosen bzw. pseudo-phreatischen Milieu durch Sickerwasser bildete, das in den zementierten, schluffigen Feinsand (Abb. 29, II) eindrang. Die darüber folgende Schicht III besteht aus einer quasi wasserundurchlässigen Ton-Schluff-Wechselfolge

(Abb. 29, III), durch deren Porenraum nicht genügend Wasser in Schicht II gelangen konnte, um pseudo-phreatische Konkretionsbildung zu ermöglichen. Bei den Geländeuntersuchungen wurden Schrumpfrisse in Schicht III beobachtet, die sich wahrscheinlich durch Austrocknung im vadosen Milieu bildeten und die Wasserwegsamkeiten darstellten, durch die Sickerwasser aus den „Beckenablagerungen“ (Abb. 29, IV) direkt in Schicht II gelangten. Die pseudo-phreatischen Bedingungen, die zur Konkretionsbildung führten, wurden wahrscheinlich durch Korngrößenunterschiede und die Lagerungsbeziehung zwischen Schicht I und II begünstigt. Dabei wird die relativ feinkörnige Schicht II als Entwässerungsschicht interpretiert, in der Sickerwasser oberhalb der Kapillarsperre (Schicht I) lateral abgeleitet wurde (vgl. Kap. 6.3.8).

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: diskusförmige Konkretionen
 Zement: u.a. Isopachenzement

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: vados, pseudo-phreatisch
 Zementationskörper: diskusförmige Konkretionen
 Zement: u.a. Meniskuszement

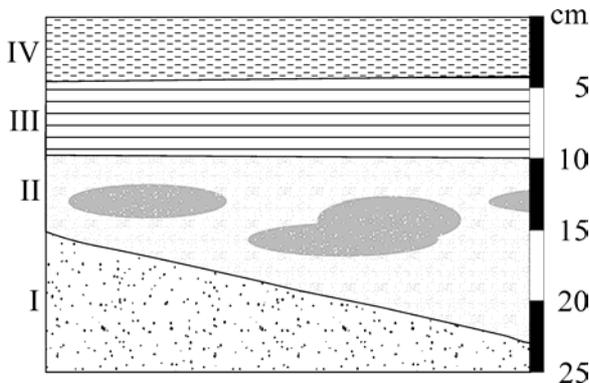


Abb. 29: Schema der Basis der „Beckenablagerungen“ mit den hier auftretenden diskusförmigen Konkretionen. I: $qM/mS-gS$ (k_f -Wert $5,4 \times 10^{-4}$ m/s), II: $qD/fS, u, ms2$ (k_f -Wert geschätzt: 10^{-5} m/s), III: qD/wl (T-U) (k_f -Wert geschätzt: 10^{-9} m/s), IV: qD/wl (fS-U) (k_f -Wert geschätzt: 10^{-6} m/s). Legende s. Anh. 2.

Zusammenfassung Aufschluss Helpensen

In den fluviatilen und glazigenen Sedimenten gibt es in drei Horizonten karbonatisch zementierte Partien (Abb. 30), die sich unter wechselhaften hydrogeologischen Bedingungen bildeten.

1. Zementationsphase Aufschluss Helpensen

Wahrscheinlich begann die Zementation im Aufschluss Helpensen mit der Bildung stratiformer Zementationskörper im Horizont a. Dafür sprechen ihre im Vergleich zu den übrigen Zementationskörpern ungewöhnliche Beschaffenheit und ihre

Beziehung zu den übrigen Zementationsformen im Aufschluss Helpensen.

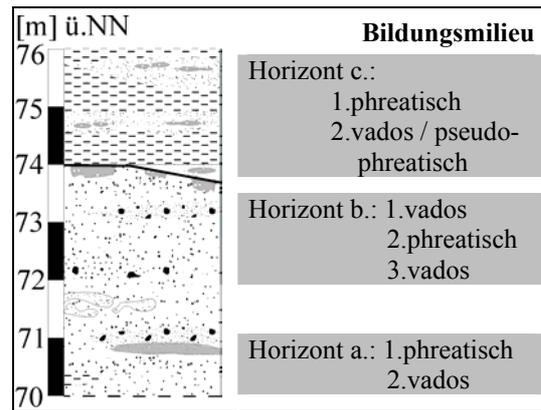


Abb. 30: Zusammenfassende Übersicht der hydrogeologischen Bedingungen, die während der Karbonatzementation herrschten. Legende s. Anh. 2.

2. Zementationsphase Aufschluss Helpensen

Die erste Zementationsphase im Horizont b. ereignete sich unter vadosen bis pseudo-phreatischen Bedingungen wahrscheinlich vor der Überführung des Drenthe-Inlandeis, da hier sowohl der Detritus als auch die erste Zementgeneration deformiert sind.

3. Zementationsphase Aufschluss Helpensen

Der phreatisch entstandene Zement der Horizonte b. (Zementationsphase 2) und c. (Zementationsphase 1) bildeten sich auf Grund gleicher Kristalleigenschaften wahrscheinlich zeitgleich unter phreatischen Bedingungen. Die Grundwasser-Oberfläche muss bei mindestens 74 m ü.NN gewesen sein.

4. Zementationsphase Aufschluss Helpensen

Im Horizont a. fand die zweite Zementationsphase im vadosen Milieu statt. Der Zement ist mit vadosem Zement des Horizontes c. (Zementationsphase 2) nach Kristalleigenschaften und Bildungsbedingungen vergleichbar, so dass zeitgleiche Bildung anzunehmen ist. Während dieser Zementationsphase muss sich die Grundwasser-Oberfläche nach der Höhenlage vados entstandenen Zementes unterhalb von 71 m ü.NN befunden haben.

5. (?) Zementationsphase Aufschluss Helpensen

Während der jüngsten Zementationsphase entstand auch im Horizont b. vadoser Zement, der allerdings im Gegensatz zu dem der beiden anderen Horizonte orange bis rot luminesziert. Dies deutet entweder auf horizonspezifische Sonderbedingungen oder auf nicht gleichzeitige Bildung hin.

6.5.6 Aufschluss Bad Münders / Hachmühlen: Zementationsphasen

Die Zementation von Massenzementationskörpern begann mit der Bildung von quantitativ eher unbedeutendem Isopachenzement im phreatischen Milieu (Zementationsphase 1). Durch die Überlagerung vom Drenthe-zeitlichen Inlandeis wurde siliziklastischer Detritus mit Isopachenzement in weichere Körner hinein gequetscht (Kap. 6.3.10). Die phreatischen Bedingungen während der Zementationsphase 1 sind möglicherweise auf große Schmelzwassermengen zurückzuführen, durch die sich Grundwasser subglazial im erheblichen Umfang neubildete.

Nach Abschmelzen des Inlandeises sank nach Rückgang des Schmelzwassers die Grundwasser-Oberfläche, was zu vadosem Milieu in den Schmelzwasserablagerungen und zur Bildung der Zementationsphase 2 (u.a. Meniskuszement) führte. Das Bildungsmilieu von Zementationsphase 3 lässt sich nicht eindeutig rekonstruieren. Der Zement zeigt zwar auch Merkmale phreatischer Entstehung, geht jedoch sukzessive aus vadosem Zement der Zementationsphase 2 hervor und ist fleckhaft mehr oder weniger häufig. Die Synopsis dieser Befunde spricht insgesamt eher für pseudo-phreatische Entstehung, wobei der in den Zementationsphasen 1 und 2 gebildete Zement möglicherweise Sickerwasser im Bereich der Massenzementationskörper aufstaute und so pseudo-phreatische Bedingungen während der Zementationsphase 3 verursachte.

6.5.7 Aufschluss Copenbrügge: Zementationsphasen

Horizont a.

Die Bildung der in einer Fließmoräne vorkommenden kugeligen Konkretionen fand nach der Konkretionsform im phreatischen Milieu bei sehr geringer Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit statt. Die Beschaffenheit der Zementtypen sowie die Unterschiede in den jeweiligen Fließmoränenlagen sind ganz wesentlich substratgesteuert, so dass sie keine relevanten Informationen zum Diagenesemilieu des Aufschlusses Copenbrügge liefern können.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: phreatisch
Zementationskörper: kugelige Konkretionen
Zement: u.a. Isopachenzement

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: phreatisch (?)
Zementationskörper: kugelige Konkretionen
Zement: ohne Bildungsmilieu-relevante Merkmale

Zementationsphase 3

Zementationsmilieu: phreatisch
Zementationskörper: kugelige Konkretionen

Zement: Isopachenzement

Horizont b.

Die erste Zementgeneration in den Massenzementationskörpern bildete sich im vadosen Milieu bei deszendtem Wassertransport. Die später im phreatischen Milieu entstandenen syntaxialen Anwachssäume und Isopachenzement sprechen für eine zwischenzeitlich bis auf mindestens ca. 161 m ü.NN gestiegene Grundwasser-Oberfläche. Bis zur Bildung der dritten und letzten im Horizont b. vorkommenden Zementgeneration muss die Grundwasser-Oberfläche wieder abgesunken sein, da der Zement Merkmale vadoser Entstehung zeigt. Allerdings gibt es auch Zement, der sich in dieser Zementationsphase bildete und Merkmale phreatischer Entstehung zeigt (z.B. vollständige syntaxiale Anwachssäume). Diese wurden als Anzeichen für pseudo-phreatische Bedingungen in der vadosen Zone gedeutet.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
Zementationskörper: Massenzementationskörper
Zement: u.a. Meniskuszement

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: phreatisch
Zementationskörper: Massenzementationskörper
Zement: u.a. Isopachenzement

Zementationsphase 3

Zementationsmilieu: vados, (pseudo?)-phreatisch
Zementationskörper: Massenzementationskörper
Zement: u.a. Meniskuszement

Horizont c.

Diskusförmige Konkretionen und flache Zapfen sind horizontbeständig häufig, was im Aufschluss oft perlschnurartig wirkt (Taf. VI/1). Nach den zementpetrographischen Befunden entstanden sie einphasig im phreatischen Milieu. Die Beziehung von Konkretionen und Zapfen zueinander zeigt, dass sich die Konkretionen vor den Zapfen bildeten. Die unterschiedliche Form der Zementationskörper deutet daraufhin, dass bei kontinuierlicher Zementation die Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers sukzessive zunahm (Kap. 6.3.6). Die Zementationskörper wurden nach ihrer Bildung durch kalkaggressives Grund- oder Sickerwasser korrodiert, wodurch die rauen und leicht absandenden Oberflächen entstanden.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: phreatisch
Zementationskörper: diskusförmige Konkretionen bis flache Zapfen
Zement: u.a. drusiger Mosaikzement

Horizont d.

Die stratiformen Zementationskörper kommen in feinkörnigen Schichten unmittelbar über der Grenzfläche zu grobkörnigen vor. Das feinkörnige Sediment fungierte wahrscheinlich als

Entwässerungsschicht, das grobkörnige als Kapillarsperre (Kap. 6.3.8), wobei die mit etwa 15° nach Westen einfallenden Schichten das Abströmen vom zutretenden Sickerwasser über die Entwässerungsschicht ermöglichten. In der Entwässerungsschicht bildete sich Zement im vadosen und pseudo-phreatischen Milieu.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados, pseudo-phreatisch
 Zementationskörper: stratiforme Zementationskörper
 Zement: u.a. Meniskuszement

Zusammenfassung Aufschluss Coppenbrügge

In den glazigenen Sedimenten der Kies-/Sandgrube „Am Felsenkeller“ treten in vier Horizonten Zementationskörper auf (Abb. 31), die sich unter wechselhaften hydrogeologischen Bedingungen bildeten. Dabei sind die Prozesse, die zur Bildung von Konkretionen in Horizont a. führten, substratgesteuert, so dass die interpretierten Bildungsbedingungen nicht in die Rekonstruktion von Zementationsphasen einbezogen werden.

1. Zementationsphase Aufschluss Coppenbrügge

Während der Zementationsphase 1 fand Zementation im vadosen Milieu statt, was in den Horizonten b. und d. durch entsprechenden Zement dokumentiert ist. Im Horizont c. wurde dagegen kein vados entstandener Zement nachgewiesen. Das kann auf diagenetische Überprägung im phreatischen Milieu oder auf Beobachtungslücken zurückgeführt werden.

2. Zementationsphase Aufschluss Coppenbrügge

In der zweiten Zementationsphase wurde in den Horizonten b. und c. der Großteil des Zementes gebildet (Hauptzementationsphase). Da oberhalb von ca. 164 m ü.NN kein phreatisch entstandener Zement auftritt, befand sich die Grundwasser-Oberfläche während der Hauptzementationsphase in diesem Niveau.

3. Zementationsphase Aufschluss Coppenbrügge

Bis zur jüngsten Zementationsphase 3 sank die Grundwasser-Oberfläche bis auf mindestens 160 m ü.NN ab, da sich im Horizont b. etwas oberhalb dieses Niveaus vadoser Zement bildete. Im Horizont c. wurde kein Zement mehr gebildet.

Die stratiformen Zementationskörper, die im Horizont d. vorkommen, befinden sich bei etwa 165 m ü.NN und zeigen Merkmale einphasiger, vadoser bis pseudo-phreatischer Entstehung. Es lies sich keine eindeutige zeitliche Beziehung zur Bildung der Zementationskörper in den übrigen Horizonten herstellen. Damit kann die Zementation im Horizont d.

- während der vadosen Zementationsphasen 1 und/oder 3 oder
- gleichzeitig zu den Zementationsphasen 1 bis 3

stattgefunden haben. Im letzteren Fall müsste die Grundwasser-Oberfläche während der phreatischen Zementationsphase 2 unterhalb von 165 m ü.NN gewesen sein.

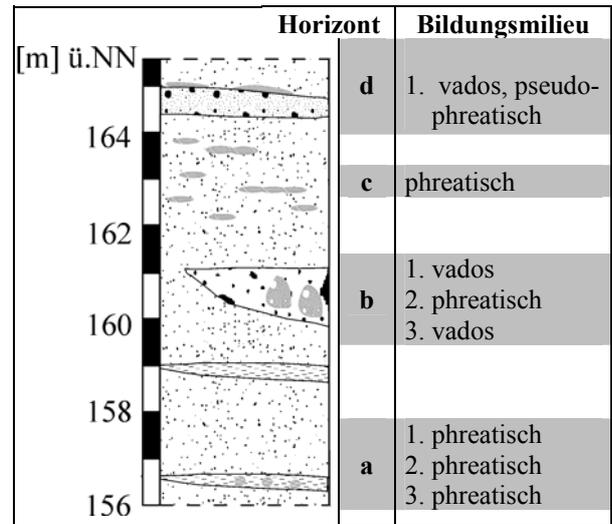


Abb. 31: Zusammenfassende Übersicht der Bildungsbedingungen, die während der Karbonatzementation in den vier Horizonten herrschten. Legende s. Anh. 2.

6.5.8 Aufschluss Eime: Zementationsphasen

Im Aufschluss Eime wurde ein hängender Zapfen untersucht, der zusammen mit Massenzementationskörpern in drei Horizonten vorkommt (Abb. 32).

In der ersten, vadosen Zementationsphase entstand Mikrit durch Sickerwasser, das aus der überlagernden Grundmoräne in die Mittelterrassenablagerungen sickerte.

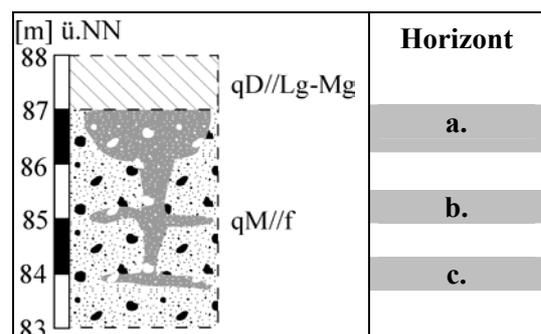


Abb. 32: Übersicht der Massenzementationskörper, die in drei Horizonten um bzw. unterhalb eines hängenden Zapfens entstanden. Legende s. Anh. 2.

Unmittelbar unterhalb der Grundmoräne bildete sich durch flächenhaft zutretendes Sickerwasser der Massenzementations-Horizont a. Der weitere Sickerweg folgte zunächst bevorzugten Sickerbahnen, wodurch hängende Zapfen entstanden. Die tieferen Massenzementations-Horizonte b. und c., die schichtparallel-fingerförmig in das Lockersediment

diment hinein reichen, entstanden durch Aufstau von Sickerwasser, der möglicherweise durch teilweise gefrorenen Untergrund verursacht wurde (Kap. 6.3.12). Der quantitativ eher unbedeutende, vadoso Zement zeichnete die Form von Zapfen und Massenzementationskörpern vor und diente als Kristallisationskeim für die beiden folgenden phreatischen Zementationsphasen (2, 3). Auf Grund der unterschiedlichen Zementbeschaffenheit ist davon auszugehen, dass sich die Bildungsbedingungen zwischen der Zementationsphase 2 und der quantitativ dominierenden Zementationsphase 3 (Hauptzementationsphase) änderten.

Eine signifikant von allen anderen Zementationsformen abweichende Beschaffenheit gibt es im höheren Teil des Massenzementations-Horizontes c. Einerseits kommt hier kein vadosoer Zement vor und andererseits unterscheidet sich die Art des phreatischen Zementes erheblich von allen anderen zementierten Bereichen (z.B. auffällig große blattförmige Kristalle, Taf. V/8). Die Position und die Beziehung zum tieferen Teil des Horizontes c. deuten darauf hin, dass die Zementation nach der Bildung des tieferen Teils erfolgte. Wahrscheinlich staute sich Sickerwasser auf dem bereits zementierten Sediment und schuf dadurch pseudo-phreatische Bedingungen (Abb. 33).

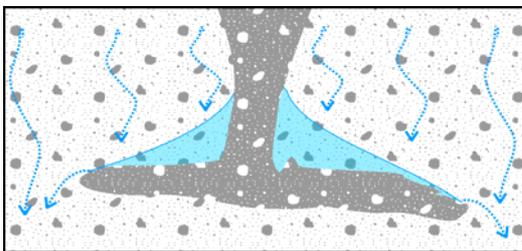


Abb. 33: Schematisches, hydrogeologisches Modell zur Bildung des höheren Teils des Massenzementations-Horizontes c. In der vadosen Zone bewegt sich Sickerwasser deszendiert (gepunktete Pfeile). Über dem bereits bestehenden Teil des tiefsten Massenzementations-Horizontes (grau) akkumuliert Sickerwasser und schafft pseudo-phreatische Bedingungen (blau), in denen sich Isopachenzement bildet.

6.5.9 Aufschluss Banteln: Zementationsphasen

In den Massenzementationskörpern im Aufschluss Banteln ist der Porenraum der Mittelterrassenablagerungen hauptsächlich durch karbonatische Pseudomatrix gefüllt. Außerdem gibt es vados gebildeten Kalzitcement, der gegenüber der Pseudomatrix quantitativ eher unbedeutend ist. Die insgesamt sehr schlechte Zementationsintensität der verkitteten Bereiche beruht daher vor allem auf adhäsive Verbindung durch Pseudomatrix und weniger auf Zementation.

6.5.10 Aufschluss Betheln: Zementationsphasen

In den in drei Horizonten vorkommenden Massenzementationskörpern fand die erste Zementationsphase im vadosen Milieu statt. Bis zur folgenden Zementationsphase 2, in der quantitativ dominierender Zement im phreatischen Milieu entstand (Hauptzementationsphase), stieg die Grundwasser-Oberfläche nach der Position des höchsten Massenzementationskörpers bis auf mindestens 143 m ü.NN an. Wahrscheinlich bildete dabei vadosoer Zement der Zementationsphase 1 Kristallisationskeime. Das Kathodolumineszenzverhalten des in der Zementationsphase 2 entstandenen Zementes (Kap. 5.2.10) deutet auf wechselnde Redox-Bedingungen während der Zementation hin. Möglicherweise wirkten sich hier Schwankungen der Grundwasser-Oberfläche aus. Bei niedriger Grundwasser-Oberfläche befanden sich die Zementationskörper in einem Bereich, in dem durch Sickerwasser auch Sauerstoff ins Grundwasser gelangte und zu oxidierende Bedingungen führte. Zunächst kamen die Zementationskörper nach dem Anstieg der Grundwasser-Oberfläche in einen tieferen Bereich des Grundwasser-Körpers, in dem reduzierende Bedingungen herrschten. Der Befund, dass die Zementation zum Abschluss der Zementationsphase 2 wieder unter oxidierenden Bedingungen stattfand, deutet darauf hin, dass sich die Grundwasser-Oberfläche wieder absenkte. Der in der Zementationsphase 3 entstandene Zement zeigt zwar Merkmale phreatischer Entstehung. Allerdings spricht die Rekonstruktion der Bildungszeit in Verbindung mit der hydrogeologischen Entwicklung im Bereich des Aufschlusses Betheln eher für pseudo-phreatische Zementationsbedingungen (Kap. 6.3.9).

6.5.11 Aufschluss Freden: Zementationsphasen

Aufschlussbereich I:

Im Aufschlussbereich I gibt es stratiforme Zementationskörper und darunter folgend mehrere Horizonte mit diskusförmigen Konkretionen. Dabei unterscheidet sich der in den stratiformen Zementationskörpern vorkommende Kalzitcement nicht von dem der Konkretionen. In der ersten Zementationsphase entstand quantitativ unbedeutender, vadosoer Zement, der wahrscheinlich als Zementationskeim für die nachfolgend gebildeten Zement diente. Zementationsphase 2 fand im phreatischen Milieu statt. Dabei entstand durch den quantitativ dominierenden Zement (Hauptzementationsphase) die Form der Konkretionen. Ihr in Horizonten gehäuftes Vorkommen ist wahrscheinlich auf hydrochemische Selbstorganisationsprozesse zurückzuführen.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
 Zementationskörper: diskusförmige Konkretionen
 Zement: u.a. Meniskuszement

Zementationsphase 2 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: diskusförmige Konkretionen
 Zement: u.a. drusiger Mosaikzement

Sowohl die Ober- als auch die Unterseite der stratiformen Zementationskörper ist stark wellig, was den Eindruck vermittelt, dass sie durch Zusammenwachsen diskusförmiger Konkretionen entstanden. Da die diskusförmigen Konkretionen in den tieferen Horizonten entweder einzeln oder zu kleineren Gruppen zusammengewachsen vorkommen, war die Zementbildung im Bereich der stratiformen Zementationskörper offensichtlich effektiver als in den tieferen Horizonten. Dazu kommt der Befund, dass das Einfallen der stratiformen Zementationskörper nicht dem der umgebenden Schichten entspricht und damit nicht substrat- sondern strömungsgesteuert wurde (Taf. VII/2). Daraus lässt sich ein Modell entwickeln, bei dem sich die stratiformen Zementationskörper im Gegensatz zu den Konkretionen unmittelbar unterhalb einer Grundwasser-Oberfläche bildeten, wobei das relativ starke Einfallen auf einen hohen hydraulischen Gradienten bzw. die Einfallsrichtung auf nach SE abströmendes Grundwasser hinweisen (Abb. 34). Da es sich beim Lockersediment um eine geringdurchlässige Feinsand-Schluff-Wechselfolge handelt (k_f -Wert geschätzt: $10^{-5} - 10^{-6}$ m/s), fand die Zementation trotz des hohen hydraulischen Gradienten bei niedriger Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit statt. Dabei entstand unmittelbar unterhalb der Grundwasser-Oberfläche mehr Zement, da hier zusätzlich zum Grundwasser-Transport gelöste Stoffe durch Sickerwasser aus der vadosen Zone zugeführt wurden.

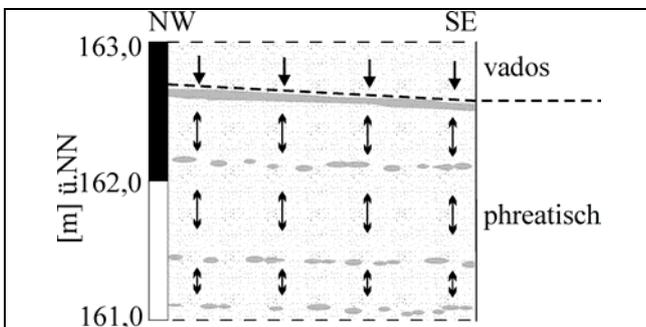


Abb. 34: Schematische Darstellung der hydrogeologischen Situation, die zur Bildung von stratiformen Zementationskörpern (oben) und diskusförmigen Konkretionen (drei Horizonte unten) führte.

Auf den Konkretionen kommen verästelte Kalkröhrchen vor (Taf. VII/1), die nach der

Konkretionsbildung entstanden. In diesem Aufschlussbereich kommen auch Rhizokonkretionen vor. Die verästelte Form und die Größe der Kalkröhrchen ist mit rezenten, noch lebenden Wurzeln in diesem Bereich vergleichbar. Damit ist die Bildung der Kalkröhrchen wahrscheinlich auf die Aktivität von Pflanzenwurzeln zurückzuführen.

Aufschlussbereich II:

Im Aufschlussbereich II wurden die anstehenden Schmelzwasserablagerungen glazitektonisch stark deformiert. Dabei wurden die Schichten im zentralen Teil des Aufschlusses diapirartig verstellt (Taf. VII/3a). Unmittelbar am Rand des Kernbereichs sind die Sedimente noch stark verfaultet, mit zunehmender Entfernung vom diapirartigen Zentralteil nimmt auch der Grad der glazitektonischen Deformation ab (Taf. VII/3a). Dabei wurden die Schichten im Bereich II-1 nur geringfügig bzw. im Bereich II-2 stark verstellt. Die stark deformierten Sedimente im unmittelbaren Randbereich des diapirartigen Zentralteils wurden mit II-3 bezeichnet (Taf. VII/3).

In geringfügig verstellten Schmelzwasserschichten (**Bereich II-1**) gibt es fleckhaft Massenzementationskörper. In der ersten Zementationsphase entstand Zement mit Merkmalen vadoser Entstehung, der dann als Kristallisationskeim für die spätere Bildung von phreatischem Zement diente. Die zwei folgenden Zementationsphasen fanden im phreatischen Milieu statt, wobei in der Zementationsphase 3 die größte Zementmenge gebildet wurde (Hauptzementationsphase) und qualitative Unterschiede zwischen den jeweils gebildeten Zementen für zwischenzeitlich geänderte Bildungsbedingungen sprechen.

Bereich II-1

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
 Zementationskörper: Massenzementationskörper
 Zement: u.a. Meniskuszement

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: Massenzementationskörper
 Zement: Isopachenzement

Zementationsphase 3 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: Massenzementationskörper
 Zement: u.a. drusiger Mosaikzement

Im **Bereich II-2** gibt es Massenzementationskörper in stark deformierten, teilweise nahezu saiger stehenden Schichten. Da die Massenzementationskörper aus dem Kies fingerförmig über eine Verwerfungsbahn hinweg in eine unmittelbar angrenzende Feinsand-Schluff-Wechselfolge reichen, müssen sie jünger als die glazitektonische Deformation sein, die für den diskordanten Kontakt von Kies und Wechselfolge verantwortlich ist. Sie

entstanden im Kies an der steilstehenden Kontaktfläche zwischen gering wasserdurchlässigen und sehr gut wasserdurchlässigen Sedimenten. Dabei führten von oben kommendes Sickerwasser und aus der geringdurchlässigen Feinsand-Schluff-Wechselfolge zutretendes Wasser im Kies unmittelbar über der Verwerfungsbahn auch zu pseudo-phreatischen Bedingungen, in denen Zement mit phreatischen Merkmalen entstand (Abb. 35).

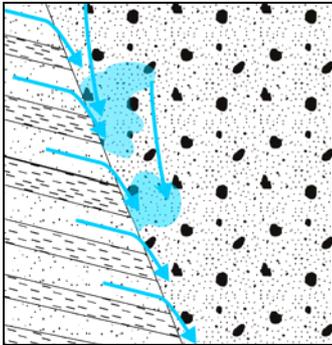


Abb. 35: Schematische Darstellung zur hydrogeologischen Situation, die zur Bildung pseudo-phreatischer Bereiche im Kies führte. Aus der Wechselfolge und von oben zusickerndes Wasser (Pfeile) führte oberhalb der Verwerfungsbahn partiell zu pseudo-phreatischen Bedingungen (blaue Bereiche) im ansonsten vadosen Milieu.

Bereich II-2

Zementationsphase 1a

Zementationsmilieu: vados

Zementationskörper: Massenzementationskörper

Zement: u.a. Meniskus-, Gravitationszement

Zementationsphase 1b (?) / 2(?)

Zementationsmilieu: pseudo-phreatisch (?)

Zementationskörper: Massenzementationskörper

Zement: u.a. drusiger Mosaikzement

In intensiv gefalteten Sand- und Kiesschichten (**Bereich II-3**), die sich unmittelbar an den diapirartig verstellten Zentralteil des Aufschlussbereiches II anschließen, gibt es liegende Zapfen und Massenzementationskörper. In den Massenzementationskörpern kommen Hinweise auf eine erste, vadoso Zementationsphase vor, die in den Zapfen nicht nachgewiesen werden konnte. Während der Zementationsphasen 2 und 3 entstanden in den Massenzementationskörpern u.a. Isopachenzement und Blockkalzit mit Merkmalen phreatischer Entstehung. Dabei hat der Zement der Zementationsphase 3 den größten Anteil an den Zementationskörpern (Hauptzementationsphase). Die beiden phreatisch entstandenen Zementtypen gibt es auch in den Zapfen und auf Grund der großen Übereinstimmung der Zementeigenschaften fand wahrscheinlich zeitgleiche Bildung statt. Damit dürfte sich während der Zementationsphase 1 auch in den Zapfen vadoser Zement gebildet

haben und der fehlende Nachweis ist auf Beobachtungslücken zurückzuführen.

Bereich II-3

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados

Zementationskörper: Massenzementationskörper, liegende Zapfen (?)

Zement: u.a. Meniskuszement

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: phreatisch

Zementationskörper: Massenzementationskörper, liegende Zapfen

Zement: Isopachenzement

Zementationsphase 3 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch

Zementationskörper: Massenzementationskörper, liegende Zapfen

Zement: u.a. porenformerhaltend

Zusammenfassung Aufschlussbereich II

1. Zementationsphase

Vados, während der Zementationsphase 1 entstandener Zement kommt in allen drei Bereichen mit Zementationskörpern im Aufschlussbereich II vor (Tab. 9). Der Zement entstand wahrscheinlich synsedimentär vor Überfahung durch das Inlandeis und der dadurch verursachten glazitektonischen Deformation (Kap. 6.3.10). Dieses Szenario korreliert zwar mit dem von LATZKE (1996) diskutierten Sedimentationsablauf, wonach der Kiessandkörper von Freden von einem Drenthezeitlichen Gletscher überfahren wurde. Allerdings zeigt der in den Massenzementationskörpern vorkommende Zement, der sich während der Zementationsphase 1 bildete, kein Merkmal, das auf glazitektonischen Einfluss hinweist.

2. Zementationsphase

In der Zementationsphase 2 entstand in den Bereichen II-1 und II-3 selten vorkommender Isopachenzement. Als Bildungsmilieu wird diskontinuierlicher Permafrost unterhalb des vorrückenden Drenthe-Inlandeises diskutiert. Bereich II-2 war während dieser Zementationsphase wahrscheinlich gefroren, da hier kein Isopachenzement vorkommt.

3. Zementationsphase

Zementation während der Hauptzementationsphase (Zementationsphase 3) wurde in den Bereichen II-1 und II-3 sicher nachgewiesen (Tab. 9). Die Form der Zapfen entstand wahrscheinlich erst während in dieser Zementationsphase. Im Bereich II-2 gibt es zwar ebenfalls Zement mit Merkmalen phreatischer Entstehung. Dieser kann - nach der hydrogeologischen Situation dieses Bereichs - zumindest teilweise auch unter pseudo-phreatischen Bedingungen während der ersten Zementationsphase entstanden sein.

Tab. 9: Zusammenfassende Übersicht der in den zementierten Bereichen im Aufschlussbereich II vorkommenden Zementationsphasen. Hervorgehoben sind die Hauptzementationsphasen.

II-1	II-2	II-3
vados phreatisch phreatisch	vados phreatisch (?)	vados phreatisch phreatisch

Aufschlussbereich III:

Die Bildung von Massenzementationskörpern begann in der vadosen Zone (Zementationsphase 1). Der vados Zement bildete Kristallisationskeime, die die spätere Bildung von phreatischem Zement in zwei Phasen mit unterschiedlichen Bildungsbedin-

gungen ermöglichten. In der jüngsten Zementationsphase 3 entstand der in den Massenzementationskörpern quantitativ dominierende Zement (Hauptzementationsphase).

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
Zementationskörper: Massenzementationskörper
Zement: u.a. Meniskus-, Gravitationszement

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: phreatisch
Zementationskörper: Massenzementationskörper
Zement: Isopachenzement

Zementationsphase 3 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch
Zementationskörper: Massenzementationskörper
Zement: u.a. drusiger Mosaikzement

Tafel VII: Diagenesmilieus II

Taf. VII/1: Aus diskusförmigen Konkretionen zusammengewachsener Zementationskörper auf dessen Oberseite verästelte Kalkröhrchen (Pfeile) vorkommen, die wahrscheinlich biogen entstanden. Aufschluss Freden, Aufschlussbereich I.

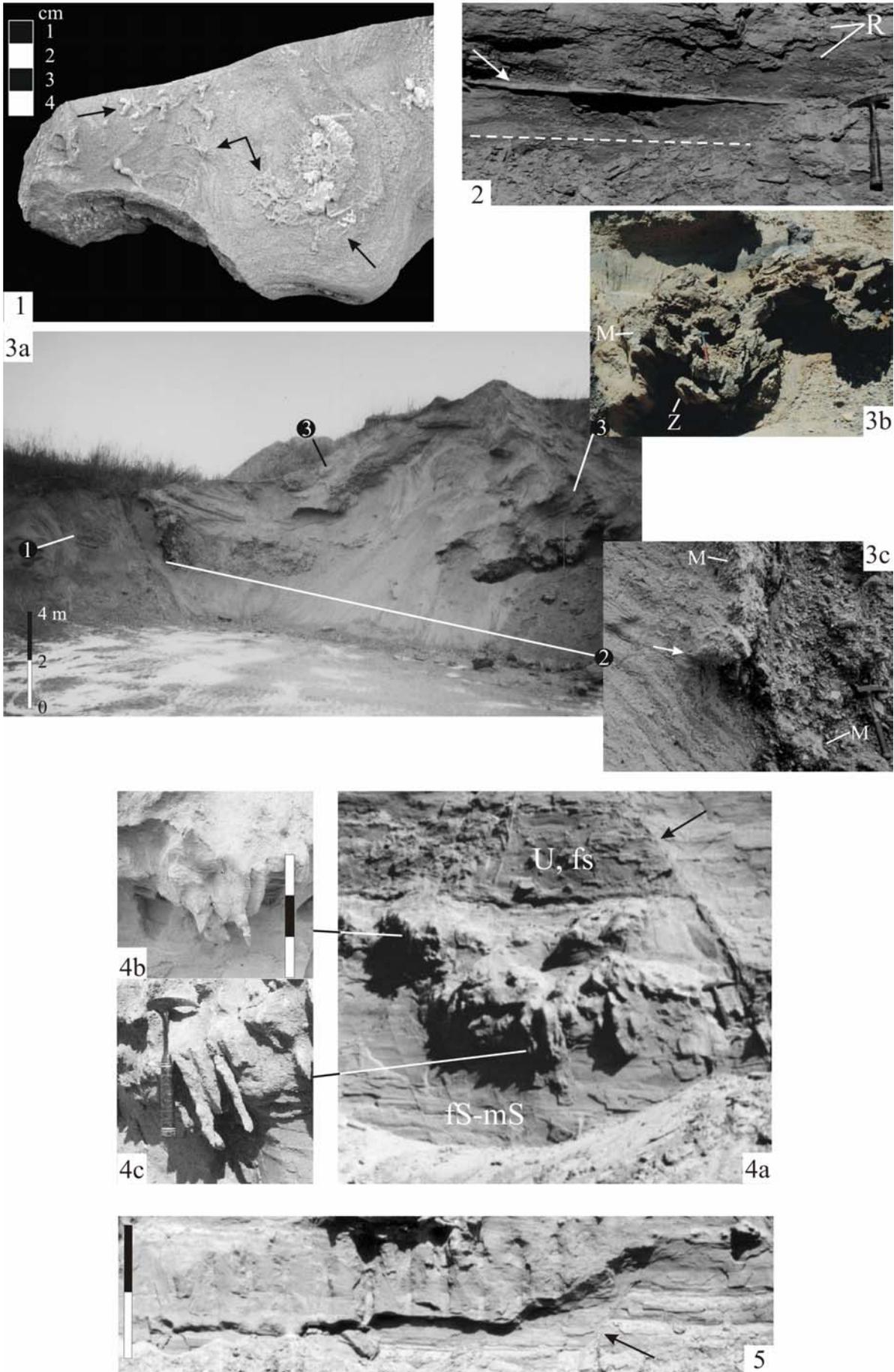
Taf. VII/2: Diskordant zur Schichtung der Schluff-Feinsand-Abfolge (gestrichelte Linie) nach SE einfallender stratiformer Zementationskörper (Pfeil), der eine ehemalige Grundwasser-Oberfläche nachzeichnet. Im höheren Teil gibt es Rhizokonkretionen (R), Aufschluss Freden, Aufschlussbereich I.

Taf. VII/3: Übersicht zum Aufschlussbereich II (3a): Zementationskörper (II-1 – II-3) gibt es in unterschiedlich glazitektonisch beanspruchten Bereichen am Rand von diapirartig verstellten Schichten. Im Bereich II-3 gibt es intensiv gefaltete Schmelzwasserablagerungen (Detail: 3b), wobei in Sandschichten meist zu Gruppen zusammengewachsene Zapfen (Z, hier im Querschnitt) bzw. im Kies Massenzementationskörper (M) vorkommen. Im Bereich II-2 gibt es Massenzementationskörper (M) am diskordanten, steilstehenden Kontakt zwischen Sand-Schluff-Wechselfolge und Kies. Die zementierten Partien befinden sich im Wesentlichen im Kies unmittelbar über der Kontaktfläche, reichen aber auch beulen- bis fingerförmig etwa horizontal einige cm in die Wechselfolge hinein (Pfeil).

Taf. VII/4: Aufschluss Freden, Aufschlussbereich VIII-1: Übersichts- (4a) und Detailbilder (4b, 4c) mit hängenden Zapfen, die im oberen Bereich zusammenwachsen und unten schwach nach Norden umbiegen. Die Zapfen befinden sich ca. 30 – 50 cm unterhalb einer Schluffschicht, die von einer Abschiebung abgeschnitten wird (Pfeil). Länge des Maßstabs (Bild 4b) entspricht 30 cm.

Taf. VII/5: Stratiformer Zementationskörper im Aufschlussbereich VIII-5: Östlich einer mit Sand gefüllten Abschiebung (Pfeil) erstreckt sich der Zementationskörper nur einige dm, westlich davon einige m, wobei es einen etwa mit 45° einfallenden und einen etwa horizontal lagernden Bereich gibt. Länge des Maßstabs 2 m, Bild rechts = W, Bild links = E.

Tafel VII



Aufschlussbereich IV:

Im Aufschlussbereich IV gibt es in zwei Horizonten Zapfen. Dabei kommen im oberen Horizont liegende, im ca. 1,5 m tieferen Horizont gebogene Zapfen vor. Sowohl in den liegenden als auch in den gebogenen Zapfen entstand in der Zementationsphase 1 vadoser Zement. Während der Zementationsphasen 2 und 3 bildete sich Zement mit Merkmalen phreatischer Entstehung, wobei der jüngste Zement quantitativ der bedeutendste ist (Hauptzementationsphase). Entsprechend dem in Kap. 6.3.12 entwickelten Genesemodell entstanden die liegenden und die gebogenen Zapfen zeitgleich vor einem Gletscher durch dessen versickerndes Schmelzwasser. Dabei führte diskontinuierlicher Permafrost im Vorfeld des Eises zu unterschiedlichen Strömungsbedingungen und damit zur unterschiedlichen Form der Zapfen (Kap. 6.3.12).

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
Zementationskörper: Zapfen
Zement: u.a. Meniskus-, Gravitationszement

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: phreatisch
Zementationskörper: Zapfen
Zement: Isopachenzement

Zementationsphase 3 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch
Zementationskörper: Zapfen
Zement: u.a. drusiger Mosaikzement

Aufschlussbereich V

Im Aufschlussbereich V gibt es in drei Horizonten Zementationskörper. Bei ca. 151 m ü.NN gibt es Massenzementationskörper (Horizont V-1) und bei ca. 152,5 m ü.NN (Horizont V-2) bzw. ca. 155 m ü.NN (Horizont V-3) diskusförmige Konkretionen. Die Massenzementationskörper im Horizont V-1 entstanden in der vadosen Zone. Dafür sprechen die regellose Verteilung der Massenzementationskörper sowie die Beschaffenheit des Zementes, der sich in zwei Phasen bildete und überwiegend Merkmale vadose Entstehung zeigt. Ursachen für die Bildung von z.T. sehr großvolumigen Massenzementationskörpern waren nicht erkennbar.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
Zementationskörper: Massenzementationskörper
Zement: u.a. Meniskus-, Gravitationszement

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: vados
Zementationskörper: Massenzementationskörper
Zement: u.a. Meniskus-, Gravitationszement

Die diskusförmigen Konkretionen im Horizont V-2 entwickelten sich einphasig im phreatischen Milieu. Wahrscheinlich bildeten sie sich unmittelbar unter einer fossilen Grundwasser-Oberfläche, wo sich

karbonatreiches Sickerwasser mit Grundwasser vermischte (Kap. 6.3.9).

Zementationsphase 1 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch
Zementationskörper: diskusförmige Konkretionen
Zement: u.a. porenformerhaltend

Im Horizont V-3 bildeten sich diskusförmige Konkretionen ebenfalls einphasig im phreatischen Milieu. Während der Zementation wuchsen die Konkretionen zu länglichen Platten zusammen. Form und Orientierung der Konkretionsplatten deutet auf syngenetisch steigende Grundwasser-Strömung hin.

Zementationsphase 1 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch
Zementationskörper: diskusförmige Konkretionen
Zement: u.a. porenformerhaltend

Wahrscheinlich bildeten sich die diskusförmigen Konkretionen V-2 und V-3 gleichzeitig, indem die Zementation in den geringdurchlässigen Schichten des Horizontes V-3 in einem schwebenden Grundwasser-Stockwerk stattfand, das sich einige Meter über der Grundwasser-Oberfläche des Grundwasser-Stockwerks befand, in dem die Konkretionen des Horizontes V-2 entstanden (Kap. 6.3.9). Eine zeitliche oder genetische Beziehung zwischen den Konkretionen und den vados entstandenen Massenzementationskörpern (Horizont V-1) war auf der Basis der Untersuchungsergebnisse nicht zu erkennen.

Aufschlussbereich VI:

Im Aufschlussbereich VI gibt es zwischen 153 und 154 m ü.NN Massenzementationskörper und in steilstehenden Abschiebungen bei ca. 149-151 m ü.NN diskusförmige Konkretionen. Die teilweise sehr großen Massenzementationskörper kommen ohne erkennbare Systematik innerhalb der Schmelzwasserablagerungen vor. Sie bildeten sich nach einer vadosen Zementationsphase überwiegend im phreatischen Milieu (Hauptzementationsphase). Eine Ursache für die Zementation war nicht erkennbar.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
Zementationskörper: Massenzementationskörper
Zement: u.a. Meniskus-, Gravitationszement

Zementationsphase 2 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch
Zementationskörper: Massenzementationskörper
Zement: u.a. drusiger Mosaikzement

Von den diskusförmigen Konkretionen gehen vereinzelt fingerförmig zementierte Bereiche aus, die etwa horizontal in die Schmelzwasserablagerungen hinein reichen. Ursache der Zementation war wahrscheinlich die Mischung von Kluftwasser

mit Grundwasser. Dabei löste die Mischung von unterschiedlich zusammengesetztem Wasser die Zementbildung aus. In den Konkretionen gibt es Zement mit Merkmalen phreatischer Entstehung.

Zementationsphase 1 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: diskusförmige Konkretionen
 Zement: u.a. drusiger Mosaikzement

Eine zeitliche oder genetische Beziehung zwischen den Konkretionen und den vados entstandenen Massenzementationskörpern war auch hier nicht zu erkennen.

Aufschlussbereich VII:

Im Aufschlussbereich VII kommen Konkretionen horizontbeständig in Massen vor. Sie entstanden einphasig im phreatischen Milieu. Wahrscheinlich lösten Selbstorganisationsprozesse die horizontbeständige Konkretionsbildung aus (Kap. 6.3.4). Die Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit war auf Grund der kugelig bis diskusförmigen Form der Konkretionen sehr niedrig.

Zementationsphase 1 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch

Zementationskörper: kugelige bis diskusförmige Konkretionen

Zement: u.a. porenformerhaltend

Aufschlussbereich VIII:

Im Aufschlussbereich VIII stehen über 10 m mächtige Schmelzwasserablagerungen an, die im Wesentlichen aus Fein- und Mittelsand bestehen, in die dünne Schlufflagen- und linsen bzw. Grobsandschichten eingeschaltet sind. Außerdem kommt im höheren Teil des aufgeschlossenen Profils ein etwa 1 m mächtiger Schluffhorizont vor. Die flach (< 10°) nach Süden einfallenden Schichten sind von mit 60° – 70° steilstehenden Abschiebungen durchsetzt, die im westlichen Profilverteil nach Ost-südost, bzw. im östlichen Profilverteil nach West-nordwest einfallen. Die Abschiebungen bilden häufig Klüfte mit Öffnungsweiten von bis zu 5 cm und sind mit Ton, Schluff und Sand gefüllt. Karbonatische Zementation ist sehr häufig, sie kommt in verschiedenen Horizonten vor und es gibt sie in großer Formenvielfalt. Im Aufschlussbereich VIII wurden sechs unterschiedliche Typen karbonatischer Zementationskörper untersucht (Abb. 36).

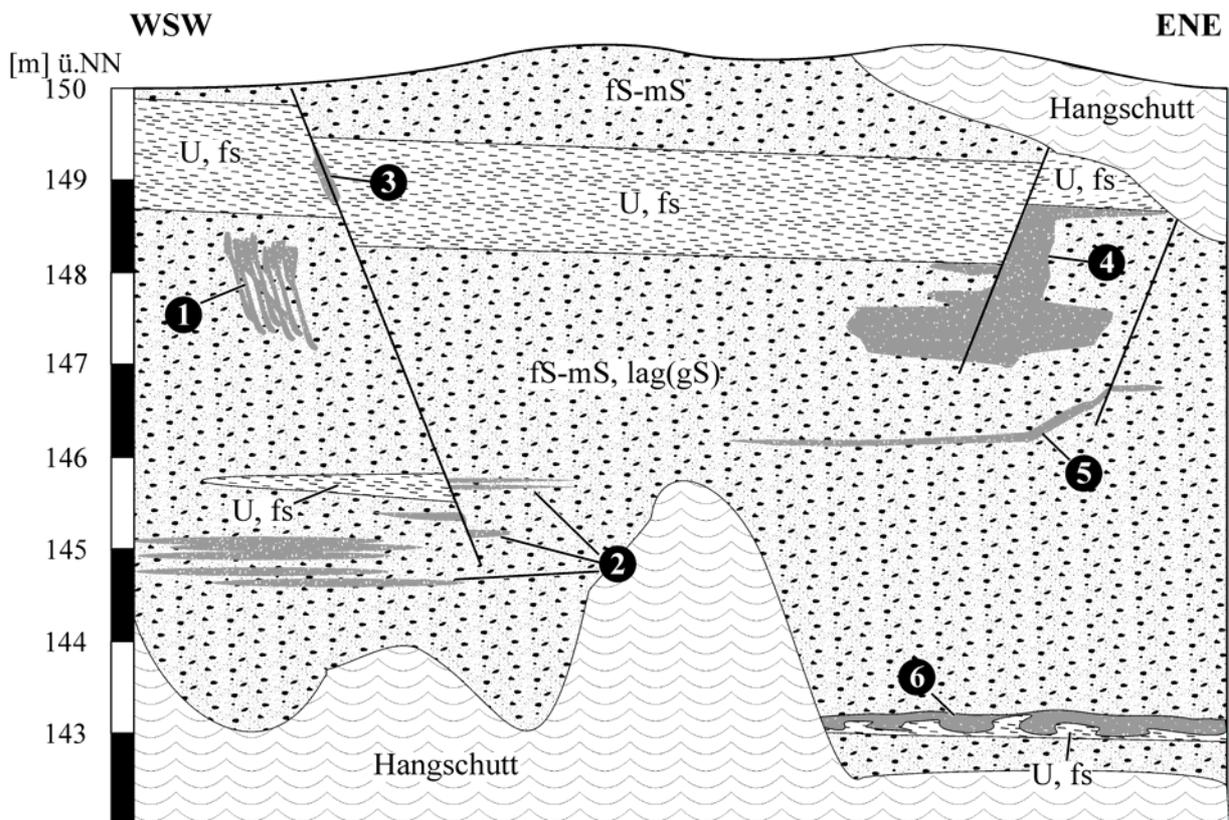


Abb. 36: Zusammengesetzter, schematischer Schnitt des Aufschlussbereiches VIII: Zementationskörper (VIII-1 - VIII-6) gibt es in großer Formenvielfalt in verschiedenen Horizonten innerhalb der Schmelzwasserablagerungen.

Im Bereich VIII-1 gibt es hängende Zapfen (Abb. 36), deren Form im vadosen Milieu angelegt wurde. Der dabei entstandene Kalzit-zement ist noch relikhaft erkennbar. Die vados Zementation fand unter Bedingungen von diskontinuierlichem

Permafrost statt (Kap. 6.3.12). In der Hauptzementationsphase bildete sich Zement im phreatischen Milieu bevorzugt im Bereich der vorgezeichneten Zapfen, wobei der vados entstandene Zement als Kristallisationskeim diente. Die phreatische

Zementation war dabei an den Rändern etwas intensiver als in den Zapfenkernen. Wahrscheinlich wurde der Lösungstransport zum Kern der Zapfen in der Spätphase der phreatischen Zementation durch den bereits weitgehend durch Zement gefüllten Porenraum in den Randbereichen der Zapfen behindert. Dadurch fand die Zementation bevorzugt in den für die Bildungslösung leichter zugänglichen Randbereichen statt.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
 Zementationskörper: hängende Zapfen
 Zement: u.a. Meniskus-, Gravitationszement

Zementationsphase 2 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: hängende Zapfen
 Zement: u.a. porenformerhaltend

Die Zementation der im **Bereich VIII-2** vorkommenden liegenden Zapfen (Abb. 36) begann im vadosen Milieu. Der dabei entstandene Zement fungierte als Zementationskeim für die spätere phreatische, quantitativ dominierende Zementation (Hauptzementationsphase). In dieser Phase strömte das Grundwasser von Südwest nach Nordost, was sich zum einen aus der SW-NE-Orientierung der Zapfenlängsachsen (Abb. 37) und zum andern aus dem Verhalten an Verwerfungen ergibt, da sich die Zapfenteile, die es südwestlich von Verwerfungen gibt, relativ höher befinden und besser entwickelt sind als die Nordöstlichen (Tafel I/5).

Die Zapfen bildeten sich wahrscheinlich unmittelbar unterhalb einer fossilen Grundwasser-Oberfläche, wo die Vermischung von Sicker- und Grundwasser zur Kalzitfällung führte. Entsprechend der Höhenlage der Zapfen befand sich die Grundwasser-Oberfläche während der Hauptzementationsphase bei etwa 145 – 146 m ü.NN. Die Zapfenform weist darüber hinaus darauf hin, dass die Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit hoch war.

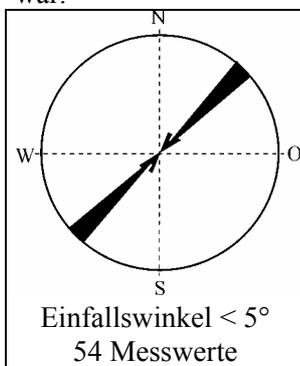


Abb. 37: Aufschlussbereich VIII-2: Richtungsrose der Zapfenlängsachsen.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
 Zementationskörper: liegende Zapfen
 Zement: u.a. Meniskus-, Gravitationszement

Zementationsphase 2 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: liegende Zapfen
 Zement: u.a. drusiger Mosaikzement

In Klüften in einer über 1 m mächtigen Schluffschicht treten im **Bereich VIII-3** diskusförmige Konkretionen auf (Abb. 37). Dabei stellten die Klüfte bevorzugte Wasserwegsamkeiten im ansonsten sehr gering wasserdurchlässigen Substrat dar (k_f -Wert geschätzt: 10^{-7} m/s). Der in drei Phasen entstandene Zement zeigt zwar Merkmale phreatischer Entstehung. Nach dem hydrogeologischen Umfeld ist es jedoch möglich, dass phreatische Bedingungen lediglich im Bereich der Kluft herrschten, über die Sickerwasser, das sich oberhalb der Schluffschicht sammelte, bevorzugt nach unten abfloss und im Bereich der Kluft pseudo-phreatische Bedingungen schuf. Damit ist das Bildungsmilieu des Zementes nicht abschließend zu klären.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: (pseudo ?)-phreatisch
 Zementationskörper: diskusförmige bis kugelige Konkretionen
 Zement: Isopachenzement

Zementationsphase 2 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: (pseudo ?)-phreatisch
 Zementationskörper: diskusförmige bis kugelige Konkretionen
 Zement: keine bevorzugte Wachstumsposition

Zementationsphase 3

Zementationsmilieu: (pseudo ?)-phreatisch
 Zementationskörper: diskusförmige bis kugelige Konkretionen
 Zement: u.a. drusig

Entlang einer steilstehenden Abschiebung unmittelbar unterhalb einer bindigen, gering durchlässigen Schluffschicht gibt es einen Massenzementationskörper (**Bereich VIII-4**, Abb. 36). In der ersten Zementationsphase bildete sich quantitativ unbedeutender, vadoser Zement, der wahrscheinlich als Zementationskeim für die spätere phreatische Hauptzementationsphase diente. Die Bildungslösung gelangte über die Kluft durch den Grundwasser-Geringleiter nach unten. Die lateral von der Abschiebung in das Lockersediment hinein reichenden zementierten Bereiche bildeten sich wahrscheinlich durch die Vermischung von Kluft- und Grundwasser. Damit entstand der große, vertikal in das Lockersediment hinein reichende Teil des Massenzementationskörpers unmittelbar unterhalb einer fossilen Grundwasser-Oberfläche, die sich nach der Höhenlage des zementierten Bereichs bei etwa 147,5 m ü.NN befand. Da der Massenzementationskörper von der Kluft aus allseitig in das Lockersediment hinein reicht, ist davon auszugehen, dass die Grundwasser-Strömung während der Bildung gering war.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
 Zementationskörper: Massenzementationskörper
 Zement: u.a. Meniskus-, Gravitationszement

Zementationsphase 2 / Hauptzementationsphase

Zementationsmilieu: phreatisch
 Zementationskörper: Massenzementationskörper
 Zement: u.a. drusiger Mosaikzement

Im stratiformen Zementationskörper des **Bereiches VIII-5** konnten zwei Zementationsphasen nachgewiesen werden, die beide im vadosen Milieu stattfanden. Dabei bildete sich der Zement wahrscheinlich über teilweise gefrorenen Partien (Kap. 6.3.12).

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
 Zementationskörper: stratiforme Zementationskörper
 Zement: u.a. Meniskuszement

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: vados
 Zementationskörper: stratiforme Zementationskörper
 Zement: u.a. Meniskuszement

Im **Bereich VIII-6** bildete sich ein stratiformer Zementationskörper (Taf. II/4, Abb. 36) zweiphasig in Sand über einem wasserstauenden Schluffhorizont. Wahrscheinlich fanden beide Zementationsphasen im vadosen Milieu statt. Während der zweiten Zementationsphase führte der Aufstau von Sickerwasser über der Schluffschicht zu partiell wassergesättigten Bereichen in der vadosen Zone (pseudo-phreatisch).

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
 Zementationskörper: stratiforme Zementationskörper
 Zement: u.a. Meniskuszement

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: vados, pseudo-phreatisch
 Zementationskörper: stratiforme Zementationskörper
 Zement: u.a. Meniskuszement

Zusammenfassung Aufschlussbereich VIII

1. Zementationsphase

In der ersten Zementationsphase fand Zementation im vadosen und pseudo-phreatischen Milieu unter periglazialen Bedingungen in den Bereichen VIII-1 und VIII-5 statt. Hinweise auf vadose Zementation während dieser Phase gibt es auch in allen anderen Bereichen.

2. Zementationsphase

Im Aufschlussbereich VIII bildete sich während der phreatischen Hauptzementationsphase in den Bereichen VIII-1, VIII-2 und VIII-4 Zement. Im Bereich VIII-2 gibt es Hinweise, dass Grundwasser von SW nach NE abströmte.

Da die Bildung der Zementationskörper in den Bereichen VIII-3 und VIII-6 von substratspezifi-

schen Prozessen gesteuert wurden, lässt sich deren Bildung keiner Zementationsphase zuordnen.

Zusammenfassung Aufschluss Freden

1. Zementationsphase

Die Zementation begann im Aufschluss Freden mit der Bildung von Zement im vadosen Milieu, der in fast allen Aufschlussbereichen auftritt. In den Aufschlussbereichen II und VIII gibt es außerdem Hinweise, dass die Zementationsphase 1 unter kaltzeitlichen Bedingungen stattfand (Kap. 6.3.12).

2. Zementationsphase

Zementationsphase 2 ist in den Aufschlussbereichen II, III und IV nachweisbar. Dabei entstand quantitativ unbedeutender Isopachenzement im phreatischen Milieu. Es gibt in den Aufschlussbereichen II und IV Hinweise, dass diese Zementationsphase in teilweise gefrorenem Untergrund vor bzw. unter dem Drenthe-Inlandeis stattfand. Dementsprechend waren die zementierten Partien der anderen Aufschlussbereiche während der Zementationsphase 2 gefroren. Die Zapfen im Aufschlussbereich IV bildeten sich wahrscheinlich durch Schmelzwasser von Inlandeis, das sich nach LATZKE (1996) im NW befand. Der Grundwasser-Abstrom war zu dieser Zeit nach SE gerichtet (Abb. 38, hellblaue Pfeile).

3. Zementationsphase

Der überwiegende Teil des im Aufschluss Freden vorkommenden Zementes bildete sich während der phreatischen 3. Zementationsphase (Hauptzementationsphase) wahrscheinlich warmzeitlich. Nach der Beschaffenheit der Zementationskörper in den Aufschlussbereichen II-3 und VIII-2 strömte das Grundwasser in dieser Zeit nach NE bis E (Abb. 38, dunkelblaue Pfeile).

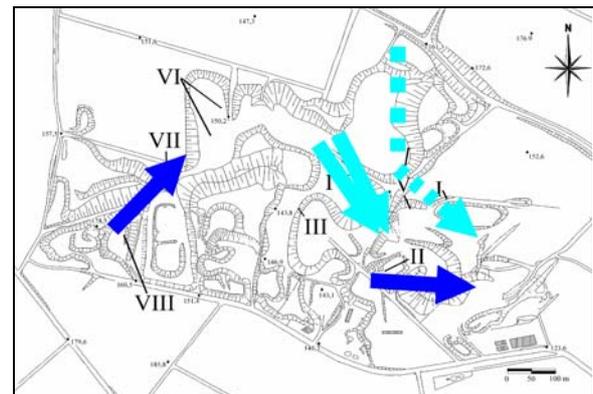


Abb. 38: Zusammenfassende Darstellung von rekonstruierten Grundwasser-Abstromrichtungen. Hellblaue Pfeile = Zementationsphase 2, Dunkelblaue Pfeile = Zementationsphase 3, gepunktete Linie / Pfeil = hydrogeologische Situation überwiegend substratgesteuert.

Auf Grund der hydrogeologischen Situation des Aufschlusses (Anh. IV) deutet dies auf starken Grundwasser-Zustrom aus dem Bereich des Selter

hin, der im Wesentlichen aus Kalkstein des oberen Jura aufgebaut wird. Damit dürfte auch ein Großteil der Lösungsfracht, die den während der Zementationsphase 3 kristallisierten Zement bildete, aus diesem Bereich stammen (Kap. 6.3.2).

Dazu gibt es in einigen Aufschlussbereichen Zementationskörper, deren Bildung im Wesentlichen substratgesteuert war (z.B. Aufschlussbereiche VI, VIII-3). Sie sind nicht in das Zementationsschema einzuordnen. Ebenfalls problematisch sind Grundwasser-Abstromrichtungen, die für Zementationskörper in überwiegend gering wasserdurchlässigen Schichten ermittelt wurden (Abb. 38, gestrichelte Linien). Da hier die Porenwasserbewegung überwiegend substratgesteuert ist, sind die hydrogeologischen Bedingungen dieser Schichten für das Umfeld nicht repräsentativ.

**6.5.12 Aufschluss Engelade:
Zementationsphasen**

Im Aufschluss Engelade gibt es in Schertill und Schmelzwasserablagerungen Massenzementationskörper. Nur im Schertill kommen außerdem kugelige Konkretionen vor. Die Zementation ist in beiden Substraten dreiphasig (Tab. 10), wobei der Zement ausschließlich Merkmale phreatischer Zementation zeigt. Die Unterschiede der Zement-eigenschaften beruhen offensichtlich auf die unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften der Substrate.

Tab. 10: Substratspezifische Übersicht der in den Zementationsphasen 1 – 3 entstanden Zemente.

Zem.-phase	Schertill	Schmelzwasser-sand
1	Mikrit/Mikrospartit	Blockkalzit
2	Isopachenzement	Mikrospartit
3	Blockkalzit	Blockkalzit

**6.5.13 Aufschluss Bornhausen:
Zementationsphasen**

Horizont a.

Die Zementation begann in diskusförmigen Konkretionen und flachen Zapfen mit der Bildung von Meniskus-, Gravitations- und Dachzement in der vadosen Zone. Die Zementkristalle waren Kristallisationskeime, von denen aus das Wachstum der Zementationskörper im phreatischen Milieu ausging (Zementationsphase 2). Bei anscheinend kontinuierlicher Zementation änderte sich das Strömungsmilieu, da sich aus den diskusförmigen Konkretionen flache Zapfen entwickelten. Die Grundwasser-Abstromrichtung war nach der Orientierung der Zapfenlängsachsen SE oder NW.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: vados
Zementationskörper: diskusförmige Konkretionen, flache Zapfen
Zement: u.a. Meniskus-, Dachzement

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: phreatisch
Zementationskörper: diskusförmige Konkretionen, flache Zapfen
Zement: u.a. Mosaikzement

Horizont b.

Die kugeligen Konkretionen entstanden einphasig im phreatischen Milieu. Das horizontbeständige Vorkommen wird auf Selbstorganisationsprozesse zurückgeführt (Kap. 6.3.4). Der Konkretionsform entsprechend war der Lösungstransport überwiegend diffusiv, was auf sehr niedrige Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit während der Konkretionsbildung hinweist. Die Bildung der kugeligen Konkretionen muss in dem gut durchlässigen Lockersediment (k_f -Wert: $1,7 \times 10^{-4}$ m/s) vor dem Einschneiden der unmittelbar südlich gelegenen Schildau stattgefunden haben, denn danach war das Milieu strömungsdominiert.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: phreatisch
Zementationskörper: kugelige Konkretionen
Zement: u.a. Mosaikzement

Horizont c.

Die Genese der Massenzementationskörper, die sich einphasig im phreatischen Milieu bildeten, steht in engem Zusammenhang mit Abschiebungen, mit denen sie vergesellschaftet sind. Das Fehlen von Deformationsmerkmalen in oder um die Massenzementationskörper zeigt, dass sie nach der Bildung der Verwerfungen entstanden. Die Massenzementationskörper bildeten sich entweder in wassergesättigten Verwerfungsbahnen im ansonsten vadosen Milieu durch Änderungen des CO₂-Partialdrucks oder im phreatischen Milieu durch Mischung des Kluftwassers mit Grundwasser, das eine andere Zusammensetzung hatte.

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: phreatisch/pseudo-phreatisch (?)
Zementationskörper: Massenzementationskörper
Zement: u.a. keine bevorzugte Wachstumsposition

Horizont d.

Im Horizont d. entstanden diskusförmige Konkretionen und flache Zapfen einphasig im phreatischen Milieu, wobei sich aus der Form der Zementationskörper sehr schwach bis schwach nach SE oder NW strömendes Grundwasser ableiten lässt. Beim Sieben des Lockersedimentes wurden Massenzementationskörper gefunden, die wenige mm bis max. 2 cm groß sind. Sie entwickelten sich

zweiphasig, wobei der Zement Merkmale phreatischer Entstehung zeigt. Gegen eine gleichzeitige Bildung von Massenzementationskörpern und Konkretionen sprechen deren signifikant unterschiedliche Form und unterschiedliche Zementmerkmale. Anhaltspunkte für eine Bildungsreihenfolge oder relative Alterseinstufung fehlen.

Zementationskörper: diskusförmige Konkretionen, flache Zapfen

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: phreatisch

Zement: u.a. keine bevorzugte Wachstumsposition

Zementationskörper: Massenzementationskörper

Zementationsphase 1

Zementationsmilieu: phreatisch

Zement: u.a. Zementsäume

Zementationsphase 2

Zementationsmilieu: phreatisch

Zement: u.a. drusiger Mosaikzement

Zusammenfassung Aufschluss Bornhausen

1. Zementationsphase

Nur im Horizont a. ist eine erste Zementationsphase nachweisbar, die im vadosen Milieu stattfand (Abb. 39).

2. Zementationsphase

Der überwiegende Teil der Konkretionen in Horizont a. sowie der Zementationskörper in den Horizonten b. und d. entstanden phreatisch (Abb. 39). Auf Grund übereinstimmender Merkmale der Zementationskörper in den Horizonten a. und d. ist gleichzeitige Bildung wahrscheinlich. Die kugeligen Konkretionen im Horizont b. entstanden durch diffusionsdominierten Lösungstransport unmittelbar unterhalb einer Grundwasser-Oberfläche, die sich auf Grund der Position der Konkretionen etwa bei 175 m ü.NN befand. Die Form von diskusförmigen Konkretionen und flachen Zapfen in den Horizonten a. und d. und deren Beziehung zueinander deuten auf erst sehr geringe, dann höhere Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit während der Bildung hin. Aus der Bildungsreihenfolge kugelige Konkretionen - diskusförmige Konkretionen - flache Zapfen lässt sich die sukzessive Erhöhung der Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit ableiten. Diese stand wahrscheinlich im Zusammenhang mit dem Einschneiden des Vorfluters, durch das sich der hydraulische Gradient vergrößerte und damit der Grundwasser-Abstrom erhöhte. Das Grundwasser bewegte sich auf die SE fließende Schildau zu (Anh. IV), worauf auch die NW-SE orientierten Zapfenlängsachsen in den Horizonten a. und d. hinweisen.

Da das Bildungsmilieu der Massenzementationskörper im Horizont c. nicht eindeutig belegbar

ist, gibt es keine Hinweise auf Einordnung in o.g. Bildungsabfolge.

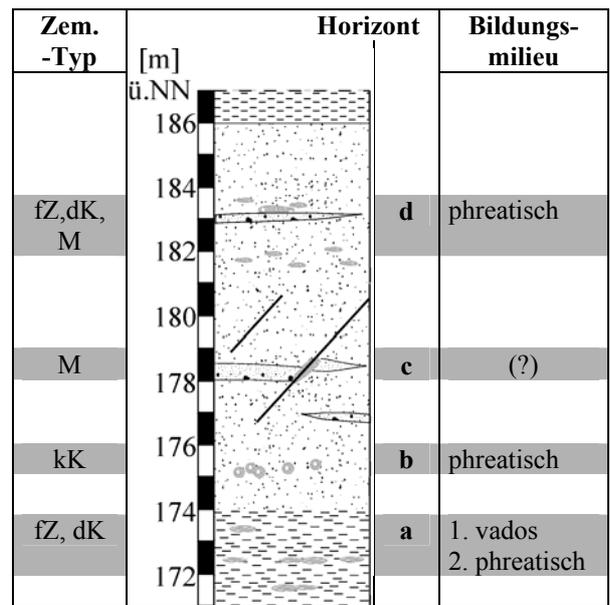


Abb. 39: Übersicht der im Aufschluss Bornhausen vorkommenden Zementationskörper und deren Bildungsmilieus. Legende s. Anh. 2.

