

Projektnummer 11956/017

**Standicherheit von Endböschungen über und unter Wasser von
Gruben und Tagebauen in Bayern**

Schlussbericht

Auftraggeber: Bayer. Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie
Referat Geothermie, Kraft-Wärme-Kopplung, Bergbau und Rohstoffe
Fachstelle Bergtechnik, Gefahrenabwehr, energetische Bodenschätze
Prinzregentenstr. 28
80525 München

E-Mail: poststelle@stmwi.bayern.de

Benedikt Chlosta

Tel.: 089 2162 2529

E-Mail: benedikt.chlosta@stmwi.bayern.de

Rainer Zimmer

E-Mail: rainer.zimmer@stmwi.bayern.de

Bezug: FstB - 8134/13/2

Verteiler: per E-Mail oder Post an Auftraggeber

Datei: 11956-017_schlussbericht_02.docx

Textseiten: Bericht: 164 Seiten

Anhang: 36 Seiten

Forschungs-
nehmer: Technische Universität München
Zentrum Geotechnik
Franz-Langinger-Str. 10
81245 München

Tel.: 089 / 289 27 131

Fax.: 089 / 289 27 189

Ordinarius: Prof. Dr.-Ing. Roberto Cudmani

Bearbeiter: Friedrich Levin M.Sc.

Tel.: 089 / 289 27 146

E-Mail: f.levin@tum.de

Projektleiter: Dr.-Ing. Dirk Heyer

Tel.: 089 / 289 27 134

E-Mail: d.heyer@tum.de

Zeichen: Lv/Hy

Ort, Datum: München, 20.12.2020

Kurzzusammenfassung

Der vorliegende Bericht fasst die Erkenntnisse des Forschungsvorhabens „Standsicherheit von Endböschungen über und unter Wasser von Gruben und Tagebauen in Bayern“ zusammen und stellt die vorgeschlagenen Kategorisierungen, Bewertungen und Bemessungen von Grubenböschungen vor. Mit Hilfe eines Kriterienkatalogs werden die Böschungen je nach Sensibilität der Nachnutzung und geotechnischer Komplexität in die Böschungskategorien 1, 2 oder 3 eingeteilt und darauf aufbauend anhand einer Checkliste die notwendigen Informationen zur Standsicherheitsbewertung der Grubenböschungen genannt. Anhand von drei Beispielkategorisierungen wird das Vorgehen veranschaulicht. Außerdem wird auf die geotechnische Bewertung der Grubenböschungen näher eingegangen, wobei je nach Böschungskategorie eine unterschiedliche Vorgehensweise vorgeschlagen wird. Für die Böschungskategorien 2 und 3 werden Hinweise zur Berechnung der Standsicherheit gegeben. Für Unterwasserböschungen wird gesondert je nach Böschungskategorie ein Bemessungsverfahren vorgeschlagen, da sich diese häufig nicht mit klassischen Bemessungsverfahren behandeln lassen. Abschließend werden Verfahren zur Böschungsgestaltung im Vorhinein und im Nachhinein behandelt. Damit sind Maßnahmen gemeint, die während oder nach Herstellung der Grubenböschungen ergriffen werden können, um die Böschungen standsicher und je nach Nachnutzung gebrauchstauglich herzustellen bzw. dahingehend zu ertüchtigen.

Abstract

This report summarizes the findings of the research project "Stability of final slopes above and below water of pits and opencast mines in Bavaria" and presents the proposed categorizations, evaluations and dimensioning of mine embankments. With the help of a catalog of criteria, the slopes are classified into slope categories 1, 2 or 3 and, based on this, a checklist is used to provide the necessary information for the stability assessment of mine slopes. The procedure is illustrated by means of three exemplary cases. In addition, the geotechnical evaluation of the pit slopes is dealt with, whereby a different procedure is proposed depending on each slope category. For the slope categories 2 and 3 recommendations for the calculation of the stability are given. For underwater embankments, a design method is proposed depending on the slope category, as these often cannot be treated with classical design methods. Finally, measures are presented that can be taken during or after the construction of the mine slopes in order to reach a stable design and satisfy the Service Ability Limit State depending on the subsequent use.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	1
2	Aufgabenstellung	3
3	Einleitung	4
4	Planung und Ablauf der Arbeiten.....	7
4.1	Teilbereich 1: Literaturrecherche.....	7
4.2	Teilbereich 2: Erstellung einer Checkliste bzw. eines Kriterienkatalogs.....	7
4.3	Teilbereich 3: Modellfallbetrachtungen	7
4.4	Teilbereich 4: Numerische Untersuchung zur Sensitivität der Böschungsstandsicherheit 8	
4.5	Teilbereich 5: Abfassung des Schlussberichts und Handbuchs.....	8
5	Literaturrecherche	9
5.1	Böschungsbrüche	9
5.2	Standsicherheitsberechnungen	11
5.2.1	Allgemeines	11
5.2.2	Nichtlinearität der MOHR-COULOMB'schen Bruchbedingung.....	13
5.2.3	Ansatz einer Strukturfestigkeit beim Standsicherheitsnachweis von Böschungen	14
5.2.4	Teilgesättigte Böschungen	15
5.3	Unterwasserböschungen.....	17
5.3.1	Allgemeines	17
5.3.2	Erfahrungswerte.....	20
5.3.3	Bemessungsansatz nach RICHWIEN (2005).....	23
5.3.4	Bemessungsansatz nach BODE (2005).....	24
5.3.5	Bemessungsansatz der böschungsp parallelen Strömung	26
5.3.6	Vergleich der Bemessungsansätze	27
5.3.7	Wasserwechselzone	28
5.3.8	Sicherheitsabstand an Böschungsschulter.....	29
5.4	Verfahrenstechnik	30
5.4.1	Nassgewinnung.....	30
5.4.2	Trockengewinnung.....	32

5.5	Normen, Gesetze, Richtlinien und Merkblätter	34
5.5.1	Genehmigungsverfahren.....	34
5.5.2	Bayerische Industrie- und Handelskammer (BIHK): Leitfaden zur Rohstoffsicherung 35	
5.5.3	Normen zur Böschungsstandsicherheit	37
5.5.4	Gesetze, Richtlinien und Merkblätter in Bayern	44
5.5.5	Gesetze, Richtlinien und Merkblätter außerhalb Bayerns	48
5.5.6	Rutschungsbegünstigende Verhältnisse	52
5.5.7	Beobachtungsmethode	53
5.5.8	Geotechnische Kategorien	54
5.5.9	Baugrunduntersuchungen	58
5.6	Fazit zu den Regelwerken	62
6	Geotechnische Bewertung von Endböschungen über und unter Wasser	63
6.1	Grundlegendes.....	63
6.2	Risikobewertung.....	64
6.3	Erkundung und Probenahme.....	68
6.4	Potentielle Versagensmechanismen	68
6.5	Berechnung der Standsicherheit	68
6.5.1	Einfluss der Schnittführung und Neigung.....	69
6.5.2	Sensitivitätsanalyse (numerische Untersuchungen)	74
6.6	Böschungen in bindigem Baugrund.....	83
6.7	Unterwasserböschungen.....	88
6.7.1	Erfahrungswerte.....	89
6.7.2	Bemessungsverfahren	89
6.7.3	Seegrundvermessungen im Raum München.....	91
6.7.4	Seegrundvermessung einer Sandgrube in der Oberpfalz	108
6.8	Übertragung der Regelwerke (Kapitel 5.4) auf Grubenböschungen.....	112
6.8.1	zu Kapitel 5.4.2.1: EC7 + DIN 1054: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik.....	112
6.8.2	zu Kapitel 5.4.2.2: DIN 4084 Baugrund – Geländebruchberechnungen.....	113

6.8.3	zu Kapitel 5.4.3.1: Richtlinien für Anlagen zur Gewinnung von Kies, Sand, Steinen und Erden	113
6.8.4	zu Kapitel 5.4.3.4: Bundesberggesetz	114
6.8.5	zu Kapitel 5.4.4.1: Richtlinie Geotechnik des Sächsischen Oberbergamtes	114
6.8.6	zu Kapitel 5.4.4.2: Sächsisches Oberbergamt: Merkblatt Böschungen im Lockergestein.....	114
6.8.7	zu Kapitel 5.4.4.3: Sächsische Bergverordnung	115
6.8.8	zu Kapitel 5.4.5: Rutschungsbegünstigende Verhältnisse	115
6.8.9	zu Kapitel 5.4.6: Beobachtungsmethode	116
6.8.10	Definition eines Böschungsaudits für BK1 und BK2:	117
6.8.11	zu Kapitel 5.4.7: Geotechnische Kategorien.....	117
6.8.12	zu Kapitel 5.4.8: Baugrunduntersuchungen.....	119
7	Kriterienkatalog und Checkliste	120
7.1	Kriterienkatalog	120
7.1.1	Nachnutzung.....	121
7.1.2	Böschungskategorie 1	123
7.1.3	Böschungskategorie 2.....	124
7.1.4	Böschungskategorie 3.....	125
7.2	Erhebung von Eingangsdaten zur Standsicherheitsbewertung.....	126
7.2.1	Auswertung der Auskunftsbögen.....	128
7.2.2	Checkliste	129
7.3	Beispielkategorisierungen	131
7.3.1	Böschungskategorie 1 - Kiesgrube bei München.....	131
7.3.2	Böschungskategorie 2 - Kies- und Sandgrube in Franken.....	138
7.3.3	Böschungskategorie 3 - Tongrube in der Oberpfalz	144
8	Anforderungen an die Böschungen	150
8.1	Böschungskategorie 1	150
8.2	Böschungskategorie 2.....	152
8.3	Böschungskategorie 3.....	153
9	Böschungsgestaltung im Vorhinein	154
9.1	Einbau unter Wasser.....	154

9.1.1	Einschieben am Grubenrand.....	154
9.1.2	Qualifizierter Einbau.....	156
9.2	Einbau oberhalb des Grundwasserspiegels	157
10	Böschungsgestaltung im Nachhinein.....	158
10.1	Tiefenverdichtung.....	158
10.2	Oberflächenverdichtung	159
11	Darstellung und Bewertung der erzielten Ergebnisse und ihrer praktischen Anwendbarkeit, durch praxisorientierte Umsetzbarkeit.	160
12	Schlussbemerkung.....	161
	Danksagung	161
	Literatur.....	163
	Anhang.....	I

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Schlussbericht stellt die Erkenntnisse des Forschungsvorhabens „Standsicherheit von Endböschungen über und unter Wasser von Gruben und Tagebauen in Bayern“ ausführlich vor und erläutert die vorgeschlagenen Kategorisierungen, Bewertungen und Bemessungen von Grubenböschungen. Mit Hilfe eines Kriterienkatalogs werden die Böschungen in die Böschungskategorien 1, 2 oder 3 je nach Sensibilität der Nachnutzung und geotechnischer Komplexität eingeteilt. Die Böschungskategorien 1, 2 und 3 orientieren sich dabei sinngemäß an den sogenannten Geotechnischen Kategorien nach Eurocode 7 und DIN 1054. Die Böschungskategorie 1 steht für einfache Fälle mit wenig sensibler Nachnutzung, die Böschungskategorie 3 steht für komplexe Fälle mit schwierigen geotechnischen Randbedingungen und hoher Sensibilität in der Nachnutzung und die Böschungskategorie 2 behandelt Böschungen, die weder in die Kategorie 1 noch 3 passen. Es wurde außerdem eine Checkliste entwickelt, die die notwendigen Informationen zur Kategorisierung und anschließenden Standsicherheitsbewertung der Grubenböschungen zusammenfasst. Informationsquellen und Erkundungsmaßnahmen werden in Abhängigkeit von der Böschungskategorie mit Orientierung an geotechnischen Normen festgelegt.

Im ersten Teil des Berichts wird in einer Literaturrecherche der Stand des Wissens in Bezug auf Böschungsbrüche, Unterwasserböschungen, Verfahrenstechnik im Abbau sowie Regelungen aus Normen, Gesetzen und Merkblättern zusammengetragen. Zwei Schwerpunkte liegen dabei auf Unterwasserböschungen, da diese häufig nicht mit konventionellen Methoden zu bemessen sind, und den bereits vorhandenen Regelungen zu Böschungen allgemein und Grubenböschungen im Besonderen in Bayern und bundesweit.

Anschließend wird auf die geotechnische Bewertung der Grubenböschungen eingegangen. Zunächst wird aufbauend auf den 2020 veröffentlichten *Empfehlungen des Arbeitskreises 4.6 Altbergbau der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. zur Geotechnisch-Markscheiderischen Untersuchung, Bewertung und Sanierung von altbergbaulichen Anlagen* eine Einführung in Risikobewertung von Gruben und Grubenböschungen gegeben. Hier werden altbergbauliche Anlagen in Risikoklassen eingeteilt. Eine ähnliche Einteilung in Risikoklassen stellt auch die in diesem Bericht vorgeschlagene Einteilung der Grubenböschungen in Böschungskategorien dar.

Aufbauend auf dem Literaturteil werden weitere Details zur Berechnung der Standsicherheit von Grubenböschungen erarbeitet. Schwerpunkte sind dabei Untersuchungen zur maßgebenden Schnittführung für den Bemessungsschnitt in Grubenböschungen und numerische Sensitivitätsanalysen zum Einfluss verschiedener Parameter auf die Böschungsstabilität. Des Weiteren wird eine Fallstudie zu einer Böschung in bindigem Baugrund vorgestellt und daraus Empfehlungen entwickelt. Umfassend werden Unterwasserböschungen thematisiert. Dazu werden in Abhängigkeit von der Böschungskategorie Vorschläge für die Bemessung von Unterwasserböschungen

basierend auf eigenen Untersuchungen und Ergebnissen aus der Literatur gemacht. Die See-Grundvermessung im Raum München, die im Rahmen des Forschungsvorhabens an mehreren Seen durchgeführt wurde und die Analyse von Vermessungsdaten von Betreibern einer Sandgrube werden ausführlich vorgestellt. Abschließend wird die Übertragbarkeit der im Literaturteil vorgestellten Regelungen aus Normen, Gesetzen und Merkblättern aus dem Bereich Geotechnik und Bergbau auf Grubenböschungen erläutert. Wichtige Punkte sind hierbei die Definition rutschungsbegünstigender Verhältnisse, der Einsatz der nach Eurocode 7 definierten Beobachtungsmethode sowie die Definition eines Böschungsaudits und die Regelungen zu Baugrunduntersuchungen.

In Kapitel 7 werden der Kriterienkatalog zur Einteilung in Böschungskategorien und die Informationscheckliste zur Einteilung und anschließenden Standsicherheitsbewertung der Grubenböschungen vorgestellt. Anhand von drei Beispielkategorisierungen wird das Vorgehen veranschaulicht. Die Beispiele decken die drei Böschungskategorien ab, wobei in einer Grube Böschungen abschnittsweise unterschiedlich kategorisiert werden.

Im Kapitel 8 werden Anforderungen an die Böschungen formuliert. Dies schließt Verformungskriterien und Anforderungen an die Nachweisführung je nach Böschungskategorie ein. Für BK1 werden tabellierte Erfahrungswerte für Böschungen über Wasser angegeben. Die entsprechenden Werte für Böschungen unter Wasser werden in Kapitel 6.7.2 genannt.

Abschließend werden Verfahren zur Böschungsgestaltung im Vorhinein und im Nachhinein behandelt. Damit sind Maßnahmen gemeint, die während oder nach Herstellung der Grubenböschungen ergriffen werden können, um die Böschungen standsicher und je nach Nachnutzung gebrauchstauglich herzustellen bzw. dahingehend zu ertüchtigen.

2 Aufgabenstellung

Es soll eine Handlungsanweisung (Handbuch) für die Vorgehensweise bei der Beurteilung der Standsicherheit von Endböschungen von Gruben und Tagebauen in Bayern, die dauerhaft vollständig unter dem Grundwasserspiegel, teilweise unter dem Grundwasserspiegel (Wasserwechselzone) oder dauerhaft vollständig über dem Grundwasserspiegel liegen, entwickelt werden. Die Betrachtungen beschränken sich auf Gruben in denen Lockergestein gewonnen wird. Mit Endböschungen ist der Zustand der Grubenböschungen nach Stilllegung der Gruben gemeint, in dem die Grube einer vorher festgelegten Nachnutzung zugeführt wird.

