

**Zur Ausbildung und Gestaltung von Böschungssystemen bei der Gewinnung
von Sand und Kies**

–

Entwicklung eines Planungssystems

Von der naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Hannover

zur Erlangung des Grades

Doktor der Naturwissenschaften

Dr. rer. nat.

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Geol. GERNOT BODE

geboren am 10.12.1967 in Hannover

(2005)

Referentin: Prof. Dr. Jutta Winsemann
1. Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Stefan Heusermann
2. Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Günter Gruhn
Tag der Promotion: 15.07.2005

KURZFASSUNG

Die Gestaltung von Böschungssystemen – als Erdbauwerke im Sinne der DIN 4084 – bei der Gewinnung von Sand und Kies steht im Spannungsfeld zwischen den Interessen der Abbautreibenden und Aufsichtsbehörden. Einerseits ist den Abbautreibenden aus rohstoffwirtschaftlichen Gründen an einer möglichst steilen Böschung gelegen. Andererseits ist den Aufsichtsbehörden aus genehmigungsrechtlichen Gründen an einer ausreichend standsicheren und entsprechend flachen Böschung gelegen.

Für Standsicherheitsnachweise von Wasserwechselzonen und Unterwasserböschungen stehen nach dem derzeitigen Stand der Technik und Wissenschaft keine geeigneten Berechnungsmodelle zur Verfügung. Dies wird aus verschiedenen Gründen auch in absehbarer Zukunft so bleiben.

Im Vordergrund der Untersuchung stand die Entwicklung eines Planungssystems, mit dem durch eine ganzheitliche Betrachtung der lagerstätten-, gewinnungsverfahren- und gewinnungsgerätebedingten Einflussfaktoren nachvollziehbare Empfehlungen zur standortabhängigen Gestaltung von Böschungssystemen gegeben werden können.

Mit Überwindung der anwendungsspezifischen Beschränkungen von erdstatischen Verfahren in DIN 4084 und kontinuumsmechanischen Methoden konnte dies unter anderem durch statistische Auswertung von zahlreichen Echolotpeilungen aus den wichtigsten Sand- und Kieslagerstätten in Deutschland – unter granulometrischer, stratigraphischer und genetischer Zuordnung von charakteristischen Böschungssystemen zu verschiedenen Bodenarten und -gruppen oder Lagerstättentypen und -provinzen – erreicht werden. Bei Verfügbarkeit von lagerstättenkundlichen Informationen – wie aussagekräftige Schichtenverzeichnisse von Aufschlussbohrungen mit zugehörigen Ergebnissen von Korngrößenanalysen – und mit Vorgaben aus der jeweiligen Abbauplanung wird damit erstmalig überhaupt eine praxisorientierte Gestaltung von standsicheren Wasserwechselzonen und Unterwasserböschungen ermöglicht.

Schlagerworte: Böschungssystem – Wasserwechselzone – Unterwasserböschung – Sand- und Kiesgewinnung

ABSTRACT

The design of slope systems – as earth structures in the sense of DIN 4084 – through the mining of sand and gravel is often a cause of conflict between diverging interests of mining industry and supervisory authorities. On the one hand the mining industry is interested in the steepest slopes possible for economic reasons. On the other hand supervisory authorities are interested in sufficiently stable and accordingly flat slopes for legal reasons.

For the stability analysis of the ranges between low and high water level with underwater slopes, there are at present no suitable computational models available. This will remain so in the foreseeable future for a number of reasons.

The aim of this investigation was to develop a planning system which can provide reasonable recommendations for the design of slope systems, by means of integrative consideration of different factors as deposit-type or mining-method and dredger-type.