6.5.14 Aufschluss Ödishausen: Zementationsphasen

Im Aufschluss Ödishausen gibt es hängende Zapfen und Massenzementationskörper. Die Zementationskörper im ungeschichteten Kies entwickelten sich wahrscheinlich im vadosen Milieu nach dem Talrand-Modell (Kap. 6.3.7). Für die Massenzementationskörper in der tieferliegenden Sand-Kies-Wechselfolge wird die Bildung nach dem Kapillarsperrenprinzip diskutiert (Kap. 6.3.8). Der neugebildete Kalzit stammt wahrscheinlich aus Sickerwasser, das bei langwieriger Passage einer ehemals überlagernden, geringdurchlässigen Grundmoräne größere Mengen des überwiegend feinkörnigen, detritischen CaCO₃ löste.

7 BILDUNGSZEITEN

7.1 Bildungszeiten der untersuchten Aufschlüsse

Die meisten untersuchten Zementationskörper bildeten sich mehrphasig, wobei zunächst relative Bildungsabfolgen ermittelt wurden (Tab. 6). Hinweise auf eine absolute Datierung der Zementationsphasen gab es häufig nur unter Einbeziehung der geologisch / hydrogeologischen Situation des Umfeldes (Anh. IV). Für die Aufschlüsse Hittfeld, Banteln, Engelage und Ödishausen gab es keine Ansatzpunkte für die Diskussion von Bildungszeiten.

Aufschluss Daerstorf

Die jüngste Zementationsphase 3 bildete sich unter periglazialen Bedingungen, die es hier nach der geologischen Entwicklung während des Warthe-Stadiums der Saale-Kaltzeit und der Weichsel-Kaltzeit gab. Für die Bildung großer Zementationskörper in Drenthe-zeitlichen Schichten noch während des Warthe-Stadiums war der Zeitraum wahrscheinlich zu kurz. Wesentlich plausibler ist, dass die Zementationsphase 3 während der Weichsel-Kaltzeit stattfand. Für die Zementationsphasen 1 und 2 stehen damit das Warthe-Stadium und die Eem-Warmzeit zur Verfügung. Da sich während der Zementationsphase 2 der meiste Zement bildete (Hauptzementationsphase), fand sie wahrscheinlich Eem-zeitlich statt.

Aufschluss Breetze

Die Diskussion der Bildungszeit der Zementationskörper im Aufschluss Breetze basiert auf folgenden Eckpunkte: Zum einen muss die vadosen Zementationsphase 2 nach der glazitektonischen, Drenthe-2-zeitlichen Deformation stattgefunden haben, da die durch den vadosen Zement vorgezeichneten Zapfen nicht deformiert sind. Zum anderen bildeten sich im Aufschluss Breetze kugelige Konkretionen während der Zementationsphase 4 unter periglazialen Bedingungen wahrscheinlich Weichsel-zeitlich (Kap. 6.3.12).

Durch die Datierung der Zementationsphase 4 ergibt sich, dass die wahrscheinlich warmzeitlich gebildete phreatische Hauptzementationsphase (Zementationsphase 3, Kap. 6.3.11) während der Eem-Warmzeit entstanden sein muss. Größere Grundwasser-Neubildung während Warmzeiten führt im Vergleich zu Kaltzeiten zu höherer Grundwasser-Oberfläche (Kap. 6.3.11, 6.3.12). Da für die Zementationsphase 3 Eem-zeitliche Entstehung anzunehmen ist, fand o.g. Zementationsphase 2 wahrscheinlich noch Saale-kaltzeitlich statt (Warthe-Stadium). Damit ergibt sich für die Zementationsphase 1 der Zeitraum zwischen Ablagerung der Vorschüttimente des jüngeren Drenthe-Vorstößes und dem Warthe-Stadium. Die phreatischen Bedingungen, die während der Bildung der Zementationsphase 1 herrschten, können nach der geologischen Entwicklung durch Schmelzwasser des jüngeren Drenthe- oder des Warthe-Vorstößes verursacht worden sein.

Aufschluss Holzen

Während der jüngsten Zementationsphase 3 waren die Schmelzwasserablagerungen grundwassererfüllt, d.h. die Grundwasser-Oberfläche lag mindestens bei etwa 50 m ü.NN. Der nur etwa 150 m südlich gelegene Sankt Vitus Bach schnitt sich spät-Eem- spätestens aber Weichsel-zeitlich bis auf

etwa 38 m ü.NN ein und senkte dadurch das Vorflutniveau entsprechend ab (Anh. IV). Bei den Schmelzwasserablagerungen handelt es sich um eine relativ homogene, gut durchlässige Schichtfolge, bei der sich unter natürlichen Bedingungen in diesem Umfeld kein sehr steiler hydraulischer Gradient etablieren kann. Es ist also davon auszugehen, dass parallel zur Absenkung des Vorflutniveaus auch die ehemals höher liegende Grundwasser-Oberfläche abgesenkt wurde und die Zementationskörper in vadoses Milieu gelangten (Abb. 14/4). Die Zementation war damit spät-Eem- bis spätestens Weichsel-zeitlich abgeschlossen. Für die drei nachgewiesenen Zementationsphasen stand der Zeitraum nach Ablagerung der Drenthe-2-Moräne, die als Karbonatquelle fungierte, bis einschließlich Eem-Warmzeit zur Verfügung. Die phreatische Hauptzementationsphase (Zementationsphase 3) fand auf Grund o.g. Annahmen wahrscheinlich während der Eem-Warmzeit statt. Da nach Modellierungen von WEERT et al. (1997) in Warmzeiten mit höherer Grundwasser-Neubildung zur rechnen ist, als in Kaltzeiten, fanden die vadosen Zementationsphasen 1 und 2 vor dem früh-Eem-zeitlichen Anstieg der Grundwasser-Oberfläche statt.

Aufschluss Volkstorf

Die Zementationskörper befinden sich in Sedimenten des Warthe-Stadiums der Saale-Kaltzeit. Dabei fand die Zementationsphase 1 noch Warthe-zeitlich vor Überlagerung durch das Warthe-Inlandeis statt (Kap. 6.4.5). Für eine zeitliche Einstufung der Zementationsphasen 2 bis 4 gibt es keine Hinweise.

Aufschluss Krankenhagen

Die Zementationskörper im Aufschluss Krankenhagen entstanden dreiphasig. Auf Grund der hydrogeologischen und geologischen Situation sowie zementpetrographischer Befunde fand die Zementationsphase 1 noch Drenthe-zeitlich im Bereich unmittelbar vor dem Inlandeis, die vadosen Zementationsphase 2 zwischen dem Abschmelzen des Eises und dem früh-Eem-zeitlichem Anstieg der Grundwasser-Oberfläche statt (Kap. 6.3.12). Für die phreatische Hauptzementationsphase ist Eem-zeitliche Entstehung anzunehmen. Sie wurde durch das früh-Weichsel-zeitliche Einschneiden des Vorfluters und die damit einhergehenden vadosen Bedingungen beendet.

Aufschluss Rumbeck

Der im Aufschluss anstehende höhere Teil der Mittelterrassenablagerungen wurde wahrscheinlich früh-Saale-zeitlich abgelagert und befand sich seit der früh-Weichsel-zeitlichen Einschneidungsphase der Weser nicht mehr im phreatischen Milieu (Anh. IV). Damit muss die phreatische Hauptzementationsphase (Zementationsphase 2) Eem-zeitlich stattgefunden haben. Für die vorhergegangene

Zementationsphase 1, die unter vadosen Bedingungen ablief, ist auf Grund der paläohydrogeologischen Entwicklung kaltzeitliche Entstehung anzunehmen (Kap. 6.3.11, 6.3.12). Als Bildungszeitraum für die Zementationsphase 1 steht somit der Zeitraum zwischen der früh-Saalezeitlichen Ablagerung der zementierten Schichten und dem früh-Eemzeitlichen Anstieg der Grundwasser-Oberfläche zur Verfügung.

Aufschluss Helpensen

Während der Zementationsphase 1 bildeten sich stratiforme Zementationskörper im tieferen, wahrscheinlich spät-Elsterzeitlich abgelagerten Teil von Weser-Mittelterrassenablagerungen. Auffällig ist die sehr hohe Zementationsintensität, durch die sich die stratiformen Zementationskörper von allen anderen im Aufschluss Helpensen vorkommenden Zementationskörpern unterscheiden. Möglicherweise ist dies ein Hinweis auf warmzeitliche Bildung. Da die Massenzementationskörper, die sich später als die stratiformen Zementationskörper bildeten (Kap. 6.4.8), Saalezeitlich entstanden (s.u.), könnte die Zementation während der Holstein-Warmzeit stattgefunden haben. Die Zementationsphase 2, die zur Bildung o.g. Massenzementationskörper führte, lief vor Überfahung durch das Drenthezeitliche Inlandeis ab (Kap. 6.3.12). Dabei wurden Mittelterrassenablagerungen im vadosen bzw. pseudo-phreatischen Milieu zementiert. Über den Mittelterrassenablagerungen folgen glazilimnische Sedimente (sensu KULLE 1985), während deren Bildung der Untergrund entweder gefroren oder wassererfüllt war. Dementsprechend muss die vadose Zementation synsedimentär während der Mittelterrassenzeit und noch vor Bildung der Drenthe-hochglazialen Staubeckenablagerungen stattgefunden haben.

Während der Zementationsphase 3 befand sich die Grundwasser-Oberfläche auf dem höchsten Stand bei mindestens 74 m ü.NN, was durch die Position und die Zementbeschaffenheit der Zementationskörper belegt ist. Die post-Drenthezeitliche Einschnidung der Weser erreichte bis zur Weichselzeitlichen Ablagerung von Niederterrassensedimenten Niveaus von deutlich unter 70 m ü.NN. Dadurch befanden sich die zementierten Mittelterrassenablagerungen, die ein homogenes, gut wasserdurchlässiges Grundwasser-Stockwerk bilden, spätestens ab der frühen Weichsel-Kaltzeit nicht mehr im phreatischen Milieu. Die phreatische Zementationsphase 3 fand dementsprechend wahrscheinlich Eemzeitlich statt.

Für die vadose Zementation in den Phasen 4 und 5, bei der die Grundwasser-Oberfläche auf Grund der Höhenlage entsprechend zementierter Bereiche unterhalb von 71 m ü.NN lag, gibt es keine

ergänzenden Hinweise auf das Bildungsalter. Dementsprechend fanden die Zementationsphasen 4 und 5 Weichselzeitlich oder später statt.

Aufschluss Bad Münder

Die während des Drenthe-Stadiums entstandenen Schmelzwasserablagerungen wurden nach der Zementationsphase 1 wahrscheinlich durch Eisauflast kompaktiert (Kap. 6.3.10). Da das Warthe-Inlandeis den Bereich nicht mehr erreichte, muss die erste Zementationsphase noch vor Überlagerung durch das Drenthe-Inlandeis stattgefunden haben. Für eine zeitliche Einstufung der beiden jüngeren, vadosen Zementationsphasen gibt es keine Hinweise.

Aufschlüsse Coppenbrügge und Betheln

Aus der geologischen und hydrogeologischen Entwicklung des Umfeldes der beiden Aufschlüsse ergibt sich, dass durch Weichselzeitliche Absenkung des Vorflutniveaus (Anh. IV) die Grundwasser-Oberfläche seitdem deutlich niedriger lag. Im Aufschluss Coppenbrügge fand die phreatische Hauptzementationsphase (Zementationsphase 2) wahrscheinlich Eemzeitlich bei einer Grundwasser-Oberfläche statt, die sich auf Grund der Höhenlage entsprechend zementierter Bereiche bei ca. 164 m ü.NN befand. Die geologische und hydrogeologische Entwicklung im Aufschluss Betheln weist ebenfalls auf Eemzeitliches Alter der Hauptzementationsphase hin. In beiden Aufschlüssen gibt es keine weiteren Datierungshinweise. Damit muss der vadose Zement der Zementationsphase 1 zwischen der Ablagerung der Drenthezeitlichen Schmelzwassersedimente und der wahrscheinlich Eemzeitlichen Hauptzementationsphase bzw. die Zementationsphase 3 Weichselzeitlich oder später entstanden sein.

Aufschluss Eime

Für die phreatische Hauptzementationsphase (Zementationsphase 3) ist warmzeitliche Entstehung anzunehmen (Kap. 6.3.11). Da sich die Zementationskörper auf Grund der hydrogeologischen Entwicklung des Umfeldes seit der Weichsel-Kaltzeit im vadosen Milieu befanden, kommt für die Hauptzementationsphase nur die Eem-Warmzeit in Frage. Die beiden tieferen Massenzementations-Horizonte wurden wahrscheinlich unter periglazialen Bedingungen angelegt (Kap. 6.3.12). Damit fand zumindest die erste, vadose Zementationsphase Saale-kaltzeitlich statt. Unklar ist dagegen, ob sich die phreatische Zementationsphase 2 noch in diesem Milieu oder Eemzeitlich bildete. Da sich die Mittelterrassenablagerungen seit der Weichselzeitlichen Einschnidung der Leine im vadosen Milieu befinden, entstand der obere Teil von Massen-

zementations-Horizont c. pseudo-phreatisch Weichsel-zeitlich oder jünger.

vorrückenden Drenthe-Inlandeises. Die phreatischen Hauptzementationsphase (3. Zementationsphase) fand warmzeitlich statt (Kap. 6.3.11). Da sich die Schmelzwasserablagerungen auf Grund der geologischen und hydrogeologischen Entwicklung seit der frühen Weichsel-Kaltzeit im vadosen Milieu befanden, kommt nur die Eem-Warmzeit als Bildungszeitraum in Frage.

Aufschluss Freden

Für die 1. Zementationsphase ist syndesimentäre Bildung vor Überföhrung durch das Drenthe-zeitliche Inlandeis anzunehmen (Kap. 6.3.12). Der während der Zementationsphase 2 entstandene Zement bildete sich auf Grund der Untersuchungsbefunde im Aufschlussbereich II möglicherweise im teilweise gefrorenen Untergrund unterhalb des

Bildungszeit / Aufschluß	Pleistozän					Holozän
	Holstein-Warmzeit	Saale-Kaltzeit		Eem-Warmzeit	Weichsel-Kaltzeit	
		Drenthe-Stadium	Warthe-Stadium			
Daerstorf			v		p	p
Breetze		p	v		p	p
Holzen			v/v		p	
Volkstorf			v			v/p/p
Krankenhagen		p	v		p	
Rumbeck			v		p	
Helpensen	p	v			p	v/v
Bad Münder		p			v/v	
Coppenbrügge			v		p	v
Eime			v	p	p	v
Betheln			v		p	v
Freden		v	p		p	
Bornhausen		?	v		p	

v = vados
 p = phreatisch
 Hauptzementationsphase
 sonst. Zementationsphasen wahrscheinlich/vermutet

Abb. 40: Übersicht von 13 der 17 untersuchten Aufschlüsse, bei deren Untersuchung Hinweise auf Bildungszeiten gefunden wurden.

Aufschluss Bornhausen

Während der phreatischen Hauptzementationsphase bildeten sich Zementationskörper bei sukzessiv steigender Grundwasser-Strömungsgeschwindigkeit. Die früh-Weichsel-zeitliche Einschneidung des südlich gelegenen Vorfluters führte zu vadosen Bedingungen, die wahrscheinlich bis heute andauern. Damit kann für die Hauptzementationsphase (Zementationsphase 2) Eem- bis früh-Weichsel-zeitliche Entstehung angenommen werden. Die Zementationsphase 1 bildete sich dementsprechend zwischen der Ablagerung der Schmelzwassersedimente, deren Alter nicht geklärt ist (Anh. IV) und der Eem-Warmzeit.

7.2 Karbonatzementation während des Quartärs

Prä-Holstein-zeitliche Zementationsphasen wurden in keinem der untersuchten Aufschlüsse nachgewiesen.

7.2.1 Holstein-Warmzeit

Hinweise auf Holstein-zeitliche Zementation wurden nur im Aufschluss Helpensen gefunden. Es handelt sich dabei um stratiforme Zementation von wahrscheinlich Elster-zeitlichen Flussablagerungen der Weser (Weser-Mittelterrassensedimente). Die Alterseinstufung beruht vor allem auf zementpetrographischen Befunden und der Beziehung zu jüngeren in diesem Aufschluss vorkommenden Zementationskörpern.

7.2.2 Saale-Kaltzeit

Gute Hinweise für Karbonatzementation während der Saale-Kaltzeit gibt es in den Aufschlüssen Breetze, Volkstorf, Krankenhagen, Helpensen, Bad Münder/Hachmühlen und Freden. Kriterien für die zeitliche Einstufung ergaben sich entweder aus dem Vergleich der Bildungsbedingungen mit der hydrogeologischen Entwicklung des Umfeldes

(Aufschluss Breetze) oder durch glazitektonische Deformation durch Drenthe- (Aufschlüsse Bad Münder/Hachmühlen, Helpensen, Freden) oder Warthe-zeitliches (Aufschluss Volkstorf) Inlandeis. Die Datierung prä-Weichsel-zeitlicher Zementationsphasen in den übrigen Aufschlüssen basiert auf der Einstufung der phreatischen Hauptzementationsphasen (s.u.).

7.2.3 Eem-Warmzeit

Eine phreatische Hauptzementationsphase kommt in 11 der 17 untersuchten Aufschlüsse vor (Abb. 40). Die Bildung unter warmzeitlichen Bedingungen ergibt sich durch den in Kap. 6.3.11 diskutierten, prozessorientierten Ansatz. Die Annahme, dass die Hauptzementationsphase Eem-zeitlich stattfand, ergibt sich aus dem überwiegend Saale-zeitlichen Alter der zementierten Sedimente und der paläohydrogeologischen Situation der meisten Aufschlüsse, auf Grund der sie sich seit der Weichsel-Kaltzeit in vadosem Milieu befinden.

7.2.4 Weichsel-Kaltzeit

Hinweise auf Weichsel-zeitliche Zementation gab in den Aufschlüssen Breetze und Daerstorf. Im Aufschluss Bornhausen fand wahrscheinlich ein Teil der Hauptzementationsphase früh-Weichsel-zeitlich statt.

7.2.5 Holozän

Bei keinem der 17 untersuchten Aufschlüsse konnte holozänes Alter von Zementationsphasen sicher belegt werden. In den Aufschlüssen Volkstorf, Helpensen, Bad/Münder, Coppenbrügge, Eime und Betheln kann Karbonatzementation während des Holozän nicht ausgeschlossen werden, da Datierungskriterien für post-Eem-zeitliche Zementation fehlen. Karbonatbildung im Rahmen von holozänen Bodenbildungsprozessen gibt es in den Aufschlüssen Breetze, Volkstorf und Freden.

8 KARBONATZEMENTATION PLEISTOZÄNER LOCKERSEDIMENTE NW- DEUTSCHLANDS - ZUSAMMENFASSENDER DISKUSSION

Aus den zur Verfügung stehenden Angaben zu den 80 lokalisierten Zementationsvorkommen (z.B. Alter der zementierten Sedimente, Höhe des Vorkommens) lassen sich keine Diagenese-szenarien ableiten. Ebenso lässt sich nicht bewerten, ob die punktuelle Häufung karbonatischer Zementationen (z.B. Hamburger Umland, Niedersächsisches Bergland) nur auf die im Vergleich zu anderen Bereichen (z.B. Stader Geest, Verdener-Geest, Hannoversches Emsland) höhere Informationsdichte zurückzuführen ist oder

ob es tatsächlich signifikante Unterschiede in Häufigkeit und Verbreitung gibt. Dementsprechend ergaben Versuche, die Verbreitung karbonatischer Zementation mit Prozessen zu korrelieren, die Einfluss auf Karbonatverlagerung ausüben – denkbar wäre bevorzugte Bildung im Zusammenhang mit Eisrandlagen oder erhöhte Karbonatmobilisierung durch CO₂-Aufstieg über tiefreichenden tektonischen Brüchen – keine Ergebnisse. Insgesamt weist die Verbreitung in NW-Deutschland und in benachbarten Bereichen, die kaltzeitlich vereist waren, eher darauf hin, dass karbonatische Zementation weitverbreitet ist.

Karbonatische Zementationskörper wurden in 17 über NW-Deutschland verteilten Aufschlüssen untersucht. Zementpetrographische Untersuchungen zeigten, dass der Zement ausschließlich aus Niedrig-Mg-Kalzit besteht. Darüber hinaus ergaben sich für die meisten Zementationskörper Hinweise auf mehrphasige Bildung und die dabei herrschenden Wassersättigungsbedingungen (vados/phreatisch). Es wurden verschiedene Beispiele syntaxialer Anwachssäume beschrieben, die Meniskuszement bilden und damit einen Hinweis auf Entstehung im vadosen Milieu geben. Als weitere Bildung der vadosen Zone wurde Dachzement als Zementtyp eingeführt und beschrieben. Dabei handelt es sich um einen Zementtyp, der im grobkörnigen, schlecht sortierten Sediment (Ungleichförmigkeitsgrad U z.T. bis > 50) zusammen mit Meniskus- und Gravitationszement auftritt. Durch Dachzement sind bevorzugt Partien oberhalb plattiger Gerölle zementiert bzw. Partien unterhalb plattiger Gerölle nicht zementiert. Er entsteht in der vadosen Zone durch Sickerwasser, das auf größeren Geröllen aufgestaut bzw. seitlich an ihnen abgelenkt wurde. Außerdem wird hier erstmalig die Bildung von poikilotopischem Zement unter kaltzeitlichen Bedingungen diskutiert.

Es wurde gezeigt, dass es Aufwuchssubstrate gibt (z.B. „Toneisensteingeoden“), deren Reaktion mit Grundwasser ein hydrochemisches Milieu schaffen kann, das die Zementbildung begünstigt. Die Zementation um diese Aufwuchssubstrate stellte bei den untersuchten Zementationen die Ausnahme dar. Dagegen gibt es in Sediment, das im Wesentlichen durch phreatisch entstandenen Zement zementiert wurde, als erste Zementgeneration sehr häufig quantitativ unbedeutenden vadosen Zement. Dieser Zusammenhang macht wahrscheinlich, dass vadoser Zement Kristallisationskeime für folgende Zementationsphasen bildete und damit ursächlich für die Entstehung der untersuchten Zementationskörper war.

Die in der Literatur vertretene Ansicht (z.B. MCBRIDE et al. 1994, MCBRIDE & PAREA 2001),

dass die Form von Zementationskörpern Rückschlüsse auf die Bewegung der Bildungslösung geben kann, wurde durch zahlreiche Beispiele bestätigt und ergänzt. Dazu gab es Hinweise, dass sich nicht nur die Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit von Sicker- bzw. Grundwasser auf die Form von Zementationskörpern auswirkt, sondern auch die Strömungsart (laminar, turbulent). Außerdem wurde das Bildungsmilieu vor allem hängender Zapfen an verschiedenen Beispielen diskutiert. Es wurde gezeigt, dass das „Talrand-Modell“ (z.B. PERSCHKE 1993) die meist komplexen Prozesse, die zur Bildung hängender Zapfen führten, nicht erfasst.

In die Bestimmung lokaler, aufschlusspezifischer Zementationsphasen gingen zementpetrographische Befunde, die daraus abgeleiteten Zementgenerationen, die Beschaffenheit der Zementationskörper und des Lockersedimentes sowie die geologische und paläohydrogeologische Situation ein. Dabei zeigte sich, dass die Synopsis aller Untersuchungsergebnisse zu Diagenesemilieu führte, die alleine über zementpetrographische Untersuchungen nicht erkannt wurden. Dies betrifft vor allem die Zementation in wassergesättigten Bereichen innerhalb der vadosen Zone, in denen Zement mit Merkmalen phreatischer Entstehung vorkommt und die als pseudo-phreatische Zementation beschrieben wurde. Dazu gab es in verschiedenen Aufschlüssen Hinweise auf Bildungsbedingungen, die typisch für „Kapillarsperren-Systeme“ sind. Dabei bewirkten unterschiedliche wasserungesättigte Leitfähigkeiten übereinander liegender Schichten, dass Sickerwasser im feinkörnigen Material (Entwässerungsschicht) oberhalb von grobkörnigem (Kapillarsperre) aufgestaut wird und es in diesem Milieu zu pseudo-phreatischer Zementation kam. Pseudo-phreatische Bedingungen wurden darüber hinaus in fleckenhafte wassergesättigten Bereichen und im Zusammenhang mit schwebenden Grundwasser-Stockwerken nachgewiesen. Dazu wurde gezeigt, dass die Zementation gering wasserdurchlässiger Schichten von substratspezifischen Prozessen gesteuert wurde, so dass über die Zementbeschaffenheit keine Hinweise auf die paläohydrogeologische Situation des Aufschlusses zu erwarten sind.

In einigen Aufschlüssen wurde Wiederanlösung von Zementationskörpern nachgewiesen. Makroskopisch erkennbare Merkmale sind raue und bröckelige Oberflächen von Konkretionen, deren Entstehung durch Anlösung mit REM-Untersuchungen bestätigt wurde. REM-Untersuchungen zeigten, dass sie auch bei Massenzementationskörpern vorkommen, obwohl deren Oberflächenbeschaffenheit keinen Hinweis

auf Anlösung gibt. Auf Grund des häufigen Vorkommens der Anlösung von Konkretionen vor allem im gut wasserdurchlässigen Sediment, ist anzunehmen, dass sie auch bei Massenzementationskörpern verbreitet ist.

In zahlreichen Aufschlüssen fanden sich Hinweise auf Kalzitcementation unter kaltzeitlichen Bedingungen. Dabei fand Zementation wahrscheinlich sowohl unterhalb als auch im unmittelbaren Vorfeld des Inlandeises sowie unter periglazialen Bedingungen im diskontinuierlichen Permafrost statt. Klimatische Einflüsse sind die einzigen überregionalen Steuerungsfaktoren der karbonatischen Zementation pleistozäner Lockersedimente NW-Deutschlands.

Die Synopsis der aufschlusspezifisch ermittelten paläohydrogeologischen Szenarien lässt kein paläohydrogeologisches Gesamtkonzept für die Bildung karbonatischer Zementation in NW-Deutschland erkennen. Auch im Zusammenhang mit den Bildungszeiten ergibt sich kein auf die untersuchten Aufschlüsse anwendbares Gesamtkonzept. Dabei beruhen die ermittelten Bildungszeiten im Wesentlichen auf prozessorientierten Folgerungen und Vergleichen mit der geologischen und paläohydrogeologischen Entwicklung der Aufschlüsse.

9 DANKSAGUNG

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. D. Henningsen (Inst. f. Geol. u. Paläont. Univ. Hannover), danke ich für seine Unterstützung und sein stetiges Interesse am Fortgang dieser Arbeit.

Von Herrn Dr. J.-P. Groetzner ging die Anregung zu dieser Arbeit aus. Er unterstützte den Fortgang der Arbeit in vielfältiger Weise, stand immer für Diskussionen zur Verfügung und half auch in schwierigen Phasen mit Rat und Tat. Darüber hinaus danke ich ihm für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Dazu haben viele weitere Personen und Institutionen die Arbeit in vielfältiger Weise unterstützt und gefördert, wofür ich allen ganz herzlich danke:

Herr Prof. Dr. Michalzik (Ruhruniversität Bochum, Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik) half mit zahlreichen Anregungen und Diskussionen und der Einführung in die Fluoreszenzmikroskopie.

Herr Dr. C. Reinhold (Fa. Preussag Energie, Lingen) half mit zahlreichen guten Tipps und Hilfestellungen und gab vor allem zum Themenkomplex „Karbonatpetrographie“ zahlreiche Anregungen und Diskussionsbeiträge. Er ermöglichte gemeinsam mit Herrn Galbert (ZELMI, TU Berlin) Mikrosondenmessungen an der TU Berlin. Darüber

hinaus führte er einige Kathodolumineszenz-Untersuchungen durch.

Herrn Dr. J. Koepke und Prof. Dr. Johannes (Inst. f. Mineralogie Univ. Hannover) ermöglichten die Fortsetzung der Mikrosondenanalysen in Hannover.

Hr. Klosa (BGR/NLFB, Hannover) unterstützte mich bei der Durchführung von REM-Untersuchungen und der Bestimmung des Gesamtkarbonatgehaltes. Hr. Evermann (NLFB, Außenstelle Bremen) führte die Durchlässigkeitsuntersuchungen an geringdurchlässigen Proben durch. Hr. Dr. Oberthür und Hr. Gast (BGR Hannover) ermöglichten die Kathodolumineszenz-Untersuchungen.

Die Mitarbeiter des Instituts für Angewandte Hydrogeologie und hier vor allem Hr. Arnecke, Hr. Kötter und Hr. Wellmann (jetzt BfS, Salzgitter) unterstützten den Fortgang der Arbeit. Hr. Schulz gab Hinweise zum „Kapillarsperrensystem“, Hr. Brenner half mir bei der Übersetzung französischer Texte.

Hinweise auf karbonatzementierte pleistozäne Ablagerungen in NW-Deutschland (und darüber hinaus) gaben (in alphabetischer Reihenfolge):

- Hr. Dipl.-Geol. W. Bartholomäus (Inst. Geol. Paläont. Univ. Hannover),
- Hr. Prof. Dr. Ehlers (GLA Hamburg),
- RNDr. Z. Gába (Sumperk, Tschechische Republik),
- Hr. Dir. u. Prof. Dr. H. Jordan (ehem. NLFB Hannover),
- Hr. Laging (Scharnebeck),
- Hr. Dir. u. Prof. Dr. K.D. Meyer (ehem. NLFB Hannover)
- Dr. W. Schulz (Schwerin-Lankow)
- Dr. H.-J. Stephan (LANU Schleswig-Holstein, Abt. Geologie / Boden).

Herr Laging überließ mir Proben aus dem Aufschluss Volkstorf, Herr Deters (ehem. Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Hannover) Proben aus dem Aufschluss Copenbrügge.

Die Gesellschaft für Geschiebekunde veröffentlichte in ihrer Zeitschrift „Geschiebekunde aktuell“ eine Suchanzeige nach Vorkommen karbonatischer Zementation.

Herr Dr. C. Hinz (Inst. für Bodenkunde und Waldernährung, Georg-August-Universität Göttingen) half mir mit einem Diskussionsbeitrag und Informationen zur Sickerwasserbewegung in der vadosen Zone.

Die Christian-Kuhleemann-Stiftung hat dem Institut für Geologie und Paläontologie der Universität

Hannover einen PC finanziert, den ich für meine Arbeit nutzen konnte. Hr. Dr. Groetzner und Artur Skowronek (Fa. Geoconsult Skowronek & Wrobel GbR) ermöglichten die Anfertigung von Dünnschliffen in Polen.

Meine Frau Bianca Elbracht trug mit ihrer Unterstützung ganz wesentlich zur Fertigstellung dieser Arbeit bei.

10 LITERATURVERZEICHNIS / VERWENDETE TOPOGRAPHISCHE KARTEN

10.1 Literaturverzeichnis

- ABDEL-WAHAB, A. & MCBRIDE, E.F. (2001): Origin of giant calcite-cemented concretions, Temple Member, Qasr el Sagha Formation (Eocene), Faiyum Depression, Egypt. - *J. Sed. Res.*, **A71** (1): 70-81, 14 Abb., 4 Tab.; Tulsa.
- ABER, J.S. (1978): Glacial Conglomerates of the Appalachian Plateau, New York. - *Quaternary Res.*, **11** (2): 185-196, 9 Abb.; New York, London.
- ADAMS, A.E. & MACKENZIE, W.S. & GUILFORD, C. (1986): Atlas der Sedimentgesteine in Dünnschliffen. - 103 S., 217 Abb.; Stuttgart (Enke).
- ALEXANDERSSON, T. (1972): Mediterranean Beachrock Cementation: Marine Precipitation of Mg-Calcite. - In: STANLEY, D.J. & KELLING, G. & WEILER, Y. [Hrsg.]: *The Mediterranean Sea: A Natural Sedimentation Laboratory*: 203-223, 15 Abb., 1 Tab.; Stroudsburg.
- AMIEL, A.J. (1975): Progressive pedogenesis of eolianite sandstone. - *J. Sed. Pet.*, **45** (2): 513-519, 8 Abb.; Tulsa.
- BADIOZAMANI, K. & MACKENZIE, F.T. & THORSTENSON, D.C. (1977): Experimental carbonate cementation: salinity, temperature and vados-phreatic effects. - *J. Sed. Pet.*, **47** (2): 529-542, 20 Abb.; Tulsa (U.S.A.).
- BAERMANN, A. & IWANOFF, A. & WILKE, H. (1983): The calcium carbonate content of North German tills. - In: EHLERS, J. [Hrsg.]: *Glacial deposits in North-West Europe*: 259-262, 6 Abb.; Rotterdam (Balkema).
- BALDSCHUHN, R. & KOCKEL, F. (1987): Geologische Karte von Hannover und Umgebung 1:100 000 Quartär und Tertiär abgedeckt. - 1 Kt.; Hannover.
- BARNABY, R.J. & RIMSTIDT, J.D. (1989): Redox conditions of calcite cementation interpreted from Mn und Fe contents of authigenic

- calcites. - *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **101**: 795-804, 11 Abb., 2 Tab.; Boulder.
- BARTHOLOMÄUS, W.A. & REINHOLD, C. & SOLCHER, J. (1997): Ein devonisches Sandsteingeschiebe des Old Red 1. Petrographie und Diagenese. - *Arch. Geschiebekde.*, **2** (3): 123-140, 5 Abb., 3 Tab., 1 Taf.; Hamburg.
- BATHURST, R.G.C. (1959): Diagenesis in Mississippian calcites and pseudobreccias. - *J. Sed. Petrol.*, **29**: 365-376, 6 Abb.; Tulsa.
- BATHURST, R.G.C. (1975): Carbonate Sediments and their Diagenesis. - *Developm. Sediment.*, **12**, 2 Aufl.: 613 S., div. Abb. u. Tab.; Amsterdam (Elsevier).
- BAUER, F. (1958): Kalkabsätze unter Alpengletschern und ihre Bedeutung für die Altersbestimmung heute gletscherfrei werdender Karrenformen. - *Z. Gletscherkunde Glazialgeol.*, **4**: 215-225, 12 Abb., 1 Tab.; Innsbruck.
- BAUMGARTL, T. & HORN, R. (1995): Bedeutung der Wasserspannung für das Schrumpfungsverhalten toniger Substrate. - *Mitt. dt. bodenkdl. Ges.*, **76**: 79-82, 5 Abb.; Oldenburg.
- BEAR, J. (1972): Dynamics of Fluids in Porous Media. - 764 S., div. Abb. u. Tab.; New York (Dover).
- BECKNER, J.R. & MOZLEY, P.S. (1998): Origin and spatial distribution of early vadose and phreatic calcite cements in the Zia Formation, Albuquerque Basin, New Mexico, USA. - *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.*, **26**: 27-51, 15 Abb.; Oxford (Blackwell).
- BEHREND, F. (1927): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern Blatt Hessen. - 42 S., div. Abb. und Tab.; Berlin. [TK25 3930]
- BENDA, L. [HRSG.] (1995): Das Quartär Deutschlands. - 408 S., 95 Abb., 30 Tab.; Berlin, Stuttgart (Bornträger).
- BERK, W.V., DEUTSCH, R. & RICHTER, D.K. (1995): Meteorische Mischwasserzementation von Ca-Siderit in einer pleistozänen Fußterrasse (Hattingen/NRW). - *Zbl. Geol. Paläont. Teil I*, **1994** (1/2): 137-145, 4 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- BERNER, R.A. (1968): Rate of concretion growth. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, **32**: 477-483, 1 Abb., 2 Anh.; Oxford, London, New York, Paris.
- BERNER, R.A. (1980): Early diagenesis. A theoretical approach. - *Princeton series in geochemistry*: 241 S., div. Abb. u. Tab.; Princeton (Princeton University Press, U.S.A.).
- BEYER, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. - *Wasserwirtschaft Wassertechnik*, **14**: 165-168, 7 Abb., 3 Tab.; Berlin.
- BJORKUM, P.A. & WALDERHAUG, O. (1990a): Lateral Extent of Calcite-cemented Zones in Shallow Marine Sandstones. - IN: BULLER, A.T. & KLEPPE, J. & TORSÆTER, O. & AASEN, J.O. [HRSG.]: *North Sea Oil and Gas Reservoirs*, **II**: 331-336, 4 Abb. - London, Dordrecht, Boston (Graham & Trotman).
- BJØRKUM, P.A. & WALDERHAUG, O. (1990b): Geometrical arrangement of calcite cementation within shallow marine sandstones. - *Earth-Sci. Reviews*, **29**: 145-161, 12 Abb.; Amsterdam (Elsevier).
- BJØRKUM, P.A. & WALDERHAUG, O. (1993): Isotopic composition of a calcite-cemented layer in the lower Jurassic Bridport Sands, Southern England: Implications for formation of laterally extensive calcite-cemented layers. - *J. Sed. Pet.*, **63** (4): 678-682, 4 Abb., 1 Tab.; Tulsa (U.S.A.).
- BODE, A. & SCHROEDER, H. (1926): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern Blatt Goslar. - 2. Aufl.: 113 S., 2 Taf.; Berlin. [TK25 4028]
- BOMBIEN, H. (1987): Geologisch-petrographische Untersuchungen zur quartären (früh-Saalezeitlichen) Flußgeschichte im nördlichen Harzvorland. - *Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover*, **26**: 131 S., 32 Abb., 4 Tab., 3 Taf.; Hannover.
- BOULDING, J.R. (1995): Practical handbook of soil, vadose zone and ground-water contamination. - 948 S., div. Abb. u. Tab.; Boca Raton (Lewis Publ.).
- BOULTON, G.S. & CABAN, P. (1995): Groundwater flow beneath ice sheets: Part II - Its impact on glacier tectonic structures and moraine formation. - *Quatern. Sci. Reviews*, **14**: 563-587, 16 Abb.; Oxford.
- BRUCKSCHEN, P. (1992): Zementstratigraphie im Trochitenkalk (Oberer Muschelkalk) des Nordwestdeutschen Berglandes. - *Bochumer geol. geotechn. Arb.*, **38**: 241 S., 60 Abb., 10 Tab., 4 Taf.; Bochum.
- BRUCKSCHEN, P. & RICHTER, D. (1994): Zementstratigraphische Grundmuster in marinen Karbonatablagerungen des

- Phanerozoikums – ein Abbild der normalen Beckenentwicklung. – *Zbl. Geol. Paläont.*, I **1993** (7/8): 959-972, 3 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- BUCHTER, B., HINZ, C., FLURY, M & FLÜHLER, H. (1995): Heterogeneous Flow and Solute Transport in an Unsaturated Stony Soil Monolith. - *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **59**: 14-21, 15 Abb., 4 Tab.; Madison (U.S.A.).
- BUCZYNSKI, C. & CHAFETZ, H.S. (1990): Habit of bacterially induced precipitation of calcium carbonate and the influence of medium porosity on mineralogy. - *J. Sed. Pet.*, **61**(2): 226-233, 3 Abb.; Tulsa (U.S.A.).
- BUCZYNSKI, C. & CHAFETZ, H.S. (1987): Siliciclastic grain beakage and displacement due to carbonate crystal growth: an example from the Lueders Formation (Permian) of north-central Texas, U.S.A. - *Sedimentology*, **34**: 837-843, 6 Abb.; Oxford, London.
- BUDD, D.A. (1988): Petrographic products of freshwater diagenesis in Holocene ooid sand, Schooner Cays, Bahamas. - *Carbon. Evapor.*, **3** (2): 143-163, 13 Abb.; Troy.
- BUSCH, K.F., LUCKNER, L. & TIEMER, K. (1993): Geohydraulik. – 3. Aufl., Lehrbuch der Hydrogeologie, **3**: 497 S., 238 Abb., 50 Tab.; Berlin, Stuttgart (Bornträger).
- CAILLEUX, A. & DIONNE, J.C. (1972): Concrétions calcaires quaternaires dans le Parc des Laurentides, Québec. - *Rev. Géogr. Montr.*, **26** (4): 361-379, 27 Abb., 3 Tab.; Montreal.
- CAMOIN, G.F. [HRSG.] (1999): Microbial Mediation in Carbonate Diagenesis. – *Sed. Geol.*, **126** (1-4): 1-340, div. Abb. u. Tab.; Amsterdam.
- CAROZZI, A.V. (1967): Recent calcite-cemented sandstone generated by the equatorial tree Iroko (*Chlorophora excelsa*), Daloa, Ivory Coast. - *J. Sed. Pet.*, **37** (2): 597-600, 5 Abb.; Tulsa (U.S.A.).
- CASPERS, G., JORDAN, H., MERKT, J., MEYER, K.D., MÜLLER, H. & STREIF, H. (1995): Niedersachsen. – IN: BENDA, L. [HRSG.]: *Das Quartär Deutschlands*: 23-58, 9 Abb., 1 Tab.; Berlin, Stuttgart (Bornträger).
- CERLING, T.E. (1984): The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate. - *Earth and Planetary Sci. Letters*, **71**: 229-240, 5 Abb., 1 Tab.; Amsterdam.
- CHAFETZ, H.S. & WILKINSON, B.H. & LOVE, K.M. (1985): Morphology and composition of non-marine carbonate cements in near-surface settings. - *Soc. Econ. Paleon. Mineral. Spec. Publ.*, **36**: 337-347, 15 Abb.; Tulsa (U.S.A.).
- COLEMAN, M.L. & RAISWELL, R. (1993): Microbial mineralization of organic matter: mechanisms of self-organization and inferred rates of precipitation of diagenetic materials. - *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **A 344**: 69-87, 2 Abb., 4 Tab.; Oxford.
- DANILOV, I.D. & SUZDAL'SKII, O.V. (1975): Pleistocene concretions of the European and Siberian sub-arctic. - *Lithology Min. Resources*, **10** (3): 308-315, 4 Abb., 2 Tab.; New York.
- DEEGAN, C.E. (1971): The mode of origin of some late diagenetic sandstone concretions from the Scottish Carboniferous. - *Scott. J. Geol.*, **7** (4): 357-365, 3 Abb., 3 Tab.; Edinburgh (U.K.).
- DETERS, H.B. (1999): Internbau und Genese von zwei pleistozänen Kiessand-Vorkommen östlich von Hameln (Afferde, Copenbrügge) im Niedersächsischen Bergland. - 100 S., 60 Abb, 4 Anh.; Hannover (unveröff. Diplomarbeit).
- DEUTLOFF, O. & STRITZKE, R. (1999): Pleistozän-Geologie und Palynostratigraphie in Subrosionssenken Ostwestfalens. – *Eiszeitalter und Gegenwart*, **49**: 84-101, 8 Abb., 2 Tab.; Hannover.
- DICKSON, J.A.D. (1966): Carbonate identification and genesis as revealed by staining. - *J. Sed. Pet.*, **36** (2): 491-505, 10 Abb.; Tulsa.
- DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1983): Bestimmung der Korngrößenverteilung. - *DIN 18123*: 12 S., div. Abb. u. Tab.; Berlin.
- DIX, G.R. & MULLINS, H.T. (1987): Shallow, subsurface growth and burial alteration of middle Devonian calcite concretions. - *J. Sed. Pet.*, **57** (1): 140-152, 14 Abb., 3 Tab.; Tulsa.
- DRAVIS, J.J. (1996): Rapidity of freshwater calcite cementation - implications for carbonate diagenesis and sequence stratigraphy. - *Sedim. Geol.*, **107**: 1-10, 4 Abb.; Amsterdam.
- DRAVIS, J.J. & YUREWICZ, D.A. (1985): Enhanced carbonate petrography using fluorescence microscopy. - *J. Sed. Pet.*, **55**: 795-804, 8 Abb.; Tulsa (U.S.A.).
- DUNHAM, R.J. (1969): Early vadose silt in Townsend Mound (Reef), New Mexico. - In: FRIEDMAN, G.M. [Hrsg.]: *Depositional Environments in Carbonate Rocks*. *SEPM Spec. Publ.*, **14**: 139-181, 22 Abb.; Tulsa (U.S.A.).

- DUNHAM, R.J. (1971): Meniscus cement. - In: BRICKER, O.P. [Hrsg.]: Carbonate Cements, Johns Hopkins Univ. Studies in Geology, **19**: 297-300, 12 Abb.; Baltimore, London (Johns Hopkins).
- DUPHORN, K. (1976): Quartär. - In: HINZE, C.: Geol. Kt. Niedersachsen 1:25.000, Erl. Bl. Seesen Nr. 4127: 52-61, 1 Abb.; Hannover.
- EHLERS, J. (1978): Die quartäre Morphogenese der Harburger Berge und ihrer Umgebung. - Mitt. Geogr. Ges. Hamburg, **68**: 181 S., 62 Abb., 47 Taf., 1 Kt.; Hamburg.
- EHLERS, J. (1987): Geologische Karte Hamburg 1:25.000, Erläuterungen zu Blatt Nr. 2525 Harburg. - 120 S., 38 Abb., 11 Tab., 7 Kt.; Hamburg.
- EHLERS, J. (1994): Allgemeine und historische Quartärgeologie. - 358 S., 176 Abb.; Stuttgart (Enke).
- EHLERS, J. (1995): Hamburg. - In: BENDA, L. [Hrsg.]: Das Quartär Deutschlands: 14-22, 5 Abb.; Hannover.
- ELBRACHT, J. (1997): Meteorische Karbonat-Zementation im Übergang vadose/phreatische Zone (Quartär, NW-Deutschland). - Terra Nostra, **97/2**: 37-38, 1 Abb.; Köln.
- ELBRACHT, J. (1998a): Frühdiagenetische Karbonatzementation in glazigenen und fluviatilen Sedimenten des Wesertales NW Hameln. - Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover, **38**: 65-85, 4 Abb., 2 Tab., 1 Taf.; Hannover.
- ELBRACHT, J. (1998b): Karbonat-Zementation in Freden. - In: FELDMANN, L. & MEYER, K. D. [Hrsg.]: Quartär in Niedersachsen, Exkursion B: Leinebergland und nördliches Harzvorland: 49-50, 1 Abb.; Hannover.
- ELBRACHT, J. & MEYER, K.D. (2000): Sandgrube Daerstorf. - In: MEYER, K. D. [Hrsg.]: Geologie und Archäologie im Bereich der Stader Geest, Exkursion B2, 67. Tag. Arbeitsgem. Nordwestdt. Geol.: 97-98; Hannover.
- EVAMY, B.D. & SHEARMAN, D.J. (1962): The application of a chemical staining technique to the study of diagenesis of limestones. - Proceed. Geol. Soc. London, **1599**: 102; London.
- EVAMY, B.D. & SHEARMAN, D.J. (1965): The Development of Overgrowths from Echinoderm Fragments. - Sediment., **5**: 211-233, 13 Abb.; Amsterdam.
- FAIRCHILD, I.J., BRADBY, L. & SPIRO, B. (1994): Reactive carbonate in glacial systems: a preliminary synthesis of its creation, dissolution and reincarnation. - In: DEYNOUX, M., MILLER, J.M.G., DOMACK, E.W., EYLES, N., FAIRCHILD, I.J. & YOUNG, G.M. [Hrsg.]: Earth's Glacial Record. - World and Regional Geol., **5**: 175-192, 15 Abb.; Cambridge.
- FAIRCHILD, I.J. & SPIRO, B. (1990): Carbonate minerals in glacial sediments: geochemical clues to palaeoenvironment. - In: DOWDESWELL, J.A. & SCOURSE, J.D. [Hrsg.]: Glacimarine Environments: Processes and Sediments, Geol. Soc. Spec. Publ., **53**: 201-216, 5 Abb.; London.
- FELDMANN, L. & GROETZNER, J.P. (1998): Leinebergland und nördliches Harzvorland. - In: FELDMANN, L. & MEYER, K. D. [Hrsg.]: Quartär in Niedersachsen, DEUQUA-Exkursionsführer: 37-88, div. Abb.; Hannover.
- FEZER, F. (1969): Tiefenverwitterung circumalpiner Pleistozänschotter. - Heidelberger Geogr. Arb.: 144 S., 94 Abb., 1 Tab.; Heidelberg.
- FISCHBECK, R. (1976): Mineralogie und Geochemie carbonatischer Ablagerungen in europäischen Höhlen, - ein Beitrag zur Bildung und Diagenese von Speleothemen. - N. Jb. Miner. Abh., **126** (3): 269-291, 6 Abb., 5 Tab.; Stuttgart.
- FLÜGEL, E. (1978): Mikrofazielle Untersuchungsmethoden von Kalken. - 454 S., 68 Abb., 57 Tab., 33 Taf.; Berlin (Springer).
- FLÜGEL, E. (1982): Microfacies analysis of limestones. - 633 S., 78 Abb., 58 Tab., 53 Taf.; Berlin (Springer).
- FOERSTER, A. (1906/07): Naturkundliches XXXVIII. - Brandenburgia, **15**:286-287; Berlin.
- FOLK, R.L. (1965): Some aspects of recrystallisation in ancient limestones. - In: PRAY, L.C. & MURRAY, R.C. [Hrsg.]: Dolomitization and limestone diagenesis, SEPM Publ., **13**: 14-48, 14 Abb., 7 Tab.; Menasha.
- FOLK, R.L. (1974): The natural history of crystalline calcium carbonate: effect of Magnesium content and salinity. - J. Sed. Pet., **44** (1): 40-53, 9 Abb.; Tulsa.
- FOLK, R.L. & ASSERETO, R. (1976): Comparative fabrics of length-slow and length-fast calcite and calcitized aragonite in a Holocene speleothem, Carlsbad Caverns, New Mexico. - J. Sed. Petr., **46** (3): 486-496, 11 Abb.; Tulsa.
- FREEMAN, T. (1971): Morphology and Composition of an Ordovician Vadose Cement. - Nature

- Phys. Sci., **233** (18): 133-134, 2 Abb.; New York.
- FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. (1979): Groundwater. – 604 S., div. Abb. u. Tab.; Englewood Cliffs (Prentice-Hall).
- FRIEDMAN, G.M. (1964): Early diagenesis and lithification in carbonate sediments. - J. Sed. Pet., **34** (4): 777-813, 53 Abb., Tulsa (U.S.A.).
- FRIEDMAN, G.M. (1998): Rapidity of marine carbonate cementation - implications for carbonate diagenesis and sequence stratigraphy: perspective. - Sed. Geol., **119**: 1-4, 2 Abb.; Amsterdam.
- FÜCHTBAUER, H. (1988): Konglomerate und Breccien. - In: FÜCHTBAUER, H. [Hrsg.]: Sedimente und Sedimentgesteine, 4. Aufl., Sediment-Petrologie, **2**: 69-96, 21 Abb., 1 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- FÜCHTBAUER, H. & RICHTER, D.K. (1988): Karbonatgesteine. - In: FÜCHTBAUER, H. [Hrsg.]: Sedimente und Sedimentgesteine, 4. Aufl., Sediment-Petrologie, **2**: 233-434, 157 Abb., 12 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- GÁBA Z. & PEK, I. (1992): Cementace uhlicitanem vápenatým v ledových sedimentech u Vidnavy ve Slezsku. - Cas. Slez. Muz. Opava (A), **41**: 77-82, 5 Abb.; Opava.
- GAGEL, C. (1915): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Blatt Lübeck: 75 S., 7 Abb., div. Tab., 4 Taf.; Berlin. [TK2130]
- GASCOYNE, M. (1981): A Climate Record of the Yorkshire Dales for the Last 300,000 Years. - Proceed. 8th Int. Congr. Speleology: 96-98, 2 Abb.; Georgia (U.S.A.).
- GAUGER, W. (1978a): Zehn Jahre Forschung in den Kiesgruben des Raumes Vastorf (10 km östlich Lüneburg), ein Abschlussbericht. - Jb. Naturw. Verein Fürstentum Lüneburg, **34**: 65-84, 2 Abb., 6 Tab.; Lüneburg.
- GAUGER, W. (1978b): Helle Schotter mit südlichen Geröllen in den Kiesgruben bei Lübbow (südlich Lüchow) und ihr Vergleich mit rezenten Elbe-Schottern bei Barförde (östlich Hohnstorf) - Jb. Naturw. Verein Fürstentum Lüneburg, **34**: 85-102, 2 Abb., 5 Tab.; Lüneburg.
- GAUGER, W. & MEYER, K.D. (1970): Ostbaltische Geschiebe (Dolomite, Old Red-Sandsteine) im Gebiet zwischen Lüneburg und Uelzen. - Der Geschiebesammler, **5** (1): 1-12, 1 Abb., 2 Tab.; Hamburg.
- GAVISH, E. & FRIEDMAN, G.M. (1969): Progressive diagenesis in Quarternary to late Tertiary carbonate sediments: sequence and time scale. - J. Sed. Pet., **39** (3): 980-1006, 32 Abb.; Tulsa (U.S.A.).
- GESLIN, J.K. (1994): Carbonate pseudomatrix in siliciclastic-carbonate turbidites from the Quirrh-Wood River Basin, Southern Idaho. - J. Sed. Res., **A64** (1): 55-58, 5 Abb., 3 Tab.; Tulsa.
- GHOSH, P. (1997): Geomorphology and palaeoclimatology of some Upper Cretaceous palaeosols in central India. - Sed. Geol., **110**: 25-49, 18 Abb., 2 Tab.; Amsterdam.
- GINSBURG, R.N., MARSZALEK, D.S. & SCHNEIDERMAN, N. (1971): Ultrastructure of carbonate cements in a Holocene algal reef of Bermuda. - J. Sed. Pet., **41** (2): 472-482, 13 Abb.; Tulsa.
- GLUYAS, J.G. (1984): Early carbonate diagenesis within Phanerozoic shales and sandstones of the NW European shelf. - Clay Minerals, **19**: 309-321, 4 Abb., 4 Tab.; London.
- GONGGRIP, G.P. (1999): Stenen als monument. - Grondboor & Hamer, **53** (5): 89-90, 3 Abb.; Maastricht.
- GÖRNE, U. (1985): Entwicklung optimaler Methoden der Suche und Erkundung fester mineralischer Rohstoffe im kristallinen Grundgebirge unter besonderer Berücksichtigung der stratiformen Mineralisation. - Freiburger Forschungsh., **C396**: 73 S., 17 Abb.; Leipzig.
- GÖRÜR, N. (1979): Downward development of overgrowths from echinoderm fragments in a submarrine environment. - Sedimentology, **26**: 605-608, 2 Abb.; Oxford.
- GRUPE, O. (1929a): Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern mit Erläuterungen Blatt Ottenstein. - 2. Aufl.: 62 S., 2 Taf.; Berlin. [TK25 4022].
- GRUPE, O. (1929b): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern Blatt Holzminden. - 2. Aufl.: 71 S., 1 Taf.; Berlin. [TK25 4122]
- HABERMANN, D. & NEUSER, R.D. & RICHTER, D.K. (1998): Low limit of Mn²⁺-activated cathodoluminescence of calcite: state of the art. - Sed. Geol., **116**: 13-24, 5 Abb.; Amsterdam.
- HALLET, B. (1976): Deposits formed by subglacial deposition of CaCO₃. - Geol. Soc. Am. Bull., **87**: 1003-1015, 9 Abb.; Boulder (U.S.A.).

- HALLEY, R. B. & HARRIS, P.M. (1979): Fresh-water cementation of a 1,000-year-old Oolite. - *J. Sed. Pet.*, **49** (3): 969-988, 14 Abb.; Tulsa.
- HANDTKE, R. (1989): Kühl- und kaltzeitliche Klimaindizien im Jungtertiär der Schweiz, des Allgäus und einiger Nachbargebiete. - *Geol. Bavarica*, **94**: 447-457, 1 Abb.; München.
- HARBORT, E. & MONKE, H. & SCHUCHT, F. (1916): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern Blatt Beedenbostel. - 67 S., div. Tab.; Berlin. [TK25 3327]
- HARBORT, E. & STOLLER, J. (1916): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern Blatt Celle. - 71 S., div. Tab.; Berlin. [TK25 3326]
- HARMS, F.J. (1983): Zur Geologie saalezeitlicher Sedimente am Rande des Leinetals zwischen Imsen und Freden. - *Beitr. Naturkunde Niedersachsen*, **36** (2): 53-69, 14 Abb.; Hannover.
- HARMS, F.J. (1984): Erläuterungen zu Blatt 4025 Freden. - Geologische Karte von Niedersachsen 1:25.000: 168 S., 20 Abb., 18 Tab., 7 Kt.; Hannover.
- HARTGE, K.H. & HORN, R. (1991): Einführung in die Bodenphysik. - 2. Aufl.: 303 S., 156 Abb., 19 Tab.; Stuttgart (Enke).
- HARTGE, K.H. & HORN, R. (1991): Die physikalische Untersuchung von Böden. - 3. Aufl.: 177 S., 51 Abb., 12 Tab.; Stuttgart (Enke).
- HATTIN, D.E. & DODD, J.R. (1978): Holocene cementation of carbonate sediments in the Florida Keys. - *J. Sed. Pet.*, **48** (1): 307-312, 5 Abb.; Tulsa (U.S.A.).
- HAUSNER, M. (1999): Biofilme in ihrer Bedeutung für mikrobielle Abbauprozesse in Grundwasserhabitaten. - *Grundwasserschutz im Karst der südlichen Frankenalb*, GSF-Ber., **04/99**: 91-98; Neuherberg.
- HEISE, K. (1996): Petrographische Zusammensetzung und Alter von Kleinvorkommen glaziärer Sedimente im NW Harzvorland. - 52 S., 9 Abb., 2 Tab., 4 Anh.; Hannover (unveröffentl. Dipl. Arbeit).
- HERRMANN, R. (1968): Geologische Karte von Niedersachsen 1:25.000 Erläuterungen zu Blatt Nr. 3923 Salzhemmendorf. - 133 S., 10 Abb., 5 Tab., 1 Kt., 3 Taf.; Hannover.
- HILLGÄRTNER, H., DUPRAZ, C. & HUG, W. (2001): Microbially induced cementation of carbonate sands: are micritic meniscus cements good indicators of vadose diagenesis? - *Sedimentology*, **48**: 117-131, 8 Abb.; Oxford.
- HINZ, C., BUCHTER, B. & FLÜHLER, H. (1996): Schwermetalltransport in ungesättigtem Boden: Kadmium in einem Bodenmonolithen. - *Z. dt. geol. Ges.*, **147** (4): 499-506, 7 Abb.; Hannover.
- HINZE, C., JERZ, H., MENKE, B. & STAUDE, H. (1989): Geogenetische Definitionen quartärer Lockergesteine für die Geologische Karte 1:25 000 (GK 25). - *Geol. Jb.*, **A112**: 243 S.; Hannover.
- HÖFLE, H.C. (1991): Über die interne Struktur und die stratigraphische Stellung mehrerer Endmoränenwälle im Bereich der Nordheide bis östlich Lüneburg. - *Geol. Jb.*, **A126**: 151-169, 7 Abb.; Hannover.
- HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie. - 5. Aufl.: 441 S., 114Abb., 46 Tab.; Stuttgart (Enke).
- HOFFMANN, A. (1927): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Blatt Elze, Nr. 2089: 44 S., div. Tab., 1 Kt.; Berlin.
- HOSELMANN, C. (1994): Stratigraphie des Hauptterrassenbereichs am unteren Mittelrhein. - *Sonderveröff. Geol. Inst. Univ. Köln*, **96**: 236 S., 71 Abb., 5 Anh., 1 Kt.; Köln.
- HOUNSLOW, M.W. (1997): Significance of localized pore pressures to the genesis of septarian concretions. - *Sediment.*, **44**: 1133-1147, 4 Abb.; Oxford.
- HUDE, N.V.D. (1991): Kapillarsperren zum Abschirmen von Deponien gegen Sickerwasser. - *Wasser Boden*, **12/1991**: 754-757, 8 Abb., 1 Tab.; Berlin.
- JAMES, N.P. (1972): Holocene and Pleistocene calcareous crust (Caliche) profiles: Criteria für subaerial exposure. - *J. Sed. Pet.*, **42** (4): 817-836, 12 Abb.; Tulsa.
- JAMES, W.C. (1984): Early diagenesis, Atherton Formation (Quaternary): A guide for understanding early cement distribution and grain modifications in nonmarine deposits. - *J. Sed. Petr.*, **55** (1): 135-146, 16 Abb.; Tulsa.
- JAMES, N.P. & CHOQUETTE, P.W. (1984): Limestones - The Meteoric Diagenetic Environment. - *Geosci. Can.*, **11** (4): 161-195, 40 Abb., 2 Tab.; Toronto.
- JARITZ, W. (1973): Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. - *Geol. Jb.*, **A10**: 77 S., 3 Abb., 1 Tab., 2 taf.; Hannover.

