

## Quantifizierung postholsteinzeitlicher Subrosion am Salzstock Gorleben durch statistische Auswertung von Bohrergebnissen

von

Detlef APPEL und Walter HÄBLER

**Kurzfassung:** Der gegenwärtig auf seine Eignung als Endlager für radioaktive Abfälle erkundete Salzstock Gorleben wird von der elstereiszeitlichen subglazialen Gorlebener Rinne gequert. Einige Einheiten der Rinnenfüllung weisen über dem Salzstock deutlich tieferes Niveau und teilweise höhere Mächtigkeit als daneben auf. Diese Unterschiede werden auf saaleiszeitliche Subrosion zurückgeführt. Ihr Ausmaß kann aus den Niveauunterschieden der holsteinzeitlichen Ablagerungen abgeleitet werden. Zuvor muß allerdings der mögliche Einfluß anderer Faktoren (Relief des Rinnenbodens, Setzung von elstereiszeitlichen Tonserien, saaleiszeitliche Eistektonik) auf deren heutiges Niveau geprüft werden. Dazu werden die Daten zu Tiefenniveau und Mächtigkeit der Einheiten der Rinnenfüllung für 79 Erkundungsbohrungen statistisch ausgewertet. Mit Hilfe von Faktoren- und Diskriminanzanalyse können die Bohrungen zwei Klassen zugeordnet werden, bei denen die heutigen Niveau- und Mächtigkeitsverhältnisse jeweils durch die Ablagerungsbedingungen in der Gorlebener Rinne bzw. saaleiszeitliche Subrosion geprägt werden. Diese Deutung stützt sich auf klassendifferenzierte Korrelations- und Regressionsbetrachtungen. Andere Einflußfaktoren können danach ausgeschlossen (Eistektonik) bzw. bei der Berechnung von Subrosionsraten berücksichtigt werden (Setzung). Aus den Niveauunterschieden der Holstein-Serien zwischen beiden Klassen ergeben sich rechnerische saaleiszeitliche Subrosionsraten von je nach Berechnungsansatz maximal 0,83 bzw. 0,96 mm/a und im Mittel 0,31 bzw. 0,41 mm/a.

**Abstract:** The Gorleben salt dome is actually investigated for its suitability as a repository for radioactive waste. It is crossed by a subglacial drainage channel, formed during the Elsterian glaciation (Gorleben channel). Some units of its filling vary strongly in niveau and thickness. Lowest positions and/or largest thickness are found above the salt dome. This is interpreted as a result of subrosion during the Saalean glaciation. The rate can be calculated from niveau differences of sediments formed during the Holsteinian interglacial. However, their position might have been influenced by other factors also (relief of the channel bottom, glacial tectonics, settlement of underlying clay-rich sediments). Their relevance was estimated applying statistical techniques to niveau and thickness data from 79 drillings in the Gorleben channel. Two classes of drillings with features caused by either Saalean subrosion or sedimentary processes during the filling of the Gorleben channel can be distinguished by means of factor and discriminant analysis. This interpretation is supported by the results of classwise correlation and regression analysis. Effects of glacial tectonics on the position of Holsteinian sediments cannot be misunderstood as subrosional. The influence of the settlement of underlying clay sediments can be estimated quantitatively. Saalean subrosion rates calculated from niveau differences of Holsteinian sediments between both classes differ with respect to the method applied: maximum values are 0,83 or 0,96 mm/a, average values are 0,31 or 0,41 mm/a.

### 1. EINLEITUNG

Seit 1979 wird der Salzstock Gorleben auf seine Eignung als Standort für die Endlagerung radioaktiver Abfälle erkundet. Die Untersuchungen erfolgten zunächst von Übertage aus. Dabei sind 6 Tiefbohrungen zur Erkundung des Salzgebirges und zahlreiche hydrogeologische Bohrungen zur Erfassung von Schichtfolge und Aufbau des Salzstock-Deckgebirges sowie der hydrogeologischen Verhältnisse niedergebracht worden. Nach Abteufen

und Ausbau der beiden Schächte Gorleben 1 und 2 konzentrieren sich die Arbeiten gegenwärtig auf die untertägige Erkundung des für die Endlagerung vorgesehenen Salzstockbereichs.

Verschiedene der von Übertage erzielten Untersuchungsergebnisse waren hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Eignung des Salzstocks als Endlagerstandort von Anfang an umstritten. Dazu gehört auch das Ausmaß nachelsterzeitlicher bzw. nachholsteinzeitlicher Subrosion. Bereits in frühen Erkundungsstadien war aufgefallen, daß die Ablagerungen der Holstein-Warmzeit über dem Salzstock örtlich erheblich tiefer liegen als daneben. Dieser Befund war mit lokaler postholsteinzeitlicher Subrosion am Salzstock Gorleben interpretiert worden (z.B. APPEL 1981, APPEL & KREUSCH 1984, DUPHORN 1986 u. 1987, DUPHORN et al. 1983). Der Ableitung von Subrosionsraten unmittelbar aus diesen Niveauunterschieden steht entgegen, daß sie grundsätzlich auch andere Ursachen als Subrosion haben können.

Die hier vorgestellte Vorgehensweise zur Berechnung nachholsteinzeitlicher Subrosionsraten trägt diesen Bedenken durch weitgehend quantitative Berücksichtigung möglicher "Störfaktoren" Rechnung. Ausgangspunkt ist die Überlegung, daß sich die verschiedenen möglichen Ursachen für tiefe Holstein-Positionen über dem Salzstock in charakteristischen statistischen Beziehungen zwischen den Basispositionen und Mächtigkeiten der jeweils betroffenen stratigraphischen Einheiten äußern müssen.

Wesentliche methodische Vorarbeiten sind im Rahmen der Überprüfung der sogenannten Eignungshöflichkeit des Salzstocks Gorleben für die Endlagerung radioaktiver Abfälle im Auftrag des Niedersächsischen Umweltministeriums durchgeführt worden (APPEL & HÄBLER 1993). Diesen wiederum liegen Ansätze zugrunde, die bereits in der Frühphase der Salzstockerkundung von APPEL & KREUSCH (1984) verfolgt worden waren. Fragen der Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die Langzeitsicherheit eines möglichen Endlagers im Salzstock Gorleben werden im folgenden nicht behandelt.

## **2. GEOLOGISCHER RAHMEN UND PLEISTOZÄNE SCHICHTFOLGE**

Der Salzstock Gorleben im hannoverschen Wendland (Niedersachsen) ist Teil der in Südwest-Nordost-Richtung etwa 30 km langen Salzstruktur Gorleben-Rambow, zu der jenseits der Elbe auch der Salzstock Rambow in der Prignitz (Mecklenburg-Vorpommern) gehört. Insbesondere für den niedersächsischen Strukturteil liegen durch die Standorterkundung Gorleben umfangreiche Darstellungen vor (insbesondere DUPHORN et al. 1983, BGR 1990), so daß die folgenden Ausführungen auf die für das Verständnis der

hier vorgestellten Berechnung von Subrosionsraten wichtigen Angaben beschränkt werden können.

Nach ZIRNGAST (1991) hat die Salzstruktur in der Zeit Keuper bis Dogger das Salzkissenstadium durchlaufen. Im Zeitraum Malm bis Unterkreide ging sie in das Diapiristadium über. Beide Strukturteile haben an der Südostflanke einen Überhang. Der Salzstock Gorleben ist knapp 7 km lang und 3 - 4 km breit. Die Gipshutoberfläche liegt im Scheitelbereich des Salzstocks rund 200-300 m unter der Erdoberfläche, der Salzspiegel um einige Meter bis Zehnermeter darunter.

Die präquartäre Sedimentfolge im Raum Gorleben wird außer von der großräumigen paläogeographischen auch deutlich von der halokinetischen Entwicklung des Salzstocks geprägt. Über dem aufsteigenden Zechsteinsalz sind die Ablagerungen einzelner stratigraphischer Einheiten von Kreide und Tertiär in ihrer Mächtigkeit reduziert oder fehlen sogar, während es in den sekundären Randsenken zu starker Mächtigkeitszunahme kam. An den Salzstockflanken sind die Gesteine aufgeschleppt. Im Quartär ist das resultierende Bild durch erosive, kumulative und tektonische glaziäre Prozesse nachhaltig überprägt worden.

Aus dem **Altpleistozän** sind jeweils mehrere Zehnermeter mächtige Ablagerungen der Menap-Kaltzeit sowie des Bavel- und Cromer-Komplexes überliefert MÜLLER (1986). Sie sind auf eine 3 km lange und bis 1,5 km breite altquartäre Subrosionssenke im zentralen bis südwestlichen Dachbereich des Salzstocks beschränkt. Im Zentralteil des Salzstocks sind diese Ablagerungen während der Elster-Eiszeit (s.u.) nahezu vollständig beseitigt worden.

Die Hauptmasse der pleistozänen Ablagerungen im Gebiet Gorleben stammt aus der Elster- und Saaleeiszeit. Vier Eisvorstöße (Elster, Drenthe-1, Drenthe-2 und Warthe) haben den Salzstockbereich überfahren und mächtige glaziäre Ablagerungen hinterlassen. Das Inlandeis der Weichsel-Eiszeit hat dagegen den Raum Gorleben nicht mehr erreicht.

Die Ablagerungen der **Elster-Eiszeit** sind im Raum Gorleben an elsterzeitliche Erosionsrinnen gebunden. Davon ist die subglaziäre, den Salzstock etwa in Südwest-Nordost-Richtung querende Gorlebener Rinne für die hier interessierenden Fragen am wichtigsten. Über dem Salzstock erreicht sie örtlich Tiefen von über 300 m unter NN und greift flächenhaft in den Gipshut, örtlich sogar ins Salzgebirge hinein. Die Mächtigkeiten weisen eine erhebliche Bandbreite mit Höchstwerten weit über 200 m auf. Während der Rinnenentstehung sind im Salzspiegelbereich durch randliche Einpressung elsterzeitlicher Komponenten und deren Vermischung mit Hutgesteinsmaterial charakteristische Brekzien entstanden. An Orten mit post-

elsterzeitlicher Subrosion ist darunter das sogenannte "geschichtete Hutgestein" entstanden, aus dessen Mächtigkeit BORNEMANN & FISCHBECK (1986) postelsterzeitliche Subrosionsraten berechnet haben (s. 7.).