Overcoming the specific restrictions of earthstatic procedures in DIN 4084 and those of numerical methods, this was achieved mainly by statistical evaluation of numerous echo soundings from the most important sand- and gravel-deposits in Germany – classifying slope systems by granulometric, stratigraphic and genetic data to different soil-types and -groups or deposit-types and -provinces. Given the availability of geological information – such as meaningful drilling logs and associated results of grain size distribution analyses – combined with the specifications of particular extraction planning, the possibility for a practise-related design of stable ranges between low and high water level with underwater slopes is presented here for the first time.

Keywords: slope system – range between low and high water level – underwater slope – granular soil mining

MEINEN ELTERN

PROF. DR. HELMUT BODE UND GUNHILD BODE, GEB. HERSCHLER

DANKSAGUNG

Die Motivation zu der vorliegenden Arbeit ist durch meine langjährige Mitarbeit im INGENIEURBÜRO DR.-ING. V. PATZOLD, Kleiberweg 20, 21244 Holm-Seppensen, entstanden. Herrn Dr.-Ing. Volker Patzold gilt mein aufrichtiger Dank für seine großzügige Unterstützung und energische Förderung in den vergangenen Jahren ebenso wie den Kollegen für ihre fachlichen Hinweise.

Frau Prof. Dr. Jutta Winsemann¹ habe ich für die Übernahme des Referates und Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Heusermann² für die Übernahme des Korreferates zu danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Günter Gruhn³ gilt mein besonderer Dank für die zahlreichen Diskussionen und methodischen Hinweise. Er hat durch seine umsichtige Anleitung in vielfältiger Weise zum offensichtlichen Gelingen der vorliegenden Studie beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Fieg³ möchte ich für die Überlassung eines Arbeitsplatzes und von Arbeitsmitteln im Arbeitsbereich Prozess- und Anlagentechnik meinen Dank aussprechen.

Herrn Dipl.-Ing. Lothar Fritze⁴ und Herrn Dipl.-Ing. Martin Detert⁵ gilt mein herzlicher Dank für ihre ausführlichen Erläuterungen zu bodenmechanischen Fragestellungen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Johann Buß⁶ habe ich für die Einführung zu und Überlassung der Software [CGU SIEVE](#), [CGU STABILITY](#), [CGU FLOW-2D](#) und [CGU TRANSIENT](#) zu danken.

Herrn Dr. Günter Leydecker² und Herrn Dipl.-Ing. Timo Schmitt² gilt mein herzlicher Dank für ihre ausführlichen Darlegungen zu bodendynamischen Fragestellungen.

Herrn Dipl.-Ing. Holger Fitschen³ als Systemadministrator möchte ich für die Unterstützung bei der Arbeit mit Hard- und Software meinen Dank aussprechen.

Einigen Hochschullehrern sowie zahlreichen Kollegen und Freunden aus der Forschung und Industrie sei für vielfältige Hilfestellungen gedankt: Dr. Holger Busche², Dr. Jörg Elbracht⁴, Dr. Gerd Hagenuth⁷, Dipl.-Geol. Carsten Hansen⁸, Dr. Wolfgang Irrlitz⁴, Dr. Lothar Lahner², Dipl.-Math. Florian Leydecker⁹, Dr. Friedrich Mauthe⁹, Dr.-Ing. Hermann Meyer⁴, Dr.-Ing. Karl-Heinz Rehm¹⁰, Dr. Torsten Richter¹¹, Prof. Dr. Wilfried Schneider³, Prof. Dr. Karl Stattegger¹², Dr. Jens Steffahn¹³, Dr. Hans-Jürgen Weymann⁹, Dr. Frank Wrobel¹⁴.

Die Forschungsarbeit wurde dankenswerterweise mit Mitteln der DEUTSCHEN BUNDESSTIFTUNG UMWELT, An der Bornau 2, 49090 Osnabrück, gefördert.

Meinem Freund und Kollegen Matthias Hartmann gilt mein ganz persönlicher Dank für seine immerwährende Hilfsbereitschaft. Er hat durch seinen ständigen Zuspruch in der ihm eigenen Weise zur abschließenden Fertigstellung der vorliegenden Arbeit beigetragen.