- JERZ, H. (1993): Das Eiszeitalter in Bayern. - Geol. von Bayern, **2**: 243 S., 74 Abb., 17 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- JOHNSON, D.B. & SWETT, K. (1974): Origin and diagenesis of calcitic and hematitic nodules in the Jordan Sandstone of Northeast Iowa. - J. Sed. Pet., **44** (3): 790-794, 10 Abb.; Tulsa (U.S.A.).
- JORDAN, H. (1987): Geologische Karte von Niedersachsen 1:25.000 Erläuterungen zu Blatt Nr. 3924 Gronau. - 181 S., 22 Abb., 21 Tab., 7 Kt.; Hannover.
- JORDAN, H. (1993): Geologische Karte von Niedersachsen 1:25.000 Erläuterungen zu Blatt Nr. 4125 Einbeck. - 107 S., 12 Abb., 18 Tab., 6 Kt.; Hannover.
- JORDAN, H. (1994): Geologische Karte von Niedersachsen 1:25.000 Erläuterungen zu Blatt Nr. 4024 Alfeld. - 126 S., 17 Abb., 13 Tab., 7 Kt.; Hannover.
- JORDAN, H. (1999): Entwurf zur digitalen Geologischen Karte von Niedersachsen 1:25.000: Geologische Karte Blatt Nr. 4027 Lutter am Barenberge Kartierbericht. - Arch. Nieders. L.-Amt für Bodenforschung, **0119132**: 20 S., 3 Abb., 2 Tab., 8 Anl.; Hannover [Unveröff.].
- JORDAN, H. & SCHWARTAU, W. (1993): Das Lößprofil von Ahlshausen und weitere tiefe Quartäraufschlüsse entlang der Bundesbahn-Neubaustrecke bei Northeim, Südniedersachsen. - Eiszeitalter u. Gegenwart, **43**: 110-122, 9 Abb., 3 Tab.; Hannover.
- KAIRO, S., RHOADES, L. & BASU, A. (1990): Pseudomatrix and its Precursors in Sands and Sandstones. - AAPG Bull., **74** (5): 690; Tulsa.
- KALTWANG, J. (1992): Die pleistozäne Vereisungsgrenze im südlichen Niedersachsen und im östlichen Westfalen. - Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover, **33**: 161 S., 7 Abb., 38 Tab., 49 Kt.; Hannover.
- KASHIK, S.A. (1965): Replacement of Quartz by Calcite in sedimentary rocks. - Geochim. Int., **2**: 133-138, 3 Abb.; Washington.
- KAUFMANN, B., SCHAUER, M. & REINHOLD, C. (1999): Concentric-zoned calcite cements of Middle Devonian carbonate mounds of the Mader Basin (eastern Anti-Atlas, Morocco) - a combined cathodoluminescence and microprobe study. - N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **214** (1/2): 95-110, 5 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- KELLER, S. (1998): Permafrost in der Weichsel-Kaltzeit und Langzeitprognose der hydrogeologischen Entwicklung in der Umgebung von Gorleben/NW-Deutschland. - Z. angew. Geol., **44** (2): 111-119, 4 Abb.; Hannover.
- KENDALL, A.C. & BROUGHTON, P.L. (1978): Origin in fabrics in speleothems composed of columnar calcite crystals. - J. Sed. Pet., **48** (2): 519-538, 12 Abb.; Tulsa.
- KERS, L.E. (1964): Förekomster av subglacialt utfälld Kalksten i Solna Samt i Gardvik, Västerbottens Län. - Geol. Fören. Stockholm Förhandlingar, **84**: 282-310, 14 Abb.; Stockholm.
- KLAPPA, C., F. (1980): Rhizoliths in terrestrial carbonates: classification, recognition, genesis and significance. - Sediment., **27**: 613-629, 9 Abb, 1 Tab.; Oxford, London, Edinburgh, Melbourne.
- KLEIN, S. (1939): Zur Bildungsweise und Alterseinstufung junger Kalkabsätze im oberbayerischen Alpenvorland, I. Über die Entstehung von Almlagern. - Zentralbl. Min. Geol. Paläont. Abt. B, **1939**: 401-416, 3 Abb.; Stuttgart.
- KLEIN, S. (1940): Zur Bildungsweise und Alterseinstufung junger Kalkabsätze im oberbayerischen Alpenvorland. III. (Schluss) Die Nagelfluhbildung im Eiszeitalter. - Zbl. Min. Geol. Paläontol., **B 1940**: 289-306, 1 Abb.; Stuttgart.
- KLEINMANN, A., MERKT, J. & MÜLLER, H. (1997): Lake Level Fluctuations in the Uppermost Preboreal in Lake Hämelsee. - 7th Intern. Symp. Palaeolimnology, Abstract Vol., Würzburger Geogr. Manuskripte, **41**: 107-108, 1 Abb.; Würzburg.
- KLEINMANN, A., MERKT, J., MÜLLER, H. & SIEWERS, U. (1998): Umweltorientierte Geochemie in der Paläolimnologie. - Z. angew. Geol., **44** (1): 33; Hannover.
- KLOSA, D. (1994): Eine rechnergestützte Methode zur Bestimmung des Gesamtkarbonatgehaltes in Sedimenten und Böden. - Z. angew. Geol., **40** (1): 18-21, 4 Abb.; Berlin.
- KLOSTERMANN, J. (1995): Nordrhein-Westfalen. - In: Benda, L. [Hrsg.]: Das Quartär Deutschlands: 59-94, 6 Abb., 8 Tab.; Stuttgart.
- KLOTZ, W. (1988): Fluoreszenzmikroskopie an Karbonatdünnschliffen. - Bochumer geol. geotechn. Arb., **29**: 86-87; Bochum.
- KNIGHT, J. (1998): Origin and significance of calcareous concretions within glacial outwash

- in the Tempo Valley, north-central Ireland. - *Boreas*, **27**: 81-87, 7 Abb.; Oslo, Stockholm, Copenhagen, Oxford, Boston.
- KOCH, R. & ZINKERNAGEL, U. (1996): Zur Zementation in Kalksteinen. - *Zbl. Geol. Paläont.*, **I 1994** (11/12): 1353-1398, 13 Abb., 2 Tab., 2 Taf.; Stuttgart.
- KOENEN, A.V. (1895): Erläuterungen zur geologischen Specialkarte von Preussen und den Thüringischen Staaten Blatt Gandersheim. - 24 S., 1 Kt.; Berlin. [Bl. 4126]
- KOERT, W. (1927): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern Blatt Seehausen Nr. 2098. - 58 S., 1 Abb., 5 Tab.; Berlin. [Bl. 3833]
- KOERT, W. & MÜLLER, G. & SCHLUNCK, J. (1910): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern Blatt Hittfeld. - 50 S., div. Abb. u. Tab.; Berlin. [Bl. 2625]
- KOK, R.J. (1973): Plaatsseigen zandsteen. - *Grondbor an Hamer*, **27** (4): 116, 1 Abb.; Maastricht.
- KRIENKE, K. (2001): Südostrügen im Weichsel-Hochglazial. - Inauguraldiss. Univ. Greifswald: 181 S., 63 Abb., 8 Taf., 8 Anl.; Greifswald.
- KULLE, S. (1985): Drenthe-stadiale Staubecken-sedimente (Pleistozän) und ihr Lagerungsverband aus zwei Aufschlüssen im Wesertal zwischen Rinteln und Hameln. - 82 S., 18 Abb., 8 Tab., 4 Taf., 3 Anl.; Hannover (unveröffentl. Dipl.-Arbeit).
- KUSTER, H. & MEYER, K.D. (1995): Karte der Lage der Quartärbasis in Niedersachsen und Bremen 1:500 000. - In: NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR BODENFORSCHUNG [Hrsg.]: Quartärgeologische Übersichtskarte von Niedersachsen und Bremen 1:500 000: 1 Kt.; Hannover.
- LACHENBRUCH, A. H. (1962): Mechanics of Thermal Contraction Cracks and Ice-Wedge Polygons in Permafrost. - *GSA Spec. Pap.*, **70**: 69 S., 13 Abb., 4 Tab., 2 Taf.; New York.
- LAND, L.S. (1970): Phreatic versus vadose meteoric diagenesis of limestones: evidence from a fossil water table. - *Sediment.*, **14**: 175-185, 6 Abb., 2 Tab.; Amsterdam.
- LAND, L.S. (1971): Phreatic versus meteoric diagenesis of limestones: evidence from a fossil water table in Bermuda. - In: BRICKER, O.P. [Hrsg.]: Carbonate Cements, Johns Hopkins Univ. Studies in Geology, **19**: 133-136, 4 Abb., 1 Tab.; Baltimore, London (Johns Hopkins).
- LANGGUTH, H.R. & VOIGT, R. (1980): Hydrogeologische Methoden. - 486 S., 156 Abb., 72 Tab.; Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- LASEMI, Z. & SANDBERG, P.A. (1984): Transformation of aragonit-dominated lime muds to microcrystalline limestones. - *Geol.*, **12**: 420-423, 1 Abb.; Boulder.
- LATZKE, A. (1996): Sedimente und Internbau des Kiessandkörpers von Freden/Leine. - 76 S., 42 Abb., 1 Tab., 4 Anh., 1 Kt.; Hannover (unveröffentl. Dipl. Arbeit).
- LEMMENS, M. & LORRAIN, R. & HAREN, J. (1982): Isotopic composition of ice and subglacially precipitated calcite in an alpine area. - *Z. Gletscherkde. Glazialgeologie*, **18** (2): 151-159, 5 Abb.; Innsbruck.
- LEPPER, J. (1984): Geologische Karte von Niedersachsen 1:25.000 Erläuterungen zu Blatt Nr. 3725 Sarstedt. - 177 S., 24 Abb., 13 Tab., 4 Kt.; Hannover.
- LEPPER, J. & MENGELING, H. (1991): Beiheft zur Geologischen Wanderkarte Mittleres Weserbergland mit Naturpark Solling-Vogler. - *Beih. Ber. naturhist. Ges. Hannover*, **10**: 58 S., 32 Abb., 1 Tab., 1 Kt.; Hannover.
- LIPPMANN, F. (1955): Ton, Geoden und Minerale des Barrême von Hoheneggelsen. - *Geol. Rundschau*, **43**: 475-503, 4 Abb., 8 Tab.; Stuttgart.
- LITTLE, B.J., WAGNER, P.A. & LEWANDOWSKI, Z. (1997): Spatial relationships between bacteria and mineral surfaces. - In: Banfield, J.F. & Nealson, K.H. [Hrsg.]: Geomicrobiology: Interactions between Mikrobe and Minerals, *Rev. Min.*, **35**: 123-159, 30 Abb., 2 Tab.; Washington D.C.
- LOHMANN, K.G. (1988): Geochemical Patterns of Meteoric Diagenetic Systems and Their Application to Studies of Paleocarst. - In: JAMES, N.P. & CHOQUETTE, P.W. [Hrsg.]: Palaeocarst, *Symp. Palaeocarst Systems and Unconformities*: 58-80, div. Abb.; New York, Berlin, Heidelberg (Springer).
- LONGMAN, M.W. (1980): Carbonate Diagenesis Textures from Nearsurface Diagenetic Environments. - *Amer. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, **64** (4): 461-487, 18 Abb.; Tulsa (U.S.A.).
- LÜTTIG, G. (1954): Alt- und mittelpleistozäne Eisrandlagen zwischen Harz und Weser. -

- Geol. Jb., **70**: 43-125, 16 Abb., 1 Taf.; Hannover.
- LÜTTIG, G. (1960): Neue Ergebnisse quartärgeologischer Forschung im Raume Alfeld-Hamelner Elze. - Geol. Jb., **77**: 337-390, 11 Abb., 5 Tab., 11 Taf.; Hannover.
- MACHEL, H.G. (2000): Application of Cathodoluminescence to Carbonate Diagenesis. - In: Pagel, M., Barbin, V., Blanc, P. & Ohnenstetter, D. [Hrsg.]: Cathodoluminescence in Geosciences: 271-301, 13 Abb.; Berlin, Heidelberg (Springer).
- MACHEL, H.G. & BURTON, E.A. (1991): Factors Governing Cathodoluminescence in Calcite and Dolomite and their Implications for Studies of Carbonate Diagenesis. - In: Barker, C.E. & Kopp, O.C. [Hrsg.]: Luminescence Microscopy and Spectroscopy. - SEPM Short Course, **25**: 37-58, 16 Abb.; Tulsa.
- MACHEL, H.G., MASON, R.A., MARIANO, A.N. & MUCCI, A. (1991): Causes und Emission of Luminescence in Calcite and Dolomite. - In: BARKER, C.E. & KOPP, O.C. [HRSG.]: Luminescence Microscopy: Quantitative and Qualitative Aspects, SEPM Short Course, **25**: 9-25, 12 Abb.; Dallas.
- MACK, G.H. & JAMES, W.C. (1992): Calcic paleosols of the Plio-Pleistocene Camp Rice and Palomas Formations, southern Rio Grande rift, USA. - Sed. Geol., **77**: 89-109, 8 Abb., 1 Tab.; Amsterdam.
- MACNAMARA, E.E. & USSELMAN, T. (1972): Salt Minerals in Soil Profiles and as Surficial Crusts and Efflorescences, Coastal Enderby Land, Antarctica. - Geol. Soc. Amer. Bull., **83**: 3145-3150, 3 Tab.; Boulder.
- MADSEN, B. (1995): Grundvandsstrømning og Stoftransport. - In: Nielsen, O.B. [Hrsg.]: Danmarks geologi fra Kridt til i dag, Us Geokompender, **1**: 171-191, div. Abb. u. Tab.; Aarhus.
- MAJOR, R.P. (1991): Cathodoluminescence in Post-Miocene Carbonates. - In: BARKER, C.E. & KOPP, O.C. [HRSG.]: Luminescence Microscopy: Quantitative and Qualitative Aspects, SEPM Short Course, **25**: 149-153; Dallas.
- MAGARITZ, M., KAUFMAN, A. & YAALON, D.H. (1981): Calcium carbonate nodules in soils: $^{18}O/^{16}O$ and $^{13}C/^{12}C$ ratios and ^{14}C contents. - Geoderma, **25**: 157-172, 5 Abb., 2 Tab.; Amsterdam, London, New York.
- MATTHEB, G. (1990): Die Beschaffenheit Des Grundwassers. - 2. Auflage, Lehrbuch der Hydrogeologie, **2**: 498 S., 139 Abb., 116 Tab.; Berlin, Stuttgart (Bornträger).
- MCBRIDE, E.F. & PAREA, G.C. (2001): Origin of highly elongate, calcite-cemented concretions in some Italian coastal beach and dune sands. - J. Sed. Res., **71** (1): 82-87, 10 Abb., 2 Tab.; Boulder.
- MCBRIDE, E.F., PICARD, M.D. & FOLK, R.I. (1994): Oriented concretions, Ionian coast, Italy: Evidence of groundwater flow direction. - J. Sed. Research, **A64** (3): 536-540, 10 Abb., 2 Tab.; Lawrence (U.S.A.).
- MCBRIDE, F., MILLIKEN, K.L., CAVAZZA, W., CIBIN, U., FONTANA, D., PICARD, M.D. & ZUFFA, G.G. (1995): Heterogenous Distribution of Calcite Cement at the Outcrop Scale in Tertiary Sandstones, Northern Apennines, Italy. - AAPG Bull., **79** (7): 1044-1063, 16 Abb., 3 Tab.; Boulder.
- MELCHIOR, S., MIEHLICH, G., STEINERT, B., BURGER, K., BERGER, K. & TÜRK, M. (1996): Dimensionierung von Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten (Kurzfassung). - BMBF-Verbundvorhaben Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen, Teilvorhaben **39**: 19 S., div. Abb. u. Tab.; Hamburg.
- MELCHIOR, S., STEINERT, B., BURGER, K. & BERGER, K. (1997): Einsatz von Kapillarsperren in Oberflächenabdichtungen. - Mitt. Inst. Grundbau Bodenmech. TU Braunschweig, **51**: 59-72, 5 Abb.; Braunschweig.
- MELIM, L.A., SWART, P.K. & MALIVA, R.G. (1995): Meteoric-like fabrics forming in marine waters: Implications for the use of petrography to identify diagenetic environments. - Geology, **23** (8): 755-758, 5 Abb.; Boulder.
- MERKEL, B. & SPERLING, B. (1996): Hydrogeochemische Stoffsysteme Teil I. - DVWK-Schriften, **110**: 288 S., div. Abb., 1 Anh.; Bonn.
- MEYER, K.D. (1982): Geologische Karte Niedersachsen 1:25.000 Erläuterungen zu Blatt Nr. 2524 Buxtehude. - 120 S., 22 Abb., 8 Tab., 7 Kt.; Hannover.
- MEYER, K.D. (1983a): Geologische Naturdenkmale im Landkreis Lüneburg. - Jb. Naturw. Verein Fstm. Lbg., **36**: 179-196, 6 Abb.; Lüneburg.

- MEYER, K.D. (1983b): Zur Anlage der Urstromtäler in Niedersachsen. - *Z. Geomorph. N.F.*, **27** (2): 147-160, 3 Abb.; Berlin, Stuttgart.
- MEYER, K.D. (1997): Schutzwürdige Zeugnisse der Eiszeiten in Niedersachsen. - LOOK, E.R. [Hrsg.]: *Geotopschutz und seine rechtlichen Grundlagen*, Veröffentl. Nds. Akademie der Geowissenschaften, **12**: 98-100, 8 Taf.; Hannover.
- MEYER, K.D. (in Vorbereit.): Geologische Karte Niedersachsen 1:25.000 Erläuterungen zu Blatt Nr. 2730 Bleckede. - Hannover.
- MOORE, C.H. (1989): Carbonate Diagenesis and Porosity. - *Dev. Sed.*, **46**: 338 S., div. Abb. und Tab.; Amsterdam (Elsevier).
- MOZLEY, P.S. & DAVIS, J.M. (1996): Relationship between oriented calcite concretions and permeability correlation structure in an alluvial aquifer, Sierra Ladrones Formation, New Mexico. - *J. Sed. Research*, **66** (1): 11-16, 7 Abb.; Tulsa (U.S.A.).
- MÜLLER, G. (1896): Glaciale Ablagerungen im südlichen Hannover und am nördlichen Harzrande. - *Z. dt. geol. Ges.* **48**: 431-434; Berlin.
- MÜLLER, G. (1971): "Gravitational" cement: an indicator for the vadose zone of the subaerial diagenetic environment. - In: BRICKER, O.P. [Hrsg.]: *Carbonate Cements*, Johns Hopkins Univ. Studies in Geology, **19**: 301-302, 1 Abb.; Baltimore, London (Johns Hopkins).
- MÜLLER, G. & GASTNER, M. (1971): The „Karbonat-Bombe“, as simple device for the determination of the carbonate content in sediments, soils, and other materials. - *N. Jb. Min.*, **1971** (10): 466-469 1 Abb.; Stuttgart.
- MÜLLER, G. & KEILHACK, K. (1922): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern Blatt Lüneburg. - 3. Aufl.: 60 S., div. Abb. u. Tab., 1 Kt.; Berlin. [Bl. 2728]
- MUNNECKE, A. & WESTPHAL, H. & REIJMER, J.J.G. & SAMTLEBEN, C. (1997): Microspar development during early marine burial diagenesis: a comparison of Pliocene carbonates from the Bahamas with Silurian limestones from Gotland (Sweden). - *Sedimentology*, **44**: 977-990, 5 Abb.; Oxford, London.
- MURAWSKI, H. & MEYER, W. (1998): Geologisches Wörterbuch. – 10. Aufl.: 278 S., 82 Abb., 7 Tab.; Stuttgart (Enke).
- NAUMANN, E. (1913-15): Geologische Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Blatt Rinteln: 1 Kt.; Berlin. [TK3820]
- NAUMANN, E. (1927a): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Blatt Eldagsen, Nr. 2088: 43 S., 1 Abb., 1 Taf.; Berlin. [TK3823]
- NAUMANN, E. (1927b): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Blatt Hessisch-Oldendorf, Nr. 2246: 43 S., 1 Abb., 1 Taf.; Berlin. [TK3821]
- NAUMANN, E. & BURRE, O. (1927): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Blatt Hameln, Nr. 2087: 43 S., 1 Abb., 1 Taf.; Berlin. [TK3822]
- NEUMANN, H. (1933): Die Gliederung des Diluviums der Altmoränenlandschaft Schleswig-Holsteins und der südlich angrenzenden Gebiete. - *Schriften Geol.-Paläont. Institut Kiel*, **1**: 92 S., 18 Abb., 4 Tab., 1 Kt.; Kiel.
- NEUMEIER, U. (1999): Experimental modelling of beachrock cementation under microbial influence. – *Sed. Geol.*, **126** (1-4): 35-46, 7 Abb.; Amsterdam.
- NEUSER, R.D. (1988): Zementstratigraphie und Kathodolumineszenz des Korallenoolith (Malm) im Südniedersächsischen Bergland. – *Bochumer geol. geotechn. Arb.*, **32**: 172 S., 40 Abb., 6 Tab., 5 Taf.; Bochum.
- NORDMANN, V. (1941): Exkursion til Fredericia - og Vejleegnen. - *Med. Dansk Geol. Forening*, **10** (1): 52-58, 3 Abb.; Kobenhavn.
- ORME, G.R. & BROWN, W.W.M. (1963): Diagenetic fabrics in the Avonian Limestones of Derbyshire and North Wales. - *Proceed. Yorkshire Geol. Soc.*, **34** (1): 51-66, 6 Abb.; Hull.
- ORTOLEVA, P.T. (1994): *Geochemical Self-organization*. - 411 S., div. Abb. u. Tab.; New York (Oxford University Press).
- PAGE, N.R. (1971): Subglacial Limestone Deposits in the Canadian Rocky Mountains. - *Nature*, **229**: 42-43; London.
- PAVICEVIC, M.K. & AMTHAUER, G. [Hrsg.] (2000): *Physikalisch – chemische Untersuchungsmethoden in den Geowissenschaften Band 1 Mikroskopische, analytische und massenspektrometrische*

- Methoden. – 252 S., 131 Abb., 15 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- PERSCHKE, A. (1993): Karbonatische Teilzementation in pleistozänen Lockersedimenten Nordwestdeutschlands. - 120 S., 58 Abb., 2 Kt.; Hannover (unveröff. Diplomarbeit).
- PIRRIE, D. (1987): Orientated calcareous concretions from James Ross Island, Antarctica. - *Brit. Antarc. Surv. Bull.*, **75**: 41-50, 9 Abb.; Cambridge (U.K.).
- PREUSS, H. & VINKEN, R. & VOSS, H.H. (1991): Symbolschlüssel Geologie. - 328 S., 1 Abb., 21 Tab.; Hannover.
- PRIES, P. (1991): Fundbericht Nagelfluh-Bildung, Kalkverkittung. - *Geschiebesammler*, **25** (1-2): 41-42, 1 Abb.; Hamburg.
- RABENHORST, M.C. & WILDING, L.P. & WEST, L.T. (1984): Identification of Pedogenic Carbonates Using Stable Carbon Isotop and Microfabric Analyses. - *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **48**: 125-132, 5 Abb., 3 Tab.; Madison (U.S.A.).
- RAISWELL, R. (1971): The growth of Cambrian and Liassic concretions. - *Sediment.*, **17**: 147-171, 7 Abb.; Amsterdam.
- REICHHHELM, K. (1908): Die Garreyer Rommel und das Schollengestein bei Niemegek. - *Brandenburgia*, **16**: 70-71, 3 Abb.; Berlin.
- REIJERS, T.J.A. & HSÜ, K.J. (1986): Manual of carbonat sedimentology a lexicographical approach. - 302 S., div. Abb. u. Tab.; London (Academic Press).
- REINHOLD, C. (1996): Prozesse, Steuerung und Produkte komplexer Diagenese-Sequenzen in süddeutschen Malm-Karbonaten. - unveröffentl. Diss. TU Berlin: 255 S., 43 Abb., 21 Tab., 28 Taf.; Berlin.
- REINHOLD, C. (1998a): Ancient helictites and the formation of vadose crystal silt in Upper Jurassic carbonates (Southern Germany). - *Journ. Sediment. Res.*, **68** (3): 378-390; Tulsa.
- REINHOLD, C. (1998b): Multiple episodes of dolomitization and dolomite recrystallisation during shallow burial in Upper Jurassic shelf carbonates: eastern Swabian Alb, southern Germany. - *Sed. Geol.*, **121**: 71-95, 14 Abb., 1 Tab.; Amsterdam.
- RICHTER, D.K. & ZINKERNAGEL, U. (1981): Zur Anwendung der Kathodolumineszenz in der Karbonatpetrographie. - *Geol. Rundschau*, **70**: 1276-1302, 2 Abb., 1 Tab., 4 Taf.; Stuttgart.
- ROHDE, P. (1983): Geologische Karte von Niedersachsen 1:25.000 Erläuterungen zu Blatt Nr. 3724 Pattensen. - 192 S., 43 Abb., 31 Tab., 2 Taf., 8 Kt.; Hannover.
- RÖHM, H. (1985): Bau und Zusammensetzung Saale-Eiszeitlicher Sedimentkörper im Raum Hausberge-Veltheim/Weser. - 107 S., 53 Abb., 7 Anl.; Hannover (unveröffentl. Dipl.-Arbeit u. -Kartierung).
- RÖHM, H. & GROETZNER, J.P. (1986): Mittelterrasse der Weser und Drenthe-Grundmoräne. - In: ROHDE, P. [HRSG.]: *Geo-Umwelt im Bergland-Quartär zwischen oberer Weser und Leine*. - 23. Deuqua Tag., Exkursionen B: 7-8, 1 Abb.; Hannover.
- ROSS, P.H. (1985): Sicherheitsuntersuchungen des Kalkberges und der Höhle von Bad Segeberg. - 52. Tag. Arb.-gem. NW-Dt. Geol.: 48-49; Kiel.
- RUNNELS, D.D. (1969): Diagenesis, chemical sediment, and the mixing of naturel waters. - *J. Sed. Pet.*, **39** (3): 1188-1201, 7 Abb., 1 Tab.; Tulsa (U.S.A.).
- SALMI, M. (1959): Imatra stones in the glacial clay of Vuolenkoski. - *Bull. Commission Geol. Finlande*, **186**: 27 S., 8 Abb.; Helsinki.
- SAMUELSSON, L. (1964): Nya Fynd Av Subglacialt Bildade Kalkstenar. - *Geol. För. Stockholm Förhandl.*, **85**: 414-427, 9 Abb.; Stockholm.
- SAVARD, M.M. & VEIZER, J. & HINTON, R. (1995): Cathodoluminescence at low Fe and Mn concentrations: a SIMS study of zones in natural calcites. - *J. Sed. Res.*, **A65** (1): 208-213, 4 Abb., 1 Tab.; Tulsa.
- SAVELLI, C. & WEDEPOHL, K.H. (1969): Geochemische Untersuchungen an Sinterkalken (Travertinen). - *Contr. Min. Petrol.*, **21**: 238-256, 1 Abb., 7 Tab.; Berlin, Heidelberg, New York.
- SCHILLINGS, R.W. (1994): Rezente Beachrockbildung des marin-meteorischen Mischbereiches in Strandgrundwässern Griechenlands. - *Bochumer Geol. u. Geotechn. Arb.*, **42**: 133 S., 48 Abb., 7 Tab., 5 Taf.; Bochum.
- SCHIEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1998): *Lehrbuch der Bodenkunde*. - 14. Aufl., 494 S., div. Abb. u. Tab.; Stuttgart (Enke).
- SHELLMANN, G. (1994): Die Talentwicklung der unteren Oberweser im jüngeren Quartär. - In: SHELLMANN, G. [HRSG.]: *Beiträge zur jungpleistozänen und holozänen Talgeschichte im deutschen Mittelgebirgsraum und*

- Alpenvorland, Düsseldorfer Geogr. Schr., **34**: 1-56, 22 Abb., 5 Tab.; Düsseldorf.
- SCHOLANDER, P.F., HEMMINGSEN, E.A., COACHMAN, L.K. & NUTT, D.C. (1961): Composition of gas bubbles in Greenland icebergs. - *J. Glaciol.*, **3** (29): 813-822, 7 Abb., 2 Tab.; Cambridge.
- SCHREINER, A. (1992): Einführung in die Quartärgeologie. - 257 S., 113 Abb., 14 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- SCHROEDER, H. (1919): Süßwasserkalke, Hercynschotter und Glazialschotter am Huy und Fallstein. - *Jb. Preuß. Geol. Landesanstalt*, **40** (II, 1): 1-45, div. Tab.; Berlin.
- SCHROEDER, J.H. (1972): Fabrics and sequences of submarine carbonate cements in Holocene Bermuda cup reefs. - *Geol. Rdsch.*, **61**: 708-730, 12 Abb.; Stuttgart.
- SCHROEDER, J.H. (1973): Submarine and vadose cements in Pleistocene Bermuda reef rock. - *Sediment. Geol.*, **10** (3): 179-204, 10 Abb.; Amsterdam.
- SCHRÖDER, P. (1988): Aufbau und Untergliederung des Niederterrassenkörpers der Unterelbe. - *Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover*, **27**: 119 S., 55 Abb., 4 Tab.; Hannover.
- SCHROEDER-LANZ, H. (1964): Morphologie des Estetales. - *Hamburger Geogr. Studien*, **18**: 167 S., 45 Abb.; Hamburg.
- SCHULZ, J. (1994): Quartärgeologische Kartierung im Süden der Topographischen Karte 1:25000 2729 Scharnebeck Landkreis Lüneburg. - 82 S., 10 Abb., 3 Anl.; Braunschweig (unveröffentl. Dipl. Kart. TU Braunschweig).
- SEHGAL, J.L. & STOOPS, G. (1972): Pedogenic calcite accumulation in arid and semi-arid regions of the Indo-Gangetic alluvial plain of erstwhile Punjab (India) - their morphology and origin. - *Geoderma*, **8**: 59-72, 8 Abb.; Amsterdam, London, New York.
- SEILACHER, A. (2001): Concretion morphologies reflecting diagenetic and epigenetic pathways. - *Sed. Geol.*, **143**: 41-57, 15 Abb.; Amsterdam.
- SELLÉS-MARTINÉZ, J. (1996): Concretion morphology, classification and genesis. - *Earth-Sci. Review*, **41**: 177-210, 12 Abb., 5 Tab.; Amsterdam.
- SERAPHIM, E.T. (1972): Wege und Halte des saalezeitlichen Inlandeises zwischen Osning und Weser. - *Geol. Jb.*, **A3**: 85 S., 14 Abb., 6 Tab.; Hannover.
- SHARP, M., TISON, J.L. & FIERENS, G. (1990): Geochemistry of subglacial calcites: implications for the hydrology of the basal water film. - *Arct. Alpine Res.*, **22** (2): 141-152, 7 Abb., 3 Tab.; Boulder.
- SLETTEN, R.S. (1988): The formation of pedogenic carbonates on Svalbard: The influence of cold temperatures and freezing. - In: Senneset, K. [Hrsg.]: *Permafrost*, 5. Intern. Conf. *Permafrost Proc.*, **1**: 467-472, 5 Abb., 4 Tab.; Trondheim).
- SOLOMON, D.K. & CERLING, T.E. (1987): The Annual Carbon Dioxide Cycle in a Montane Soil: Observations, Modeling, and Implications for weathering. - *Water Resour. Res.*, **23** (12): 2257-2265, 11 Abb.; Washington.
- SOUCHEZ, R.A. & LEMMENS, M. (1985): Subglacial carbonate deposition: An isotopic study of a present-day case. - *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **51**: 357-364, 2 Abb.; Amsterdam.
- STEINER, W. (1996): Die Parkhöhle von Weimar. - *Stiftung Weimarer Klassik [Hrsg.]*: 62 S., 38 Abb.; Weimar.
- STRASSER, A. & DAVAUD, E. (1986): Formation of Holocene limestone sequences by progradation, cementation, and erosion: two examples from the Bahamas. - *J. Sed. Pet.*, **56** (3): 422-428, 8 Abb.; Tulsa.
- STRONG, G.E. & GILES, J.R.A. & WRIGHT, V.P. (1992): A Holocene calcrete from North Yorkshire, England: implications for interpreting palaeoclimates using calcretes. - *Sedimentology*, **39**: 333-347, 13 Abb.; Oxford, London, Edinburgh.
- SUGITANI, K. & SUGISAKI, R. & ADACHI, M. (1995): Authigenic carbonate concretions and host shales from the Shimanto Belt, southwestern Japan: Implications for carbonate precipitation. - *J. Sed. Research*, **A65** (3): 531-540, 9 Abb., 4 Tab.; Lawrence (U.S.A.).
- SWETT, K. (1974): Calcrete crusts in an arctic permafrost environment. - *Am. J. Sci.*, **274**: 1059-1064, 3 Abb.; New Haven.
- TAYLOR, J.C.M. & ILLING, L.V. (1969): Holocene Intertidal Calcium Carbonate Cementation, Qatar, Persian Gulf. - *Sed.*, **12**: 69-107, 3 Abb., 2 Tab.; Amsterdam.
- TARDY, Y. & MONNIN, C. (1983): Recherches sur les mécanismes du concrétionnement. Coefficients d'activité des ions, solubilité des

- sels et de la silice dans les pores de petite taille. - *Bull. Minéral.*, **106**: 321-328, 1 Abb., 5 Tab.; Paris.
- TENHAVE, A. & HEYNEN, W. (1985): Cathodoluminescence activation and zonation in carbonate rocks: an experimental approach. - *Geol. Mijnb.*, **64**: 297-310, 5 Abb.; Amsterdam.
- THEAKSTONE, W.H. (1981): Concretions in glacial sediments at Seglvatnet, Norway. - *J. Sed. Pet.*, **51** (1): 191-196, 4 Abb.; Tulsa (U.S.A.).
- THIEM, W. (1972): Geomorphologie des westlichen Harzrandes und seiner Fußregion. - *Jb. geogr. Ges. Hannover, Sonderheft 6*: 270 S., 46 Abb., 8 Kt., 11 Taf.; Hannover.
- TIETZ, G.F. (1988): Zur Genese rezenter Karbonatbildungen in Dolomithöhlen Frankens. - *Karst und Höhle*, **1988**: 7-80, 37 Abb., 18 Taf.; München.
- TUCKER, M. (1985): Einführung in die Sedimentpetrologie. - 265 S., 219 Abb., 20 Tab.; Stuttgart (Enke).
- TUCKER, M. (1996): Methoden der Sedimentologie. - 366 S., 223 Abb., 38 Tab.; Stuttgart (Enke).
- TUCKER, M.E. & WRIGHT, V.P. (1990): Carbonate Sedimentology. - 482 S., div. Abb. u. Tab.; Oxford (Blackwell).
- UEBERSOHN, D. (1990): Aufbau und Alter pleistozäner Lockersedimente bei Bornhausen (Nord-Westliches Harzland). - 57 S., 21 Abb., 9 Tab.; Hannover [unveröff. Diplomarbeit].
- VALETON, I. & KHOO, F. (1980): Die Drenthe-I-Moräne von Hamburg-Bahrenfeld Petrographisch-geochemische Bearbeitung. - *Verh. naturwiss. Ver. Hamburg, (NF) 23*: 19-37, 6 Abb., 4 Tab.; Hamburg.
- VOGT, T. (1991): Cryogenic Physico-chemical Precipitations: Iron, Silica, Calcium Carbonate. - *Permafrost and Periglacial Processes*, **1**: 283-293, 7 Abb.; Chichester.
- WALDERHAUG, O. & BJØRKUM, P.A. (1998): Calcite Cement in shallow marine sandstones: growth mechanisms and geometry. - *Spec. Publ. int. Ass. Sediment.*, **26**: 179-192, 4 Abb., 10 Taf.; Cambridge.
- WALKDEN, G.M. & BERRY, J.R. (1984): Syntaxial overgrowths in muddy crinoidal limestones: cathodoluminescence sheds new light on an old problem. - *Sedimentology*, **31**: 251-267, ; Oxford.
- WALTHER, H.W. (1993): Der steinerne Wald von Warna, Bulgarien - Tertiäre Steinsäulen ungeklärter Genese. - *Z. Förderer des Bergbaus und des Hüttenwesens TU Berlin, fbh*, **1/93**: 14-19, 4 Abb.; Berlin.
- WARD, W.C. (1975): Petrology and Diagenesis of Carbonate Eolianites of Northeastern Yucatan. - *AAPG Stud. Geol.*, **2**: 500-571, 35 Abb., 5 Tab.; Tulsa.
- WEERT, F.H.A.V., GIJSSEL, K.V., LEIJNSE, A. & BOULTON, G.S. (1997): The effects of Pleistocene glaciations on the geohydrological system of Northwest Europe. - *J. Hydrology*, **195**: 137-159, 10 Abb., 1 Tab.; Amsterdam.
- WEI, C. & ORTOLEVA, P. (1990): Reaction from fingering in carbonate-cemented sandstones. - *Earth-Sci. Reviews*, **29**: 183-198, 13 Abb., 1 Tab., 1 Anh.; Amsterdam (Elsevier).
- WEIDENBACH, F. (1974): Über Nagelfluh, narbige und hohle Gerölle in pleistozänen Ablagerungen. - *Heidelberger Geogr. Arb.*, **40**: 331-340, 6 Abb.; Heidelberg.
- WEISE, O. (1983): Das Periglazial. - 199 S., 97 Abb., 6 Tab.; Berlin, Stuttgart (Borntraeger).
- WELLMANN, P.L. (1990): Aufbau und Genese des Saale-eiszeitlichen Sedimentkörpers von Krankenhagen-Möllenbeck. - 84 S., 45 Abb., 1 Tab., 13 Anl.; Hannover (unveröffentl. Dipl.-Arbeit).
- WELLMANN, P.L. (1998): Kies-/Sandkörper im Wesertal zwischen Rinteln und Porta Westfalica. - *Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover*, **38**: 203-212, 6 Abb.; Hannover.
- WERMBTER, H. (1891): Der Gebirgsbau des Leinethals zwischen Greene und Banteln. - *N. Jb. Min. Geol. Pal. Beil.*, **7**: 246-294; Stuttgart.
- WERNER, W. (2000): Regional-planning-related exploration for non-metallic minerals: a case history from southwestern Germany. - *Z. angew. Geol.*, **46** (1): 3-14, 11 Abb., 1 Tab.; Stuttgart.
- WIGLEY, T.M.L. & PLUMMER, L.N. (1976): Mixing of carbonate waters. - *Geochimica Cosmochimica Acta*, **40**: 989-995, 4 Abb., 1 Tab.; Oxford, London, New York, Paris.
- WILKE, H. (1981): Postsedimentäre Veränderungen kaltzeitlicher Sedimente im Hamburger Raum. - *Verh. naturwiss. Ver. Hamburg, (NF) 24 (2)*: 185-198, 7 Abb.; Hamburg.
- WILKINSON, M. (1989): Evidence for surface reaction-controlled growth of carbonate concretions in shales. - *Sediment.*, **36**: 951-953, 1 Abb.; Oxford, London, Edinburgh, Boston, Melbourne.

- WILKINSON, M. (1991): The concretions of the Bearraig Sandstone Formation: geometry and geochemistry. - *Sedimentology*, **38**: 11 Abb., 2 Tab.; Amsterdam.
- WILKINSON, M. & DAMPIER, M.D. (1990): The rate of growth of sandstone-hosted calcite concretions. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**: 3391-3399, 8 Abb., 1 Tab.; New York, Oxford, Beijing, Frankfurt.
- WINTER, S. (1998): Petrographie und Interngefüge Drenthe-zeitlicher Grundmoränenkörper im niedersächsischen und sachsen-anhaltischen Bergland zwischen Vlotho (Weser) und Hoym (nordöstliches Harzvorland). - 70 S., 38 Abb., 2 Tab., 6 Anh.; Hannover (unveröffentl. Dipl.-Arbeit).
- WOLDSTEDT, P. & HARBORT, E. (1931): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern Blatt Schöppenstedt. - 64 S., div. Abb. und Tab.; Berlin. [TK25 3830]
- WORTMANN, H. (1968): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25.000 Erläuterung zu Blatt 3619 Petershagen. - 122 S., 30 Abb., 9 Tab., 7 Taf.; Krefeld.
- WORTMANN, H. (1971): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25.000 Erläuterungen 3617 Lübbecke und 3618 Hartum. - 213 S., 24 Abb., 13 Tab., 3 Taf.; Krefeld.
- YAALON, D.H. (1967): Factors affecting the lithification of eolianite and interpretation of its environmental significance in the coastal plain of Israel. - *J. Sed. Pet.*, **37**: 1189-1199, 11 Abb.; Tulsa (U.S.A.).
- NLVA (1995): Topographische Karte 1:25.000: Nr. 2729 Scharnebeck: 1 Kt.; Hannover.
- NLVA (1984): Topographische Karte 1:25.000: Nr. 2730 Bleckede: 1 Kt.; Hannover.
- NLVA (1985): Topographische Karte 1:25.000: Nr. 3820 Rintel: 1 Kt.; Hannover.
- NLVA (1995): Topographische Karte 1:25.000: Nr. 3821 Hessisch Oldendorf: 1 Kt.; Hannover.
- NLVA (1996): Topographische Karte 1:25.000: Nr. 3822 Hameln: 1 Kt.; Hannover.
- NLVA (1992): Topographische Karte 1:25.000: Nr. 3823 Coppenbrügge: 1 Kt.; Hannover.
- NLVA (1992): Topographische Karte 1:25.000: Nr. 3824 Elze: 1 Kt.; Hannover.
- NLVA (1987): Topographische Karte 1:25.000: Nr. 3924 Gronau (Leine): 1 Kt.; Hannover.
- NLVA (1979): Topographische Karte 1:25.000: Nr. 4025 Freden/Leine: 1 Kt.; Hannover.
- NLVA (1997): Topographische Karte 1:25.000: Nr. 4026 Lamspringe: 1 Kt.; Hannover.
- NLVA (1997): Topographische Karte 1:25.000: Nr. 4027 Lutter am Barenberge: 1 Kt.; Hannover.
- NLVA (1997): Topographische Karte 1:25.000: Nr. 4126 Bad Gandersheim: 1 Kt.; Hannover.

10.2 Verwendete Topographische Karten

KATASTERAMT ALFELD

- KATASTERAMT ALFELD (1996a): Deutsche Grundkarte 1:5.000 (DGK5) 4025/16 Wispenstein Süd. 1 Kt.; Alfeld.
- KATASTERAMT ALFELD (1996b): Deutsche Grundkarte 1:5.000 (DGK5) 4025/17 Meimerhausen Ost. 1 Kt.; Alfeld.
- KATASTERAMT ALFELD (1996c): Deutsche Grundkarte 1:5.000 (DGK5) 4025/21 Röhnkrug. 1 Kt.; Alfeld.
- KATASTERAMT ALFELD (1996d): Deutsche Grundkarte 1:5.000 (DGK5) 4025/22 Freden West. 1 Kt.; Alfeld.

NLVA [NIEDERSÄCHSISCHES LANDESVERWALTUNGSAMT-LANDESVERMESSUNG]

- NLVA (1984): Topographische Karte 1:25.000: Nr. 2524 Buxtehude: 1 Kt.; Hannover.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Jörg Elbracht
Geburtsdatum: 14.01.1965
in: Hannover
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: verheiratet

Ausbildung

1971 Einschulung an der Grundschule Bad Neuenahr
1984 Abitur an der Helene-Lange-Schule, Hannover
1986 - 1993 Diplom-Studiengang Geologie am Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Hannover,
Dipl.-Arbeit (1992): Das Neogen in der westlichen Umgebung von San Miguel de Salinas (Prov. Alicante / SE Spanien) und die Genese der Gipshorizonte des Messinium.
Abschluß: Diplom-Geologe

Beruflicher Werdegang

1987 - 1991 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Hannover
1992 Wissenschaftliche Hilfskraft im Institut Für Angewandte Hydrogeologie GbR
1993 - 2000 Wissenschaftlicher Angestellter am Institut Für Angewandte Hydrogeologie GbR
seit 2000 Wissenschaftlicher Angestellter am Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung

Anhang

- Anhang I: Abbildungs- und Tabellenverzeichnis
- Anhang II: Verwendete Abkürzungen / Legende zu den Profilen
- Anhang III: Vorkommen karbonatischer Zementation pleistozäner Lockersedimente NW-Deutschlands
- Anhang IV: Untersuchte Aufschlüsse
- Anhang V: Übersicht der Zementationsformen
- Anhang VI: Ergebnisse der zementpetrographischen Untersuchungen
- Anhang VIII: Ergebnisse der Untersuchungen mit der Elektronenstrahl-Mikrosonde

Anhang I

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis:

Abbildungen:

Abb. 1a: Übersichtskarte der erfassten Karbonatzementationsvorkommen in NW-Deutschland: Darstellung lokalisierter Vorkommen. Weiße Zahlen auf schwarzem Grund benennen die untersuchten Vorkommen.	10
Abb. 2: Unmaßstäbliche Darstellung des Übergangs zwischen zementierten und unzementierten Partien in Lockersedimenten bei Konkretionen (a.) bzw. Massenzementationskörpern (b.). Oben: Dünnschliffzeichnung, unten: Schematische Darstellung einer Konkretion bzw. eines Massenzementationskörpers, schwarz = Offener Porenraum, grau = Detritus, weiß = Karbonatzement.	13
Abb. 3: Schematische, unmaßstäbliche Darstellung von Konkretionstypen.	15
Abb. 4: Schematische, unmaßstäbliche Darstellung kugeligter Konkretionen: Aufwachsen auf a. Massenzementationskörper und b. Zapfen; Zusammenwachsen von Konkretionen zu plattigen (c.) oder wolkigen (d.) Zementationskörpern.	16
Abb. 5: Schematische Darstellung von typischem Karbonatzement der vadosen Zone. 1: Meniskuszement, 2: Gravitationszement, 3: Detritus, 4: offener Porenraum (verändert nach MOORE 1989).	24
Abb. 6: Schematische Darstellung von typischem Karbonatzement der phreatischen Zone. 1: Isopachenzement, 2: Detritus, 3: offener Porenraum (verändert nach MOORE 1989).	25
Abb. 7: Schemazeichnung eines durch Blockkalzit zementierten Bereiches. Durch vereinzelt vorkommende stärkere Verunreinigungen (Pfeile) in den ansonsten einschlussarmen Blockkalzit-Kristallen (weiß) werden Menisken zwischen Körnern (grau) nachgezeichnet (schwarz = offener Porenraum). Beispiel aus dem Aufschluss Freden, Aufschlussbereich II-2.	31
Abb. 8: Schematische, unmaßstäbliche Darstellung von Dachzement. Grau: Detritus, schwarz: Kalzit, weiß: Offener Porenraum.	32
Abb. 9: In einer Rhizokonkretion (R) kommt Kalzit als weißer Saum um eine abgestorbene Wurzel vor, die als schwarzer Zentralkanal erkennbar ist. Daneben gibt es auch noch lebende Wurzeln (W). Aufschluss Breetze.	47
Abb. 10: Zusammenfassendes Übersichtsdiagramm zu Karbonatmobilisierung und -neubildung in Kalt- und Warmzeiten. Verändert nach FAIRCHILD et al. (1994).	48
Abb. 11: Schematische Darstellung von diffusivem Lösungstransport, der zum Wachstum von kugeligen Konkretionen führt (nach BERNER 1968, WILKINSON 1989).	49
Abb. 12: Richtungsänderung von Stromlinien (Pfeile) in geschichteten Systemen: Die Durchlässigkeit von Schicht 1 ist um den Faktor 10 größer als von Schicht 2 (verändert nach HUBBERT 1940, in FREEZE & CHERRY 1979).	53
Abb. 13: Idealisierendes, unmaßstäbliches Genesemodell von Zapfen und Massenzementationskörpern im Aufschluss Freden, Aufschlussbereich II-3 (unten, grau unterlegt) durch laminare Strömung im Sand bzw. durch turbulente Strömung im Kies (oben, blaue Linien = idealisierte Strömungsbahnen).	54
Abb. 15: Wassergehalts-Wasserspannungs-Charakteristiken (pF-Kurven, oben) und ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen (ku-Kurven, unten) von Entwässerungsschicht (=Kapillarschicht) und Kapillarsperre (= Kapillarblock, aus MELCHIOR et al. 1996).	57
Abb. 14: Diagenesemodell zur Entstehung von hängenden Zapfen und Massenzementationskörpern am Beispiel des Aufschlusses Holzen. Links jeweils die schematischen geologisch / hydrogeologischen Schnitte, rechts die schematische Darstellung zementpetrographischer Befunde. Rot / Orange = Produkte vadoser Zementation, Grün = Produkte phreatischer Zementation, blaue Pfeile = Sickerwasser.	56
Abb. 16: Schematisches, unmaßstäbliches Genesemodell für die Zementationskörper im Aufschluss Ödishausen. Unterhalb der vadosen Zone in der sich Sickerwasser etwa vertikal bewegte (gepunktete Linie), folgte die Entwässerungsschicht mit pseudo-phreatischen Bedingungen (blau), in der Wasser entsprechend des Schichteinfallens oberhalb der Kapillarsperre abströmte (durchgezogene Linie).	60
Abb. 17: Schematische Darstellung der hydrogeologischen Situation, die zur Bildung der Konkretionshorizonte V-2 und V-3 im Aufschlussbereich V, Aufschluss Freden führten. Im oberen, schwebenden Grundwasser-Stockwerk fand die Zementation unter pseudo-phreatischen Bedingungen statt.	61
Abb. 18: Schematisches Modell einer hydrogeologischen Situation, in der sich die kugeligen Konkretionen im diskontinuierlichen Permafrost in einem Talik (blau) gebildet haben können, der keinen hydraulischen Kontakt zum Vorfluter (Elbe) hatte.	62
Abb. 19: Unmaßstäbliches, stark vereinfachtes paläohydrogeologisches Modell zur Bildung der Zementationskörper im Aufschluss Krankenhagen (a.: stark verändert nach WELLMANN 1998).	63
Abb. 20: Aufschluss Freden, Aufschlussbereich IV: Zusammenfassende Darstellung der wahrscheinlichen ehemaligen Verbreitung von Zapfengruppen (grau), die beim Abbau anfielen und der Grundwasser-Abstromrichtung (blauer Pfeil), die am in situ-Vorkommen rekonstruiert wurde.	65
Abb. 21: Unmaßstäbliches hydrogeologisches Modell. Im Aufschluss Freden (Aufschlussbereich IV) zeichnen liegende und gebogene Zapfen Strömungslinien des Grundwassers nach, dass oberhalb gefrorener Partien abströmte bzw. vor ihnen nach unten abgelenkt wurde.	65
Abb. 22: Schematisches Genesemodell zur Zapfenbildung im Aufschlussbereich VIII-1 (Aufschluss Freden). Zwischen Partien, in denen der Porenraum eisgefüllt ist, bewegt sich Sickerwasser über Diskontinuitäten im Bodeneis nach unten und führt zu Zementation in der vadosen Zone.	66

Abb. 23: Modell zur Bildung stratiformer Zementationskörper (grauer Bereich) über einem Bereich, in dem der Porenraum durch Eis plombiert ist. Der Wassertransport erfolgte bevorzugt über steilstehende Abschiebungen.....	66
Abb. 24: REM-Aufnahme von Isopachenzement, bei dem die Kristallkanten durch Anlösung rundlich, stumpf korrodiert sind. Bildbreite entspricht etwa 40 µm, Aufschluss Coppenbrügge (Horizont d).	67
Abb. 25: Zapfen mit rauen, leicht absandenden Oberflächen (Bild links) bzw. mit relativ glatten, kompakten Oberflächen (Bild rechts). Aufschluss Freden, Aufschlussbereich IV, links: oberer Horizont, rechts: unterer Horizont.	67
Abb. 26: Schematische, unmaßstäbliche Darstellung des Sickerwassertransportes, der zur Wiederanlösung der Konkretionen im Aufschlussbereich V (Aufschluss Freden) führte. Angegeben sind ermittelte Gesamtkarbonatgehalte des Lockersedimentes.	68
Abb. 27: Schematisches, hydraulisches Modell der Grundwasser-Strömungs-Verhältnisse, die zur Bildung von diskusförmigen Konkretionen und flachen Zapfen führten (blaue Pfeile = Grundwasser-Stromlinien, schematisch). Rechts: Hypothetische Kurve der Lösungskonzentration, gepunktete Linie: Sättigungskonzentration in Bezug auf CaCO ₃	71
Abb. 28: Schematisches Modell zur Bildung von Massenzementationskörpern in phreatischem Milieu	73
Abb. 29: Schema der Basis der „Beckenablagerungen“ mit den hier auftretenden diskusförmigen Konkretionen. I: qM/mS-gS (k _r -Wert 5,4 x 10 ⁻⁴ m/s), II: qD/fS, u, ms2 (k _r -Wert geschätzt: 10 ⁻⁵ m/s), III: qD/wl (T-U) (k _r -Wert geschätzt: 10 ⁻⁹ m/s), IV: qD/wl (fS-U) (k _r -Wert geschätzt: 10 ⁻⁶ m/s). Legende s. Anh. 2.	76
Abb. 30: Zusammenfassende Übersicht der hydrogeologischen Bedingungen, die während der Karbonatzementation herrschten. Legende s. Anh. 2.....	76
Abb. 31: Zusammenfassende Übersicht der Bildungsbedingungen, die während der Karbonatzementation in den vier Horizonten herrschten. Legende s. Anh. 2.....	78
Abb. 32: Übersicht der Massenzementationskörper, die in drei Horizonten um bzw. unterhalb eines hängenden Zapfens entstanden. Legende s. Anh. 2.	78
Abb. 33: Schematisches, hydrogeologisches Modell zur Bildung des höheren Teils des Massenzementations-Horizontes c. In der vadosen Zone bewegt sich Sickerwasser deszendend (gepunktete Pfeile). Über dem bereits bestehenden Teil des tiefsten Massenzementations-Horizontes (grau) akkumuliert Sickerwasser und schafft pseudo-phreatische Bedingungen (blau), in denen sich Isopachenzement bildet.	79
Abb. 34: Schematische Darstellung der hydrogeologischen Situation, die zur Bildung von stratiformen Zementationskörpern (oben) und diskusförmigen Konkretionen (drei Horizonte unten) führte.	80
Abb. 35: Schematische Darstellung zur hydrogeologischen Situation, die zur Bildung pseudo-phreatischer Bereiche im Kies führte. Aus der Wechselfolge und von oben zusickerndes Wasser (Pfeile) führte oberhalb der Verwerfungsbahn partiell zu pseudo-phreatischen Bedingungen (blaue Bereiche) im ansonsten vadosen Milieu.....	81
Abb. 36: Zusammengesetzter, schematischer Schnitt des Aufschlussbereiches VIII: Zementationskörper (VIII-1 - VIII-6) gibt es in großer Formenvielfalt in verschiedenen Horizonten innerhalb der Schmelzwasserablagerungen.	85
Abb. 37: Aufschlussbereich VIII-2: Richtungsrose der Zapfenlängsachsen.	86
Abb. 38: Zusammenfassende Darstellung von rekonstruierten Grundwasser-Abstromrichtungen. Hellblaue Pfeile = Zementationsphase 2, Dunkelblaue Pfeile = Zementationsphase 3, gepunktete Linie / Pfeil = hydrogeologische Situation überwiegend substratgesteuert.....	87
Abb. 39: Übersicht der im Aufschluss Bornhausen vorkommenden Zementationskörper und deren Bildungsmilieus. Legende s. Anh. 2.	89
Abb. 40: Übersicht von 13 der 17 untersuchten Aufschlüsse, bei deren Untersuchung Hinweise auf Bildungszeiten gefunden wurden.	92

Tabellen:

Tab. 1: Stratigraphisches Gliderungsschema des Quartärs in NW-Deutschland (stark vereinfacht nach CASPERS et al. 1995).	6
Tab. 2: Zur Eichung der Elementmessungen verwendete natürliche Standards.	8
Tab. 3: Bereiche des nordeuropäischen Vereisungsgebietes mit nachgewiesenen Vorkommen karbonatischer Zementation pleistozäner Lockersedimente.....	12
Tab. 4: Vergleich der Klassifizierungskriterien für Zementationskörper von SELLÉS-MARTÍNEZ (1996) und den hier verwendeten.	14
Tab. 5: Definition der in dieser Arbeit deskriptiv eingesetzten Zementterminologie.	23
Tab. 6: Übersicht der in den untersuchten Aufschlüssen.....	40
Tab. 7: Übersicht der in den Konkretionen im Horizont a. vorkommenden Zementtypen.....	43
Tab. 8: Übersicht der aufschlusspezifischen Zementationsphasen. Fett hervorgehoben = phreatische Hauptzementationsphase	70
Tab. 9: Zusammenfassende Übersicht der in den zementierten Bereichen im Aufschlussbereich II vorkommenden Zementationsphasen. Hervorgehoben sind die Hauptzementationsphasen.....	82
Tab. 10: Substratspezifische Übersicht der in den Zementationsphasen 1 – 3 entstanden Zemente.....	88

Anhang II

Verwendete Abkürzungen nach „Symbolschlüssel Geologie“ (PREUSS et al. 1991):

Stratigraphie:

qO	Oberterrassen-Zeit
qe	Elster-Kaltzeit
qM	Mittelterrassen-Zeit
qs	Saale-Kaltzeit
qD	Drenthe-Stadium / Saale-Kaltzeit
qD ₁	älterer Drenthe-Vorstoß
qD ₂	jüngerer Drenthe-Vorstoß
qWA	Warthe-Stadium / Saale-Kaltzeit
qw	Weichsel-Kaltzeit

Genese:

Lol	Lößlehm
gf	glazifluviatil
f	fluviatil
b	Beckenablagerungen
fl	Fließerde
Lg	Geschiebelehm
Mg	Geschiebemergel

Petrographie:

T, t	Ton, tonig
U, u	Schluff, schluffig
S, s	Sand, sandig
G, g	Kies, kiesig
fS, fs	Feinsand, feinsandig
mS, ms	Mittelsand, mittelsandig
gS, gs	Grobsand, grobsandig
fG, fg	Feinkies, feinkiesig
mG, mg	Mittelkies, mittelkiesig
gG, gg	Grobkies, grobkiesig
X, x	Stein, steinig
..1	sehr schwach
..2	schwach
..3	mittel
..4	stark
..5	sehr stark
wl	wechsellagernd
lag	lagenweise
ssmm	mm-geschichtet
dn	dünn
zt	zum Teil

Alle sonst verwendeten Abkürzungen werden im Text erläutert.

Legende zu den Profilen:

	Kies, sandig, steinig / zementiert
	Grobsand bis Kies / zementiert
	Mittel- bis Grobsand / zementiert
	Fein- bis Mittelsand / zementiert
	Schluff bis Feinsand / zementiert
	Geschiebelehm bzw. -mergel / zementiert

Anhang III

Vorkommen karbonatischer Zementation pleistozäner Lockersedimente NW-Deutschlands

1. Karbonatzementation von Weichsel-zeitlichen glazifluviatilen Sedimenten unmittelbar unterhalb einer Grundmoräne
Ort: Sandgrube Söhrenberg nördlich Schönwohld
Blattnummer TK25: 1626
geographische Angaben: Hochwert: 35 66 100 Rechtswert: 60 20 200 Höhe: ca. 25 m üNN
Quelle: Schriftl. Mitt. STEPHAN 2000
2. a. 3 mm mächtige Karbonatzementation von Saale-zeitlichen glazifluviatilen Sedimenten unmittelbar unterhalb eines Geschiebemergels
Ort: Neue Tongrube bei Wacken
Blattnummer TK25: 1922
geographische Angaben: Hochwert: 35 26 900 Rechtswert: 59 87 700 Höhe: ca. 35 m üNN
Quelle: Schriftl. Mitt. STEPHAN 2000
b. Konkretionen im Saale-zeitlichen Geschiebelehm
Ort: Wacken-Neuland
Blattnummer TK25: 1922
geographische Angaben: Hochwert: 35 25 420 Rechtswert: 59 88 475 Höhe: ca. 40 m üNN
Quelle: Schriftl. Mitt. STEPHAN 2000
3. Karbonatzementation von pleistozänen glazifluviatilen Sedimenten unmittelbar unterhalb einer Grundmoräne
Ort: ehem. Ziegeleitongrube in Burg bei Dithmarschen
Blattnummer TK25: 2021
geographische Angaben: Hochwert: 35 17 430 Rechtswert: 59 85 080 Höhe: ca. 35 m üNN
Quelle: NEUMANN (1933)
4. Karbonatzementation von pleistozänen glazifluviatilen Sedimenten unmittelbar unterhalb einer Grundmoräne
Ort: Klifftrand östlich Eddelak
Blattnummer TK25: 2120
geographische Angaben: Hochwert: 0510600 Rechtswert: 5978400 Höhe: ca. 1 m üNN
Quelle: NEUMANN (1933)
5. Plattige Karbonatzementation von Saale-zeitlichen glazifluviatilen Sedimenten unmittelbar unterhalb einer Grundmoräne
Ort: Sandgruben südlich Dägeling bei Lägerdorf
Blattnummer TK25: 2123
geographische Angaben: Hochwert: 35 84 800 Rechtswert: 59 71 700 Höhe: ca. 20 m üNN
Quelle: Schriftl. Mitt. STEPHAN 2000
6. Karbonatzementation von Saale-zeitlichen glazifluviatilen Sedimenten unmittelbar unterhalb einer Grundmoräne
Ort: Paulsruh östlich Tarbek
Blattnummer TK25: 1927
geographische Angaben: Hochwert: 35 84 500 Rechtswert: 59 93 100 Höhe: ca. 60 m üNN
Quelle: Schriftl. Mitt. STEPHAN 2000
7. Kalkkonkretionen im Lauenburger Ton und evtl. im Weichsel-zeitlichen Beckenton („...oberhalb der oberen Grundmoräne...“)
Ort: ehem. Tongruben bei Lübeck
Blattnummer TK25: 2425
geographische Angaben: Hochwert: 35 60 330 Rechtswert: 59 35 320 Höhe: ca. 15 m üNN
Quelle: GAGEL (1915)

8. Mächtige Karbonatzementationskörper im Saale-zeitlichen Geschiebemergel
Ort: Bohrung bei Heidgraben (Elmshorn), ca. 44 – 49 m u.GOK
Blattnummer TK25: 2224
geographische Angaben: Hochwert: 35 45 810 Rechtswert: 59 54 125 Höhe: ca. 15 m üNN
Quelle: Schriftl. Mitt. STEPHAN 2000
9. Karbonatzementation von Saale-zeitlichen glazifluviatilen Sedimenten unterhalb einer Drenthe-Grundmoräne
Ort: Hamburg Övelgönne, Elbchaussse 189
Blattnummer TK25: 2425
geographische Angaben: Hochwert: 35 60 330 Rechtswert: 59 35 320 Höhe: ca. 15 m üNN
Quelle: WILKE (1981)
10. Karbonatkonkretionen in Drenthe-Grundmoräne
Ort: ehem. Kies-/Sandgrube am Buchholzer Dreieck an der A261 (bei Hamburg)
Blattnummer TK25: 2625
geographische Angaben: Hochwert: 35 57 830 Rechtswert: 59 16 570 Höhe: ca. 90 m üNN
Quelle: RABE (mündl. Mitt. 1999)
11. a. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen glazifluviatilen Sedimenten
Ort: ehem. Sandgrube zwischen Lürade und Beckedorf
Blattnummer TK25: 2525
geographische Angaben: Hochwert: 35 62 330 Rechtswert: 59 21 420 Höhe: ca. 70 m üNN
Quelle: EHLERS (1978, 1987)
b. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen glazifluviatilen Sedimenten unter „Niendorfer Grundmoräne“ (mittlere Saale-Grundmoräne)
Ort: Autobahnbaustelle Sinstorfer Kirchweg (ca. 1200 m östlich von Lürade)
Blattnummer TK25: 2525
geographische Angaben: Hochwert: 35 64 100 Rechtswert: 59 21 800 Höhe: ca. 43 m üNN
Quelle: EHLERS (1978)
12. Karbonatkonkretionen in Schmelzwasser-Ablagerungen unter Geschiebemergel
Ort: Nordwand des Geestaufschlusses bei Börnsen
Blattnummer TK25: 2527
geographische Angaben: Hochwert: 35 85 810 Rechtswert: 59 26 770 Höhe: ca. 5 m üNN
Quelle: NEUMANN (1933)
13. Karbonatzementation von glazifluviatilen Sedimenten unterhalb von Geschiebesand (beides jüngere Drenthe / qD₂)
Ort: Kiesgrube nördlich Grauen (Südwand des Aufschlusses)
Blattnummer TK25: 2524
geographische Angaben: Hochwert: 35 49 860 Rechtswert: 59 19 780 Höhe: ca. 45 m üNN
Quelle: MEYER (1982)
14. a. Karbonatzementation von glazifluviatilen Sedimenten (jüngere Drenthe / qD₂)
Ort: Sandgrube westlich Daerstorf
Blattnummer TK25: 2524
geographische Angaben: Hochwert: 35 52 700 Rechtswert: 59 23 160 Höhe: ca. 55 m üNN
Quelle: mündl. Mitt. MEYER (1999)
b. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen glazifluviatilen Sedimenten unterhalb einer Grundmoräne (Geschiebemergel)
Ort: ehem. Sandgrube südwestlich Neu Wulmstorf (ca. 1500 m nördlich Daerstorf)
Blattnummer TK25: 2524
geographische Angaben: Hochwert: 35 52 900 Rechtswert: 59 24 700 Höhe: ca. 47 m üNN
Quelle: EHLERS (1978)
15. Karbonatzementation von wahrscheinlich Saale-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: ehem. Sandgrube südlich Eddelsen
Blattnummer TK25: 2625
geographische Angaben: Hochwert: 35 64 180 Rechtswert: 59 17 080 Höhe: ca. 40 m üNN
Quelle: KOERT et al. (1910)

16. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: ehem. Sand- / Kiesgruben bei Hittfeld
Blattnummer TK25: 2625
geographische Angaben: Hochwert: 35 62 830 Rechtswert: 59 16 650 Höhe: ca. 85 m üNN
Quelle: K.D. MEYER (NLfB, mündl. Mitt. 1997)
17. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: Sand- und Kiesgruben westlich Helmstorf
Blattnummer TK25: 2625
geographische Angaben: Hochwert: 35 65 040 Rechtswert: 59 15 520 Höhe: ca. 40 m üNN
Quelle: K.D. MEYER (NLfB, mündl. Mitt. 1997)
18. Karbonatkonkretionen in pleistozänen Schmelzwasser-Ablagerungen unter Geschiebemergel
Ort: Sandkrug nordöstlich Artlenburg, 5 km elbabwärts von Lauenburg
Blattnummer TK25: 2628
geographische Angaben: Hochwert: 35 99 500 Rechtswert: 59 17 500 Höhe: ca. 20 m üNN
Quelle: NEUMANN (1933)
19. Karbonatzementation („Kalkkrusten“) von pleistozänen Schmelzwasser-Ablagerungen unter Grundmoräne
Ort: ehem. Sandgrube am Ziegelberg bei Boizenburg / Elbe
Blattnummer TK25: 2630
geographische Angaben: Hochwert: 44 14 640 Rechtswert: 59 17 250 Höhe: ca. 40 m üNN
Quelle: NEUMANN (1933)
20. Karbonatzementation von Saale-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen unter Geschiebemergel
Ort: ehem. Sandgrube nördlich Adendorf
Blattnummer TK25: 2728
geographische Angaben: Hochwert: 35 95 900 Rechtswert: 59 07 850 Höhe: ca. 20 m üNN
Quelle: MÜLLER & KEILHACK (1922)
21. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: Aufschluß westlich Rullstorf
Blattnummer TK25: 2729
geographische Angaben: Hochwert: 44 01 810 Rechtswert: 59 07 110 Höhe: ca. 25 m üNN
Quelle: LAGING (mündl. Mitt. 1999)
22. Schichtkonforme, weitverbreitete und einige dm mächtige Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: ehem. Sandgrube südlich Neetze
Blattnummer TK25: 2729
geographische Angaben: Hochwert: 44 08 250 Rechtswert: 59 04 120 Höhe: ca. 45 m üNN
Quelle: LAGING (mündl. Mitt. 1998)
23. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: Sandgruben östlich Breetze
Blattnummer TK25: 2730
geographische Angaben: Hochwert: 44 15 370 Rechtswert: 59 04 960 Höhe: ca. 40 m üNN
Quelle: K.D. MEYER (NLfB, mündl. Mitt. 1997)
24. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: ehem. Sandgrube am nordöstlichen Ortsausgang von Holzen
Blattnummer TK25: 2729
geographische Angaben: Hochwert: 44 05 680 Rechtswert: 59 02 330 Höhe: ca. 50 m üNN
Quelle: BAERMANN et al. (1983), MEYER (1983)
25. Möglicherweise transportierte Karbonatkonkretionen im Drenthe-zeitlichen Geschiebemergel
Ort: ehem. Sandgrube ca. 800 m östlich der Autobahn A7
Blattnummer TK25: 2826
geographische Angaben: Hochwert: 35 73 200 Rechtswert: 58 94 900 Höhe: ca. 100 m üNN
Quelle: SOLCHER / BATHOLOMÄUS (mündl. Mitt. 1996)

26. Karbonatzementation von Warthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen und Geschiebemergel
Ort: Sand-/Kiesgrube bei Volkstorf
Blattnummer TK25: 2729
geographische Angaben: Hochwert: 44 02 540 Rechtswert: 58 99 550 Höhe: ca. 80 m üNN
Quelle: LAGING (mündl. Mitt. 1998)
27. Karbonatzementation von Saale-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen und Geschiebemergeln (z.T. Konkretionen), Karbonatzementation auf Geschiebemergel
Ort: ehem. Sandgruben im Bereich Vastorf
Blattnummer TK25: 2729
geographische Angaben: Hochwert: 44 02 940 Rechtswert: 58 99 400 Höhe: ca. 50 m üNN
Quelle: GAUGER (1978a)
28. Karbonatkonkretionen im Warthe-zeitlichen Geschiebemergel
Ort: Bohrung bei der Woltersdorfer Kirche (nahe Woltersdorf)
Blattnummer TK25: 3033
geographische Angaben: Hochwert: 44 48 615 Rechtswert: 58 68 480 Höhe: ca. 35 m üNN
Quelle: eigener Befund (1995)
29. Karbonatzementation von Warthe-zeitlichen glazilimnischen Ablagerungen und Geschiebemergel (z.T. Konkretionen)
Ort: Sand- / Kiesgrube bei Lübbow
Blattnummer TK25: 3033
geographische Angaben: Hochwert: 44 47 250 Rechtswert: 58 67 150 Höhe: ca. 25 m üNN
Quelle: GAUGER (1978b)
30. Karbonatzementation von pleistozänen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: Bohrung bei Garßen
Blattnummer TK25: 3326
geographische Angaben: Hochwert: 35 76 800 Rechtswert: 58 36 640 Höhe: ca. 60 m üNN
Quelle: HARBORT & STOLLER (1916)
31. Karbonatzementation von pleistozänen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: Bohrung bei Beedenbostel
Blattnummer TK25: 3327
geographische Angaben: Hochwert: 35 85 200 Rechtswert: 58 35 900 Höhe: ca. 60 m üNN
Quelle: HARBORT et al. (1916)
32. Karbonatzementation von Weser-Mittelterrassen-Ablagerungen
Ort: Bohrung
Blattnummer TK25: 3618
geographische Angaben: Hochwert: 34 81 090 Rechtswert: 57 99 890 Höhe: 49 m üNN
Quelle: WORTMANN (1971)
33. Karbonatzementation von Weser-Mittelterrassen-Ablagerungen
Ort: Bohrung in Minden - Minderheide
Blattnummer TK25: 3619
geographische Angaben: Hochwert: 34 91 600 Rechtswert: 57 98 000 Höhe: 60 m üNN
Quelle: WORTMANN (1968)
34. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: kleiner Sand- / Kiesabbau ca. 400 m westlich des Ortsendes von Rennau an der L294
Blattnummer TK25: 3731
geographische Angaben: Hochwert: 44 25 160 Rechtswert: 57 96 500 Höhe: ca. 100 m üNN
Quelle: JORDAN (NLFb, mündl. Mitt. 1996)
35. Karbonatumkrustete Gerölle in pleistozänen Ablagerungen
Ort: Umgebung von Druxberge
Blattnummer TK25: 3833
geographische Angaben: Hochwert: 44 51 930 Rechtswert: 57 80 310 Höhe: ca. 160 m üNN
Quelle: KOERT (1927)

36. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: Steinbruch bei Vlotho
Blattnummer TK25: 3819
geographische Angaben: Hochwert: 34 91 500 Rechtswert: 57 81 130 Höhe: ca. 110 m üNN
Quelle: eigener Befund
37. Karbonatkonkretionen in Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: Sand- / Kiesgrube Fa. Reese bei Möllenbeck
Blattnummer TK25: 3820
geographische Angaben: Hochwert: 35 03 800 Rechtswert: 57 80 300 Höhe: ca. 130 m üNN
Quelle: eigener Befund
38. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: Sandgrube bei Krankenhagen
Blattnummer TK25: 3820
geographische Angaben: Hochwert: 35 04 750 Rechtswert: 57 79 120 Höhe: ca. 90 m üNN
Quelle: eigener Befund
39. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: Böschungen / Aufschlüsse südöstlich der L433 zwischen Rumbeck und Hohenrode
Blattnummer TK25: 3821
geographische Angaben: Hochwert: 35 12 250 Rechtswert: 57 81 350 Höhe: ca. 65 m üNN
(Koordinaten eines ehem. Sand- / Kiesabbaus mit Karbonatzementationen)
Quelle: NAUMANN (1927), PERSCHKE (1993)
40. Karbonatzementation von präglazialen, altquartären Schottern in einer Karsthöhle
Ort: Steinbruch am Riesenberg, Alter Höhlenarm
Blattnummer TK25: 3721
geographische Angaben: Hochwert: 35 19 550 Rechtswert: 57 85 250 Höhe: ca. 305 m üNN
Quelle: eigener Befund
41. Karbonatzementation von Weser-Mittelterrassen-Ablagerungen (z.T. Konkretionen)
Ort: ehem. Sand- / Kiesgrube bei Haverbeck
Blattnummer TK25: 3821
geographische Angaben: Hochwert: 35 19 140 Rechtswert: 57 78 150 Höhe: ca. 70 m üNN
Quelle: NAUMANN (1927)
42. Karbonatzementation von Weser-Mittelterrassen-Ablagerungen (z.T. Konkretionen)
Ort: ehem. Sand- / Kiesgrube bei Helpensen
Blattnummer TK25: 3821
geographische Angaben: Hochwert: 35 20 700 Rechtswert: 57 76 420 Höhe: ca. 85 m üNN
Quelle: NAUMANN (1927)
43. Karbonatkonkretionen in Saale-zeitlichen, glazifluviatilen Ablagerungen unter Geschiebemergel (Saale-Kaltzeit)
Ort: ehem. („Landwirt Ehrhardsche“) Kiesgrube am Basberg bei Hameln
Blattnummer TK25: 3822
geographische Angaben: Hochwert: 35 27 420 Rechtswert: 57 76 240 Höhe: ca. 130 m üNN
Quelle: NAUMANN & BURRE (1927)
44. Karbonatzementation im „...reinen Weserkies...“ (Anmerkung: wahrscheinlich Oberterrassen-Ablagerungen)
Ort: Bahneinschnitt bei Rohrsen (Erweiterungsbau Güterbahnhof Hameln), östlich von Hameln
Blattnummer TK25: 3822
geographische Angaben: Hochwert: 35 26 760 Rechtswert: 57 74 330 Höhe: ca. 70 m üNN
Quelle: NAUMANN & BURRE (1927)
45. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: Sandgruben bei Bad Münder/Hachmühlen
Blattnummer TK25: 3822
geographische Angaben: Hochwert: 35 33 400 Rechtswert: 57 82 030 Höhe: ca. 115 m üNN
Quelle: eigener Befund