Mit dem Abschmelzen des Elster-Eises füllte sich die Gorlebener Rinne mit Grundmoränenmaterial sowie Schmelzwassersanden und schließlich feinkörniger Gletschertrübe des Lauenburger-Ton-Komplexes. Dieser wird bis zu 120 m mächtig und besteht vorwiegend aus Ton und Schluff. Er weist jedoch auch Sand- und Kieslagen auf, die bei nur geringer Quererstreckung über mehrere Kilometer entlang der Gorlebener Rinne verfolgt werden können. Außer im südlichen Bereich der Gorlebener Rinne, wo mehrere Zehnermeter mächtige Nachschüttsande entwickelt sind, bildet der Lauenburger-Ton-Komplex den Abschluß der elstereiszeitlichen Sedimentation.

Aus der **Holstein-Warmzeit** sind im Raum Gorleben Ton- und Schluffserien mit geringmächtigen Sandeinschaltungen in limnischer bis mariner Flachwasserfazies bekannt. Örtlich treten Braunkohle- und Schillagen auf. Die Verbreitung der holsteinzeitlichen Sedimente ist weitgehend an die Gorlebener Rinne gebunden. Einzelbefunde liegen aus ihrem Randbereich im südwestlichen Salzstockdach bzw. einer Nebenrinne (Gartower Rinne) vor.

Die erbohrten Mächtigkeiten der Holstein-Schichten liegen zwischen 2 m und 33 m. Sie können zumindest örtlich durch Erosion bzw. eistektonische Prozesse im Zuge des ersten saaleeiszeitlichen Eisvorstoßes beeinflusst sein. Südlich außerhalb des Salzstocks liegt das durch Eistektonik ungestörte Höhenniveau der Holstein-Basis zwischen 31 m und 44 m unter NN. Im Salzstockdach variiert es bei eistektonisch ungestörten Vorkommen zwischen 26 m und 137 m unter NN. Besonders tiefe Positionen werden mit saaleeiszeitlicher Subrosion erklärt. Wegen ihrer - gemessen an den Niveauunterschieden - geringen Mächtigkeit sind die holsteinzeitlichen Ablagerungen für die Berechnung von Subrosionsraten besonders gut geeignet.

Während der **Saale-Eiszeit** sind Inlandeismassen dreimal über den Raum Gorleben nach Süden vorgestoßen. In den Interstadialen war das Gebiet wahrscheinlich eisfrei. Alle drei Stadiale (Drenthe-1, Drenthe-2, Warthe) haben charakteristische Grundmoränen und Schmelzwasserablagerungen hinterlassen, die allerdings nicht überall angetroffen werden. Im Gegensatz zu den elsterzeitlichen Sedimenten sind die Ablagerungen der Saale-Eiszeit flächenhaft verbreitet. Subglaziäre Rinnenbildung war in der Saale-Eiszeit nur örtlich von Bedeutung.

Die Basispositionen und Mächtigkeiten der saaleeiszeitlichen Ablagerungen weisen große Schwankungsbreiten auf. Ungewöhnlich tiefe Positionen bis zu 127 m unter NN und große Mächtigkeiten von maximal 131 m über dem zentralen Salzstock werden auf saaleeiszeitliche Subrosion zurückgeführt.

Außerhalb des Salzstocks werden die Saale-Ablagerungen in rinnenartigen Strukturen örtlich bis rund 150 m mächtig (Woltersdorfer Rinne).

Die in den Raum Gorleben vordringenden Inlandeismassen der Saaleeiszeit haben verbreitet zu glazitektonischem Falten- und Schuppenbau geführt (SCHNEIDER 1981, DUPHORN et al. 1983). Diese Phänomene sind an der Erdoberfläche vor allem aus dem Nordostteil des Salzstocks (Höhbeck) bekannt. Dort ist es zu staffelartiger Verschuppung hauptsächlich von Geschiebemergel und Schmelzwassersand gekommen. Örtlich sind Tone des Tertiär, der Elster-Eiszeit (Lauenburger Ton) und der Holstein-Warmzeit in die saaleeiszeitlichen Serien eingeschuppt. In Bohrungen sind eistektonische Falten und Schuppen nur über dem zentralen Teil des Salzstocks beobachtet worden. Betroffen sind dort offenbar vor allem die Holstein-Schichten, örtlich auch Lauenburger Ton. Manche der bisher erkannten Schuppen aus holsteinzeitlichem Material liegen autochthonen Holstein-Bildungen direkt auf, andere sind in saaleeiszeitliche Sedimente eingeschuppt.

Sedimente des **Eem-Interglazials** sind nur lokal außerhalb des Salzstocks erbohrt worden.

Aus der **Weichsel-Eiszeit** sind im Raum Gorleben vor allem fluviatile Sande und Kiese der Elbe-Niederterrasse erhalten. Abgesehen von Geestinseln, wie dem Höhbeck im Nordostteil des Salzstocks, sind sie innerhalb des Elbe-Urstromtals, in dem sich der Salzstock Gorleben befindet, flächenhaft verbreitet. Geröllpetrographisch kann die Niederterrasse in einen jüngeren und einen älteren Abschnitt unterteilt werden (SCHRÖDER 1988). Die Gesamtmächtigkeit schwankt im Raum Gorleben zwischen einigen wenigen und mehr als 40 m. Die Basis liegt im Mittel einige Meter über NN, örtlich auch unter NN. Der Niederterrasse sind in wechselhafter Ausdehnung und Mächtigkeit spätglaziale bis frühholozäne Flugsanddecken, Dünen und Mudden aufgesetzt.

### 3. DATENBASIS

Wichtigste Informationsgrundlage für die Quantifizierung nachholsteinzeitlicher Subrosion mit Hilfe statistischer Verfahren sind die Schichtenverzeichnisse der im Rahmen der (vor allem hydrogeologischen) Standorterkundung Gorleben niedergebrachten Bohrungen. Sie sind im wesentlichen von Bearbeitern der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe erstellt worden und in HARRES-PICKEL (1992) dokumentiert. Von den aus den Schichtenverzeichnissen direkt übernommenen bzw. berechneten Daten werden im folgenden die Basispositionen der Elster-, Holstein-, Saale- und Weichsel-Serien (in Metern unter NN), die scheinbaren Mächtigkeiten

dieser Einheiten sowie die Summen der scheinbaren Mächtigkeiten von Ton- bzw. Sand- und Kieseinschaltungen in den elsterzeitlichen Ablagerungen (in Metern) berücksichtigt. Basispositionen unter NN haben positive Werte, hohe Werte kennzeichnen also tiefe Positionen. Alle Werte sind auf ganze Zahlen gerundet. Die Verwendung der scheinbaren anstelle der (ohnehin unbekannt) wahren Mächtigkeiten ist wegen der weitgehend ruhigen Lagerungsverhältnisse und der insgesamt geringen Bandbreite der Mächtigkeit bei den holsteinzeitlichen Ablagerungen gerechtfertigt.

In die Auswertung sind nur diejenigen Bohrungen einbezogen worden, bei denen die Holstein- und die Elster-Serien vollständig durchteuft worden sind. Damit soll sichergestellt werden, daß die primären und nicht die durch das vorrückende Saale-Eis reduzierten Mächtigkeiten dieser Einheiten in die Berechnungen einfließen. Bei den Holstein-Serien ist diese Anforderung nur näherungsweise erfüllt, weil höchste Teile der ursprünglichen Schichtfolge durch das Eis des Drenthe-1-Stadiums beseitigt worden sein können. Außerdem wurden nur solche Bohrungen berücksichtigt, bei denen am autochthonen Charakter der Holstein-Serien kein Zweifel besteht.

Diese Bedingungen werden von insgesamt 72 Bohrungen über dem Salzstock und sieben Bohrungen südlich bzw. östlich neben dem Salzstock erfüllt. Sie liegen mit einer Ausnahme (Gartower Rinne) in der den Salzstock querenden Gorlebener Rinne.

Gegenüber dem in den Schichtenverzeichnissen dokumentierten Kenntnisstand von 1992 (HARRES-PICKEL 1992) haben sich durch Neuinterpretation einzelner Untersuchungsbefunde einige Veränderungen ergeben (BGR 1995). Sie betreffen insbesondere die Frage der Autochthonie der erbohrten Holstein-Vorkommen. Sie konnten für die vorliegende Untersuchung nicht berücksichtigt werden. Dieser Verzicht ist akzeptierbar, weil hier die methodischen Aspekte der Quantifizierung von Subrosion im Vordergrund stehen.