Meinem Schwiegervater Hermann Klein habe ich für die Durchsicht des Manuskriptes im Hinblick auf Fragen zur Semantik und Syntaktik zu danken.

Meiner Frau Tanja Bode schließlich schulde ich herzlichen und aufrichtigen Dank für ihre liebevolle Geduld und uneingeschränkte Loyalität.

¹ Universität Hannover

² Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

³ Technische Universität Hamburg-Harburg

⁴ Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung

⁵ Universität Karlsruhe

⁶ Firma Gesellschaft für Grundbau und Umwelttechnik

⁷ Firma Rhein Main Kies und Splitt

⁸ Technische Universität Clausthal

⁹ Universität Hannover

¹⁰ Firma Geotechnik Labor

¹¹ Universität Hildesheim

¹² Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

¹³ Ruhr-Universität Bochum

¹⁴ Firma Geoconsult Skowronek & Wrobel

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	GEOLOGIE UND VERBREITUNG DER SAND- UND KIESLAGERSTÄTTEN IN DEUTSCHLAND	6
3	GLIEDERUNG DES BÖSCHUNGSSYSTEMS BEIM ABBAU VON SAND UND KIES	14
4	EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE STANDSICHERHEIT VON BÖSCHUNGSSYSTEMEN	16
4.1	<i>Überwasserböschung</i>	16
4.2	<i>Wasserwechselzone</i>	16
4.3	<i>Unterwasserböschung</i>	17
4.3.1	Lagerstättenbedingte Einflussfaktoren	17
4.3.1.1	Materialabhängige Einflussfaktoren	17
4.3.1.2	Materialunabhängige Einflussfaktoren	19
4.3.2	Gewinnungsverfahrenbedingte Einflussfaktoren	24
4.3.2.1	Kontrollierte Baggerung	24
4.3.2.2	Unkontrollierte Baggerung	27
4.3.2.3	Saugbaggerung	30
4.3.3	Gewinnungsgerätebedingte Einflussfaktoren	31
4.3.3.1	Schwimmende Gewinnungsgeräte	32
4.3.3.2	Landgestützte Gewinnungsgeräte	36
5	STAND DES WISSENS BEI DER AUSBILDUNG VON BÖSCHUNGSSYSTEMEN	38
5.1	<i>Überwasserböschung</i>	38
5.2	<i>Wasserwechselzone</i>	38
5.2.1	Erfahrungen und Empfehlungen aus der Literatur	38
5.3	<i>Unterwasserböschung</i>	39
5.3.1	Erfahrungen und Empfehlungen aus der Literatur	39
5.3.2	Vorgaben der staatlichen geologischen Dienste	42
5.3.3	Verfahren zur Berechnung der Standsicherheit von Böschungen	44
5.3.4	Numerische Simulationen	48
6	GRUNDLAGEN UND METHODEN ZUR ENTWICKLUNG DES PLANUNGSSYSTEMS	49
6.1	<i>Überwasserböschung</i>	49
6.2	<i>Wasserwechselzone</i>	49
6.2.1	Verfahren zum Geländeaufmaß	49
6.2.2	Abschätzung der Wellenauflaufhöhe	50
6.3	<i>Unterwasserböschung</i>	52
6.3.1	Kontrollierte Baggerung	52
6.3.1.1	Verfahren zur Parameterstudie	53
6.3.1.2	Ansatz zum Auftreten und zur Bewegung von Grundwasser	54
6.3.1.3	Ansatz zu ständigen Lasten	56
6.3.1.4	Ansatz zu Verkehrslasten	56