46. Karbonatkonkretionen in Saale-zeitlichen, glazifluviatilen Ablagerungen unter Bänderton
Ort: ehem. („Reineckesche“) Kiesgrube bei Hameln
Blattnummer TK25: 3822
geographische Angaben: Hochwert: 35 26 190 Rechtswert: 57 76 820 Höhe: ca. 170 m üNN
Quelle: NAUMANN & BURRE (1927)
47. Karbonatzementation von wahrscheinlich Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen (z.T. Konkretionen)
Ort: Sand- / Kiesgrube am Felsenkeller in Coppenbrügge
Blattnummer TK25: 3823
geographische Angaben: Hochwert: 35 36 360 Rechtswert: 57 76 200 Höhe: ca. 160 m üNN
Quelle: LÜTTIG (1954), DETERS (2000)
Anmerkung: Die beobachteten und untersuchten karbonatisch verkitteten Partien kamen in sowohl von LÜTTIG (1954) als auch von DETERS (2000) als Saale-zeitlich eingestuften Schichten vor. Dazu beschreibt LÜTTIG (1954, Abb. 10) karbonatische Zementation in Schmelzwasser-Ablagerungen, von denen er vermutet sie könnten Elster-zeitlich entstanden sein.
48. Karbonatzementation von Saale-Mittelterrassen-Ablagerungen
Ort: Straßenböschung südlich der Haltestelle Levedagsen
Blattnummer TK25: 3923
geographische Angaben: Hochwert: 35 42 250 Rechtswert: 57 67 800 Höhe: ca. 190 m üNN
Quelle: HERRMANN (1968)
49. Karbonatzementation von Mittelterrassen-Ablagerungen unter Schmelzwasser-Sand
Ort: Aufschluß westlich von Elze
Blattnummer TK25: 3824
geographische Angaben: Hochwert: 35 50 080 Rechtswert: 57 76 500 Höhe: ca. 90 m üNN
Quelle: LÜTTIG (1954)
50. Karbonatzementation von Leine-Mittelterrassen-Ablagerungen
Ort: ehem. Kiesgrube bei Eime
Blattnummer TK25: 3924
geographische Angaben: Hochwert: 35 50 910 Rechtswert: 57 73 080 Höhe: ca. 85 m üNN
Quelle: eigener Befund
51. Karbonatzementation von Leine-Mittelterrassen-Ablagerungen
Ort: aufgelassene Kiesgrube bei Banteln
Blattnummer TK25: 3924
geographische Angaben: Hochwert: 35 51 460 Rechtswert: 57 71 140 Höhe: ca. 90 m üNN
Quelle: eigener Befund
52. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen (z.T. Konkretionen)
Ort: Sandgrube ca. 1 km südlich Burgstemmen bei der Siedlung Berkel
Blattnummer TK25: 3824
geographische Angaben: Hochwert: 35 52 700 Rechtswert: 57 77 600 Höhe: ca. 100 m üNN
Quelle: PERSCHKE (1993)
53. Karbonatzementation von Saale-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: ehem. Sand- / Kiesgrube bzw. Bauschuttdeponie nördlich Betheln
Blattnummer TK25: 3824
geographische Angaben: Hochwert: 35 54 540 Rechtswert: 57 77 540 Höhe: ca. 130 m üNN
Quelle: eigener Befund
54. Karbonatzementation von prä-Saale-zeitlichen Sedimenten
Ort: Aufschluß bei Eitzum (Ldk. Hildesheim)
Blattnummer TK25: 3925
geographische Angaben: Hochwert: 35 58 940 Rechtswert: 57 72 220 Höhe: ca. 140 m üNN
Quelle: LÜTTIG (1954)

55. Karbonatzementation von Elster-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: ehem. Sand- / Kiesgrube westnordwestlich Werder
Blattnummer TK25: 3926
geographische Angaben: Hochwert: 35 76 190 Rechtswert: 57 68 300 Höhe: ca. 130 m üNN
Quelle: LÜTTIG (1954)
56. Karbonatzementation von „...grogen, gerundeten Muschelkalkschottern, die...wenig nordische Bestandteile enthalten...“ (Mittelterrassen-Ablagerungen?) unter „Decklehm“
Ort: ehem. Kiesgrube am Himmelsberg bei Eitzum (Ldk. Wolfenbüttel)
Blattnummer TK25: 3830
geographische Angaben: Hochwert: 44 19 280 Rechtswert: 57 81 180 Höhe: ca. 150 m üNN
Quelle: WOLDSTEDT & HARBORT (1931)
57. Karbonatzementation von „...grogen, gerundeten Muschelkalkschottern, die...wenig nordische Bestandteile enthalten...“ (Mittelterrassen-Ablagerungen?) unter „Decklehm“
Ort: ehem. Kiesgrube Kiesgrube nördlich des Heilsberges bei Kneitlingen
Blattnummer TK25: 3830
geographische Angaben: Hochwert: 44 15 020 Rechtswert: 57 83 400 Höhe: ca. 185 m üNN
Quelle: WOLDSTEDT & HARBORT (1931)
58. Karbonatzementation von möglicherweise Elster-zeitlichen Schmelzwasser- und von Mittelterrassen-Ablagerungen
Ort: ehem. Kiesgrube ca. 300 m westlich Hiddesen (südwestlich Detmold)
Blattnummer TK25: 4019
geographische Angaben: Hochwert: 34 90 150 Rechtswert: 57 54 400 Höhe: ca. 160 m üNN
Quelle: PERSCHKE (1993)
59. Karbonatzementation von „altpleistozänen Höhenschottern“ (Datierung der Sedimente fraglich)
Ort: ehem. Kiesgrube am Barfelde und Böschungen bei Hohe
Blattnummer TK25: 4022
geographische Angaben: Hochwert: 35 31 600 Rechtswert: 57 57 600 Höhe: ca. 180 m üNN
Quelle: GRUPE (1929a)
60. Karbonatzementation von Oberterrassen-Ablagerungen
Ort: Holzminden: Böschung östlich des Bahnhofs, südlich der Fa. H&R, beim Gasthof Felsenkeller, Grundstück „Am Kiesberg 22“
Blattnummer TK25: 4122
geographische Angaben: Hochwert: 35 31 550 Rechtswert: 57 43 220 Höhe: ca. 115 m üNN
Hochwert: 35 31 575 Rechtswert: 57 43 280 Höhe: ca. 115 m üNN
Hochwert: 35 31 650 Rechtswert: 57 43 250 Höhe: ca. 120 m üNN
Quelle: GRUPE (1929b), LEPPER & MENGELING (1991), PERSCHKE (1993)
61. Karbonatzementation von Elster-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen, die als Erosionsrelikte in Karsthöhlen erhalten geblieben sind
Ort: ehem. Steinbruch bei Brunkensen
Blattnummer TK25: 4024
geographische Angaben: Hochwert: 35 52 080 Rechtswert: 57 61 350 Höhe: ca. 190 m üNN
Quelle: LÜTTIG (1954)
62. Karbonatzementation von Mittelterrassen-Sedimenten (a.) und von Saale-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen (b.)
Ort: ehem. Kiesgruben bei Imsen
Blattnummer TK25: 4025
geographische Angaben: a. Hochwert: 35 58 540 Rechtswert: 57 57 000 Höhe: ca. 130 m üNN
b. Hochwert: 35 57 480 Rechtswert: 57 57 400 Höhe: ca. 120 m üNN
Quelle: a. LÜTTIG (1954), b. HARMS (1984)

63. Karbonatzementation von Mittelterrassen-Ablagerungen
Ort: Leinetal zwischen Alfeld und Limmer
Blattnummer TK25: 4024
geographische Angaben: Hochwert: 35 57 600 Rechtswert: 57 62 620 Höhe: ca. 100 m üNN
Quelle: JORDAN (1994)
64. Karbonatzementation von Saale-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen (z.T. Konkretionen)
Ort: Kiesgruben ca. 300 m nordwestlich Freden
Blattnummer TK25: 4025
geographische Angaben: Hochwert: 35 59 600 Rechtswert: 57 55 900 Höhe: ca. 155 m üNN
Quelle: u.a. LÜTTIG (1954), HARMS (1984), PERSCHKE (1993)
65. Karbonatzementation von Mittelterrassen-Ablagerungen (z.T. Konkretionen)
Ort: Böschung am Firmengelände Fa. Weisig nördlich von Dehnsen an der Bundesstraße B3
Blattnummer TK25: 3924
geographische Angaben: Hochwert: 35 53 000 Rechtswert: 57 66 050 Höhe: ca. 90 m üNN
Quelle: PERSCHKE (1993)
66. Karbonatzementation von Elster-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen unter Schwemmlöß
Ort: ehem. Sandgrube westlich Waldschenke, südöstlich Lamspringe
Blattnummer TK25: 4026
geographische Angaben: Hochwert: 35 70 700 Rechtswert: 57 57 600 Höhe: ca. 260 m üNN
Quelle: LÜTTIG (1954)
67. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen
Ort: ehem. Kiesgrube nordwestlich Eulenburg bei Engelade
Blattnummer TK25: 4126
geographische Angaben: Hochwert: 35 78 090 Rechtswert: 57 49 180 Höhe: ca. 200 m üNN
Quelle: LÜTTIG (1954), WINTER (1998)
68. Karbonatzementation von Schmelzwasser-Ablagerungen (z.T. Konkretionen)
Ort: Sandgrube 200 m nördlich Bornhausen
Blattnummer TK25: 4026
geographische Angaben: Hochwert: 35 79 250 Rechtswert: 57 55 000 Höhe: ca. 175 m üNN
Quelle: PERSCHKE (1993)
69. Karbonatzementation von pleistozänen Sedimenten (z.T. Konkretionen)
Ort: ehem. Kiesgrube bei Ödishausen, ca. 3,5 km östlich Rhüden
Blattnummer TK25: 4027
geographische Angaben: Hochwert: 35 81 440 Rechtswert: 57 57 850 Höhe: ca. 215 m üNN
Quelle: PERSCHKE (1993)
70. Karbonatzementation von pleistozänen Sedimenten
Ort: Hüttenberg bei Oker
Blattnummer TK25: 4028
geographische Angaben: Hochwert: 36 03 000 Rechtswert: 57 53 000 Höhe: ca. 240 m üNN
Quelle: BODE & SCHROEDER (1926)
71. Karbonatzementation von pleistozänen Schmelzwasser-Ablagerungen (Kies)
Ort: Westwand des Steinbruches am Wasserberg östlich Osterode
Blattnummer TK25: 3930
geographische Angaben: Hochwert: 44 09 880 Rechtswert: 57 67 520 Höhe: ca. 120 m üNN
Quelle: SCHROEDER (1919)
72. Karbonatzementation von pleistozänen Schmelzwasser-Ablagerungen unterhalb von Travertin
Ort: Kiesgrube am Schmalenberg an der Landstraße Veltheim-Osterode
Blattnummer TK25: 3930
geographische Angaben: Hochwert: 44 10 300 Rechtswert: 57 67 980 Höhe: ca. 100 m üNN
Quelle: BEHREND (1927)

73. Karbonatzementation im pleistozänen Hangschutt

Ort: Schmalenberg an der Landstraße Veltheim-Osterrode

Blattnummer TK25: 3930

geographische Angaben: Hochwert: 44 10 000 Rechtswert: 57 68 000 Höhe: ca. 130 m üNN

Quelle: SCHROEDER (1919)

74. Karbonatzementation von Drenthe-zeitlichen Schmelzwasser-Ablagerungen unter Beckenton/-schluff

Ort: ehem. Kiesgrube östlich von Orxhausen

Blattnummer TK25: 4125

geographische Angaben: Hochwert: 35 67 500 Rechtswert: 57 48 500 Höhe: ca. 120 m üNN

Quelle: JORDAN (1993)

75. Karbonatzementation von Oberterrassen-Ablagerungen

Ort: Böschung an der Eisenbahnlinie

Blattnummer TK25: 4225

geographische Angaben: Hochwert: 35 66 870 Rechtswert: 57 37 050 Höhe: ca. 130 m üNN

Quelle: JORDAN & SCHWARTAU (1993)

76. Karbonatzementation von Oberterrassen-Ablagerungen

Ort: Kiesgrube südwestlich der Autobahn A7-Abfahrt Northeim Nord

Blattnummer TK25: 4226

geographische Angaben: Hochwert: 35 66 600 Rechtswert: 57 33 500 Höhe: ca. 110 m üNN

Quelle: JORDAN (mündl. Mitt. 1996)

ANHANG IV: UNTERSUCHTE AUFSCHLÜSSE

1	Aufschluss bei Daerstorf (Anhang III: Nr. 14a)	2
2	Aufschluss bei Hittfeld (Anhang III: Nr. 16)	3
3	Aufschluss bei Breetze (Anhang III: Nr. 23)	4
4	Aufschluss bei Holzen (Anhang III: Nr. 24)	7
5	Aufschluss bei Volkstorf (Anhang III: Nr. 26)	8
6	Aufschluss bei Krankenhagen (Anhang III: Nr. 38)	10
7	Aufschluss bei Rumbeck (Anhang III: NR. 39)	12
8	Aufschluss bei Helpensen (Anhang III: Nr. 42)	14
9	Aufschluss bei Bad Münden / Hachmühlen (Anhang III: Nr. 45)	16
10	Aufschluss bei Coppenbrügge (Anhang III: Nr. 47)	18
11	Aufschluss bei Eime (Anhang III: Nr. 50)	20
12	Aufschluss bei Banteln (Anhang III: Nr. 51)	22
13	Aufschluss bei Betheln (Anhang III: Nr. 53)	23
14	Aufschluss bei Freden / Leine (Anhang III: Nr. 64)	25
15	Aufschluss bei Engelade (Anhang III: Nr. 67)	30
16	Aufschluss bei Bornhausen (Anhang III: Nr. 68)	31
17	Aufschluss bei Ödishausen (Anhang III: Nr. 69)	33

1 AUFSCHLUSS BEI DAERSTORF (ANHANG III: NR. 14A)

Allgemeine Angaben

Die von den Firmen Cohrs und Hubpfeld betriebene Sandgrube (Abb. IV-1.1) ist in weiten Teilen ausgeküstet und wird als Baustofflager genutzt. Der Abbau von Sand und Kies findet nur noch in den westlichen und nördlichen Teilen der Grube statt. Hier sind die Aufschlussverhältnisse in weiten Bereichen gut. Im südwestlichen Grubenteil wurden zahlreiche, beim Abbau angefallene Zementationskörper auf Halde abgelagert. Unmittelbar nordwestlich / nördlich der Sandgrube finden auf einem Grabungsfeld archäologische Untersuchungen statt. In der Sandgrube wurden Schmelzwasser-Ablagerungen abgebaut, die nach MEYER (1982) dem Drenthe-Stadium der Saale-Kaltzeit zuzuordnen sind (Abb. IV-1.2). Die aufgeschlossene ca. 10 m mächtige Abfolge aus Mittel- bis Grobsand mit eingeschalteten Kieslagen bildet den oberen Abschnitt einer nach EHLERS (1978) mindestens 23 m mächtigen Schichtfolge. Die Schmelzwasser-Sedimente bestehen hauptsächlich aus Quarz, Feldspat, siliziklastischem Detritus (Sedimente, Metamorphite, Magmatite), Glaukonit sowie untergeordnet detritischem Karbonat (z.B. Fossilkalk, Dolomit: insges. < 5 Gew.-%). Außerdem gibt es vereinzelt Schwerminerale (z.B. Hornblende) sowie opake Minerale (z.B. Fe-Hydroxid). Die Schmelzwasser-Sedimente werden von einer grauen, über 2 m mächtigen Jüngeren Drenthe-Grundmoräne überlagert, die eine gleichmäßige Decke auf dem Geestplateau bildet (MEYER 1982). Der stark kalkige Geschiebemergel besteht aus sandigem Schluff, der nach MEYER (1982) bis zu 20 % Ton sowie Kies und Steine führt. Südlich der Kies-/Sandgrube befindet sich ein kleineres, Ost-West gestrecktes Weichsel-zeitlich entstandenes Flugsand-Vorkommen. Darüber kommt ebenfalls Weichsel-zeitlich entstandener Geschiebedecksand weiträumig in geringer Mächtigkeit vor (MEYER 1982).

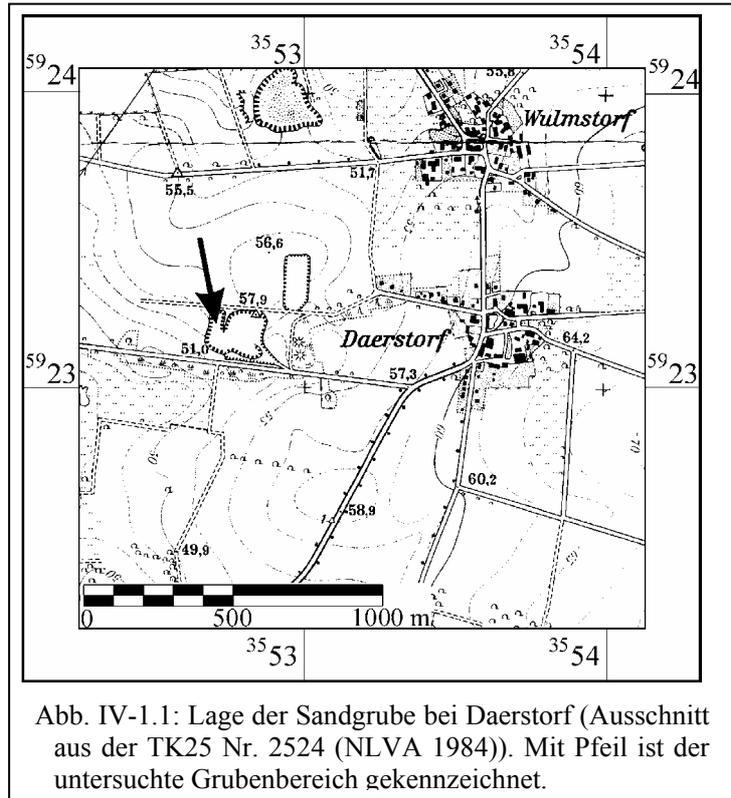


Abb. IV-1.1: Lage der Sandgrube bei Daerstorf (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 2524 (NLVA 1984)). Mit Pfeil ist der untersuchte Grubenbereich gekennzeichnet.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Das Geestplateau, in dem die Sandgrube liegt, wird im Westen durch das Estetal und im Norden durch das Elbe-Tal begrenzt. Das Elbe-Tal, dessen heutige Basis sich über 50 m unterhalb der Sandgrube befindet, wurde nach MEYER (1983b) mindestens Warthe-zeitlich angelegt, bestand aber sicher seit dem Ende der Saale-Kaltzeit (EHLERS 1995). Die heutige Talform entstand während der Weichsel-Kaltzeit (SCHRÖDER 1988). Das Estetal, dessen Basis sich auch über 50 m unterhalb des Sandgrubenniveaus befindet, gab es wahrscheinlich ebenfalls prä-Warthe-zeitlich (SCHROEDER-LANZ 1964). Der Grundwasser-Abstrom dürfte aus dem Bereich der Gruben vor allem nach Norden auf das Elbe-Tal gerichtet sein.

Zem. Typ	[m] ü.NN		GKG [Gew. %]		Lockersediment	
			unzement. Sediment	zement. Sediment	Korngröße	k _f -Wert [m/s]
M	55		< 1,5	12,0 - 27,8	U, fs, t, g2, x2 ⁺ mS, fs, gs lag (gS, fg) ⁺ , (G, s) ⁺	10 ^{-9*}
kK	54					3,87 x 10 ⁻⁴
Z	53					
	52					
	51					

Abb. IV-1.2: Sandgrube bei Daerstorf: Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße und Durchlässigkeitsbeiwerten. M = Massenzementationskörper, S = stratiforme Zementation, kK = kugelige Konkretionen, Z = Zapfen, ⁺ = nach Geländeansprache, * = nach Korngrößenzusammensetzung geschätzt, Legende s. Anh. 2.

2 AUFSCHLUSS BEI HITTFELD (ANHANG III: NR. 16)

Allgemeine Angaben

Die Kies- / Sandgrube „Otto Dörner“ gehört zu einem größeren Lagerstättenkomplex im Bereich Hittfeld-Eddelsen-Klecken. Der derzeitige Abbau findet SW Eddelsen statt (Abb. IV-2.1). Hier bestehen hervorragende Aufschlussverhältnisse. Die stillgelegten Abbaubereiche sind bzw. werden mit Bauschutt verfüllt oder sind rekultiviert und es gibt lediglich Restaufschlüsse. In der Kies- / Sandgrube werden drenthe-stadiale Schmelzwasser-Ablagerungen abgebaut. Aufgeschlossen sind einige 10er m einer Abfolge aus Kies-, Sand- und untergeordnet Schluffschichten (Abb. IV-2.2). Am Top der Grube werden sie von einer Grundmoräne überlagert, die einige m mächtig und im höheren Teil entkalkt ist. Die Schmelzwasser-Sedimente sind häufig durch Eisen- und Manganhydroxide imprägniert bzw. – vor allem in höheren Profiteilen - zementiert. Während Zementationskörper sowohl in der Grube „Otto Dörner“ als auch in anderen Gruben des Lagerstättenkomplexes Hittfeld-Eddelsen-Klecken in der Vergangenheit häufiger auftraten (z.B. KOERT et al. 1910, mündl. Mitt. K.D. MEYER 1997, vgl. Anh. 2: Nr. 15 - 17), war zum Untersuchungszeitpunkt nur das untersuchte Vorkommen aufgeschlossen.

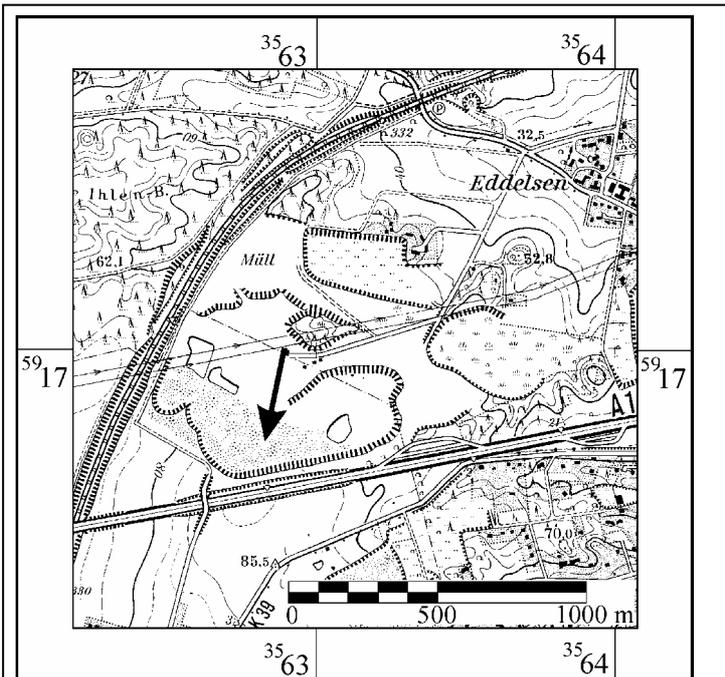


Abb. IV-2.1: Lage der Kies- / Sandgrube „Otto Dörner“ bei Hittfeld (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 2625 (NLVA 1995)). Mit dem Pfeil ist der untersuchte Grubenbereich gekennzeichnet.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Die Zementationskörper kommen bei etwa 50 bis 55 m ü.NN und damit etwa 30 m u.GOK vor. Etwa 1 km südöstlich der Grube schnitt sich ein Bach bis auf 30 bis 35 m ü.NN ein. Der Grundwasser-Abstrom erfolgt aus dem Grubenbereich vermutlich in diese Richtung.

Zem. - Typ	[m] ü.NN		GKG [Gew. %]		Lockersediment	
			unzement. Sediment	zement. Sediment	Korngröße	k _f -Wert [m/s]
M	85 80 55 50		1,3	26,2	U,t,s,g,x S-G, dn-lag(U) G,s,x	10 ⁻⁸ 10 ⁻³ - 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶ 10 ⁻³

Abb. IV-2.2: Kies- / Sandgrube „Otto Dörner“ bei Hittfeld: Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommendem Zementationstyp, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße (nach Geländeansprache) und nach Korngrößenzusammensetzung geschätztem Durchlässigkeitsbeiwert. M = Massenzementationskörper, Legende s. Anh. 2.

3 AUFSCHLUSS BEI BREETZE (ANHANG III: NR. 23)

Allgemeine Angaben

Die Kies- / Sandgrube der Arbeitsgemeinschaft Kieswerk Breetze (AKB) befindet sich ca. 1,5 km SE der Ortschaft Breetze (Abb. IV-3.1). Die Grube wurde in der Vergangenheit intensiv abgebaut, derzeit ist die Abbautätigkeit etwas zurückgegangen. Teile der ausgekierten Bereiche werden mit Bauschutt verfüllt. Die Aufschlussverhältnisse sind in weiten Teilen der Kies- und Sandgrube sehr gut.

An der Basis der Grube stehen Schmelzwasser-Ablagerungen des Drenthe-Stadiums der Saale-Kaltzeit an. Es handelt sich meist um schwach kalkigen Fein- bis Mittelsand (Gesamtkarbonatgehalt 0,7 – 1,5 Gew.-%) mit vereinzelt eingeschalteten Grobsand-, Kies- und Schlufflagen. Die Schmelzwasser-Ablagerungen werden auf Grund der Lagerungsbeziehung zur Drenthe-Haupt-Moräne als „Vorschüttssande“ des älteren Drenthe-Vorstößes gedeutet (MEYER in Vorbereit.). Darüber folgt grauer Geschiebemergel des Drenthe-Haupt-Vorstößes. Er ist im Aufschluss zwischen 2 und über 10 m und nach MEYER (in Vorbereit.) in der

Umgebung durchschnittlich 12 m mächtig. Die Grundmoräne besteht aus sandigem Schluff, der ton- und kiesführend ist und Steine enthält. An den Proben des Geschiebemergels wurden Gesamtkarbonatgehalte von 6,0 bis 11,1 Gew.-% gemessen. Der in Dünnschliffen beobachtete Detritus besteht ganz überwiegend aus Quarz. Seltener kommen Feldspat und Karbonat (z.B. Mikrit, Fossilreste) und Glaukonit vor. An der Südwestecke der Grube gibt es vereinzelt wahrscheinlich durch das vorrückende Inlandeis des jüngeren Drenthe-Vorstößes glazitektonisch verstellte Partien der Drenthe-Haupt-Moräne. Über der Drenthe-Haupt-Moräne tritt erneut Schmelzwasser-Sand auf, in den gelegentlich Kies- oder Schlufflagen eingeschaltet sind. Während die untersuchten Sandschichten sehr schwach kalkig sind (Gesamtkarbonatgehalt 0,6 Gew.-%), weist der Kies nach MEYER (in Vorbereit.) hohe Gehalte an Oberkreide- und paläozoischem Kalkstein auf. Die im Aufschluss meist zwischen 4 und 6 m mächtigen Schmelzwasser-Ablagerungen sind Vorschüttssedimente des jüngeren Drenthe-Vorstößes, dessen Grundmoräne sie unmittelbar überlagert. Die jüngere Drenthe-Grundmoräne besteht aus tonigem Schluff, der Sand, Kies und Steine führt und nach MEYER (in Vorbereit.) einen Gesamtkarbonatgehalt von über 10 Gew.-% hat. Die sonst meist hellgraue, durchschnittlich 12 m mächtige jüngere Drenthe-Moräne ist im untersuchten Bereich rötlich-hellbraun und zwischen 2 und 3 m mächtig bzw. keilte im mittlerweile abgebauten Bereich östlich der aktuellen Aufschlusswand ganz aus (mündl. Mitt. K.-D. Meyer 2001). Die Basis der Grundmoräne ist schwach gewellt, was auf glazitektonische Deformation oder Auskleidung eines vorhandenen Reliefs zurückgeführt werden kann. Sie wird von wahrscheinlich ebenfalls Drenthe-zeitlichem Schmelzwasser-Sand, der einige m mächtig ist sowie von fleckenhaft vorkommenden Relikten eines roten, möglicherweise Warthe-zeitlichen Geschiebelehm / -mergels überlagert. Darüber hinaus waren in der Kies- / Sandgrube nach MEYER (in Vorbereit.) zeitweilig zwei Eem-Vorkommen aus Torf, Mudde und Beckenschluff aufgeschlossen, die mittlerweile jedoch vollständig abgebaut sind. Den Abschluss des aufgeschlossenen Profils bildet Weichsel-zeitlich, periglazial gebildeter, meist weniger als 1 m mächtiger Geschiebedecksand. Alle anstehenden Schmelzwasser-Sedimente bestehen ganz überwiegend aus Quarz. Außerdem kommen Feldspat und siliziklastische Gesteinsbruchstücke sowie selten opake Minerale, Glaukonit, Schwerminerale (z.B. Hornblende) vor. Dazu gibt es karbonatischen Detritus wie z.B. Fossilkalk, Fossilreste oder Mikrit. Detritische Echinodermenfragmente bestehen nach der Reaktion bei der Anfärbung der Dünnschliffe häufig aus Fe-haltigem Kalzit.

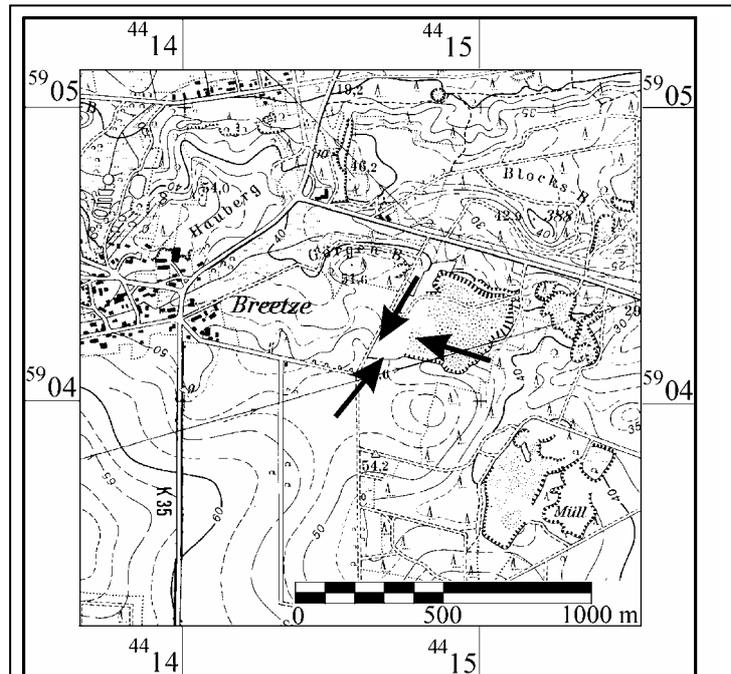


Abb. IV-3.1: Lage der Kies- / Sandgrube der AKB (Arbeitsgemeinschaft Kieswerk Breetze) bei Breetze (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 2730 Bleckede (NLVA 1994)). Mit den Pfeilen sind die untersuchten Grubenbereiche gekennzeichnet.

Karbonatische Zementation kommt in folgenden Teilen des Aufschlusses Breetze vor (Abb. IV-3.2, IV-3.3):

- jüngere Drenthe-Grundmoräne (Horizont e.),
- an ihrer Basis und in den darunter lagernden Schmelzwasser-Sedimenten (Horizonte c, d.),
- Drenthe-Haupt-Moräne (Horizont b.),
- an deren Basis im Übergang zum Vorschüttsand des Drenthe-Haupt-Vorstoßes (Horizont a.). Im Horizont a. gibt es Zementationskörper teilweise in glazitektonisch verstellten Schichten (Abb. IV 3.3a, links).

In oberflächennahen Bereichen gibt es außerdem Ansammlungen von lockerem, weißen Kalzitpulver sowie Rhizokongretionen um teilweise noch erkennbare Wurzeln.

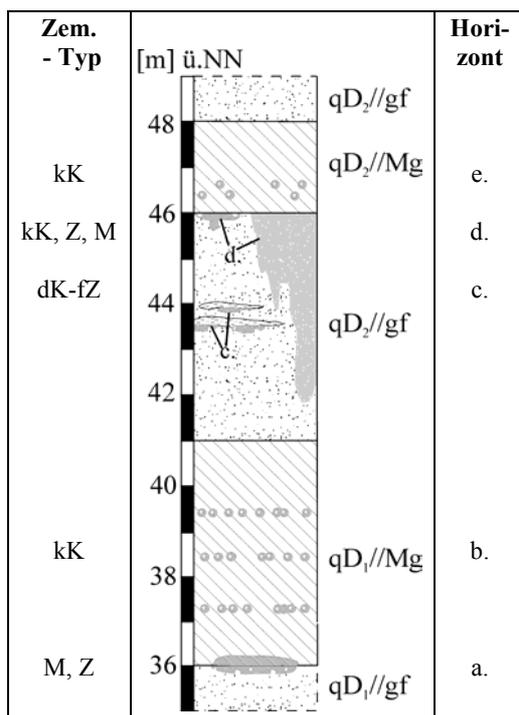


Abb. IV-3.2: Aufschluss Breetze: Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommenden Zementationstypen. Die dargestellten Mächtigkeiten sind im Aufschluss festgestellte Durchschnittswerte. kK = kugelige Konkretionen, dK = diskusförmige Konkretionen, fZ = flache Zapfen, M = Massenzementation, Legende s. Anh. 2.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Der Aufschluss Breetze befindet sich auf einer Geesthochfläche, die im Aufschlussbereich Geländehöhen von etwa 30 bis über 50 m ü. NN hat und 1 km nördlich der Grube an die Elbe-Niederung stößt. Hier liegen die Elbe-Urstomtal-Terrasse bei etwa 10 – 15 m ü. NN und die darin eingeschnittene Elbaue bei etwa 8 – 10 m ü. NN (MEYER in Vorbereitung.). Die Elbe-Talung bestand nach der Höhenlage der jüngeren Drenthe-Moräne (MEYER in Vorbereitung.) als morphologisches und damit als hydrogeologisch relevantes Element bereits während des jüngeren Drenthe-Vorstoßes. Der Untersuchungsbereich gehört zum Einzugsgebiet der Elbe. Kleinere Bäche und Gräben sind jeweils mehr als 1 km entfernt und wirken sich wahrscheinlich nicht merklich auf den Grundwasserabstrom im Grubenbereich aus.

Horizont	Zem.-Typ	[m] ü.NN 36,5 36,0 35,5 qD ₁ //gf qD ₁ //Mg	GKG [Gew. %]		Lockersediment	
			unzem. Sediment	zem. Sediment	Korngröße	k _f -Wert [m/s]
a.	M, Z		6,0	40,3	U, s, g, t2, x2 ⁺	10 ^{-8*}
			< 1,1	29,1	mS, fs	2,6 x 10 ⁻⁴
b.	kK	[m] ü.NN 40 38 36 qD ₂ //gf qD ₁ //Mg qD ₁ //gf	< 1,0	39,7	mS ⁺	10 ^{-4*}
			9,7	38,9	U, s, g, t2, x2 ⁺	10 ^{-8*}
			6,0	37,0	S ⁺	10 ^{-4*}
c.	dK-fZ	[m] ü.NN 46 45 44 qD ₂ //Mg qD ₂ //gf	11,1	46,5	U, t, s, g2, x2 ⁺	4,8 x 10 ⁻⁷
			≤ 1,0		mS, fs, lag (U, s) ⁺	2,4 x 10 ⁻⁴ 10 ^{-7*}
d.	M, Z, kK M, Z Z	[m] ü.NN 46 45 44 43 42 qD ₂ //Mg qD ₂ //gf	11,1 ≤ 1,5	43,3 27,2	U, t, s, g2, x2 ⁺ mS ⁺ mS, fs, mS, fs, gs2, mS, fs4, lag (U, tS, gS, G) ⁺	4,8 x 10 ⁻⁷ 10 ^{-4*} 2,7 x 10 ⁻⁴ 2,9 x 10 ⁻⁴ 2,1 x 10 ⁻⁴
			≤ 1,0	30,6		
				21,5		
				22,6		
e.	kK	[m] ü.NN 48 47 46 qD ₂ //gf qD ₂ //Mg qD ₂ //gf			S ⁺	10 ^{-4*}
			11,1	40,4	U, t, s, g2, x2 ⁺	4,8 x 10 ⁻⁷
			≤ 1,5		mS, fs	2,6 x 10 ⁻⁴

Abb. IV-3.3: Schematisches Säulenprofil Aufschluss Breetze Horizonte a.-e. Ergänzend gibt es Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße und Durchlässigkeitsbeiwerten.

M = Massenzementationskörper, kK = kugelige Konkretionen, dK = diskusförmige Konkretionen, fZ = flache Zapfen, Z = hängende Zapfen, ⁺ = nach Geländeansprache, * = Durchlässigkeitsbeiwert nach Korngrößenzusammensetzung geschätzt, Legende s. Anh. 2.

4 AUFSCHLUSS BEI HOLZEN (ANHANG III: NR. 24)

Allgemeine Angaben

Das wohl bekannteste Vorkommen karbonatischer Zementation pleistozäner Sedimente in NW-Deutschland ist das Naturdenkmal „Verkitteter Sand“ bei Holzen (BAERMANN et al. 1983, MEYER 1983a, PRIES 1991, PERSCHKE 1993, WALTHER 1993, MEYER 1997). Die Zementationskörper nehmen ein Volumen von einigen m³ ein. Da sie durch den Landkreis Lüneburg zum Naturdenkmal „Verkitteter Sand“ erklärt und unter Schutz gestellt wurden, beschränkte sich die Untersuchung auf einige Lesesteine und das Lockersediment. Die ehemalige Sand-/Kiesgrube bei Holzen (Abb. IV-4.1) diente bis in die 1960er Jahre dem Abbau von Schmelzwasser-Sand, der nach MEYER (1983a) Vorschüttand der Saale-Kaltzeit ist. Es handelt sich um Mittel- bis Grobsand mit eingeschalteten Kieslagen, die nach PERSCHKE (1993) Steine enthalten. Sand und Kies bestehen vor allem aus Quarz, Feldspat, siliziklastischem Detritus (Sedimente, Metamorphite, Magmatite) sowie untergeordnet detritischem Karbonat (< 1 Gew.-%). Sowohl MEYER (1983a) als auch PERSCHKE (1993) nahmen an, dass der Schmelzwasser-Sand im Aufschlussbereich von einer Drenthe-2-Grundmoräne überlagert wurde (Abb. IV-4.2). Dies stützen Untersuchungsergebnisse von SCHULZ (1994), wonach es eine entsprechende Überlagerungssituation in der Umgebung des Aufschlusses gibt. Nach SCHULZ (1994) besteht die Grundmoräne aus mittelsandführendem Feinsand bis Schluff, der geringe bis sehr geringe Ton-, Grobsand und Feinkiesgehalte hat. Im Warthe-Stadium wurde der Bereich um Holzen erneut vom Inlandgletscher überdeckt, wobei sich zwischen 1,0 m und 5,4 m mächtiger Geschiebemergel ablagerte. Während des Hochglazials der Weichsel-Kaltzeit herrschten Permafrost-Bedingungen.

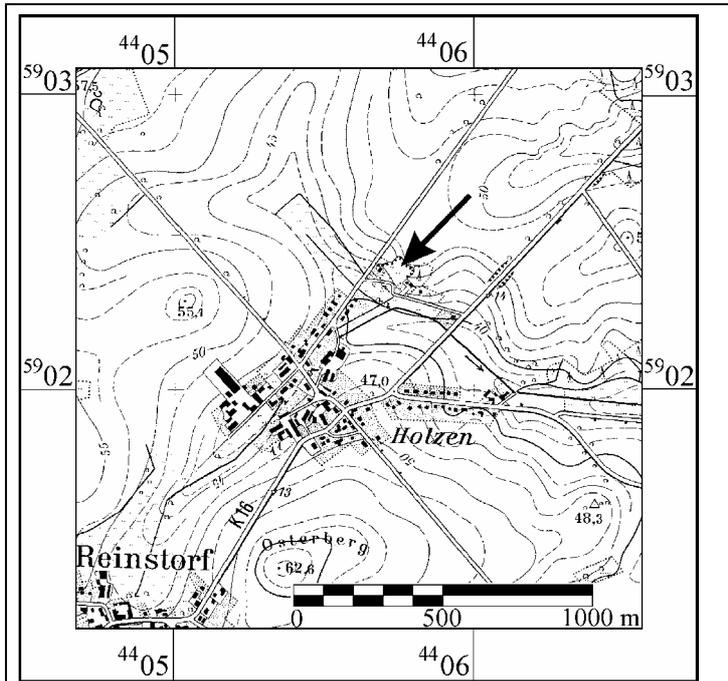


Abb. IV-4.1: Lage der ehemaligen Kies- / Sandgrube bei Holzen (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 2729 Scharnebeck (NLVA 1997)). Mit dem Pfeil ist der untersuchte Grubenbereich gekennzeichnet.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Der Aufschluss befindet sich am nördlichen Rand des St. Vitus-Tales in einer Höhe von ca. 45 bis 50 m ü.NN und ca. 5 bis 10 m über dem rezenten Talboden. Während der Weichsel-Kaltzeit wurde das Tal des St. Vitus-Baches ausgeweitet und bis auf weniger als 38 m ü.NN eingetieft. Auf Grund nachlassender Transportkraft füllte sich das St. Vitus-Tal sukzessive mit Hangmaterial und fluviatilen Sedimenten. Die Oberkante dieser Ablagerungen befindet sich unmittelbar südlich des Aufschlusses bei ca. 40 m ü.NN (SCHULZ 1994).

Zem. - Typ	[m] ü.NN	qD2//Mg (?)	GKG [Gew. %]		Lockersediment	
			unzement. Sediment	zement. Sediment	Korngröße	k _r -Wert [m/s]
Z, M	50	?	7,5	17,2 – 28,7	fS-U, ms, t2,gs2,g2 ⁺	10 ⁻⁸
	49				S-G*	10 ⁻³ bis 10 ⁻⁴
	48					
	47					
	46					

Abb. IV-4.2: Ehem. Sandgrube bei Holzen: Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße und nach Korngrößenzusammensetzung geschätzten Durchlässigkeitsbeiwerten.

Z = Zapfen, M = Massenzementationskörper, * = nach Geländeansprache, ⁺ = Werte aus SCHULZ (1994), Legende s. Anh. 2.

5 AUFSCHLUSS BEI VOLKSTORF (ANHANG III: NR. 26)

Allgemeine Angaben

Die zur Fa. Paetzmann gehörende Kies- / Sandgrube Volkstorf befindet sich ca. 1 km W bis NW der Ortschaft Volkstorf (Abb. IV-5.1). Der Abbau schreitet von Süden nach Norden fort. Im aktuellen Abbaubereich im Norden der Grube bestehen hervorragende Aufschlussverhältnisse, in mittlerweile ausgeklasten Bereichen sind Restaufschlüsse vorhanden.

Die Grube liegt im Barendorfer Höhenzug, dessen Kern aus einer steilstehenden Falte aus Drenthe-zeitlichen, glazigenen Sedimenten besteht (Abb. IV-5.3). Darüber folgen Warthe-zeitliche Schmelzwasser-Ablagerungen und eine rote Grundmoräne (HÖFLE 1991), mit ihrer typischen „Vastorfer Geschiebegemeinschaft“ (GAUGER & MEYER 1970). In der Weichsel-Kaltzeit herrschten im Bereich des Barendorfer Höhenzuges periglaziäre Bedingungen, die weiträumig zur Bildung periglaziärer Deckschichten (z.B. Geschiebedecksand) führten.

Karbonatische Zementationskörper kommen im Nordteil des Grubenkomplexes vor, in dem derzeit Sand und Kies gewonnen werden.

Darüber hinaus gab es Zementationen in mittlerweile ausgeklasten Bereichen im Süden des Grubenkomplexes (mündl. Mitt. u. Proben LAGING 1998). Die Zementationskörper treten in teilweise glazitektonisch verstellten Schmelzwasser-Ablagerungen auf, die sich nach MEYER (1998) im Warthe-Stadium der Saale-Kaltzeit ablagerten. Schmelzwasser-Sand und -Kies bestehen im wesentlichen aus Quarz und anderem siliziklastischen Detritus (Gesteinsbruchstücke, Feldspat, seltener Schwerminerale (z.B. Hornblende), Glimmer, vereinzelt Glaukonit). Außerdem kommen opake Minerale und karbonatischer Detritus vor, wobei neben Kalk- (u.a. Fossilreste, Kalkarenit, Mikrit) vor allem Dolomitgerölle nicht selten sind. Für den Schmelzwasser-Sand wurden Gesamtkarbonatgehalte von bis zu 14,8 Gew.-% ermittelt. Sie können aber auch deutlich darüber liegen, wie Messungen GAUGERS (1978a) belegen, der z.T. über 25 (Stück?-) % Dolomit nachwies. Die Schmelzwasser-Sedimente werden von einer Warthe-zeitlich entstandenen, roten Grundmoräne überlagert. Die während der Untersuchungen teilweise abgeschobene, mindestens 3 – 4 m mächtige Grundmoräne besteht aus sandigem, zum Teil stark tonigem Schluff, der Kies und Steine führt. In der roten Warthe-Grundmoräne ist – im Gegensatz zum grauen Geschiebemergel des Drenthe-Stadiums - Dolomit häufig (GAUGER & MEYER 1970, GAUGER 1978a).

Neben karbonatischen Zementationskörpern, die in 6 Horizonten (Abb. IV-5.2) beobachtet wurden, gibt es Rhizokonkretionen als Ansammlungen von lockerem, weißem Kalzitpulver. Sie kommen meist unmittelbar unterhalb der Oberfläche bzw. seltener bis einige m darunter vor und treten i.d.R. zusammen mit Wurzeln teilweise noch lebender Pflanzen auf.

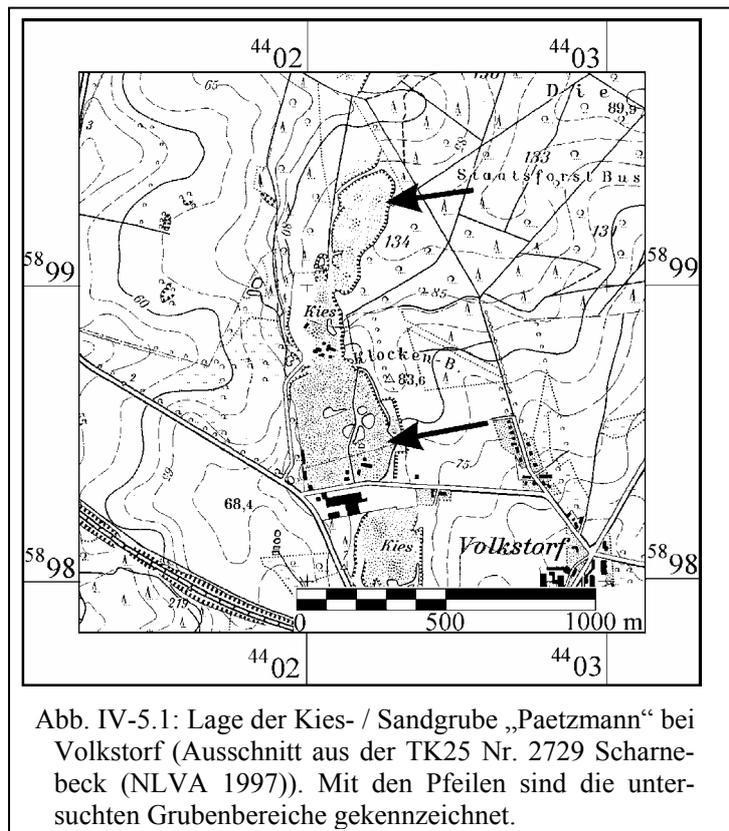


Abb. IV-5.1: Lage der Kies- / Sandgrube „Paetzmann“ bei Volkstorf (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 2729 Scharnebeck (NLVA 1997)). Mit den Pfeilen sind die untersuchten Grubenbereiche gekennzeichnet.

Zem.-Typ	[m] ü.NN	Horizont	GKG [Gew. %]		Lockersediment	
			unzement. Sediment	zement. Sediment	Korngröße	k _f -Wert [m/s]
kK		f.	18,1	32,4	U;t,s,g2,x2 ⁺	10 ^{-8*} - 10 ^{-9*}
fZ, M	82	e.	2,7	36,3 / 37,8	mS, fs	2,2 x 10 ⁻⁴
M	81	d.	14,8	41,0	gG;fg-mg4,gs ⁺	10 ^{-2*}
M	80	c.	12,3	32,0	gG-mG;x,fg,gs ⁺	10 ^{-2*}
dK	79	b.				
M	78	a.	13,1	36,4	mS;fs4	1,2 x 10 ⁻⁴
	77			36,0	mS;gs	4,3 x 10 ⁻⁴

Abb. IV-5.2: Kies- / Sandgrube Fa. Paetzmann bei Volkstorf. Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße und Durchlässigkeitsbeiwerten.

kK = kugelige Konkretionen, dK = diskusförmige Konkretionen, fZ = flache Zapfen, M = Massenzementationskörper, ⁺ = nach Geländeansprache, * = Durchlässigkeitsbeiwert nach Korngrößenzusammensetzung geschätzt, Legende s. Anh. 2.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Der etwa Nord-Süd streichende Höhenzug erreicht Geländehöhen von z.T. deutlich über 80 m ü.NN und liegt damit durchschnittlich etwa 30 m über der Umgebung. Der Grundwasser-Abstrom dürfte seit der Warthezeitlichen Entstehung des Barendorfer Höhenzugs (MEYER 1998) der geologischen und morphologischen Situation entsprechend (Abb. IV-5.3) teils nach Westen, teils parallel zum Grundwasser-geringleitenden Kern des Höhenzugs Nord-Süd gerichtet sein.

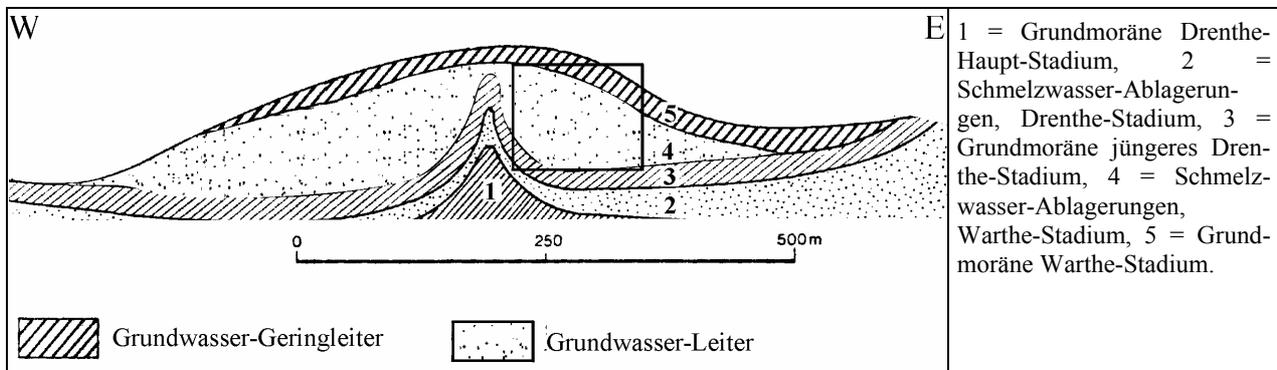


Abb. IV-5.3: Schematischer hydrogeologischer Schnitt durch den Barendorfer Höhenzug bei Volkstorf (verändert nach HÖFLE 1991). Das Rechteck entspricht etwa der Position des Aufschlusses.

6 AUFSCHLUSS BEI KRANKENHAGEN (ANHANG III: NR. 38)

Allgemeine Angaben

Die Kies- / Sandgrube „Dubbert 2“ liegt ca. 700 m SW der Ortschaft Krankenhagen, unmittelbar E der Verbindungsstraße von Krankenhagen nach Silixen (Abb. IV-6.1), das unverständlicherweise eine eigene Bayern-München-Fankneipe hat. Die Aufschlussverhältnisse sind gut. Teile der Grube werden sukzessive mit Bauschutt verfüllt.

Die abgebauten Ablagerungen gehören zu einem Sedimentkörper, der sich etwa zwischen den Ortschaften Möllenbeck im Westen und Krankenhagen im Osten befindet. Der Kiessandkörper von Krankenhagen-Möllenbeck liegt unmittelbar südlich des heutigen Wesertales in einem breiten Einschnitt in das Lippische Keuperbergland und wird von glazigenen Ablagerungen aufgebaut. Das unterlagernde Festgestein besteht hauptsächlich aus flach lagernden Mergelsteinschichten des mittleren Keuper (NAUMANN 1913-15). Der Kiessandkörper wurde von WELLMANN (1990) als Randkame eines Drenthe-zeitlichen Gletschers gedeutet. Er besteht aus Sand- und Kiesschichten, in die Fließmoränen eingeschaltet sind. Die Schmelzwasser-Sedimente enthalten bis über 30 % Muschelkalk- und Malmkalkstein-Gerölle. Außerdem sind Ton- und Mergelstein des Keupers sowie einheimisch-paläozoische und nordische Gerölle häufig. An der Basis des Kiessandkörpers kommt Drenthe-Grundmoräne vor, die in der Kies- / Sandgrube Dubbert 2 bei 83 m ü.NN angetroffen wurde. Die Randkame-Sedimente bildeten sich während des Rückschmelzens des Drenthe-Gletschers während einer Stillstandsphase zwischen dem Gletscherrand oder inaktivem Eis auf der einen und dem Lippischen Keuperbergland auf der anderen Seite. Der Sedimenttransport erfolgte durch Schmelz- und Weserwasser. Unmittelbar nach Abschluss der Sedimentation wurde der Kiessandkörpers periglazial überprägt. In der Weichsel-Kaltzeit kam es zur Bildung von Fließerde und Löss (WELLMANN 1990).

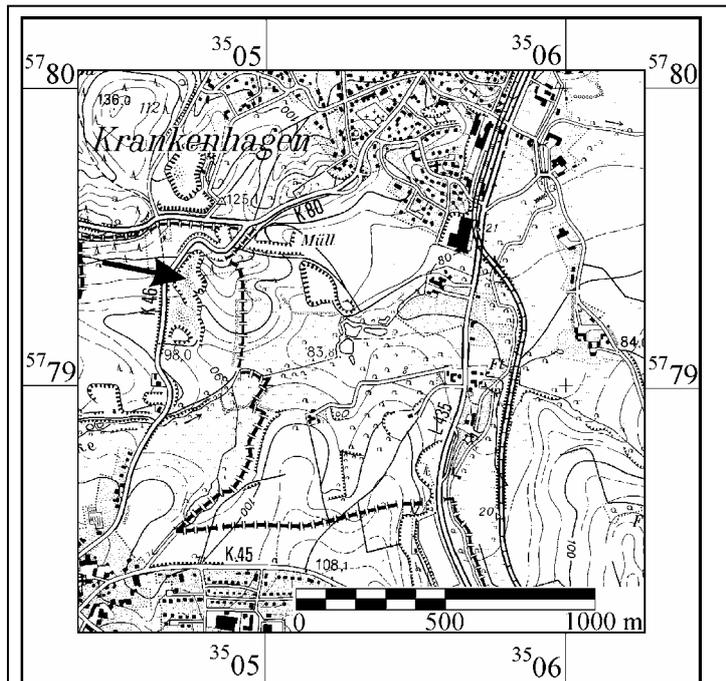


Abb. IV-6.1: Lage der Kies- / Sandgrube Dubbert 2 bei Krankenhagen (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 3820 Rinteln (NLVA 1995)). Mit dem Pfeil ist der untersuchte Grubenbereich gekennzeichnet.

Karbonatische Zementation wurde sowohl in mittlerweile verfüllten Gruben (mündl. Mitt. HENNINGSEN 1999) als auch in den Gruben Reese bei Möllenbeck und Dubbert 2 (Abb. IV-6.2) beobachtet. In der Grube Dubbert 2 treten karbonatische Zementationskörper etwa 12 m unter der Oberfläche auf.

Zem.-Typ	[m] ü.NN	qd//gf	GKG [Gew. %]		Lockersediment	
			unzem. Sediment	zem. Sediment	Korngröße	k _f -Wert [m/s]
M	97		9,1		mS ⁺	10 ⁻⁴ *
kK-dK			14,4	19,8	wl (fS,u)-(U, fs) ⁺	10 ⁻⁶ *
			2,0	8,5	mS, gs, g	7,5 x 10 ⁻⁴
	96				mS, fs	2,2 x 10 ⁻⁴

Abb. IV-6.2: Kies- / Sandgrube Dubbert 2 bei Krankenhagen: Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße und Durchlässigkeitsbeiwert.

M = Massenzementationskörper, kK = kugelige Konkretion, dK = diskusförmige Konkretion; ⁺ = nach Geländesprache, * = Durchlässigkeitsbeiwert nach Korngrößenzusammensetzung geschätzt, Legende s. Anh. 2.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Der Bereich der Kies- / Sandgrube Dubbert 2 wird durch den Wembke-Bach entwässert. Er fließt unmittelbar südlich des Kiessandkörpers, wobei die Talaue, die von holozän entstandenen Auenablagerungen gebildet wird, bei etwa 92 m ü. NN liegt. Der Wembke-Bach mündet in die westlich gelegene Exter und die wiederum im Norden in die Weser. Da Weichsel-zeitlich entstandener Löß / Lößlehm bis unmittelbar an die Aue des Wembke-Baches reicht, geschah die Einschneidung bis auf heutiges Niveau prä- bis früh-Weichsel-zeitlich.

7 AUFSCHLUSS BEI RUMBECK (ANHANG III: NR. 39)

Allgemeine Angaben

In einer ehem. Kies- / Sandgrube, die sich ca. 1,5 km SW der Ortschaft Rumbeck unmittelbar S der L 433 befindet (Abb. IV-7.1), wurden Ablagerungen des Weser-Mittelterrassenkörpers abgebaut. Der stark verfallene Aufschluss bietet keine Möglichkeit mehr, die anstehenden Schichten umfassend geologisch zu untersuchen. Lediglich die karbonatisch zementierten Bereiche ragen als Härtlinge aus Böschungen der ansonsten verfallenen und zugewachsenen, ehem. Kies-/Sandgrube heraus. Die zementierten Mittelterrassen-Ablagerungen lassen sich lateral über eine Distanz von ca. 1 km an der Abbruchkante zur Niederterrasse verfolgen und liegen durch Abtragung der dünnen Bodenauflage temporär in kleineren Aufschlüsse offen.

Unter Quartär-zeitlichen Sedimenten gibt es flachlagernden Ton- und Schluffstein (NAUMANN 1927b) des oberen Keuper (BALDSCHUHN & KOCKEL 1987). In der ehem. Grube steht eine ca. 2 m mächtige Kies- / Sand-Abfolge an, bei der es sich nach PERSCHKE (1993) um den obersten Abschnitt des Weser-Mittelterrassen-Körpers handelt, der sich früh-Saale-zeitlich abgelagerte (RÖHM 1985). Die durchweg kalkigen, gut bis sehr gut durchlässigen Schichten bestehen aus meist kieshaltigem Mittel- bis Grobsand in den Kieslagen eingeschaltet sind. Dabei handelt es sich im wesentlichen um Quarz und anderen siliziklastischen Detritus, etwas Karbonatdetritus (z.B. Mikrit, Fossilreste) und vereinzelt vorkommende opake Minerale. Das ca. 2 m mächtige Hangende der Mittelterrassen-Sedimente ist stark verfallen, überwachsen und wahrscheinlich anthropogen überprägt. Nach Untersuchungen PERSCHKES (1993) folgt unmittelbar über den aufgeschlossenen Mittelterrassen-Ablagerungen eine aus sandigem, tonigem Schluff bestehende Drenthe-Grundmoräne. Die Gesamtmächtigkeit quartärer Ablagerungen oberhalb des Festgesteins beträgt im Grubenbereich etwa 7 m. Bei etwa 2 m mächtigen Deckschichten oberhalb des ca. 4 – 5 m mächtigen Mittelterrassen-Körpers (NAUMANN 1927b) dürfte sich die Festgesteinsoberfläche bei etwa 63 ü.NN befinden.

Karbonatische Zementationskörper treten im Aufschluss Rumbeck in Form von Massenzementationskörpern in den Mittelterrassen-Ablagerungen auf (Abb. IV 7.2). Die aufgeschlossenen Partien waren augenscheinlich stark verwittert, so dass keine gesicherten Werte für den Gesamtkarbonatgehalt erzielbar waren und auf entsprechende Bestimmungen verzichtet wurde.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Die hydrogeologische Situation wird durch die unmittelbar nordöstlich strömende Weser bestimmt. Nach Abschmelzen des Drenthe-Eises schnitt sie sich Warthe- bis früh-Weichsel-zeitlich um einige 10er m bis auf ein Niveau von etwa 45 – 55 m ü.NN ein. Dies ergibt sich aus der Höhenlage Drenthe-zeitlicher Ablagerungen und des „Übergangsterrassen“-Körpers, der sich nach SCHELLMANN (1994) Warthe- bis früh-Weichsel-zeitlich abgelagerte. Mit dem Einschneiden der Weser senkte sich das Vorflutniveau, wodurch sich im Aufschlussbereich durch Absinken der Grundwasser-Oberfläche vadose Bedingungen etablierten.

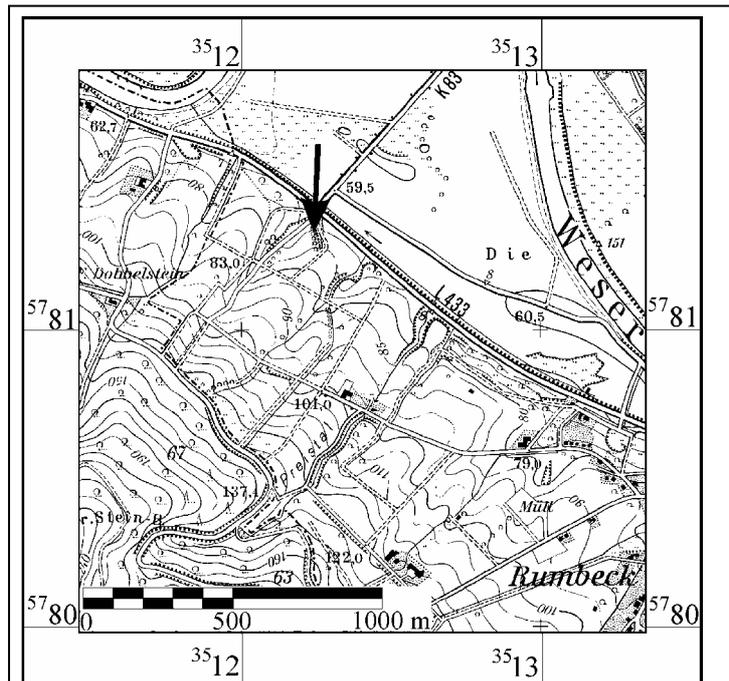


Abb. IV-7.1: Lage der ehemaligen Kies- / Sandgrube bei Rumbeck (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 3821 Hessisch Oldendorf (NLVA 1995)). Mit dem Pfeil ist der untersuchte Grubenbereich gekennzeichnet.

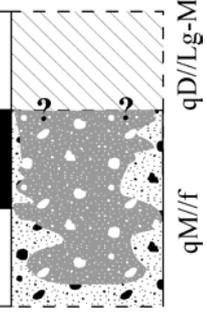
Zem. - Typ	[m] ü.NN		Lockersediment	
			Korngröße	k_r -Wert [m/s]
M	69	qD//Lg-Mg	U,s,t,g-x2	10^{-8}
	67	qM//f	mS-G, lag(G, s)	10^{-2} - 10^{-3}

Abb. IV-7.2: Ehem. Kies- / Sandgrube bei Rumbeck: Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommendem Zementationstyp, Korngrößen (nach Geländeansprache) und (nach Korngrößenzusammensetzung geschätzten) Durchlässigkeitsbeiwerten.
M = Massenzementationskörper, Legende s. Anh. 2.

8 AUFSCHLUSS BEI HELPENSEN (ANHANG III: NR. 42)

Allgemeine Angaben

Teilergebnisse der Untersuchung karbonatischer Verfestigungen der Sand- / Kiesgrube „Müller“ bei Helpensen wurden bereits vorab zur Diskussion gestellt (ELBRACHT 1998).

Die Kies- / Sandgrube „Müller“ liegt unmittelbar westlich des Gutes Helpensen ca. 3 km nordwestlich von Hameln (Abb. IV-7.1). Die ausgekiesten Teile der Grube werden mit Bauschutt verfüllt und rekultiviert. Die Aufschlussverhältnisse sind in den im Abbau stehenden Grubenteilen meist sehr gut.

Die im Aufschlussbereich insgesamt etwa 25 m mächtigen Quartär-zeitlichen Sedimente (KULLE 1985) werden ab etwa 65 m ü.NN von Schichten unterlagert, die zum oberen Keuper gehören (BALDSCHUHN & KOCKEL 1987). Es handelt sich um Ton- und Schluffstein, in den dünne Quarzsandsteinschichten eingeschaltet sind (NAUMANN 1927b). Die ältesten Quartär-zeitlich entstandenen Lockersedimente sind Weser-Mittelterrassen-Ablagerungen. Sie bilden die ersten Hinweise auf Nutzung dieses Talabschnittes durch die Weser. Der Mittelterrassen-Körper kann einen tieferen, teilweise entkalkten und einen höheren, kalkhaltigen Teil haben, die sich nach RÖHM & GROETZNER (1986) in einem spät-Elster-zeitlichen und einem früh-Denthe-zeitlichen Abschnitt bildeten. Die Entkalkung fand nach RÖHM (1985) in der Holstein-Warmzeit statt. Die Mittelterrassen-Ablagerungen bestehen aus teilweise kieshaltigem Mittel- bis Grobsand, in den Schluff-, Feinsand- oder Kieslagen eingeschaltet sind. Bei ca. 72 m ü. NN gibt es einen Kryoturbationshorizont. Die fluviatilen Ablagerungen bestehen überwiegend aus Quarz und anderem siliziklastischem Detritus. Außerdem kommen detritisches Karbonat (z.B. Mikrit, Mikrosparrit, Fossilbruchstücke, Dolomit), selten Schwerminerale (z.B. Hornblende) und opake Minerale vor.

Der vordringende Gletscher des Drenthe-Haupt-Vorstoßes blockierte die Porta Westfalica (SERAPHIM 1972), was den Abfluß der Weser aus dem Niedersächsischen Bergland in die Norddeutsche Tiefebene unterband oder zumindest sehr stark einschränkte. Der damit verbundene Aufstau der Weser führte zur Bildung von Staubecken-Sedimenten (KULLE 1985), die in der Grube „Müller“ oberhalb der Mittelterrassen-Ablagerungen in einer Mächtigkeit von insgesamt ca. 4 m anstehen. Dabei handelt es sich um rotbraune sandige Schluffschichten, in die hell- bis rotbrauner, schluffiger bzw. z.T. stark mittelsandiger Feinsand linsig oder rinnenartig eingeschaltet ist. Dazu gibt es im tiefsten Abschnitt dieser Abfolge, teilweise unmittelbar oberhalb der Mittelterrassen-Ablagerungen eine ca. 5 – 10 cm mächtige Wechselfolge aus dunklem, schluffigem Ton und braunem, tonhaltigem Schluff. Über den „Beckenablagerungen“ sensu KULLE (1985) folgen etwa 2 m mächtiger Warvit. Das Drenthe-Eis rückte in der Folgezeit weiter in das Wesertal vor und hinterließ nach seinem Abschmelzen u.a. Geschiebemergel, der nach KULLE (1985) bis 8 m mächtig ist. In der Weichsel-Kaltzeit, in der das Inlandeis das Untersuchungsgebiet nicht mehr erreichte (u.a. KALTWANG 1992), wurden unter periglazialen Bedingungen die Niederterrassen-Ablagerungen der Weser aufgeschottert bzw. es bildeten sich Löß und Fließerde (SCHELLMANN 1994).