#### **4. AUSGANGSSITUATION UND VORGEHENSWEISE**

Niveaunterschiede zwischen den Bereichen neben und über dem Salzstock Gorleben sind bei den Ablagerungen der Holstein-Warmzeit wegen ihrer geringen Mächtigkeit zwar besonders gut zu erkennen, jedoch nicht darauf beschränkt. Auch bei den Elster- und Saale-Serien liegen die Basispositionen im Schnitt über dem Salzstock rund 20 m tiefer als daneben. Bei den Saale-Serien ist parallel dazu die mittlere Mächtigkeit über dem Salzstock um etwa 20 m erhöht (APPEL & HÄBLER 1993). Wenngleich diese Befunde insgesamt stark auf saaleeiszeitliche Subrosion als Ursache für die Unterschiede hindeuten, ist doch die Beteiligung anderer Faktoren unge-

prüft nicht auszuschließen. Ihr Einfluß ist also (möglichst) quantitativ zu beurteilen, bevor aus den Niveauunterschieden neben und über dem Salzstock Subrosionsraten berechnet werden. Zudem ist die Datenbasis neben dem Salzstock mit nur sieben Bohrungen für die statistisch signifikante Unterscheidung beider Bereiche nicht ausreichend. Auch ist die Differenzierung der Bohrungen allein nach ihrer Lage zum Salzstock statt nach subrosionsspezifischen Merkmalen grundsätzlich unbefriedigend. Zur gezielten Verbesserung der Aussagekraft der vorliegenden Informationen, zur quantitativen Erfassung möglicher Störfaktoren und zur Eingrenzung des Subrosionszeitraums sind daher folgende statistischen Verfahren angewendet worden:

### **Faktorenanalyse**

Die Faktorenanalyse dient der Identifizierung multidimensionaler Beziehungen zwischen verschiedenen Beurteilungsparametern anhand neuer fiktiver Größen ("Faktoren"), die über sogenannte Faktorenladungen in Beziehung zu diesen Parametern stehen. Einbezogen wurden hier die Basispositionen und Mächtigkeiten der betrachteten stratigraphischen Einheiten sowie als Faziesindikatoren für die elstereiszeitlichen Schmelzwasserablagerungen die Gesamtmächtigkeiten der darin enthaltenen Ton- bzw. Sand- und Kieseinschaltungen. Es wurde erwartet, daß sich die verschiedenen möglichen Ursachen für die unterschiedlichen Lage- und Mächtigkeitsverhältnisse neben und über dem Salzstock in Faktoren mit charakteristischen, genetisch interpretierbaren Faktorenladungen äußern. Randbedingungen der Berechnungen waren: Korrelationsmatrix, Varimax-Rotation der Komponenten, kleinster Eigenwert Null. Die Verwendung einer Kovarianzmatrix oder anderer Rotationsverfahren führt zu praktisch übereinstimmenden Ergebnissen wie hier vorgestellt.

### **Diskriminanzanalyse**

Mit Hilfe der (linearen) Diskriminanzanalyse sind die Bohrungen des Datensatzes zwei Klassen zugeordnet worden, in denen sich jeweils die Bohrungen mit bzw. ohne Beeinflussung durch Subrosion wiederfinden. Dabei ist derjenige Faktor der Faktorenanalyse, der seine Ausprägung durch Subrosion erfahren hat, als von der Lage der Bohrungen neben bzw. über dem Salzstock abhängige Differenzierungsvariable in die Analyse eingegangen. Hintergrund ist die Beobachtung, daß Niveau und Mächtigkeit der verschiedenen Ablagerungen bei einer Reihe von Bohrungen über dem Salzstock den Verhältnissen neben dem Salzstock entsprechen. Bei solchen Bohrungen kann Subrosion allenfalls in geringem Ausmaß stattgefunden haben. Die Zusammenfassung dieser Bohrungen mit denen neben dem Salzstock zu einer eigenen Klasse würde die bisher unzureichende Datenbasis für Bohrungen ohne Subrosion erheblich verbessern.

### **Statistische Kenngrößen**

Getrennt für die beiden resultierenden Klassen wurden statistische Kenngrößen für die Basispositionen und Mächtigkeiten der Elster-, Holstein-, Saale- und Weichsel-Serien zur Beschreibung ihrer klassenspezifischen Größe und Variabilität berechnet. Mit dem t-Test wurde geprüft, ob sich die einzelnen Parameter beider Klassen signifikant voneinander unterscheiden.

### **Korrelation und Regression**

Ebenfalls getrennt für die beiden Klassen sind die (multiplen) Pearson-Korrelationskoeffizienten berechnet worden. Von ihnen wurden Aussagen über klassenspezifische, bivariate statistische Zusammenhänge und über die genetischen Beziehungen zwischen den Beurteilungsparametern erwartet. Auch die Korrelationskoeffizienten sind auf Signifikanz getestet worden (t-Test). Diese bivariaten Zusammenhänge werden zusätzlich in Streudiagrammen für die Basispositionen und Mächtigkeiten der Elster-, Holstein- und Saale-Serien dargestellt. Die Diagramme enthalten auch die Regressionsgeraden und - soweit darunter nicht die Übersichtlichkeit leidet - die Begrenzungslinien für die zugehörigen 95%-Vertrauensintervalle für die mit der Diskriminanzanalyse festgelegten Bohrungsklassen.

Die Ergebnisse der statistischen Untersuchungen werden mit Hilfe von geowissenschaftlichen Modellen genetisch interpretiert. Abschließend werden für die Bohrungen, bei denen die Holstein-Serien durch Subrosion zweifellos abgesenkt worden sind, die Absenkungsbeträge und daraus die Subrosionsraten berechnet.

Auf die mathematischen Grundlagen der statistischen Verfahren und Einzelheiten der Durchführung wird im folgenden nicht eingegangen. Die unerläßlichen Voraussetzungen für ihre Anwendung (Normalverteilung der Parameterwerte und lineare Beziehungen zwischen ihnen) sind erfüllt. Die Berechnungen und ihre grafische Darstellungen sind mit dem Statistik- und Grafikprogramm SYSTAT, Version 6.0 (Systat Inc., Evanston, IL, USA) durchgeführt worden.

## **5. INTERPRETATIONSMODELLE**

Die auffälligen Niveau- und Mächtigkeitsunterschiede zwischen Bohrungen neben und über dem Salzstock können außer auf Subrosion grundsätzlich auch auf das unregelmäßige Relief des Rinnenbodens, die unterschiedliche Setzung toniger Anteile im Lauenburger-Ton-Komplex sowie eistektonische Deformationen zurückgehen. Für die quantitative Beurteilung der genannten Ursachen bzw. Einflußfaktoren werden geowissenschaftliche Interpretationsmodelle auf die Ergebnisse der statistischen Untersuchungen angewendet. Die Modelle werden daraus abgeleitet, wie sich die verschiedenen

Faktoren auf die statistischen Beziehungen zwischen den jeweils betroffenen Beurteilungsparametern auswirken müssten.

### **Relief des Bodens der Gorlebener Rinne**

Bei der Auffüllung eines zusammenhängenden Ablagerungsraums, hier der Gorlebener Rinne, durch Zufuhr klastischen Materials entstehen in tiefen Zonen grundsätzlich größere Sedimentmächtigkeiten als in flacheren. Daraus resultiert eine deutliche Korrelation zwischen der in Bohrungen angebotenen Mächtigkeit einer bestimmten Schicht und der Position ihrer Basisfläche. Entsprechende, wenngleich weniger deutliche Beziehungen müssen auch zwischen den Basispositionen und Mächtigkeiten nacheinander entstandener Schichten bestehen.

Die Mächtigkeit einer Schicht ist ein durch spätere Lageveränderungen, z.B. Subrosion, allenfalls unwesentlich veränderbares Maß für das Ablagerungsniveau, das zur Rekonstruktion des Ausgangsniveaus benutzt werden kann. Das ist deswegen bedeutsam, weil das Fehlen einer (ursprünglich möglicherweise vorhandenen) sedimentationsbedingten Korrelation bei den Holstein-Serien darauf zurückgehen kann, daß sie teilweise durch das vorrückende Saale-Eis beseitigt worden sind. Eine etwaige ablagerungsgesteuerte Korrelation zwischen Elster-Mächtigkeit und Basisposition der Holstein-Serien wäre davon nicht betroffen.

Parallel zur tiefendifferenzierten Mächtigkeitsverteilung kann es zu einer Korngrößenabhängigen Faziesdifferenzierung kommen: In tiefen Zonen abgelagerte Sedimente des Lauenburger-Ton-Komplexes können erhöhte Feinkornanteile aufweisen. Daraus ergäbe sich für die elstereiszeitlichen Sedimente eine hohe positive Korrelation zwischen Basisposition bzw. Mächtigkeit und Feinkornanteil. Alle Parameter mit hohen positiven Korrelationen sollten sich auch bei der Faktorenanalyse in einem für die Ablagerung in der Gorlebener Rinne charakteristischen Faktor wiederfinden.

Die geschilderten Beziehungen werden um so undeutlicher, je vollständiger bzw. gleichmäßiger der Ablagerungsraum mit Sedimenten aufgefüllt ist. Bei einer erst nach Auffüllung der Gorlebener Rinne abgelagerten Einheit besteht keine Korrelation zwischen der Position ihrer Basisfläche und ihrer Mächtigkeit bzw. zu den Parametern der unterlagernden Einheiten mehr. Die Basispositionen und Mächtigkeiten einer solchen Einheit werden lediglich innerhalb einer gewissen Bandbreite variieren.

### **Subrosion**

Durch Subrosion sinken bereits vorhandene Gesteinsschichten in der Subrosionszone gegenüber deren Umgebung ab. Rinnenablagerungen mit spezifischer Beziehung zwischen Basisposition und Mächtigkeit der Schicht gelangen so in eine - gemessen an ihrer Mächtigkeit - zu tiefe Position. Ge-

meinsam von Subrosion betroffene Einheiten sinken an einzelnen Punkten der Subrosionszone um identische Beträge gegenüber der unbeeinflussten Umgebung ab. Ihre Basispositionen müssen daher bei ausreichender Absenkung deutlich positiv miteinander korreliert sein.

Bei einer in Entstehung begriffenen Gesteinseinheit führt die Absenkung ihrer Basis bei ausreichender Sedimentationsrate gegenüber der subrosionsfreien Umgebung zur Mächtigkeitzunahme. Die Mächtigkeit dieser Schicht muß daher positiv hoch mit ihrer Basisposition und deutlich mit den Basispositionen der ebenfalls von Subrosion betroffenen älteren Schichten korreliert sein.

Bei der Faktorenanalyse sollten sich diese Beziehungen in einem eigenen "Subrosionsfaktor" äußern. Er muß durch hohe Ladungen für die Basispositionen der gemeinsam abgesenkten Ablagerungen und die Mächtigkeit derjenigen Einheit gekennzeichnet sein, während der die Subrosion stattgefunden hat.