Die Handlungsanweisungen umfassen schwerpunktmäßig die Art der Erkundungsarbeiten, die Belegung der bodenmechanischen Parameter und rechnerische Betrachtungen. Dabei sind Aspekte der Optimierung der Lagerstättenausnutzung zu beachten, d.h. auch die Möglichkeiten einer nachträglichen Sicherung sind einzubeziehen. Insofern sind auch verfahrenstechnische Regeln bzw. Empfehlungen für die Herstellung der Endböschungen und die Qualitätssicherung zu erarbeiten, aufbauend auf den einschlägigen verfahrenstechnischen Rahmenbedingungen in der Abbauindustrie. Bei allen Überlegungen sind die Aspekte und Vorgaben des Gewässerschutzes zu berücksichtigen. Hinsichtlich der zulässigen (Nach-)Nutzung sollte auch eine Differenzierung von uneingeschränkt über eingeschränkt bis zum Ausschluss/Verbot vorgenommen werden.

Das grundsätzliche Vorgehen sieht eine Einteilung von Grubenböschungen in sogenannte Böschungskategorien 1 bis 3 (BöK) in Anlehnung an die Definitionen der Geotechnischen Kategorien (GK) des Eurocode 7 (EC7) vor. Die Kategorien berücksichtigen das geotechnische und das aus der Nachnutzung sich ergebende Risiko. Aufbauend auf den BöK werden Handlungsanweisungen zur Erkundung des Baugrunds sowie zur Beurteilung der Standsicherheit der Böschungen gegeben. Die Kategorisierung erfolgt auf Basis von Kriterienkatalogen, die aber immer einzelfallspezifisch angepasst werden müssen und die keinen Anspruch auf Vollständigkeit haben können, da schwankende Randbedingungen einen universellen Katalog nicht zulassen. Aufbauend auf der Kategorisierung erfolgt mit der hier entwickelten Checkliste die Abfrage der zur Beurteilung der Standsicherheit notwendigen Informationen.

Zur Anpassung und Verifizierung des Kriterienkatalogs und der Checkliste werden Beispielkategorisierungen anhand von im Forschungsvorhaben untersuchten Grubenböschungen vorgenommen.

3 Einleitung

Gruben und Tagebaue zur Rohstoff-, Mineral- oder Energiebrennstoffgewinnung wurden und werden vielfach aus rechtlichen oder wirtschaftlichen Gründen nicht wiederverfüllt, so dass hieraus Seen und Seenlandschaften oder trockene Gruben verbleiben. Die Attraktion dieser Gebiete führt zu einem Siedlungsdruck und zu Freizeitaktivitäten, die sich vornehmlich ufernah abspielen. Außerdem bieten sich die Flächen zur Nachnutzung als Standort zur Energiegewinnung mittels erneuerbarer Technologien an. Um solche Aktivitäten jedoch genehmigen zu können, ist die Standsicherheit der bestehenden Endböschungen und auch die Begrenzung der Verformungen zur Einhaltung von Gebrauchstauglichkeitsanforderungen von maßgeblicher Bedeutung. Auch ohne Siedlungsdruck bei gewöhnlicher Nutzung muss die Oberfläche langfristig uneingeschränkt sicher sein. Dabei sei darauf hingewiesen, dass „die Forderung nach einer „absoluten Sicherheit“ [...] illusorisch ist. Der Geotechniker muss in solchen Fällen klar widersprechen“ (Brandl, 2015). Es muss vielmehr die Abwägung eines sozioökonomisch tolerierbaren Risikos stattfinden, dass zwischen der grundsätzlichen Anforderung einer standsicheren Böschung und ökonomischen sowie Anforderungen, die aus einer ökologischen Nachnutzung erfolgen (z.B. Steilböschungen), abwägt.

Die wissenschaftlichen Grundlagen für die Beurteilung der Standsicherheit von Böschungen stehen zur Verfügung. Der Aufgabenbereich ist aber durch Besonderheiten gekennzeichnet, die bisher nicht standardisiert sind und zu denen wenige veröffentlichte Untersuchungen vorliegen. Die Besonderheiten beruhen u. a. darauf, dass der Zweck der bergbaulichen Unternehmung nicht die Oberflächengestaltung oder die Errichtung eines Bauwerks, sondern der Rohstoffabbau ist. Die Arbeitsmethoden und die Maschinenauswahl ergeben sich zunächst aus Produktionserfordernissen. Die Endböschungen werden also weniger gebaut, sondern entstehen überwiegend bei der Produktion und stehen damit häufig bodenmechanisch a priori in einem Grenzgleichgewicht, womit ein Sicherheitsrisiko verbunden ist.

Im Zusammenhang mit der Standortsuche und -findung für Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien ist es auch aufgrund landesplanerischer Randbedingungen geboten, hierfür auch Areale mit alten Gruben oder Tagebauen in Betracht zu ziehen. In Frage kommen hier einerseits Photovoltaikanlagen und andererseits Windkraftanlagen. Hierbei bieten sich PV-Anlagen aufgrund ihrer wenig kritischen Gründung aus grundbautechnischer Sicht insbesondere für solche Standorte an, wo aufgrund von Gebrauchstauglichkeitsanforderungen hochwertigeren Nutzungen abgesehen werden muss. Da Windparks im ländlichen Raum vornehmlich abseits von Bauungen vorzusehen sind, können auch für diese erneuerbaren Energien solche Areale als Standorte im besonderen Maße vorgesehen werden. Windkrafträder sind aufgrund der auftretenden erheblichen horizontalen und dynamischen Lasten gründungstechnisch anspruchsvoll und müssen bei der Beurteilung der Standsicherheit der Böschungen von Gruben und Tagebauen besonders betrachtet werden.

Die Relevanz der Fragestellung wird nicht zuletzt durch verschiedene Schadensereignisse begründet, die in den vergangenen Jahren mehr oder minder öffentlich geworden sind. Das bekannteste Ereignis war die Böschungsbewegung in Nachterstedt am 18.07.2009 (KATZENBACH, 2013), bei dem auch Personen betroffen waren. Aber auch in Bayern sind ähnliche Ereignisse, wenn auch mit glimpflicherem Ausgang, bekannt.

Die Beurteilung der Standsicherheit von Endböschungen ist selbst bei Kiesböschungen nicht immer trivial, da z.B. zwischenliegende feinkörnigere Schichten potentielle Gleitflächen darstellen, die die Standsicherheit der Böschung erheblich beeinträchtigen können. Sofern die Böschung teilweise unter Wasser liegt und sich im Grenzgleichgewicht befindet, können selbst kleine Schwankungen im Grundwasserstand zu einem globalen Versagen der Böschung führen. Die sich daraus ergebenden Böschungsgeometrien und Bruchmechanismen sind komplex und beeinflussen sich gegenseitig.

Im Allgemeinen muss die Feststellung, ob ein geplantes Nachnutzungskonzept durch die angrenzende Böschung gefährdet ist, auf der Basis von einzelfallspezifischen Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen in Abhängigkeit von den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen sowie von der statischen, stationären und dynamischen Beanspruchung der Böschung getroffen werden. Auf Basis dieser Untersuchungen sind die Gestaltung der Böschungen und Mindestabstände der Böschungskante zu den Nachbargrundstücken – je nach zulässiger Nutzung – festzulegen.

Für einfache Standardfälle, bei wenig sensibler Nachnutzung, günstigen Böschungsgeometrien sowie günstigen geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen, können ggfs. verallgemeinerte Ansätze zur Böschungsgestaltung und Festlegung des Mindestabstandes abgeleitet werden, die eine einzelfallspezifische Berechnung der Standsicherheit nicht mehr erfordern.

Es ist jedoch zu beachten, dass es vor allem bei teilweise unter dem Grundwasser liegenden Böschungen infolge von nicht genau erfassbaren (kurzfristig) stationären oder dynamischen Einwirkungen (zusammen mit einer ungünstigen Dichte oder Porenstruktur des vorliegenden Böschungsmaterials) zu globalen oder lokalen Böschungsbrüchen kommen kann, die mit üblichen Standsicherheitsberechnungen nicht erfasst werden können. Die damit verbundene sukzessive Abflachung der Böschung kann über lange Zeiträume andauern. Infolge der kleiner werdenden mittleren Böschungsneigung erhöht sich zwar im Allgemeinen die globale Standsicherheit der Böschung, das damit verbundene rückschreitende lokale Nachbrechen der Böschungsoberkante im selben Zeitraum führt jedoch zu einer Abnahme des Abstands der Nachbargrundstücke zur Böschungsoberkante. Ein Abflachen der Böschung mit dem damit einhergehenden rückschreitenden Nachbrechen der Böschungsoberkante wird im Allgemeinen auch in sich neu ausbildenden Wasserwechselzonen im Uferbereich beobachtet. Beide Effekte treten üblicherweise gleichzeitig auf und können die Standsicherheit oder zumindest die Gebrauchstauglichkeit des geplanten Nachnutzungskonzepts gefährden.

Die rechnerische Beurteilung der zu erwartenden Böschungsabflachung mit der Zeit ist aufgrund der nicht genau erfassbaren Beanspruchung der Böschung sowie des sehr komplexen Materialverhaltens während des Böschungsbruchs (Materialumlagerung) mit der damit einhergehenden Änderung der Böschungsgeometrie zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. In solchen Fällen muss die Bewertung des Gefährdungspotentials auf Erkenntnissen aus empirischen Untersuchungen basieren und einzelfallspezifisch in Abhängigkeit von den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen geschehen. Je nach Zielsetzung kann auch die Kontrolle z.B. der Mindestabstände mit der Beobachtungsmethode erfolgen oder es können zusätzliche Sicherungsmaßnahmen ergriffen werden.

4 Planung und Ablauf der Arbeiten

4.1 Teilbereich 1: Literaturrecherche

In der Literaturrecherche werden die Erkenntnisse aus Fachliteratur und Regelwerken zum Thema Grubenböschungen über wie unter Wasser zusammengetragen. Dabei wird genauer betrachtet, was in eine Standsicherheitsberechnung einer Böschung mit eingeht, wie Unterwasserböschungen behandelt werden, welche Verfahrenstechnik beim Abbau zum Einsatz kommt und welchen Einfluss sie auf die Böschungen hat und insbesondere wie aktuelle Normen, Gesetze Richtlinien und Merkblätter in Bayern und außerhalb Bayerns mit dem Thema der Beurteilung der Standsicherheit von Grubenböschungen umgehen (siehe dazu Kapitel 5).

4.2 Teilbereich 2: Erstellung einer Checkliste bzw. eines Kriterienkatalogs

Es wird ein Kriterienkatalog für die Zuordnung zu den Böschungskategorien 1 bis 3 aufgestellt, der Aspekte wie

- Abbau-/Gewinnungsverfahren und beobachteter Einfluss auf die Entwicklung der Böschungsgeometrie sowie auf den Zustand und die Zusammensetzung des Böschungsmaterials,
- aktuelle Böschungsgeometrien nach Betriebsende,
- Beobachtungen von Rutschungen in der Betriebsphase (auch in Nachbargruben)
- Geologie inkl. verfüllter Bereiche
- Hydrogeologie
- Ist-Zustand des Böschungsmaterials (z.B. Dichte, Struktur, Verfestigungen)
- aktuelle Standzeit der Böschung nach Betriebsende
- Art der Nachnutzung (Lasten),
- Regionaler Standort: Seismik, Erfahrungen aus umliegenden Gruben und
- vorhandene teilverfüllte Bereiche

zum Inhalt hat. Eine Bewertung des jeweiligen Kriteriums oder die Kombination verschiedener Kriterien im Kriterienkatalog führt dann zu einer Zuordnung einer Böschungskategorie. Außerdem ist eine Checkliste zu erstellen, die Informationen darüber gibt, welche Informationen zur Beurteilung der Standsicherheit einer Böschung je nach Böschungskategorie notwendig sind. Siehe dazu Kapitel 7.

4.3 Teilbereich 3: Modellfallbetrachtungen

Die Abarbeitung des Kriterienkatalogs soll beispielhaft anhand von drei Modellfällen durchgespielt werden und so der Kriterienkatalog und das Vorgehen bei der Böschungskategorisierung auf Handhabbarkeit, Eignung, Vollständigkeit und Sinnhaftigkeit geprüft werden. Es werden folgende drei Modellfälle betrachtet

- Kiesgrube unter Grundwasser (Böschungskategorie 1 bis 2)
- Kies- und Sandgrube unter Grundwasser (Böschungskategorie 2)
- Tongrube mit Abbau unter Grundwasserhaltung mit anschließender Flutung der Restlöcher (Böschungskategorie 3)

Des Weiteren werden Böschungsabflachungen von Unterwasserböschungen und das Versagen einer Böschung im Trockenabbau in einer Tongrube untersucht, um Erkenntnisse zur Einschätzung des Gefahrenpotentials zu gewinnen. Siehe dazu Kapitel 7.3.

4.4 Teilbereich 4: Numerische Untersuchung zur Sensitivität der Böschungsstandsicherheit

Bestimmte Aspekte wie Grundwasserstände, Schichtfolge, Geometrie und Belastung von Böschungen werden anhand numerischer Untersuchungen bezüglich der Sensitivität der Böschungsstandsicherheit hinsichtlich der jeweiligen Einflussgröße oder Randbedingung untersucht. Ziel ist es, kritische Einflussgrößen auf die Böschungsstandsicherheit und damit relevante Aspekte für die Beurteilung der Böschungen zu identifizieren. Siehe dazu Kapitel 6.5.1 und 6.5.2.

4.5 Teilbereich 5: Abfassung des Schlussberichts und Handbuchs

Die gesammelten Erkenntnisse der Forschung werden in einem ausführlichen Schlussbericht zusammengefasst. Aufbauend auf diesem Schlussbericht und zur besseren Handhabung wird ein Handbuch mit den abgeleiteten Empfehlungen und Vorgehensweisen zur Beurteilung der Endböschungen von Gruben und Tagebauen in Bayern erstellt. Das Handbuch soll Fach- und Genehmigungsbehörden helfen, die Böschungskategorisierung durchzuführen und die aus der Kategorisierung folgenden Vorgehensweisen zur Beurteilung der Endböschungen beschreiben. Darin werden die Anforderungen an die Mindestkenntnisse über die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse sowie bodenmechanischen Kennwerte zusammengestellt. Es werden Hinweise zu Art und Umfang detaillierter Erkundungen gegeben. Ein besonderes Augenmerk soll auch auf den Einsatz von Beobachtungsmethoden gelegt werden. Hierzu werden die verschiedenen Möglichkeiten und die dafür gesammelten Erfahrungen zusammengestellt.

5 Literaturrecherche

5.1 Böschungsbrüche

In Abhängigkeit von der Böschungsgeometrie, den Bodenarten und deren Schichtung, der Dichte, der Mikrostruktur, dem Wassergehalt, der Belastung und der Belastungsgeschwindigkeit kann eine Böschung entlang von Scherfugen, in denen der Scherwiderstand des Bodens überschritten ist, entlang vorgeprägter Schwachstellen (Gleitflächen) oder als Zonenbruch versagen. Je nach Lage und Geometrie der Scherfugen folgen daraus oberflächennahe Böschungsbrüche oder ein globales tiefgreifendes Versagen der gesamten Böschung. In Abhängigkeit von der geologischen Vorgeschichte können vorgeprägte Gleitzonen, Störzonen, Harnischflächen, Verkarstungen sowie Schwächezonen im Untergrund vorhanden sein, die infolge des Aushubs aktiviert werden können. Der Böschungsbruch tritt dann bevorzugt in diesen Zonen auf. In Lockergesteinen tritt das Versagen der Böschung häufig entlang einer kreisförmigen Gleitfuge auf. Bei nichtbindigen Lockergesteinen sind die Versagenskörper eher oberflächlich, während sie mit zunehmendem Einfluss von Kohäsion oder Wassereinfluss tiefer in die Böschung eingreifen. Bei Wechsellagerungen aus bindigen und nicht bindigen Schichten tritt das Versagen häufig entlang definierter Schwächezonen als einfacher oder zusammengesetzter Bruchkörper auf.

Bei wassergesättigten, locker gelagerten granularen Böden (z.B. in Unterwasserböschungen) besteht die Gefahr der Bodenverflüssigung, sofern die Böschung durch dynamische Einwirkungen zu Schwingungen angeregt wird (TRIANAFYLLIDIS, 2013). Die Böschung kann dadurch über ihren gesamten Querschnitt verflüssigen. Plötzliche auch nur kleine Belastungsänderungen (Initiale) können zudem zu einer Bodenverflüssigung in einem lokal begrenzten Bereichen führen (Setzungsfliessen). Die Böschung rutscht dann entlang einer verflüssigten Bewegungsfuge ab (GUDEHUS et al., 2015). Setzungsfliessen einer Böschung kann auch ohne ausgeprägte dynamische Einwirkung initiiert werden, z.B. durch äußere Lasten, Aushub oder Niederschlag.