6.3.2	Unkontrollierte Baggerung	57
6.3.2.1	Verfahren zur Echolotpeilung	57
6.3.2.2	Verfahren zur Korngrößenanalyse	61
6.3.2.3	Abschätzung des Reibungswinkels	63
6.3.2.4	Ansatz zur Regressionsanalyse	66
6.4	<i>Bermen</i>	73
6.4.1	Betrachtung zu Baggertoleranzen	73
6.4.2	Betrachtung zur Saugbaggerung	74
6.4.3	Betrachtung zu Erdbeben	82
6.4.4	Betrachtung zur Bodenverflüssigung	87
7	BEOBACHTUNGEN UND AUSWERTUNGEN ZUR ENTWICKLUNG DES PLANUNGSSYSTEMS	89
7.1	<i>Wasserwechselzone</i>	89
7.1.1	Gestaltung der Wasserwechselzone	92
7.2	<i>Unterwasserböschung</i>	93
7.2.1	Kontrollierte Baggerung	114
7.2.1.1	Beanspruchung durch das Auftreten und die Bewegung von Grundwasser	114
7.2.1.2	Beanspruchung durch ständige Lasten	115
7.2.1.3	Beanspruchung durch Verkehrslasten	115
7.2.1.4	Beanspruchung durch kombinierte Lasten	115
7.2.1.5	Beanspruchung durch profilgerechte Baggerung	116
7.2.1.6	Beanspruchung durch Box-Cut Baggerung	116
7.2.1.7	Gestaltung der Unterwasserböschung	117
7.2.2	Unkontrollierte Baggerung	118
7.2.2.1	Gestaltung der Unterwasserböschung	123
7.3	<i>Bermen</i>	124
7.3.1	Berücksichtigung von Baggertoleranzen	125
7.3.2	Berücksichtigung der Saugbaggerung	128
7.3.3	Berücksichtigung von Erdbeben	132
7.3.4	Berücksichtigung der Bodenverflüssigung	135
7.3.5	Gestaltung von Bermen	135
8	PLANUNGSABLÄUFE ZUR ENTWICKLUNG DES PLANUNGSSYSTEMS	136
8.1	<i>Wasserwechselzone</i>	136
8.2	<i>Unterwasserböschung</i>	137
8.2.1	Kontrollierte Baggerung	137
8.2.2	Unkontrollierte Baggerung	140
8.3	<i>Bermen</i>	142
8.3.1	Baggertoleranzen	142
8.3.2	Saugbaggerung	143
8.3.3	Erdbeben	144
8.3.4	Bodenverflüssigung	145
9	ANWENDUNG DES PLANUNGSSYSTEMS	146
10	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	154

11	LITERATURVERZEICHNIS	156
12	NORMENVERZEICHNIS	167
13	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	169
14	TABELLENVERZEICHNIS	174
15	ANHANG	177
Anhang 1	Ergebnisse der Lagerstättenerkundung	
Anhang 2	Ergebnisse der Korngrößenanalysen	
Anhang 3	Ergebnisse der Rahmenscherversuche	
Anhang 4	Ergebnisse der Parameterstudie	
Anhang 5	Schichtenverzeichnis der Rammkernbohrung " <i>Friedrichsfeld</i> "	

Die wichtigsten Sand- und Kiesvorkommen finden sich im Norddeutschen Tiefland, in der Niederrheinischen Bucht, im Oberrheintal und im Alpenvorland (s. Abb. 1 und Kap. 2).

In weiten Teilen des Bundesgebietes, und insbesondere in den bevölkerungsreichen Ballungsgebieten, besteht ein erheblicher Bedarf, wenn auch nach Angaben des BUNDESVERBANDES DER DEUTSCHEN KIES- UND SAND-INDUSTRIE e.V. (2004) mit rückläufiger Tendenz (s. Abb. 2). Diese negative Entwicklung ist im unmittelbaren Zusammenhang mit der engen Bindung der Steine- und Erdenindustrie an die seit einigen Jahren konjunkturschwache Bauwirtschaft zu sehen.