### **Setzung im Lauenburger-Ton-Komplex**

Lockersedimente unterliegen unter Auflast einer setzungsbedingten Verringerung ihrer Mächtigkeit. Das Ausmaß ist von der Höhe der Belastung und der Zusammensetzung der Sedimente abhängig. Die maßgebliche Maximalbelastung der elster- und holsteinzeitlichen Ablagerungen in der Gorleben Rinne erfolgte durch saaleeiszeitliche Inlandeismassen. Sie muß überall im Untersuchungsgebiet annähernd gleich groß gewesen sein. Ausschlaggebend für etwaige setzungsbedingte Niveauunterschiede der Holstein-Basis sind daher allein Unterschiede in der Zusammensetzung der unterlagernden elstereiszeitlichen Ablagerungen. Als Maß für das potentielle Setzungsausmaß wird die Mächtigkeitssumme aller in den einzelnen Bohrungen registrierten elstereiszeitlichen Toneinschaltungen verwendet.

Es ist zu erwarten, daß die Holstein-Basis bei Bohrungen mit hoher Gesamtmächtigkeit von Toneinschaltungen in den elstereiszeitlichen Gesteinen setzungsbedingt tiefer liegt als in Bereichen mit geringeren Tonmächtigkeit. Das sollte sich bei sonst ungestörten Lagerungsverhältnissen in positiver Korrelation zwischen der Holstein-Basis und der Tonmächtigkeit äußern. Bei der Faktorenanalyse sollte sich ein Faktor mit hoher Ladung für die Holstein-Basis und die Tonmächtigkeit in den Elster-Serien ergeben.

### **Eisstauchung**

Saaleeiszeitliche eistektonische Schuppen werden in den Schichtenverzeichnissen von neun der hier berücksichtigten Bohrungen erwähnt, faltenartige Stauchungserscheinungen bei acht Bohrungen. Es kann aber sein, daß Schuppen aus Lauenburger Ton oder Holstein-Material, die sich in Kontakt mit entsprechenden autochthonen Vorkommen befinden, bisher

übersehen worden sind (BGR 1995). Wahrscheinlich sind auch nicht alle vorhandenen eistektonischen Faltenstrukturen erkannt worden.

Für die hier zu behandelnde Fragestellung sind die genannten Unsicherheiten von nachrangiger Bedeutung, da eistektonische Stauchung und Verschuppung ganz überwiegend vorwärts-aufwärts gerichtete Vorgänge sind. Aus mechanischen Gründen muß nämlich die vertikale Kompensation des horizontalen Zusammenschubs von Lockergestein durch vorrückendes Eis nach oben erfolgen. Die Basis der Kompensationszone bzw. der jeweilige Abscherungshorizont dürfte wegen der feinkörnigen und damit gleitfreundlichen Zusammensetzung innerhalb des Schichtpaketes Lauenburger-Ton-Komplex / Holstein-Serien gelegen haben. Von lokalen Sonderbedingungen abgesehen kann dagegen Holstein-Material durch eistektonische Vorgänge in der Saale-Eiszeit weder in unterlagernde ältere Einheiten eingedrungen noch in Gestalt von Schuppen oder Falten deutlich unter das ursprüngliche Ablagerungsniveau der Holstein-Serien gelangt sein. Dazu wären mit Rotation verbundene Gesteinsverschiebungen mit ausgeprägt abwärts gerichteter Bewegungskomponente, etwa entlang listrischer Flächen vor dem Eisrand, erforderlich, für die es bisher jedoch keine Anzeichen gibt.

Die Auswirkungen eistektonischer Vorgänge auf das Niveau der holsteinzeitlichen Ablagerungen (bzw. anderer betroffener Schichten) sollten sich daher darin äußern, daß deren Basis eine höhere Position als normal bzw. als nach der Mächtigkeit der Schicht zu erwarten wäre aufweisen. Das muß in den Streudiagrammen zur Veranschaulichung der Beziehungen zwischen Basispositionen und Mächtigkeiten der betroffenen Einheiten zu erkennen sein.

Nur lokal kann es zur eistektonisch verursachten Absenkung der Holstein-Serien unter ihr Ausgangsniveau gekommen sein. Denkbar ist etwa die lokale injektionsartige Einpressung begrenzter Lauenburger-Ton-Massen in überlagernde Schichten. Ein solcher Vorgang müßte am Herkunftsort der ausgequetschten Masse zu einer Absenkung der Holstein-Serien führen. Solche Phänomene sind bisher für den Raum Gorleben nicht belegt.

Es ist nicht auszuschließen, daß es weitere, bislang unerkannte bzw. nicht abschließend geklärte Ursachen für tiefe Positionen der Holstein-Serien gibt. In BGR (1995) werden als Beispiel dafür die Verhältnisse bei der Bohrung GoHy 515 diskutiert. Dort befinden sich die Basispositionen der Elster, Holstein- und Saale-Serien in auffällig tiefer Position, so daß am Befund postholsteinzeitlicher Absenkung kein Zweifel besteht. Die Zusammensetzung des Hutgesteins deutet jedoch nach BGR (1995) daraufhin, daß keine postholsteinzeitliche Subrosion stattgefunden hat.

Möglicherweise können also nicht alle identifizierten Tiefpositionen der Holstein-Basis mit absoluter Sicherheit auf Subrosion zurückgeführt werden. Das ist allerdings auf Grundlage statistischer Untersuchungen schon deshalb nicht möglich, weil sie keine unmittelbaren Aussagen zur Entstehung der Lagerungs- und Mächtigkeitsverhältnisse bei jeder einzelnen Bohrung liefern.

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5
qw-NN	-0,064	-0,097	<b>0,977</b>	0,077	-0,015
qw-M	-0,050	-0,103	<b>0,856</b>	0,097	-0,137
qs-NN	<b>0,993</b>	0,022	0,013	<b>-0,108</b>	-0,002
qs-M	<b>0,975</b>	0,038	-0,181	<b>-0,121</b>	-0,000
qhol-NN	<b>0,993</b>	0,029	0,011	<b>0,109</b>	0,015
qhol-M	-0,058	0,073	0,124	<b>0,779</b>	0,115
qe-NN	<b>0,480</b>	<b>0,809</b>	-0,073	0,052	<b>0,318</b>
qe-M	-0,025	<b>0,924</b>	-0,092	-0,004	<b>0,360</b>
qe-T	0,001	<b>0,253</b>	-0,115	0,135	<b>0,710</b>
qe-S/G	-0,087	<b>0,963</b>	-0,115	0,102	-0,032
Eigenwert	3,600	2,641	1,647	0,649	0,403
Anteil an erklärter Varianz (%)	31,7	25,3	17,8	6,9	7,7
Interpretation	Subrosion	Rinne	N.-Terrasse	Saale-Eis	Rinne
Randbedingungen der Berechnung: 71 Bohrungen, Korrelationsmatrix, Varimax-Rotation, kleinster Eigenwert = 0; Gesamtanzahl der berechneten Faktoren: 9					
qw-NN / qw-M	Basisposition / Mächtigkeit der Weichsel-Serien				
qs-NN / qs-M	Basisposition / Mächtigkeit der Saale-Serien				
qhol-NN / qhol-M	Basisposition / Mächtigkeit der Holstein-Serien				
qe-NN / qe-M	Basisposition / Mächtigkeit der Elster-Serien				
qe-T / qe-S/G	Gesamtmächtigkeit der Ton- / Sand- und Kiesfolgen in Elster-S.				
	Basispositionen in Meter unter NN / Mächtigkeiten in m				
<b>0,993</b>	für die genetische Interpretation wichtige Faktorenladung				
Subrosion	Faktor wird mit Subrosion erklärt				
Rinne	Faktor wird mit Sedimentation in der Gorlebener Rinne erklärt				
Saale-Eis	Faktor wird mit Erosionswirkung des Saale-Eises erklärt				
N.-Terrasse	Faktor wird mit Bildung der Niederterrasse erklärt				

Tab.1: Rotierte Faktorenladungen und genetische Interpretation der fünf wichtigsten Faktoren der Faktorenanalyse

## 6. STATISTISCHE ERGEBNISSE UND IHRE INTERPRETATION

### Faktorenanalyse

Die Faktorenanalyse hat insgesamt neun Faktoren geliefert. Davon sind in Tab. 1 nur diejenigen fünf dargestellt, die für die Interpretation relevante

Ladungen aufweisen. Faktoren, aus denen auf maßgeblichen Einfluß der Setzung von Lauenburger Ton bzw. Eisstauchung auf die Lage der Holstein-Basis bei den Bohrungen über dem Salzstock geschlossen werden könnte, befinden sich nicht darunter.

Der erste Faktor weist sehr hohe positive Ladungen bei den Basispositionen der Holstein- und Saale-Serien sowie der Mächtigkeit der Saale-Serien und noch erhöhte positive Ladung bei der Basisposition der Elster-Serien auf. Die Ladungen der übrigen Parameter sind dagegen sehr niedrig. Bei den betroffenen Bohrungen sind danach Elster-, Holstein- und Saale-Basis durch tiefe Positionen gekennzeichnet. Damit sind zugleich hohe Mächtigkeiten der saaleeiszeitlichen Ablagerungen verbunden, während die Mächtigkeiten von Elster- und Holstein-Ablagerungen unauffällig sind. Dieses Bild muß auf Massenabtransport unterhalb der Elster-Basis zurückgeführt werden, der syndementär zur Ablagerung der Saale-Schichten stattgefunden hat. Das ist sinnvoll nur mit saaleeiszeitlicher Subrosion zu erklären. Dieser Faktor wird daher als "Subrosionsfaktor" interpretiert.