In durchströmten Böschungen kann infolge von Strömungskräften ein Materialtransport aus der Böschungen heraus auftreten (innere Suffosion, rückschreitende Erosion). Dabei wird zunächst Bodenmaterial aus einem begrenzten Bereich der Böschung ausgetragen. Im Folgenden kommt es zu einer rückschreitenden Aufweitung der entstandenen Hohlräume (*engl.: piping*). Die Hohlraumaufweitung ist aufgrund der damit verbundenen Erhöhung der Strömungskräfte selbstverstärkend. Dies kann zum Versagen der Böschung in dem entstandenen geschwächten Bereich führen (OTTO & FROMMENKORD, 2001). Im Uferbereich kommt es infolge von Wellenschlag sowie hohen lokalen hydraulischen Gradienten ebenfalls zu Erosionserscheinungen sowie lokalen Böschungsbrüchen, die den Uferbereich rückschreitend abflachen.

Beispiele für verschiedene Versagensformen von Böschungen in Lockergestein sind in Abbildung 5.1 dargestellt. In Tabelle 5.1 sind nach Bodenart mögliche Versagensformen deren zeitlicher Ablauf und zu erwartende Böschungswinkel ohne Einfluss von Wasser zusammengefasst.

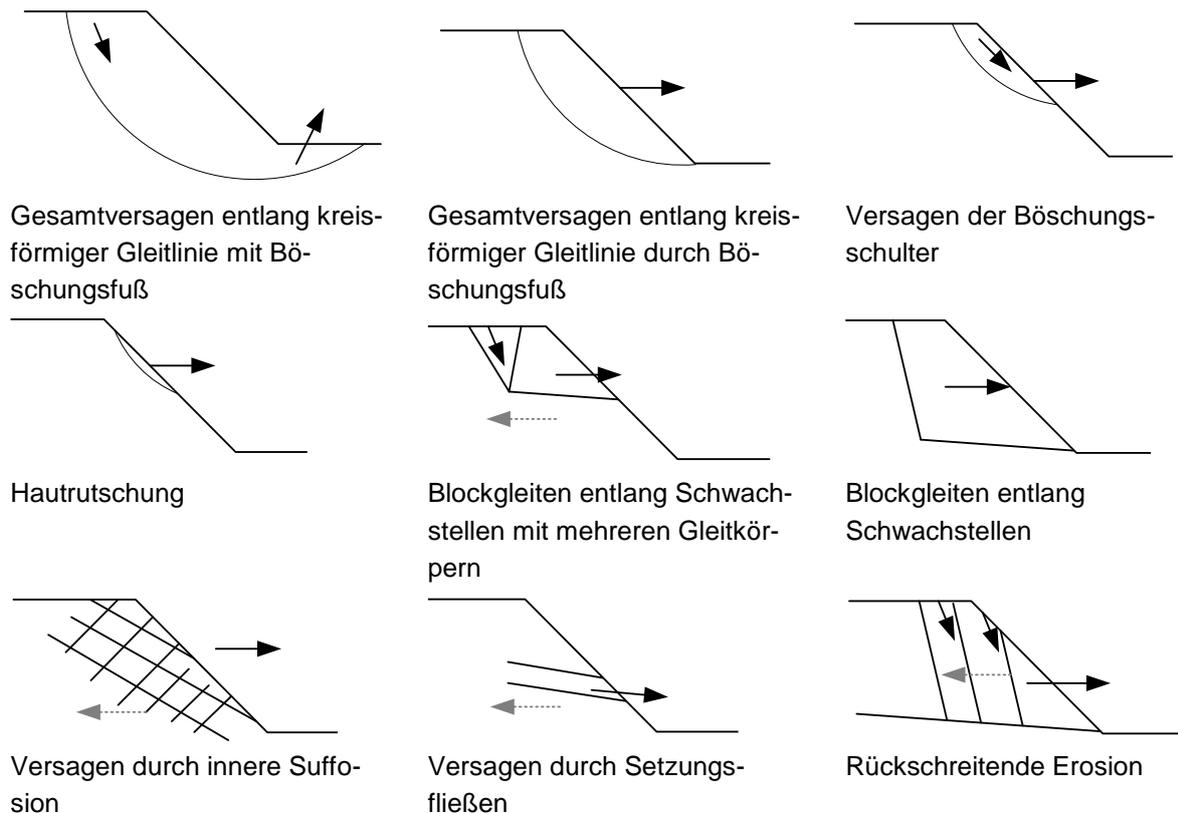


Abbildung 5.1: Beispielhafte Versagensformen von Böschungen

Tabelle 5.1: Häufige Böschungsversagensformen nach Bodenart

Bodenart	Versagensform	Zeitlicher Ablauf des Versagens	Böschungswinkel ohne Wassereinfluss
gleichförmige enggestufte locker gelagerte Sande	Setzungsfließen Oberflächliche Böschungsrutschungen (sog. Hautrutschungen)	plötzlich zeitlich verzögert, durch Wind und Wasser beeinflusst	27 – 32°
Stark bindige Sande und Kiese	Tiefreichende Gleitfugen	plötzlich oder zeitlich verzögert, häufig durch starke Regenfälle ausgelöst	> 30°
Weit- bis intermittierend gestufte Sande und Kiese ohne bindige Anteile	Tiefreichende Gleitfugen Oberflächliche Böschungsrutschungen (sog. Hautrutschungen)	plötzlich oder zeitlich verzögert plötzlich oder zeitlich verzögert, durch Wind und Wasser beeinflusst	33 – 45°

Tabelle 5.1: Häufige Böschungsversagensformen nach Bodenart

Bodenart	Versagensform	Zeitlicher Ablauf des Versagens	Böschungswinkel ohne Wassereinfluss
Kiese ohne bindige Anteile	Oberflächliche Böschungsrutschungen (sog. Hautrutschungen)	zeitlich verzögert, durch Wind und Wasser beeinflusst	34 – 42°
Sande ohne bindige Anteile	Oberflächliche Böschungsrutschungen (sog. Hautrutschungen)	zeitlich verzögert, durch Wind und Wasser beeinflusst	32 – 42°
Bindige Böden bis zu weicher Konsistenz	Böschungen rutschen entlang durch bindige Schichten definierte Schwächezonen ab. Fließen der gesamten Böschung	zeitlich verzögert, durch Wind und Wasser beeinflusst	-

5.2 Standsicherheitsberechnungen

5.2.1 Allgemeines

Standsicherheitsberechnungen für Böschungen sind in DIN 4084:2009-01 und dem EC7 (DIN EN 1997-1:2014-03) geregelt. Der Standsicherheitsnachweis (Ultimate Limit State, ULS) muss für den Grenzzustand GEO-3 (Grenzzustand des Versagens durch Verlust der Gesamtstandsicherheit) geführt werden. Bei der gegebenen Fragestellung der langfristigen Beurteilung der Standsicherheit von Grubenböschungen ist die Bemessungssituation BS-P (ständige Situation) zugrunde zu legen. Je nach Nachnutzung des böschungsnahen Bereichs kann es auch notwendig sein, einen Gebrauchstauglichkeitsnachweis (Serviceability Limit State SLS) zu führen, um Verformungen zu begrenzen. Dies stellt in der Regel einen größeren Aufwand dar und ist nur mit Hilfe von Erfahrungswerten oder Finite-Elemente-Berechnungen mit geeigneten Stoffmodellen, die das Verformungsverhalten des Bodens wiedergeben können, möglich (siehe dazu Kapitel 5.5.2.1 und 8).

Beim Standsicherheitsnachweis müssen alle in Frage kommenden Kinematiken der Bruchkörper untersucht werden. Beispiele für unterschiedliche Kinematiken und Versagensformen sind in Abbildung 5.1 dargestellt. In der Praxis hat sich die Betrachtung als ebenes System bewährt, wobei man im Vergleich zu einer dreidimensionalen Betrachtung in der Regel auf der sicheren Seite liegt. Als Berechnungsverfahren kommen

- Lamellenfreie Verfahren (nur in Ausnahmefällen),
- Lamellenverfahren beispielsweise nach KREY (1926) und BISHOP (1954),
- Böschungsparalleles Gleiten für kohäsionsloses Material,

- Berechnungsverfahren zusammengesetzter Bruchmechanismen (Kinematische Elementmethode, Discontinuity Layout Optimization) und
- die Finite-Elemente Methode in Frage.

Bei allen genannten Berechnungsverfahren ist die Variation möglicher Bruchmechanismen zur Findung des maßgebenden Bruchmechanismus entscheidend. Die Beurteilung der Berechnungsergebnisse verlangt daher nach einer Plausibilitätsanalyse durch einen Experten. Folgende Hinweise können hierzu gegeben werden:

- Bei homogenen Baugrundverhältnissen im Lockergestein geht der maßgebende Bruchmechanismus in der Regel durch den Böschungsfuß.
- Schichtgrenzen zu bindigen Schichten können als Gleitfläche dienen, die den Bruchmechanismus begrenzen.
- Bei Böschungen in kohäsiven Böden muss das mögliche Auftreten von Zugrissen nach DIN 4084 berücksichtigt werden.
- Oberflächliche Rutschungen (sog. Hautrutschungen) sollten hinsichtlich ihrer Relevanz für die Gesamtstandsicherheit der Böschung beurteilt und u.U. als maßgebende Mechanismen ausgeschlossen werden.

Grundsätzlich können Böschungsstandsicherheitsberechnungen auch mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode durch eine sogenannte φ' - c' -Reduktion durchgeführt werden. Dies stellt jedoch in den meisten Fällen einen zu großen Aufwand dar.

Böschungen in homogenen kohäsionslosen Böden ohne Einfluss von Wasserdruck oder äußere Lasten können unter Zugrundelegung der Designwerte für den Böschungswinkel β und für den Reibungswinkel φ'_d mit Hilfe der FELLENIUS-Regel bemessen werden

$$\mu = \frac{\tan \beta}{\tan \varphi'_d}. \quad (1)$$

Für einfache Böschungen mit homogenem kohäsivem Baugrund, ohne Wasserdruckeinflüsse oder äußere Lasten, existiert ein Bemessungsdiagramm nach TAYLOR (1948) (siehe Abbildung 5.2). Daraus kann unter Zugrundelegung der Designwerte für den Reibungswinkel φ'_d , die Kohäsion c'_d , der Wichte des Baugrund γ_d und der Höhe der Böschung h der maximale Böschungswinkel ausgelesen werden.

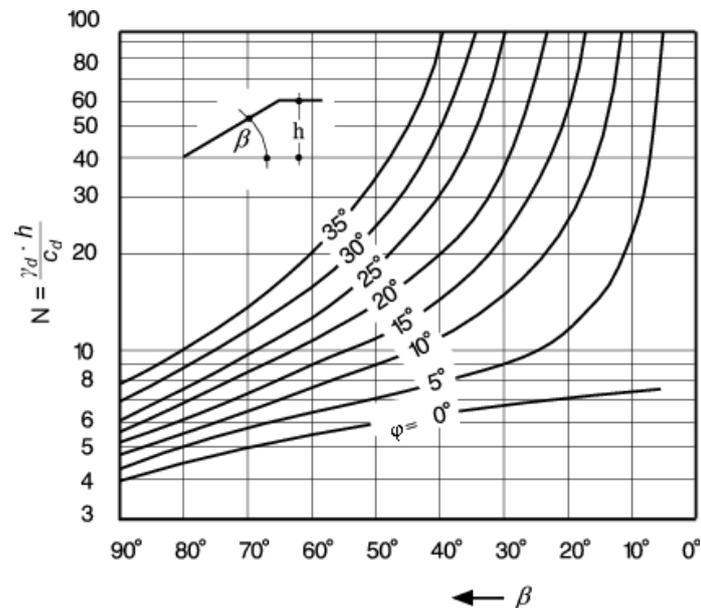


Abbildung 5.2: Bemessungsdiagramm nach TAYLOR (1948)

5.2.2 Nichtlinearität der MOHR-COULOMB'schen Bruchbedingung

Bei Böschungsstandsicherheitsbetrachtungen wird bisher nur selten eine Nichtlinearität der Mohr-Coulombschen Bruchbedingung in Ansatz gebracht. In der Regel wird mit einem konstanten Reibungswinkel φ' im gesamten zu berücksichtigenden Spannungsbereich gerechnet. Es ist bekannt, dass der Reibungswinkel keine konstante Größe ist, sondern abhängig ist vom mittleren Druck (siehe Abbildung 5.3). Es ist ersichtlich, dass im niedrigen Spannungsbereich bis ca. 40 kPa die Reibungswinkel für die untersuchten Sande wesentlich höher sind als die üblichen Erfahrungswerte von $\varphi'_{peak} = 30^\circ$ bis 35° (VON SOOS, 2009).

ANGERER (2020) liefert zur Berücksichtigung der Nichtlinearität der MOHR-COULOMB'schen Bruchbedingung einen Ansatz, bei dem eine Böschung in unterschiedliche Zonen eingeteilt wird, in denen je nach Spannungsniveau mit unterschiedlichen Scherfestigkeiten gerechnet wird. Eine vereinfachte Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit des Reibungswinkels ist nach DIN 4084:2009-01 Kapitel 7.1.6 möglich. Demnach darf bei oberflächennahen Gleitlinien in nichtbindigen Böden von einem höheren Bemessungswert des Reibungswinkels als bei tiefliegenden Gleitflächen ausgegangen werden. Die Erhöhung darf bis zu einer Tiefe von 1 m normal zur Böschungsoberfläche 15% betragen. Darunter geht sie bis zu einer Tiefe von 2,5 m linear auf 0 % zurück.

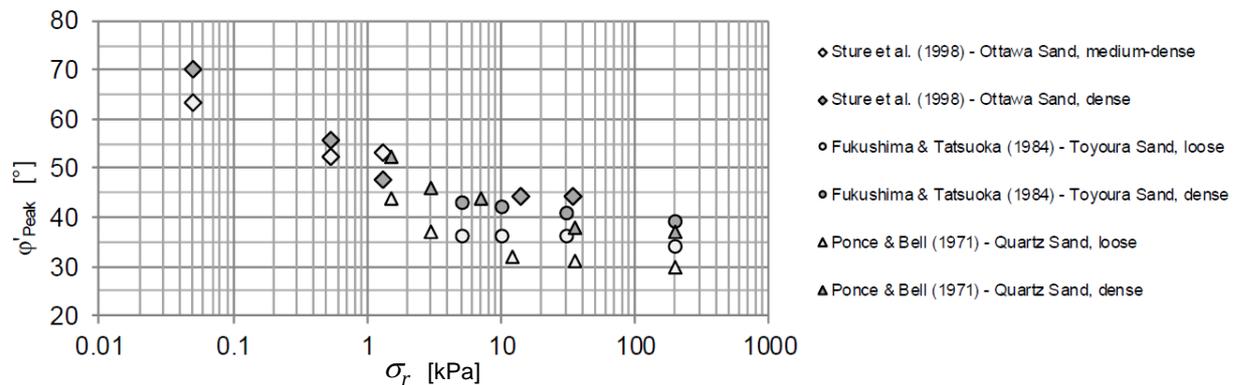


Abbildung 5.3: Spitzen-Reibungswinkel als Funktion des radialen Druckes (ANGERER, 2020)

5.2.3 Ansatz einer Strukturfestigkeit beim Standsicherheitsnachweis von Böschungen

Als Strukturfestigkeit wird eine Festigkeit des Bodens bezeichnet, die durch Verzahnung und Ver kittung der Bodenpartikel und eine stabile Anordnung der transmittierenden Kraftketten über die Zeit entsteht. Bei natürlichen Böschungen aus nichtbindigen Lockergesteinen werden Böschungswinkel, die weit größer sind als der Reibungswinkel des Materials, beobachtet, die über Jahre standsicher stehen (siehe Abbildung 5.4). Ein Grund hierfür ist die Strukturfestigkeit, die in der Bodenmechanik in der Regel nicht berücksichtigt wird und daher – wenn vorhanden – als Sicherheitsreserve dient. Die Strukturfestigkeit wird in der Bodenmechanik deswegen nicht planmäßig angesetzt, weil sie labortechnisch schwer zu quantifizieren ist und nicht sichergestellt werden kann, dass sie dauerhaft vorhanden ist. Beispielsweise Be- und Entlastungsvorgänge des Bodens oder Witterungseinflüsse können zu einem Verlust der Strukturfestigkeit führen.



Abbildung 5.4: Abschnittsweise nahezu vertikal stehende Böschung in einer Sandgrube (grSa, $\varphi' = 35^\circ$, $c' = 0$ kPa), Standzeit > 10 a

Quantifizierbar ist die Strukturfestigkeit beispielsweise über Rückrechnungen der Standsicherheit von Böschungen aus nichtbindigem Material, in denen die Strukturfestigkeit als eine Art Kohäsion angesetzt wird, die mindestens notwendig ist, damit die Böschung in der gegebenen Form unter Zugrundelegung des effektiven Reibungswinkels φ' standsicher ist (siehe Kapitel 6.5). Außerdem kann die Strukturfestigkeit anhand ungestörter Bodenproben im Labor ermittelt werden. Insbe-

sondere bei nichtbindigen Lockergesteinen ist jedoch die Gewinnung von ungestörten Bodenproben eine große Herausforderung und gelingt häufig nicht oder ist mit einem zu großen Aufwand verbunden.