Es gibt Massenzementationskörper und stratiforme Zementation in den Mittelterrassen-Ablagerungen und diskusförmigen Konkretionen in den Sandschichten der „Beckenablagerungen“ (Abb. IV-8.2).

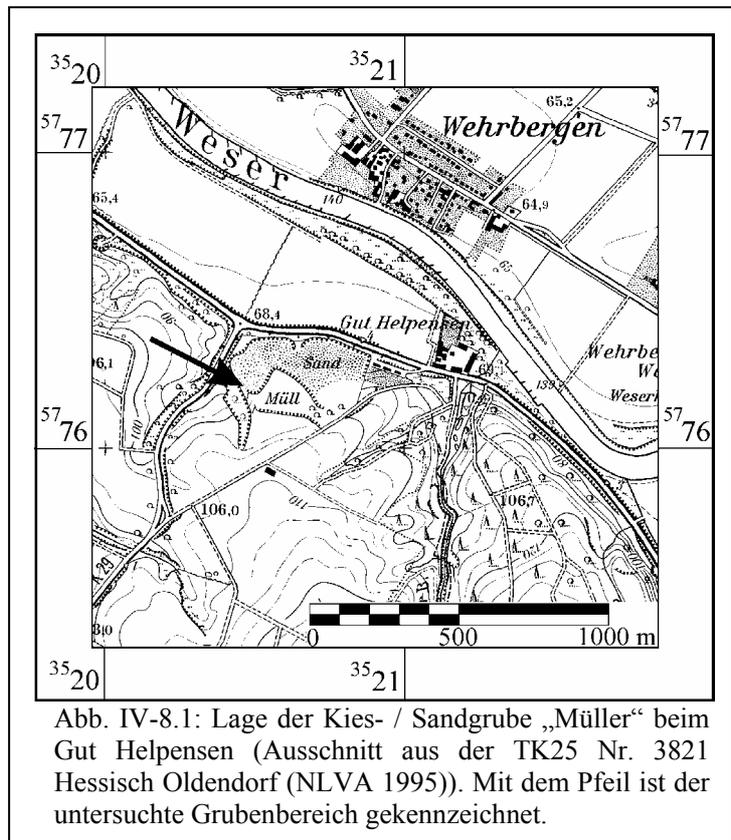


Abb. IV-8.1: Lage der Kies- / Sandgrube „Müller“ beim Gut Helpensen (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 3821 Hessisch Oldendorf (NLVA 1995)). Mit dem Pfeil ist der untersuchte Grubenbereich gekennzeichnet.

Zem. - Typ	[m] ü.NN	Horizont	GKG [Gew. %]		Lockersediment	
			unzement. Sediment	zement. Sediment	Korngröße	k _r -Wert [m/s]
dK	76	c.	6,9	31,1	U, fs, lag (fs, ms, u)	10 ^{-7*} 10 ^{-6*}
	75				wl-ssmm(U,t),(T, u) ⁺ fs, u, ms2 ⁺	10 ^{-9*} 10 ^{-5*}
M	74	b.	10,1	25,6	mS, gs4, fs2 lag (mS)	5,4 x 10 ⁻⁴ 5,5 x 10 ⁻⁴
	73		7,7 5,7	15,6 20,1		
M sZ	72	a.	5,8	27,9 45,0	mS-gS, lag(G, fs, U) ⁺	10 ⁻³ - 10 ^{-7*}
	71				gS, g ⁺ fs, ms ⁺	10 ^{-3*} 10 ^{-4*}
	70				mS-gS, lag(G, fs, U) ⁺	

Abb. IV-8.2: Sand/Kiesgrube Fa. Müller bei Helpensen. Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngrößen und Durchlässigkeitsbeiwerten.

M = Massenzementationskörper, sZ = stratiforme Zementation, dK = diskusförmige Konkretion; ⁺ = nach Geländeansprache, * = Durchlässigkeitsbeiwert nach Korngrößenzusammensetzung geschätzt, Legende s. Anh. 2.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Die hydrogeologische Situation wird im Wesertal zwischen Hameln und der Porta Westfalica naturgemäß im wesentlichen durch die Weser bestimmt. Die fluviatile Einschneidung erreichte bis zur Warthe- oder früh-Weichsel-zeitlichen Ablagerung der „Übergangsterrassen“-Ablagerungen zwischen Wehrbergen und Rinteln ein Niveau von etwa 45 – 55 m ü.NN (SCHELLMANN 1994). Es ist davon auszugehen, dass sich die Grundwasser-Oberfläche mit der Einschneidung absenkte.

9 AUFSCHLUSS BEI BAD MÜNDER / HACHMÜHLEN (ANHANG III: NR. 45)

Allgemeine Angaben

Nordöstlich der Ortschaft Hachmühlen bei Bad Münder werden in einigen kleineren Kies- / Sandgruben Schmelzwasser-Sedimente abgebaut. Die teilweise bereits wieder mit Bauschutt verfüllten Gruben befinden sich zwischen der B442 im W und der B217 im S (Abb. IV-9.1). Die Basis quartärer Ablagerungen liegt bei etwa 78 m ü. NN (ROHDE 1983: 48). Die ältesten Lockersedimente sind fluviatile Ablagerungen, bei denen es sich nach ROHDE (1983) möglicherweise um Weser-Oberterrassen-Sedimente handelt. Darunter folgen Schichten des Münder Mergel (oberer Jura) (BALDSCHUHN & KOCKEL 1987), die im wesentlichen aus Schluff- und Tonstein bestehen, in die in größerer Tiefe Gipslagen eingeschaltet sein können (NAUMANN & BURRE 1927).

Die Quartär-zeitlich entstandenen Schichten bestehen im wesentlichen aus Kies und Sand, in die cm- bis wenige dm mächtige Schlufflagen einschaltet sind.

Eingeschnittene Rinnen sind mit Kies gefüllt. Die aufgeschlossenen Sedimente sind durchweg kalkig bis stark kalkig. Da Zementationskörper nur in Kieslagen auftreten (Abb. IV-9.2), für die es auf Grund ihrer Grobkörnigkeit kaum möglich war, repräsentative Gesamtkarbonatgehaltswerte zu ermitteln, wurde hier auf die Bestimmung verzichtet. Nach den Befunden der Geländeaufnahme und der Dünnschliffuntersuchungen bestehen Sand und Kies im wesentlichen aus siliziklastischem Detritus (Quarz, Gesteinsbruchstücke, Feldspat) und karbonatischem Detritus (Mikrit, Fossilkalk, Oolith, Fossilreste). Außerdem gibt es häufiger Reste von umgelagerten, mesozoischen Sideritkonkretionen, die i.d.R. stark verwittert sind. Im höheren Teil des aufgeschlossenen Profils kommt bis 2 m mächtige Grundmoräne aus sandigem, tonigem Schluff vor, der Kies und Steine enthält. Sie ist auf Grund der regionalen geologischen Situation, wie sie von LÜTTIG (1954) beschrieben wurde, wahrscheinlich Drenthe-zeitlich entstanden. Die Grundmoräne ist teilweise glazitektonisch verstellt und deformiert. NAUMANN & BURRE (1927) deuteten die glazigenen Sedimente als eisrandliche Bildungen. Die Deformation der Grundmoräne weist auf Überfahrung und Stauchung durch einen jüngeren Eisvorstoß hin. Eine vergleichbare Situation kommt am Basberg bei Hameln vor, was LÜTTIG (1954: 96f) mit zwei Saale-zeitlichen Eisvorstößen in diesem Bereich erklärte. Das deformierte Sediment stufte er als Saale-I-zeitlich ein („Alfelder Stadium“). Der Bereich oberhalb der Grundmoräne war zum Untersuchungszeitpunkt nicht aufgeschlossen. Nach NAUMANN & BURRE (1927) werden die glazigenen Sedimente durch Weichsel-zeitlichen Löss überlagert.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Unmittelbar W der des Aufschlusses fließt die Hamel. Die Sohle der untersuchten Kies- / Sandgrube befindet sich etwas oberhalb von 120 m ü. NN und damit ca. 25 m über dem Hameltal (90 – 95 m ü. NN). Es ist mit einer tief liegenden Grundwasser-Oberfläche und einem nach Westen bzw. Westnordwesten gerichteten Grundwasser-Abstrom zu rechnen. Obwohl keine Angaben zur Flußgeschichte der Hamel vorliegen, läßt sich aus der Lößverbreitung, die im wesentlichen das heutige Relief nachzeichnet, schließen, dass eine der heutigen vergleichbare morphologische (und damit auch hydrogeologische) Situation mindestens seit der Weichsel-Kaltzeit bestand.

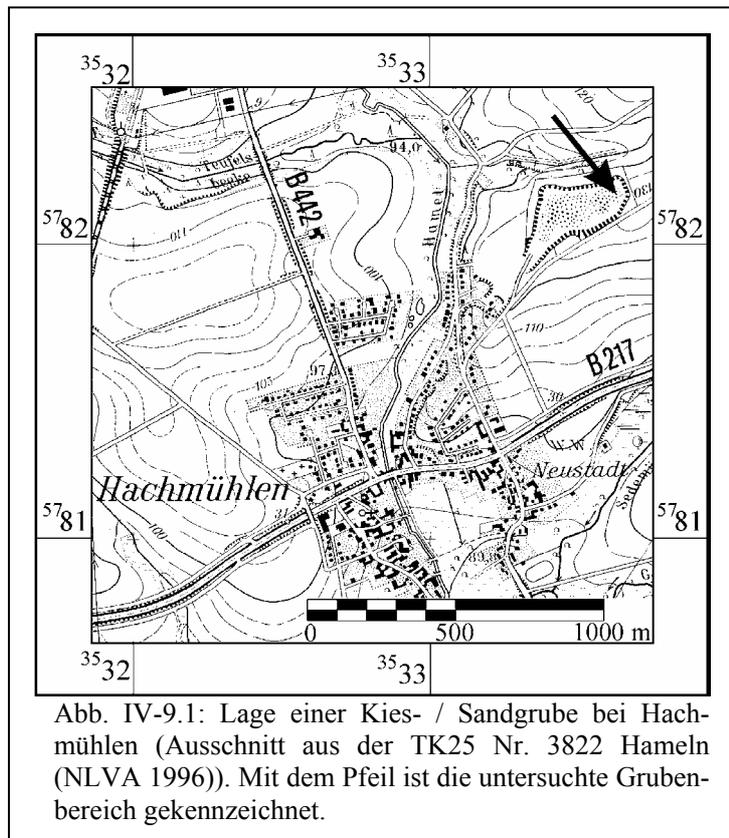


Abb. IV-9.1: Lage einer Kies- / Sandgrube bei Hachmühlen (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 3822 Hameln (NLVA 1996)). Mit dem Pfeil ist die untersuchte Grubenbereich gekennzeichnet.

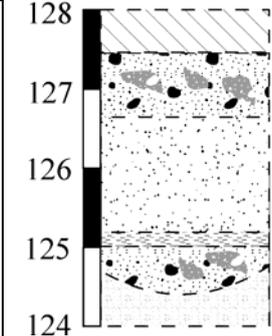
Zem. - Typ	[m] ü.NN		Lockersediment	
			Korngröße	k_f -Wert [m/s]
M	128		U, s, t, g, x2	10^{-8}
	127		mG, gg, ms, gs1, fg1	$10^{-2} - 10^{-3}$
	126		mS, gs, g1	10^{-4}
M	125		U, fs, ms1	10^{-6}
			mG, gg, ms, gs1, fg1	$10^{-2} - 10^{-3}$
	124		fS, u, ms1	10^{-4}

Abb. IV-9.2: Kies- / Sandgrube bei Bad Mündler / Hachmühlen. Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommendem Zementationstyp, Korngröße (nach Geländeansprache) und nach Korngrößenzusammensetzung geschätzten Durchlässigkeitsbeiwerten.
Zementationstyp: M = Massenzementationskörper, Legende s. Anh. 2.

10 AUFSCHLUSS BEI COPPENBRÜGGE (ANHANG III: NR. 47)

Allgemeine Angaben

Die Kies- / Sandgrube „Heerburg“ befindet sich am Felsenkeller unmittelbar W des Fleckens Coppenbrügge (Abb. IV-10.1). Der Abbau findet im nördlichen Grubenteil statt, in dem die Aufschlusssituation sehr gut ist. Die ausgekiesten südlichen Grubenteile sind dagegen weitgehend verfallen, z.T. verfüllt und renaturiert. An der östlichen Grubenböschung ragt ein großer Zementationskörper heraus.

Im Liegenden der nach DETERS (1999) über 30 m mächtigen, pleistozänen Schmelzwasser-Sedimente, stehen Tonsteinschichten des mittleren Jura (Dogger) an (BALDSCHUHN & KOCKEL 1987). Bei den Schmelzwasser-Ablagerungen handelt es sich um Sand und Kies mit eingeschalteten Schluff- und Tonlagen, in die mit Kies gefüllte Rinnen eingeschnitten sind. Nach Geröllzählungen von DETERS (1999) besteht die Mittelkiesfraktion der Schmelzwasser-Ablagerungen zu ca. 80 Stück-% aus einheimisch-mesozoischem Gestein. Dabei dominieren Jurakalkstein- und „Plänerkalk“-Gerölle, deren Anteil bis über 50 Stück-% erreichen kann. Neben weiteren einheimisch-mesozoischen Gesteinen (z.B. Wealden-Sand- und Tonstein, Sideritkonkretionen) kommen einheimisch-paläozoische (z.B. Lydit, Grauwacke) und selten nordische Gerölle vor. In den Dünnschliffen treten vor allem Quarz, Feldspat und andere siliziklastische Komponenten und detritischer Kalk (z.B. Oolith, Mikrit, Foraminiferen- und Kalzispären-Kalk, Fossilreste) auf. Seltener gibt es Glaukonit, Schwerminerale (z.B. Hornblende) und opake Minerale. Bei letzteren handelt es sich um Kohlefitter und – bruchstücke aus Unterkreide-Schichten und stark verwitterte Sideritkonkretionen. Zumindest im Südteil der Grube werden die Schmelzwasser-Sedimente von Geschiebelehm / -mergel unterlagert, dessen Oberkante sich bei etwa 154 m ü. NN befindet. Die Grundmoräne besteht aus ungeschichtetem Ton und Schluff und führt Sand, Kies und Steine. Dazu treten bei ca. 156,5 m ü. NN bzw. bei ca. 159,5 m ü. NN zwei Fließmoränen („flowtill“) auf. Die wenige dm mächtigen Fließmoränen bestehen aus sand- und kieselhaltigem Schluff, der geschichtet ist und Ton- und Sandeinschaltungen hat (alles: DETERS 1999).

Während LÜTTIG (1954) die Schmelzwasser-Ablagerungen in eine liegende Elster-zeitliche und eine hangende Drenthe-zeitliche Abfolge gliederte und die karbonatische Zementation Holstein-zeitlich datierte, machte DETERS (1999) durch Untersuchungen von Geröllbestand, Gesamtkarbonatgehalt und Verwitterungsgrad wahrscheinlich, dass die gesamte Abfolge Drenthe-zeitlich entstand. Über den glazigenen Sedimenten kommen an den Flanken des Kiessandkörpers und weitflächig in der näheren Umgebung Weichsel-zeitlich entstandener Löß /-lehm sowie Fließerde vor.

Karbonatische Zementation gibt es in verschiedenen Horizonten innerhalb der glazigenen Sedimente des Heerburg-Hügels. Besonders markant sind große Massenzementationskörper, die aus der renaturierten Westböschung der Grube herausragen. Diese zementierten Bereiche befinden sich nicht mehr in ursprünglicher Position, sondern sind bei früherem Abbau angefallen und wurden am Westrand der Grube abgelagert (mündl. Mitt. Radladerfahrer der Grube 1997). In-situ vorkommende Verfestigungen wurden in vier Horizonten festgestellt und untersucht (Abb. IV-10.2).

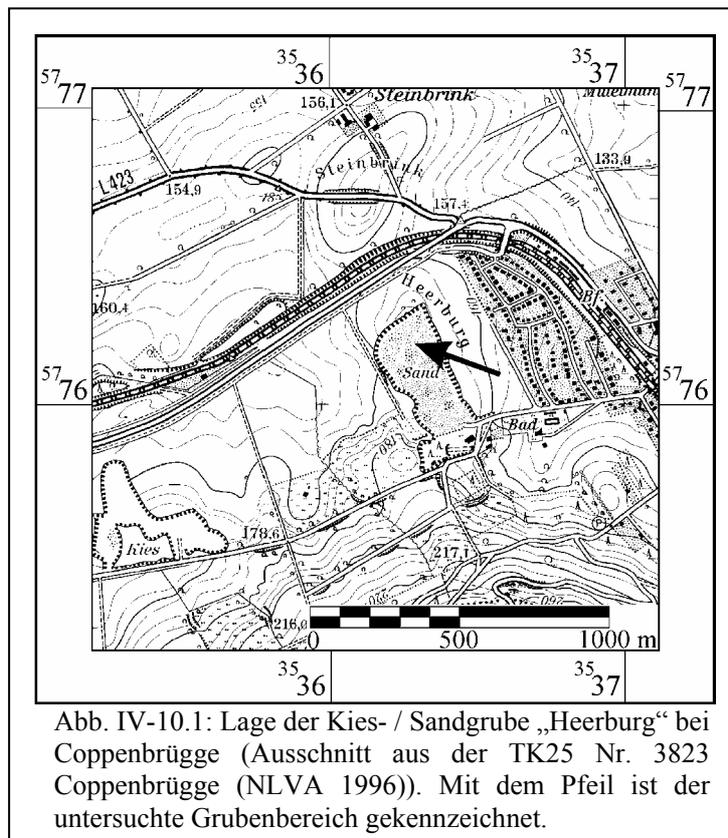


Abb. IV-10.1: Lage der Kies- / Sandgrube „Heerburg“ bei Coppenbrügge (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 3823 Coppenbrügge (NLVA 1996)). Mit dem Pfeil ist der untersuchte Grubenbereich gekennzeichnet.

Zem.- Typ	[m] ü.NN	Horizont	GKG [Gew. %]		Lockersediment	
			unzement. Sediment	zement. Sediment	Korngröße	k _r -Wert [m/s]
	168				mG, gg, ms, fg2,fs2	10 ⁻² - 10 ^{-3*}
sZ	166	d.	11,5	33,4/34,7	mS, fs	2,0 x 10 ⁻⁴
	164		12,4		mS, g4, gs mS, fs4	8,6 x 10 ⁻⁴ 1,5 x 10 ⁻⁴
dK-fZ	162	c.	10,4	19,2	mS, fs	2,6 x 10 ⁻⁴
	160		9,3	31,3	mS, fs2	4,5 x 10 ⁻⁴
M	160	b.	11,6	29,5	mS, fs mS, mg, fg, gs	1,9 x 10 ⁻⁴ 6,9 x 10 ⁻⁴
	158					
kK	156	a.			wl(gS,g)-(U,fs,ms) ⁺ U, t,s,g ⁺	10 ⁻⁴ - 10 ^{-6*} 10 ⁻⁵ - 10 ^{-7*}

Abb. IV-10.2: Kies-/Sandgrube „Am Felsenkeller“ bei Copenbrügge: Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngrößen und Durchlässigkeitsbeiwerten.

M = Massenzementationskörper, sZ = stratiforme Zementation, dK = diskusförmige Konkretion, kK = kugelige Konkretion, fZ = flacher Zapfen; * = Durchlässigkeitsbeiwert nach Korngrößenzusammensetzung geschätzt, ⁺ = nach DETERS (1999), Legende s. Anh. 2.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Der Kiessandkörper mit Höhen von etwa 160 bis über 180 m ü.NN liegt unmittelbar nordwestlich des Ith, der hier Höhen von über 400 m ü. NN erreicht. Vorfluter für den Bereich des Kiessandkörpers dürften der etwa 1,5 km nördlich gelegene Gelbbach bzw. seine Zuflüsse sein, deren Talauen bei etwa 115 bis 130 m liegen. Ob der Kiessandkörper ein Erosionsrelikt von ehemals weitaus mächtigeren glazigenen Ablagerungen ist (NAUMANN 1927a) oder sich als Endmoräne (LÜTTIG 1954, DETERS 1999) schon bei der Bildung über das Ithvorland erhob, ist nicht abschließend zu klären. Aus der Verbreitung Weichsel-zeitlicher Sedimente in der näheren Umgebung kann jedoch sicher geschlossen werden, dass die heute bestehende topographische Situation – zumindest weitgehend - bereits in der Weichsel-Kaltzeit bestand. Damit gab es wahrscheinlich schon Eemzeitlich, sicher aber Weichsel-zeitlich eine hydrogeologische Situation, die der heutigen vergleichbar ist. Das Grundwasser strömte vom Heerburg-Berg (in dem die untersuchte Grube angelegt ist) in das westlich, nördlich bzw. östlich angrenzende, z.T. über 70 m tiefer liegende Ithvorland ab. Die Grundwasser-Oberfläche befindet sich heute im Bereich des Heerburg-Berges bei ca. 140-145 m ü.NN.

11 AUFSCHLUSS BEI EIME (ANHANG III: NR. 50)

Allgemeine Angaben

Die mittlerweile vollständig verfüllte ehem. Kies-/Sandgrube liegt ca. 1.700 m NE der Ortschaft Eime und ca. 100 m W der Bundesstraße B3 (Abb. IV-11.1). In der Grube wurden vor allem Mittelterrassenablagerungen der Leine abgebaut. Zum Untersuchungszeitpunkt war nur noch ein kleiner Teil der Grubenböschung aufgeschlossen. Durch die fortschreitende Verfüllung ist mittlerweile auch dieser Bereich nicht mehr zugänglich.

Im Untergrund steht Tonstein des Lias (Pliensbachium) an, der von 10 – 12 m mächtigen quartären Ablagerungen überlagert wird. Bei den Quartärzeitlich entstandenen Deckschichten handelt es sich zum überwiegenden Teil um Mittelterrassen-Ablagerungen der Leine. Die insgesamt 6 – 10 m mächtige Abfolge besteht aus teilweise schluffig bis sandigem Kies und eingeschalteten Schluff- und Sandlagen. Kies besteht teilweise bis über 60 % aus Oberkreide-Kalkmergelstein-Geröllen („Plänerkalk“). Einheimisch paläozoische Gerölle kommen mit 20 – 30 %, nordische mit meist < 1 % vor (JORDAN 1987). Nach mikroskopischen Untersuchungen handelt es sich bei den detritischen Karbonaten häufig um Foraminiferen- und Calcisphären-führenden Kalk-/Mergelstein („Plänerkalk“), um Schillkalk und Fossilbruchstücke. Außerdem kommen siliziklastischer Detritus und nicht selten Reste von stark verwitterten Sideritkonkretionen vor. Die Ungleichförmigkeit des untersuchten Mittelkieses lag bei $U = 21,2$, so dass die Berechnung der Durchlässigkeit nicht möglich war. Über den Leine-Mittelterrassen-Ablagerungen folgt mit scharfer Grenze eine etwa 2 – 3 m mächtige Grundmoräne des Drenthe-Stadiums der Saale-Kaltzeit (Abb. IV-11.2). Es handelt sich um tonigen, sehr stark sandigen Schluff, der Kies und Steine führt. Für die zu Geschiebelehm entkalkte Grundmoräne wurde eine Durchlässigkeit von $2,2 \times 10^{-7}$ m/s ermittelt. Der unverwitterte Geschiebemergel dürfte nach Analogieschlüssen deutlich gering-durchlässiger sein (geschätzt 10^{-9} m/s). Die Geschiebeführung ist vor allem in Hinblick auf die einheimisch-mesozoischen Komponenten heterogen, es kommen teils bis über 20 % Oberkreide-Kalkmergelstein, teils bis 80 % Oberjura-Kalkstein vor (JORDAN 1987). Das Profil wird nach JORDAN (1987) durch Weichselzeitlich entstandenen, einige dm mächtigen Löß abgeschlossen, der ebenso wie die höheren Teile des Geschiebelehms / -mergels auf Grund der schlechten Aufschlussverhältnisse nicht mehr zugänglich war. Es handelt sich um sehr schwach sandigen und tonigen Schluff, der meist zu Lößlehm entkalkt ist (JORDAN 1987).

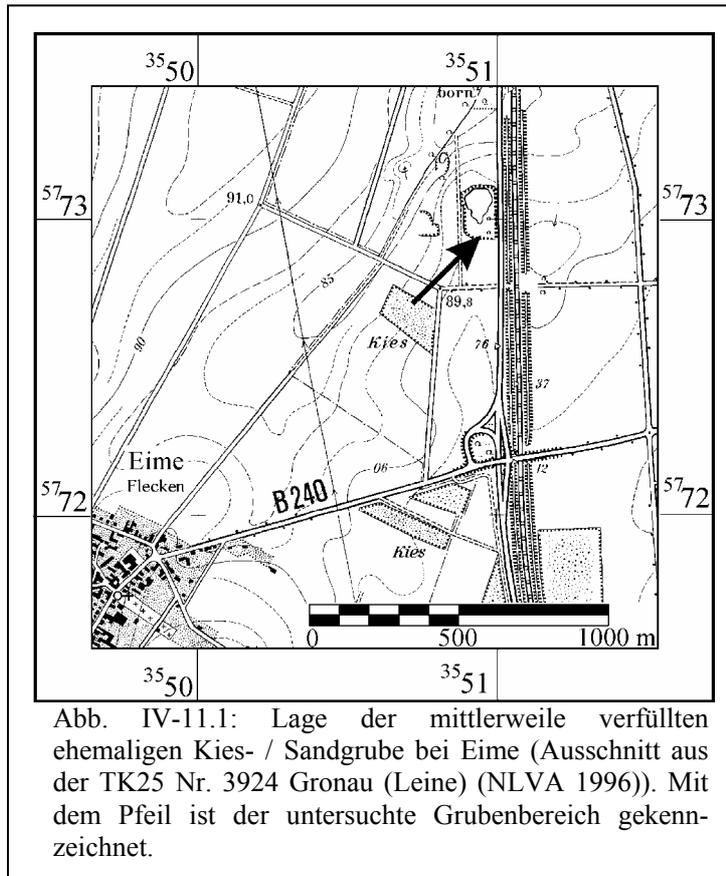


Abb. IV-11.1: Lage der mittlerweile verfüllten ehemaligen Kies- / Sandgrube bei Eime (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 3924 Gronau (Leine) (NLVA 1996)). Mit dem Pfeil ist der untersuchte Grubenbereich gekennzeichnet.

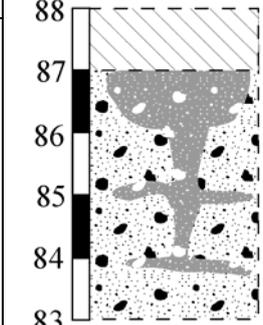
Zem. - Typ	[m] ü.NN		GKG [Gew. %]		Lockersediment	
			unzem. Sediment	zem. Sediment	Korngröße	k _f -Wert [m/s]
M	87	qD//Lg-Mg	28,0	46,9	U, s4, t, g, x	2,2 x 10 ⁻⁷
M, Z	85	qM//f		64,3	G, lag(S)	10 ^{-2*} lag(10 ^{-4*})
M	84			58,3		

Abb. IV-11.2: Ehem. Kiesgrube bei Eime: Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße (nach Geländeansprache) und Durchlässigkeitsbeiwert.

M = Massenzementationskörper, Z = Zapfen, * = Durchlässigkeitsbeiwert nach Korngrößenzusammensetzung geschätzt, Legende s. Anh. 2.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Die Mittelterrasse liegt bei über 90 m ü.NN. Die Mittelterrassen-Ablagerungen nehmen gegenüber dem Vorflutniveau eine relative Hochlage ein, so dass Grundwasser heute in ihrem tieferen Teil vorkommt (DÖRHÖFER & GOLDBERG in: JORDAN 1987). Das Grundwasser strömt aus diesem Bereich etwa nach Nordosten auf die Leine zu (JORDAN 1987). Die Leine, die knapp 2 km östlich und nordöstlich der Grube fließt, liegt bei etwa 78 m ü.NN. Die Basis der meist 5 bis 10 m mächtigen, Weichsel-zeitlichen Niederterrassen-Sedimente befindet sich unterhalb von 70 m ü.NN (JORDAN 1987). Es ist davon auszugehen, dass sich mit der Eintiefung, die der Ablagerung der Niederterrassen-Sedimente vorausging, auch das Vorflutniveau und damit die Grundwasser-Oberfläche absenkten. Daraus ergibt sich, dass die Grundwasser-Oberfläche seit der Weichsel-Kaltzeit bei heutigem Niveau oder tiefer lag und sich der Bereich der ehemaligen Kiesgrube seitdem in vadosem Milieu befindet.

12 AUFSCHLUSS BEI BANTELN (ANHANG III: NR. 51)

Allgemeine Angaben

Die stillgelegte ehemalige Kies- und Sandgrube befindet sich ca. 100 m N Banteln (Abb. IV-12.1). Insgesamt bieten die Böschungen bereichsweise gute Aufschlussverhältnisse. Teile der Grube, in der Mittelterrassen-Ablagerungen der Leine abgebaut wurden, sind mit Bauschutt verfüllt. Andere Bereiche dienen als Baustofflager.

Unter etwa 8 – 9 m mächtigen quartären Deckschichten – im wesentlichen Mittelterrassen-Ablagerungen der Leine - stehen Ton- und Tonmergelstein des Lias (Hettangium-Sinemurium) an (JORDAN 1987). Die etwa 7 m mächtigen Mittelterrassen-Ablagerungen bestehen hauptsächlich aus sandigem, teilweise schwach schluffigem Kies. In Dünnschliffen kommen neben zahlreichen detritischen Karbonatgeröllen (Mikrit, Fossilreste, Foraminiferenkalk, Calcisphärenkalk usw.) Quarz, Feldspat, anderer siliziklastischer Detritus und seltener opake Minerale vor. Die Durchlässigkeit konnte nicht berechnet werden, da die Ungleichförmigkeit des Kieses bei $U = 31,8$ lag. Im Bereich des Grubeneingangs wird der Mittelterrassen-Kies, der große Mengen Oberkreide-Kalk- und -Mergelstein führt, von Geschiebemergel-Resten überlagert. Die Grenze zwischen Grundmoräne und Mittelterrassen-Ablagerungen ist kryoturbat deformiert. Der nur wenige dm-mächtige Geschiebelehm / -mergel ist in den oberen Partien entkalkt und nur im basalen Teil schwach kalkig. Er wird – mit unscharfem Übergang – von einigen dm Lößlehm überlagert (Abb. IV-12.2).

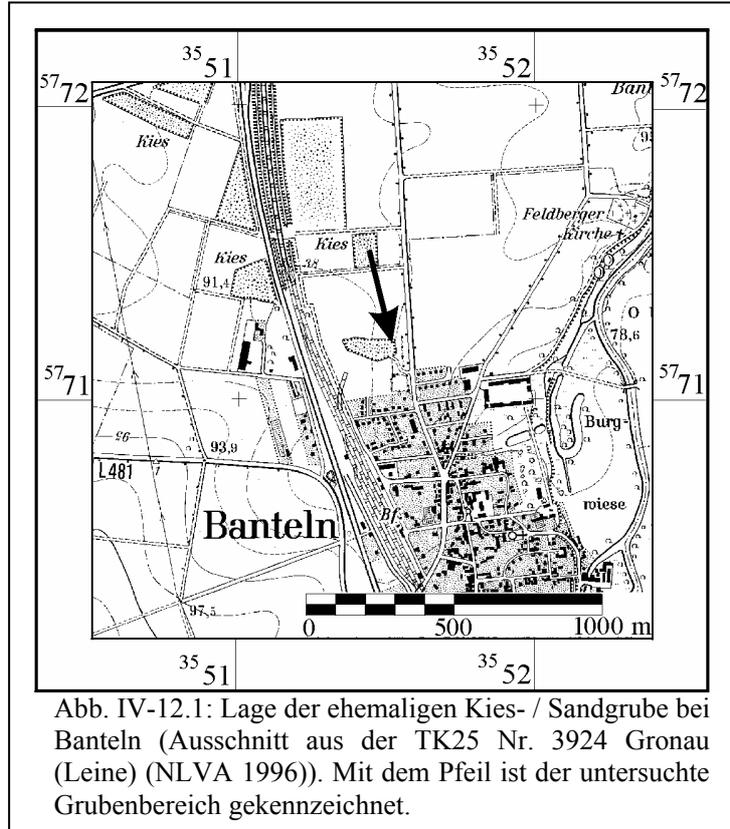


Abb. IV-12.1: Lage der ehemaligen Kies- / Sandgrube bei Banteln (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 3924 Gronau (Leine) (NLVA 1996)). Mit dem Pfeil ist der untersuchte Grubenbereich gekennzeichnet.

Karbonatische Zementation kommt im Eingangsbereich der stillgelegten Grube vor.

Zem. - Typ	[m] ü.NN	[m] ü.NN	GKG [Gew. %]		Lockersediment	
			unzem. Sediment	zem. Sediment	Korngröße	k _f -Wert [m/s]
M	92,0	qw//Lol	22,2 unten > 50*	67,1	U, s	10 ⁻⁶
	91,5	qD//Lg-Mg			U, s4, g, x	10 ⁻⁵
	91,0	qM//f			G, s	10 ⁻²
	90,5					

Abb. IV-12.2: Ehem. Kies-/Sandgrube bei Banteln: Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommendem Zementationstyp, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße (nach Geländeansprache) und geschätztem Durchlässigkeitsbeiwert.

M = Massenzementationskörper; * Wert aus JORDAN (1987), Legende s. Anh. 2.

13 AUFSCHLUSS BEI BETHELN (ANHANG III: NR. 53)

Allgemeine Angaben

Die ehemalige Kies- / Sandgrube bei Betheln wird durch die Fa. Fischer als Bauschuttdeponie genutzt und sukzessive verfüllt. Die Grube befindet sich ca. 1,8 km N Betheln und ca. 200 m SW der Hügelergräber am Osterholz (Abb. IV-13.1). Zum Untersuchungszeitraum bestanden an der N-Grubenwand und im NE Bereich der Grube noch gute Aufschlussverhältnisse. Unmittelbar S der Bauschuttdeponie wurde in jüngster Zeit eine kleinere Sandgrube neu aufgefahren.

Die ehemalige Kies-/Sandgrube liegt auf der Südwestflanke des Hildesheimer Waldes, der in diesem Bereich vor allem aus Gesteinen der Muschelkalk-Serie der Trias besteht. Das im Bereich der Grube unterlagernde Festgestein wird von Ablagerungen des mittleren Keupers aufgebaut (HOFFMANN 1927). Die Basis quartärer Ablagerungen liegt in diesem Bereich bei etwa 100 m ü.NN (KUSTER & MEYER 1995), so dass die Quartärmächtigkeit bei Geländehöhen von etwa 130 bis 150 m ü.NN einige 10 er m beträgt. Im Aufschluss stehen im wesentlichen z.T. kiesige Sand-schichten an, in die – oft rinnenartig – Kieslagen und selten grobe Blockpackungen eingeschaltet sind (Abb. IV-13.2). Der Kies besteht ganz überwiegend aus Ton- und Schluffstein des Keupers und Kalkstein des Muschelkalkes. In den Dünnschliffen kommen vor allem karbonatischer Detritus (z.B. Mikrit, Fossilkalk, Fossilreste, Dolomit), Quarz, Feldspat und andere siliziklastische Körner sowie selten Schwerminerale (z.B. Hornblende) vor. Außerdem gibt es häufig opake Minerale, bei denen es sich um stark verwitterte Sideritkongkretionen handelt. Der am unverfestigten Sand ermittelte Gesamtkarbonatgehalt von 16,4 Gew.-% dürfte in den Kiesschichten auf Grund des großen Anteils von Muschelkalk-Geröllen deutlich höher sein. Die Schmelzwasser- Sedimente entstanden im Drenthe-Stadium der Saale-Kaltzeit (LÜTTIG 1954). Den Abschluss des aufgeschlossenen Profils bildet Weichsel-zeitlicher Lößlehm, der die Drenthe-zeitlichen Sedimente überlagert. Es handelt sich um schwach tonigen und feinsandigen Schluff, der kalkfrei und einige dm mächtig ist.

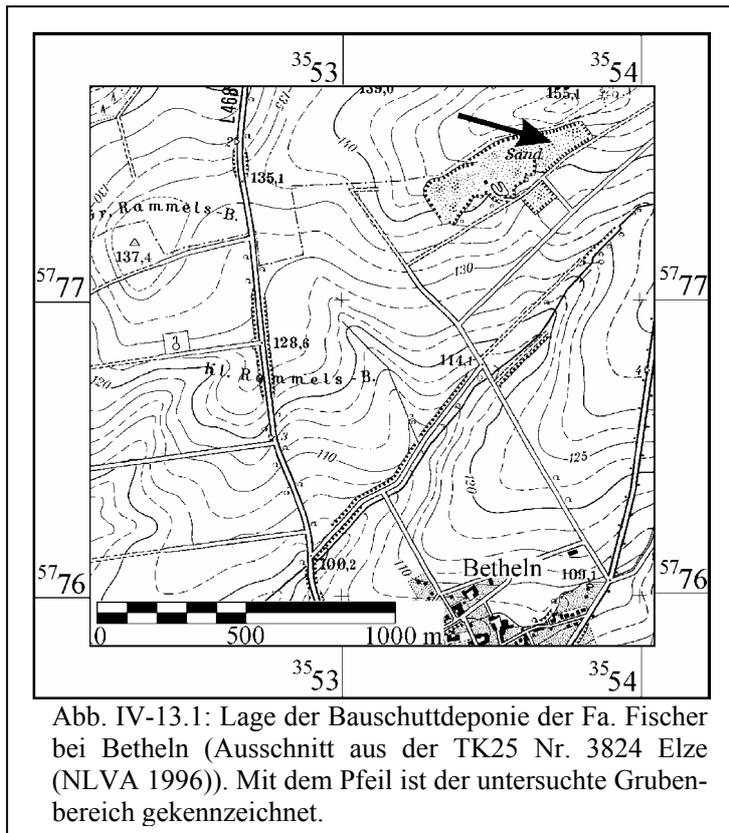


Abb. IV-13.1: Lage der Bauschuttdeponie der Fa. Fischer bei Betheln (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 3824 Elze (NLVA 1996)). Mit dem Pfeil ist der untersuchte Grubenbereich gekennzeichnet.

Zem. - Typ	[m] ü.NN	[Diagram]	GKG [Gew.-%]		Lockersediment	
			unzem. Sediment	zem. Sediment	Korngröße	k _r -Wert [m/s]
M	144	[Diagram showing sediment layers with labels qw//Lol and qD//gf]	16,4		U, s, t2	10 ⁻⁶
M	143			47,2	S, g	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴
M	142			54,7	lag (gG, fg, mg, x, s2),	10 ⁻²
M	141			50,4	lag (mG, s, fg, gg2),	10 ⁻²
	140					

Abb. IV-13.2: Ehem. Kies-/Sandgrube Fa. Fischer bei Betheln: Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommendem Zementationstyp, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße (nach Geländeansprache) und Durchlässigkeitsbeiwert (nach Korngröße geschätzt). M = Massenzementationskörper, Legende s. Anh. 2.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Die aufgeschlossenen Zementationskörper befinden sich zwischen etwa 140 und 143 m ü.NN. Etwa 400 m südöstlich der Grube fließt der Bethelner Bach, dessen Talboden hier bei ca. 125 – 130 m ü.NN liegt. Die morphologische Situation deutet einen nach Süden gerichteten Grundwasser-Abstrom an, der von den nördlich des Vorfluters gelegenen Hügeln, in denen sich die Grube befindet, auf den Bethelner Bach gerichtet ist. Nach der Verbreitung von Weichsel-zeitlich entstandenem Löß /-lehm, der bis unmittelbar an die Talau des Bethelner Baches heranreicht, besteht die heute existierende morphologische und damit auch die hydrogeologische Situation zumindest seit der Weichsel-Kaltzeit.

14 AUFSCHLUSS BEI FREDEN / LEINE (ANHANG III: NR. 64)

Allgemeine Angaben

Der Kies- / Sandkörper von Freden/Leine ist derzeit noch durch drei größere Grubenkomplexe sehr gut aufgeschlossen (Abb. IV-14.1). Er besteht aus Drenthe-zeitlichen glazigenen Sedimenten und wird seit über 100 Jahren intensiv ausgebeutet. In den noch abbauwürdigen Bereichen bestehen von S nach N die Grube Fischer, die Grube Ulrich und die Grube Lohmann, wobei Kies- und Sand derzeit nur noch von der Fa. Ulrich abgebaut wird. Die übrigen Gruben werden teilweise mit Bauschutt verfüllt bzw. offen gelassen. Die oberhalb der Grundwasseroberfläche liegende Lagerstätte ist in weiten Teilen ausgekiest. Ob die Rohstoffgewinnung im Naabbau fortgeführt wird oder eine Folgenutzung durch einen Freizeitpark stattfinden wird, ist derzeit noch ungeklärt. Teile der ausgekiesten Gruben werden sukzessive mit Bauschutt verfüllt. Die Schmelzwasser-Ablagerungen des Kiessandkörpers von Freden / Leine sind bis zu 60 m mächtig (z.B. FELDMANN & GROETZNER 1998). Die Länge des Kiessandkörpers beträgt in NW-SE-Richtung max. ca. 2 km bzw. in NE-SW-Richtung max. ca. 0,6 km Er befindet sich in einem breiten Tal, das parallel zum Leinetal verläuft und zwischen einem Muschelkalkrücken im NE und dem vor allem aus Kalksteinen des Malm bestehenden Selter im SW liegt (HARMS 1983, Abb. IV-14.2).

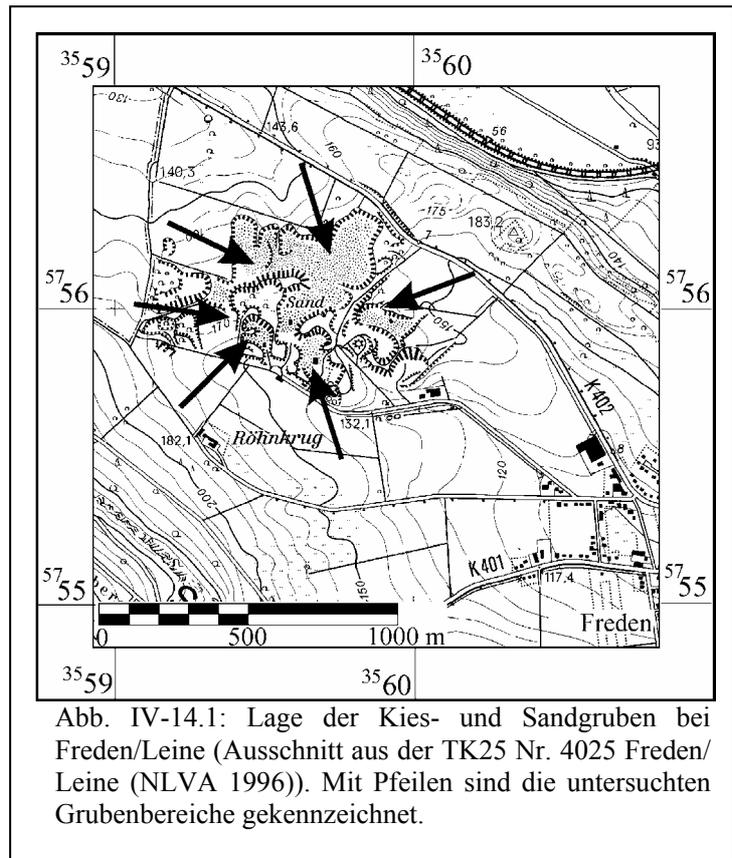
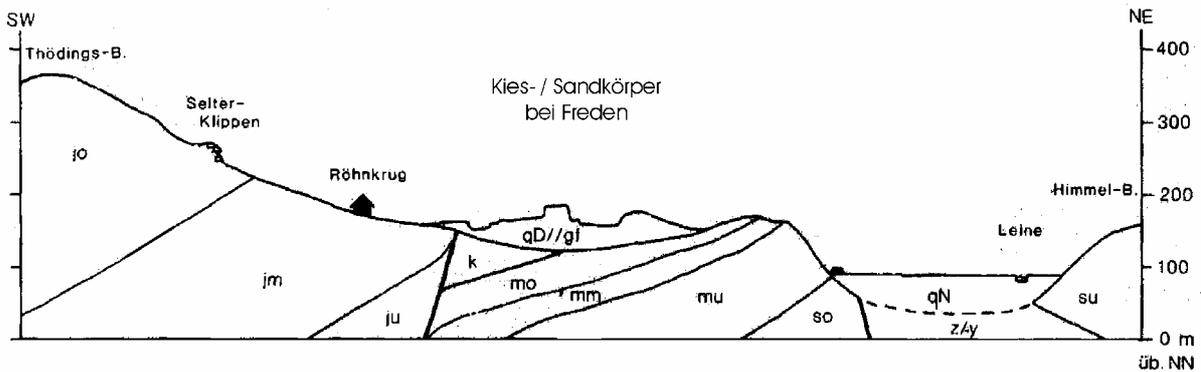


Abb. IV-14.1: Lage der Kies- und Sandgruben bei Freden/Leine (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 4025 Freden/Leine (NLVA 1996)). Mit Pfeilen sind die untersuchten Grubenbereiche gekennzeichnet.



Legende:	jo: Malm	k: Keuper	so: Oberer Buntsandstein
qN: Leine-Niederterrasse	jm: Dogger	mo: Oberer Muschelkalk	su: Unterer Buntsandstein
qD//gf: Schmelzwasser-Ablagerungen des Drenthe-Stadiums (Saale-Kaltzeit)	ju: Lias	mm: Mittlerer Muschelkalk	z/ -y Zechstein (Gipshut)
		mu: Unterer Muschelkalk	

Abb. IV-14.2: Geologischer Schnitt durch das Leinetal nördlich von Freden (2-fach überhöht, vereinfacht nach HARMS 1983).

Der Kiessandkörper von Freden besteht vor allem aus Sand-Schichten, in die Schluff- und Kieslagen eingeschaltet sind. Das Sediment ist in einigen Teilen des Kiessandkörpers intensiv glazitektonisch, teilweise in Form von Kollaps-Abtau-Strukturen deformiert sowie durch Abschiebungen verworfen. Außerdem sind verschiedene Bereiche kryoturbar deformiert. Das Sediment besteht überwiegend aus einheimisch-mesozoischen Komponenten, bei denen Gerölle aus Oberkreide-, Muschelkalk- und Malm-Kalkstein überwiegen (HARMS 1984, LATZKE 1996). In Dünnschliffen besteht der Detritus überwiegend aus Quarz, Feldspat und anderem siliziklastischen Detritus. Außerdem ist kalzitischer Detritus häufig (z.B. Mikrit, Oolith, Fossilkalk,

Fossilreste). Seltener gibt es Dolomit und Echinodermenreste aus Fe-Kalzit. Außerdem kommen gelegentlich verwitterte Reste von Sideritkonkretionen, Kohleflitter und andere opake Minerale, Glaukonit und Schwerminerale (u.a. Hornblende) und sehr selten Knochenreste vor.

Schon WERMBTER (1891) erkannte die pleistozäne Entstehung des Kiessandkörpers und berichtete darüber hinaus von „...kalkig verkitteten Konglomeratlagen...“ und von Kalkkonkretionen, die er mit „Imatrasteinen“ (s. auch SALMI 1959) verglich. MÜLLER (1896), der ebenfalls Kalkkonkretionen („Kalksinterknollen“) erwähnte, deutete die Hügel bei Freden als Endmoräne, was LÜTTIG (1954, 1960) präziserte und ergänzte, indem er die Sedimente als Satzendumoräne bzw. als Kames in einem Toteisgebiet ansprach. Vor allem auf Grund von Lagerungsbeziehungen zur Leine-Mittelterrasse ging er von Drenthe-zeitlicher Entstehung aus (LÜTTIG 1960). Dazu beschrieb LÜTTIG (1960), dass in den Schmelzwasser-Ablagerungen Gerölle aus karbonatverkitteten Mittelterrassen-Sedimenten der Wispe auftreten, was allerdings durch spätere Bearbeiter nicht wieder beobachtet wurde (mündl. Mitt. PERSCHKE, LATZKE, GROETZNER, eigene Befunde). LATZKE (1996) fand im Rahmen einer umfassenden Neubearbeitung mehrere Fließmoränen („flowtills“), die in die Schmelzwasser-Ablagerungen im Nordteil des Kiessandkörpers eingeschaltet sind. Er konnte darüber hinaus nachweisen, dass der Kiessandkörper vom Saale-Gletscher überfahren wurde, was auf Ablagerung an einem über längere Zeit stagnierenden Eisrand hinweist. Während der Weichsel-Kaltzeit entwickelten sich unter periglazialen Bedingungen weiträumig Fließerden an den Hängen des Selter und den Höhen nordöstlich des Kiessandkörpers. Dazu lagerte sich Löß ab, der häufig den Dachbereich der aufgeschlossenen Profile bildet.

In den Schmelzwassersedimenten, die durch zahlreiche kleinere Gruben und Abbaubereiche aufgeschlossen sind (Abb. IV-14.1), kommen karbonatisch zementierte Partien in großer Vielzahl und Formenvielfalt vor. Es wurden insgesamt 8 Aufschlussbereiche untersucht (Abb. IV-14.3).

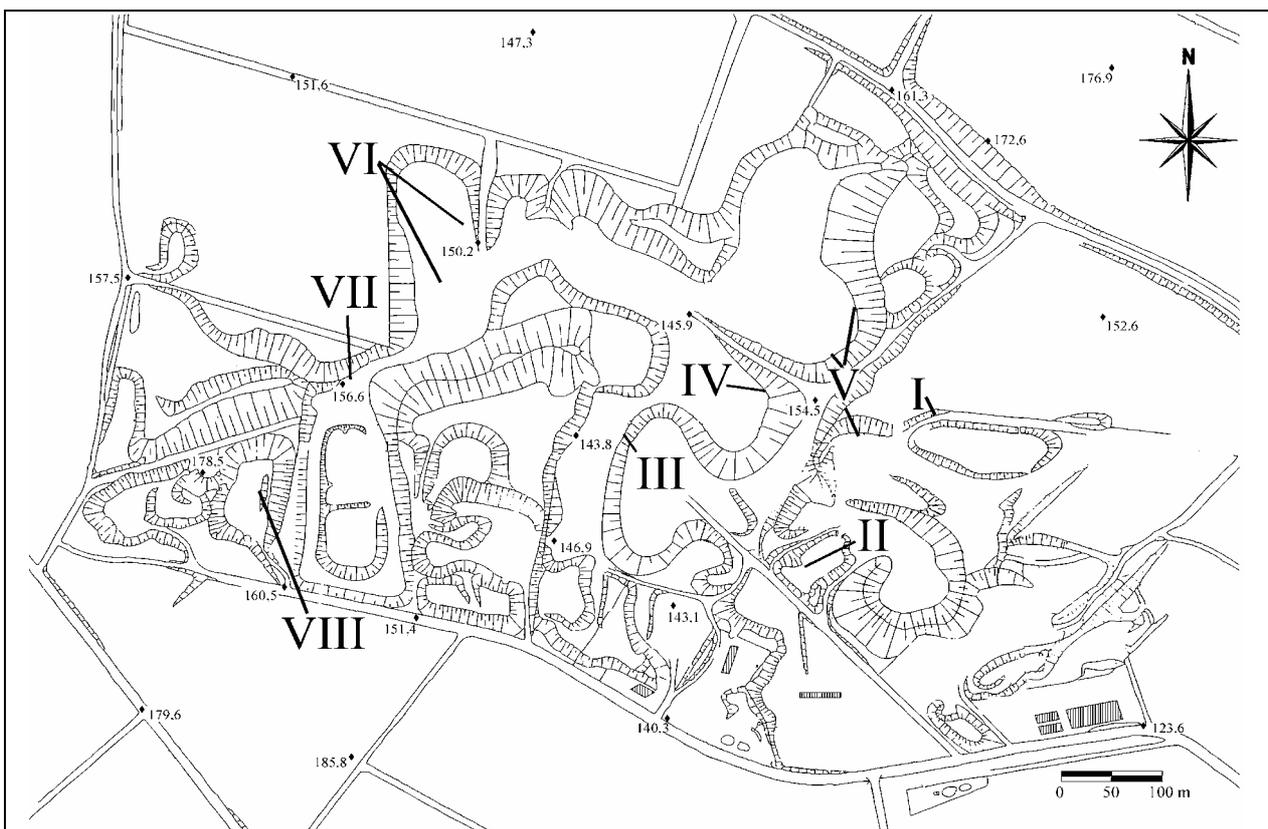


Abb. IV-14.3: Kies-/Sandgruben bei Freden. Mit römischen Ziffern sind die untersuchten Aufschlussbereiche gekennzeichnet. (Karte verändert und aktualisiert nach KATASTERAMT ALFELD 1996a-d).

Aufschlussbereich I:

Am Nordrand des östlichen, teilweise verfüllten Grubenteils sind in den höchsten 2 m feinkörnige Schmelzwasser-Ablagerungen aufgeschlossen (Abb. IV-14.4). Die darüber folgenden Schichten - wahrscheinlich nur noch einige dm Boden - waren zum Untersuchungszeitpunkt abgeschoben. Die unmittelbar im Liegenden folgenden Schichten sind nicht aufgeschlossen.

Zem.-Typ	[m] ü.NN	GKG [Gew. %]		Lockersediment	
		unzem. Sediment	zem. Sediment	Korngröße	k _r -Wert [m/s]
sZ	163,0	9,4	43,1		
dK	162,0	12,5	45,0	wl (fS, u, zt-ms), (U, fs, zt-t), dn-lag(T, u)	10 ⁻⁵ 10 ⁻⁶ 10 ⁻⁸
dK dK	161,0	11,7	48,0		

Abb. IV-14.4: Aufschlussbereich I: Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße (nach Geländeansprache) und Durchlässigkeitsbeiwert (nach Korngröße geschätzt).

sZ= stratiforme Zementation, dK = diskusförmige Konkretion, Legende s. Anh. 2.

Aufschlussbereich II:

Die im Aufschlussbereich II zwischen etwa 138 – 146 m ü.NN anstehenden Schmelzwasser-Ablagerungen sind glazitektonisch stark deformiert. Es handelt sich im wesentlichen um Sandschichten, in die dünne Schluff- und meist einige dm-mächtige Kieslagen eingeschaltet sind. Der Kies füllt dabei häufig in den Sand und Schluff eingeschnittene Rinnen. Im zentralen Teil des Aufschlusses sind die Schichten diapirartig verstellt, randlich sind die Sedimente verfaltet oder als Schuppen eingepreßt. Mit zunehmender Entfernung vom diapirartigen Zentralteil nimmt auch der Grad der glazitektonischen Deformation ab. Dabei treten karbonatische Verfestigungen in vier Bereichen in Form von Massenzementationskörpern und Zapfen auf. Dazu gibt es in den höheren Aufschlussbereichen um meist noch erkennbare Pflanzenwurzeln weißes Kalzitpulver und Rhizokonkretionen.

Aufschlussbereich III:

Zem.-Typ	[m] ü.NN	Lockersediment	
		Korngröße	k _r -Wert [m/s]
M	147	S	10 ⁻⁴
	146	G,s	10 ⁻²
	145	S	10 ⁻⁴

Abb. IV-14.5: Schematisches Säulenprofil von Aufschlussbereich III mit Angaben zu vorkommendem Zementationstyp, Korngröße (nach Geländeansprache) und Durchlässigkeitsbeiwert (nach Korngröße geschätzt).

M= Massenzementationskörper, Legende s. Anh. 2.

Aufschlussbereich IV:

Zem.-Typ	[m] ü.NN	GKG [Gew. %]		Lockersediment	
		unzem. Sediment	zem. Sediment	Korngröße	k _r -Wert [m/s]
Z	154	11,0	30,9	mS, gs, fg2	6,3 x 10 ⁻⁴
gZ	153				
	151	7,1	41,2	mS, fs	2,0 x 10 ⁻⁴
	149	5,6	37,2	mS, fs, gs2	2,3 x 10 ⁻⁴
	148				

Abb. IV-14.6: Schematisches Säulenprofil Aufschlussbereich IV: Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße und Durchlässigkeitsbeiwert.

Z= Zapfen, gZ = gebogene Zapfen, Legende s. Anh. 2.

Aufschlussbereich V:

Aufschlussbereich V umfaßt Abbauwände in zwei Grubenteilen, durch die über 10 m mächtige Schmelzwasser-Ablagerungen aufgeschlossen sind und die lediglich durch einen Zufahrtsweg getrennt werden.

Zem.- Typ	[m] ü.NN	Horizont	GKG [Gew. %]		Lockersediment	
			unzement. Sediment	zement. Sediment	Korngröße	k _r -Wert [m/s]
dK	156	v-3	9,1	23,6	U ₂ fs ⁺	10 ⁻⁶ - 10 ^{-7*}
	155				fS, u ⁺	10 ^{-5*}
dK	154	v-2	8,3	22,7	U, fs ⁺	10 ⁻⁶ - 10 ^{-7*}
	153				mS, fs4	1,5 x 10 ⁻⁴
M	152	v-1	8,4	21,3	mS, fs2	4,6 x 10 ⁻⁴
	151				mS, fs5	1,7 x 10 ⁻⁴
	150		8,8	24,5	mS, fs2	3,5 x 10 ⁻⁴

Abb. IV-14.7: Schematisches Säulenprofil Aufschlussbereich V: Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße und Durchlässigkeitsbeiwerten. M = Massenzementationskörper, dK = diskusförmige Konkretion; ⁺ = nach Geländeansprache, * = Durchlässigkeitsbeiwert nach Korngrößenzusammensetzung geschätzt, Legende s. Anh. 2.

Aufschlussbereich VI:

Im Aufschlussbereich VI sind etwa 10 m mächtige Schmelzwasser-Schichten aufgeschlossen, in deren tieferem Teil häufig Abschiebungen vorkommen. Es handelt sich im wesentlichen um Sand, der unten feinsandig ist und nach oben zunehmend gröber wird. Hier gibt es diskusförmige Konkretionen in der Füllung von Klüften und Massenzementationskörper (Abb. IV-14.8).

Zem.- Typ	[m] ü.NN	GKG [Gew. %]		Lockersediment	
		unzement. Sediment	zement. Sediment	Korngröße	k _r -Wert [m/s]
M	154	8,4	37,0	mS, lag (gS)	10 ⁻⁴
dK	153	7,5	37,4	mS, zt-fs, lag (fS)	10 ⁻⁴
	150				
	149				

Abb. IV-14.8: Schematisches Säulenprofil Aufschlussbereich VI: Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße (nach Geländeansprache) und Durchlässigkeitsbeiwert (nach Korngröße geschätzt).

M = Massenzementationskörper, dK = diskusförmige Konkretion, Legende s. Anh. 2.

Aufschlussbereich VII:

Zem.- - Typ	[m] ü.NN 	GKG [Gew. %]		Lockersediment	
		unzement. Sediment	zement. Sediment	Korngröße	k _r -Wert [m/s]
kK-dK	161			G, s ⁺	10 ^{-3*}
	160			mS ⁺ ,	10 ^{-4*}
	159	15,2	29,2	lag (mS, gs, fs2)	3,4 x 10 ⁻⁴
	158				

Abb. IV-14.9: Schematisches Säulenprofil von Aufschlussbereich VII mit Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße und Durchlässigkeitsbeiwert. kK = kugelige Konkretion, dK = diskusförmige Konkretion; ⁺ = nach Geländeansprache, * = Durchlässigkeitsbeiwert nach Korngrößenzusammensetzung geschätzt, Legende s. Anh. 2.

Aufschlussbereich VIII:

Im Aufschlussbereich VIII stehen über 10 m mächtige Schmelzwasser-Ablagerungen an. Sie bestehen aus Fein- bis Mittelsand, in den dünne Schlufflagen- und linsen bzw. Grobsandschichten eingeschaltet sind. Außerdem kommt im höheren Teil des aufgeschlossenen Profils ein etwa 1 m mächtiger Schluffhorizont vor. Die flach (< 10°) nach Süden einfallenden Schichten sind von mit 60° – 70° steilstehenden Abschiebungen durchsetzt, die im westlichen Profilverteil nach Ost-südost, bzw. im östlichen Profilverteil nach West-nordwest einfallen. Die Abschiebungen bilden häufig Klüfte mit Öffnungsweiten von bis zu 5 cm und sind mit Ton, Schluff und Sand gefüllt. Karbonatische Zementationen sind sehr häufig, Sie kommen in verschiedenen Horizonten vor und es gibt sie in großer Formenvielfalt. Im Aufschlussbereich VIII wurden sechs unterschiedliche Typen karbonatischer Zementation untersucht.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Die in der Talung von Freden anstehenden mesozoischen Schichten (Abb. IV-14.2) bestehen im wesentlichen aus schlecht grundwasserleitendem Ton- und Schluffstein (Lias) mit eingeschalteten Sand- (Keuper) bzw. Kalksteinschichten (Oberer Muschelkalk). Grundwasser-Abstrom findet vor allem in quartären Lockersedimenten und untergeordnet in geklüfteten Sand- und Kalksteinschichten statt. Aus dem Bereich des Kiessandkörpers strömt das Grundwasser Richtung Nordwest und entwässert über die Wispe in die Leine (alles: HARMS 1984). Nach HARMS (1984) erreichen Weichsel-zeitlich entstandene Niederterrassen-Ablagerungen im Bereich um Freden Mächtigkeiten zwischen 3 bis 7 m. Berücksichtigt man die 2 bis 5 m mächtigen Auenablagerungen auf der Niederterrasse, ist für die Zeit nach Abschmelzen des Drenthe-Gletschers bis zur Aufschotterung des Weichsel-zeitlichen Niederterrassen-Körpers mit Einschneidungsbeträgen von 5 bis 12 m unter heutiges Auenniveau zu rechnen, womit sich in diesem Zeitraum die Grundwasser-Oberfläche um einige m abgesenkt haben dürfte. Damit sind seit der früh-Weichsel-zeitlichen Einschneidung Grundwasser-Höhen anzunehmen, die auf heutigem Niveau, das knapp unterhalb der Grubensohle (bei etwa 142 m ü. NN) oder darunter lagen.

15 AUFSCHLUSS BEI ENGELADE (ANHANG III: NR. 67)

Allgemeine Angaben

Ca. 600 m S der Ortschaft Engelade liegt eine stark verfallene Kies-/Sandgrube (Abb. IV-15.1). Unmittelbar W der Grube befinden sich die in diesem Bereich etwa von S nach N fließende Nette, die Bundesstraße B248 und die Autobahn A7. Die Grube ist in weiten Teilen weitgehend renaturiert. Frische Aufschlüsse sind nur im Zusammenhang mit Rutschungen der übersteilten Böschungen und dem sporadischen Abbau von Sand und Kies zu erwarten. Im Untergrund der ehemaligen Grube gibt es Schichten des Oberen und des Mittleren Buntsandstein. Der Heber-Höhenzug im Westen des Nettetales wird im wesentlichen von Muschelkalkschichten aufgebaut (KOENEN 1895). Im tieferen Teil der in der ehem. Sandgrube aufgeschlossenen Schichten stehen Schmelzwasser-Ablagerungen an, die wohl Elster-zeitlich entstanden (LÜTTIG 1954, HEISE 1996). Es handelt sich um eine mindestens 10 m mächtige Abfolge aus Sand mit eingeschalteten Schluff- oder Kieslagen. Das Material besteht hauptsächlich aus Quarz, Feldspat und siliziklastischen Gesteinsbruchstücken. Vereinzelt kommen opake Minerale, z.T. als Neubildungen, Schwerminerale (z.B. Hornblende) und detritisches Karbonat vor. Darüber folgt ein etwa 20 cm mächtiger Horizont aus sandigem Schluff / schluffigem Sand, den WINTER (1998) als Schertill deutete, sowie 1 – 2 m mächtige Grundmoräne (Absetztil). Schmelzwasser-Sand und Moränenmaterial unterscheiden sich hinsichtlich des größeren karbonatischen Detritus (Sand – Kies) nicht signifikant, so dass der höhere Gesamtkarbonatgehalt des Geschiebemergels (7,3 Gew.-%) in der Ton- und Schlufffraktion enthalten sein muss. Während LÜTTIG (1954) auch für das Moränenmaterial Elster-zeitliche Entstehung diskutierte, machte WINTER (1998) Drenthe-stadiales Alter wahrscheinlich. Bei den nicht mehr aufgeschlossenen Ablagerungen oberhalb des Geschiebemergels handelt es sich nach HEISE (1996) um 2,6 m mächtige „jüngere“ Schmelzwasser-Schichten, ca. 1,6 m Weichsel-zeitliche Fließerde aus sandig, steinigem Schluff und 1,5 m Löß. Karbonatzementation kommt in Form von dünnen Massenzementationskörpern an der Basis des Schertills bzw. von kugeligen Konkretionen innerhalb des Geschiebemergels vor.

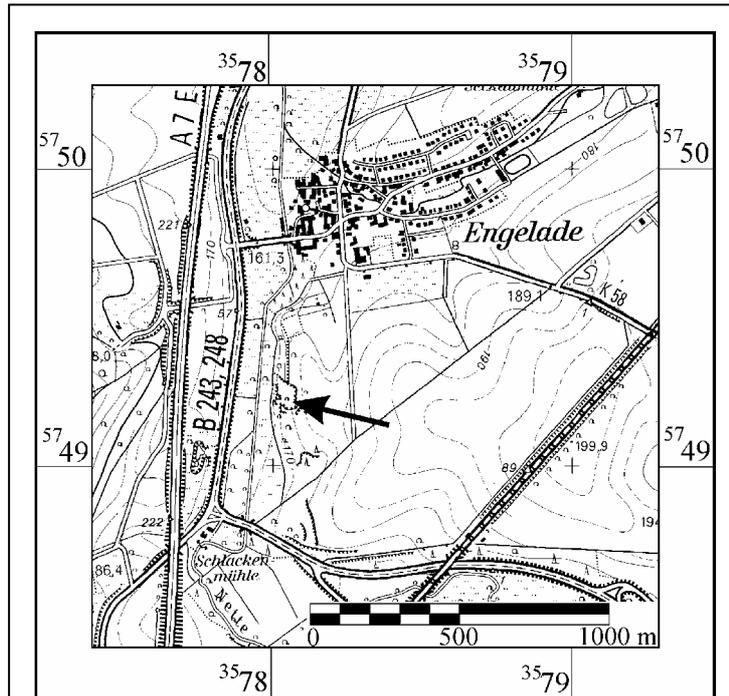


Abb. IV-15.1: Lage der Kies-/Sandgrube bei Engelade (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 4126 Bad Gandersheim (NLVA 1997)). Mit dem Pfeil ist der untersuchte Grubenbereich gekennzeichnet.

Zem.-Typ	[m] ü.NN	Diagramm	GKG [Gew. %]		Lockersediment	
			unzement. Sediment	zement. Sediment	Korngröße	k _r -Wert [m/s]
K	175	qD//Mg	7,3	43,6	U, s, g, t, x2 ⁺	10 ⁻⁸ - 10 ^{-9*}
M	174	qe//gf	0,4 / 0,1	35,2	U, s, lag (S,u) ⁺ mS, gs4	10 ^{-6*} 8,5 x 10 ⁻⁴

Abb. IV-15.2: Ehem. Sandgrube bei Engelade: Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße und Durchlässigkeitsbeiwerten. kK = kugelige Konkretion, M = Massenzementationskörper, ⁺ = nach Geländeansprache, * = Durchlässigkeitsbeiwert nach Korngrößenzusammensetzung geschätzt, Legende s. Anh. 2.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Die ehem. Sandgrube befindet sich unmittelbar östlich des Nettetales. Die Basis des Moränenmaterials befindet sich etwa 15 m oberhalb des heutigen Talbodens, der von Auenablagerungen gebildet wird (THIEM 1972), so dass das Grundwasser im Bereich der Grube nach Westen abströmt.