Die geschilderten Zusammenhänge bei Faktor 1 sind nicht Ausdruck der Auffüllung der Gorlebener Rinne während der Elster-Eiszeit. Die damit verbundenen Vorgänge schlagen sich vielmehr in den Faktoren 2 und 5 mit hohen bzw. erhöhten Ladungen für Basisposition und Mächtigkeit der elsterzeitlichen Ablagerungen sowie für die Mächtigkeiten der darin enthaltenen Ton- bzw. Sand- und Kieseinschaltungen nieder. Die Unterschiede zwischen den Faktoren werden als Ausdruck der faziell differenzierten Rinnenauffüllung interpretiert.

Tiefe Basispositionen und hohe Mächtigkeit der Saale-Serien können auch nicht durch Sedimentation in einer vom vorrückenden Saale-Eis zuvor geschaffenen Hohlform erklärt werden. In diesem Fall wären die Holstein-Serien nicht abgesenkt, sondern erodiert worden. Dieser Vorgang schlägt sich wahrscheinlich in Faktor 4 nieder, bei dem nur die Holstein-Mächtigkeit erhöhte Ladung aufweist, während die Ladungen für Basisposition und Mächtigkeit der Saale-Bildungen zwar niedrig, aber auffälligerweise negativ sind. Geringe Holstein-Mächtigkeit ist also - allerdings nur undeutlich - mit tiefer Saale-Basis und erhöhter Saale-Mächtigkeit gekoppelt.

Bei Faktor 3 haben nur die weichseleiszeitlichen Parameter auffällige (positive) Ladungen. Daher kann dieser Faktor nur auf die Bildung der weichseleiszeitlichen Niederterrasse zurückgeführt werden. Ein Zusammenhang mit den zuvor abgelaufenen Prozessen ist nicht erkennbar.

### **Diskriminanzanalyse**

Zur Diskriminanzanalyse ist der 1. Faktor der Faktorenanalyse ("Subrosion") herangezogen worden. Ausgehend von seiner unterschiedlichen Aus-

prägung bei den Bohrungen neben und über dem Salzstock sind alle Bohrungen einer von zwei Klassen mit jeweils entsprechenden Lage- und Mächtigkeitsverhältnissen zugeordnet worden. 40 Bohrungen über dem Salzstock mit (subrosionsspezifisch) tiefen Basispositionen der Elster-, Holstein- und Saale-Serien sowie großer Mächtigkeit der Saale-Ablagerungen sind so zur Klasse "Subrosion" zusammengefaßt worden. Die übrigen 39 Bohrungen weisen "normale" Positionen und Mächtigkeiten der Elster-, Holstein- und Saale-Serien auf. Sie werden zur Klasse "Rinne" zusammengefaßt, deren Ausprägung mit der Auffüllung der Gorlebener Rinne in der Elster-Eiszeit in Zusammenhang steht. Ihr gehören auch die sieben Bohrungen neben dem Salzstock an.

	N		Min		Max		MW		SD	
	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S
qw-NN	33	38	-14	-17	9	8	-5,2	-6,5	6,4	5,8
qw-M	33	38	2	3	35	44	16,9	14,8	8,8	8,1
qs-NN	39	40	0	31	40	127	24,5	69,2	10,5	26,4
qs-M	39	40	10	36	50	126	29,0	75,2	11,8	27,0
qhol-NN	39	40	7	49	52	133	32,6	79,3	10,3	23,5
qhol-M	39	40	2	4	21	33	7,9	8,9	4,6	6,3
qe-NN	39	40	62	74	240	292	147,6	196,3	47,6	56,4
qe-M	39	40	36	24	212	239	115,2	117,0	49,2	51,2
R	Klasse "Rinne"				S		Klasse "Subrosion"			
N	Anzahl Bohrungen				MW		Mittelwert			
Min	Minimalwert				SD		Standardabweichung			
Max	Maximalwert									
Basispositionen in m unter NN / Mächtigkeiten in m. Berechnete Werte auf erste Dezimalstelle gerundet.										
qw-NN / qw-M	Basisposition / Mächtigkeit der Weichsel-Serien									
qs-NN / qs-M	Basisposition / Mächtigkeit der Saale-Serien									
qhol-NN / qhol-M	Basisposition / Mächtigkeit der Holstein-Serien									
qe-NN / qe-M	Basisposition / Mächtigkeit der Elster-Serien									

Tab. 2: Statistische Kenngrößen für Basispositionen und Mächtigkeiten der Ablagerungen in der Gorlebener Rinne für die mit Hilfe der Diskriminanzanalyse bestimmten Bohrungsklassen "Rinne" und "Subrosion"

### Statistische Kenngrößen

Die für die Bohrungen der Klassen "Rinne" und "Subrosion" getrennt berechneten statistischen Kenngrößen (Tab. 2) verdeutlichen die zwischen beiden Klassen bestehenden Lagerungs- und Mächtigkeitsunterschiede: Die höchsten Basispositionen der drei ältesten Einheiten werden erwartungsgemäß in der Klasse "Rinne" erreicht, die tiefsten in der Klasse "Subrosion". Die mittleren Basispositionen aller drei Einheiten liegen bei der Klasse "Subrosion" rund 45 m tiefer als bei der Klasse "Rinne". Die Saale-Mächtigkeit ist bei der Klasse "Subrosion" um etwa denselben Betrag größer. Die Unterschiede sind signifikant. Die mittleren Mächtigkeiten von

Elster- und Holstein-Serien beider Klassen unterscheiden sich dagegen praktisch nicht. Diese Zusammenhänge deuten auf im wesentlichen saale-eiszeitliche Subrosion hin.

Bei den Weichsel-Serien sind interpretierbare Unterschiede zwischen beiden Klassen nicht erkennbar. Weichseleiszeitliche oder noch jüngere Subrosion ist demnach mit dem hier vorgestellten Verfahren nicht nachzuweisen. Die weichselzeitlichen Ablagerungen werden daher bei der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt.

Klasse "Rinne" (39 Bohrungen)								
	qe-NN	qe-M	qhol-NN	qhol-M	qs-NN	qs-M	qe-T	
qe-NN	<b>1,000</b>							
qe-M	<b>0,978</b>	<b>1,000</b>						
qhol-NN	-0,059	<u>-0,267</u>	<b>1,000</b>					
qhol-M	<b>0,274</b>	<u>0,234</u>	0,143	<b>1,000</b>				
qs-NN	-0,192	<b>-0,373</b>	<b>0,896</b>	<b>-0,307</b>	<b>1,000</b>			
qs-M	-0,159	<b>-0,297</b>	<b>0,684</b>	<b>-0,432</b>	<b>0,848</b>	<b>1,000</b>		
qe-T	<b>0,528</b>	<b>0,519</b>	-0,044	0,180	-0,123	-0,105	<b>1,000</b>	
qe-S	<b>0,810</b>	<b>0,832</b>	<u>-0,237</u>	<b>0,333</b>	<b>-0,388</b>	<b>-0,379</b>	0,177	
Klasse "Subrosion" (40 Bohrungen)								
	qe-NN	qe-M	qhol-NN	qhol-M	qs-NN	qs-M	qe-T	
qe-NN	<b>1,000</b>							
qe-M	<b>0,909</b>	<b>1,000</b>						
qhol-NN	<b>0,420</b>	0,003	<b>1,000</b>					
qhol-M	-0,032	0,026	-0,134	<b>1,000</b>				
qs-NN	<b>0,403</b>	0,006	<b>0,953</b>	<b>-0,352</b>	<b>1,000</b>			
qs-M	<b>0,435</b>	0,053	<b>0,927</b>	<b>-0,382</b>	<b>0,977</b>	<b>1,000</b>		
qe-T	<b>0,496</b>	<b>0,543</b>	0,009	0,118	-0,039	0,001	<b>1,000</b>	
qe-S	<b>0,804</b>	<b>0,913</b>	-0,058	0,079	-0,071	-0,007	<b>0,340</b>	
qs	Saale-Serien	-M	Mächtigkeit (m)					
qhol	Holstein-Serien	-T	Gesamtmächtigkeit der Tonfolgen in qe (m)					
qe	Elster-Serien	-S	Gesamtmächtigkeit der Sand-/Kiesfolgen in qe (m)					
<b>0,713</b>	Korrelation signifikant (Wahrscheinlichkeit $\geq 90$ %)							
<u>0,316</u>	Korrelation eingeschränkt signifikant (Wahrscheinlichkeit $\geq 80$ %)							
-0,126	Korrelation nicht signifikant (Wahrscheinlichkeit $< 80$ %)							

Tab. 3: Multiple (listenweise berechnete) Pearson-Korrelationskoeffizienten für die Basispositionen und Mächtigkeiten der Elster-, Holstein- und Saale-Serien sowie die Gesamtmächtigkeiten der Ton- und Sand-/Kiesfolgen in den Elster-Serien für die Bohrungsklassen "Rinne" und "Subrosion"

### Korrelation und Regression

Bei den **Elster-Serien** sind die Korrelationskoeffizienten zwischen der Basisposition und der Mächtigkeit für beide Klassen, insbesondere die Klasse "Rinne", sehr hoch und positiv (Tab. 3). Darin kommt die reliefgesteuerte Abhängigkeit der Mächtigkeit der elsterzeitlichen Rinnenfüllung von der Tiefe der Gorlebener Rinne zum Ausdruck (s. 5.).