WAGENBRETH (1970) gibt Größenordnungen einer Strukturfestigkeit für Sande in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und dem Sättigungsgrad zwischen 0,9 und 12,5 kPa an. RICHWIEN (2005) nennt erforderliche Strukturfestigkeiten von ca. 3 bis 7 kPa, um die Standsicherheit vorhandener Unterwasserböschungen in Lockergesteinen nachvollziehen zu können und schlägt vor, diese bei den Standsicherheitsberechnungen von Grubenböschungen anzusetzen.

Letztlich ist jedoch der gesicherte Ansatz einer Strukturfestigkeit in einer Standsicherheitsbetrachtung nur bei sehr genauen Untersuchungen der jeweiligen in situ Bedingungen möglich und hängt neben dem Baugrund stark von der Abbaumethode der Böschung ab. Sie sollte in der Regel nicht planmäßig berücksichtigt werden, um stabile Böschungswinkel von Endböschungen festzulegen. Sie könnte lediglich indirekt über die Festlegung stabiler Böschungswinkel aus Erfahrungswerten berücksichtigt werden, da im Spektrum der Erfahrungswerte auch Neigungen auftauchen, die nur unter Einbeziehung einer Strukturfestigkeit als standsicher beurteilt werden können (siehe Tabelle 8.1). Eine zweite Möglichkeit ist die Quantifizierung über Laborversuche an ungestörten Proben, die jedoch in der Regel nur bei sehr großen Gewinnungsmaßnahmen wirtschaftlich zu rechtfertigen sind (bspw. Großtagebaue). Daten aus einem Großtagebau erlauben den beispielhaften Vergleich zwischen Scherparametern ermittelt an ungestörten sog. Blockproben und gestörten Proben aus Bohrkernen (siehe Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2: Vergleich zwischen Scherparameter ermittelt an gestörten und ungestörten Bodenproben des gleichen Materials (Kaolin)

	ϕ' [°]	c' [°]
Scherparameter aus gestörten Proben	35	28
Scherparameter aus ungestörten Proben	43	290

5.2.4 Teilgesättigte Böschungen

In der Regel sind die Böden in einer Böschung oberhalb des Grundwasserspiegels in einem teilgesättigten Zustand (Kapillarität). Die Teilsättigung kann aufgrund einer Erhöhung der Effektivspannungen in der Böschung zu einer gesteigerten Scherfestigkeit und höheren Standsicherheit der Böschung führen. Die Zunahme der Effektivspannungen im Korngerüst ist abhängig vom Wassergehalt des Bodens und damit keine konstante Größe, sondern abhängig von der klimatischen Beeinflussung des Bodens. Untersuchungen von BILZ & VIEWEG (1993) an einem Damm in Berlin, hergestellt aus schluffigem Sand, haben gezeigt, dass die vom Klima beeinflusste Zone bis in etwa 1,0 m unter die Geländeoberfläche reicht (siehe Abbildung 5.5). Darunter bewegen sich die Schwankungen des Sättigungsgrads nur noch zwischen $\Delta S_r = 7$ bis 9%. Ähnliche Ergebnisse wurden von DELAGE et al. (2008), CUI & DELAGE (2009) und YAO et al. (2016) genannt. In

diesem Bereich kann von einer konstanten Erhöhung der Effektivspannungen ausgegangen werden. Im Hinblick auf den Erhalt der Kapillarkohäsion spielen sowohl die Austrocknung, aber in besonderem Maße auch die Vernässung eine große Rolle, wobei die Vernässung als die größere Gefahr für einen vollständigen Verlust der Kapillarkohäsion beispielsweise durch Starkregen zu bewerten ist (FGSV, 2020).

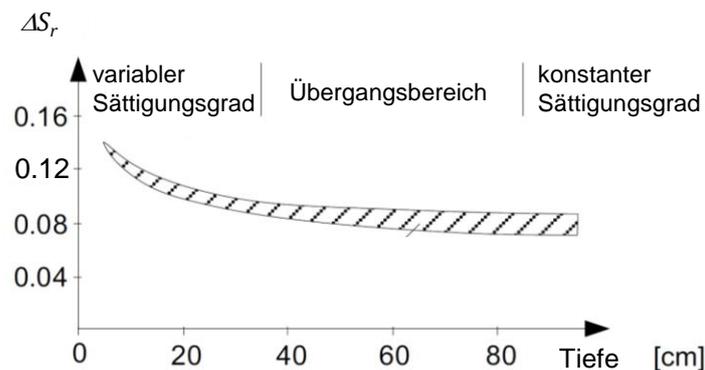


Abbildung 5.5: Tiefenabhängige Änderungen des Sättigungsgrades ΔS_r (BILZ & VIEWEG, 1993)

BILZ & VIEWEG (1993) geben Werte für die Kapillarkohäsion für Sande in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und der Jahreszeit an, die relevanten Einfluss auf die Böschungsstandsicherheit haben können (siehe Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Kapillarkohäsion in Sanden gemäß BILZ & VIEWEG (1993) zitiert in FGSV (2020)

Lagerungs- dichte	Feuchtigkeit Sättigungsgrad	Jahreszeit	Kapillarkohäsion $c_{c,k}$ [kN/m ²]		
			Feinsand	Mittelsand	Grobsand
locker	feucht > 0,07 ... 0,20	Mai / Juni bis November / Dezember	6,5	3,0	1,0
	sehr feucht > 0,20 ... 0,55	Dezember bis April	8,5	5,5	4,5
mitteldicht und dicht	feucht > 0,07 ... 0,25	Mai / Juni bis November / Dezember	8,5	4,0	2,0
	sehr feucht > 0,25 ... 0,60	Dezember bis April	10,5	6,5	5,5

In BAW (2011) wird der Ansatz einer Kapillarkohäsion von $c_{c,k} = 5,0$ kN/m² unter folgenden Voraussetzungen empfohlen:

- Es muss ein Verdunstungsschutz für den Boden, z.B. eine geschlossene Grasnarbe, vorhanden sein und
- das Dammmaterial muss eine Körnungslinie haben, bei der $d_{50} < 0,6$ mm und $d_{85} < 2,0$ mm ist.

Untersuchungen von ANGERER (2020) an einem Bahndamm aus schluffigem Sand in Ostdeutschland haben gezeigt, dass die Erhöhung der Effektivspannungen mit $\Delta\sigma' \approx 1,0$ kPa, sprich die Kapillarkohäsion, nur sehr gering ist und auf die Standsicherheit einer Böschung aus nichtbindigem Lockergestein in der Regel keinen signifikanten Einfluss hat.

Die vorab genannten hohen Werte für Kapillarkohäsion bis zu $10,5$ kN/m² aus der Literatur können nach neuesten Erkenntnissen (ANGERER, 2020) nur dadurch begründet werden, dass es bei kleinen Spannungen in nichtbindigen Böden neben der durch Teilsättigung leicht erhöhten Effektivspannung zu einer Zunahme des Reibungswinkels kommt (siehe Kapitel 5.2). Die MOHR-COULOMB'sche Bruchbedingung ist demnach bei kleinen Spannungen nicht linear. Diese Nichtlinearität wird vereinfacht über einen Achsabschnitt der linearen Bruchbedingung berücksichtigt, die als Kapillarkohäsion bezeichnet wird. Der Begriff Kapillarkohäsion ist hier allerdings etwas irreführend, da die Erhöhung der Scherfestigkeit bei kleinen Spannungen unabhängig vom Sättigungsgrad des Bodens auftritt.

Letztlich sollte bei der Standsicherheitsberechnung von Böschungen oberflächennah (bis ca. 1,0 m) nur eine Erhöhung des Reibungswinkels aufgrund des niedrigen Spannungsniveaus berücksichtigt werden. Dies kann mit dem in Kapitel 5.2 beschriebenen Ansatz nach DIN 4084:2009-01 erfolgen. Die Erhöhung der Effektivspannung und damit das Auftreten einer Kapillarkohäsion in größeren Tiefen ist bei nichtbindigen Böden nach neuesten Erkenntnisse nur sehr gering und hat kaum Einfluss auf die Standsicherheit.

5.3 Unterwasserböschungen

5.3.1 Allgemeines

Viele Gruben insbesondere beim Kies- und Sandabbau reichen unter den Grundwasserspiegel, so dass beim Abbau Baggerseen entstehen. Dabei entstehen Böschungen, die grundsätzlich in drei Bereiche eingeteilt werden können: Die Unterwasserböschung, die Wasserwechselzone und die vom Wasser unbeeinflusste Zone (siehe Abbildung 5.6). Im Bereich der Wasserwechselzone wird die Böschung durch zyklische Beanspruchungen aus Wellenschlag und periodische Wasserstandsschwankungen beeinflusst. Im Bereich der Unterwasserböschung ist die Böschung nahezu nur durch periodische Wasserstandsschwankungen und nicht durch zyklischen Beanspruchungen infolge Wellenschlags beeinflusst.

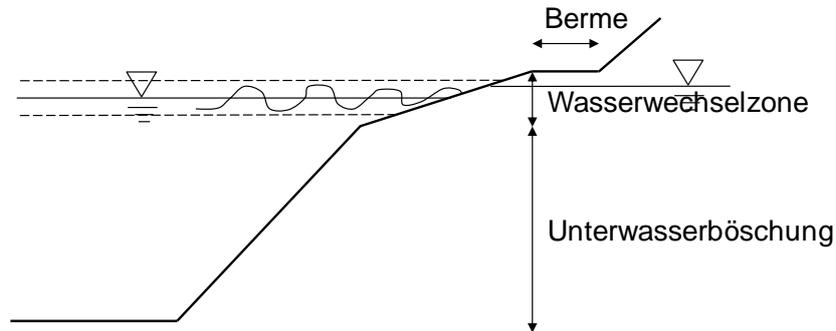


Abbildung 5.6: Bereiche einer Unterwasserböschungen nach BODE (2005)

Es ist allgemein bekannt, dass sich Neigungen von Unterwasserböschungen, die durch Rohstoffgewinnungsmaßnahmen entstehen, langfristig deutlich flacher einstellen können, als es der kritische Reibungswinkel (Reibungswinkel bei volumentreuer Scherung) zulassen würde (HORN 1969, RICHWIEN 2005 und BODE 2005). Die sich einstellenden Böschungsneigungen sind abhängig vom Baugrund, den Grundwasserverhältnissen, der Abbaumethode, dem Alter der Böschungen und von äußeren Lasteinwirkungen auf die Böschungen. Häufig werden Böschungen auch mittels Anschüttungen hergestellt, deren Neigungen sich in der Regel nochmals deutlich flacher einstellen, als bei Unterwasserböschungen, die in gewachsenem Lockergestein hergestellt wurden.

Eine entscheidende Rolle für den sich einstellenden Böschungswinkel spielt die Grundwasserströmung beziehungsweise der hydraulische Gradient. Ein durch die Rohstoffgewinnung entstandener Grundwassersee bewirkt im Grundwasserleiter eine Unterbrechung des Grundwassergefälles. Dadurch entstehen je nach Orientierung der Böschungsfallrichtung zum Grundwassergefälle Verhältnisse, bei denen das Grundwasser aus der Böschung im Vergleich zum ungestörten Grundwassergefälle mit einem erhöhten Gefälle austritt (outflow) und in die Böschung in Fließrichtung unter erhöhtem Grundwassergefälle wieder eintritt (inflow) (Abbildung 5.7).

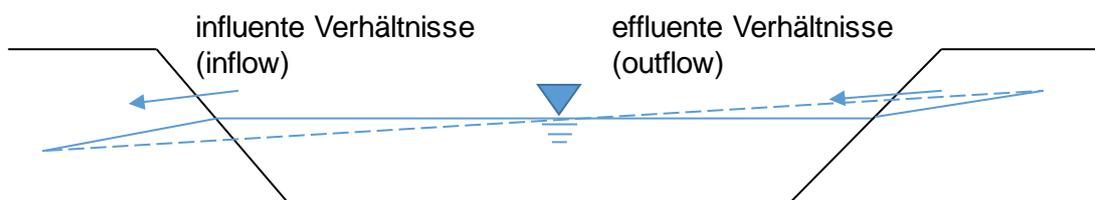


Abbildung 5.7: Grube in Grundwasserleiter

VAN RHEE & BEZUIJEN (1993) führten dazu Versuche mit einer Sandbox durch, die sie neigen und in der sie den hydraulischen Gradienten in der Sandböschung mithilfe eines Unter- und eines Oberwasserstandes in der Box kontrollieren konnten (siehe Abbildung 5.8). Als „outflow“ sind dabei effluente Verhältnisse und als „inflow“ influente Verhältnisse gemeint. Der in den Versuchen verwendete Sand hatte einen Reibungswinkel von $\varphi' = 37^\circ$.

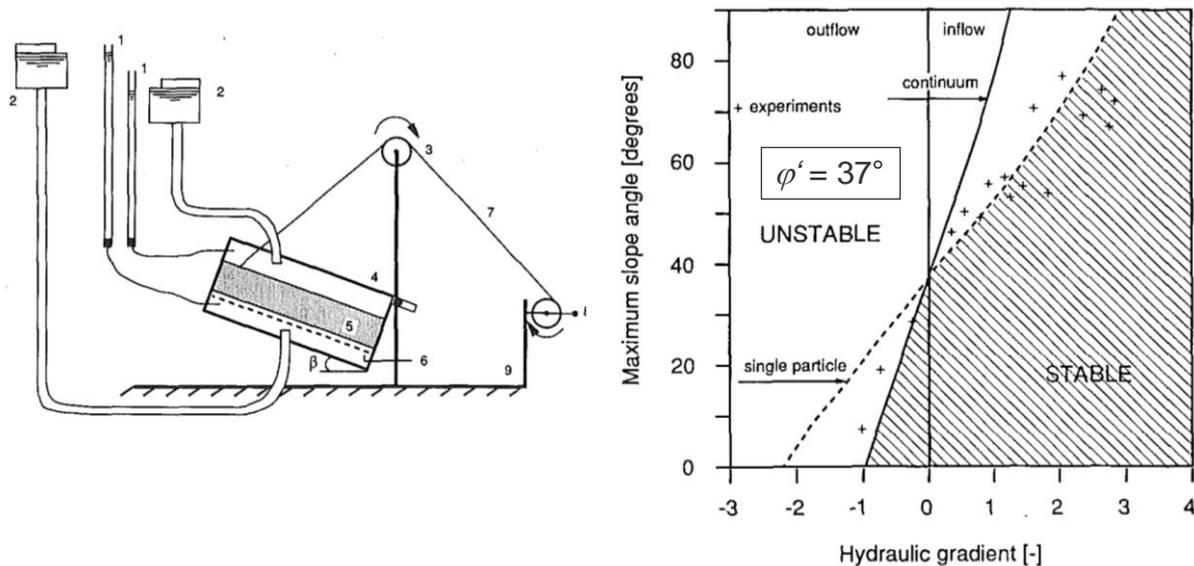


Abbildung 5.8: Links: Skizze des Versuchsaufbaus mit Sandbox (4), Unter- und Oberwasser (1)(2); rechts: Maximaler Böschungswinkel in Abhängigkeit vom hydraulischen Gradienten (VAN RHEE & BEZUIJEN, 1993)

Die Ergebnisse zeigen, wie die Strömungsrichtung und der hydraulische Gradient die Böschungsstandsicherheit maßgeblich beeinflussen. Bei einem hydraulischen Gradienten von null entspricht der maximale Böschungswinkel genau dem Reibungswinkel des Sandes. Bei negativen hydraulischen Gradienten, also effluenten Verhältnissen, nimmt der maximale Böschungswinkel stark mit dem hydraulischen Gradienten ab. Bei einem hydraulischen Gradienten von -1 ist die Böschung sogar bei einem Neigungswinkel von 0° nicht mehr standsicher. Die Strömung ist dann so stark, dass das Korngefüge, das durch das Eigengewicht der Körner besteht, aufgelöst wird. Influyente Verhältnisse hingegen sorgen dafür, dass die Böschung mit einem steileren Winkel als dem Reibungswinkel stabil bleibt. Die Autoren unterscheiden bei ihren Untersuchungen zwischen zwei verschiedenen Versagensmechanismen, dem „continuum movement“ und dem „single particle movement“. „Continuum movement“ meint das Versagen entlang eines tiefer liegenden Versagensmechanismus und „particle movement“ meint das Versagen durch oberflächliche Partikelbewegungen. „Continuum movement“ ist bei effluenten Verhältnissen und „single particle movement“ bei influenten Verhältnissen maßgeblich.