16 AUFSCHLUSS BEI BORNHAUSEN (ANHANG III: NR. 68)

Allgemeine Angaben

Ca. 600 m N der Ortschaft Bornhausen wird durch die Fa. Gropengießler eine Kies-/Sandgrube betrieben (Abb. IV-16.1). Die östlichen und westlichen Grubenteile stehen derzeit nicht im Abbau. Dennoch sind hier die Aufschlussverhältnisse, wie auch im zentralen Grubenteil, in dem derzeit verstärkt abgebaut wird, sehr gut. Die Grube liegt unmittelbar N einer Siedlungsabfalldeponie.

In der Kies-/Sandgrube werden bis zu 15 m mächtige Schmelzwasser-Ablagerungen abgebaut, in denen karbonatisch zementierte Partien in 4 Horizonten vorkommen (Abb. IV-16.2). Der präquartäre Untergrund besteht aus einige 100 m mächtigen Schichten des mittleren und unteren Buntsandstein sowie darunter folgender Salinarschichten des Zechstein. Im tiefsten Teil der Grube steht eine etwa söhllich lagernde Abfolge aus Feinsand und Schluff an, die nach FELDMANN & GROETZNER (1998) durch Schmelzwasser in größerer Entfernung zum Gletscher abgelagert wurde. Mit erosivem Kontakt folgen darüber nach NW einfallende Schmelzwasser-Schichten. Diese Abfolge zeigt eine

Vergrößerungstendenz zum Top („coarsening upwards“) von Fein- bis Mittelsand mit eingeschalteten Schluffschichten im tieferen Teil bis zu Mittel- bis Grobsand mit Kiesschichten im oberen Teil. Die Vergrößerung der Schmelzwasser-Ablagerungen entsteht möglicherweise während des Heranrückens eines Gletschers, wobei die Sand- und Kiesschichten im höheren Teil der Abfolge nach FELDMANN & GROETZNER (1998) als Gletschertor-Schwemmfächer gedeutet werden können. Die Schmelzwasser-Sedimente bestehen aus Quarz, Feldspat und Gesteinsbruchstücken (Metamorphite, Magmatite, Sedimente). Außerdem kommen Karbonat (u.a. Mikrit, Plänerkalk, Fossilreste), Glaukonit sowie selten opake Minerale und Schwerminerale (z.B. Hornblende) vor. Im Lockersediment kommen steilstehende NNW und SSE einfallende Verwerfungen vor, die nach UEBERSOHN (1990) auf Subrosion im tieferen Untergrund und nicht auf niedertauendes Toteis zurückzuführen sind. Den höchsten Teil der aufgeschlossenen Schichten bildet eine maximal 2 m mächtige, Weichsel-zeitliche Fließerde, die im Nordteil der Grube in ein bis zu 5 m mächtiges Lößderivat übergeht.

Die stratigraphische Stellung der Schmelzwasser-Ablagerungen ist umstritten. LÜTTIG (1954) nahm auf Grund von Leitgeschiebe-Untersuchungen Elster-zeitliche Entstehung an (Elster I, Bornhäuser Stadium). Durch Lagebeziehungen zu Mittelterrassen-Sedimenten kam DUPHORN (1976) dagegen zu dem Schluss, „...die glaziären Sedimente im Kartiergebiet (Anm.: gilt auch für die Schmelzwasser-Ablagerungen von Bornhausen) werden daher nicht der Elster-Kaltzeit, sondern dem Drenthe-Stadium der Saale-Kaltzeit zugeordnet...“, eine Auffassung, die schon THIEM (1972) vertrat. Die Argumente gegen eine Elster-zeitliche Entstehung werden von UEBERSOHN (1990) ergänzt. Dazu zeigte er aber auch, dass die von DUPHORN (1976) angeführte Einstufung auf Grund von Subrosion nicht zwingend ist und schließt, dass die stratigraphische Einstufung der Schmelzwasser-Ablagerungen offen bleiben muss.

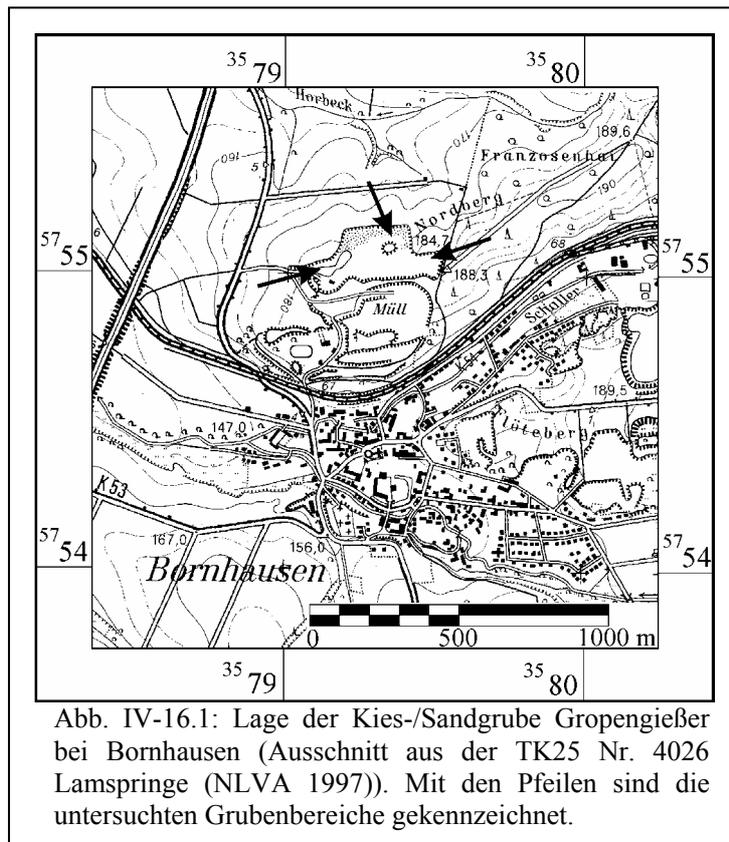


Abb. IV-16.1: Lage der Kies-/Sandgrube Gropengießler bei Bornhausen (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 4026 Lamspringe (NLVA 1997)). Mit den Pfeilen sind die untersuchten Grubenbereiche gekennzeichnet.

Zem.- Typ	[m] ü.NN	Horizont	GKG [Gew. %]		Lockersediment	
			unzement. Sediment	zement. Sediment	Korngröße	k _r -Wert [m/s]
fZ, dK, M	186	d.	6,0 / 8,0	17,4 / 23,1	mS – gS, g ⁺	10 ^{-3*}
	184				mS, fs2, gs2 mS,gs	2,2 x 10 ⁻⁴ 7,9 x 10 ⁻⁴
M	180	c.	11,2	29,8	fS – gS, g ⁺	10 ^{-3*} - 10 ^{-4*}
kK	178	b.	6,8	28,1	mS;fs	1,7 x 10 ⁻⁴
fZ, dK	176				fS – mS ⁺	10 ^{-4*}
fZ, dK	174	a.	7,5 / 12,2	34,5 / 35,8	fS – U, fs ⁺	10 ^{-5*} - 10 ^{-6*}
	172					

Abb. IV-16.2: Kies- / Sandgrube Fa. Gropengießler bei Bornhausen: Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße und Durchlässigkeitsbeiwerten.

kK = kugelige Konkretionen, dK = diskusförmige Konkretionen, fZ = flache Zapfen, M = Massenzementationskörper, ⁺ = nach Geländeansprache, * = Durchlässigkeitsbeiwert nach Korngrößenzusammensetzung geschätzt, Legende s. Anh. 2.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Die Schmelzwasser-Ablagerungen werden im Südosten durch das Tal der Schaller bzw. im Süden durch das Tal der Schildau, in die die Schaller unmittelbar westlich Bornhausen mündet, geschnitten. Die Schildau dürfte der dominierende Vorfluter sein, so dass mit überwiegend nach Süden gerichtetem Grundwasser-Abstrom zu rechnen ist. Die Einschneidung des Abschnittes des Schildau-Tales, das sich südlich Bornhausen etwa 20 m unterhalb der Basis der Sand-/Kiesgrube befindet, fand wahrscheinlich früh-Weichsel-zeitlich statt (THIEM 1972).

17 AUFSCHLUSS BEI ÖDISHAUSEN (ANHANG III: NR. 69)

Allgemeine Angaben

Die ehemalige Kies-/Sandgrube bei Ödishausen liegt zwischen Rhüden und Hahausen direkt an der Bundesstraße B82 (Abb. IV-17.1). Der mittlerweile völlig verfallene und zugewachsene Aufschluss ist teilweise mit Bauschutt aufgefüllt. Aus Böschungen ragen Zementationskörper heraus.

Die Höhenzüge nördlich und südlich des Aufschlusses sowie dessen präquartärer Untergrund bestehen im wesentlichen aus etwa nach Norden einfallenden Schichten der Trias. Dabei kommen nördlich des Tales Schichten des Muschelkalk und oberen Buntsandstein vor. Im Tal und im Bereich der ehem. Kiesgrube steht Gestein des mittleren bzw. südlich davon des unteren Buntsandstein an (JORDAN 1999). In der Grube, deren Basis bei etwa 205 m ü.NN liegt, wurde ca. 10 m mächtiger Kies und Sand abgebaut. Im tieferen Teil des Profils steht eine etwa 4 m mächtige Wechselfolge aus Grobsand-, Fein- und Mittelkiesschichten an, die mit etwa 20° – 24° nach Westen einfällt schichten abgebaut. Darüber folgt ca. 3 – 4 m mächtiger, ungeschichteter Grobkies, der sandig, fein- bis mittelkiesig und steinig ist (Abb. IV-17.2). Die Schichten sind kalkig (Gesamtkarbonatgehalt ca. 5 – 10 Gew.-%) und bestehen überwiegend aus

paläozoischer Grauwacke und Tonstein, mesozoischem Sand- und Kalkstein (Mikrit, Mikrospartit, „Plänerkalk“, Fossilreste, Oolith) sowie untergeordnet aus Geröllen nordischer Herkunft. Vor allem in Sandkorngröße treten opake Minerale und Schwerminerale hinzu. Während LÜTTIG (1954) die Ablagerungen als Schmelzwasser-Sedimente der Elster-Kaltzeit deutete, nahm BOMBIEN (1987) nach Auswertung des Geröllspektrums an, dass es sich um „Mischsediment“ handeln könnte. In diesem Modell vermischte sich das Flußwasser der Neile, die durch einen von Norden vorrückenden Gletscher in die Talung zwischen Hahausen und Rhüden, in der auch Ödishausen liegt, abgelenkt wurde, mit Schmelzwasser dieses Gletschers. Wenngleich die isolierte Lage des Vorkommens eine eindeutige Datierung nicht zuläßt, nahm BOMBIEN (1987) aus der Gesamtsituation am nördlichen Harzrand ein eher Saale-zeitliches Alter an, eine Auffassung der sich auch JORDAN (1999) anschloss.

Im Hangenden der Kies- und Sandschichten folgt eine schlecht aufgeschlossene, wenige dm mächtige Schluffschicht. Der kalkfreie Schluff enthält Sand, Kies und vereinzelt Steine und wurde von PERSCHKE (1993) wegen nordischer Geschiebe als Grundmoränen-Relikt gedeutet. Obwohl die Datierung des Geschiebelehms aussteht, spricht das Vorkommen Drenthe-zeitlicher Grundmoränen-Relikte bzw. das Fehlen Elster-zeitlicher Grundmoräne in der näheren Umgebung (JORDAN 1999) eher für Drenthe-zeitliche Entstehung. Das Profil wird nach oben durch fleckenhaft vorkommenden, meist nur wenige dm mächtigen, Weichsel-zeitlichen Lößlehm abgeschlossen.

In der ehemaligen Grube sind noch zwei größere Zementationskörper, die sich – im Gegensatz zu einigen kleineren verfestigten Bereichen - noch in-situ befinden.

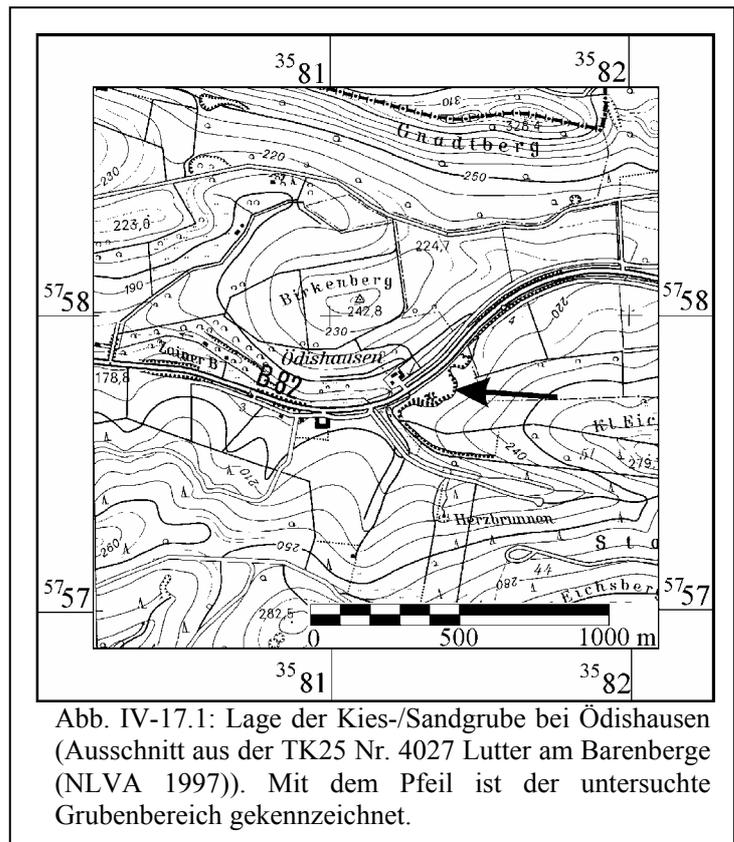


Abb. IV-17.1: Lage der Kies-/Sandgrube bei Ödishausen (Ausschnitt aus der TK25 Nr. 4027 Lutter am Barenberge (NLVA 1997)). Mit dem Pfeil ist der untersuchte Grubenbereich gekennzeichnet.

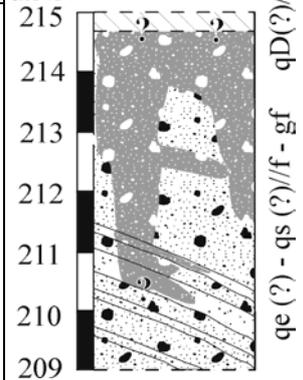
Zem.- - Typ	[m] ü.NN		GKG [Gew. %]		Lockersediment	
			unzement. Sediment	zement. Sediment	Korngröße	k _r -Wert [m/s]
M, Z	215				U, s, g, x2	10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁹
M, Z	214			31,1	gG, fg, mg, gs	10 ⁻¹ - 10 ⁻²
M, Z	213		5,5	27,3		
	212		9,9	28,0		
M	211			32,5 / 33,3	wl (gS), (fG), (mG, gg, x)	10 ⁻² - 10 ⁻³
	210			37,4		
	209			33,0		

Abb. IV-17.2: Ehem. Kies-/Sandgrube bei Ödishausen: Schematisches Säulenprofil mit Angaben zu vorkommenden Zementationstypen, Gesamtkarbonatgehalt (GKG), Korngröße nach Geländeansprache und nach Korngrößenzusammensetzung geschätzten Durchlässigkeitsbeiwerten. Z = Zapfen, M = Massenzementationskörper, Legende s. Anh. 2.

Hydrologische / Hydrogeologische Situation

Etwa 15 m unterhalb der Basis der aufgeschlossenen Schichten befindet der nach Westen fließende Zainer Bach. Sein Tal ist im wesentlichen mit Niederterrassen-Sedimenten gefüllt. Auf Grund der exponierten Lage wird versickerndes Niederschlagswasser rasch Richtung Zainer-Bach abströmen, so dass in den pleistozänen Sedimenten nicht mit nennenswerter Grundwasser-Führung zu rechnen ist.

ANHANG V: ÜBERSICHT DER ZEMENTATIONSFORMEN

1	Aufschluss bei Daerstorf (Anhang III: Nr. 14a).....	1
2	Aufschluss bei Hittfeld (Anhang III: Nr. 16).....	1
3	Aufschluss bei Breetze (Anhang III: Nr. 23).....	2
4	Aufschluss bei Holzen (Anhang III: Nr. 24).....	3
5	Aufschluss bei Volkstorf (Anhang III: Nr. 26).....	4
6	Aufschluss bei Krankenhagen (Anhang III: Nr. 38).....	5
7	Aufschluss bei Rumbeck (Anhang III: Nr. 39).....	5
8	Aufschluss bei Helpensen (Anhang III: Nr. 42).....	5
9	Aufschluss bei Bad Münder / Hachmühlen (Anhang III: Nr. 45).....	6
10	Aufschluss bei Coppenbrügge (Anhang III: Nr. 47).....	6
11	Aufschluss bei Eime (Anhang III: Nr. 50).....	7
12	Aufschluss bei Banteln (Anhang III: Nr. 51).....	7
13	Aufschluss bei Betheln (Anhang III: Nr. 53).....	7
14	Aufschluss bei Freden / Leine (Anhang III: Nr. 64).....	7
15	Aufschluss bei Engelade (Anhang III: Nr. 67).....	11
16	Aufschluss bei Bornhausen (Anhang III: Nr. 68).....	11
17	Aufschluss bei Ödishausen (Anhang III: Nr. 69).....	12

1 AUFSCHLUSS BEI DAERSTORF (ANHANG III: NR. 14A)

Zementationstyp: hängende Zapfen (Endostalaktiten)

Länge: max. 2 m

Durchmesser: bis 40 cm

Zementationsintensität: im Kern hoch (Gesamtkarbonatgehalt 22,5 Gew.-%), z.T. gibt es einige cm-mächtige, schlechter zementierte Säume um Zapfen (Gesamtkarbonatgehalt 13,0 Gew.-%)

Sediment: Schmelzwasser-Sand

Vorkommen: unterhalb der jüngeren Drenthe-Grundmoräne

Besonderheiten: kommen relikthaft in Massenzementationskörpern vor bzw. ragen teilweise unten aus ihnen heraus,

- bei Zapfen änderten sich z.T. Einfallswinkel der Zapfenlängsachsen und Zapfendurchmesser. Der Einfallswinkel der Zapfenlängsachsen wird beim Übergang von gröber- in feinkörnige Schichten eher flacher bzw. innerhalb der feinkörnigen Schichten wieder steiler, der Zapfendurchmesser steigt beim Übergang von gröber- zu feinkörnigen Schichten an

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: bis wenige m³

Zementationsintensität: mäßig bis hoch,

- in gröbereren Schichten ist die Zementationsintensität meist besser und die laterale Erstreckung der Zementation größer als in benachbarten feinkörnigen

Sediment: Schmelzwasser-Sand

Vorkommen: unterhalb der jüngeren Drenthe-Grundmoräne

Besonderheiten: bei Zementationskörpern, die auf Halde liegen, haften an der scharfen, ehemals oberen Begrenzungsfläche Geschiebemergelreste an,

- innerhalb der Zementationskörper sind die Schichten oft verfaltet und deformiert. Schichtverstellung wurde bei unzementiertem Sediment nicht beobachtet,
- Massenzementationskörper bildeten sich vor allem in den höheren Teilen der zementierten Bereiche um oft nur noch relikthaft erkennbare Zapfen,
- auf Massenzementationskörper wuchsen häufig kugelige Konkretionen auf

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Durchmesser: 1 – 4 cm

Zementationsintensität: niedrig bis hoch (Gesamtkarbonatgehalt: 12,0 - 27,8 Gew.-%)

Sediment: Schmelzwasser-Sand

Vorkommen: horizontweise in Massen

Besonderheiten: z.T. auf Massenzementationskörper auf- bzw. seitlich mit ihnen verwachsen,

- z.T. seitlich mit Zapfen verwachsen,
- häufig zu plattigen Zementationen zusammengewachsen, in denen einzelne Konkretionen noch erkennbar sind

2 AUFSCHLUSS BEI HITTFELD (ANHANG III: NR. 16)

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: max. 5 cm

Zementationsintensität: mäßig

Anhang VI: Ergebnisse der zementpetrographischen Untersuchungen

Sediment: sandige Kiesschicht in Fein- bis Grobsand-Abfolge

Vorkommen: auf fossilführenden Kalkmergelsteingeröllen und verwitterten „Toneisensteingeoden“

3 AUFSCHLUSS BEI BREETZE (ANHANG III: NR. 23)

Vorkommende Zementationstypen:

Horizont a.: Massenzementationskörper und hängende Zapfen (Endostalaktiten) an der Basis der Drenthe-Haupt-Moräne im Übergang zum Vorschüttsand des Drenthe-Haupt-Vorstoßes

Horizont b.: kugelige Konkretionen in der Drenthe-Haupt-Moräne

Horizont c.: diskusförmige Konkretionen und flache Zapfen in Schmelzwasser-Ablagerungen des jüngeren Drenthe-Vorstoßes

Horizont d.: Massenzementationskörper, hängende Zapfen (Endostalaktiten), kugelige Konkretionen in Schmelzwasser-Ablagerungen des jüngeren Drenthe-Vorstoßes

Horizont e.: kugelige Konkretionen in der jüngeren Drenthe-Grundmoräne

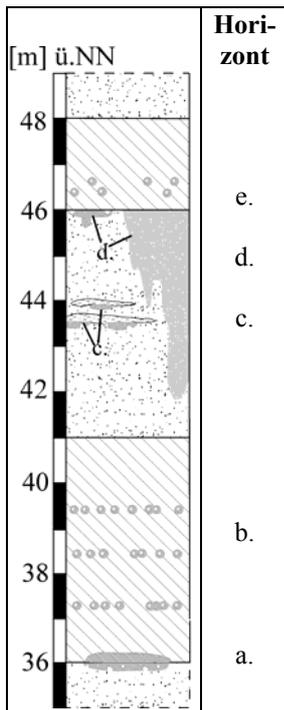


Abb. V-41: Schematisches Säulenprofil der bei Volkstorf aufgeschlossenen Sedimente. Karbonatische Zementation (grau) kommt in 6 Horizonten (a. - e.) vor. Legende s. Anh. 2.

Horizont a.

Zementationstyp: Massenzementation

laterale Verbreitung: bis mehrere dm²

Höhe: max. 20 cm

Zementationsintensität: hoch (Sand) bis sehr hoch (Geschiebemergel)

Sediment: Drenthe-Haupt-Moräne, liegender Schmelzwasser-Sand und einige cm mächtiger Horizont, in dem beide Schichten wolzig, diffus miteinander vermengt sind (Übergangsbereich)

Besonderheiten: Ober- vor allem aber die Untergrenze sind unregelmäßig beulig-wellig,
 • in einer glazitektonisch deformierten Partie in der Südwestecke der Grube fallen die Massenzementationskörper entsprechend der Kontaktfläche zwischen Geschiebemergel und Vorschüttsand mit einem Winkel von ca. 45° nach WNW ein

Zementationstyp: hängende Zapfen (Endostalaktiten)

Länge: bis 15 cm

Durchmesser: 5 – 10 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: Schmelzwasser-Sand

Vorkommen: an der Basis der Massenzementationskörper aus ihnen herausragend

Besonderheiten: auch bei stärker (bis zu 45°) einfallenden Massenzementationskörpern stehen die Längsachsen der Zapfen etwa vertikal

Horizont b.

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Durchmesser: 2 – 5 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: Drenthe-Haupt-Moräne (qD₁//Mg)

Vorkommen: perlschnurartig entlang von drei etwa horizontalen Trennflächen im Geschiebemergel,
 • der Geschiebemergel ist meist parallel zu den Trennflächen aufgelockert

Besonderheiten: i.d.R. zu Gruppen zusammengewachsen, in denen einzelne Individuen noch gut erkennbar sind,

• gelegentlich mit etwa vertikalen Schrumpfrissen,

• in Bereichen mit sehr geringer Auflockerungszone um die Trennfläche bilden zusammengewachsene Konkretionen kleinere Platten mit Durchmessern von bis zu 20 cm. In Bereichen mit mächtigerer Auflockerungszone um die Trennflächen auch Knollen aus allseitig miteinander verwachsenen Konkretionen. Durchmesser der Knollen bis zu 15 cm, Höhen bis zu 10 cm

Horizont c.

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen bis flache Zapfen

diskusförmige Konkretionen

Durchmesser: max. 8 cm

Höhe: 1 - 2 cm

flache Zapfen

Breite: max. 8 cm

Länge: max. 15 cm

Höhe: 1 - 2 cm

Zementationsintensität: mäßig bis hoch

Sediment: feinsandiger Mittelsand mit cm-mächtigen Schlufflagen bzw. -linsen

Vorkommen: schichtparallel unmittelbar unterhalb von sandigen Schluffeinschlaltungen, im wesentlichen im Sand, durch die Zementation sind z.T. auch einige mm der Schlufflagen/-linsen unmittelbar über der Grenze zum Sand zementiert

Besonderheiten: vertikale Schrumpfrisse,

- die Längsachsen der flachen Zapfen fallen mit weniger als 5° nach Nordost (49° – 52°) ein (13 Meßwerte)

Horizont d.

Im Aufschluss Breetze sind die Zementationskörper im Horizont d. ihrem Volumen nach die mit Abstand bedeutendsten. Kleinere Zementationskörper konnten in-situ untersucht werden, größere, die den in situ-Vorkommen in Form und Bau ähnlich sind, waren nur verrutscht an Böschungen oder auf Halde aufgeschlossen

Zementationstyp: hängende Zapfen (Endostalaktiten)

Durchmesser: max. 30 cm

Länge: max. mehrere m

Zementationsintensität: hoch

Sediment: fein- oder grobsandiger Mittelsand,

- selten Lagen aus Schluff, Feinsand, Grobsand oder Kies

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft

Besonderheiten: In einem in situ aufgeschlossenen Zapfen gibt es Mn-Hydroxid-Anreicherungen, die einen konzentrischen Ring parallel zur Außenfläche bzw. zur Längsachse der Zapfen bilden,

- Zapfen kommen z.T. zusammen mit Massenzementationskörpern vor und sind in diesen oft nur noch relikthaft erkennbar,
- einige Zapfen haben neben dem sehr gut zementierten Kernbereich einen Saum, der wenige cm mächtig und signifikant schlechter zementiert ist,
- die Längsachsen von auf Halde lagernden Zapfen, stehen teilweise nicht senkrecht zur Schichtung. Da es sich nicht um in situ-Vorkommen handelt und die im Aufschluss anstehenden Schichten oft schräggeschichtet sind, lassen sich daraus allerdings keine Rückschlüsse auf die ursprüngliche Stellung der Zapfen ziehen. Nach Analogieschlüssen zu in situ-Vorkommen ist anzunehmen, dass die Längsachsen ursprünglich ebenfalls etwa vertikal standen

Zementationstyp: Massenzementation
laterale Verbreitung: einige m²
Mächtigkeit: in situ: 5 - max. 20 cm
 Haldenmaterial: 5 cm bis mehrere m

Zementationsintensität: hoch (Sand) bis sehr hoch (Geschiebemergel)

Sediment: Drenthe-Haupt-Moräne, liegender Schmelzwasser-Sand und einige cm mächtiger Horizont, in dem beide Schichten wolkig, diffus miteinander vermengt sind (Übergangsbereich)

Besonderheiten: die obere Begrenzung von Haldenmaterial ist eben, besteht oft aus dem o.g. Übergangsbereich und hat gelegentlich Anhaftungen von Geschiebemergel,

- aus der beuligen Unterseite ragen Wülste und Zapfen heraus,
- bei Haldenmaterial sind in Massenzementationskörpern oft relikthaft Zapfen zu erkennen

Zementationstyp: kugelige Konkretion

Durchmesser: 1 - 3 cm

Zementationsintensität: mäßig

Sediment: Sand

Vorkommen: in den höheren Teilen der Schmelzwasser-Ablagerungen in verschiedenen Horizonten massenhaft,

- oft lateral auf Massenzementationskörpern aufgewachsen

Besonderheiten: meist sind zahlreiche über- und nebeneinander vorkommende Konkretionen zu Knollen zusammengewachsen

Besonderheiten: meist sind zahlreiche über- und nebeneinander vorkommende Konkretionen zu Knollen zusammengewachsen

Horizont e.

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Durchmesser: 2 – 5 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: jüngere Drenthe-Grundmoräne

Vorkommen: regellos verteilt

Besonderheiten: gelegentlich zu Gruppen zusammengewachsen, in denen einzelne Individuen noch gut erkennbar sind,

- vertikale Schrumpfrisse

4 AUFSCHLUSS BEI HOLZEN (ANHANG III: NR. 24)

Zementationstyp: hängende Zapfen (Endostalaktiten)

Länge: einige dm bis > 3 m

Durchmesser: einige 10er cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: Drenthe-2-Vorschütttsand / -kies

obere Begrenzung: scharf, etwa horizontal, fällt mit der Schichtgrenze zu ehemals überlagerndem Geschiebemergel zusammen

Sonstiges: vor allem im oberen Bereich durch Massenzementationskörper überwachsen

Zementationstyp: Massenzementation

Volumen: einige m³

Zementationsintensität: mittel bis hoch, feinkörnige Schichten sind i.d.R. besser zementiert sind als größere

Sediment: Drenthe-2-Vorschüttssedimente

obere Begrenzung: scharf, etwa horizontal

Sonstiges: Zementationsintensität und -verbreitung von oben nach unten abnehmend,

- vor allem die Bereiche zwischen den Zapfen sind durch Massenzementationskörper zementiert,
- die Zementationen liegen schon seit einigen Jahrzehnten frei, so dass auf Grund von Abspülungen und Verwitterung der Übergang in das umgebende Lockersediment nicht mehr nachvollziehbar ist

5 AUFSCHLUSS BEI VOLKSTORF (ANHANG III: NR. 26)

Vorkommende Zementationen:

Horizont a.: Massenzementationskörper

Horizont b.: diskusförmige Konkretionen

Horizont c.: Massenzementationskörper, Zementkrusten

Horizont d.: Massenzementationskörper

Horizont e.: flache Zapfen, Massenzementationskörper

Horizont f.: kugelige Konkretionen

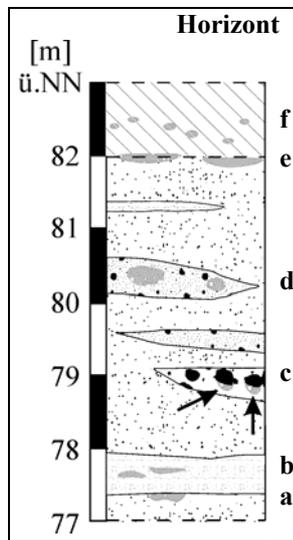


Abb. V-42: Schematisches Säulenprofil der bei Volkstorf aufgeschlossenen Sedimente. Karbonatische Zementation kommt in 6 Horizonten (a. - f.) vor. Legende s. Anh. 2.

Horizont a.

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: einige cm - 10er cm

Zementationsintensität: mäßig bis hoch

Sediment: oben stark feinsandiger Mittelsand, unten grobsandiger Mittelsand

Obere Begrenzung: etwa horizontal

Vorkommen: vor allem in grobsandigem Mittelsand, wenig in feinsandigen Mittelsand hineinreichend

Horizont b.

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Durchmesser: 3 - 8 cm

Höhe: 1 - 3 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: z.T. schluffiger Fein- bis Mittelsand (k_f -Wert geschätzt: 10^{-5} m/s)

Vorkommen: - (Probe aus dem Südteil des Grubenkomplexes: freundl. überlassen durch LAGING 1998)

Besonderheiten: häufig Zusammenwachsen benachbarter Konkretionen,

- innerhalb der Konkretionen kommen meist senkrecht zur Schichtung orientierte vor,

- es gibt mm- bis wenige cm-durchmessende Bereiche, die vor allem aus braunem Schluff bestehen, in dem sich nur vereinzelt größerer Detritus befindet und die gelegentlich schlierig mit dem umgebenden Sediment vermischt sind. Das Material wird als Geschiebemergel-Gerölle gedeutet

Horizont c.

Zementationstyp: Zementkrusten (vor allem an der Unterseite von Geröllen), kleine Massenzementationskörper

Größe: dünne unregelmäßige Säume und Krusten, wenige mm^3 - cm^3 große Massenzementationskörper

Zementationsintensität: mäßig,

- oberhalb von Geröllen besser als darunter

Sediment: Mittel- bis Grobkies

Vorkommen: ober- und unterhalb von größeren Geröllen (Grobkies, Steine)

Horizont d.

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: bis 30 cm

Zementationsintensität: mäßig

Sediment: sandiger Kies

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft

Besonderheiten: fleckenhafte, wenige cm durchmessende Areale sind fast vollständig zementiert

Horizont e.

Zementationstyp: flache Zapfen

Länge: max. 20 cm

Breite: max. 8 cm

Höhe: max. 3 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: Feinsand bis feinsandiger Mittelsand (cm- bis dm-geschichtet), unterhalb der Grenze zur hangenden Grundmoräne

Vorkommen: o.g. feinkörnige Sandschichten wechsellagern mit Mittel- bis Grobsandschichten, die Zapfen kommen ausschließlich in feinkörnigem Sand vor,

- vereinzelt sind durch die Zapfen auch einige mm der Grundmoräne unmittelbar oberhalb der Grenze zum Sand zementiert,

- Zapfen und Sediment fallen mit 5°-10° nach Osten ein

Besonderheiten: meist horizontbeständig zu Gruppen zusammengewachsen

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: mm³ – cm³

Zementationsintensität: mäßig

Sediment: grobkörnige Schichten (Mittel- bis Grobsand), die mit Feinsand bis feinsandigem Mittelsand (in denen Zapfen vorkommen) wechsellagern

Vorkommen: fleckenhaft

Besonderheiten: Massenzementationskörper verbinden übereinanderliegende, durch grobkörnige Schichten getrennte Zapfen

Horizont f.

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Durchmesser: max. 5 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: Warthe-Geschiebemergel

Vorkommen: horizontbeständig

Sonstiges: oft mit stern- bis netzförmige Schrumpfrissen

6 AUFSCHLUSS BEI KRANKENHAGEN (ANHANG III: NR. 38)

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: einige cm bis wenige dm

Zementationsintensität: gering

Sediment: Kies unmittelbar unter Feinsand-Schluff-Wechselfolge

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft

Besonderheiten: hauptsächlich im Kies,

- vereinzelt sind wenige cm der hangenden Feinsand-Schluff-Wechselfolge zementiert, wobei die Zementationsintensität in der Wechselfolge etwas besser ist als im Kies,
- die Zementationsintensität nimmt im Kies nach unten kontinuierlich ab

Zementationstyp: kugelige bis diskusförmige Konkretionen

Durchmesser: 2 – 5 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: feinsandiger Mittelsand

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft

Besonderheiten: Lagen mit höherem Anteil von Feinsand sind besser zementiert als solche mit geringerem Feinsandgehalt

7 AUFSCHLUSS BEI RUMBECK (ANHANG III: NR. 39)

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: einige m³ in der ehem. Kies- / Sandgrube bei Rumbeck. Das Gesamtvolumen der Zementationskörper die zwischen der Ortschaft

Rumbeck und der Grube aus der Talböschung herausragen, ist um ein vielfaches höher

Zementationsintensität: mäßig bis hoch, oben generell besser als unten

Sediment: Mittelterrassen-Ablagerungen

Obere Begrenzung: scharf, entspricht wahrscheinlich der Schichtgrenze zur ehemals überlagernden Drenthe-Grundmoräne (nicht mehr aufgeschlossen)

Vorkommen: fleckenhaft

Besonderheiten: feinkörnige Schichten (Sand, stark sandiger Kies) sind i.d.R. besser zementiert, als grobkörnige (Kies, z.T. steinig),

- vereinzelt sind in Sandeinschaltungen zementierte Partien zu beobachten, bei denen es sich möglicherweise um stark überwachsene Relikte von etwa horizontal lagernden flachen Zapfen handelt

8 AUFSCHLUSS BEI HELPENSEN (ANHANG III: NR. 42)

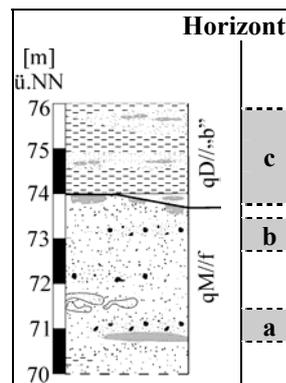


Abb. V-43: Schematisches Säulenprofil der im Aufschluss Helpensen anstehenden Sedimente. Karbonatische Zementation kommt in 3 Horizonten (a. - c.) vor. Legende s. Anh. 2.

Horizont a.

Zementationstyp: stratiforme Zementation

Verbreitung: mehrere m²

Höhe: 4 cm

Zementationsintensität: sehr hoch

Sediment: mittelsandiger Feinsand in Mittel- bis Grobsand-Abfolge

Besonderheiten: stratiforme Zementation lagert ebenso wie das zementierte Sediment etwa horizontal

Zementationstyp: Massenzementation

Verbreitung: wenige dm

Höhe: 10 – 15 cm

Sediment: kieshaltiger Grobsand

Vorkommen: fleckenhaft unmittelbar auf stratiformen Zementationskörpern

Zementationsintensität: mäßig, fleckenhaft niedrig oder hoch

Horizont b.

Zementationstyp: Massenzementation

Verbreitung: einige dm

Höhe: max. 15 cm

Zementationsintensität: mäßig

Sediment: feinsandführender, z.T. stark grobsandiger Mittelsand, unterhalb von „Beckenablagerungen“ (sensu KULLE 1985), die

- im Nordwestteil der Grube aus einer etwa 5 cm mächtigen, mm-geschichteten Wechselfolge aus schluffigem Ton und tonigem Schluff (Durchlässigkeitsbeiwert geschätzt: 10^{-9} m/s) bzw.
- im Südostteil aus nach Nordwesten auskeilendem, bis zu 20 cm mächtigem, schluffigem Feinsand (Durchlässigkeitsbeiwert geschätzt: 10^{-6} m/s) bestehen

Obere Begrenzung: scharf, fällt mit der Schichtgrenze zu den hangenden „Beckenablagerungen“ zusammen

Vorkommen: fleckenhaft

Besonderheiten: Massenzementationskörper sind unter der Ton-Schluff-Wechselfolge kleiner und schlechter zementiert als unter dem schluffigen Feinsand

Horizont c.

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Durchmesser: bis 10 cm

Höhe: 2 – 4 cm

Zementationsintensität: mäßig bis hoch

Sediment: cm-geschichtete Abfolge aus schluffigem, mittelsandführendem Feinsand an der Basis der „Beckenablagerungen“,

- in Feinsandpartien innerhalb der überwiegend aus feinsandigem Schluff bestehenden „Beckenablagerungen“

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft

Besonderheiten: neben- bzw. übereinander vorkommende Konkretionen teilweise zu kleineren Gruppen zusammengewachsen

9 AUFSCHLUSS BEI BAD MÜNDER/ HACHMÜHLEN (ANHANG III: NR. 45)

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: max. 20 cm

Zementationsintensität: schlecht bis mäßig,

- teilweise sind lediglich einige Kieskörner durch Zementbrücken miteinander verbunden

Sediment: in einer Kieslage unterhalb von Geschiebemergel,

- in einer aus Kies bestehenden Rinnenfüllung unterhalb einer etwa 20 – 30 cm mächtigen feinsandigen Schluffschicht

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft

10 AUFSCHLUSS BEI COPPENBRÜGGE (ANHANG III: NR. 47)

[m] ü.NN	Horizont	Abb. V-44: Schemati-
	d.	
	c.	
	b.	
	a.	

Horizont a.

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Durchmesser: 0,5 bis 3 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: Fließmoräne aus sand- und kieshaltigem Schluff mit Ton- und Sandschmitzen und –lagen (DETERS 1999)

Vorkommen: häufig entlang von Sandschmitzen, sonst unsystematisch fleckenhaft

Besonderheiten: oft zu Gruppen zusammengewachsen,

- zusammengewachsene Konkretionen, die entlang von Sandlagen / -schmitzen angereichert sind, bilden kleinere Platten,
- Konkretionen, die innerhalb der Fließmoräne regellos verteilt sind, sind z.T. zu beuligen Knollen zusammengewachsen,
- im Kern der Konkretionen gibt es meist stark verwitterte Bruchstücke von umgelagerten, mesozoischen Sideritkonkretionen,
- oft mit Schrumpfungsrissen,
- die Fließmoräne, in der die Konkretionen vorkommen, war zum Untersuchungszeitpunkt nicht aufgeschlossen. Das untersuchte Probenmaterial wurde von DETERS (1999) zur Verfügung gestellt

Horizont b.

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: einige cm bis wenige dm

Zementationsintensität: niedrig

Sediment: kiesiger Sand bis sandiger Kies

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft

Horizont c.

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen bis flache Zapfen

diskusförmige Konkretionen

Durchmesser: 3 – 8 cm

Höhe: 1 - 3 cm

flache Zapfen

Breite: 3 – 8 cm

Länge: max. 15 cm

Höhe: 1 - 3 cm

Zementationsintensität: mäßig bis hoch

Sediment: Mittelsand, z.T. feinsandig

Vorkommen: horizontbeständig,

- Abstand der Konkretionshorizonte 10 bis 50 cm

Besonderheiten: innerhalb von Zapfen sind Relikte von diskusförmigen Konkretionen zu erkennen,

- Konkretionen und Zapfen kommen horizontbeständig parallel zur Schichtung, bei schrägeschichteten Abschnitten parallel zu Schrägschichtungsblättern vor,
- sowohl Konkretionen als auch Zapfen haben sehr häufig raue, oft leicht absandende Oberflächen und einen deutlich besser zementierten Kern

Horizont d.

Zementationstyp: stratiforme Zementation

Verbreitung: einige dm² - m²

Höhe: bis 10 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: feinsandiger Mittelsand

Vorkommen: in feinsandigem Mittelsand über Dachfläche von stark kiesigem, grobsandigem Mittelsand

Besonderheiten: Lockersediment und Zementationskörper fallen mit 15° nach Westen ein,

- in den stratiformen Zementationskörpern sind gelegentlich relikthaft Zapfen zu erkennen, deren Längsachse etwa Nord-Süd streicht und die schichtparallel nach Westen einfallen

11 AUFSCHLUSS BEI EIME
(ANHANG III: NR. 50)

Zementationstyp: hängender Zapfen (Endostalaktit)

Länge: ca. 3,20 m

Durchmesser: oben ca. 40 cm, nach unten bis auf ca. 10 cm abnehmend

Zementationsintensität: mäßig bis hoch (Bereiche gleicher Zementationsintensität sind fleckenhaft, unregelmäßig verteilt)

Sediment: Mittelterrassen-Ablagerungen

Obere Begrenzung: scharf, entspricht Schichtgrenze zur überlagernden Drenthe-Grundmoräne

Sonstiges: vor allem im oberen Bereich innerhalb des Massenzementationskörpers nur noch relikthaft erkennbar

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: 3 Horizonte:

a. unmittelbar unterhalb der Schichtgrenze zur Grundmoräne

b. 2 m unter der Grundmoränenbasis

c. unmittelbar unterhalb des Zapfens

Laterale Verbreitung: a. max. 4 m,

b., c. max. 2 m

Mächtigkeit: a. max. 1 m

b., c. wenige dm

Zementationsintensität: mäßig

Sediment: Mittelterrassen-Ablagerungen (Kies mit Sandlagen), a. unter Drenthe-Geschiebemergel (mit scharfer oberer Begrenzung)

Sonstiges: Horizonte a. und b. haben sich um den Zapfen herum gebildet, der im Massenzementationskörper vor allem im oberen Bereich von Horizont a. nur noch relikthaft erkennbar ist,

- ein Zusammenhang zwischen der horizontbeständigen Bildung der Massenzementationskörper und der Beschaffenheit des Ausgangssubstrates (z.B. veränderter Sandgehalt des Kieses) war nicht erkennbar

12 AUFSCHLUSS BEI BANTELN
(ANHANG III: NR. 51)

Zementationstyp: Massenzementation

Verbreitung: bis 40 cm

Höhe: bis 10 cm

Zementationsintensität: sehr niedrig

Sediment: in Mittelterrassen-Kies unmittelbar unter Drenthe-Grundmoräne

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft, selten

13 AUFSCHLUSS BEI BETHELN
(ANHANG III: NR. 53)

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: max. 40 cm

Zementationsintensität: mäßig,

- ober- bzw. unterhalb größerer Gerölle oft höher als in anderen Partien

Sediment: drei Kiesschichten im höheren Teil der Grubenwand

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft

Besonderheiten: größere Gerölle haben häufig dünne Zementkrusten, die sie zwar mit benachbartem Detritus verbinden, die aber nicht zu relevanter Plombierung des Porenraums führen

14 AUFSCHLUSS BEI FREDEN / LEINE
(ANHANG III: NR. 64)

Aufschlussbereich I:

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Durchmesser: bis 10 cm

Höhe: bis 5 cm

Zementationsintensität: hoch bis sehr hoch

Sediment: Wechselfolge aus z.T. tonhaltigem, feinsandigem Schluff sowie schluffigem und z.T. mittelsandigem Feinsand und vereinzelt vorkommenden schluffigen Tonschichten

Vorkommen: horizontbeständig in 3 Horizonten,

- die Horizonte werden durch einige dm konkretionsfreies Sediment getrennt

Besonderheiten: oft zu Gruppen von mehreren Individuen zusammengewachsen,

- in den Konkretionen treten häufig Schrumpfrisse auf,
- auf den Konkretionen haften verästelte Kalkröhrchen, die wenige cm lang sind und Durchmesser von ca. 1 bis max. 2 mm haben

Zementationstyp: stratiforme Zementation

Verbreitung: einige 10er m²

Höhe: bis 5 cm

Zementationsintensität: sehr hoch

Sediment: Wechselfolge aus z.T. tonhaltigem, feinsandigem Schluff sowie schluffigem und z.T. mittelsandigem Feinsand und vereinzelt vorkommenden schluffigen Tonschichten

Vorkommen: einige dm über dem obersten Konkretionshorizont (s.o.)

Besonderheiten: die stratiformen Zementationskörper fallen nach SE ein, die glazifluviatilen Schichten mit Winkeln < 10° nach E,

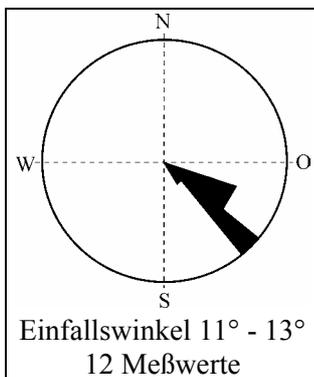


Abb. V-45: Richtungsrose zum Einfallen eines stratiformen Zementationskörpers.

- sowohl Ober- als auch Unterseite sind stark wellig, wodurch in einigen Abschnitten der Eindruck vermittelt wird, dass sie aus diskusförmigen Konkretionen zusammenwuchs

Aufschlussbereich II-1:

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: bis 30 cm

Zementationsintensität: im Kern teilweise gut, sonst eher mäßig

Sediment: Fein- bis Mittelkies, als Rinnenfüllung in Grob- bis Mittelsand,

- k_f -Wert Kies: $1,2 \times 10^{-3}$ m/s
- k_f -Wert Sand: $2,3 - 2,5 \times 10^{-4}$ m/s

Gesamtkarbonatgehalt:

Lockersediment: 30,7 - 37,4 Gew.-%

Massenzementationskörper: 51,9 Gew.-%

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft

Aufschlussbereich II-2:

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: wenige dm

Zementationsintensität: hoch bis sehr hoch

Sediment: glazitektonisch deformierte Schichten:

- fast saiger stehender Kies, k_f -Wert geschätzt: 10^{-3} m/s,
- mit 45° einfallende Feinsand /Schluff-Wechselfolge, k_f -Wert geschätzt: $10^{-5} - 10^{-7}$ m/s,
- Kies und Wechselfolge werden durch eine mit ca. 60° Verwerfung getrennt

Vorkommen: überwiegend in Kies unmittelbar an der Verwerfung,

- beulen- bis fingerförmige, etwa horizontal in die Wechselfolge reichende Partien des feinkörnigen Sedimentes sind auch zementiert

Besonderheiten: Kies ist in weiten Teilen intensiv durch Manganhydroxide verunreinigt

Aufschlussbereich II-3:

Am Rand des Diapirs kommen zementierte Partien in teilweise intensiv gefalteten Sand- und Kiesschichten vor. Es gibt zementierte Bereiche in Sand und Kies häufig, in Schlufflagen nicht.

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: bis 30 cm

Zementationsintensität: mäßig

Sediment: Kies, glazitektonisch deformiert

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft, häufig am Kontakt zu Sandschichten

Zementationstyp: liegende Zapfen

Länge: bis 100 cm

Durchmesser: bis 8 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: Mittel- bis Grobsand, glazitektonisch deformiert

Vorkommen: z.T. am Kontakt zu Massenzementationskörpern auf diese aufgewachsen

Besonderheiten: die Längsachsen der Zapfen fallen teils mit der Schichtung, teils diskordant zur Schichtung ein,

- die Längsachsen der Zapfen streichen etwa West - Ost

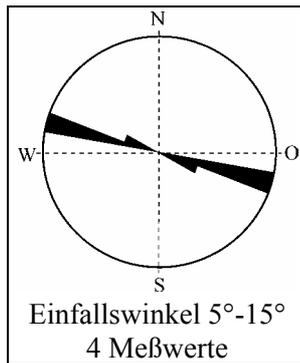


Abb. V-46:
Richtungsrose der
Zapfenlängsachsen.

- Zapfen sind häufig zu größeren Gruppen zusammengewachsen

Aufschlussbereich III:

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: einige cm bis ca. 1 m

Zementationsintensität: niedrig

Sediment: grobsandiger Kies in einer Rinne

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft

Aufschlussbereich IV:

Im Aufschlussbereich IV gibt es in zwei Horizonten Zapfen.

Oberer Horizont

Zementationstyp: liegende Zapfen

Länge: max. 1,5 m

Durchmesser: ca. 5 bis 8 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: Schmelzwasser-Sand

Vorkommen: horizontbeständig

Besonderheiten: Zapfenlängsachsen fallen mit etwa 10° bis 15° nach Südsüdost ein,

- nebeneinander liegende Zapfen sind gelegentlich miteinander verwachsen,
- Zapfenoberflächen sind meist rau und leicht absandend

Unterer Horizont

Zementationstyp: gebogene Zapfen

Länge: max. 2,5 m

Durchmesser: ca. 5 bis 8 cm

Zapfenform: Die Zapfen bestehen aus einem bis zu 1,5 m langen, etwa vertikal stehenden Teil, einem flach einfallenden unteren Teil sowie dem Umbiegunsbereich dazwischen

Zementationsintensität: sehr hoch

Sediment: Schmelzwasser-Sand

Obere Begrenzung: nicht aufgeschlossen,

- bindige, geringdurchlässige Schichten (z.B. Fließmoränen) kommen in diesem Bereich nicht vor

Vorkommen: horizontbeständig

Besonderheiten: einzelne Konkretionen sind eher die Ausnahme, die Zapfen sind meist zu einige m³-großen Komplexen zusammengewachsen,

- die liegenden, unteren Teile der gebogenen Zapfen fallen mit etwa 10° nach Südsüdost ein.

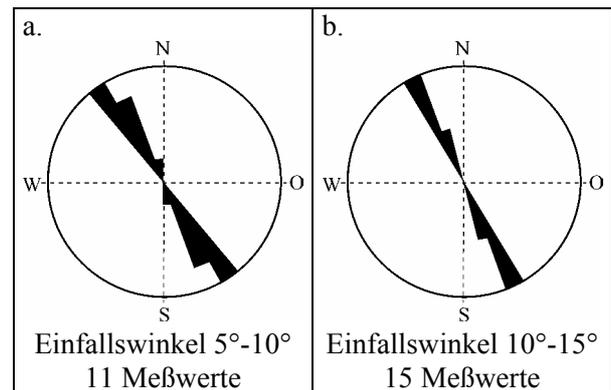


Abb. V-47: Aufschlussbereich IV: Richtungsrosen zur Lage der Längsachsen des unteren etwa horizontalen Teils der gebogenen Zapfen im unteren Horizont (a.) und der Zapfen im oberen Horizont (b.).

- eine Zapfengruppe konnte in-situ untersucht werden, zahlreiche weitere lagen unweit davon auf Halde. Die in-situ Zapfengruppe ist etwa 3,5 m hoch, 7 m breit und im Bereich der etwa vertikal stehenden Zapfen etwa 1,5 - 2 m tief. Die breite Seite streicht etwa Nordost-Südwest. Die auf Halde lagernden Zapfengruppen sind etwa genauso groß wie der in-situ Zementationskörper. Sie befanden sich nach Angaben eines Arbeiters etwa auf einer Linie südlich bis südwestlich der in-situ Gruppe

Aufschlussbereich V-1:

Zementationstyp: Massenzementation

Höhe: wenige cm bis 1 m

Verbreitung: 10 cm - 3 m

Zementationsintensität: in feinkörnigen Lagen hoch bzw. in grobkörnigen mäßig

Sediment: schwach bis stark feinsandiger Mittelsand

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft

Besonderheiten: innerhalb von größeren Massenzementationskörpern treten unzementierte Partien auf

Aufschlussbereich V-2:

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Durchmesser: 1 bis 10 cm

Höhe: max. 2 cm

Zementationsintensität: insgesamt mäßig, im Kern meist besser als an den Rändern

Sediment: schwach feinsandiger Mittelsand unmittelbar unterhalb einer stark feinsandigen Mittelsandschicht

Vorkommen: horizontbeständig

Besonderheiten: häufig zu Gruppen zusammengewachsen,

- die Oberflächen sind sehr rau und stark absandend

Aufschlussbereich V-3:**Zementationstyp:** diskusförmige Konkretionen**Durchmesser:** 1 bis 10 cm**Höhe:** 0,5 bis 3 cm**Zementationsintensität:** hoch**Sediment:** Feinsand-Schluff-Wechselfolge: in etwa 5 cm mächtigem schluffigem Feinsand, der in feinsandigen Schluff eingeschaltet ist**Vorkommen:** horizontbeständig**Besonderheiten:** i.d.R. zu Platten zusammengewachsen, in denen einzelne Konkretionen noch gut erkennbar sind,

- die Platten sind jeweils bis zu 1 m lang und etwa 20 cm breit,
- die Längsachsen der Platten streichen etwa Nord-Süd, der Einfallswinkel ist wie beim umgebenden Lockersediment $< 10^\circ$

Aufschlussbereich VI:**Zementationstyp:** diskusförmige Konkretionen**Vorkommen:** in mit Grob- bis Mittelsand gefüllten Abschiebungen, die mit $60^\circ - 80^\circ$ einfallen und Öffnungsweiten von max. 3 – 4 cm haben**Durchmesser** (parallel zur Kluftwandung): 3 bis 12 cm**Dicke** (senkrecht zur Kluftwandung): max. 4 cm, abhängig von der Breite der Kluft**Zementationsintensität:** hoch**Umgebendes Sediment:** feinsandiger Mittelsand mit eingeschaltetem Feinsand**Besonderheiten:** meist zu größeren Gruppen zusammengewachsen, in denen einzelne Individuen noch gut erkennbar sind,

- vereinzelt reichen von den Konkretionen ausgehend etwa horizontal fingerförmig zementierte Bereiche in die Schmelzwasser-Ablagerungen hinein

Zementationstyp: Massenzementation**Höhe:** bis zu etwa 1,5 m**Durchmesser:** 3 – 4 m**Zementationsintensität:** insgesamt mäßig, in feinkörnigen Lagen etwas besser als in grobkörnigen**Sediment:** Mittel- bis Grobsand**Vorkommen:** unsystematisch fleckenhaft**Besonderheiten:** innerhalb der Massenzementationskörper treten fleckenhaft nicht zementierte Partien auf**Aufschlussbereich VII:****Zementationstyp:** diskusförmige bis kugelige Konkretionen**Durchmesser:** 2 – 5 cm**Höhe:** 1 - 5 cm**Zementationsintensität:** im Kern hoch, an den Rändern meist mäßig bis schlecht**Sediment:** schwach feinsandiger, grobsandiger Mittelsand**Vorkommen:** horizontbeständig, in verschiedenen Horizonten massenhaft**Besonderheiten:** häufig zu kleineren Gruppen zusammengewachsen,

- bröckelige Beschaffenheit, absandende Oberflächen

Aufschlussbereich VIII-1:**Zementationstyp:** hängende Zapfen (Endostalaktiten)**Länge:** 5 - 40 cm**Durchmesser:** 3 - 8 cm**Zementationsintensität:** hoch**Sediment:** schwach schluffiger, mittelsandiger Feinsand bis feinsandiger Mittelsand,

- k_f -Wert: $2,6 \times 10^{-4} - 4,7 \times 10^{-5}$ m/s

Gesamtkarbonatgehalt:

Lockersediment: 3,2 - 7,5 Gew.-%

Zapfen: 35,9 - 52,0 Gew.-%

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft**Obere Begrenzung:** scharf und wellig,

- sie fällt nicht mit einem erkennbaren Materialwechsel des Lockersedimentes zusammen und befindet sich 10 – 50 cm unter dem hängenden Schluffhorizont

Besonderheiten: Zapfenlängsachsen fallen teilweise steil Richtung Norden ein bzw. stehen im oberen Bereich etwa vertikal und biegen unten Richtung Norden um (Einfallswinkel etwa $70^\circ - 80^\circ$),

- die Zapfen wuchsen i.d.R. zu größeren Gruppen zusammen

Aufschlussbereich VIII-2:**Zementationstyp:** liegende Zapfen**Durchmesser:** 1 - 8 cm**Länge:** 20 - 150 cm**Zementationsintensität:** hoch**Sediment:** Mittelsand, fein- bis grobsandig,

- k_f -Wert: $5,3 \times 10^{-4}$ m/s

Vorkommen: horizontbeständig angereichert**Besonderheiten:** gelegentlich zu Gruppen zusammengewachsen,

- die Oberflächen sind meist rau und stark absandend,
- Zapfenlängsachsen streichen etwa Nordost-Südwest und fallen mit weniger als 5° ein,
- vereinzelt kommen Zapfen zusammen mit Ton-, Schluff- und Sand-gefüllten Abschiebungen vor. Zum einen gibt es Zapfen, die an Abschiebungen umbiegen und ihren oben begonnen Verlauf etwas tiefer fortsetzen. Die Zementationskörper sind nicht durch die

Abschiebung zerbrochen, sondern schließen die Kluffüllung ein,

- wo Sandschichten an ausschließlich mit Ton- und Schluff-gefüllte Abschiebungsbereiche grenzen oder durch Verwerfungen gegen Schluffschichten versetzt sind, enden die Zapfen an der Abschiebung und setzen sich nicht im Schluff fort

Aufschlussbereich VIII-3:

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Vorkommen: in den Klüften unsystematisch fleckenhaft

Größe: 3 - 10 cm (parallel zum Kluffeinfallen)

Höhe: 1 - 3 cm (senkrecht zum Kluffeinfallen)

Zementationsintensität: sehr hoch

Sediment: aus Schluff und Sand bestehende Füllung von Klüften, vereinzelt daran angrenzende Partien der umgebenden Schmelzwasser-Ablagerungen

Besonderheiten: i.d.R. zu Gruppen zusammengewachsen,

- vereinzelt ragen zementierte Bereiche fingerartig in die an die Abschiebung grenzenden Schichten,
- ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Zementation und der Beschaffenheit von Abschiebung, Kluffüllung oder dem Sediment, das an die Kluff angrenzt, waren nicht erkennbar,
- das Sediment ist fleckenhaft durch Mn-Hydroxide verunreinigt,
- vereinzelt kommen – makroskopisch kaum erkennbar - Haarrisse in den Konkretionen vor

Aufschlussbereich VIII-4:

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: unmittelbar unterhalb einer Schluffschicht erreicht der Massenzementationskörper eine laterale Ausdehnung von einigen m², ansonsten reicht sie horizontal wenige dm fingerartig in den Schmelzwasser-Sand hinein

Zementationsintensität: hoch

Sediment: Schmelzwasser-Sand unmittelbar unterhalb einer etwa 1 m mächtigen Schluffschicht, die durch eine Abschiebung durchschlagenen wird

Vorkommen: entlang einer steilstehenden Abschiebung, z.T. fingerartig horizontal in den Schmelzwasser-Sand hineinreichend

Besonderheiten: im Gegensatz zu Massenzementationskörpern i.e.S. ist die Abgrenzung in das umgebende Lockersediment scharf

Aufschlussbereich VIII-5:

Zementationstyp: stratiforme Zementation

laterale Verbreitung: einige 10er m²

Höhe: 8 bis 15 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: teilweise stark schluffiger, mittelsandiger Feinsand (k_f -Wert nach Korngröße geschätzt: 10^{-5}) mit steil stehender Abschiebung

Vorkommen: östlich der Kluff befindet sich ein etwa horizontal lagernder zementierter Bereich, der einige dm in das unzementierte Sediment hinein reicht und in dem sich der stratiforme Zementationskörper mit zunehmender Entfernung zur Kluff knollig auflöst,

- westlich der Kluff gibt es zunächst von der Kluff ausgehend einen zementierten Bereich, der treppenartig mit etwa 45° nach Westen einfällt und der sich in einem viele m langen, etwa horizontal lagernden stratiformen Zementationskörper fortsetzt

Gesamtkarbonatgehalt:

Lockersediment: 14,0 Gew.-%

stratiforme Zementation: 59,9 Gew.-%

Besonderheiten: Ober- und Unterseite sind wellig bis beulig

Aufschlussbereich VIII-6:

Zementationstyp: stratiforme Zementation

Höhe: 3 - 20 cm

laterale Erstreckung: einige m² bis 10er m²

Zementationsintensität: hoch

Sediment: schwach schluffiger, feinsandiger Mittelsand, in einem Kryoturbationshorizont über feinsandigem Schluff

- k_f -Wert Sand: $6,9 \times 10^{-5}$ m/s
- k_f -Wert Schluff (geschätzt): 10^{-7} m/s

Gesamtkarbonatgehalt:

Lockersediment: 6,4 Gew.-%

stratiforme Zementation: 25,0 – 27,1 Gew.-%

Vorkommen: unmittelbar oberhalb einer Schluffschicht

15 AUFSCHLUSS BEI ENGELADE **(ANHANG III: NR. 67)**

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Durchmesser: 1 – 5 cm

Zementationsintensität: sehr hoch

Sediment: Geschiebemergel

Vorkommen: unsystematisch fleckenhaft

Besonderheiten: i.d.R. um oder auf bzw. unter karbonatischen Kieskörnern oder verwitterten „Toneisensteingeoden“,

- gelegentlich mit Schrumpfrissen,
- oft zu Gruppen zusammengewachsen

Zementationstyp: Massenzementation

Länge / Breite: bis 20 cm

Höhe: bis 8 cm

Zementationsintensität: sehr hoch

Sediment: Schertill, Schmelzwasser-Sand

Vorkommen: fleckenhaft im Übergangsbereich zwischen Schertill und darunter folgenden Schmelzwasser-Sand

16 AUFSCHLUSS BEI BORNHAUSEN (ANHANG III: NR. 68)

Horizont a.

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Durchmesser: 5 – 10 cm

Höhe: ≤ 3 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: feinkörnige Basisfolge aus Schluff- und Feinsand-Schichten

Vorkommen: horizontbeständig massenhaft in Feinsand-Schichten

Besonderheiten: benachbarte Konkretionen sind häufig zu Gruppen zusammengewachsen,

- durch die Konkretionen sind vereinzelt noch einige mm von über dem Feinsand folgenden Schlufflagen zementiert

Zementationstyp: flache Zapfen

Länge: ≤ 50 cm

Breite: ≤ 20 cm

Höhe: ≤ 10 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: feinkörnige Basisfolge aus Schluff und Feinsand

Vorkommen: horizontbeständig in Feinsand

Besonderheiten: benachbarte flache Zapfen sind meist zu Gruppen zusammengewachsen,

- innerhalb der Zapfen sind z.T. noch diskusförmige Konkretionen relikthaft erkennbar,
- die horizontal liegenden Längsachsen der Zapfen streichen etwa SE-NW,
- durch die Zapfen sind vereinzelt auch einige mm von über dem Feinsand folgenden Schlufflagen zementiert

Horizont b.

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Durchmesser: 1 - 4 cm

Zementationsintensität: hoch

Sediment: feinsandiger Mittelsand

Vorkommen: schichtparallel, horizontbeständig in Massen

Besonderheiten: oft zu kleineren Gruppen zusammengewachsen,

- die Oberflächen der Konkretionen sind häufig auffallend rau

Horizont c.

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: bis 20 cm

Zementationsintensität: mäßig

Sediment: Fein- bis Grobsand, z.T. kiesig

Vorkommen: von steilstehenden, nach UEBERSOHN (1990) subrosionsbedingten Verwerfungen ausgehend

Besonderheiten: vor allem in grobkörnigen Schichten (Grobsand, kiesiger Grobsand), die von den Verwerfungen geschnitten werden,

- nicht von der durch die Verwerfungen verursachten Verstellung der Schichten betroffen

Horizont d.