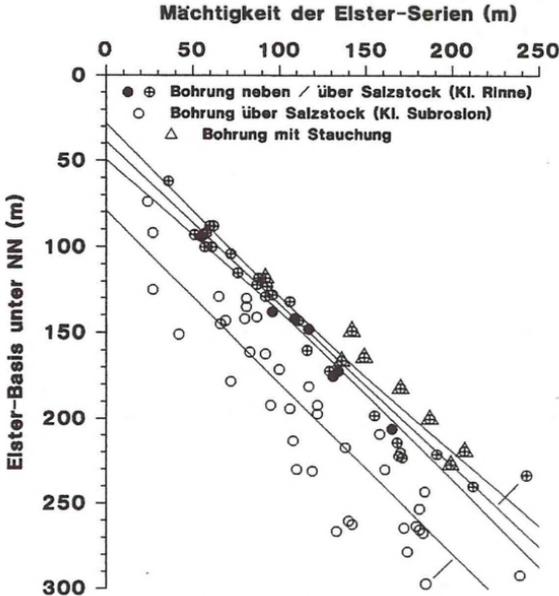


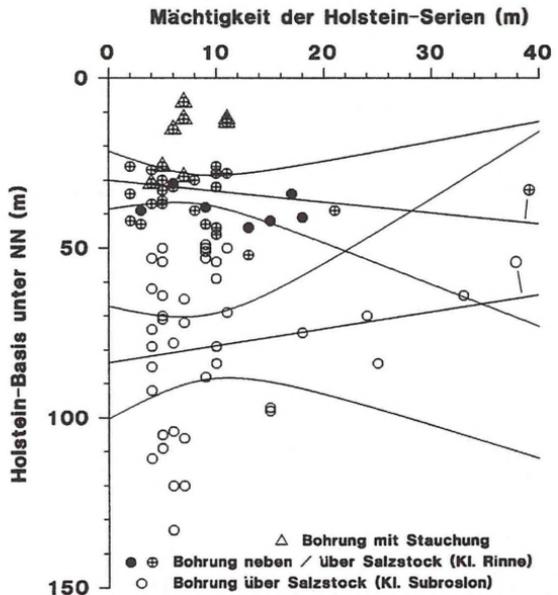
Abb. 1: Abhängigkeit der Mächtigkeit der elsterzeitlichen Ablagerungen in der Gorlebener Rinne von der Position ihrer Basis bei den Bohrungen der Klassen "Rinne" und "Subrosion" (mit den Regressionsgeraden für die Bohrungen beider Klassen und dem 95%-Vertrauensintervall für die Klasse "Rinne")

Das Streudiagramm für die Beziehung zwischen Basisposition und Mächtigkeit läßt eine differenziertere Betrachtung für beiden Klassen zu (Abb.1): Der durch die Regressionsgerade für die Bohrungen der Klasse "Rinne" beschriebene (statistisch signifikante) Zusammenhang zwischen der Mächtigkeit der Elster-Serien und der Lage ihrer Basis ist für die Auffüllung der Gorlebener Rinne während der Elster-Eiszeit charakteristisch. Die Punkte für die Bohrungen der Klasse "Subrosion" liegen mehr oder weniger deutlich darunter. Ihr Abstand zur Regressionsgeraden für die Klasse "Rinne" ist ein Maß für die subrosionsbedingte Absenkung der Elster-Basis an der jeweiligen Bohrung. Er kann mit Hilfe der Formel für die Regressionsgerade berechnet werden. Danach ist die Elster-Basis bei den Bohrungen der Klasse "Subrosion" um maximal 101 m, im Mittel um 47 m gegenüber dem Ausgangsniveau abgesenkt worden. Diese Werte sind nicht "setzungsbereinigt" und daher etwas höher als die für die Holstein-Serien berechneten Absenkungsbeträge (s.u. und 7.). Die Absenkungsbeträge steigen mit zunehmender Tiefe der Elster-Basis und zunehmender Mächtigkeit an. Daher vergrößert sich der Abstand zwischen den Regressionsgeraden für die beiden Klassen mit zunehmender Mächtigkeit und Tiefe der Basispositionen von

rund 40 m auf etwa 50 m. Verantwortlich sind insbesondere diejenigen Bohrungen über dem Salzstock, bei denen gut wasserdurchlässige Sedimente direkt Salzgestein des Salzstocks überlagern (s. 2.). Dort hat möglicherweise noch während der Elstereiszeit Subrosion stattgefunden.

Bei den **Holstein-Serien** weist keine der beiden Klassen eine nennenswerte oder gar signifikante Korrelation zwischen Mächtigkeit und Lage der Basis auf (Tab. 3). Da die Lage der Holstein-Basis auch nicht mit der Basisposition und Mächtigkeit der Elster-Ablagerungen korreliert ist, muß die Gorlebener Rinne bereits zu Beginn der Holstein-Warmzeit auf ein weitgehend einheitliches Niveau aufgefüllt gewesen sein (s. 5.). Die Beschränkung der Holstein-Vorkommen auf die Rinne belegt andererseits, daß sie noch ein eigenständiger Sedimentationsraum gewesen sein muß.

Abb. 2: Abhängigkeit der Mächtigkeit der holsteinwarmzeitlichen Ablagerungen in der Gorlebener Rinne von der Position ihrer Basis bei den Bohrungen der Klassen "Rinne" und "Subrosion" (mit den Regressionsgeraden und zugehörigen 95%-Vertrauensintervallen)



Im Streudiagramm werden die Beziehungen zwischen Basisposition und Mächtigkeit durch die flache Lage der Regressionsgeraden und die Breite der umgebenden 95%-Vertrauensbereiche bei den Bohrungen beider Klassen deutlich (Abb. 2). Bei näherungsweise übereinstimmender (geringer) Bandbreite der Mächtigkeiten liegen die Punkte für die Klasse "Subrosion" im Streudiagramm überwiegend unterhalb derer für die Klasse "Rinne". Dieser Befund deutet auf nachträgliche subrosionsbedingte Absenkung der holsteinzeitlichen Ablagerungen bei den Bohrungen der Klasse "Subrosion" hin.

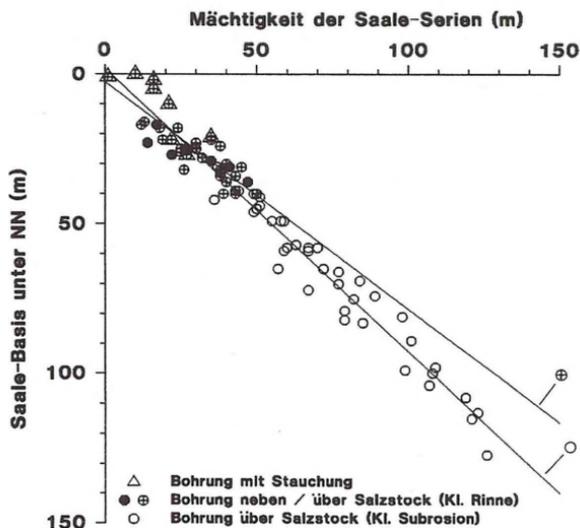


Abb. 3: Abhängigkeit der Mächtigkeit der saalezeitlichen Ablagerungen in der Gorleber Rinne von der Position ihrer Basis bei den Bohrungen der Klassen "Rinne" und "Subrosion" (mit den Regressionsgeraden für die Bohrungen beider Klassen).

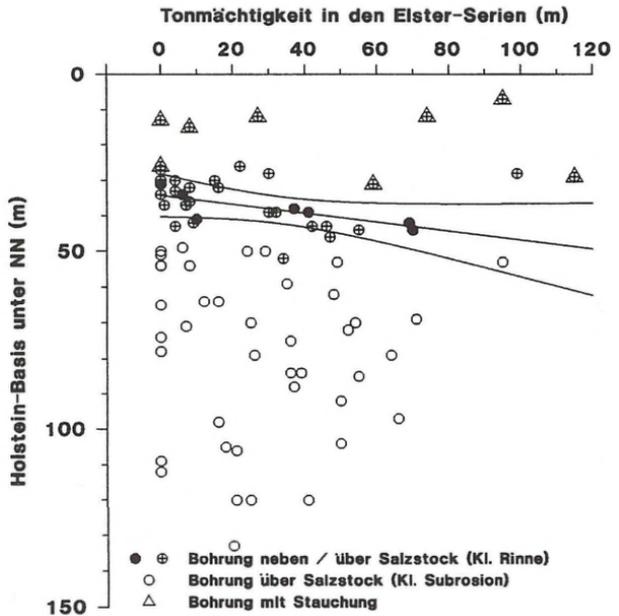
Basisposition und Mächtigkeit der **Saale-Serien** sind bei den Bohrungen der Klasse "Rinne" hoch, bei denen der Klasse "Subrosion" nahezu perfekt miteinander korreliert (Tab. 3). Aus dem Streudiagramm in Abb. 3 wird ergänzend deutlich, daß sich die klassenspezifischen Bandbreiten beider Größen kaum überschneiden. Im Gegensatz zu den Elster- und Holstein-Serien sind also die Bohrungen der Klasse "Subrosion" durch tiefere Basispositionen und höhere Mächtigkeiten als bei der Klasse "Rinne" gekennzeichnet. Der steilere Verlauf der Regressionsgeraden für die Bohrungen der Klasse "Subrosion" als für die der Klasse "Rinne" deutet auf ein steileres bzw. sich vertiefendes subrosionsgeprägtes Relief des Rinnenbodens hin.

Im Hinblick auf den Einfluß der **Setzung des Lauenburger-Ton-Komplexes** auf die heutigen Positionen der Holstein-Ablagerungen bestätigen die Korrelationsrechnungen (Tab. 3) und das Streudiagramm in Abb. 4 das Ergebnis der Faktorenanalyse: Das heutige Niveau der Holstein-Basis ist bei keiner der beiden Bohrklassen mit der Tonmächtigkeit oder der Sand- und Kiesmächtigkeit in den Elster-Serien korreliert. Setzung von Lauenburger Ton kann also für die heutigen Holstein-Positionen keine maßgebliche Bedeutung haben.

Im Streudiagramm (Abb. 4) ist jedoch bei den Bohrungen neben dem Salzstock eine klare Abhängigkeit der Lage der Holstein-Basis von der Tonmächtigkeit in den Elster-Ablagerungen zu erkennen (Korrelationskoeffizient 0,804). Die zugehörige Regressionsgerade kennzeichnet das "setzungsbereinigte" mittlere Ausgangsniveau der Holstein-Basis vor Subro-

sionsbeginn. Mit Hilfe der Formel für die Gerade kann der Einfluß der Setzung auf die heutigen Holstein-Positionen berechnet und so bei der Beurteilung des Subrosionsausmaßes quantitativ berücksichtigt werden.