Die in den Untersuchungen berücksichtigten hydraulischen Gradienten sind allerdings für übliche Grundwasserströmungen extrem hoch. Laut Auswertungen von BÖTTGER (1978) zitiert in BODE (2005) liegen übliche hydraulische Gradienten infolge der Unterbrechung des Grundwassergefälles durch Grundwasserseen im Bereich von $i = 0,05$ bis $0,10$. Sie werden auch dadurch begrenzt, dass die Seen nicht beliebig groß hergestellt werden können, um ein eventuelles Überlaufen aufgrund von Grundwasserstandsschwankungen zu verhindern.

Neben der Grundwasserströmung beeinflussen noch Grundwasserstandsänderungen, Wellenschlag und die Abbaumethode die Böschungsneigung. Diese Einflussgrößen sind schwierig in einem Bemessungsansatz zu berücksichtigen. BODE (2005) und RICHWIEN (2005) haben daher

auf empirischer und semiempirischer Basis Bemessungskonzepte für Böschungsstandsicherheiten unter Berücksichtigung der genannten Einflussgrößen entwickelt. Auf diese Ansätze wird in den Kapiteln 5.3.3 und 5.3.4 näher eingegangen.

5.3.2 Erfahrungswerte

Tabelle 5.4 fasst Erfahrungswerte für die Böschungsneigung von Unterwasserböschungen aus der Literatur zusammen. Dabei handelt es sich um den durch periodische Wasserstandsänderungen und zyklische Beanspruchungen durch Wellenschlag weitgehend unbeeinflussten Bereich der Böschung. Neben den Angaben aus der Literatur sind zum Vergleich auch Ergebnisse der Seegrundvermessung im Raum München eingetragen, die im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführt wurden. Für die Wasserwechselzone werden Erfahrungswerte in Tabelle 5.5 angegeben.

Auffällig ist, dass die meisten Quellen zwar nach Bodenarten unterscheiden, aber keine Differenzierung hinsichtlich dessen vornehmen, ob die Böschung im gewachsenem Untergrund hergestellt wurde, oder die Böschung gekippt wurde. Die Vermessungen von Baggerseen im Raum München haben gezeigt, dass die Böschungen im gewachsenen Lockergestein etwa doppelt so steil sind wie im gekippten Material (siehe Kapitel 6.7.3).

Neben diesem Einfluss spielen noch die Standzeit der Böschung und das Abbaugerät eine Rolle für die Neigung der Böschung. Die Abbaumethode kann einen großen Einfluss auf die Böschungsgeometrie und damit die Standsicherheit haben.

Tabelle 5.4: Erfahrungswerte für Neigungen von Unterwasserböschungen

Quelle	Bodenart	Neigung [°]	Neigung 1:x	Bemerkung
(HORN, 1969)	Sand und Kies	33,7°	1:1,5	nach Baggerung
		26,6 bis 20°	1:2 bis 1:2,75	14 Monate nach Baggerung
		18,4°	1:3	als standsicher bewertet
(ZWECK & LEHMANN, 1971)	Sand und Kies	26,6°	1:2	bei GW-Strömung
(SCHUBERT, 1972)	Feinsand Mittel- bis Grobsand Kiessand	24,0°	1:2,25	kein Strömungsdruck, $\eta = 1,3$
		28,4°	1:1,85	
		31,2°	1:1,65	
(BÖTTGER, 1978)	Sand und Kies (Oberrheingebiet)	21,8°	1:2,5	Überwasserzone bei natürlich gelagerten Böden u. Aufschüttungen
(DINGETHAL <i>et al.</i> , 1985)	Sand und Kies	33,7 bis 26,6°	1:1,5 bis 1:2	

Tabelle 5.4: Erfahrungswerte für Neigungen von Unterwasserböschungen

Quelle	Bodenart	Neigung [°]	Neigung 1:x	Bemerkung
(OBERSTE BERGBEHÖRDE, 1985)	Sand und Kies	$\beta = \varphi_c$		Unterwasserzone bei Gewinnung mit Eimerkettenbagger
(DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, 1992)	Kies und Sand	33,7°	1:1,5	annähernd horiz. Schichtung, unter Wasser
	bindige u. gemischtkörnige Böden	26,6°	1:2	annähernd horiz. Schichtung, unter Wasser
(HEYNE & MEIXNER, 1992)	Kies-Sand	18,4°	1:3	Unterwasserzone mit Schwimmgreifer
(SCHAREK & MÜLLER, 1997)	Kies und Sand	26,6°	1:2	Unterwasserzone
(FLOSS, 1997)	Kies	26,6°	1:2	Baggerseen
	Grobsand	18,4 bis 14,0°	1:3 bis 1:4	
	Mittel- bis Feinsand	11,3 bis 7,1°	1:5 bis 1:8	
(ADERHOLD, 2001)	Kies	33,7° bis 21,8°	1:1,5 bis 1:2,5	Hessische Tagebaue bei Abbau unter Wasser
	Sand und Kies	26,6 bis 21,8°	1:2 bis 1:2,5	
(PATZTOLD & BODE, 2001)	Quarzsand		1:3	Raum Fläsheim Raum Offenburg
	Oberrhein-Kies		1:3 und flacher	
	Kies		1:2,5 bis 1:3	
(BODE, 2005)	Kies	33,7 bis 15,9°	1:2	Raum Hameln Raum Hannover
	Kies-Sand		1:1,5 bis 1:3,5	
(BODE, 2005)	Sand	19,7 bis 12,5°	1:2,8 bis 1:4,5	Mittel: 1:2,6 Stabw/Mittel: 13%
			1:2,8 bis 1:4,5	Mittel: 1:3,7 Stabw/Mittel: 11%
Seegrundvermessungen im Raum München 2019	gewachsenes Lockergestein	26,7 bis 24,4°	1:2,0 bis 1:2,2	Gerharding Seilgreifer Standzeit 1 bis 8 a
	Kies-Sand mit Feinkorn			
	Gekipptes Lockergestein	14,4 bis 8,8°	1:3,9 bis 1:6,5	Gerharding eingeschoben Standzeit 2 bis 9,5 a

Tabelle 5.4: Erfahrungswerte für Neigungen von Unterwasserböschungen

Quelle	Bodenart	Neigung [°]	Neigung 1:x	Bemerkung
	heterogener Abraum	26,5 bis 24,5°	1:2 bis 1:2,2	Berglern Schürfkübel Standzeit 5 a
	gewachsenes Lockergestein Kies-Sand mit Feinkorn	27,5 bis 25,1°	1:1,9 bis 1:2,1	Berglern Saugbagger Standzeit 1 bis 18 a
	Gewachsenes Lockergestein Kies-Sand mit Feinkorn	14,8 bis 11,8°	1:3,8 bis 1:4,8	Berglern Standzeit 2 bis 4 a
	Gekipptes Lockergestein Kies-Sand mit Feinkorn	28,8 bis 27,7°	1:1,8 bis 1:1,9	Eichenkofen Eimerkettenbagger Standzeit 5 bis 6 a
	Gewachsenes Lockergestein Kies-Sand mit Feinkorn	15,9 bis 10,3°	1:3,5 bis 1:5,5	Eichenkofen Standzeit < 1 bis 10 a
Sandgrube Oberpfalz	eng gestufter Mittelsand	21°	1:2,6	Standzeit > 1 a
Sandgrube Großostheim	Fein- bis Grobsand	27,5° bis 20,2°	1:1,9 bis 1:2,7	Standzeiten unbekannt

Der Vergleich zwischen der Unterwasserböschung und der Wasserwechselzone zeigt, dass diese deutlich flacher ist mit Neigungen zwischen 1:3 bis 1:10 (siehe Tabelle 5.5).

Tabelle 5.5: Erfahrungswerte für Neigungen der Wasserwechselzone

Quelle	Bodenart	Neigung [°]	Neigung 1:x	Bemerkung
(BÖTTGER, 1978) (BÖTTGER, 1983)	Sand und Kies	11,3°	1:5	
(DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, 1992)	Sand und Kies	18,4°	1:3	
(DINGETHAL <i>et al.</i> , 1985)	nicht benannt	11,3 bis 5,7°	1:5 bis 1:10	
(HEYNE & MEIXNER, 1992)	Sand und Kies	8,1 bis 5,7°	1:7 bis 1:10	
(SCHAREK & MÜLLER, 1997)	Kies und Sand	11,3°	1:5	
(NIEDERSÄCHSISCHES UMWELTMINISTERIUM, 2003)	nicht benannt	11,3 bis 5,7°	1:5 bis 1:10	
(RUNGE, 2003)	nicht benannt	11,3 bis 5,7°	1:5 bis 1:10	
(BODE, 2005)	Kies-Sand	18,4 bis 7,1°	1:3 bis 1:8	Mittel: 1:5 Stabw/Mittel: 23%
	Sand	12 bis 6,6°	1:4,7 bis 1:8,6	Mittel: 1:7,1 Stabw/Mittel: 24%

5.3.3 Bemessungsansatz nach RICHWIEN (2005)

Der semiempirische Bemessungsansatz für Unterwasserböschungen nach RICHWIEN (2005) basiert auf dem klassischen Lamellenverfahren erweitert um den Einfluss instationärer Porenwasserdrücke infolge periodischer Wasserstandsänderungen (Wellenschlag) Δu_i und stationärer Wasserstandsänderungen infolge Grundwasserstandsschwankungen S_{nat} . Die Böschungsstandsicherheit μ wird durch den Vergleich einwirkender E und widerstehender R Größen berechnet:

$$\mu = \frac{E}{R} \quad (2)$$

mit

$$R = r \cdot \sum \frac{(G_i + P_i - (u_i + \Delta u_i) \cdot b_i) \cdot \tan \varphi_i}{\cos \vartheta_i + \mu \cdot \tan \varphi_i \cdot \sin \vartheta_i} \quad [kN/m] \quad (3)$$

mit G_i Eigengewicht der Lamelle
 P_i oberhalb der Böschung angreifende Vertikallasten
 u_i Porenwasserdruck auf Lamelle
 b_i Breite der Lamelle
 ϑ_i Winkel zwischen Vertikaler durch den Gleitkreismittelpunkt und dem Mittelpunkt der Lamellenunterkante

und

$$E = r \cdot \sum (G_i + P_i) \cdot \sin \vartheta_i + \sum M_s + S_{nat} \cdot a_s \quad [kN/m] \quad (4)$$

Die Größe der instationären Wasserstandsänderungen Δu_i , die den maßgeblichen Einfluss auf die Böschungsstandsicherheit haben, kann zum einen mittels eines Ansatzes von DE GROOT (1988) und KÖHLER (1989) abgeschätzt werden. Alternativ, wie von RICHWIEN vorgeschlagen, kann der Einfluss durch Einführung des Speicherkoeffizienten S_s , der in gängigen Berechnungsprogrammen im Lamellenverfahren als zusätzliche Bodenkenngroße enthalten ist, berechnet werden:

$$S_s = \frac{2 \cdot k \cdot t_A \cdot b^2}{\pi} \quad [kN/m] \quad (5)$$

mit k der hydraulischen Durchlässigkeit des Bodens, t_A der Absinkzeit, und b dem Porenwasserdruckparameter. Der Porenwasserdruckparameter ist abhängig von der Wassertiefe, der Steifigkeit des Baugrunds, der Porenzahl, der hydraulischen Durchlässigkeit und der Absinkzeit. RICHWIEN liefert für häufige Parameterbereiche in Nomogrammen zusammengefasste Werte für b .

Das Verfahren nach RICHWIEN birgt folgende Nachteile:

- Keine Unterscheidung zwischen Wasserwechselzone und tiefer liegender Unterwasserböschung, bzw. für die Wasserwechselzone wird pauschal H:L = 1:5 angenommen.
- keine Unterscheidung zwischen den Abbaumethoden. Das Verfahren nach RICHWIEN liefert ausschließlich Böschungsneigungen für Böschungen, die schonend (kontrolliert) abgebaut wurden.
- Es werden keine Angaben zu Sicherheitsbereichen (Bermen) zwischen der Böschungsschulter und angrenzender Infrastruktur gemacht.
- Der Porenwasserdruckparameter b ist abhängig vom Steifemodul E_s , der Porenzahl e , dem Sättigungsgrad S_r , der Wassertiefe, der Absinkzeit t_A und der hydraulischen Durchlässigkeit k . Daher ist die Bestimmung von b mit einem hohen Untersuchungsaufwand verbunden.
- Die berechneten Böschungsneigungen sind stark abhängig vom errechneten Potentialliniennetz und zeigen eine große Streubreite.

5.3.4 Bemessungsansatz nach BODE (2005)

Ein zweiter empirischer Ansatz zur Bemessung von Unterwasserböschungen wurde von BODE (2005) entwickelt. Er wertete dazu Böschungsneigungen von insgesamt 126 Baggerseen in ganz Deutschland aus, davon 14 in Bayern. Tabelle 5.6 zeigt die Auswertung der Neigungsmessungen an den 126 Baggerseen nach maximaler, minimaler und mittlerer Neigung sowie der Streubreite ausgedrückt als die Standardabweichung (Stabw) dividiert durch die mittlere Neigung. Die Streubreite ist mit 21 bis 24% in der Wasserwechselzone wesentlich größer als bei den Unterwasserböschungen mit 11 bis 14%.

Tabelle 5.6: Auswertung der Neigungsmessungen an 126 Baggerseen nach maximaler, minimaler und mittlerer Neigung sowie der Streubreite (Stabw / Mittel)

	Max	Min	Mittel	Stabw/Mittel
Unterwasserböschung				
Kies	1:1,50 (34°)	1:3,50 (16°)	1:2,57 (21°)	14%
Kies-Sand	1:2,00 (27°)	1:3,00 (18°)	1:2,57 (21°)	12%
Sand	1:2,75 (20°)	1:4,50 (13°)	1:3,72 (15°)	11%
Wasserwechselzone				
Kies	1:3,00 (18°)	1:8,00 (7°)	1:4,95 (11°)	23%
Kies-Sand	1:3,60 (16°)	1:6,20 (9°)	1:5,08 (11°)	21%
Sand	1:4,70 (12°)	1:8,60 (7°)	1:7,13 (8°)	24%

BODE teilt die Böschung in die drei genannten Bereiche Unterwasserböschung, Wasserwechselzone und Berme ein (siehe Abbildung 5.6). Für jeden Bereich schlägt er separate Bemessungsansätze vor. Dabei gehen folgende Informationen in die Bemessung ein:

Immer notwendige Informationen

- Ansprache Probenmaterial
- Aufstellung Schichtenverzeichnis
- Bestimmung Kornverteilung (KV)

Zusätzlich fast immer notwendige Informationen

- Scherparameter (bei BODE über KV abgeschätzt)
- Wichte der Böden
- Grundwasserinformationen
- Lasten auf der Böschung
- Gewinnungsgeräte
- Lagerstättenprovinz zur Einteilung in Erfahrungswertbereiche

Weitere Informationen im Falle Erdbeben und Bodenverflüssigung

- Erdbebengefährdung
- Kornform
- Verflüssigungspotential

Insbesondere wird zwischen kontrollierten und unkontrollierten Abbauarten unterschieden. Bei kontrollierten Abbauarten wird die Böschung schonend hergestellt und sie ist während des Abbauprozesses standsicher. Unkontrollierte Abbauarten stellen nach den gesammelten Daten die weitaus häufigere Methode dar und erzeugen im Abbauprozess permanent Böschungsbrüche. Für die beiden Abbauarten schlägt BODE folgende empirische Formeln vor:

Unkontrollierte Baggerung:

$$\beta_{erf} = \arctan \left(5,260155 - 0,074211 \cdot \frac{\varphi'}{\gamma_{\varphi}} + 0,004926 \cdot \mu_0^{<0,063} \right)^{-1} \quad [^\circ] \quad (6)$$

gültig für $30,2^\circ \leq \varphi' \leq 39,8^\circ$ und $2,4\% \leq \mu_0^{<0,063} \leq 100\%$

Kontrollierte Baggerung:

$$\beta_{erf} = \arctan\left(\eta_{tab} \cdot \alpha_{dyn} \cdot \tan\frac{\varphi'}{\gamma_\varphi}\right) [^\circ] \quad (7)$$

mit $\gamma_\varphi = 1,10$ (weicht vom Teilsicherheitsbeiwert für den Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des dränierten Bodens nach DIN1054 – BS-P ab), $\mu_0^{<0,063}$ dem Massenanteil kleiner 0,063 mm des Bodens, η_{tab} dem Sicherheitsbeiwert nach Bodenart und Grundwassergefälle (siehe Anhang A.2) und α_{dyn} dem Beiwert für die Baggerung (0,70 Box-Cut Baggerung nicht zwangsgeführt, 0,8 Box-Cut Baggerung zwangsgeführt, 0,9 profilgerechte Baggerung).