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Durchmesser: 5 – 10 cm

Höhe: ≤ 3 cm

Zementationsintensität: mäßig

Sediment: fein- bis grobsandiger Mittelsand

Vorkommen: horizontbeständig

Besonderheiten: benachbarte Konkretionen sind häufig zu Gruppen zusammengewachsen,

- in grobkörnigen Schichten (Grobsand, kiesiger Grobsand) sind die Konkretionen oft bröckelig, ihre Oberflächen rau

Zementationstyp: flache Zapfen

Länge: ≤ 50 cm

Breite: ≤ 20 cm

Höhe: ≤ 10 cm

Zementationsintensität: mäßig

Sediment: fein- bis grobsandiger Mittelsand

Vorkommen: horizontbeständig

Besonderheiten: benachbarte flache Zapfen sind meist zu Gruppen zusammengewachsen,

- in grobkörnigen Schichten (Grobsand, kiesiger Grobsand) sind die Zapfen oft bröckelig, ihre Oberflächen rau,
- vereinzelt sind noch relikthaft diskusförmige Konkretionen in den Zapfen zu erkennen

Zementationstyp: Massenzementation

Größe: einige mm bis 2 cm

Zementationsintensität: mäßig

Sediment: fein- bis grobsandiger Mittelsand

Vorkommen: vereinzelt, fleckenhaft

Besonderheiten: erst beim Sieben des Lockersedimentes gefunden

17 AUFSCHLUSS BEI ÖDISHAUSEN (ANHANG III: NR. 69)

Zementationstyp: hängende Zapfen (Endostalaktiten)

Länge: einige dm bis > 4 m

Durchmesser: einige 10er cm

Zementationsintensität: mäßig bis hoch

Sediment: Kies, oben ungeschichtet, unten geschichtet mit Sandlagen

obere Begrenzung: scharf, etwa horizontal

Sonstiges: hängende Zapfen kommen hauptsächlich im ungeschichteten Kies vor,

- in den höheren Teilen werden die Zapfen von Massenzementationskörpern umwachsen,
- in der nach Westen einfallenden Kies-Grobsand-Wechselfolge unterhalb des ungeschichteten Kiesel gehen die Zapfen sukzessive in Massenzementationskörper über

Zementationstyp: Massenzementation

Volumen: bis einige 10er-m³

Zementationsintensität: mäßig bis hoch

Sediment: Kies oben ungeschichtet, unten geschichtet mit Sandlagen

obere Begrenzung: scharf, etwa horizontal

Sonstiges: vor allem im oberen Bereich um Zapfen herum gebildet, die in Massenzementationskörpern oft nur noch relikthaft erkennbar sind,

- nach der Höhenlage der oberen Begrenzung und dem dazu passenden Vorkommen von Grundmoränenrelikten in der näheren Umgebung, zeichnet sie wahrscheinlich die ehemalige Grenze zwischen Sand und Kies im Liegenden und Geschiebemergel im Hangenden nach
- in der nach Westen einfallenden Kies-Grobsand-Wechselfolge unterhalb des ungeschichteten Kiesel gehen die Zapfen sukzessive in Massenzementationskörper über,
- in der Sand-Kies-Wechselfolge sind feinkörnige Schichten (Grobsand bis sandiger Feinkies) besser zementiert als grobkörnige (Mittel- bis Grobkies),
- die Basis der Massenzementationskörper in der Sand-Kies-Wechselfolge war nicht abgeschlossen

ANHANG VI: ERGEBNISSE DER ZEMENTPETROGRAPHISCHEN UNTERSUCHUNGEN

1	Aufschluss bei Daerstorf (Anhang III: Nr. 14a).....	1
2	Aufschluss bei Hittfeld (Anhang III: Nr. 16)	2
3	Aufschluss bei Breetze (Anhang III: Nr. 23)	2
4	Aufschluss bei Holzen (Anhang III: Nr. 24)	6
5	Aufschluss bei Volkstorf (Anhang III: Nr. 26)	7
6	Aufschluss bei Krankenhagen (Anhang III: Nr. 38)	10
7	Aufschluss bei Rumbeck (Anhang III: Nr. 39)	10
8	Aufschluss bei Helpensen (Anhang III: Nr. 42).....	11
9	Aufschluss bei Bad Münder/Hachmühlen (Anhang III: Nr. 45)	13
10	Aufschluss bei Coppenbrügge (Anhang III: Nr. 47)	14
11	Aufschluss bei Eime (Anhang III: Nr. 50)	17
12	Aufschluss bei Banteln (Anhang III: Nr. 51)	18
13	Aufschluss bei Betheln (Anhang III: Nr. 53)	18
14	Aufschluss bei Freden/Leine (Anhang III: Nr. 64)	19
15	Aufschluss bei Engelage (Anhang III: Nr. 67).....	29
16	Aufschluss bei Bornhausen (Anhang III: Nr. 68).....	30
17	Aufschluss bei Ödishausen (Anhang III: Nr. 69).....	31

1 AUFSCHLUSS BEI DAERSTORF (ANHANG III: NR. 14A)

Zementgeneration 1a

Kristalltyp: Mikrosparit/Blockkalzit

Kristallgröße: 4 - 20 µm, 30-60 µm, 60-100 µm, 80-140 µm,

- kleinere Kristalle in Mittelsand bzw. größere in Grobsand

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: meist unvollständige Säume um bzw. punktuelle Aufwachsungen auf Detritus, ohne bevorzugte Wachstumsposition, porenformerhaltend bis porenfüllend

Zementationstyp: Zapfen, Massenzementation, kugelige Konkretionen

Vorkommen: bereichsweise dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	23
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,09 – 99,90
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,05 – 0,87
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,13
Mn [Mol-%]:	n.n. - 0,08
Sr [ppm]:	n.n. - 600

Sonstiges: einschlussarm (klare Kristalle),

- Zementationsintensität fleckenhaft mäßig bis sehr hoch

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 1b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachssäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: Zapfen, Massenzementation, kugelige Konkretionen

Vorkommen: sehr selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2

Kristalltyp: poikilotopischer Zement

Kristallgröße: 300 - 1500 µm (selten - 2400 µm)

Zementationstyp: kugelige Konkretionen, seltener Zapfen, Massenzementation

Vorkommen: bereichsweise dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	13
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,49 – 99,92
MgCO ₃ [Mol-%]:	n.n. – 0,16
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,05
Mn [Mol-%]:	n.n. - 0,07
Sr [ppm]:	n.n. - 500

Sonstiges: einschlussarm (klare Kristalle)

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Besonderheiten: Blockkalzit und poikilotopischer Zement kommen innerhalb einzelner Poren oft gemeinsam vor. Die Beziehung beider Zementtypen zueinander spricht dafür, dass sich Blockkalzit früher bildete als poikilotopischer Zement. An den Rändern und teilweise innerhalb von poikilotopischen Kristallen gibt es Verunreinigungen die Kristallgrenzen von

Blockkalzit nachzeichnen. Vereinzelt treten auch Übergangsbereiche auf, in denen nebeneinander befindliche Blockkalzitkristalle einheitlich auslöschend Blockkalzit ist in allen Proben – zumindest relikthaft – vorhanden. Dagegen kommt poikilotopischer Zement teilweise nicht oder nur vereinzelt vor. Er kann auch den dominierenden Zementtyp darstellen

2 AUFSCHLUSS BEI HITTFELD **(ANHANG III: NR. 16)**

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 10-20 µm, 20-40 µm, 80-100 µm

Kristallgestalt: an- bis euhedral

Kristallgefüge: fleckenhafte Aufwachsungen auf Detritus,

- vollständige und gleichmäßige Zementsäume

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: Kristalleigenschaften (z.B. Kristallgröße, -gestalt) sind nur in 0,5 bis einige mm³ großen Arealen gleich

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	12
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,36 – 99,42
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,56 – 1,48
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,69
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,05
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussarm bis einschlussführend,

- neben Bereichen, in denen die Fe-Konzentration unterhalb der Nachweisgrenze liegt, kommen solche mit hohen Fe-Gehalten (bis 0,69 Mol-%) vor

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Pseudomatrix

Korngröße: meist ≤ 4 µm

Vorkommen: kleinere, isolierte Ansammlungen in Eintiefungen zwischen Zementsäumen und auf größeren Geröllen

Kathodolumineszenz: schwach rötlich bis kräftig orange lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe)

3 AUFSCHLUSS BEI BREETZE **(ANHANG III: NR. 23)**

Horizont a.

Die Zementation betrifft Geschiebemergel, Schmelzwasser-Sand und den einige cm mächtigen Übergangsbereich, in dem beide Schichten wolkgig, diffus miteinander vermengt sind. Die Beschaffenheit des Kalzitzementes ist in allen drei Sedimenttypen unterschiedlich.

Zementation im Schmelzwasser-Sand

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrit

Kristallgröße: ≤ 4 µm

Kristallgestalt: anhedral

Kristallgefüge: Meniskus-, Gravitationszement

Zementationstyp: Massenzementation, Zapfen

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 2a

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 60 – 100 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: porenformerhaltend - porenfüllend

Zementationstyp: Massenzementation, Zapfen

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussführend

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachssäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: Massenzementation, Zapfen

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementation im Übergangsbereich

Kristalltyp: Mikrosparit/Blockkalzit

Kristallgröße: 5 - 20 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: ohne Orientierung

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe)

Bildungsmilieu: keine Hinweise

Zementation im Geschiebemergel

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrit/Mikrosparit

Kristallgröße: ≤ 4-10 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: ohne Orientierung

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: Verunreinigungen in und zwischen den Kristallen (braune Eigenfarbe),

- zementierte Partien erscheinen im Dünnschliff etwas heller und sind dichter als unzemementierte, ansonsten ist der Zement kaum von der feinkörnigen Matrix der Grundmoräne zu unterscheiden

Bildungsmilieu: keine Hinweise

Zementgeneration 2

Kristalltyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallform: blattförmig – granular

Blattförmig

Kristallbreite: 10- 30 μm , **-länge:** 20 – 60 μm

Granular

Kristalldurchmesser: 10 - 50 μm

Kristallgefüge: meist vollständige Zementsäume

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- kommt auf zementierter Matrix als Füllung von Hohlräumen zwischen Detritus und Matrix und auf der Oberfläche von Rissen vor, die die Konkretionen durchziehen

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Horizont b.

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrit/Mikrospatit

Kristallgröße: < 4-10 μm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: ohne Orientierung

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: Verunreinigungen in und zwischen den Kristallen,

- zementierte Partien erscheinen im Dünnschliff etwas heller und wirken dichter als unzemementierte. Ansonsten ist der Zement kaum von feinkörniger Matrix der Grundmoräne zu unterscheiden

Bildungsmilieu: keine Hinweise

Zementgeneration 2

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallform: blattförmig

Kristallbreite: \leq 4- 30 μm , **-länge:** 10 – 60 μm

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- kommt auf zementierter Matrix als Füllung von Hohlräumen zwischen Detritus und Matrix, auf Detritus und auf der Oberfläche von Rissen vor, die die Konkretionen durchziehen,
- über bzw. unter Körnern oft mächtigere Säume als seitlich

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 3

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 20 bis 40 μm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: z.T. porenfüllend (Mosaikzement)

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Vorkommen: im höchsten Konkretionshorizont häufig, im mittleren selten, im tieferen vereinzelt

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Horizont c.

Hauptsächlich ist feinsandiger Mittelsand zementiert. Die Zementation betrifft z.T. auch einige mm von Schlufflagen/-linsen unmittelbar über der Grenze zum Sand. Da sich die Zementation in Abhängigkeit der Korngröße des zementierten Sedimentes qualitativ unterscheiden, werden sie gesondert beschrieben.

Zementation im Sand

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 40 - 60 μm (selten bis 80 μm)

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: meist vollständige, gleichmäßige Zementsäume um Detritus (porenformerhaltend)

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen bis flache Zapfen

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussführend,

- die makroskopisch auffällige Orientierung der flachen Zapfen findet sich nicht in der Orientierung des Kalzitementes wieder, d.h. es gibt keine Unterschiede zwischen senkrecht bzw. parallel zur Zapfenlängsachse orientierten Dünnschliffen

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementation im Schluff

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrit/Mikrospatit

Kristallgröße: < 4-10 μm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: ohne Orientierung

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen bis flache Zapfen

Vorkommen: häufig

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: Verunreinigungen in und zwischen den Kristallen (braune Eigenfarbe),

- zementierte Partien erscheinen im Dünnschliff etwas heller und sind dichter als unzementierte, ansonsten ist der Zement kaum von der feinkörnigen Matrix der Grundmoräne zu unterscheiden

Bildungsmilieu: keine Hinweise

Zementgeneration 2

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallform: blattförmig

Kristallbreite: 10 – 20 µm, **-länge:** 20 – 40 µm

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen bis flache Zapfen

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- kommt als Füllung von Hohlräumen zwischen Detritus und durch Zementgeneration 1 zementierter Matrix vor,
- auf der Matrix, selten auf Detritus

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Horizont d.

Zementationstyp: hängende Zapfen (Endostalaktiten)

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrit bis Blockkalzit

Kristallgröße: ≤ 4 - 60 µm

Kristallgestalt: an – bis subhedral

Kristallgefüge: Meniskus-, Gravitationszement

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 2a

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 30 – 160 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: meist porenfüllend (Mosaikzement), teilweise drusig

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	23
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,42 – 99,63
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,36 – 1,52
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,20
Mn [Mol-%]:	n.n. -0,07
Sr [ppm]:	n.n. -900

- Zementationsintensität ist am äußeren Rand der Zapfen signifikant niedriger als im Kern

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermenreste vollständig

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Besonderheiten

Die ringförmige schwarze Verfärbung, die in einem in-situ vorkommenden Zapfen beobachtet wurde, wird durch Mn-Hydroxide verursacht, die im Restporenraum zwischen dem Kalzit zement auftreten, also nach Abschluss der Karbonatzementation entstanden.

Zementationstyp: Massenzementation

Durch die Massenzementationskörper sind sowohl Bereiche in Geschiebemergel unmittelbar oberhalb der Grenze zum Schmelzwasser-Sand als auch der Schmelzwasser-Sand zementiert.

Sediment: Geschiebemergel

Zementgeneration 1

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallform: blattförmig

Kristallbreite: 8 – 25 µm, **-länge:** 10 – 60 µm

Kristallgefüge: auf grobem Detritus

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm (klare Kristalle)

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2

Kristalltyp: Mikrit/Mikrospatit

Kristallgröße: ≤ 4-10 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: ohne Orientierung

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: Verunreinigungen in und zwischen den Kristallen,

- meist nicht von feinkörniger Matrix der Grundmoräne zu unterscheiden

Bildungsmilieu: keine Hinweise

Sediment: Schmelzwasser-Sand

Zementgeneration 1

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallform: blattförmig

Kristallbreite: <5 - 10 µm, **-länge:** 5 – 25 µm

Kristallgefüge: auf grobem Detritus

Vorkommen: unmittelbar unterhalb des Geschiebemergels häufig, sonst fehlend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	16
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,29 – 99,68
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,32 – 1,76
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,96
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,07
Sr [ppm]:	n.n. - 400

Sonstiges: einschlussarm (klare Kristalle),

- häufiger auf Quarzkörnern, nie auf detritischem Karbonat

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2

Kristalltyp: Mikrit bis Blockkalzit

Kristallgröße: ≤ 4 - 60 µm

Kristallgestalt: an – bis subhedral

Kristallgefüge: porenfüllend,

- fleckenhafte Aufwachsungen auf Detritus,
- Meniskus-, Gravitationszement,
- 20 – 40 µm dicke, gleichmäßige und vollständige Zementsäume

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: Verunreinigungen in und zwischen den Kristallen

Bildungsmilieu: meteorisch-vados/pseudophreatisch,

Zementgeneration 3

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 15 – 60 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: porenfüllend (Mosaikzement)

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm (klare Kristalle)

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Zement 1

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 30–80 µm, selten bis 150 µm

Kristallgestalt: subhedral

Säume im Detritus

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- in kleinen, selten vorkommenden Arealen zeichnen Verunreinigungen im Blockkalzit, die bei Fluoreszenzuntersuchungen auffielen, Menisken nach,
- in einigen Partien vergrößert sich der Blockkalzit sukzessive, so dass er einzelne Körner teilweise umwächst und so Übergangsformen zu poikilotropischem Zement bildet

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zement 2

Kristalltyp: poikilotropischer Zement

Kristallgröße: max. 0,5 mm

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	25
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,26 - 99,81
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,15 – 0,70
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,07
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,08
Sr [ppm]:	n.n. - 700

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zement 3

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermenreste vollständig

Vorkommen: sehr selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Horizont e.

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrit/Mikrospatit

Kristallgröße: ≤ 4-10 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: ohne Orientierung

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: durch Verunreinigungen in und zwischen den Kristallen meist nicht von feinkörniger Matrix der Grundmoräne zu unterscheiden

Bildungsmilieu: keine Hinweise

Zementgeneration 2**Zementtyp:** Isopachenzement**Kristallgestalt:** sub- bis euhedral**Kristallform:** blattförmig**Kristallbreite:** ≤ 4 - 10 μm , **-länge:** 5 – 30 μm **Zementationstyp:** kugelige Konkretionen**Vorkommen:** häufig**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussführend,

- in Hohlräumen zwischen Detritus und Matrix auf zementierter Matrix

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch**Zementgeneration 3****Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 20 - 40 μm **Kristallgestalt:** subhedral**Kristallgefüge:** ohne Orientierung**Zementationstyp:** kugelige Konkretionen**Vorkommen:** plombiert Restporenraum**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch**4 AUFSCHLUSS BEI HOLZEN****(ANHANG III: NR. 24)****Zementgeneration 1a****Kristalltyp:** Mikrosparit**Kristallgröße:** 5 – 8 μm **Kristallgestalt:** anhedral**Kristallgefüge:** Meniskuszement, dünne, unvollständige Säume um Detritus**Zementationstyp:** Zapfen, Massenzementation**Vorkommen:** selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Niedrig-Mg-Kalzit**Elementgehalte:**

Messungen [Stück]:	7
CaCO ₃ [Mol-%]:	97,16 - 99,51
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,46 - 1,08
Fe [Mol-%]:	n.n. - 1,51
Mn [Mol-%]:	n.n. - 0,35
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussreich,

- kam bei REM/EDX-Untersuchungen häufig zusammen mit feinverteilten Tonmineralen vor

Bildungsmilieu: meteorisch-vados**Zementgeneration 2a****Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** von Pore zu Pore stark unterschiedlich (8-15 μm bis 60-80 μm)**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallgefüge:** Meniskuszement**Zementationstyp:** Zapfen, Massenzementation**Vorkommen:** fleckenhaft häufig**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussführend,

- tritt nie zusammen mit Zementgeneration 1 innerhalb einer Pore auf

Bildungsmilieu: meteorisch-vados**Zementgeneration 1b/2b****Kristalltyp:** syntaxiale Anwachssäume**Kristallgefüge:** Meniskuszement**Zementationstyp:** Zapfen, Massenzementation**Vorkommen:** selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussführend**Bildungsmilieu:** meteorisch-vados**Zementgeneration 3a****Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 40 – 80 μm **Kristallgestalt:** subhedral**Kristallgefüge:** z.T. drusiger Mosaikzement, porenformerhaltend**Zementationstyp:** Zapfen, Massenzementation**Vorkommen:** dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Niedrig-Mg-Kalzit**Elementgehalte:**

Messungen [Stück]:	11
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,91 - 99,26
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,60 - 1,01
Fe [Mol-%]:	n.n. - 0,18
Mn [Mol-%]:	n.n. - 0,08
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussarm,

- grobkörnige Bereiche sind besser zementiert als feinkörnige,
- bei REM-Untersuchungen zeigen Kristalle oft keine erkennbaren Kristallflächen bzw. -kanten, die Kristallmorphologie ist rundlich und stumpf

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch**Zementgeneration 3b****Kristalltyp:** syntaxiale Anwachssäume**Kristallgefüge:** umschließen detritische Echinodermereste vollständig**Zementationstyp:** Zapfen, Massenzementation**Vorkommen:** selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Niedrig-Mg-Kalzit**Elementgehalte:**

Messungen [Stück]:	2
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,03 - 99,50
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,47-0,94
Fe [Mol-%]:	n.n.
Mn [Mol-%]:	n.n.
Sr [ppm]:	n.n.

- bei der geochemischen Untersuchung der Anwachs säume konnten Fe^{2+} , Mn^{2+} und Sr^{2+} nicht nachgewiesen werden. Der Kalzit eines Echinodermenfragmentes auf dem syntaxialer Zement aufwuchs, hat dagegen höhere Fe^{2+} , Mn^{2+} - und Sr^{2+} -Gehalte (Fe^{2+} 900 ppm, Mn^{2+} 400 ppm, Sr^{2+} 700 ppm)

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Pseudomatrix

Korngröße: meist $\leq 10 \mu\text{m}$

Vorkommen: wolkenartige Agglomerate, die z.T. die ursprüngliche Form und Größe detritischer Komponenten erahnen lassen. In diesen steckt vereinzelt randlich siliziklastischer Detritus,

- kleinere, isolierte Ansammlungen, z.T. in Eintiefungen von Körnern

Zementationstyp: Zapfen, Massenzementation

Kathodolumineszenz: schwach rötlich bis kräftig orange lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe)

5 AUFSCHLUSS BEI VOLKSTORF (ANHANG III: NR. 26)

Horizont a.

Zementgeneration 1a

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 20 – 40 μm , selten 10 – 20 μm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: Meniskuszement

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussführend

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 1b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachs säume

Kristallgefüge: Meniskuszement

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: sehr selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussführend

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 2a

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 20 – 40 μm , selten 10 – 20 μm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: meist porenformerhaltend

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachs säume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermenreste vollständig

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Horizont b.

Zementgeneration 1a

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 15 - 25 μm

Kristallgestalt: sub- bis anhedral

Kristallgefüge: meist porenfüllend

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich,

- oft nicht von Detritus zu unterscheiden

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 1b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachs säume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermenreste vollständig

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Vorkommen: sehr selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallform: blattförmig - granular

Blattförmig

Kristallbreite: 5 – 10 μm , **-länge:** 10 -15 μm

Granular

Kristallgröße: 5 – 10 μm

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich,

- in Hohlräumen zwischen zementiertem feinkörnigem Detritus und vereinzelt vorkommendem grobem Detritus auf grobem Detritus

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Horizont c.

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrosparit

Kristallgröße 5 – 10 µm

Kristallgefüge: Meniskus-, Dachzement

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	1
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,44
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,46
Fe [Mol-%]:	0,04
Mn [Mol-%]:	0,05
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussreich

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 2

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: subhedral

Kristallform: blattförmig - granular

Blattförmig

Kristallbreite: 5 – 10 µm, **-länge:** 10 -20 µm

Granular

Kristallgröße: 5 – 10 µm

Kristallgefüge: lückenhafte bis vollständige Zementsäume

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	14
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,12 - 99,93
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,01 – 0,74
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,19
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,07
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussführend,

- Saummächtigkeit schwankt oft,
- Säume sind gleichmäßig begrenzt („even“ sensu REIJERS & HSÜ 1986),
- Quarzkörner und anderer siliziklastischer Detritus haben immer Zementsäume, auf karbonatischem Detritus fehlen sie oft oder sind deutlich schlechter ausgebildet,
- Quarzkörner mit Isopachenzement sind nach der Entstehung von Zementgeneration 2 vereinzelt in Karbonatdetritus hineingedrückt worden. Die mechanische Deformation muss nach der Bildung von Zementgeneration 2 stattgefunden haben

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 3

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgröße: 30 – 100 µm

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	5
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,01 – 99,30
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,59 – 0,83
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,21
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,10
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussführend

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Horizont d.

Zementgeneration 1

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallform: blattförmig - granular

Blattförmig

Kristallbreite: 5 – 10 µm, **-länge:** 10 -20 µm

Granular

Kristallgröße: 5 – 10 µm

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm (klare Kristalle),

- Mächtigkeit der Säume schwankt stark, wobei die Verteilung dünnerer bzw. dickerer Saumabschnitte keine bevorzugte Orientierung erkennen lässt

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2

Kristalltyp: Mikrosparit

Kristallgröße: 5 – 10 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: gleichmäßige, 40 – 50 µm mächtige Säume um Detritus, porenform-erhaltend

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: Verunreinigungen in und zwischen den Kristallen (braune Eigenfarbe),

- kommt vereinzelt auf Isopachenzement vor

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Horizont e.

Zementgeneration 1a

Kristalltyp: Mikrosparit

Kristallgröße: 4-10 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: ohne Orientierung

Zementationstyp: flache Zapfen

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe),

- feinkörnige Lagen sind besser zementiert sind als benachbarte grobkörnige,
- sukzessiver Übergang zu Zementgen. 2,
- die makroskopisch auffällige Orientierung der flachen Zapfen findet sich nicht in der Orientierung des Kalzitzementes wieder, d.h. es treten keine Unterschiede zwischen senkrecht bzw. parallel zur Zapfenlängsachse orientierten Dünnschliffen auf

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2a

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 20-40 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: porenformerhaltende Zementation, in Massenzementationskörpern: z.T. Meniskuszement

Zementationstyp: flache Zapfen, Massenzementation

Vorkommen: in flachen Zapfen häufig, in Massenzementationskörpern dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm – einschlussführend,

- in Zapfen sukzessiver Übergang zu Zementgeneration 1,
- die makroskopisch auffällige Orientierung der flachen Zapfen findet sich nicht in der Orientierung des Kalzitzementes wieder

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch, in Massenzementationskörpern auch meteorisch-vados

Zementgeneration 1b/2 b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: flache Zapfen, Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Horizont f.

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrit/Mikrospatit

Kristallgröße: < 4-10 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: ohne Orientierung

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: Verunreinigungen in und zwischen den Kristallen (braune Eigenfarbe),

- zementierte Partien erscheinen im Dünnschliff etwas heller und sind dichter als unzementierte, ansonsten ist der Zement kaum von der Geschiebemergelmatrix zu unterscheiden

Bildungsmilieu: keine Hinweise

Zementgeneration 2

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallform: blattförmig – granular

Blattförmig

Kristallbreite: 5 – 10 µm, **-länge:** 10 - 30 µm

Granular

Kristallgröße: 5 – 10 µm

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- auf Detritus, der in Schluff-Matrix schwimmt,
- auf der Wandung von Schrumpfungsrissen,
- Saummächtigkeit schwankt ohne bevorzugte Orientierung dickerer bzw. dünnerer Saumbereiche

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

6 AUFSCHLUSS BEI KRANKENHAGEN (ANHANG III: NR. 38)

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrospatit/Blockkalzit

Kristallgröße: 5 - 25 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: fleckenhafte Anwachsungen bis unvollständige Säume

Zementationstyp: kugelige bis diskusförmige Konkretionen, Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalt:

Messungen [Stück]:	5
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,37 – 99,64
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,28 – 0,49
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,08
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,11
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2

Kristalltyp: Mikrit

Kristallgröße: ≤ 4 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: Meniskus-, Gravitations-, Dachzement,

- häufig auf Zementgeneration 1

Zementationstyp: kugelige bis diskusförmige Konkretionen, Massenzementation

Vorkommen: selten, oben häufiger als unten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalt:

Messungen [Stück]:	8
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,29 – 99,53
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,42 – 0,81
Fe [Mol-%]:	0,04 – 0,89
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,08
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussreich (braune Kristalle)

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 3a

Kristalltyp: Mikrosparit/Blockkalzit

Kristallgröße: 5 – 25 µm, 20 – 60 µm, 60 – 70 µm, 40 – 100 µm,

- schwankt von Pore zu Pore

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: unsystematisch verteilte fleckenhafte Anwachsungen bzw. unvollständige Säume auf älteren Zementgenerationen oder direkt auf Detritus,

- selten porenfüllend (drusiger Mosaikzement)

Zementationstyp: kugelige bis diskusförmige Konkretionen, Massenzementation

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalt:

Messungen [Stück]:	2
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,37 – 99,54
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,41 – 0,45
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,15
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,05
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 3b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachs säume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalt:

Messungen [Stück]:	2
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,44 – 99,50
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,39
Fe [Mol-%]:	0,09 – 0,10
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,08
Sr [ppm]:	n.n.

Zementationstyp: kugelige bis diskusförmige Konkretionen, Massenzementation

Sonstiges: einschlussarm,

- Echinodermereste mit Mg-Konzentrationen von etwa 2,5 Mol-%, Fe-Gehalten von über 3 Mol-%

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

7 AUFSCHLUSS BEI RUMBECK (ANHANG III: NR. 39)

Zement 1

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: subhedral

Kristallform: blattförmig, selten granular
Blattförmig

Kristallbreite: 5 – 10 µm, **-länge:** 10 – 25 µm
Granular

Kristallgröße: 20 – 40 µm

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: fleckenhaft, selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- Isopachenzement kommt ohne erkennbare Systematik in verschiedenen Teilen der Zementationskörper vor, wobei die Häufigkeit auch im Dünnschliffbereich stark schwankt

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	15
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,08 – 99,44
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,53 – 0,87
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,23
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,05
Sr [ppm]:	n.n. – 600

Bildungsmilieu: meteorisch-(pseudo?) phreatisch

Zement 2

Kristalltyp: Mikrit/Mikrosparit

Kristallgröße: ≤ 10 µm

Kristallgestalt: anhedral

Kristallgefüge: Meniskus-, Dachzement,

- selten porenfüllend

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: nur im oberen Teil der Massenzementationskörper, dort nicht selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	2
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,10 – 99,16
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,50 – 1,38
Fe [Mol-%]:	0,06 – 0,52
Mn [Mol-%]:	n.n.
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussreich (braune Kristalle)

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zement 3

Kristalltyp: syntaxiale Anwachssäume
Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig
Zementationstyp: Massenzementation
Vorkommen: selten
Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend
Mineralbeschreibung: Kalzit
Sonstiges: einschlussarm
Bildungsmilieu: meteorisch-(pseudo?) phreatisch

Zement 4

Kristalltyp: Blockkalzit
Kristallgröße: 20-60 µm, 40-80 µm, 80-120 µm
Kristallgestalt: sub- bis anhedral
Kristallgefüge: z.T. drusiger Mosaikzement
Zementationstyp: Massenzementation
Vorkommen: dominierend
Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend
Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit
Sonstiges: einschlussarm,

- Kristallgröße nimmt mit Porengröße zu,
- bei einer von 47 Messungen wurde eine Sr-Konzentration festgestellt, die mit 1200 ppm erheblich höher als die der übrigen (n.n. – 700 ppm) lag. Es handelt sich offenkundig um eine Fehlbestimmung oder es wurde ein marin entstandenes Karbonatkorn ungewollt mitgemessen, bei dem hoher Sr-Gehalt nicht ungewöhnlich ist.

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	47
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,42 – 99,62
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,34 – 1,53
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,22
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,13
Sr [ppm]:	n.n. – 700 (1200)

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Pseudomatrix

Korngröße: meist ≤ 4 µm
Vorkommen: kleinere, isolierte Ansammlungen, vereinzelt zwischen Mikrit-/Mikrosparit-Zementkristallen
Kathodolumineszenz: orange lumineszierend
Mineralbeschreibung: Kalzit
Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe)

8 AUFSCHLUSS BEI HELPENSEN **(ANHANG III: NR. 42)**

Horizont a.**Zement 1**

Kristalltyp: Mikrit- bis Mikrosparit
Kristallgröße: < 4 bis 15 µm
Kristallgestalt: an- bis subhedral
Kristallgefüge: z.T. vollständige Zementsäume um Detritus, sonst porenfüllend
Zementationstyp: stratiforme Zementation

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalt:

Messungen [Stück]:	3
CaCO ₃ [Mol-%]:	97,94 – 98,57
MgCO ₃ [Mol-%]:	1,26 – 2,02
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,14
Mn [Mol-%]:	n.n.
Sr [ppm]:	n.n. – 500

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe),

- kommt auch in postsedimentär entstandenen Anlösungshohlformen in Quarzkörnern vor

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zement 2

Kristalltyp: Mikrit- bis Mikrosparit

Kristallgröße: < 4 bis 15 µm

Kristallgestalt: an- bis subhedral

Kristallgefüge: Meniskus-, Dach- und Gravitationszement,

- unregelmäßig fleckenhaft auf Detritus

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalt:

Messungen [Stück]:	2
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,61 – 98,70
MgCO ₃ [Mol-%]:	1,23 – 1,33
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,05
Mn [Mol-%]:	n.n.
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe),

- insgesamt mäßige Zementationsintensität,
- dabei vereinzelte, mm-durchmessende Bereiche, die fast vollständig zementiert sind

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Horizont b.**Zement 1**

Kristalltyp: Mikrosparit/Blockkalzit

Kristallgröße: ca. 5 µm, 5 – 20 µm, 15 – 25 µm, 30 – 50 µm, 40 – 80 µm

Kristallgestalt: sub- bis anhedral

Kristallgefüge: oft fleckenhafte Anwachsungen auf Detritus,

- selten Gravitations-, Dach-, Meniskuszement,
- vereinzelt drusiger Mosaikzement

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalt:

Messungen [Stück]:	18
CaCO ₃ [Mol-%]:	(96,95 -) 98,54 – 99,59
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,15 – 1,76
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,36 (- 1,49)
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,09
Sr [ppm]:	n.n. – 900

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: dominierend

Sonstiges: einschlussführend,

- Areale mit gleicher Kristallgröße durchmessen meist wenige mm- bis cm, sie können aber auch von Pore zu Pore schwanken,
- feinkörniges Sediment ist besser zementiert als grobkörniges,
- kommt in postsedimentär entstandenen Anlösungshohlformen in Quarzkörnern vor,
- in gut zementierten Arealen gibt es häufig Hohlräume zwischen plattigen Geröllen und umhüllendem Zement. Dabei zeichnet die Zementhülle i.d.R. die Form des jeweiligen Kornes nach,
- Fe-Gehalt bei einer Messung sehr hoch (1,49 Gew.-%), was wahrscheinlich auf ungewollt mitgemessene Fe-Oxide/-Hydroxide zurückzuführen ist, die in bzw. zwischen den Zementkristallen vorkommen

Bildungsmilieu: meteorisch-vados, meteorisch-pseudo-phreatisch

Zement 2

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zement 3

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallform: blattförmig

Kristallbreite: 5 – 8 µm, **-länge:** 10 – 20 µm

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kristallgefüge: auf Zement 1 in Hohlräumen zwischen Detritus und Zement 1

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalt:

Messungen [Stück]:	7
CaCO ₃ [Mol-%]:	97,25 – 99,15
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,81 – 2,11
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,65
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,04
Sr [ppm]:	n.n. - 900

Sonstiges: einschlussarm,

- Saummächtigkeit schwankt

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zement 4

Kristalltyp: Mikrosparit/Blockkalzit

Kristallgröße: ca. 5 µm, 5 – 20 µm, 15 – 25 µm

Kristallgestalt: sub- bis anhedral

Kristallgefüge: Gravitations-, Dach- oder Meniskuszement,

- fleckenhafte Anwachsungen auf Detritus

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: fleckenhaft häufig

Kathodolumineszenz: schwach orange bis rot

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussführend,

- ist von Zement 1 nur durch Lumineszenzverhalten zu unterscheiden,
- kommt in einzelnen Poren oder in mm³-durchmessenden Arealen vor

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Pseudomatrix

Korngröße: meist ≤ 4 µm

Vorkommen: kleinere, isolierte Ansammlungen in Eintiefungen auf größeren Geröllen

Kathodolumineszenz: schwach rötlich bis kräftig orange lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe)

Besonderheiten: In unverwitterten karbonatischen Detritus (scharfe und klare Kornformen) sind siliziklastische Körner eingedrückt.

Horizont c.

Zementgeneration 1a

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallform: blattförmig

Kristallbreite: 5 µm, **-länge:** 10 – 20 µm

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Vorkommen: selten

Kristallgefüge: fleckenhaft

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 1b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2

Kristalltyp: Mikrit/Mikrosparit

Kristallgröße: < 4 µm bis 20 µm

Kristallgestalt: anhedral

Kristallgefüge: Meniskus-, Gravitationszement, teilweise porenfüllend

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalt:

Messungen [Stück]:	12
CaCO ₃ [Mol-%]:	97,88 – 98,71
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,91 – 1,95
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,67
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,08
Sr [ppm]:	n.n. - 900

Sonstiges: einschlussreich (hellbraun bis braun),
 • feinkörniges Sediment ist besser zementiert als grobkörniges

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Besonderheiten

In karbonatischen Detritus sind häufig siliziklastische Körner hineingepresst. Dabei haben die karbonatischen Körner i.d.R. scharfe, klare Kornformen und sind randlich nur minimal angewittert.

9 AUFSCHLUSS BEI BAD MÜNDER /HACHMÜHLEN (ANHANG III: NR. 45)

Zementgeneration 1a

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: subhedral

Kristallform: blattförmig - granular

Blattförmig

Kristallbreite: 15 – 20 µm, **-länge:** 20 – 60 µm

Granular

Kristallgröße: 20 – 40 µm

Kristallgefüge: auf Detritus

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: nicht selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	7
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,60 – 99,73
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,13 – 0,34
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,11
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,12
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussarm,
 • vereinzelt ist Detritus zusammen mit Isopachenzement (Zementgeneration 1a) in benachbarte weichere Körner hinein gedrückt

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 1b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2

Kristalltyp: Mikrit

Kristallgröße: ≤ 4 µm

Kristallgestalt: anhedral

Kristallgefüge: auf Detritus und Zementgen. 1,

- Meniskus-, Gravitations-, Dachzement,
- fleckenhafte Anwachsungen bis Teilsäume

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: in fleckenhaft verteilten Arealen häufig, sonst nicht

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	3
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,29 – 99,23
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,43 – 0,73
Fe [Mol-%]:	0,28 – 0,93
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,05
Sr [ppm]:	n.n. - 400

Sonstiges: einschlussreich (braune Kristalle),
 • sukzessiver Übergang zu Bereichen, in denen Blockkalzit (Zementgeneration 3) dominiert

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 3

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 20 – 60 µm

Kristallgestalt: anhedral

Kristallgefüge: selten porenfüllend, sonst unregelmäßige Aufwachsungen auf Detritus und Zementgeneration 1, fleckenhaft unterschiedliche Zementationsintensität

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	3
CaCO ₃ [Mol-%]:	97,55 – 99,75
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,24 – 0,41
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,38 (1,70)
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,21
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussführend,
 • die Ränder der Kristalle wirken oft ausgefranst und gezackt,
 • sukzessiver Übergang zu Bereichen, in denen Mikritzement (Zementgeneration 2) dominiert,
 • die Fe-Konzentration einer Messung ist auffallend hoch (1,70 Mol-%), was wahrscheinlich auf ungewollt mitgemessene Fe-Oxide/-Hydroxide zurückzuführen ist, die in bzw. zwischen den Zementkristallen vorkommen

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch (?)

Pseudomatrix**Korngröße:** meist $\leq 4 \mu\text{m}$ **Vorkommen:** kleinere, isolierte Ansammlungen in Eintiefungen auf größeren Geröllen oder in nicht vollständig durch Zement plombierten Poren**Kathodolumineszenz:** orange lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussreich (braune Eigenfarbe)**10 AUFSCHLUSS BEI COPPENBRÜGGE**
(ANHANG III: NR. 47)**Horizont a.**

Durch die Konkretionen sind sowohl Schluff- als auch Sand- und Tonpartien zementiert. Es gibt in Abhängigkeit von der Korngröße des Sedimentes Unterschiede der Zementationsqualität.

Sediment: toniger Schluff**Kristalltyp:** Mikrosparit/Blockkalzit**Kristallgröße:** 4 – 15 μm **Kristallgestalt:** subhedral**Kristallgefüge:** ohne Orientierung**Zementationstyp:** kugelige Konkretionen**Vorkommen:** sehr häufig**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm (klare Kristalle),

- Zement läßt sich gut vom braunen bis dunkelbraunen Detritus unterscheiden

Bildungsmilieu: keine Hinweise**Sediment:** feinsandiger Schluff**Zementgeneration 1****Kristalltyp:** Mikrosparit/Blockkalzit**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallform:** blattförmig**Kristallbreite:** 5 - 8 μm , **-länge:** 8 – 20 μm **Kristallgefüge:** unvollständige Zementsäume um Sandkörner**Zementationstyp:** kugelige Konkretionen**Vorkommen:** nicht selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussführend**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch**Zementgeneration 2****Kristalltyp:** Mikrosparit**Kristallgröße:** 4 – 10 μm **Kristallgestalt:** an- bis subhedral**Kristallgefüge:** ohne Orientierung**Zementationstyp:** kugelige Konkretionen**Vorkommen:** sehr häufig**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** starke Verunreinigungen innerhalb und zwischen den Zementkristallen (braune Eigenfarbe),

- vom ebenfalls braunen, meist schwach

orange lumineszierenden Detritus nur durch das Lumineszenzverhalten zu unterscheiden

Bildungsmilieu: keine Hinweise**Sediment:** Fein- bis Mittelsand**Zementgeneration 1****Zementtyp:** Isopachenzement**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallform:** blattförmig**Kristallbreite:** 10 – 30 μm , **-länge:** 20 – 60 μm **Kristallgefüge:** auf Detritus**Zementationstyp:** kugelige Konkretionen**Vorkommen:** selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm,

- Säume oben bzw. unten mächtiger als an den Seiten

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch**Zementgeneration 2****Kristalltyp:** Mikrit bis Blockkalzit**Kristallgröße:** $\leq 10 \mu\text{m}$, 10 – 20 μm , 20 – 40 μm , 20 – 80 μm **Kristallgestalt:** an- bis subhedral**Kristallgefüge:** oft porenfüllend, vereinzelt porenformerhaltende Zementation**Zementationstyp:** kugelige Konkretionen**Vorkommen:** häufig**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussführend bis -reich,

- Bereiche gleicher Kristallgröße reichen von Einzelporen und bis zu einigen 100 μm durchmessenden Partien

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch (?)**Als jüngste Bildung in allen Bereichen:****Zementtyp:** Isopachenzement**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallform:** blattförmig**Kristallbreite:** 20–30 μm , **-länge:** 30–200 μm **Kristallgefüge:** auf Schrumpfungsrissen in den Konkretionen**Zementationstyp:** kugelige Konkretionen**Vorkommen:** selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch**Horizont b.****Zementgeneration 1****Kristalltyp:** Mikrit**Kristallgröße:** $\leq 4 \mu\text{m}$ **Kristallgefüge:** Meniskuszement**Zementationstyp:** Massenzementation**Vorkommen:** sehr selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit**Elementgehalt:**

Messungen [Stück]:	7
CaCO ₃ [Mol-%]:	97,07 – 99,71
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,23 – 1,19
Fe [Mol-%]:	n.n. – 1,72
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,09
Sr [ppm]:	n.n. – 400

Sonstiges: einschlussreich (braune Kristalle),

- Mg- und Fe-Konzentrationen sind sehr hoch

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 2a

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: subhedral

Kristallform: blattförmig

Kristallbreite: 5 – 10 µm, **-länge:** 10 – 15 µm

Kristallgefüge: fleckenhafte Anwachsungen bis unvollständige Säume, wobei nebeneinander vorkommende Kristalle meist unterschiedliche Länge haben

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalt:

Messungen [Stück]:	16
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,25 – 99,76
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,13 – 0,68
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,37
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,09
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussarm,

- ausschließlich auf kalzitischem Detritus

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsensäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalt:

Messungen [Stück]:	4
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,63 – 99,90
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,05 – 0,22
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,09
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,05
Sr [ppm]:	n.n. – 500

Sonstiges: einschlussreich,

- keine signifikanten Unterschiede der chemischen Zusammensetzung von Fossilresten und Anwachsensäumen

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 3

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 20 - 80 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: oft Meniskus-, Gravitationszement,
• selten porenfüllend

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalt:

Messungen [Stück]:	21
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,34 – 99,96
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,01 – 0,32
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,40
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,17
Sr [ppm]:	n.n. – 800

Sonstiges: einschlussarm,

- fleckenhafte 0,5 bis mehrere mm-große Bereiche sind gut, das dazwischen liegende Areale sehr schlecht bis gar nicht zementiert

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Pseudomatrix

Korngröße: meist ≤ 10 µm

Vorkommen: kleinere, isolierte Ansammlungen in Eintiefungen auf größeren Geröllen, Kornform relikhaft z.T. noch erkennbar

Kathodolumineszenz: schwach rötlich bis kräftig orange lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe)

Horizont c.**Zementgeneration 1a**

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 40 - 80 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: meist porenfüllend (drusiger Mosaikzement), sonst porenformerhaltend

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen, flache Zapfen

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm (klare Kristalle)

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 1b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsensäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen, flache Zapfen

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Horizont d.**Zement 1****Zementtyp:** Isopachenzement**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallform:** blattförmig - granular

Blattförmig

Kristallbreite: 10 – 20 µm, **-länge:** 20 – 30 µm

Granular

Kristallgröße: 10 – 20 µm**Kristallgefüge:** auf Detritus**Zementationstyp:** stratiforme Zementation**Vorkommen:** sehr selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm,

- Kristallspitzen sind meist rundlich stumpf

Bildungsmilieu: meteorisch-(pseudo?) phreatisch**Zement 2a****Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 15 – 40 µm**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallgefüge:** selten porenfüllend (drusiger Mosaikzement),

- Meniskus-, Gravitationszement

Zementationstyp: stratiforme Zementation**Vorkommen:** dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm,

- Kristallflächen mit Kontakt zu offenem Porenraum sind oft abgerundet und stumpf,
- gelegentlich zeichnen Verunreinigungen in Kristallen, die durch höhere Fluoreszenzintensität gut erkennbar sind, Menisken nach,
- Quarzdetritus gelegentlich mit randlichen, postsedimentär entstandenen Anlösungsgruben, die durch Blockkalzit verfüllt sind

Bildungsmilieu: meteorisch-vados, -phreatisch**Zement 2b****Kristalltyp:** syntaxiale Anwachssäume**Kristallgefüge:** umschließen detritische Echinodermereste vollständig**Zementationstyp:** stratiforme Zementation**Vorkommen:** nicht selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch

11 AUFSCHLUSS BEI EIME (ANHANG III: NR. 50)

Zementationstyp: Zapfen, Massenzementation (Horizonte a., b.)**Zementgeneration 1****Kristalltyp:** Mikrit**Kristallgröße:** ≤ 4 µm**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallgefüge:** Meniskus-, Dach-, Gravitationszement**Vorkommen:** selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Niedrig-Mg-Kalzit**Elementgehalte:**

Messungen [Stück]:	2
CaCO ₃ [Mol-%]:	94,60 – 99,43
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,45 – 3,34
Fe [Mol-%]:	0,07 – 2,06
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,05
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussreich (braune Kristalle),

- Mg- und Fe-Konzentrationen stark schwankend

Bildungsmilieu: meteorisch-vados**Zementgeneration 2****Zementtyp:** Isopachenzement**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallform:** blattförmig, selten granular

Blattförmig

Kristallbreite: 10 – 15 µm, **-länge:** 25 – 40 µm

Granular

Kristallgröße: 10 – 15 µm**Vorkommen:** selten,

- meist unvollständige Zementsäume ohne bevorzugte Wachstumspositionen,
- Saummächtigkeit schwankt sowohl um einzelne Körner als auch von Korn zu Korn

Kristallgefüge: Säume kommen vor allem auf Quarz vor, auf karbonatischem Detritus sind sie selten und bestehen aus deutlich kleineren Kristallen**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Niedrig-Mg-Kalzit**Elementgehalte:**

Messungen [Stück]:	3
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,40 – 99,57
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,31 – 0,57
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,05
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,04
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussarm (klare Kristalle)**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch**Zementgeneration 3a****Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 30 – 100 µm**Kristallgestalt:** eu- bis subhedral**Kristallgefüge:** z.T. drusiger Mosaikzement**Vorkommen:** dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	12
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,24 – 99,72
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,24 – 0,75
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,48
Mn [Mol-%]:	n.n.
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussarm (klare Kristalle)

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration3b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachssäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- detritische Echinodermereste bestehen z.T. aus Fe-haltigem Kalzit (bläuliche Anfärbung)

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementationstyp: Massenzementation (Horizont c., unterer Teil)

Sediment: Mittel- bis Grobkies, in dessen Porenraum Sand und Feinkies vorkommen

Zementgeneration1

Kristalltyp: Mikrit

Kristallgröße: $\leq 4 \mu\text{m}$

Kristallgestalt: anhedral

Kristallgefüge: Meniskus-, Dachzement,

- Anhaftungen auf Detritus ohne bevorzugte Bildungsposition

Vorkommen: untergeordnet

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Kristalle)

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 2

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 20 – 80 μm

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallgefüge: häufig vollständige und gleichmäßige Zementsäume,

- selten porenfüllend

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementationstyp: Massenzementation (Horizont c., oberer Teil)

Sediment: Mittel- bis Grobkies, in dessen Porenraum kaum Sand und Feinkies vorkommen

Zementgeneration 1

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: euhedral

Kristallform: blattförmig

Kristallbreite: 10 – 20 μm , **-länge:** 20 – 40 μm

Vorkommen: meist vollständige Säume,

- auf Grund unterschiedlicher Kristallgrößen unmittelbar benachbarter Kristalle unregelmäßig

Kristallgefüge: auf Detritus

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussführend

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: euhedral

Kristallform: blattförmig

Kristallbreite: 100 – 400 μm , **-länge:** 300 – 2000 μm

Vorkommen: dominierend

Kristallgefüge: auf Zementgeneration 1

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

In allen Bereichen:**Pseudomatrix**

Korngröße: meist $\leq 4 \mu\text{m}$, vereinzelt Mikrofossilien (z.B. Foraminiferen, Calcisphären)

Vorkommen: kleinere, isolierte Ansammlungen in Eintiefungen auf größeren Geröllen, in Zwickeln zwischen Zementkristallen

Kathodolumineszenz: orange lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe)

12 AUFSCHLUSS BEI BANTELN
(ANHANG III: NR. 51)**Pseudomatrix**

Korngröße: meist $\leq 10 \mu\text{m}$, vereinzelt Mikrofossilien (z.B. Foraminiferen, Calcisphären)

Vorkommen: dominierend,

- oft auf plattigen bzw. über größeren Geröllen angereichert,
- selten wolkige Aggregate, bei denen es sich erkennbar um ehemaligen karbonatischen Detritus handelt, der weitgehend entfestigt und in Auflösung begriffen ist,
- außerdem gibt es karbonatische Körner, die angewittert (Kern unverwittert, am Rand entfestigt) bis unverwittert sind

Kathodolumineszenz: meist orange lumineszierend

Zement

Kristalltyp: Mikrit/Mikrospatit

Kristallgröße: $\leq 10 \mu\text{m}$

Kristallgestalt: an- bis subhedral

Kristallgefüge: unvollständige Zementsäume,
 • fleckenhafte Aufwachsungen auf Detritus,
 • Meniskuszement

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm (fast klare Kristalle) bis einschlussreich (braune Kristalle)

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

13 AUFSCHLUSS BEI BETHELN (ANHANG III: NR. 53)

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrit

Kristallgröße: $\leq 4 \mu\text{m}$

Kristallgestalt: anhedral

Kristallgefüge: Meniskus-, Gravitations-, Dachzement

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	7
CaCO ₃ [Mol-%]:	97,81 – 99,10
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,78 – 1,44
Fe [Mol-%]:	0,08 – 0,70
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,08
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussreich (braune Kristalle)

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 2a

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 15 – 30 μm , 20 – 60 μm

Kristallgestalt: sub- bis anhedral

Kristallgefüge: bildet meist vollständige und gleichmäßige Säume auf Detritus (porenformerhaltend), selten porenfüllend (Mosaikzement)

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: intrinsisch bis orange lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	17
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,44 – 99,53
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,43 – 1,53
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,15
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,05
Sr [ppm]:	n.n. - 400

Sonstiges: einschlussarm bis -führend,

- in grobkörnigen Partien (sandarmer Kies) sind die Zementkristalle größer als in feinkörnigen (sandreicher Kies),

- Quarzkörner gelegentlich mit postsedimentär entstandenen, randlichen Anlösungsgruben, die i.d.R. mit Blockkalzit gefüllt sind,

- in den Massenzementationskörpern in der obersten Kiesschicht luminesziert der Blockkalzit nicht,

- in den tiefer liegenden Zementationskörpern kommt häufig orange lumineszierender Blockkalzit vor. Nicht lumineszierenden Blockkalzit gibt es hier lediglich in den zentralen Teilen vollständig plombierter Poren, wobei die Grenze zwischen lumineszierendem und nicht lumineszierendem Kalzit auch durch Zementkristalle geht

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: intrinsisch bis orange lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 3

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: anhedral

Kristallform: blattförmig

Kristallbreite: 20 – 60 μm , **-länge:** 80 – 300 μm

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: füllt Spalten in den Zementationskörpern meist vollständig auf

Kristallgefüge: auf zementiertem Sediment

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Pseudomatrix

Korngröße: meist $\leq 4 \mu\text{m}$, vereinzelt Mikrofossilien (z.B. Foraminiferen, Calcisphären)

Vorkommen: z.T. sind härtere Körner (z.B. Quarz) in weichere (z.B. „Plänerkalk“, Mikrit-, Mergelkörner) eingedrückt,

- z.T. ist noch die Kornform ehemaliger Karbonatkörner erkennbar,
- kleinere, isolierte Ansammlungen in Eintiefungen auf größeren Geröllen,
- zahlreiche Übergangsformen

Kathodolumineszenz: orange lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe),
 • Pseudomatrix ist teilweise mit Mikritzement vermengt, wird von Blockkalzit überwachsen oder kommt auf ihm vor

14 AUFSCHLUSS BEI FREDEN/LEINE (ANHANG III: NR. 64)

Aufschlussbereich I:

Zement 1

Kristalltyp: Mikrosparit/Blockkalzit

Kristallgröße: 8 – 60 µm,

- in eingeschalteten Schlufflagen 5 – 15 µm

Kristallgestalt: anhedral

Kristallgefüge: porenformerhaltend, z.T. drusiger Mosaikzement,

- bis 50 µm breite Säume auf Risswandungen,
- selten Meniskuszement

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen, stratiforme Zementation

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	11
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,12 – 99,90
MgCO ₃ [Mol-%]:	n.n. – 1,21
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,88
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,40
Sr [ppm]:	n.n. – 600

Sonstiges: einschlussführend bis –reich,

- gelegentlich zeichnet stärkere Verunreinigung von Kristallen Menisken nach,
- eingeschaltete Schlufflagen sind signifikant besser zementiert als umgebender Feinsand,
- Fe- (bis 0,88 Mol-%) bzw. Mn-Konzentrationen (bis 0,40 Mol-%) sind teilweise ungewöhnlich hoch,
- Quarzkörner gelegentlich mit postsedimentär entstandenen, randlichen Anlösungsgruben, die durch Zement 1 gefüllt sind

Bildungsmilieu: meteorisch-vados, -phreatisch

Zement 2

Kristalltyp: syntaxiale Anwachs säume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen, stratiforme Zementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Pseudomatrix

Korngröße: meist ≤ 10 µm

Vorkommen: kleinere, isolierte Ansammlungen in Eintiefungen auf Geröllen

Kathodolumineszenz: orange lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe)

Aufschlussbereich II-1:

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrit/Mikrosparit

Kristallgröße: ≤ 10 µm

Kristallgestalt: an- bis subhedral

Kristallgefüge: Meniskus-, Gravitationszement

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: in fleckenhaft verteilten Arealen in Massenzementationskörpern, sonst nicht

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 2

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: subhedral

Kristallform: blattförmig - granular

Blattförmig

Kristallbreite: 10 – 20 µm, **-länge:** 30 – 50 µm
Granular

Kristallgröße: 10 – 20 µm

Kristallgefüge: auf Detritus: vollständige Säume, fleckenhafte Teilsäume ohne bevorzugte Wachstumsposition

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: nicht selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussführend

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 3

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 40 - 80 µm (selten bis 250 µm)

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: porenformerhaltend bis selten porenfüllend, z.T. drusiger Mosaikzement

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Aufschlussbereich II-2:

Zement 1

Kristalltyp: Blattförmiger Zement

Kristallgestalt: subhedral

Kristallbreite: 4 – 10 µm, **-länge:** 10 – 40 µm

Kristallgefüge: fleckenhafte Teilsäume meist ober- und unterhalb von Körnern (Dach- und Gravitationszement)

Substrat: Kies

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zement 2

Kristalltyp: Mikrosparit

Kristallgröße: 4 - 10 µm

Kristallgestalt: anhedral

Kristallgefüge: oft porenfüllend,

- z.T. drusiger Mosaikzement,
- vereinzelt Meniskus- und Gravitationszement

Substrat: Feinsand, feinsandiger Kies

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	10
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,83 – 99,46
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,53 – 0,80
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,40
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,06
Sr [ppm]:	n.n. - 500

Sonstiges: einschlussführend,

- stärker verunreinigte Bereiche zeichnen Meniskus- und Gravitationszement nach,
- Quarzkörner gelegentlich mit randlichen, nach der Ablagerung entstandenen Anlösungsgruben, die mit Zement gefüllt sind

Bildungsmilieu: meteorisch-vados, meteorisch-phreatisch

Zement 3

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 50 – 100 µm (selten bis 300 µm)

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: porenfüllend,

- z.T. drusiger Mosaikzement,
- vereinzelt Meniskus- und Gravitationszement

Substrat: Kies, z.T. mittelsandig

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	8
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,05 – 99,40
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,56 – 0,84
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,15
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,07
Sr [ppm]:	n.n. - 500

Sonstiges: einschlussarm,

- stärker verunreinigte Bereiche zeichnen Meniskus- und Gravitationszement nach,

- Quarzkörner gelegentlich mit randlichen, nach der Ablagerung entstandenen Anlösungsgruben, die mit Zement gefüllt sind

Bildungsmilieu: meteorisch-vados, meteorisch-phreatisch

Sonstiges

Auf den Zementkristallen kommen Kalzitauflösungen vor, die aus filigranen Laminae und Krusten bestehen. Sie werden als mikrobielle Bildungen gedeutet, die jünger sind als der anorganische Kalzitement und vermutlich holozänzeitlich im Zusammenhang mit der Bildung der beobachteten Rhizokonkretionen entstanden.

Aufschlussbereich II-3:

Zementationstyp: liegende Zapfen

Zementgeneration 1a

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallform: blattförmig

Kristallbreite: 5 – 25 µm, **-länge:** 10 – 100 µm

Kristallgefüge: auf Detritus

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2a

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 30 – 80 µm, 40 – 120 µm, 80 – 150 µm

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallgefüge: oft porenfüllend

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 1b/2b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermenreste vollständig

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementationstyp: Massenzementation

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrosparit

Kristallgestalt: anhedral

Kristallgröße: 4 – 10 µm

Kristallgefüge: Meniskuszement

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich
Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 2a

Zementtyp: Isopachenzement
Kristallgestalt: sub- bis euhedral
Kristallform: blattförmig
Kristallbreite: 5 – 20 µm, **-länge:** 15 – 80 µm
Kristallgefüge: auf Detritus, meist vollständige Säume mit oft konstanter Mächtigkeit

Vorkommen: selten
Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend
Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	3
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,96 – 99,07
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,74 – 0,86
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,21
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,09
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussarm
Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 3a

Kristalltyp: Blockkalzit
Kristallgröße: 30-100 µm (selten bis 200 µm)
Kristallgestalt: sub- bis anedral
Kristallgefüge: porenformerhaltend
Vorkommen: dominierend
Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend
Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	13
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,50 – 99,43
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,35 – 1,43
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,27
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,21
Sr [ppm]:	n.n. - 600

Sonstiges: einschlussarm
Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2b/3b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachssäume
Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermenreste vollständig

Vorkommen: selten
Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend
Mineralbeschreibung: Kalzit
Sonstiges: einschlussarm
Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Aufschlussbereich III:

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrit/Mikrospatit
Kristallgröße: < 4 - 10 µm
Kristallgestalt: an- bis subhedral
Kristallgefüge: Meniskus-, Gravitationszement
Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: in vereinzelt vorkommenden, mm-durchmessenden Bereichen nicht selten, sonst nicht

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 2a

Zementtyp: Isopachenzement
Kristallgestalt: sub- bis euhedral
Kristallform: blattförmig
Kristallbreite: < 5 - 10 µm, **-länge:** 10 - 40 µm
Kristallgefüge: unsystematisch vorkommende Teilsäume auf karbonatischem Detritus

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- nebeneinander vorkommende Kristalle haben meist unterschiedliche Größe

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	4
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,47 – 99,65
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,31 – 0,49
Fe [Mol-%]:	n.n.
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,04
Sr [ppm]:	n.n.

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 3a

Kristalltyp: Blockkalzit
Kristallgröße: 30 - 100 µm (selten bis 500 µm)
Kristallgestalt: sub- bis anedral
Kristallgefüge: z.T. drusiger Mosaikzement,
 • porenformerhaltend

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	2
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,46 – 99,48
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,46 – 0,48
Fe [Mol-%]:	n.n.
Mn [Mol-%]:	n.n.
Sr [ppm]:	n.n. - 500

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2b/3b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachssäume
Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermenreste vollständig

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Pseudomatrix

Korngröße: meist $\leq 10 \mu\text{m}$

Vorkommen: Ansammlungen in Eintiefungen auf plattigen Geröllen,

- Gerölle aus Mikrit/Mikrospatit sind gelegentlich randlich aufgelöst/entfestigt, wodurch solche Körner z.T. diffuse Pseudomatrix-Säume haben

Kathodolumineszenz: orange lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe)

Aufschlussbereich IV:

Oberer Horizont

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrit/Mikrospatit

Kristallgröße: $< 4 - 10 \mu\text{m}$

Kristallgestalt: an- bis subhedral

Kristallgefüge: Meniskus-, Gravitationszement

Zementationstyp: liegende Zapfen

Vorkommen: in vereinzelt vorkommenden, mm-durchmessenden Bereichen selten, sonst nicht

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 2

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallform: blattförmig

Kristallbreite: $5 - 25 \mu\text{m}$, **-länge:** $15 - 80 \mu\text{m}$

Kristallgefüge: unsystematisch vorkommende Teilsäume meist auf karbonatischem selten auf siliziklastischem Detritus

Zementationstyp: liegende Zapfen

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- nebeneinander vorkommende Kristalle haben meist unterschiedliche Größe

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 3a

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: $40 - 100 \mu\text{m}$

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: meist porenfüllend, sonst porenformerhaltend

Zementationstyp: liegende Zapfen

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]: 3

CaCO₃ [Mol-%]: 98,07 – 99,10

MgCO₃ [Mol-%]: 0,80 – 1,08

Fe [Mol-%]: 0,06. – 0,21

Mn [Mol-%]: n.n.

Sr [ppm]: n.n.

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 3b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachssäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: liegende Zapfen

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- Echinodermereste bestehen oft aus Fe-Kalzit (bläuliche Anfärbung)

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Pseudomatrix

Korngröße: meist $\leq 10 \mu\text{m}$

Vorkommen: Ansammlungen in Eintiefungen auf plattigen Geröllen

Kathodolumineszenz: orange lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe)

Unterer Horizont

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrit/Mikrospatit

Kristallgröße: $< 4 - 10 \mu\text{m}$

Kristallgestalt: an- bis subhedral

Kristallgefüge: Meniskus-, Gravitationszement, • vereinzelt unregelmäßig verteilte Teilsäume

Zementationstyp: gebogene Zapfen

Vorkommen: in vereinzelt vorkommenden, mm-durchmessenden Bereichen häufig, sonst nicht

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]: 1

CaCO₃ [Mol-%]: 98,56

MgCO₃ [Mol-%]: 1,26

Fe [Mol-%]: 0,10

Mn [Mol-%]: n.n.

Sr [ppm]: n.n.

Sonstiges: einschlussreich

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 2

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallform: blattförmig

Kristallbreite: $< 4 - 10 \mu\text{m}$, **-länge:** $10 - 15 \mu\text{m}$

Kristallgefüge: meist unsystematisch vorkommende Teilsäume, selten vollständige Säume auf karbonatischem Detritus

Zementationstyp: gebogene Zapfen

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- nebeneinander vorkommende Kristalle haben meist unterschiedliche Größe

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 3a

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 40 - 100 µm, fleckhaft 10 – 25 µm, 25 – 50 µm oder 60 – 120 µm

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallgefüge: meist porenfüllend, sonst porenformerhaltend,

- vereinzelt Meniskuszement

Zementationstyp: gebogene Zapfen

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	20
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,14 – 99,85
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,09 – 0,50
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,42
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,05
Sr [ppm]:	n.n. - 1700

Sonstiges: einschlussarm,

- im Bereich von Kornkontakten gelegentlich stärker verunreinigte Kristalle (Meniskuszement),
- z.T. auffällig hohe Sr-Gehalte,
- Zementationsintensität ist in feinkörnigen Schichten i.d.R. höher als in grobkörnigen,
- gelegentlich sind Quarzkörner postsedimentär randlich angelöst, wobei die Lösungsmulden mit Blockkalzit gefüllt sind

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch (der Meniskuszement wird als Relikt von Zementgeneration 1 gedeutet)

Zementgeneration 3b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: gebogene Zapfen

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Pseudomatrix

Korngröße: meist ≤ 4 µm

Vorkommen: z.T. ist noch die Kornform ehemaliger Karbonatkörner erkennbar,

- kleinere, isolierte Ansammlungen in Eintiefungen auf größeren Geröllen,
- zahlreiche Übergangsformen

Kathodolumineszenz: orange lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe)

Besonderheiten

Vereinzelt gibt es im vertikal stehenden Teil der gebogenen Zapfen kleine, etwa vertikal stehende Kanäle, die einen Durchmesser von max. 0,5 cm und im Dünnschliff Längen von höchstens 2 cm haben und in denen kein Zement auftritt. Im unmittelbaren Umfeld um diese Kanäle treten Meniskus- und Gravitationszement signifikant häufiger auf, als im übrigen zementierten Bereich. Die Kanäle sind nicht miteinander verbunden und durchziehen die Zapfen somit auch nicht wie z.B. Lösungstransportkanäle, die in Stalaktiten vorkommen,

- Zement ist bis auf o.g. Ausnahmen innerhalb der Zementationskörper homogen verteilt. Es gibt keine erkennbare Korrelation zwischen äußerer Form der Zapfen sowie Beschaffenheit und Verteilung des Zementes.