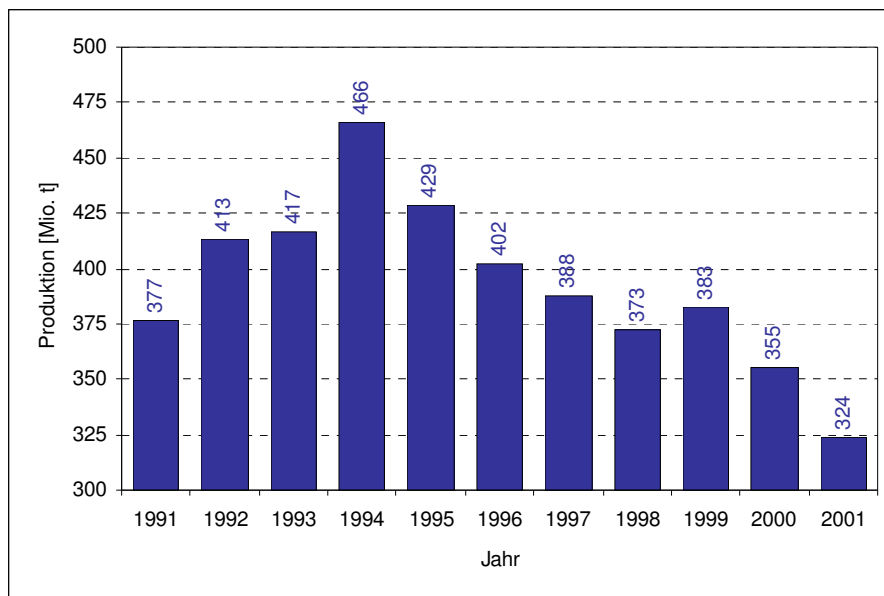


Abb. 2: Produktion an Sand und Kies in den Jahren 1991 bis 2001 in der Bundesrepublik Deutschland nach Angaben des BUNDESVERBANDES DER DEUTSCHEN KIES- UND SANDINDUSTRIE e.V. (2004).

In weiten Teilen von Deutschland, und auch in den benachbarten Ländern, erfolgt die Gewinnung von Sand und Kies aufgrund der lagerstättenkundlichen und hydrogeologischen Gegebenheiten überwiegend im Nassen. Dabei ergeben sich durch die Ausbildung von Unterwasserböschungen einerseits unvermeidbare Abbauverluste und andererseits vermeidbare Gewinnungsverluste, die in Abhängigkeit von den genehmigungsrechtlichen Auflagen und gewinnungstechnischen Aspekten unterschiedlich hoch ausfallen.

Die jeweilige Gestaltung der Böschungen steht hier im Spannungsfeld verschiedener, teilweise gegensätzlicher, Interessen. Zum einen muss die Unterwasserböschung als Erdbauwerk im Sinne der DIN 4084 (1981) und E DIN 4084 (2002) entsprechend dem derzeitigen Stand der Technik den üblichen Standsicherheitsanforderungen genügen. Zum anderen sprechen rohstoffwirtschaftliche und umweltpolitische Aspekte für eine möglichst steile Ausbildung der Böschung (s. Abb. 3) – einerseits um die sogenannten "Böschungsverluste" zu minimieren, andererseits um den Flächenverbrauch mit dem Aufschluss unverritzter Vorkommen zu reduzieren.

Das eigentliche Interesse des Abbautreibenden ist zwar langfristig auf die Maximierung des Ausbeutegrades, kurzfristig jedoch auch auf die Auslastung der Maschinenanlagen gerichtet. Letzteres kann bei nicht fachgerechter oder fahrlässiger Ausführung der Baggerung zu einer Überbaggerung der Böschung oder zu einer Böschungsrutschung und damit zu einer Übertretung der genehmigungsrechtlichen Vorgaben führen.