Abb. 4: Abhängigkeit der Lage der Holstein-Basis von der Gesamtmächtigkeit von Toneinschaltungen in den elstereiszeitlichen Ablagerungen (mit der Regressionsgeraden und zugehörigem 95%-Vertrauensintervall für die Bohrungen neben dem Salzstock)



Für Abb. 5 sind die Basispositionen der Holstein-Serien anhand dieser Formel so umgerechnet worden, daß das "setzungsberichtigte" Ausgangsniveau nun als horizontale Gerade beim Niveau Null erscheint. Die für die einzelnen Bohrungen gültigen, allein subrosionsbedingten Absenkungsbeiträge können direkt abgelesen werden (Höchstbetrag: 96 m).

Hinweise oder gar Belege für **eistektonisch bedingte Absenkung** der holsteinzeitlichen Sedimente liefern die statistischen Auswertungen nicht. Vielmehr deuten folgende Beobachtungen darauf hin, daß - entsprechend den in 5. formulierten Vorstellungen - solche Bewegungen gerade nicht in größerem Ausmaß stattgefunden haben:

- In den Streudiagrammen für die Holstein- und Saale-Serien (Abb. 2 u. 3) liegt bei fünf der acht Bohrungen mit faltenartiger eistektonischer Stauchung die Holstein- bzw. Saale-Basis erwartungsgemäß höher als auf Grund der normalen Beziehung zwischen den jeweiligen Parametern zu erwarten wäre. Weniger deutlich gilt das sogar für die Basis der elstereiszeitlichen Ablagerungen (Abb. 1). Alle acht Bohrungen gehören der Klasse "Rinne" an.

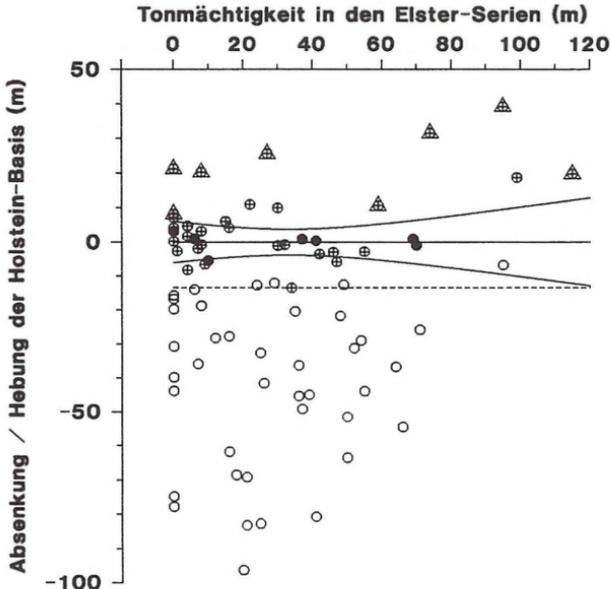


Abb. 5: Beziehung zwischen dem "setzungs-bereinigten" rechnerischen Absenkungs- bzw. Hebungsbetrag der Holstein-Basis und der Gesamtmächtigkeit von Toneinschaltungen in den elstereiszeitlichen Ablagerungen (mit der Regressionsgeraden und zugehörigem 95%-Vertrauensintervall für die Bohrungen neben dem Salzstock; gestrichelte horizontale Linie: Niveau der tiefsten Bohrung der Klasse "Rinne"; Bedeutung der Symbole s. Abb. 1-4)

- Sieben der neun Bohrungen mit eistektonischen Schuppen aus holsteinzeitlichem Material in den Saale-Ablagerungen gehören der Klasse "Subrosion" an. Die Schuppen liegen umso tiefer, je tiefer die Basis der Holstein- bzw. Saale-Serien liegt. Diese Verteilung ist am einfachsten durch nachträgliche Absenkung der Schuppen gemeinsam mit dem autochthonen Vorkommen zu erklären.
- Bohrungen mit tiefer Position der Holstein-Basis weisen immer auch entsprechend tiefe Positionen der Elster-Basis auf. Die gegenüber dem jeweiligen Ausgangsniveau erkennbaren Absenkungsbeträge stimmen für beide Einheiten bei allen Bohrungen annähernd überein. Wäre eistektonische Absenkung die entscheidende Ursache tiefer Positionen, müßte die Basis der Kompensationszone für den faltenartigen Zusammenschub bzw. der Abscherungshorizont für Schuppen also unterhalb der Elster-Basis gelegen haben. Dafür gibt es weder Hinweise, noch ist dies auf Grund der petrographischen Ausbildung der Rinnenfüllung wahrscheinlich.

Zusammenfassend sind die statistischen Ergebnisse wie folgt zu werten:

- Die Gorlebener Rinne war zu Beginn der Holstein-Warmzeit auf ein weitgehend einheitliches Niveau aufgefüllt. Reliefunterschiede im damaligen Boden der Gorlebener Rinne sind daher für die tiefen Positionen der hol-

steinzeitlichen Ablagerungen über dem Salzstock (Bohrungsklasse "Subrosion") nicht verantwortlich.

- Hinweise oder gar Belege dafür, daß Eistektonik für die tiefen Basispositionen der Holstein-Ablagerungen mitverantwortlich oder gar maßgeblich verantwortlich sind, gibt es nicht. Die bisher bekannten Lagerungsstörungen können nicht mit den Auswirkungen von Subrosion verwechselt werden.
- Setzung im unterlagernden Lauenburger-Ton-Komplex hat ein zu geringes Ausmaß gehabt, um allein damit die besonders tiefen Positionen der Holstein-Serien erklären zu können. Das Setzungsausmaß wird bei der Berechnung von Subrosionsraten berücksichtigt.
- Die tiefen Positionen der Holstein-Basis über dem Salzstock Gorleben können maßgeblich nur durch saaleeiszeitliche Subrosion erklärt werden. Bohrungen, an denen Subrosion stattgefunden hat, können statistisch von solche ohne Subrosion unterschieden werden.

## 7. BERECHNUNG POSTHOLSTEINZEITLICHER SUBROSIONSRATEN

Die gesuchte postholsteinzeitliche Subrosionsrate ist der Quotient aus dem Absenkungsbetrag der Holsteinbasis und der Subrosionsdauer. Der Subrosionszeitraum kann wie folgt eingengt werden: Bereits vor Ablagerung der weichseleiszeitlichen Serien hatte die Subrosion nur noch ein so geringes Ausmaß, daß sie mit dem hier angewendeten Verfahren nicht nachgewiesen werden kann (s. 6.). Auch während des vorangegangenen Eem-Interglazials hat Subrosion in relevantem Ausmaß nicht stattgefunden, andernfalls müßten Reste eemzeitlicher Ablagerungen in Subrosionshohlformen überliefert worden sein. Das ist jedoch nicht der Fall. Der für die Berechnung heranzuziehende Zeitraum reduziert sich damit auf die Saale-Eiszeit. Dafür werden 100.000 Jahre angesetzt (DUPHORN 1986). Berechnungen auf Basis anderer Angaben zur Dauer der Saale-Eiszeit (z.B. BGR 1990: 105.000 Jahre) führen nur zu geringfügig anderen Werten. Zwar liegen deutliche Hinweise darauf vor, daß die Subrosion nicht während der gesamten Saale-Eiszeit gleichmäßig abgelaufen ist (APPEL & KREUSCH 1984, DUPHORN 1986, DUPHORN et al. 1983), doch erlaubt das hier angewendete Verfahren eine weitere Eingrenzung innerhalb der Saale-Eiszeit nicht. Der angenommene Subrosionszeitraum führt also zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Subrosionsraten.

Die Lage der Holstein-Basis bei den Bohrungen der Klasse "Rinne" entspricht mit 26 bis 52 m unter NN für die Bohrungen ohne eistektonischen Stauchung etwa den aus anderen Gebieten Norddeutschlands bekannten Verhältnissen (KUSTER & MEYER 1979, DUPHORN 1987, DUPHORN et al.

1983). Es liegt nahe, in diesem Bereich das durch Subrosion unbeeinflusste Niveau zu sehen. Tatsächlich dürfte es wegen des isostatischen Aufstiegs Norddeutschlands nach Ende der Weichsel-Eiszeit eher am unteren Rand der angegebenen Bandbreite gelegen haben (DUPHORN 1987: rund 50 m unter NN). Für die Berechnung von Subrosionsraten ist diese Frage jedoch unerheblich, da der Raum Gorleben vom isostatischen Aufstieg gleichmäßig erfaßt worden ist.

Nimmt man als Maß für den mittleren subrosionsbedingten Absenkungsbetrag die Differenz der Mittelwerte für die Basispositionen der holsteinzeitlichen Ablagerungen bei den Bohrung der Klassen "Subrosion" und "Rinne" (Tab. 2: 46 m), so ergibt sich eine durchschnittliche saaleiszeitliche Subrosionsrate von 0,46 mm pro Jahr. Aus der entsprechenden Differenz für die elstereiszeitlichen Ablagerungen ergeben sich 0,48 mm pro Jahr.