Aufschlussbereich V-1:

Zement 1

Kristalltyp: Mikrit/Mikrospatit

Kristallgröße: < 4 - 10 µm

Kristallgestalt: an- bis subhedral

Kristallgefüge: Meniskus-, Gravitationszement

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: fleckhaft häufig, sonst nicht

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zement 2

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 20 - 60 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: häufig Meniskus- und Gravitationszement,

- in Bereichen mit geringem offenem Restporenraum wirkt die Zementation eher porenrundend

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- Zementationsintensität ist auch im Dünnschliffbereich sehr heterogen. Neben mm-mächtigen Lagen, die nahezu vollständig zementiert sind, kommen Bereiche vor, in denen

nur vereinzelt Zementkristalle vorkommen. Dabei ist kein Zusammenhang mit der Beschaffenheit des Lockersedimentes erkennbar

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zement 3

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste teils vollständig bzw. sind teils fleckenhaft auf diese aufgewachsen

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-(pseudo?) phreatisch

Aufschlussbereich V-2:

Zement 1

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 20 und 50 μm

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallgefüge: unvollständige und vollständige Zementsäume um Detritus,

- Teilsäume ohne bevorzugte Wachstumsposition,
- sehr selten porenfüllend

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- grobkörnige Bereiche sind besser zementiert als feinkörnige

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zement 2

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Aufschlussbereich V-3:

Zement 1

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 20 – 50 μm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: meist porenfüllend (Mosaikzement), sonst porenformerhaltend

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussführend,

- Platten aus zusammengewachsenen Konkretionen

sind homogen zementiert, d.h. die makroskopisch auffällige Form der Zementationskörper steht in keinem Zusammenhang mit der Zementbeschaffenheit,

- Quarzdetritus ist gelegentlich postsedimentär randlich angelöst, wobei die Lösungsspuren durch Blockkalzit gefüllt sind

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zement 2

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Aufschlussbereich VI:

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrosparit

Kristallgröße: 4 - 10 μm

Kristallgestalt: anhedral

Kristallgefüge: Meniskuszement

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussführend

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 2a

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 40 – 80 μm

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallgefüge: häufig porenfüllend, z.T. drusiger Mosaikzement

Zementationstyp: Massenzementation, diskusförmige Konkretionen

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm (klare Kristalle)

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: Massenzementation, diskusförmige Konkretionen

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Aufschlussbereich VII:**Zement 1****Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 20 – 40 µm**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallgefüge:** unvollständige und vollständige Zementsäume,

- porenformerhaltend,
- selten porenfüllend

Zementationstyp: diskusförmige bis kugelige Konkretionen**Vorkommen:** dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch**Zement 2****Kristalltyp:** syntaxiale Anwachssäume**Kristallgefüge:** umschließen detritische Echinodermereste vollständig**Zementationstyp:** diskusförmige bis kugelige Konkretionen**Vorkommen:** selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch**Aufschlussbereich VIII-1:****Zementgeneration 1****Substrat:** schluffiger Feinsand bis Feinsand**Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 5 – 30 µm**Kristallgestalt:** sub- bis anhedral**Kristallgefüge:** Meniskus-, Gravitationszement**Zementationstyp:** hängende Zapfen (Endostalaktiten)**Vorkommen:** fleckenhaft**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussführend**Bildungsmilieu:** meteorisch-vados**Substrat:** Mittelsand, z.T. feinsandig**Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 30 – 100 µm**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallgefüge:** Meniskuszement**Zementationstyp:** hängende Zapfen (Endostalaktiten)**Vorkommen:** fleckenhaft**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm**Bildungsmilieu:** meteorisch-vados**Zementgeneration 2a****Substrat:** schluffiger Feinsand**Kristalltyp:** Mikrosparit/Blockkalzit**Kristallgröße:** 5 – 20 µm**Kristallgestalt:** sub- bis anhedral**Kristallgefüge:** porenformerhaltend bis meist porenfüllend**Zementationstyp:** hängende Zapfen (Endostalaktiten)**Vorkommen:** dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussführend,

- Zementationsintensität ist an den Zapfenrändern oft höher als im Zapfenkern

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch**Substrat:** Feinsand**Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 10 – 30 µm**Kristallgestalt:** sub- bis anhedral**Kristallgefüge:** oft vollständige Säume um Quarzdetritus, z.T. porenfüllend**Zementationstyp:** hängende Zapfen (Endostalaktiten)**Vorkommen:** dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussführend,

- Zementationsintensität ist an den Zapfenrändern oft höher als im Zapfenkern

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch**Substrat:** Mittelsand, z.T. feinsandig**Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 30 – 100 µm**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallgefüge:** häufig porenfüllend**Zementationstyp:** hängende Zapfen (Endostalaktiten)**Vorkommen:** dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Niedrig-Mg-Kalzit**Elementgehalte:**

Messungen [Stück]:	10
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,41 – 99,18
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,79 – 1,54
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,11
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,08
Sr [ppm]:	n.n. - 600

Sonstiges: einschlussarm,

- Zementationsintensität ist an den Zapfenrändern oft höher als im Zapfenkern

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch**Zementgeneration 2b****Kristalltyp:** syntaxiale Anwachssäume**Kristallgefüge:** umschließen detritische Echinodermereste vollständig**Zementationstyp:** hängende Zapfen (Endostalaktiten)

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- Echinodermenreste bestehen z.T. aus Fe-Kalzit (bläuliche Anfärbung)

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Pseudomatrix

Korngröße: meist $\leq 10 \mu\text{m}$

Vorkommen: fleckige bis wolkige Aggregate, bei denen vereinzelt noch ehemalige Kornumrisse erkennbar sind

Kathodolumineszenz: orange lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe),

- Pseudomatrix ist teilweise mit Mikritzement vermennt, wird von Blockkalzit überwachsen oder kommt auf ihm vor

Aufschlussbereich VIII-2:

Zementgeneration 1

Kristalltyp: Mikrit/Mikrospatit

Kristallgröße: $\leq 10 \mu\text{m}$

Kristallgestalt: an- bis subhedral

Kristallgefüge: Meniskus-, Gravitationszement

Zementationstyp: liegende Zapfen

Vorkommen: fleckenhaft selten, sonst nicht

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	5
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,31 – 99,72
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,23 – 0,46
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,26
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,04
Sr [ppm]:	n.n. – 600

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-vados

Zementgeneration 2a

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 30 – 80 μm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: häufig vollständige Zementsäume um Detritus (porenformerhaltend),

- oft porenfüllend, z.T. als drusiger Mosaikzement

Zementationstyp: liegende Zapfen

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	25
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,26 – 99,84
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,09 – 0,70
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,14
Mn [Mol-%]:	n.n.
Sr [ppm]:	n.n. – 600

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2b

Kristalltyp: syntaxiale Anwachssäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermenreste vollständig

Zementationstyp: liegende Zapfen

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	2
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,52 – 99,61
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,21 – 0,29
Fe [Mol-%]:	0,13 – 0,16
Mn [Mol-%]:	n.n.
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussarm,

- Echinodermenfragment, dessen syntaxialer Anwachssaum o.g. Zusammensetzung hat, mit relativ hoher Mn-Konzentration (0,24 Mol-%)

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Aufschlussbereich VIII-3:

Zementgeneration 1

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallform: blattförmig - granular

Blattförmig

Kristallbreite: 10 – 15 μm , **-länge:** 20 – 30 μm

Granular

Kristallgröße: 10 – 20 μm

Kristallgestalt: eu- bis subhedral

Zementationstyp: diskusförmige bis kugelige Konkretionen

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussführend,

- nur auf Quarzkörnern,
- Saummächtigkeit schwankt

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2

Kristalltyp: Mikrospatit/Blockkalzit

Kristallgröße: 8 – 25 μm

Kristallgestalt: anhedral

Kristallgefüge: meist porenfüllend

Zementationstyp: diskusförmige bis kugelige Konkretionen

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit**Sonstiges:** einschlussreich,

- meist nur durch Kathodolumineszenzverhalten vom überwiegend orange bis rot lumineszierenden karbonatischen Detritus zu unterscheiden

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch**Zementgeneration 3****Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 40 – 80 µm**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallgefüge:** füllt Mikrokluft und Haarrisse, z.T. drusig**Zementationstyp:** diskusförmige bis kugelige Konkretionen**Vorkommen:** häufig**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch**Besonderheiten:**

Die Mn-Hydroxide, die die makroskopisch erkennbare, starke Verunreinigung verursachen, bildeten sich in durch Kalzitzement offengelassenem Restporenraum und in Poren zwischen den Zementkristallen und damit nach der Kalzitzementation

Aufschlussbereich VIII-4:**Zement 1****Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 30 – 80 µm**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallgefüge:** porenformerhaltend (Isopachenzement) bis porenfüllend (z.T. drusiger Mosaikzement),

- (in Bereichen mit geringerer Zementationsintensität) Meniskus-, Gravitationszement

Zementationstyp: Massenzementation**Vorkommen:** dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch, z.T. meteorisch-vados**Zement 2****Kristalltyp:** syntaxiale Anwachssäume**Kristallgefüge:** umschließen detritische Echinodermenreste vollständig**Zementationstyp:** Massenzementation**Vorkommen:** selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch**Aufschlussbereich VIII-5:****Zementgeneration 1****Kristalltyp:** Mikrit**Kristallgröße:** ≤ 4 µm**Kristallgestalt:** anhedral**Kristallgefüge:** Meniskuszement**Zementationstyp:** stratiforme Zementation**Vorkommen:** fleckenhaft häufig, sonst nicht**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussreich (braune Kristalle)**Bildungsmilieu:** meteorisch-vados**Zementgeneration 2****Kristalltyp:** Mikrospatit/Blockkalzit**Kristallgröße:** 4 – 15 µm (schluffiger Feinsand), 15 – 25 µm (z.T. mittelsandiger Feinsand)**Kristallgestalt:** sub- bis anhedral**Kristallgefüge:** häufig Meniskuszement,

- gleichmäßige Zementsäume auf Detritus,
- gelegentlich porenfüllend

Zementationstyp: stratiforme Zementation**Vorkommen:** dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Niedrig-Mg-Kalzit**Sonstiges:** einschlussführend,

- Zementationsintensität schwankt in 0,1 - 1 mm großen Flecken von mäßig bis sehr hoch

Bildungsmilieu: meteorisch-vados, meteorisch-(pseudo?) phreatisch**Aufschlussbereich VIII-6:****Zementgeneration 1****Kristalltyp:** Mikrit**Kristallgröße:** ≤ 4 µm**Kristallgestalt:** anhedral**Kristallgefüge:** Meniskus-, Gravitationszement**Zementationstyp:** stratiforme Zementation**Vorkommen:** selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussreich (braune Kristalle)**Bildungsmilieu:** meteorisch-vados**Zementgeneration 2a****Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 15 – 60 µm**Kristallgestalt:** sub- bis anhedral**Kristallgefüge:** meist porenformerhaltend, selten Meniskuszement**Zementationstyp:** stratiforme Zementation**Vorkommen:** dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussführend**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch, meteorisch-vados

Zementgeneration 2b **Kristalltyp:** syntaxiale
Anwachsäume
Kristallgefüge: umschließen detritische
Echinodermenreste vollständig
Zementationstyp: stratiforme Zementation
Vorkommen: selten
Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend
Mineralbeschreibung: Kalzit
Sonstiges: einschlussarm
Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

15 AUFSCHLUSS BEI ENGELADE (ANHANG III: NR. 67)

Sediment: Schertill

Zementgeneration 1

Zementtyp: Isopachenzement

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallform: blattförmig

Kristallbreite: < 5- 10 µm, **-länge:** 8 – 40 µm

Kristallgefüge: auf Detritus, der in Matrix schwimmt

Zementationstyp: kugelige Konkretionen, Massenzementation

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm,

- Mächtigkeit der Säume schwankt stark, wobei es keine bevorzugte Orientierung von mächtigeren bzw. dünneren Saumabschnitten gibt

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zementgeneration 2

Kristalltyp: Mikrospatit

Kristallgröße: 5 – 10 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: ohne Orientierung

Zementationstyp: kugelige Konkretionen, Massenzementation

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: Verunreinigungen in und zwischen den Kristallen (hellbraune Eigenfarbe),

- gelegentlich etwas heller als die braune bis dunkelbraune, feinkörnige Grundmasse der Grundmoräne (Schluff, Ton), von der er sich sonst kaum unterscheidet

Bildungsmilieu: keine Hinweise

Zementgeneration 3

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 20 – 60 µm, 100 – 140 µm

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallgefüge: plombiert Spalten und Risse

Zementationstyp: kugelige Konkretionen, Massenzementation

Vorkommen: häufig

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Sediment: Schmelzwasser-Sand

Zement 1

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 20 – 150 µm

Kristallgestalt: sub- bis anhedral

Kristallgefüge: porenformerhaltend

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: nicht selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	7
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,16 – 99,79
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,16 – 0,49
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,35
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,06
Sr [ppm]:	n.n. – 500

Sonstiges: einschlussführend

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zement 2

Kristalltyp: Mikrospatit

Kristallgröße: 5 – 10 µm

Kristallgestalt: anhedral

Kristallgefüge: auf plattigen Geröllen zwischen Zement 1 und 3: häufig unvollständige, ungleichmäßige Säume ohne bevorzugte Wachstumsposition

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	4
CaCO ₃ [Mol-%]:	96,70 – 99,70
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,21 – 1,36
Fe [Mol-%]:	0,04 – 1,68
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,23
Sr [ppm]:	n.n. – 500

Sonstiges: einschlussreich (braune Kristalle),

- teilweise erhöhte Mg- (bis 1,36 Mol-%) und Fe-Gehalte (bis 1,68 Mol-%)

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zement 3

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 20 – 100 µm

Kristallgestalt: sub- bis euhedral

Kristallgefüge: porenformerhaltend bis porenfüllend,

- auf Detritus und Zement 1/2

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: nicht selten

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalte:

Messungen [Stück]:	15
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,63 – 99,83
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,16 – 0,57
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,69
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,16
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

16 AUFSCHLUSS BEI BORNHAUSEN (ANHANG III: NR. 68)

Horizont a.

Zement 1

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 40 - 60 µm im Feinsand,

- 15 – 20 µm in Partien der Zementationskörper, die in Schlufflagen hinein reichen

Kristallgestalt: sub- bis anhedral

Kristallgefüge: oft porenfüllend (Mosaikzement),

- selten Meniskus-, Gravitations-, Dachzement

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen, flache Zapfen

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Niedrig-Mg-Kalzit

Elementgehalt:

Messungen [Stück]:	30
CaCO ₃ [Mol-%]:	97,92 – 99,79
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,11 – 1,48
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,44
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,11 (1,19)
Sr [ppm]:	n.n. - 800

Sonstiges: einschlussarm (klare Kristalle),

- stärkere Verunreinigungen in den Kristallen zeichnen gelegentlich Meniskus-, Dach- und Gravitationszement nach,
- bei einer der 30 Messungen wurde ein extrem hoher Mn-Gehalt (1,19 Mol-%) festgestellt. Da es sich dabei nur um einen Wert handelt, der zudem noch im Vergleich zu den Übrigen ungewöhnlich hoch ist, ist wahrscheinlich, dass hier eine Mn-Hydroxid-Phase randlich mitgemessen wurde oder dass es sich um einen Messfehler handelt

Bildungsmilieu: meteorisch-vados, meteorisch-phreatisch

Zement 2

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: diskusförmige Konkretionen, flache Zapfen

Vorkommen: selten

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Horizont b.

Zement 1

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 15 – 40 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: oft porenfüllend (Mosaikzement), sonst um Detritus unvollständige Säume ohne bevorzugte Position

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussführend, in wolkigen Arealen vereinzelt auch einschlussreich

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zement 2

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: kugelige Konkretionen

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Horizont c.

Zement 1

Kristalltyp: Blockkalzit

Kristallgröße: 20 – 80 µm

Kristallgestalt: subhedral

Kristallgefüge: keine bevorzugte Wachstumsposition, selten porenfüllend

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: dominierend

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Zement 2

Kristalltyp: syntaxiale Anwachsäume

Kristallgefüge: umschließen detritische Echinodermereste vollständig

Zementationstyp: Massenzementation

Vorkommen: selten

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-phreatisch

Horizont d.

Zementationstyp: flache Zapfen, diskusförmige Konkretionen

Zementgeneration 1a**Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 10 – 50 µm**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallgefüge:** keine bevorzugte Wachstumsposition, teilweise porenfüllend**Vorkommen:** dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm bis (selten) einschlussführend**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch**Zementgeneration 1b****Kristalltyp:** syntaxiale Anwachssäume**Kristallgefüge:** umschließen detritische Echinodermenreste vollständig**Vorkommen:** selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch**Zementationstyp:** Massenzementation**Zement generation 1****Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 15 – 20 µm**Kristallgestalt:** subhedral**Kristallgefüge:** um detritischen Kalk, meist unvollständige Säume ohne bevorzugte Wachstumsposition**Vorkommen:** selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussführend**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch**Zementgeneration 2****Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 40 bis 250 µm**Kristallgestalt:** sub- bis euhedral**Kristallgefüge:** häufig drusiger Mosaikzement**Zementationstyp:** Massenzementation**Vorkommen:** dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm**Bildungsmilieu:** meteorisch-phreatisch**Pseudomatrix****Kristalltyp:** Mikrit/Mikrospatit**Vorkommen:** kleinere, isolierte Ansammlungen in Eintiefungen auf größeren Geröllen,

- wolkige Ansammlungen, z.T. ist die ursprüngliche Kornform noch erkennbar

Kathodolumineszenz: schwach rötlich bis kräftig orange lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussreich (braune Eigenfarbe),

- im Mikrit/Mikrospatit „schwimmen“ nicht selten marine Mikrofossilien (meist Foraminiferen)

**17 AUFSCHLUSS BEI ÖDISHAUSEN
(ANHANG III: NR. 69)****Sediment: ungeschichteter Kies**

Die Zementationsqualität ist sehr heterogen. Unterschiede treten nicht zwischen Zapfen und Massenzementationskörpern, sondern in willkürlich positionierten Partien auf

Zement 1**Kristalltyp:** Mikrospatit**Kristallgröße:** 5 – 10 µm**Kristallgestalt:** anhedral**Kristallgefüge:** fleckenhafte bis vollständige Zementsäume,

- Gravitations-, Meniskus-, Dachzement

Zementationstyp: hängende Zapfen, Massenzementation**Vorkommen:** in mm-durchmessenden, fleckenhaften Bereichen vorkommend, hier dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Niedrig-Mg-Kalzit**Elementgehalte:**

Messungen [Stück]:	6
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,76 – 99,23
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,77 – 1,21
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,18
Mn [Mol-%]:	n.n.
Sr [ppm]:	n.n. – 500

Sonstiges: einschlussreich (braune Kristalle),

- diffuser Übergang zu durch Zement 2 zementierten Bereichen

Bildungsmilieu: meteorisch-vados, -pseudophreatisch**Zement 2****Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 30 – 100 µm**Kristallgestalt:** anhedral**Kristallgefüge:** fleckenhafte Zementsäume,

- Gravitations-, Meniskus-, Dachzement

Zementationstyp: hängende Zapfen, Massenzementation**Vorkommen:** in mm-durchmessenden, fleckenhaften Bereichen vorkommend, hier dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussführend,

- diffuser Übergang zu durch Zement 1 zementierten Bereichen

Bildungsmilieu: meteorisch-vados, -pseudophreatisch

Zement 3**Zementtyp:** Isopachenzement**Kristallgestalt:** sub- bis euhedral**Kristallform:** blattförmig**Kristallbreite:** 5 – 20 µm, **-länge:** 10 – 50 µm**Zementationstyp:** hängende Zapfen, Massenzementation**Vorkommen:** selten**Kristallgefüge:** auf Detritus**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm (klare Kristalle)**Bildungsmilieu:** meteorisch-pseudo-phreatisch**Zement 4****Zementtyp:** Isopachenzement**Kristallgestalt:** sub- bis euhedral**Kristallform:** blattförmig**Kristallbreite:** 10 – 120 µm, **-länge:** 20 – 500 µm**Zementationstyp:** hängende Zapfen, Massenzementation**Vorkommen:** nur im tieferen Teil der Zapfen, selten**Kristallgefüge:** auf Detritus oder Zement 3**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm (klare Kristalle)**Bildungsmilieu:** meteorisch-pseudo-phreatisch**Zement 5****Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 30 - 80 µm, 70 – 140 µm, 80 – 180 µm, 80 – 240 (vereinzelt max. 500) µm**Kristallgestalt:** sub- bis euhedral**Kristallgefüge:** porenfüllend, z.T. drusiger Mosaikzement,

- selten vollständige, gleichmäßige Zementsäume

Zementationstyp: hängende Zapfen, Massenzementation**Vorkommen:** porenfüllend in den durch Zement 1/2 zementierten Arealen,

- porenfüllend auf Zement 3,
- selten auf Zement 4,
- in Bereichen ohne anderen Zement

Kathodolumineszenz: nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Elementgehalte:**

Messungen [Stück]:	34
CaCO ₃ [Mol-%]:	98,24 – 99,56
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,43 – 1,69
Fe [Mol-%]:	n.n. – 0,13
Mn [Mol-%]:	n.n. – 0,08
Sr [ppm]:	n.n. – 600

Sonstiges: einschlussarm (klare Kristalle),

- vereinzelt zeichnet stärkere Verunreinigung der Kristalle Menisken nach

Bildungsmilieu: meteorisch-vados, -pseudo-phreatisch**Zement 6****Kristalltyp:** syntaxiale Anwachs säume**Kristallgefüge:** umschließen detritische Echinodermereste vollständig**Zementationstyp:** hängende Zapfen, Massenzementation**Vorkommen:** selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Niedrig-Mg-Kalzit**Elementgehalte:**

Messungen [Stück]:	2
CaCO ₃ [Mol-%]:	99,06 – 99,19
MgCO ₃ [Mol-%]:	0,80 – 0,89
Fe [Mol-%]:	n.n.
Mn [Mol-%]:	n.n.
Sr [ppm]:	n.n.

Sonstiges: einschlussarm,

- Mg-Konzentrationen sind etwas niedriger als bei überwachsenem Echinodermerest (1,24/1,25 Gew.-%)

Bildungsmilieu: meteorisch-pseudo-phreatisch**Sediment: Sand-Kies-Wechselfolge****Zement 1****Zementtyp:** Isopachenzement**Kristallgestalt:** euhedral**Kristallform:** blattförmig**Kristallbreite:** 40-200 µm, **-länge:** 100-1000 µm**Zementationstyp:** Massenzementation**Vorkommen:** selten**Kristallgefüge:** auf Detritus**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm (klare Kristalle)**Bildungsmilieu:** meteorisch-pseudo-phreatisch**Zement 2****Kristalltyp:** Blockkalzit**Kristallgröße:** 30 - 60 µm**Kristallgestalt:** sub- bis euhedral**Kristallgefüge:** vollständige, gleichmäßige Zementsäume bis porenfüllend (Mosaikzement)**Zementationstyp:** Massenzementation**Vorkommen:** dominierend**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend**Mineralbeschreibung:** Kalzit**Sonstiges:** einschlussarm (klare Kristalle)**Bildungsmilieu:** meteorisch-pseudo-phreatisch**Zement 3****Kristalltyp:** syntaxiale Anwachs säume**Kristallgefüge:** umschließen detritische Echinodermereste vollständig**Zementationstyp:** Massenzementation**Vorkommen:** selten**Kathodolumineszenz:** nicht lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussarm

Bildungsmilieu: meteorisch-pseudo-phreatisch

Pseudomatrix

Korngröße: meist $\leq 10 \mu\text{m}$, vereinzelt Mikro-fossilien (z.B. Foraminiferen, Calcisphären)

Vorkommen: kleinere, isolierte Ansammlungen in Eintiefungen auf größeren Geröllen,

- wolkige Ansammlungen, z.T. ist die ursprüngliche Kornform noch erkennbar,
- tritt sowohl zwischen Detritus und Kalzit-zement, zwischen verschiedenen Zementtypen als auch auf der jeweils letzten Zementgeneration auf

Substrat: ungeschichteter Kies, Kies-Sand-Wechselfolge

Kathodolumineszenz: schwach rötlich bis kräftig orange lumineszierend

Mineralbeschreibung: Kalzit

Sonstiges: einschlussreich (braune Eigenfarbe),

- Pseudomatrix entstand wahrscheinlich durch den Zerfall von „Plänerkalk“-Geröllen

Lfd. Nr.	Aufschluss	Zementationstyp	Zement	Mol-% CaCO ₃	Mol-% MgCO ₃	Mol-% FeCO ₃	Mol-% MnCO ₃	SrCO ₃ [ppm]
1	Betheln	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,61	1,37	---	---	---
2	Betheln	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,05	0,89	0,05	---	---
3	Betheln	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,18	0,81	---	---	---
4	Betheln	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,58	1,32	0,08	---	---
5	Betheln	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,93	1,02	---	---	---
6	Betheln	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,58	1,40	---	---	---
7	Betheln	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,44	1,53	---	0,03	---
8	Betheln	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,70	1,27	---	0,03	300
9	Betheln	Massenzementation	Isopachenzement	99,38	0,52	0,08	---	---
10	Betheln	Massenzementation	Isopachenzement	98,47	1,42	0,06	---	---
11	Betheln	Massenzementation	Isopachenzement	99,39	0,57	0,04	---	---
12	Betheln	Massenzementation	Isopachenzement	99,53	0,43	---	---	---
13	Betheln	Massenzementation	Isopachenzement	99,27	0,63	---	0,05	---
14	Betheln	Massenzementation	Isopachenzement	98,85	1,00	0,15	---	---
15	Betheln	Massenzementation	Isopachenzement	98,80	1,06	0,07	0,04	---
16	Betheln	Massenzementation	Isopachenzement	98,59	1,38	---	0,03	---
17	Betheln	Massenzementation	Isopachenzement	99,11	0,84	---	---	---
18	Betheln	Massenzementation	Mikrit	97,94	1,44	0,59	0,03	---
19	Betheln	Massenzementation	Mikrit	98,33	0,95	0,62	0,08	---
20	Betheln	Massenzementation	Mikrit	98,34	1,36	0,28	---	400
21	Betheln	Massenzementation	Mikrit	98,86	0,96	0,15	0,03	---
22	Betheln	Massenzementation	Mikrit	97,81	1,41	0,70	0,08	---
23	Betheln	Massenzementation	Mikrit	99,10	0,78	0,08	---	---
24	Betheln	Massenzementation	Mikrit	98,42	1,32	0,25	---	---
25	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,79	0,13	0,05	0,04	---
26	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,24	0,57	0,06	0,06	800
27	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,39	0,53	---	0,08	---
28	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,57	0,36	---	0,04	---
29	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,76	0,18	0,06	---	---
30	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,63	0,32	0,05	---	---
31	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,15	0,72	0,10	---	---
32	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,44	0,45	---	0,11	---
33	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,90	0,79	0,29	---	---
34	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,74	0,17	0,08	---	---
35	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,46	0,38	0,12	---	400
36	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,14	0,64	0,15	0,04	300
37	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,77	0,11	0,04	0,08	---
38	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,27	0,71	---	---	---
39	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,33	0,59	---	0,07	---
40	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,26	0,47	0,05	1,19	300
41	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,51	0,44	---	---	500
42	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,24	0,63	0,05	---	800
43	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,14	0,64	0,15	---	500
44	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,40	0,53	0,06	---	---
45	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,37	0,55	0,04	---	400
46	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,38	0,60	---	---	---
47	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	97,92	1,48	0,44	0,11	500
48	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,71	0,91	0,32	0,06	---
49	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,49	0,45	0,06	---	---
50	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,36	0,52	0,07	0,04	---
51	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,21	0,71	0,04	---	300
52	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,22	0,58	0,18	---	---
53	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,38	0,57	---	0,04	---
54	Bornhausen	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,08	0,60	0,23	0,03	500

Lfd. Nr.	Aufschluss	Zementationstyp	Zement	Mol-% CaCO ₃	Mol-% MgCO ₃	Mol-% FeCO ₃	Mol-% MnCO ₃	SrCO ₃ [ppm]
55	Breetze	Massenzementation	Isopachenzement	99,27	0,71	---	---	---
56	Breetze	Massenzementation	Isopachenzement	98,29	1,57	0,13	---	---
57	Breetze	Massenzementation	Isopachenzement	97,80	1,67	0,53	---	---
58	Breetze	Massenzementation	Isopachenzement	97,27	1,76	0,96	---	---
59	Breetze	Massenzementation	Isopachenzement	98,56	1,28	0,08	0,07	---
60	Breetze	Zapfen	Isopachenzement	99,38	0,57	---	0,03	---
61	Breetze	Zapfen	Isopachenzement	99,53	0,41	0,05	---	---
62	Breetze	Zapfen	Isopachenzement	99,33	0,57	0,08	---	---
63	Breetze	Zapfen	Isopachenzement	99,18	0,70	0,10	---	---
64	Breetze	Zapfen	Isopachenzement	99,64	0,33	0,03	---	---
65	Breetze	Zapfen	Isopachenzement	99,51	0,48	---	---	---
66	Breetze	Zapfen	Isopachenzement	99,42	0,49	---	0,03	---
67	Breetze	Zapfen	Isopachenzement	99,68	0,32	---	---	300
68	Breetze	Zapfen	Isopachenzement	99,38	0,62	---	---	---
69	Breetze	Zapfen	Isopachenzement	99,59	0,37	---	---	---
70	Breetze	Zapfen	Isopachenzement	99,34	0,62	0,04	---	---
71	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,72	1,20	---	0,06	---
72	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,09	0,86	0,05	---	400
73	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,21	0,72	0,03	---	---
74	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,51	1,44	---	0,05	---
75	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,83	1,14	---	0,03	---
76	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,42	1,52	0,03	0,03	---
77	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,10	0,83	---	0,07	---
78	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,71	1,20	---	0,06	---
79	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,97	0,97	---	0,06	---
80	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,01	0,95	0,03	---	---
81	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,08	0,87	0,04	---	600
82	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,74	1,22	0,04	---	---
83	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,58	1,35	0,04	---	500
84	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,55	1,40	---	0,04	---
85	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,86	1,13	---	---	300
86	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,66	1,20	0,12	---	---
87	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,71	1,23	0,06	---	---
88	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,47	1,48	---	---	---
89	Breetze	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,42	1,50	0,07	---	---
90	Breetze	Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,34	0,39	0,20	---	900
91	Breetze	Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,37	0,54	0,06	0,03	---
92	Breetze	Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,63	0,36	---	---	500
93	Breetze	Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,40	0,53	0,03	---	---
94	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,64	0,26	---	0,08	---
95	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,44	0,53	---	---	---
96	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,51	0,35	---	0,06	---
97	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,48	0,45	0,07	---	---
98	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,51	0,44	---	---	---
99	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,46	0,47	0,04	0,03	---
100	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,43	0,48	---	0,06	---
101	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,54	0,45	---	---	600
102	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,61	0,39	---	---	---
103	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,60	0,37	---	---	---
104	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,49	0,47	0,03	---	300
105	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,53	0,33	0,05	---	600
106	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,54	0,40	0,04	---	---
107	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,46	0,49	---	---	400
108	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,54	0,39	---	0,05	---
109	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,43	0,47	0,06	0,04	---

Lfd. Nr.	Aufschluss	Zementationstyp	Zement	Mol-% CaCO ₃	Mol-% MgCO ₃	Mol-% FeCO ₃	Mol-% MnCO ₃	SrCO ₃ [ppm]
110	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,33	0,61	---	---	---
111	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,26	0,69	---	0,04	---
112	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,47	0,48	0,05	---	---
113	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,31	0,56	0,07	---	600
114	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,50	0,35	---	0,08	600
115	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,51	0,45	---	---	400
116	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,81	0,15	---	0,03	---
117	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,37	0,55	---	---	700
118	Breetze	Konkretion	poikilotopischer Zement	99,44	0,48	---	0,08	---
119	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,41	0,53	---	---	400
120	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,32	0,66	---	---	---
121	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,40	0,57	---	---	---
122	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,27	0,62	0,04	---	---
123	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,29	0,60	---	0,03	---
124	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,43	0,56	---	---	---
125	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,25	0,63	0,08	0,04	---
126	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	98,62	1,31	0,05	---	600
127	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,01	0,94	---	0,03	400
128	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,22	0,74	---	0,03	---
129	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,24	0,70	---	0,03	500
130	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,37	0,55	0,05	---	---
131	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,32	0,62	0,04	0,03	---
132	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,11	0,76	0,03	0,08	---
133	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,42	0,55	---	---	---
134	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,35	0,58	---	0,03	---
135	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,26	0,73	---	---	500
136	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,08	0,90	---	---	---
137	Burgstemmen	Massenzementation	Blockkalzit	99,25	0,63	---	0,05	---
138	Burgstemmen	Massenzementation	Echinodermenfragment	99,47	0,44	0,04	---	---
139	Burgstemmen	Massenzementation	Mikrit / Mikrosparit	99,06	0,65	0,26	---	---
140	Burgstemmen	Massenzementation	Mikrit / Mikrosparit	98,68	1,01	0,31	---	---
141	Burgstemmen	Massenzementation	Mikrit / Mikrosparit	98,70	0,61	0,68	---	300
142	Burgstemmen	Massenzementation	Mikrit / Mikrosparit	98,07	0,62	1,30	---	---
143	Burgstemmen	Massenzementation	Mikrit / Mikrosparit	98,74	1,03	0,23	---	---
144	Burgstemmen	Massenzementation	Mikrit / Mikrosparit	96,32	0,72	2,96	---	---
145	Burgstemmen	Massenzementation	Mikrit / Mikrosparit	99,28	0,62	0,05	0,05	---
146	Burgstemmen	Massenzementation	syntaxialer Zement (auf 138)	99,07	0,85	0,07	---	---
147	Burgstemmen	Massenzementation	syntaxialer Zement (auf 138)	99,39	0,52	0,03	---	300
148	Burgstemmen	Massenzementation	syntaxialer Zement (auf 138)	99,38	0,62	---	---	300
149	Burgstemmen	Massenzementation	syntaxialer Zement (auf 138)	99,04	0,88	0,07	---	300
150	Burgstemmen	Massenzementation	syntaxialer Zement (auf 138)	99,14	0,77	0,03	0,06	---
151	Burgstemmen	Massenzementation	syntaxialer Zement (auf 138)	99,55	0,41	0,03	---	---
152	Burgstemmen	Massenzementation	syntaxialer Zement (auf 138)	99,45	0,54	---	---	500
153	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Gravitationszem.)	99,70	0,13	0,12	0,05	800
154	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Meniskuszement)	99,79	0,10	---	---	300
155	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Meniskuszement)	99,93	---	0,03	---	---
156	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Meniskuszement)	99,85	0,08	---	0,06	---
157	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Meniskuszement)	99,78	0,10	0,03	0,09	500
158	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Meniskuszement)	99,86	0,04	---	---	500
159	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Meniskuszement)	99,88	0,06	---	---	300
160	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Meniskuszement)	99,86	0,06	---	0,04	---
161	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Meniskuszement)	99,96	---	---	---	---
162	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Meniskuszement)	99,77	0,09	0,13	---	---
163	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Meniskuszement)	99,66	0,13	0,16	0,04	700
164	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,83	0,08	0,05	---	500

Lfd. Nr.	Aufschluss	Zementationstyp	Zement	Mol-% CaCO ₃	Mol-% MgCO ₃	Mol-% FeCO ₃	Mol-% MnCO ₃	SrCO ₃ [ppm]
165	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,85	0,09	0,05	---	---
166	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,83	0,06	0,09	---	500
167	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,93	0,06	---	---	300
168	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,83	0,08	0,06	---	---
169	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,71	0,06	0,05	0,17	---
170	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,85	0,10	0,05	---	---
171	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,84	0,04	---	0,07	300
172	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,34	0,21	0,40	0,04	---
173	Coppenbrügge	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,68	0,32	---	---	---
174	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,76	0,22	---	---	500
175	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,76	0,23	---	---	---
176	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,76	0,13	0,11	---	---
177	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,70	0,23	0,06	---	---
178	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,58	0,41	---	---	---
179	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,41	0,55	0,03	---	---
180	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,53	0,39	---	0,05	---
181	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,55	0,40	0,05	---	400
182	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,65	0,34	---	---	---
183	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,49	0,35	0,09	0,07	---
184	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,66	0,30	0,03	---	---
185	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,52	0,47	---	---	---
186	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,57	0,41	---	---	400
187	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,25	0,68	0,03	---	400
188	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,41	0,53	---	0,06	---
189	Coppenbrügge	Massenzementation	Isopachenzement	99,63	0,33	---	---	---
190	Coppenbrügge	Massenzementation	Echinodermerest	99,70	0,07	0,03	0,13	---
191	Coppenbrügge	Massenzementation	Echinodermerest	99,72	0,18	---	0,05	---
192	Coppenbrügge	Massenzementation	Mikritzement	98,48	1,16	0,34	0,03	---
193	Coppenbrügge	Massenzementation	Mikrit	97,07	1,19	1,72	---	---
194	Coppenbrügge	Massenzementation	Mikrit	98,71	0,78	0,37	0,09	---
195	Coppenbrügge	Massenzementation	Mikrit	99,71	0,23	---	0,05	300
196	Coppenbrügge	Massenzementation	Mikrit	99,52	0,44	0,04	---	---
197	Coppenbrügge	Massenzementation	Mikrit	99,57	0,26	0,12	---	---
198	Coppenbrügge	Massenzementation	Mikrit	99,41	0,44	0,08	0,03	---
199	Coppenbrügge	Massenzementation	syntaxialer Zem. (auf 190/191)	99,81	0,12	0,07	---	---
200	Coppenbrügge	Massenzementation	syntaxialer Zem. (auf 190/191)	99,82	0,10	0,08	---	300
201	Coppenbrügge	Massenzementation	syntaxialer Zem. (auf 190/191)	99,63	0,22	0,09	0,05	---
202	Coppenbrügge	Massenzementation	syntaxialer Zem. (auf 190/191)	99,90	0,05	---	---	---
203	Daerstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,41	0,41	0,13	0,05	---
204	Daerstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,26	0,70	0,04	---	---
205	Daerstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,27	0,61	0,03	0,03	600
206	Daerstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,61	0,36	0,03	---	---
207	Daerstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,37	0,60	---	---	---
208	Daerstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,47	0,47	0,04	0,03	---
209	Daerstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,10	0,87	---	---	---
210	Daerstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,09	0,83	---	0,04	300
211	Daerstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,58	0,36	0,06	---	---
212	Daerstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,22	0,78	---	---	---
213	Daerstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,18	0,79	0,03	---	---
214	Daerstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,49	0,45	---	---	600
215	Daerstorf	kugelige Konkretion	Blockkalzit	99,87	0,10	0,03	---	---
216	Daerstorf	kugelige Konkretion	Blockkalzit	99,85	0,08	---	---	---
217	Daerstorf	kugelige Konkretion	Blockkalzit	99,83	0,17	---	---	---
218	Daerstorf	kugelige Konkretion	Blockkalzit	99,90	0,05	---	---	500
219	Daerstorf	kugelige Konkretion	Blockkalzit	99,82	0,09	---	---	500

Lfd. Nr.	Aufschluss	Zementationstyp	Zement	Mol-% CaCO ₃	Mol-% MgCO ₃	Mol-% FeCO ₃	Mol-% MnCO ₃	SrCO ₃ [ppm]
220	Daerstorf	kugelige Konkretion	Blockkalzit	99,81	0,14	0,03	---	400
221	Daerstorf	kugelige Konkretion	Blockkalzit	99,88	0,10	---	---	300
222	Daerstorf	kugelige Konkretion	Blockkalzit	99,90	0,08	---	---	---
223	Daerstorf	kugelige Konkretion	Blockkalzit	99,81	0,13	---	---	---
224	Daerstorf	kugelige Konkretion	Blockkalzit	99,89	0,09	---	---	---
225	Daerstorf	kugelige Konkretion	Blockkalzit	99,83	0,17	---	---	300
226	Daerstorf	kugelige Konkretion	poikilotopischer Zement	99,94	---	0,03	---	---
227	Daerstorf	kugelige Konkretion	poikilotopischer Zement	99,86	0,11	---	---	---
228	Daerstorf	kugelige Konkretion	poikilotopischer Zement	99,88	0,08	---	0,04	---
229	Daerstorf	kugelige Konkretion	poikilotopischer Zement	99,83	0,08	0,03	---	600
230	Daerstorf	kugelige Konkretion	poikilotopischer Zement	99,75	0,12	---	0,08	---
231	Daerstorf	kugelige Konkretion	poikilotopischer Zement	99,92	0,04	---	---	400
232	Daerstorf	kugelige Konkretion	poikilotopischer Zement	99,80	0,13	0,04	---	600
233	Daerstorf	kugelige Konkretion	poikilotopischer Zement	99,86	0,12	---	---	---
234	Daerstorf	kugelige Konkretion	poikilotopischer Zement	99,84	0,15	---	---	---
235	Daerstorf	kugelige Konkretion	poikilotopischer Zement	99,78	0,16	0,05	---	---
236	Daerstorf	kugelige Konkretion	poikilotopischer Zement	99,78	0,12	---	0,07	500
237	Daerstorf	kugelige Konkretion	poikilotopischer Zement	99,86	0,12	---	---	---
238	Daerstorf	kugelige Konkretion	poikilotopischer Zement	99,88	0,08	---	0,03	---
239	Eime	Massenzementation	blattförmiger Saumzement	99,57	0,37	0,05	---	---
240	Eime	Massenzementation	blattförmiger Saumzement	99,57	0,31	0,04	0,04	300
241	Eime	Massenzementation	blattförmiger Saumzement	99,40	0,57	---	0,03	---
242	Eime	Massenzementation	gr. Blockkalz. (Mosaikzem.)	99,33	0,61	0,06	---	---
243	Eime	Massenzementation	gr. Blockkalz. (Mosaikzem.)	99,42	0,58	---	---	300
244	Eime	Massenzementation	kl. Blockkalz. (Mosaikzem.)	99,56	0,43	---	---	---
245	Eime	Massenzementation	kl. Blockkalz. (Mosaikzem.)	99,58	0,39	---	---	300
246	Eime	Massenzementation	gr. Blockkalzit (Basis)	99,44	0,49	0,04	---	---
247	Eime	Massenzementation	gr. Blockkalzit (über Basis)	99,49	0,49	---	---	400
248	Eime	Massenzementation	gr. Blockkalzit (Spitze)	99,46	0,45	0,07	---	---
249	Eime	Massenzementation	gr. Blockkalzit (unter Spitze)	99,58	0,41	---	---	---
250	Eime	Massenzementation	großer Blockkalzit	99,72	0,24	---	---	---
251	Eime	Massenzementation	großer Blockkalzit	99,43	0,57	---	---	---
252	Eime	Massenzementation	großer Blockkalzit	99,24	0,75	---	---	---
253	Eime	Massenzementation	Karbonatdetritus (Basis d. Zementsaumes (254))	98,76	0,69	0,48	0,03	---
254	Eime	Massenzementation	kleiner Blockkalzit zwischen Detritus (253) und großem Blockkalzit (250-252)	99,45	0,50	0,04	---	300
255	Eime	Massenzementation	Mikritzement auf Quarz	99,43	0,45	0,07	0,05	---
256	Eime	Massenzementation	Mikritzement auf Quarz	94,60	3,34	2,06	---	---
257	Engelade	Massenzementation	Isopachenzement um Quarz	99,16	0,49	0,32	---	---
258	Engelade	Massenzementation	Isopachenzement um Quarz	99,51	0,34	0,12	---	300
259	Engelade	Massenzementation	Isopachenzement um Quarz	99,79	0,16	---	0,05	---
260	Engelade	Massenzementation	Isopachenzement um Quarz	99,46	0,44	0,06	0,04	300
261	Engelade	Massenzementation	Isopachenzement um Quarz	99,34	0,26	0,35	---	---
262	Engelade	Massenzementation	Isopachenzement um Quarz	99,56	0,24	0,14	0,06	---
263	Engelade	Massenzementation	Isopachenzement um Quarz	99,68	0,30	---	---	---
264	Engelade	Massenzementation	detritischer Mikrit	98,47	0,20	1,21	0,12	---
265	Engelade	Massenzementation	detritischer Mikrit	98,23	0,82	0,71	0,22	---
266	Engelade	Massenzementation	detritischer Mikrit	99,37	0,25	0,28	0,06	---
267	Engelade	Massenzementation	detritischer Mikrit	96,89	1,84	1,00	0,19	---
268	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	99,17	0,41	0,26	0,16	---
269	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	99,04	0,44	0,51	---	---
270	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	99,79	0,16	---	0,03	---
271	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	99,83	0,16	---	---	300

Lfd. Nr.	Aufschluss	Zementationstyp	Zement	Mol-% CaCO ₃	Mol-% MgCO ₃	Mol-% FeCO ₃	Mol-% MnCO ₃	SrCO ₃ [ppm]
272	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	99,54	0,33	0,07	0,06	300
273	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	99,64	0,32	---	0,03	---
274	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	99,65	0,27	0,04	---	---
275	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	99,62	0,29	0,09	---	500
276	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	99,67	0,29	---	---	---
277	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	99,65	0,31	0,03	---	---
278	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	99,71	0,22	0,05	---	---
279	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	99,71	0,19	---	0,10	300
280	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	99,73	0,22	0,05	---	300
281	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	99,66	0,21	---	0,10	---
282	Engelade	Massenzementation	Blockkalzit	98,63	0,57	0,69	0,08	---
283	Engelade	Massenzementation	Mikrosparitsaum um detritischen Mikrit (vgl. 264)	99,54	0,28	0,14	0,04	900
284	Engelade	Massenzementation	Mikrosparitsaum um detritischen Mikrit (vgl. 265)	99,70	0,21	0,04	---	---
285	Engelade	Massenzementation	Mikrosparitsaum um detritischen Mikrit (vgl. 266)	96,70	1,36	1,68	0,23	500
286	Engelade	Massenzementation	Mikrosparitsaum um detritischen Mikrit (vgl. 267)	99,48	0,29	0,13	0,10	---
287	Freden	Konkretion	Mikrosparit	99,60	---	0,36	---	---
288	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,67	1,28	---	0,04	---
289	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,50	1,43	---	---	300
290	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,20	0,77	---	---	---
291	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,93	1,00	0,04	0,03	---
292	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,43	0,54	---	---	---
293	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,15	0,35	0,27	0,21	600
294	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,16	0,83	---	---	---
295	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,19	0,75	---	0,06	---
296	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,22	0,72	---	---	---
297	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,25	0,74	---	---	---
298	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,12	0,82	---	0,04	---
299	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,16	0,77	---	0,05	400
300	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,74	1,18	0,04	---	400
301	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Saumzement)	98,96	0,80	0,13	0,09	---
302	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Saumzement)	99,04	0,74	0,21	---	---
303	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Saumzement)	99,07	0,86	0,03	---	---
304	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,48	0,48	---	---	300
305	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,46	0,46	---	---	500
306	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Saumzement)	99,56	0,33	---	0,04	---
307	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Saumzement)	99,62	0,34	0,03	---	---
308	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Saumzement)	99,47	0,49	---	---	---
309	Freden	Massenzementation	Blockkalzit (Saumzement)	99,65	0,31	---	---	---
310	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,75	0,19	---	---	---
311	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,14	0,37	0,42	---	700
312	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,58	0,24	0,16	---	400
313	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,61	0,35	---	---	---
314	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,74	0,17	---	---	400
315	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,77	0,15	---	---	---
316	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,70	0,29	---	---	1.000
317	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,80	0,13	---	---	700
318	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,85	0,09	---	---	1.200
319	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,40	0,50	0,04	---	600
320	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,77	0,20	0,03	---	300
321	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,62	0,34	---	---	500
322	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,62	0,28	---	0,05	1.700

Lfd. Nr.	Aufschluss	Zementationstyp	Zement	Mol-% CaCO ₃	Mol-% MgCO ₃	Mol-% FeCO ₃	Mol-% MnCO ₃	SrCO ₃ [ppm]
323	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,78	0,18	---	---	300
324	Freden	gebogener Zapfen	Mikrit / Mikrospart	98,56	1,26	0,10	---	---
325	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,51	0,45	---	---	600
326	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,58	0,38	---	---	800
327	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,54	0,21	0,23	---	---
328	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,77	0,18	---	---	700
329	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,75	0,17	0,04	---	500
330	Freden	gebogener Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,82	0,14	---	---	600
331	Freden	gerader Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,07	0,84	0,09	---	---
332	Freden	gerader Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,10	0,80	0,06	---	---
333	Freden	gerader Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,69	1,08	0,21	---	---
334	Freden	Massenzementation	Mikrospart	98,83	0,72	0,39	0,06	300
335	Freden	Massenzementation	Mikrospart	99,31	0,53	0,11	0,04	300
336	Freden	Massenzementation	Mikrospart	99,20	0,65	0,13	---	---
337	Freden	Massenzementation	Mikrospart	98,77	0,80	0,39	---	400
338	Freden	Massenzementation	Mikrospart	98,93	0,79	0,27	---	---
339	Freden	Massenzementation	Mikrospart	99,46	0,54	---	---	---
340	Freden	Massenzementation	Mikrospart	99,29	0,70	---	---	---
341	Freden	Massenzementation	Mikrospart	99,27	0,61	0,12	---	500
342	Freden	Massenzementation	Mikrospart	99,00	0,60	0,40	---	---
343	Freden	Massenzementation	Mikrospart	99,08	0,70	0,16	0,05	---
344	Freden	Massenzementation	Blockkalzit	99,40	0,56	0,03	---	400
345	Freden	Massenzementation	Blockkalzit	99,17	0,78	---	0,04	300
346	Freden	Massenzementation	Blockkalzit	99,26	0,67	---	0,07	---
347	Freden	Massenzementation	Blockkalzit	99,05	0,75	0,15	---	400
348	Freden	Massenzementation	Blockkalzit	99,11	0,84	0,04	---	---
349	Freden	Massenzementation	Blockkalzit	99,29	0,62	0,09	---	400
350	Freden	Massenzementation	Blockkalzit	99,18	0,61	0,12	0,04	---
351	Freden	Massenzementation	Blockkalzit	99,31	0,60	---	0,04	500
352	Freden	Konkretion	Blockkalzit	99,33	0,39	0,26	---	---
353	Freden	Konkretion	Blockkalzit	99,55	0,38	0,07	---	---
354	Freden	Konkretion	Blockkalzit	98,52	1,21	0,22	0,04	400
355	Freden	Konkretion	Blockkalzit	99,60	0,35	0,05	---	---
356	Freden	Konkretion	Blockkalzit	99,50	0,40	0,10	---	---
357	Freden	Konkretion	Blockkalzit	99,29	0,50	0,21	---	600
358	Freden	Konkretion	Blockkalzit	99,42	0,43	0,15	---	---
359	Freden	Konkretion	Blockkalzit	99,06	0,63	0,31	---	---
360	Freden	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,79	0,17	---	---	---
361	Freden	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,18	0,32	0,46	---	500
362	Freden	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,79	0,26	0,88	0,03	---
363	Freden	Konkretion	Mikrospart	99,12	0,23	0,16	0,40	300
364	Freden	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,90	0,07	---	---	---
365	Freden	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,89	0,43	0,21	0,39	---
366	Freden	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,35	0,39	0,05	0,09	---
367	Freden	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,85	---	0,06	0,03	---
368	Freden	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,01	0,25	0,67	---	400
369	Freden	Konkretion	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,44	0,19	0,19	---	400
370	Freden	hängender Zapfen	Blockkalzit (Meniskuszem.)	98,88	1,03	---	0,03	600
371	Freden	hängender Zapfen	Blockkalzit (Meniskuszem.)	98,92	0,90	0,07	0,08	300
372	Freden	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,73	1,11	0,11	---	300
373	Freden	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,41	1,54	0,05	---	300
374	Freden	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,14	0,79	---	---	500
375	Freden	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,18	0,79	---	---	300
376	Freden	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,11	0,87	---	---	---
377	Freden	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,88	1,03	0,04	---	500

Lfd. Nr.	Aufschluss	Zementationstyp	Zement	Mol-% CaCO ₃	Mol-% MgCO ₃	Mol-% FeCO ₃	Mol-% MnCO ₃	SrCO ₃ [ppm]
378	Freden	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,09	0,88	0,03	---	300
379	Freden	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,13	0,81	---	---	---
380	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,44	0,44	0,04	0,03	600
381	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,45	0,37	0,14	---	400
382	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,26	0,70	---	---	---
383	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,68	0,29	---	---	---
384	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,47	0,49	---	---	300
385	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,31	0,62	0,04	---	400
386	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,80	0,17	---	---	500
387	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,67	0,31	---	---	400
388	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,58	0,35	---	---	300
389	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,68	0,28	---	---	---
390	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,62	0,35	---	---	---
391	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,40	0,54	---	---	400
392	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,45	0,49	---	---	---
393	Freden	liegender Zapfen	Echinodermenrest	99,32	0,19	0,23	0,24	---
394	Freden	liegender Zapfen	Mikrosporit (Meniskuszement)	99,51	0,46	---	---	---
395	Freden	liegender Zapfen	Mikrosporit (Meniskuszement)	99,72	0,23	0,03	---	600
396	Freden	liegender Zapfen	Mikrosporit (Meniskuszement)	99,70	0,26	---	---	---
397	Freden	liegender Zapfen	syntaxialer Zement (auf 393)	99,52	0,29	0,16	---	---
398	Freden	liegender Zapfen	syntaxialer Zement (auf 393)	99,61	0,21	0,13	---	---
399	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,84	0,09	---	---	---
400	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,57	0,38	---	---	500
401	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,80	0,17	---	---	300
402	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,78	0,16	---	---	---
403	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,70	0,25	---	---	---
404	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,71	0,22	---	---	---
405	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,46	0,46	0,03	---	400
406	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,39	0,54	0,04	---	400
407	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,65	0,34	---	---	300
408	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,51	0,45	---	---	400
409	Freden	liegender Zapfen	Blockkalzit	99,63	0,36	---	---	400
410	Freden	liegender Zapfen	Mikrosporit (Meniskuszement)	99,31	0,37	0,26	---	---
411	Freden	liegender Zapfen	Mikrosporit	99,54	0,36	0,04	0,04	500
412	Hachmühlen	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,21	0,41	0,38	---	---
413	Hachmühlen	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	97,55	0,53	1,70	0,21	300
414	Hachmühlen	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,75	0,24	---	---	---
415	Hachmühlen	Massenzementation	Isopachenzement auf Quarz	99,62	0,31	0,05	---	400
416	Hachmühlen	Massenzementation	Isopachenzement auf Quarz	99,64	0,31	---	---	---
417	Hachmühlen	Massenzementation	Isopachenzement auf Quarz	99,68	0,19	0,11	---	---
418	Hachmühlen	Massenzementation	Isopachenzement auf Quarz	99,60	0,34	---	0,04	---
419	Hachmühlen	Massenzementation	Isopachenzement auf Quarz	99,72	0,24	0,03	---	---
420	Hachmühlen	Massenzementation	Isopachenzement auf Quarz	99,66	0,22	---	0,12	---
421	Hachmühlen	Massenzementation	Isopachenzement auf Quarz	99,73	0,13	0,06	0,06	---
422	Hachmühlen	Massenzementation	Mikrit (Meniskuszem.)	98,66	0,69	0,64	---	---
423	Hachmühlen	Massenzementation	Mikrit (Meniskuszem.)	98,29	0,73	0,93	---	---
424	Hachmühlen	Massenzementation	Mikritzement	99,23	0,43	0,28	0,05	---
425	Helpensen	diskusf. Konkretion	Mikrosporit (Gravitationszem.)	98,26	1,53	0,21	---	---
426	Helpensen	Massenzementation	Mikrosporit (Gravitationszem.)	96,95	1,52	1,49	---	---
427	Helpensen	Massenzementation	Mikrosporit (Gravitationszem.)	98,73	0,99	0,10	0,09	---
428	Helpensen	diskusf. Konkretion	Mikrosporit (Meniskuszement)	98,71	1,15	0,13	---	300
429	Helpensen	diskusf. Konkretion	Mikrosporit (Meniskuszement)	98,63	1,15	0,21	---	---
430	Helpensen	diskusf. Konkretion	Mikrosporit (Meniskuszement)	98,16	1,16	0,67	---	900
431	Helpensen	diskusf. Konkretion	Mikrosporit (Meniskuszement)	98,11	1,54	0,24	0,08	---
432	Helpensen	diskusf. Konkretion	Mikrosporit (Meniskuszement)	97,88	1,95	0,10	0,07	---

Lfd. Nr.	Aufschluss	Zementationstyp	Zement	Mol-% CaCO ₃	Mol-% MgCO ₃	Mol-% FeCO ₃	Mol-% MnCO ₃	SrCO ₃ [ppm]
433	Helpensen	diskusf. Konkretion	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,71	1,07	0,19	---	---
434	Helpensen	diskusf. Konkretion	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,08	1,54	0,29	0,04	500
435	Helpensen	diskusf. Konkretion	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,31	1,29	0,33	---	700
436	Helpensen	diskusf. Konkretion	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,69	1,01	0,23	0,03	400
437	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,58	1,34	---	---	---
438	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,60	1,21	0,18	---	900
439	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	99,08	0,87	---	0,03	500
440	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	99,59	0,15	0,22	---	---
441	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,86	1,11	0,03	---	---
442	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,54	1,06	0,36	0,03	---
443	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,54	1,45	---	---	---
444	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,55	1,28	0,10	---	---
445	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,23	1,50	0,27	---	---
446	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,80	1,13	---	0,07	700
447	Helpensen	Massenzem. über stratif. Zem.	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,70	1,23	0,05	---	---
448	Helpensen	Massenzem. über stratif. Zem.	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,61	1,33	0,03	---	---
449	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,69	1,24	0,04	0,04	300
450	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,07	1,76	0,11	---	300
451	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,78	1,17	---	---	---
452	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,37	1,62	---	---	300
453	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	98,87	1,02	---	---	---
454	Helpensen	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	99,26	0,72	---	---	---
455	Helpensen	diskusf. Konkretion	Mikrosparit (porenfüllend)	98,57	0,91	0,43	---	---
456	Helpensen	diskusf. Konkretion	Mikrosparit (porenfüllend)	98,55	1,25	0,17	0,03	500
457	Helpensen	stratifforme Zem.	Mikrosparit (porenfüllend)	98,25	1,69	0,03	---	---
458	Helpensen	stratifforme Zem.	Mikrosparit (porenfüllend)	98,57	1,26	0,14	---	---
459	Helpensen	stratifforme Zem.	Mikrosparit (porenfüllend)	97,94	2,02	---	---	500
460	Helpensen	Massenzementation	Isopachenzement	97,78	2,11	0,11	---	---
461	Helpensen	Massenzementation	Isopachenzement	97,25	2,05	0,65	---	---
462	Helpensen	Massenzementation	Isopachenzement	98,49	1,42	0,08	---	900
463	Helpensen	Massenzementation	Isopachenzement	97,99	1,53	0,47	---	---
464	Helpensen	Massenzementation	Isopachenzement	98,34	1,49	0,17	---	---
465	Helpensen	Massenzementation	Isopachenzement	98,68	1,21	0,06	0,04	---
466	Helpensen	Massenzementation	Isopachenzement	99,15	0,81	0,03	---	---
467	Hittfeld	Zementationkruste	Blockkalzit	98,64	0,83	0,52	---	---
468	Hittfeld	Zementationkruste	Blockkalzit	99,40	0,56	---	0,03	---
469	Hittfeld	Zementationkruste	Blockkalzit	98,55	1,39	0,03	0,03	---
470	Hittfeld	Zementationkruste	Blockkalzit	99,21	0,64	0,09	0,05	---
471	Hittfeld	Zementationkruste	Blockkalzit	98,65	1,35	---	---	---
472	Hittfeld	Zementationkruste	Blockkalzit	98,42	0,85	0,69	---	300
473	Hittfeld	Zementationkruste	Blockkalzit	99,42	0,57	---	---	---
474	Hittfeld	Zementationkruste	Blockkalzit	98,91	1,08	---	---	---
475	Hittfeld	Zementationkruste	Blockkalzit	98,97	1,02	---	---	---
476	Hittfeld	Zementationkruste	Blockkalzit	98,91	1,04	0,04	---	---
477	Hittfeld	Zementationkruste	Blockkalzit	98,36	1,48	0,13	0,03	---
478	Hittfeld	Zementationkruste	Blockkalzit	98,94	0,97	0,06	0,03	---
479	Holzen	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,91	1,01	---	0,06	---
480	Holzen	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,02	0,95	---	---	---
481	Holzen	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,13	0,84	---	---	---
482	Holzen	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,06	0,88	0,04	---	---
483	Holzen	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,13	0,81	---	0,06	---
484	Holzen	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,16	0,60	0,17	0,04	---
485	Holzen	hängender Zapfen	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,04	0,91	0,05	---	---

Lfd. Nr.	Aufschluss	Zementationstyp	Zement	Mol-% CaCO ₃	Mol-% MgCO ₃	Mol-% FeCO ₃	Mol-% MnCO ₃	SrCO ₃ [ppm]
486	Holzen	hängender Zapfen	Blockkalzit (Saumzement)	99,12	0,78	---	0,06	---
487	Holzen	hängender Zapfen	Mikrosporit	98,50	0,63	0,82	0,04	---
488	Holzen	hängender Zapfen	Mikrosporit	99,51	0,46	---	---	300
489	Holzen	hängender Zapfen	Mikrosporit auf Quarz	98,89	0,93	0,18	---	---
490	Holzen	hängender Zapfen	Mikrosporit auf Quarz	99,03	0,90	0,06	---	---
491	Holzen	hängender Zapfen	Mikrosporit auf Quarz	97,16	0,98	1,51	0,35	300
492	Holzen	hängender Zapfen	Mikrosporit auf Quarz	98,86	0,93	0,19	---	---
493	Holzen	hängender Zapfen	Mikrosporit auf Quarz	97,83	1,08	1,09	---	---
494	Holzen	hängender Zapfen	Isopachenzement auf Quarz	99,16	0,74	---	0,08	---
495	Holzen	hängender Zapfen	Isopachenzement auf Quarz	99,26	0,63	---	0,07	700
496	Holzen	hängender Zapfen	Isopachenzement auf Quarz	99,21	0,78	---	---	---
497	Holzen	hängender Zapfen	syntaxialer Anwachssaum	99,03	0,94	---	---	---
498	Holzen	hängender Zapfen	syntaxialer Anwachssaum	99,50	0,47	---	---	---
500	Krankenhagen	Massenzementation	Isopachenzement (auf Qz, der in Mikrit schwimmt)	99,37	0,49	0,11	---	---
501	Krankenhagen	Massenzementation	Isopachenzement (s. Mess. 500.)	99,58	0,38	0,04	---	---
502	Krankenhagen	Massenzementation	Isopachenzement (s. Mess. 500.)	99,53	0,35	0,05	---	---
503	Krankenhagen	Massenzementation	Isopachenzement (s. Mess. 500.)	99,53	0,33	0,11	---	---
504	Krankenhagen	Massenzementation	Isopachenzement (s. Mess. 500.)	99,64	0,28	---	0,08	---
505	Krankenhagen	Massenzementation	Blockkalzit	99,54	0,41	---	0,05	---
506	Krankenhagen	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,37	0,45	0,15	---	---
507	Krankenhagen	Massenzementation	Echinodermerrest	93,71	2,57	3,48	0,23	---
508	Krankenhagen	Massenzementation	Echinodermerrest	94,10	2,53	3,09	0,26	---
509	Krankenhagen	Massenzementation	mikritischer Saum auf Quarz	98,87	0,61	0,48	0,04	---
510	Krankenhagen	Massenzementation	mikritischer Saum auf Quarz	99,01	0,47	0,51	---	500
511	Krankenhagen	Massenzementation	mikritischer Saum auf Quarz	99,48	0,46	0,05	---	300
512	Krankenhagen	Massenzementation	mikritischer Saum auf Quarz	99,12	0,56	0,30	---	---
513	Krankenhagen	Massenzementation	Mikrit	98,78	0,81	0,33	0,08	---
514	Krankenhagen	Massenzementation	Mikrit	98,29	0,77	0,89	0,05	---
515	Krankenhagen	Massenzementation	Mikrit	99,53	0,42	0,04	---	---
516	Krankenhagen	Massenzementation	Mikrit	98,67	0,60	0,70	---	---
517	Krankenhagen	Massenzementation	syntaxialer Zem. (um 507/508)	99,50	0,39	0,10	---	---
518	Krankenhagen	Massenzementation	syntaxialer Zem. (um 507/508)	99,44	0,39	0,09	0,08	---
519	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,70	1,21	0,08	---	---
520	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	99,01	0,96	0,03	---	---
521	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,72	1,23	---	0,03	---
522	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,89	1,09	---	---	---
523	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,40	1,52	0,08	---	---
524	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,83	1,07	0,07	---	---
525	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,99	1,00	---	---	---
526	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,94	1,02	0,03	---	---
527	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,64	1,34	---	---	500
528	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,66	1,15	0,11	0,06	300
529	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,24	1,69	---	---	---
530	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	99,37	0,59	0,04	---	---
531	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,91	1,04	---	0,03	---
532	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,87	0,99	0,13	---	300
533	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	99,56	0,43	---	---	600
534	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,89	1,11	---	---	---
535	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,53	1,37	0,03	0,07	---
536	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	99,02	0,96	---	---	---
537	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,92	1,06	---	---	---
538	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,73	1,14	---	0,08	---
539	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,85	1,02	0,07	---	---
540	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,43	1,53	---	---	---

Lfd. Nr.	Aufschluss	Zementationstyp	Zement	Mol-% CaCO ₃	Mol-% MgCO ₃	Mol-% FeCO ₃	Mol-% MnCO ₃	SrCO ₃ [ppm]
541	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,92	0,95	0,12	---	---
542	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,77	1,11	0,12	---	---
543	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	99,11	0,86	---	---	400
544	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,75	1,18	---	---	600
545	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	98,90	1,09	---	---	400
546	Ödishausen	Massenzementation	Blockkalzit	99,34	0,65	---	---	---
547	Ödishausen	Massenzementation	detritischer Echinodermenrest	98,74	1,24	---	---	---
548	Ödishausen	Massenzementation	detritischer Echinodermenrest	98,67	1,25	---	---	400
549	Ödishausen	Massenzementation	drusiger Blockkalzit	99,02	0,87	0,09	---	---
550	Ödishausen	Massenzementation	drusiger Blockkalzit	98,46	1,54	---	---	---
551	Ödishausen	Massenzementation	drusiger Blockkalzit	98,69	1,23	---	0,03	500
552	Ödishausen	Massenzementation	drusiger Blockkalzit	98,80	1,12	0,08	---	---
553	Ödishausen	Massenzementation	drusiger Blockkalzit	98,63	1,26	0,09	---	---
554	Ödishausen	Massenzementation	drusiger Blockkalzit	98,66	1,23	0,07	---	---
555	Ödishausen	Massenzementation	Mikrosporit	98,86	0,94	0,18	---	---
556	Ödishausen	Massenzementation	Mikrosporit	98,76	1,21	---	---	300
557	Ödishausen	Massenzementation	Mikrosporit auf Quarz	98,80	1,13	0,06	---	---
558	Ödishausen	Massenzementation	Mikrosporit auf Quarz	99,07	0,85	0,08	---	---
559	Ödishausen	Massenzementation	Mikrosporit auf Quarz	99,23	0,77	---	---	---
560	Ödishausen	Massenzementation	Mikrosporit auf Quarz	99,00	0,89	0,06	---	800
561	Ödishausen	Massenzementation	syntaxialer Zem. (um 547/548)	99,06	0,89	---	0,03	---
562	Ödishausen	Massenzementation	syntaxialer Zem. (um 547/548)	99,19	0,80	---	---	---
563	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,16	0,50	0,23	0,05	600
564	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,08	0,70	0,18	0,05	---
565	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,14	0,80	0,03	---	600
566	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,40	0,54	0,03	0,03	---
567	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,14	0,80	0,06	---	---
568	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,24	0,71	0,05	---	---
569	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,19	0,76	0,04	---	---
570	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,40	0,57	0,03	---	---
571	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,43	0,56	---	---	---
572	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,18	0,80	---	---	---
573	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,32	0,66	---	---	---
574	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,38	0,57	---	---	---
575	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,08	0,87	0,05	---	---
576	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,26	0,71	---	---	---
577	Rumbeck	Massenzementation	Isopachenzement	99,44	0,53	---	---	---
578	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,65	1,24	0,06	0,04	---
579	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,78	1,11	0,10	---	---
580	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,55	1,36	0,06	---	---
581	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,19	0,72	0,04	0,05	---
582	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,22	0,77	---	---	---
583	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,48	0,52	---	---	---
584	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,38	0,60	---	---	1.200
585	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,98	0,89	---	---	400
586	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,63	1,33	---	---	---
587	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,35	0,60	0,03	---	---
588	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,24	0,72	---	---	---
589	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,13	0,84	---	---	---
590	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,44	0,55	---	---	---
591	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,11	0,78	0,05	0,06	---
592	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,08	0,90	---	---	300
593	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,70	1,26	---	---	500
594	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,42	1,53	---	---	---
595	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,93	1,06	---	---	---

Lfd. Nr.	Aufschluss	Zementationstyp	Zement	Mol-% CaCO ₃	Mol-% MgCO ₃	Mol-% FeCO ₃	Mol-% MnCO ₃	SrCO ₃ [ppm]
596	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,04	0,84	0,10	---	---
597	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,99	0,88	---	0,13	500
598	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,60	1,31	0,06	0,03	---
599	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,77	1,14	---	0,03	---
600	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,13	0,86	---	---	300
601	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,20	0,78	---	---	---
602	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,37	0,62	---	---	600
603	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,92	1,07	---	---	---
604	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,30	0,69	---	---	---
605	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,33	0,58	---	0,08	---
606	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,14	0,84	---	---	---
607	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,11	0,84	---	---	---
608	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,44	0,50	---	---	---
609	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,62	0,34	---	---	---
610	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,44	0,56	---	---	500
611	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,08	0,87	0,04	---	300
612	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,10	0,78	0,09	---	400
613	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,21	0,78	---	---	---
614	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,34	0,65	---	---	---
615	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	98,97	0,95	0,07	---	300
616	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,49	0,44	---	0,04	---
617	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,15	0,73	---	0,12	---
618	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,39	0,54	---	---	---
619	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,43	0,54	---	---	300
620	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,25	0,67	0,06	---	---
621	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,12	0,83	---	0,05	700
622	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,15	0,61	0,22	---	---
623	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,09	0,86	---	---	300
624	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,17	0,61	0,07	0,10	---
625	Rumbeck	Massenzementation	Blockkalzit (Mosaikzement)	99,19	0,81	---	---	---
626	Rumbeck	Massenzementation	Detritus (Mikrosparit)	98,32	1,14	0,47	---	---
627	Rumbeck	Massenzementation	Mikritzement (auf 626)	99,46	0,46	0,06	---	500
628	Rumbeck	Massenzementation	Mikritzement	98,10	1,38	0,52	---	---
629	Volkstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,30	0,59	0,10	---	---
630	Volkstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,09	0,80	---	0,10	---
631	Volkstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,15	0,65	0,19	---	---
632	Volkstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,01	0,84	0,14	---	---
633	Volkstorf	Massenzementation	Blockkalzit	99,16	0,63	0,21	---	---
634	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Meniskuszement)	99,44	0,46	0,04	0,05	300
635	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Saumzement)	99,35	0,60	---	---	---
636	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Saumzement)	99,39	0,51	---	0,07	300
637	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Saumzement)	99,53	0,46	---	---	---
638	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Saumzement)	99,47	0,46	0,07	---	---
639	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Saumzement)	99,44	0,48	---	0,04	---
640	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Saumzement)	99,40	0,43	0,06	0,07	---
641	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Saumzement)	99,93	---	0,05	---	---
642	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Saumzement)	99,29	0,70	---	---	---
643	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Saumzement)	99,34	0,49	0,17	---	---
644	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Saumzement)	99,15	0,66	0,19	---	300
645	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Saumzement)	99,12	0,74	0,11	---	---
646	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Saumzement)	99,30	0,67	---	---	---
647	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Saumzement)	99,24	0,69	0,06	---	---
648	Volkstorf	Massenzementation	Mikrosparit (Saumzement)	99,56	0,42	---	---	---