Das grundsätzliche Interesse der Aufsichtsbehörden ist zwar einerseits auf die Belange der Raumordnung und Rohstoffsicherung, andererseits jedoch auch auf die Gewährung der Böschungsstandsicherheit gerichtet. Letzteres kann bei überzogenen Ansprüchen zu einer Vernachlässigung der ökonomischen und ökologischen Belange mit Forderungen nach überflachen Unterwasserböschungen wie im LANDKREIS HANNOVER (1999) führen. "Im Interesse der Ressourcenschonung sollten Böschungen ... jedoch im Sinne von LANGER & VOSS (2001) ... so steil wie möglich und nur so flach wie nötig angelegt werden."

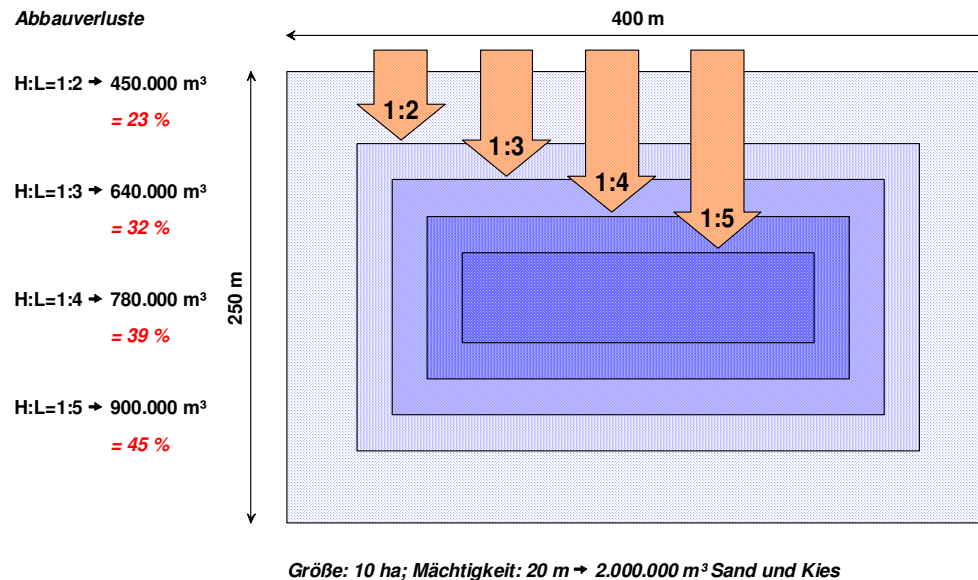


Abb. 3: Abbauverluste in Abhängigkeit von der Böschungsneigung am Beispiel einer Musterlagerstätte in Anlehnung an LANGER & VOSS (2001).

Die betriebliche Realität zeigt, dass sich die Unterwasserböschungen bei der Gewinnung von Sand und Kies in anderer Neigung einstellen, als die üblichen Berechnungsverfahren in DIN 4084 (1981) und E DIN 4084 (2002) erwarten lassen (s. PATZOLD & BODE, 2001 und PATZOLD & BODE, 2002). Mit erdstatischen Verfahren nach BISHOP, BOROWICKA, FELLENIUS, FRÖHLICH, JANBU, KREY, MORGENSTERN & PRICE und anderen Autoren in DIN 4084 werden mit vorgegebenen Bodenkennwerten die aktivierten Scherfestigkeiten in verschiedenen Ebenen, auch polygonartigen, oder kreisförmigen Gleitflächen berechnet. Der natürliche Spannungs- und Verformungszustand wird dabei jedoch ebenso wenig wie der tatsächliche Verlauf der Versagensfläche bestimmt: Diese können in erheblichem Maße von den angenommenen Verhältnissen und den erdstatischen Modellen abweichen.

Eine rechnerische Berücksichtigung von dynamischen Einwirkungen durch die unterschiedlichen Gewinnungsverfahren und Gewinnungsgeräte oder eine entsprechende Betrachtung von dynamischen Prozessen durch das ständige Auftreten von Rutschungen und Trübeströmen im Zuge der Abbautätigkeit – mit maßgeblicher Bedeutung für die jeweils herstellbare Böschungsneigung – ist damit nicht möglich.