5.3.5 Bemessungsansatz der böschungsp parallelen Strömung

Ein weiterer Bemessungsansatz für Unterwasserböschungen ist die sogenannte böschungsp parallele Strömung, die beispielweise in Niedersachsen zur Bemessung von Unterwasserböschungen zum Einsatz kommt (RICHWIEN, 2005):

$$\beta_{max} = \arctan\left(\frac{\gamma'}{\gamma_w + \gamma'} \cdot \frac{\tan \varphi'_k}{\gamma_\varphi}\right) \approx \arctan\left(0,5 \cdot \frac{\tan \varphi'_k}{\gamma_\varphi}\right) [^\circ] \quad (8)$$

mit γ_φ dem Teilsicherheitsbeiwert für den Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des dränierten Bodens nach DIN1054 BS-P. Der Ansatz zeichnet sich insbesondere durch seine einfache Anwendbarkeit aus. Er basiert auf der Annahme eines böschungsp parallelen Gleitens, ist also strenggenommen nur für kohäsionsloses Material gültig. Eine Herleitung findet sich bei ENGEL & LAUER (2017). Die grundsätzliche Annahme ist, dass die Strömung böschungsp parallel verläuft und der hydraulische Gradient sich daher aus der Böschungsneigung ermitteln lässt über

$$i = \frac{z \cdot \cos^2 \beta}{l}. \quad (9)$$

Die so ermittelten hydraulischen Gradienten sind sehr groß im Vergleich zu den bereits erwähnten Erfahrungswerten von $i = 0,05$ bis $0,10$. Unter der Annahme eines Verhältnisses von $z/l = 1$ ergeben sich bei Reibungswinkeln $\varphi' = \beta = 30^\circ$ bis 40° Gradienten von $i = 0,75$ bis $0,59$. Dadurch führt der Ansatz tendenziell zu flachen Böschungswinkeln.

Grundsätzlich ist der Ansatz der böschungsp parallelen Strömung physikalisch nicht begründbar, da sich eine böschungsp parallele Strömung in der Böschung insbesondere unter Wasser nicht ausbildet. Der Ansatz ist aber trotzdem verwendbar, da er Böschungswinkel ergibt, die sich mit Erfahrungswerten und dem Bemessungsansatz von BODE für unkontrolliert abgebaute Böschungen decken, wie im Folgenden gezeigt wird.

5.3.6 Vergleich der Bemessungsansätze

Abbildung 5.10 zeigt den Vergleich der verschiedenen vorgestellten Bemessungsvarianten für den Bereich der Unterwasserböschung in Abhängigkeit vom Reibungswinkel. Gut zu erkennen ist, dass die Bemessungsansätze von BODE für unkontrollierte Baggerung und der Ansatz der böschungsparellen Strömung sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Der Bereich der betrachteten Reibungswinkel zwischen 30° und 40° deckt den Bereich üblicher Werte in situ ab. Die standsischeren Böschungswinkel für unkontrollierte Abbaumethoden nach BODE und gemäß dem Ansatz einer böschungsparellen Strömung liegen zwischen $\beta_{min} = 14,8^\circ$ (1:3,8) bei $\varphi' = 30^\circ$ und $\beta_{max} = 21,1^\circ$ (1:2,6) bei $\varphi' = 40^\circ$, also in etwa $\beta = 0,5 \varphi'$. Für kontrollierte Abbaumethoden ergeben sich wesentlich steilere Böschungsneigungen zwischen $\beta_{min} = 17,7^\circ$ (1:3,1) bei $\varphi' = 30^\circ$ und $\beta_{max} = 34,1^\circ$ (1:1,5) bei $\varphi' = 40^\circ$. Die Variationen beim Ansatz von BODE entstehen für die unkontrollierten Abbaumethoden ausschließlich aufgrund der unterschiedlichen Feinanteile $\mu_0^{<0,063}$, hier variiert zwischen 2,4% und 100%. Die verstärkte Separierung des Baugrunds bei unkontrollierter Abbauart und die verzögerte Sedimentation der Feinanteile bewirken einen weiten Transport des Bodens unter Wasser und dadurch eine Abflachung der Böschung. Bei den kontrollierten Abbauarten ist die Böschungsneigung maßgeblich beeinflusst durch den Beiwert α_{dyn} für die unterschiedlichen kontrollierten Abbaumethoden (Box-Cut Baggerung nicht zwangsgeführt, Box-Cut Baggerung zwangsgeführt, profilgerechte Baggerung, siehe Abbildung 5.9) und den Beiwert η_{tab} zur Berücksichtigung der Grundwasserströmung sowie der Bodenart. Das führt zu einer wesentlich größeren Bandbreite zwischen den minimal und maximal möglichen Böschungsneigungen.

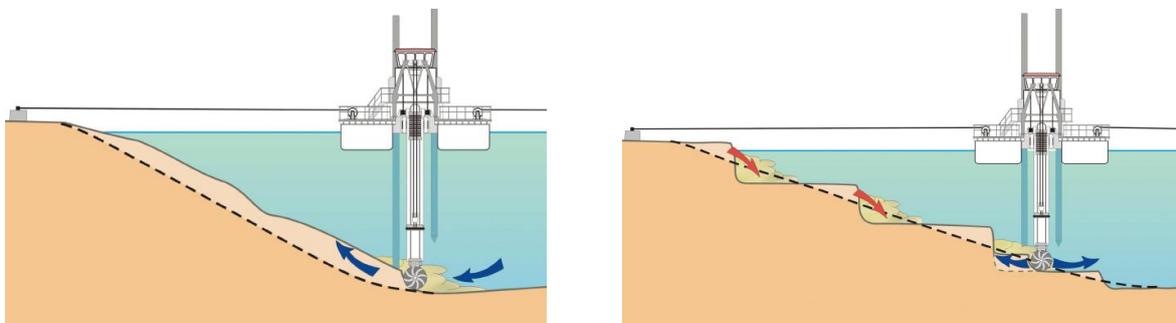


Abbildung 5.9: Kontrollierte Abbaumethode mittels profilgerechter Baggerung (links) und Box-Cut Baggerung (rechts) (entnommen aus BODE, 2005)

Zum Vergleich ist außerdem die Bandbreite möglicher Böschungsneigungen bei einem Reibungswinkel von $\varphi' = 30^\circ$ nach RICHWIEN in Abbildung 5.10 eingetragen. Es zeigt sich, dass die angegebene Bandbreite im Bereich der maximalen Böschungswinkel nach BODE liegt und die Bemessungsmethode nach RICHWIEN, wenn überhaupt, dann nur auf kontrollierte Abbauarten mit profilgerechter Baggerung angewendet werden sollte. Wie schon erwähnt, bedeutet die nicht Berücksichtigung der Abbauart bei dem Ansatz nach RICHWIEN eine starke Einschränkung der Anwendbarkeit des Bemessungsansatzes.

Der Vergleich der verschiedenen Bemessungsansätze zeigt, dass der sehr einfach anwendbare Ansatz der böschungsp parallelen Strömung anstelle des komplizierten Ansatzes nach BODE im Falle unkontrollierter Abbaumethoden verwendet werden kann. Im Falle kontrollierter Abbauarten bedarf es einer genaueren Betrachtung des Baugrunds, der Grundwassersituation und der genauen Abbaumethode, um eine stabile Böschungswinkel festzulegen. Die Obergrenze der möglichen Böschungswinkel bei kontrollierter Abbaumethode nach BODE (2005) sind nahezu identisch mit den sich ergebenden Böschungswinkeln unter Anwendung der FELLENIUS-Regel unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwerts für den Reibungswinkel nach DIN1054 für die ständige Bemessungssituation BS-P und eines Ausnutzungsgrads von $\mu = 1,0$:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \varphi'}{\gamma_{\varphi}} \right), \tag{10}$$

mit $\gamma_{\varphi} = 1,25$. Sie lassen sich so wesentlich leichter abschätzen, als mit der Methode nach BODE (2005). Nach eigenen Erfahrungen und nach Angaben von BODE (2005) arbeitet heutzutage allerdings die Mehrzahl der Betriebe mit unkontrollierten Abbaumethoden, da diese in den meisten Fällen wirtschaftlicher sind.

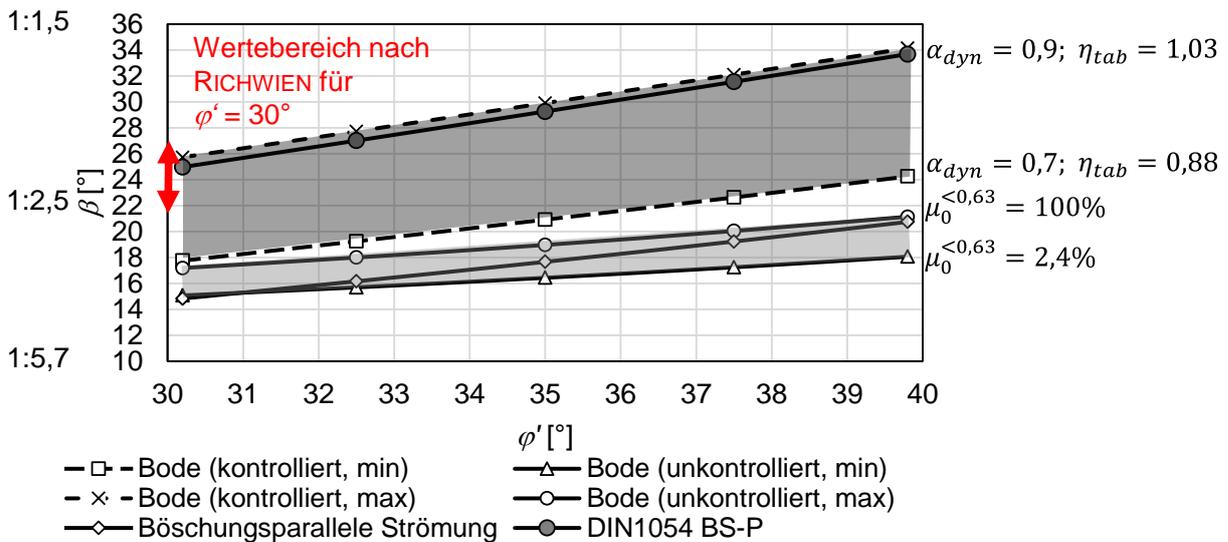


Abbildung 5.10: Stabile Böschungswinkel in Abhängigkeit vom Reibungswinkel nach BODE (2005) ($\gamma_{\varphi} = 1,10$), gemäß dem Ansatz einer böschungsp parallelen Strömung, nach RICHIWIEN (2005) für $\varphi' = 30^{\circ}$ und nach der Fellenius Regel (DIN1054 BS-P) $\beta = \tan^{-1}(\tan(\varphi')/\gamma_{\varphi})$, $\gamma_{\varphi} = 1,25$

5.3.7 Wasserwechselzone

BODE (2005) leitete aus umfangreichen Vermessungen von Böschungswinkel im Wasserwechselbereich Erfahrungswerte für unterschiedliche Bodenarten ab (siehe Tabelle 5.7).

Tabelle 5.7: Empfehlungen für Neigungen der Wasserwechselzone in Abhängigkeit von der Bodenart (BODE, 2005)

Bodenart	H:L	β [°]
Sand bis Sand kiesig	1:8	7,1
Sand kiesig bis Kies sandig	1:6	9,5
Kies sandig bis Kies	1:5	11,3

Zusätzlich zum erforderlichen Neigungsverhältnis gibt er einen Bemessungsansatz für die mindestens erforderliche Breite der Wasserwechselzone in Abhängigkeit von den Wasserstandsschwankungen und Wellenauflaufhöhen an:

$$b_{erf} = \frac{1}{n} \left(HW + z_{98} - NW + \frac{H_s}{2} \right) [m] \quad (11)$$

mit $n = H:L$, HW dem Hochwasserstand, NW dem Niedrigwasserstand, z_{98} der Wellenauflaufhöhe mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 2% (siehe BODE (2005) Seite 50 ff. und Kapitel 6.7.2) und H_s der signifikanten Wellenhöhe (i.d.R. $\leq 0,5$ m).

5.3.8 Sicherheitsabstand an Böschungsschulter

BODE (2005) macht neben dem Bereich der Unterwasserböschung und der Wasserwechselzone auch Angaben zum notwendigen Sicherheitsabstand an der Böschungsschulter (von BODE Bermbreite genannt). Für die Bemessung wird keine Formel wie bei den Unterwasserböschungen vorgeschlagen, sondern es werden je nach Beanspruchung der Böschung und gegebenen Randbedingungen tabellierte Sicherheitsabstände, abgeleitet aus numerischen Berechnungen und Erfahrungswerten, genannt. Berücksichtigt werden Beobachtungen und Messungen zu Baggertoleranzen, Erdbebenbeanspruchungen und eine mögliche Bodenverflüssigung. Die einzelnen erforderlichen Sicherheitsabstände je nach Beanspruchung und Abbaumethode werden aufaddiert zum insgesamt erforderlichen Sicherheitsabstand. Die Zusammenstellungen finden sich auf den Seiten 124 bis 135 seiner Arbeit und werden zusammengefasst in Anhang A.3 wiedergegeben. Die Festlegung von Sicherheitsabständen bei Erdbebenbeanspruchung und möglicher Bodenverflüssigung werden dabei nicht wiedergegeben, da in diesen Fällen eine genaue Einzelfallbetrachtung dringend zu empfehlen ist, die sich nicht ohne Weiteres auf Erfahrungswerte stützen kann. Zur Wahrung der Sicherheit bei möglicher Verflüssigung können nach BODE sehr große Sicherheitsabstände an der Böschungsschulter (> 50 m) nötig sein. Eine genaue Einzelfallbetrachtung kann daher auch von großem wirtschaftlichem Interesse für die Betreiber sein.

5.4 Verfahrenstechnik

Ein entscheidender Faktor für die Gestaltung standsicherer Endböschungen ist die Verfahrenstechnik beim Abbau der Böschungen. Insbesondere bei Unterwasserböschungen ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Abbaumethoden unterschiedliche stabile Böschungsneigungen. Im Folgenden werden die gängigen Abbaumethoden kurz benannt und hinsichtlich ihres Einflusses auf eine stabile Böschungsneigung bewertet. Dabei wird grundsätzlich zwischen Verfahren in der Trockengewinnung und Verfahren in der Nassgewinnung unterschieden. Einen Überblick über Verfahren in der Nassgewinnung bietet BODE (2005).

5.4.1 Nassgewinnung

BODE (2005) unterscheidet bei der Nassgewinnung grundsätzlich zwischen kontrollierten und unkontrollierten Abbaumethoden. Es ist abhängig vom Gewinnungsgerät, ob der Abbau kontrolliert oder unkontrolliert erfolgen kann. Außerdem weist die Saugbaggerung einige Besonderheiten auf, auf die auch hier gesondert eingegangen wird. Eine tabellarische Zusammenfassung von Gewinnungsgeräten der Nassgewinnung unter Angabe möglicher Abbaumethoden ist in Tabelle A. 1.1 angegeben.

Bei kontrollierten Abbaumethoden wird die Böschung so hergestellt, dass sie bereits im Abbauprozess eine vorgegebene Neigung hat, die standsicher ist und die sich nach dem Abbau auch nicht mehr stark ändert. Bei kontrollierten Abbaumethoden wird außerdem zwischen der profilgerechten Baggerung und der Box-Cut Baggerung unterschieden (siehe Abbildung 5.9). Die profilgerechte Baggerung kann nur mit zwangsgeführten Abbaugeräten erfolgen. Es wird durch eine genaue Schnittführung vom Böschungsfuß zur Böschungsschulter eine definierte Neigung hergestellt, die im Abbauprozess permanent durch Echolotpeilungen kontrolliert wird. Diese Abbaumethode kommt jedoch aufgrund der verhältnismäßig hohen Kosten nahezu nur im Bereich des Wasserbaus und nicht in der Rohstoffgewinnung zum Einsatz (BODE, 2005). Bei der Box-Cut Baggerung wird die Böschung treppenartig mit niedrigen übersteilten Teilböschungen hergestellt. Die Generalneigung der Böschung wird jedoch während des Abbaus so gewählt, dass die Gesamtböschung standsicher ist. Die Box-Cut Baggerung kann mit den meisten gängigen Abbaugeräten ausgeführt werden (siehe Tabelle A. 1.1).