Da neben Subrosion auch Setzung des Lauenburger Tons einen erkennbaren Einfluß auf die Position der Holstein-Basis gehabt hat (s. 6. u. Abb. 4), müssen zur Berechnung von Subrosionsraten die "setzungsbereinigten" Absenkungsbeträge benutzt werden. Diese Beträge müssen angesichts der Bandbreite der Basispositionen der holsteinzeitlichen Ablagerungen bei den Bohrungen der Klasse "Rinne" und der Überschneidung der rechnerischen Absenkungsbeträge der Holstein-Basis bei den beiden Bohrungsklassen "Rinne" und "Subrosion" (Abb. 5) zunächst genauer festgelegt werden. Dazu bestehen verschiedene Möglichkeiten, die unterschiedliche, jedoch ähnliche Ergebnisse liefern. Davon sollen hier zwei vorgestellt werden:

- Berechnet man die Subrosionsraten für die Bohrungen der Klasse "Subrosion" direkt aus den Abständen zur "setzungsbereinigten" mittleren Ausgangsposition (horizontale Regressionsgerade für die Klasse "Rinne" in Abb. 5), so ergeben sich Absenkungsbeträge von maximal 96 m und im Mittel von 41 m. Das entspricht Subrosionsraten von maximal 0,96 mm/a bzw. im Mittel 0,41 mm/a.
- Will man nur diejenigen Bohrungen in die Berechnung einbeziehen, bei denen die Lage der Holstein-Basis eindeutig subrosionsbedingt ist, so müssen die Absenkungsbeträge um den höchsten bei der Klasse "Rinne" auftretenden "setzungsbereinigten" Absenkungsbetrag (13,5 m) vermindert werden. Das entsprechende Niveau ist in Abb. 5 gekennzeichnet. Es wird von 36 Bohrungen der Klasse "Subrosion" unterschritten. Für sie ergibt sich gegenüber diesen Niveau ein maximaler bzw. mittlerer Absenkungsbetrag von 83 m bzw. 31 m, entsprechend rechnerischen Subrosionsraten von maximal 0,83 mm/a und im Mittel 0,31 mm/a.

Auf entsprechende Weise lassen sich für Bohrungen oberhalb der Regressionsgeraden in Abb. 4 und 5 theoretisch auch rechnerische Hebungsraten

berechnen. Da für mehrere dieser Bohrungen Stauchungsphänomene belegt sind, können hohe Positionen der Holstein-Basis jedoch nicht im Sinne von postholsteinzeitlichem Salzaufstieg interpretiert werden, wenngleich Salzaufstieg nicht vollends ausgeschlossen werden kann.

Die Subrosionsraten stimmen mit den bereits früher anhand von Lageveränderungen der Holstein-Serien berechneten Werten (DUPHORN 1986, 1987; DUPHORN et al. 1983, APPEL & HÄBLER 1993) weitgehend überein. Für ihre Plausibilität spricht u.a., daß sie recht gut zu den für die Elster-Basis berechenbaren Raten passen, die allerdings durchweg etwas höher liegen (s. dazu 6.).

Die Ursachen für die beträchtliche saaleeiszeitliche Subrosion stehen wahrscheinlich mit der Existenz der Gorlebener Rinne und den kaltzeitlichen hydraulischen Verhältnissen in der Rinne zusammen. Das kann jedenfalls aus der Konzentration von Bohrungen mit besonders starker Subrosion auf die tiefsten Teile der Gorlebener Rinne abgeleitet werden. Für die Erklärung der sehr unterschiedlichen Subrosionsintensität innerhalb der Gorlebener Rinne versagen einfache Interpretationsansätze bislang. So haben tiefe Positionen des Salzspiegels zu Beginn der Saale-Eiszeit saaleeiszeitliche Subrosion wider Erwarten keineswegs generell verhindert: Berechnet man mit Hilfe des nachholsteinzeitlichen Absenkungsbetrages der Holstein-Basis die mutmaßliche Ausgangslage des Salzspiegels vor Subrosionsbeginn so ergibt sich zwar die generelle Tendenz, daß die Subrosionsintensität mit zunehmender Tiefe des Ausgangsniveaus abnimmt. Doch ist andererseits selbst bei einer Ausgangsposition des Salzspiegels von rund 280 m unter NN noch eine subrosionsbedingte Absenkung von rund 45 m aufgetreten. Auch das Vorhandensein einer Schutzschicht aus Tertiär-Ton über dem Gipshut hat starke Subrosion keineswegs verhindert.

Die berechneten Subrosionsraten passen nicht gut zu den von BORNEMANN & FISCHBECK (1986) aus der postelsterzeitlichen Hutgesteinsentwicklung (s. 2.) berechneten Raten, die deutlich unter den hier berechneten Werten liegen. Die Unterschiede sind nur zum Teil geklärt. Zweifellos spielen die unterschiedlichen Methoden zur Berechnung der einfließenden Absenkungsbeträge eine wichtige Rolle. Außerdem beziehen sich die Berechnungen nicht auf dieselben Bohrungen, da die beiden Verfahren jeweils das Vorhandensein bestimmter Gesteinseinheiten voraussetzen. Daher sind in die Berechnungen von BORNEMANN & FISCHBECK (1986) eine Reihe von Bohrungen eingeflossen, in denen Holstein-Serien nicht angetroffen worden sind. Andererseits ist bei einigen Bohrungen mit sehr tiefen Holstein-Positionen kein geschichtetes Hutgestein angetroffen worden. Bei diesen Bohrungen ergeben sich also nach der hier vorgestellten Methoden hohe Subrosionsraten, während nach der Methode von BORNEMANN & FISCHBECK (1986) Subrosion überhaupt nicht stattgefunden haben soll. Diese Diskre-

panzen müssen vor Beurteilung der saaleiszeitlichen Subrosion im Hinblick auf die Sicherheit eines möglichen Endlagers im Salzstock Gorleben geklärt werden.

## LITERATUR

- APPEL, D. (1981): Berechnungen von Salzaufstiegs- und Subrosionsraten am Salzstock Gorleben mit Hilfe geologischer Schnitte.- In: Bundesministerium für Forschung und Technologie, Hrsg.: Entsorgung. Zwischenergebnisse zum Salzstock Gorleben: 254-259, 2 Abb.; Bonn.
- APPEL, D. & HÄBLER, W. (1993): Berechnung nachholsteinzeitlicher Subrosionsraten für den Salzstock Gorleben anhand von Lageveränderungen holsteinzeitlicher Ablagerungen.- 100 S., 29 Abb., 5 Tab.; Hannover. [Gutachten]
- APPEL, D. & KREUSCH, J. (1984): Gutachterliche Stellungnahme zum Zusammenfassenden Zwischenbericht über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchung in Gorleben der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt vom Mai 1983.- 122 S. 10 Abb., 2 Tab.; Hannover.
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1990): Übertägige geowissenschaftliche Erkundung des Standortes Gorleben. Zusammenfassender Bericht. Stand 1.1.1990.- 369 S., 118 Abb., 62 Tab., 39 Anl.; Hannover (Archiv-Nr. 108880).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1995): Projekt Gorleben. Stellungnahme zu Gutachten, die im Auftrag des NMU zur Eignungshöflichkeit des Standortes Gorleben angefertigt wurden. Abschlußbericht zum Arbeitsbericht 9G/31-461000.- 134 S., 16 Abb.; Hannover (Archiv-Nr. 114026).
- BORNEMANN, O. & FISCHBECK, R. (1986): Ablaugung und Hutgesteinsbildung am Salzstock Gorleben.- Z. dt. geol. Ges., **137**: 71-83, 4 Abb., 1 Tab., 2 Taf.; Hannover.
- DUPHORN, K. (1986): Das subrosive Sicherheitsrisiko bei der geplanten Endlagerung von radioaktiven Abfällen im Salzstock Gorleben aus quartärgeologischer Sicht.- Z. dt. geol. Ges., **137**: 105-120, 5 Abb.; Hannover.
- DUPHORN, K., mit einem Beitrag von A. RICHTER (1987): Die quartäre Subrosion am Endlager Salzstock Gorleben.- Eine vergleichende Betrachtung der Arbeitsmethoden, Bohrbefunde, Deutungen und sicherheitsgeologischen Bewertungen.- Meyniana, **39**: S. 41-69; Kiel.
- DUPHORN, K., KABEL, CH., SCHNEIDER, U. & SCHRÖDER, P. (1983): Quartärgeologische Gesamtinterpretation Gorleben. Abschlußbericht.- 265 S., 40 Abb., zahlr. Anl.; Kiel / Wellington.
- HARRES-PICKEL - HARRES-PICKEL CONSULT (1992): Hydrogeologisches Untersuchungsprogramm Gorleben. Abschlußbericht.- Fuldata (35 Bände, umfangreiche Dokumentation, zahlreiche Beiträge verschiedener Autoren).
- KUSTER, H. & MEYER, K.- D. (1979): Glaziäre Rinnen im mittleren und nordöstlichen Niedersachsen.- Eiszeitalter und Gegenwart, **29**: 135-156, 5 Abb., 3 Tab., 1 Kt.; Hannover.
- MÜLLER, H. (1986): Altquartäre Sedimente im Deckgebirge des Salzstockes Gorleben.- Z. dt. geol. Ges., **137**: 85-95, 5 Abb.; Hannover.
- SCHNEIDER, U. (1981): Ergebnisse der quartärgeologischen Oberflächenkartierung.- In: Bundesministerium für Forschung und Technologie, Hrsg.: Entsorgung. Zwischenergebnisse zum Salzstock Gorleben: 241-251, 3 Abb.; Bonn.
- SCHRÖDER, P. (1988): Aufbau und Untergliederung des Niederterrassenkörpers der Unterelbe.- Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover, **27**: 119 S., 55 Abb., 4 Tab.; Hannover.
- ZIRNGAST, M. (1991): Die Entwicklung des Salzstocks Gorleben - Ergebnis einer strukturgeologischen Bearbeitung.- Geol. Jb., **A 132**: 3-31, 17 Abb., 2 Tab., 1 Taf.; Hannover.

Anschriften der Autoren: Dr. Detlef Appel, PanGeo - Geowissenschaftliches Büro, Ibykusweg 23, 30629 Hannover. Tel.: 0511 - 95 86 710; Fax: 0511 - 95 86 711  
 Dr. Walter Häbler, Hüttenstraße 10, 31162 Bad Salzdetfurth (OT Breinum).  
 Tel.: 05060 - 96 03 63; Fax: 05060 - 96 03 64