Die daraus resultierende Unsicherheit im Hinblick auf die Gestaltung von Unterwasserböschungen spiegelt sich dann auch in der hilfswisen Abschätzung von standsicheren Böschungen bei ersatzweiser Annahme einer böschungparallelen Strömung mit der wohl auf BERNATZIK (1940) zurückgehenden und beispielsweise von MEYER & FRITZ (2001) angeführten Beziehung wider. Dabei ergibt sich die Böschungsneigung β zu:

$$\beta = \arctan \left[\frac{\gamma' \cdot \tan \varphi'}{\gamma' + \gamma_w} \cdot \frac{1}{\eta} \right] \quad [1]$$

mit:	β	Neigung der Unterwasserböschung	[°]
	γ'	Wichte des Bodens unter Auftrieb	[kN m ⁻³]
	γ_w	Wichte des Wassers	[kN m ⁻³]
	φ'	Effektiver Reibungswinkel des Bodens	[°]
	η	Sicherheit	[-]

Bei konservativem Ansatz der Eingangsparameter φ' und η – ohne auf den jeweiligen Einzelfall abgestimmte geotechnische Untersuchungen – führt die praktische Anwendung dieses vereinfachten Bemessungsverfahrens zu überflachen Böschungen. Darüber hinaus ergeben sich aus den unterschiedlichen Erfahrungswerten des anzusetzenden Parameters φ' in den einschlägigen Standardwerken widersprüchliche Aussagen zur Gestaltung der betrachteten Böschungen (s. PATZOLD & BODE, 2002).

Durch die langjährige Tätigkeit des INGENIEURBÜROS DR.-ING. V. PATZOLD als Dienstleistungsunternehmen der Steine- und Erdenindustrie steht ein umfangreiches Archiv mit lagerstättenkundlichen Unterlagen aus den wichtigsten Sand- und Kieslagerstätten in Deutschland für die lagerstätten-spezifische Auswertung im Rahmen der vorliegenden Studie zur Verfügung. Dabei handelt es sich beispielsweise um Schichtenverzeichnisse von Aufschlussbohrungen, Ergebnisse von Korngrößenanalysen und Messwerte aus Echolotpeilungen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines rechnergestützten Planungssystems, mit dem unter weitgehender Berücksichtigung der verschiedenen lagerstätten-, gewinnungsverfahren- und gewinnungsgerätebedingten Einflussfaktoren qualifizierte Empfehlungen für die standortabhängige und standsichere Gestaltung von Wasserwechselzonen, Unterwasserböschungen und Bermen im Endzustand gegeben werden können. Der Bauzustand ist in diesem Zusammenhang nur von untergeordnetem Interesse.

Die Bedeutung des von der DEUTSCHEN BUNDESSTIFTUNG UMWELT geförderten Vorhabens für den Umweltschutz ergibt sich durch die Maximierung des Ausbeutegrades in den Lagerstätten bei Gewährleistung der Böschungsstandsicherheit und damit durch eine Reduzierung des Flächenverbrauchs mit dem Aufschluss unverritzter Vorkommen.

Durch die vorliegende Studie werden die anwendungsspezifischen Beschränkungen der genannten erdstatischen Berechnungsverfahren in DIN 4084 im Sinne der genannten Fragestellung durch eine ganzheitliche Betrachtung der unterschiedlichen Einflussfaktoren überwunden. Dazu wurden schwerpunktmäßig folgende Untersuchungen durchgeführt (s. Abb. 4):