Bei unkontrollierten Abbaumethoden wird die Böschung dadurch geformt, dass während des Abbaus permanente Böschungsbrüche erzeugt werden und sich so eine Böschungsneigung am Grenzgleichgewicht einstellt, die sich in der Regel nach Beendigung des Abbaus weiter abflacht (siehe Abbildung 5.11). Nach eigenen Recherchen und Angaben von BODE (2005) ist der unkontrollierte Abbau die Regel bei der Rohstoffgewinnung in der Steine- und Erdenindustrie. Unkontrolliert abgebaute Böschungen verändern über längere Zeiträume ihre Böschungsneigung, da sie im Zustand unmittelbar nach dem Abbau im Grenzgleichgewicht stehen und kleinste Änderungen der Randbedingungen zu Böschungsrutschungen führen. HORN (1969) gibt hierzu beispielhaft für eine Sand- und Kiesgrube folgende zeitliche Entwicklung an:

- 1 : 1,5 unmittelbar nach der Baggerung,
- 1 : 2 bis 1 : 2,75 14 Monate nach der Baggerung und
- 1 : 3 als standsicher bewertet.

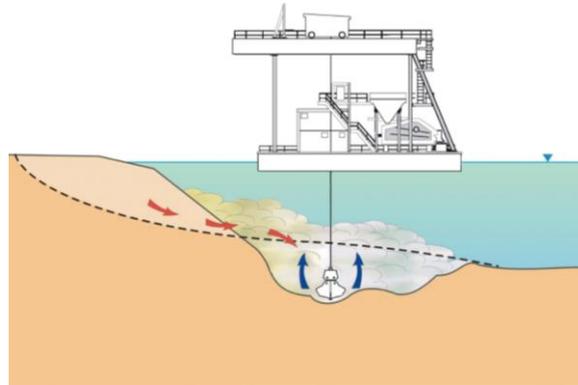


Abbildung 5.11: Unkontrollierte Abbaumethode mittels Schwimmbagger mit Greiferkorb (entnommen aus BODE, 2005)

Je nach Abbauart können sich sehr unterschiedliche stabile Böschungsneigungen der Unterwasserböschung ergeben. Die aus Erfahrungswerten abgeleiteten Spannweiten sind bei kontrollierten Abbauarten bei Reibungswinkeln $\varphi' = 30^\circ$ bis 40° Böschungsneigungen von $\beta = 18^\circ$ bis 34° . Die große Spannweite ist auf unterschiedliche hydrodynamische, baugrundbedingte und abbaubedingte Einflussfaktoren zurückzuführen. Bei unkontrolliert abgebauten Böschungen liegen die Böschungsneigungen für die gleiche Spannweite an Reibungswinkeln zwischen $\beta = 15^\circ$ bis 21° und damit wesentlich enger beieinander (vgl. Kapitel 5.3).

Saugbaggerung:

Die Saugbaggerung zählt zu den unkontrollierten Abbauarten, wobei unter bestimmten Voraussetzungen auch eine Box-Cut Baggerung umgesetzt werden kann. Bei der Saugbaggerung wird Boden durch Unterdruck hydraulisch gelöst und über Rohrleitungen gefördert. Maximale Fördertiefen ohne Unterwasserpumpen liegen bei etwa 25 m. Es gibt unterschiedliche Saugbaggertypen, die beispielsweise neben Unterdruckförderung das Lockergestein noch mittels Druckwasserstrahlen oder Schneidköpfen lösen. Einen Überblick liefert BODE (2005). In der Regel hinterlassen Saugbagger eine heterogene Morphologie der Böschungen und des Gewässergrunds (siehe Kapitel 6.7.3).

Bei der Saugbaggerung wird während des Abbauprozesses eine sogenannte rückschreitende Erosion bedingt durch Suffosionserscheinungen (siehe Kapitel 5.1) in der Abbauböschung ausgelöst, bei der schollenartige Abbrüche rückschreitend in die Böschung wandern (siehe Abbildung 5.12). Die rückschreitende Erosion (engl.: *retrogressive erosion*) kann unter Umständen Stunden nach Ende der Saugbaggerung weiterlaufen und große Eingriffstiefen in den Rückraum der Böschung erreichen. BODE schlägt daher, basierend auf numerischen Analysen, einen zusätzlichen Sicherheitsabstand bei Saugbaggerung von der Böschungsschulter von 5 m vor (siehe Anhang A.3.2). Im unteren Böschungsabschnitt entstehen während der rückschreitenden Erosion

treppenartige Böschungsstrukturen, die durch den Übergang einer schießenden zu einer strömenden Materialströmung entstehen (siehe Detail in Abbildung 5.12). Bei den erzeugten Böschungsbrüchen kommt es zu einer Separierung des Materials, da die Feianteile wesentlich länger brauchen, um sich abzusetzen und sehr weite Transportwege unter Wasser zurücklegen. Die Separierung und Nachbrüche der Böschung können zu sehr flachen Böschungsneigungen führen $\beta \ll \varphi_c$.

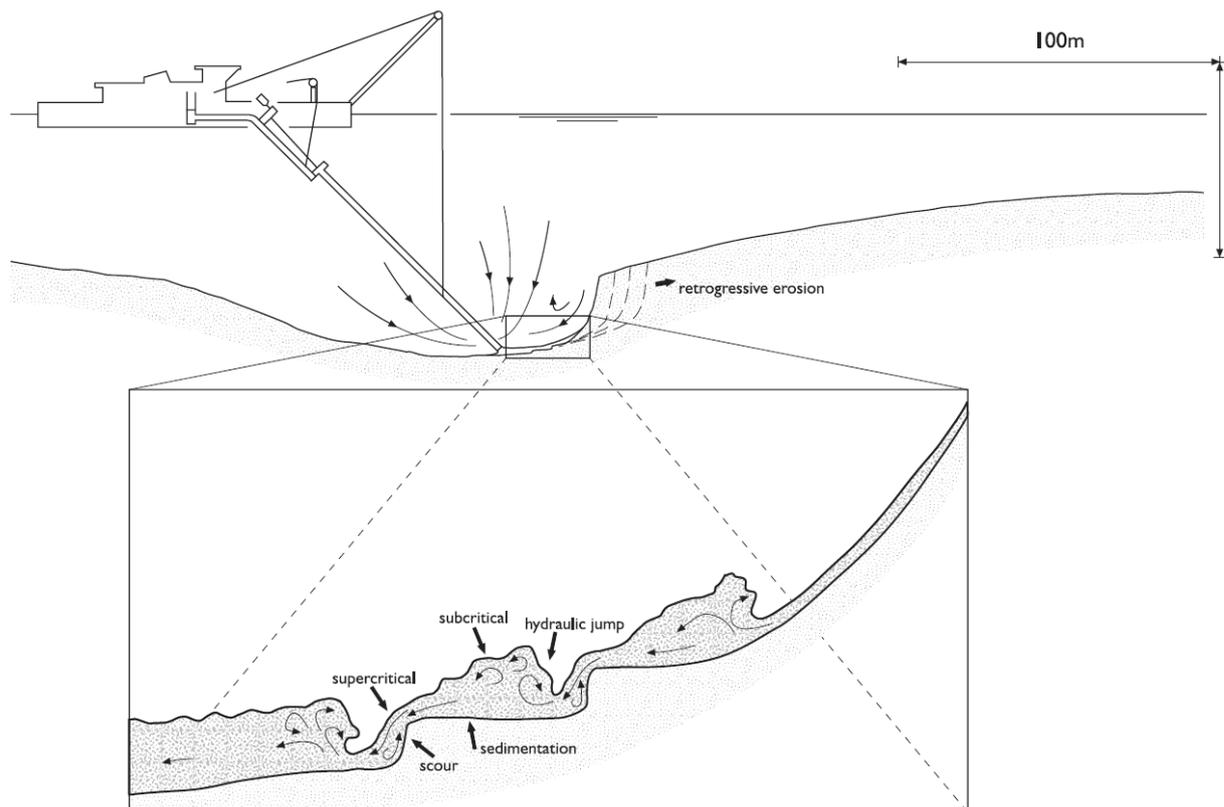


Abbildung 5.12: Rückschreitende Erosion bei Saugbaggerung (VAN DEN BERG *et al.*, 2002; nach DE KONING, 1970)

5.4.2 Trockengewinnung

Eine Übersicht über Gewinnungsgeräte für die Trockengewinnung ist in Tabelle A. 1.2 angegeben. Dort wird auch unterschieden, ob mit den Geräten kontrolliert oder unkontrolliert abgebaut werden kann. Grundsätzlich stellen sich auch bei der Trockengewinnung unterschiedliche Böschungsneigungen in Abhängigkeit von der Abbaumethode ein. Bei kontrolliertem Abbau, während dessen die Böschung permanent stabil ist, bleibt eine möglicherweise vorhandene Strukturfestigkeit in großen Teilen erhalten und die Böden können in der Regel steiler geböschet werden. Bei unkontrolliertem Abbau, während dessen permanent Böschungsbrüche ausgelöst werden, wird eine vorhandene Strukturfestigkeit gestört und die Böschungen bilden sich in der Regel flacher aus und müssen zum Herstellen einer permanent stabilen Neigung angeschüttet und / oder

nachträglich profiliert werden. Dies spiegelt sich auch in den Erfahrungswerten für Böschungsneigungen bei Trockengewinnung und Böschungskategorie BK1 angegeben in Tabelle 8.1 und Tabelle 8.2 wieder. Bei Bemessungen für Böschungen der BK2 oder 3 wiederum ist es nicht ohne Weiteres zulässig eine Strukturfestigkeit, die aufgrund kontrollierter Abbauweise möglicherweise noch erhalten ist, anzusetzen (siehe dazu Kapitel 5.2.3). Wichtig ist für die Neigungen der Endböschungen noch die Unterscheidung, ob die Trockengewinnung mit einer Wasserhaltung oder ohne Wasserhaltung geschieht. Bei Gewinnung mit Wasserhaltung wird zwar im Trockenen abgebaut, die Böschungen im Endzustand stehen aber ganz oder teilweise wieder im Wasser und müssen somit anhand von Erfahrungswerten bzw. Bemessungsverfahren für Unterwasserböschungen bemessen werden (siehe Kapitel 6.7.2).

5.5 Normen, Gesetze, Richtlinien und Merkblätter

In diesem Kapitel werden Regelungen und Hinweise aus den gängigen Regelwerken zusammengefasst, die mit der Themenstellung des Forschungsprojekts in Zusammenhang stehen. Dabei wird unterschieden zwischen Normen, Gesetzen, Richtlinien und Merkblättern. Zunächst werden die Genehmigungsverfahren für Gruben und geotechnische Normen zur Böschungsstandsicherheit behandelt. Anschließend werden die Gesetze, Richtlinien und Merkblätter innerhalb und außerhalb Bayerns, die bei Gruben eine Rolle spielen, dahingehend betrachtet, ob Regelungen zur Endstandsicherheit der Grubenböschungen genannt werden. Gesondert wird auf die Definition rutschungsbegünstigender Verhältnisse und die in der Geotechnik häufig angewandte Beobachtungsmethode eingegangen. Außerdem wird die Definition Geotechnischer Kategorien nach EC7 und DIN 1054 sowie Angaben zu notwendigen Baugrunduntersuchungen behandelt. Zitate sind dabei kursiv gekennzeichnet. In Kapitel 6.8 wird darauf eingegangen, welche Regelungen und Hinweise daraus auch im Bereich von Grubenböschungen Beachtung finden sollten.

5.5.1 Genehmigungsverfahren

Wichtig bei der aktuellen Beurteilung von Gruben ist, welchem Genehmigungsverfahren die Gruben unterliegen. Das Genehmigungsverfahren von Gruben und Brüchen in Bayern ist abhängig davon, ob der zu fördernde Rohstoff dem Bergrecht unterliegt oder nicht. Unter Bergrecht stehen sogenannte bergfreie Rohstoffe wie z.B. Erze, Kohle und Salze und einige grundeigene Rohstoffe wie beispielsweise Quarzsande oder Tone, die zur Herstellung von feuerfesten, säurefesten oder nicht als Ziegeleierzeugnissen anzusehenden keramischen Erzeugnissen oder zur Herstellung von Aluminium geeignet sind. Diese Rohstoffe unterstehen dem Bundesberggesetz (BBergG). Die Genehmigungsverfahren werden in diesen Fällen von den regionalen Bergämtern durchgeführt.

Nicht dem Bergrecht unterstehende grundeigene Rohstoffe sind beispielsweise Sande oder Kiese. Die Gewinnung dieser Rohstoffe ist für Bayern im Bayerischen Abtragungsgesetz (siehe Kapitel 5.5.3.2) und im Wasserrecht geregelt. Alle Abgrabungen mit über 500 m² Fläche und einer Tiefe über 2,0 m sind genehmigungspflichtig. Weitere Details insbesondere auch zu geotechnisch relevanten Genehmigungsunterlagen finden sich in der Richtlinie für Anlagen zur Gewinnung von Kies, Sand, Steinen und Erden (siehe Kapitel 5.5.3.1). Da es sich nur um eine Richtlinie handelt, hat sie keine bindende Wirkung. Die Genehmigungsverfahren für nicht dem Bergrecht unterstehende grundeigene Rohstoffe werden von den Landratsämtern durchgeführt.

Um Einblick in die Genehmigungspraxis zu bekommen und daraus ableiten zu können, welche geotechnisch relevanten Daten dort bereits zur Verfügung stehen, wurden Gespräche mit Betrieben und Behörden durchgeführt und die entsprechenden Vorschriften untersucht. Die Erkenntnisse daraus werden im Folgenden zusammengefasst wiedergegeben:

Genehmigung der Gewinnung nach Bergrecht in Bayern:

- Der Abschlussbetriebsplan legt die Nachnutzung und die detaillierte Böschungsgeometrie fest. Dabei sind auch Nachweise zu erbringen, wenn die Betriebe von Erfahrungswerten abweichen wollen. Die Erfahrungswerte basieren dabei in der Regel auf Erfahrungen der jeweiligen Behörde bzw. des Sachbearbeiters und sind nicht generell festgelegt. Die allgemein anerkannten Regeln der Technik sind bei Bergbauvorhaben zu berücksichtigen.
- Es gibt kein vorgeschriebenes Verfahren zur Baugrunderkundung. Der Umfang wird immer individuell festgelegt und beurteilt. Er zielt i.d.R. mehr auf die Eigenschaften des auszubehutenden Rohstoffs als auf die bodenmechanischen Eigenschaften des Bodens hinsichtlich seiner Scherfestigkeit oder weiterer für die Böschungsstandsicherheit relevanter Parameter.

Genehmigung der Gewinnung grundeigener Rohstoffe, die nicht dem Bergrecht unterliegen, in Bayern:

- Die Richtlinie für Anlagen zur Gewinnung von Kies, Sand, Steinen und Erden empfiehlt die Angabe von geotechnisch relevanten Informationen für eine Genehmigung (siehe dazu Kapitel 5.5.3.1). Die Richtlinie macht auch Angaben zu Nachnutzungskonzepten. Hierbei spielt der Naturschutz die vorrangige Rolle. Geotechnische Langzeitkriterien für die Böschungsstandsicherheiten werden nur indirekt festgelegt, indem beispielsweise keine für die Natur nachteiligen Grundwasserstandsänderungen erfolgen dürfen. Dies hat auch Auswirkungen auf die Böschungsstandsicherheit. Manche Anforderungen wie zum Beispiel die Ausbildung unregelmäßiger Böschungen in denen im Einzelfall auch Steilwände erhalten bleiben sollen, können sich die Standsicherheit mindernd auswirken.
- In der Praxis wird häufig eine Art Beobachtungsmethode zur Beurteilung der Standsicherheit von Böschungen angewendet. In der Regel handelt es sich dabei nur um visuelle Kontrollen der Böschungen, die von der Genehmigungsbehörde durchgeführt werden. Rechnerische Nachweise unter Berücksichtigung der Böschungsneigung werden in der Regel nicht verlangt.

5.5.1.1 Bayerische Industrie- und Handelskammer (BIHK): Leitfaden zur Rohstoffsicherung

Der BIHK Leitfaden zur Rohstoffsicherung gibt einen guten Überblick über die Genehmigungsverfahren und wann welche anzuwenden sind. Dieser wird in Auszügen im Folgenden wiedergegeben:

Für bestimmte, im Gesetz abschließend aufgezählte Rohstoffe (z.B. Quarzsand und Quarzkies) gilt das Bundesberggesetz, in dem mit der sogenannten Betriebsplanzulassung eine eigene, spezielle Form der Genehmigung geregelt ist. Ist die Gewinnung eines Rohstoffes, der nicht unter das Bundesberggesetz fällt, mit der Herstellung eines Gewässers verbunden (z.B. Nassauskiesung), ist eine wasserrechtliche Genehmigung erforderlich, nämlich die sogenannte Erlaubnis.

[...] Für Tagebaue, für die keiner der genannte Fälle zutrifft, ist eine Erlaubnis nach dem Bayerischen Abgrabungsgesetz erforderlich (siehe Kapitel 5.5.1 und 5.5.3.25.5.1).