In einem 1. Arbeitsschritt und im Vorfeld der Forschungsarbeit durch den Verfasser wurde vom ARBEITSBEREICH GEOTECHNIK UND BAUBETRIEB der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT HAMBURG-HARBURG im Auftrag des INGENIEURBÜROS DR.-ING. V. PATZOLD überprüft, ob und gegebenenfalls inwieweit die Ausbildung von Unterwasserböschungen bei der Gewinnung von Sand und Kies mit kontinuumsmechanischen Verfahren und geeigneten Stoffgesetzen, wie in diesem Zusammenhang mit dem hypoplastischen Stoffmodell von GUDEHUS (1996) und VON WOLFFERSDORFF (1996), betrachtet werden kann. Dazu wurden von KELM (2003) numerische Berechnungen für unterschiedliche Böschungsgeometrien angestellt. Die Ergebnisse der Untersuchung sind auf S. 48 zusammengefasst.

In einem 2. Arbeitsschritt wurden einige der wesentlichen Einflussfaktoren – Grundwasser, ständige Lasten, Verkehrslasten und Erdbeben – auf die Ausbildung von Unterwasserböschungen näher untersucht. Dazu wurden zahlreiche Parameterstudien mit dem Lamellenverfahren von BISHOP (1954) an unterschiedlichen Bodenarten und bei wechselnden Lastannahmen durchgeführt. Die Einflussfaktoren sind in Kap. 4, die Grundlagen des Berechnungsverfahrens in Kap. 5, die Dimensionierung der Einwirkungen mit dem Aufbau der Böschungsmodelle in Kap. 6 und die Ergebnisse der Untersuchung in Kap. 7 beschrieben.

In einem 3. Arbeitsschritt wurden die lagerstättenkundlichen Unterlagen aus dem Archiv des INGENIEURBÜROS DR.-ING. V. PATZOLD gesichtet, aufbereitet und kategorisiert. Dabei wurde eine rechnergestützte Datenbank mit standortspezifischen Erfahrungswerten zur Einstellung von Unterwasserböschungen erstellt (s. Anh. 1). Die Beobachtungen zur Ausbildung der aquatischen Zone in unterschiedlichen Bodenarten und Lagerstätten sind in Kap. 7 angeführt.

In einem 4. Arbeitsschritt wurden die digitalisierten Daten mit statistischen Methoden untersucht. Dabei wurde ein empirisches Regressionsmodell mit standortabhängigen Empfehlungen zur Gestaltung von Unterwasserböschungen entwickelt. Die Grundlagen des Regressionsverfahrens sind in Kap. 6 und die Ergebnisse der Untersuchung in Kap. 7 beschrieben.

In einem 5. Arbeitsschritt wurden die gewinnungsspezifischen Auswirkungen der Saugbaggerung auf die Erosion von Unterwasserböschungen näher untersucht. Dazu wurden stationäre und instationäre Strömungsmodellierungen an unterschiedlichen Bodenarten und bei wechselnden Saugleistungen des Gewinnungsgerätes durchgeführt. Die Grundlagen zur Grundwassermodellierung sind in Kap. 5, die Dimensionierung der Einwirkungen mit dem Aufbau der Strömungsmodelle in Kap. 6 und die Ergebnisse der Modellierung in Kap. 7 angeführt.

In einem 6. Arbeitsschritt wurde schließlich die jeweilige Ausbildung der Böschung im Schwankungsbereich des Baggerseespiegels anhand entsprechender Geländebeobachtungen dargestellt. Dabei wurde ein empirisches Modell mit standortabhängigen Empfehlungen zur Gestaltung von Wasserwechselzonen erstellt. Die Beobachtungen zur Ausbildung der amphibischen Zone in unterschiedlichen Bodenarten und Lagerstätten sind in Kap. 7 beschrieben.

Auf Grundlage der durchgeführten Arbeiten und fallspezifischen Planungsabläufe in Kap. 8 wird derzeit das rechnergestützte Planungssystem zur Gestaltung von Böschungssystemen bei der Gewinnung von Sand und Kies programmtechnisch umgesetzt.



Abb. 4: Arbeitsschritte als Schwerpunkte zur Entwicklung des Planungssystems.