Welche Genehmigung(en) für die eigentliche Rohstoffgewinnung erforderlich ist (sind), und welches Verfahren für die Genehmigung durchzuführen ist, hängt von der Art des Rohstoffs und der Gewinnung ab. Die wesentlichen Bereiche des Genehmigungsrechts werden im Folgenden dargestellt.

3.1 Bergrechtliche Betriebsplanzulassung

Fällt ein Bodenschatz unter das Bundesberggesetz (BBergG), richten sich die Genehmigungsveraussetzungen und das Genehmigungsverfahren nach diesem Gesetz (siehe Kapitel 5.5.3.4). Zuständig ist die Bergbehörde, das heißt das Bergamt. Das Bergamt Nordbayern ist bei der Regierung für Oberfranken, das Bergamt Südbayern bei der Regierung von Oberbayern angesiedelt. Das Gesetz unterscheidet dabei zwischen bergfreien und grundeigenen Bodenschätzen.

Bergfreie Bodenschätze: Zum Beispiel eine Vielzahl von Metallen und Halbmetallen, Stein- und Braunkohle, Graphit, Stein-, Kali-, Magnesia- und Borsalze, Flußspat und Schwerspat.

Grundeigene Bodenschätze: Zum Beispiel Basaltlava (mit Ausnahme des Säulenbasalts), Bentonit, Quarz und Quarzit (soweit sie bestimmte Qualitätskriterien erfüllen [...]) sowie Ton (soweit er bestimmte Kriterien erfüllt).

Bodenschätze, die nicht in §3 Abs. 3 oder Abs. 4 BBergG genannt sind, fallen nicht unter das Bergrecht. Dies gilt häufig für Sand und Kies [...]. Eine Genehmigung nach BBergG ist dann nicht erforderlich und grundsätzlich nicht zulässig, sondern die Genehmigung ist in einem anderen Verfahren zu prüfen.

Das BBergG regelt für die Zulassung einer Rohstoffgewinnung eine besondere Form der Genehmigung, nämlich die sogenannte Betriebsplanzulassung. Für unterschiedliche Zwecke unterscheidet das BBergG zwischen verschiedenen Arten von Betriebsplänen. Die wichtigste Form ist der Hauptbetriebsplan, mit dem die Errichtung und Führung des Betriebs zugelassen wird (§52 Abs. 1 BBergG). Für bestimmte Teile des Betriebs [...] ist der Sonderbetriebsplan vorgesehen, dessen Aufstellung von der Behörde verlangt werden kann (§52 Abs. 2 Nr. 2 BBergG). Für die Einstellung des Betriebs ist schließlich ein Abschlussbetriebsplan erforderlich (§ 53 BBergG), dessen Zulassung und Durchführung Voraussetzung für die „Entlassung aus dem Bergrecht“ ist. Die Zulassung dieser Betriebspläne stellt die Genehmigung für die in ihnen jeweils enthaltenen Anlagen und Einrichtungen dar. [...]

3.2 Wasserrechtliche Planfeststellung / Plangenehmigung oder Erlaubnis

Das Wasserrecht enthält nicht nur materiell-rechtliche Vorgaben, die bei der Rohstoffgewinnung zu beachten sind, sondern auch Genehmigungsvorbehalte. Ist das BBergG nicht anwendbar, ist zu prüfen, ob eine wasserrechtliche Genehmigung erforderlich ist. Für einen Gewässerausbau ist

grundsätzlich eine Planfeststellung erforderlich. Gewässerausbau ist die Herstellung, die Beseitigung oder die wesentliche Umgestaltung eines Gewässers oder seiner Ufer. Ein Gewässer wird nicht hergestellt (das heißt eine Planfeststellung ist nicht erforderlich), wenn das Gewässer nur für einen begrenzten Zeitraum entsteht und der Wasserhaushalt dadurch nicht erheblich beeinträchtigt wird. Hinsichtlich der „begrenzten Dauer“ kommt es weniger auf die Länge des Zeitraums bis zur Wiederverfüllung an, sondern ob von vorherein konkrete, zeitliche Festlegungen für die Wiederverfüllung des Gewässers bestehen.

Eine Plangenehmigung anstelle der Planfeststellung kommt für einen Gewässerausbau in Betracht, für den nach dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) keine Verpflichtung zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung besteht.

Wenn durch Rohstoffgewinnung Grundwasser freigelegt, dadurch aber kein Gewässer hergestellt wird, ist eine Planfeststellung oder Plangenehmigung nicht erforderlich, sondern eine wasserrechtliche Erlaubnis. Diese Erlaubnis hat keine Konzentrationswirkung, das heißt die daneben erforderlichen weiteren Genehmigungen müssen separat von der dafür jeweils zuständigen Behörde erteilt werden.

Zuständig ist die beim Landratsamt bzw. der kreisfreien Stadt angesiedelte Untere Wasserbehörde. Dieser kommt bei der Entscheidung über Planfeststellungen und Plangenehmigungen ein planerischer Gestaltungsspielraum zu.

5.5.1.2 Angaben aus Richwien (2005) zur Genehmigungspraxis in Bayern

Nach RIECHWIEN (2005) existiert in Bayern keine einheitliche Genehmigungspraxis bezüglich der Standsicherheit von Böschungen. Die Genehmigungsbehörden geben auf den Einzelfall bezogene geotechnische Hinweise. Eine Böschungsgestaltung findet nur im Hinblick auf eine Renaturierung, aber nicht unter Berücksichtigung von Standsicherheitskriterien statt.

Diese Feststellung ist nur eingeschränkt gültig. Im Falle von bergrechtlich zugelassenen Gruben wird häufig eine Standsicherheitsbetrachtung verlangt. Sie wird allerdings nicht allgemein vorgeschrieben, sondern im Einzelfall beurteilt, ob sie notwendig ist. Für nicht nach BBergG zugelassene Gruben wird im Betrieb in der Regel nur die Einhaltung von definierten Sicherheitsabständen (siehe Kapitel 5.5.3.1) und für den Endzustand werden Böschungsneigungen nach Erfahrungswerten und naturschutzrechtlichen Belangen festgelegt. Häufig stehen naturschutzrechtliche Belange im Widerspruch zu Standsicherheitsanforderungen, wenn beispielsweise Steilböschungen verlangt werden.

5.5.2 Normen zur Böschungsstandsicherheit

Im Folgenden werden die Angaben zur Berechnung der Böschungsstandsicherheit aus dem EC7, der DIN 1054 und der DIN 4084 zusammengefasst.

5.5.2.1 Aus Handbuch EC7: DIN EN 1997:2014-3 Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik + DIN 1054:2010

- Hinweis: (X) ... aus EC7 stammende Absätze
(X)P... (P) hinter den Absatznummern bedeutet, dass der darauf folgende Satz einen Grundsatz (Prinzip) darstellt.
(X)A ... aus DIN 1054 stammende Absätze

11 Geländebruchsicherheit

[...]

11.3 Einwirkungen und Bemessungssituation

[...]

(5) *Bei Uferböschungen sind die ungünstigsten hydraulischen Bedingungen in der Regel die stationäre Durchsickerung bei höchstem Grundwasserstand und eine rasche Spiegelabsenkung im offenen Wasser.*

(6)P *Bei der Ableitung von Bemessungsverteilungen des Porenwasserdrucks muss die mögliche Bandbreite der Anisotropie der Durchlässigkeit und der Veränderlichkeit des Untergrundes in Rechnung gestellt werden.*

(7)P *Böschungflächen, die möglicherweise einer Erosion ausgesetzt sind, müssen erforderlichenfalls geschützt werden, um zu erreichen, dass ihre Standsicherheit erhalten bleibt.*

(8) *Böschungen sollten versiegelt, bepflanzt oder künstlich geschützt werden. Bei Böschungen mit Bermen sollte ein Dränsystem auf der Berme berücksichtigt werden.*

11.5 Berechnung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

11.5.1 Nachweis der Gesamtstandsicherheit

(1)P *Die Standsicherheit von Böschungen einschließlich vorhandener, betroffener oder geplanter Tragwerke muss für die Grenzzustände der Tragfähigkeit (GEO und STR) mit Bemessungswerten für Einwirkungen und Festigkeiten nachgewiesen werden, wobei die in A.3.1(1)P, A.3.2 (1)P und A.3.3.6 (1)P definierten Teilsicherheitsbeiwerte anzuwenden sind.*

(2)P *Bei der Ermittlung der Böschungsbruchsicherheit müssen alle in Frage kommenden Versagensformen einbezogen werden.*

(3) *Bei Wahl eines Berechnungsverfahrens sollte Folgendes beachtet werden:*

- *Schichtaufbau des Untergrundes;*
- *Vorkommen und Einfallswinkel von Diskontinuitäten;*
- *Sickerwasser und Porenwasserdruckverteilung;*
- *Kriechen durch Scherverformung;*
- *Bruchmechanismus (kreisförmige oder nichtkreisförmige Gleitflächen; Kippen; Fließen);*
- *Anwendung numerischer Verfahren*

(4) Die von der Gleitfläche umschlossene Boden- oder Felsmasse sollte in der Regel als starrer Körper oder in Form mehrerer starrer Körper behandelt werden, die sich gleichzeitig bewegen. Die Gleitflächen oder Grenzflächen zwischen starren Körpern können viele Formen haben – einschließlich ebener, kreisförmiger und komplizierterer Formen. Wahlweise darf die Standsicherheit durch eine Grenzzustandsberechnung oder mit der Finite-Elemente-Methode nachgewiesen werden.

(5) Wenn der Baugrund oder das Dammschüttmaterial relativ homogen und isotrop ist, sollten in der Regel kreisförmige Gleitflächen angenommen werden.

(6) Bei Böschungen in geschichteten Böden mit deutlich wechselnden Scherfestigkeiten sollten die Schichten mit geringer Festigkeit besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Möglicherweise erfordert das die Berechnungen mit nichtkreisförmigen Gleitflächen.

(7) Bei geklüftetem Material wie hartem Fels und geschichteten oder gerissenen Böden kann die Gleitflächenform teilweise oder gänzlich durch die Diskontinuitäten vorgeprägt sein. In diesem Fall müssen in der Regel die Untersuchungen dreidimensionaler Keile vorgenommen werden.

(8) Bereits vorhandene Gleitflächen, die unter Umständen reaktiviert werden können, sollten sowohl mit kreisförmigen als auch nichtkreisförmige Gleitflächen untersucht werden. Die sonst für Nachweise der Gesamtstandsicherheit angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte können dann ungeeignet sein.

(9) Wenn der Bruchzustand nicht als ebener Zustand angenommen werden kann, sollte die Anwendung dreidimensionaler Gleitflächenformen erwogen werden.

[...]

(12) Da es bei der Festlegung der ungünstigsten Gleitfläche nicht möglich ist, zwischen günstigen und ungünstigen Gewichtslasten zu unterscheiden, sollten Unsicherheiten beim Ansatz der Wichte des Bodens durch die Anwendung oberer und unterer charakteristischer Werte berücksichtigt werden.

(13)P Es muss nachgewiesen werden, dass die Baugrundverformung unter Bemessungslasten infolge Kriechens oder großräumiger Setzungen keine unzulässigen Schäden an Tragwerken oder Infrastruktureinrichtungen anrichten kann, die sich im Baugrund, im Baugelände oder in seiner Nähe befinden.

A(14) Stabilisierende Effekte aus Kapillarspannungen dürfen nur dann berücksichtigt werden, wenn deren Wirkung dauerhaft zu erwarten ist.

A(15) Bei Böden, die sich nach 2.4.1 A(11) nicht ausreichend duktil verhalten, ist zu prüfen, ob fortschreitendes Versagen (progressiver Bruch) als Versagensursache in Frage kommt, z.B. bei geschüttetem Boden auf strukturempfindlichen Untergrund.

Einschub:

2.4.1 A(11)

A ANMERKUNG zu (11) Ein ausreichend duktiler Verhalten liegt vor, wenn sich ein Grenzzustand der Tragfähigkeit durch große Verformungen ankündigt. Dies ist z. B. nicht der Fall, wenn wassergesättigter Boden wegen eines sehr großen Hohlraumgehaltes schon bei geringer Störung flüssig werden kann, insbesondere zum Setzungsfließen neigender Sand oder Quickton.

Ende Einschub.

A(16) Räumliche Bruchmechanismen dürfen durch ebene Bruchmechanismen ersetzt werden, wenn dadurch der Grenzzustand der Tragfähigkeit auf der sicheren Seite liegend erfasst wird.

[...]

A(18) Bei Eingriffen in Hängen¹ muss eine mögliche Aktivierung geologisch vorgegebener Gleitflächen berücksichtigt werden.

11.6 Berechnung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

(1)P Entwurf und Berechnung müssen zeigen, dass die Verformungen des Baugrunds keinen Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit bei Tragwerken und Infrastruktureinrichtungen auf dem Baugelände oder in seiner Nähe verursacht.

(2) Die durch folgende Ursachen bedingten Senkungen des Geländes sollten beachtet werden:

- Veränderungen der Grundwasserverhältnisse und der entsprechenden Porenwasserdrücke;*
- Langfristiges Kriechen unter dränierten Verhältnissen;*
- Volumenverluste tiefliegender löslicher Schichten;*
- Bergbau und ähnliche Aktivitäten wie eine Gasgewinnung.*

(3) Da die derzeit verfügbaren analytischen und numerischen Verfahren gewöhnlich keine zuverlässigen Voraussagen zur Verformung eines natürlichen Hanges machen können, sollte das Eintreten eines Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit entweder durch

- eine Begrenzung der mobilisierbaren Scherfestigkeit oder*
- die Beobachtung der Bewegung und die Festlegung von Maßnahmen, diese zu bremsen oder erforderlichenfalls zu unterbinden, vermieden werden.*

A(4) Bei mindestens mitteldicht gelagerten nichtbindigen und bei mindestens steifen bindigen Böden beinhalten die Teilsicherheitsbeiwerte der Tabellen A2.1 und A2.3 für die Bemessungssituation BS-P im Grenzzustand GEO-3 in der Regel auch eine ausreichende Sicherheit gegen den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

¹ Bei Hängen handelt es sich um natürlich entstandene Böschungen.

A(5) Bei Geländesprüngen neben Gebäuden oder Verkehrsflächen, die erhöhten Gebrauchstauglichkeitsanforderungen unterliegen, kann entweder in begründeten Einzelfällen der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit dadurch erbracht werden, dass der Grenzzustand GEO-3 mit durch Anpassungsfaktoren abgeminderten Bodenwiderständen nachgewiesen oder die Beobachtungsmethode nach 2.7 (siehe Kapitel 5.5.5) angewendet wird.

11.7 Kontrollmessung

(1) P Kontrollmessungen im Baugrund müssen mit geeigneter Ausrüstung vorgenommen werden, wenn es entweder

- nicht möglich ist, durch Berechnung oder konstruktive Vorkehrungen nachzuweisen, dass die in 11.2 genannten Grenzzustände (siehe auch Kapitel 5.1) mit ausreichender Wahrscheinlichkeit nicht eintreten werden oder
- die in den Berechnungen getroffenen Annahmen nicht auf zuverlässigen Werten beruhen.

(2) Die vorgesehenen Kontrollmessungen sollten Kenntnis geben von:

- Grundwasserkoten oder Porenwasserdrücken im Untergrund, so dass Berechnungen mit wirksamen Spannungen ausgeführt oder geprüft werden können;
- seitlichen und vertikalen Bewegungen im Untergrund, um weitere Verformungen vorherzusagen zu können;
- der Tiefe und Form einer aktiven Gleitfläche, um die Kennwerte der Bodenfestigkeit für die Planung von Gegenmaßnahmen zu gewinnen.

5.5.2.2 DIN 4084:2009-1 Baugrund – Geländebruchberechnungen

In DIN 4084 ist die Berechnung der Böschungsstandsicherheit normiert. Darin sind detailliert die verschiedenen Berechnungsmöglichkeiten zum Nachweis der Standsicherheit von Böschungen erläutert. Die darin thematisierten Verfahren basieren auf der kinematischen Methode, bei der durch Variation infrage kommender Bruchkörper der maßgebende ermittelt wird. Nicht enthalten sind Regelungen zu numerischen Methoden wie beispielsweise der Finite-Elemente-Methode. An dieser Stelle werden nicht die detaillierten Erläuterungen der Berechnungsverfahren, sondern nur Teile wiedergegeben, die zur Beurteilung und zur Festlegung maßgebender Versagensformen einer Böschung hilfreich sein können, da dies für die Kategorisierung und Beurteilung der Böschung relevant ist.

8.3 Hinweise für die Wahl des Bruchmechanismus

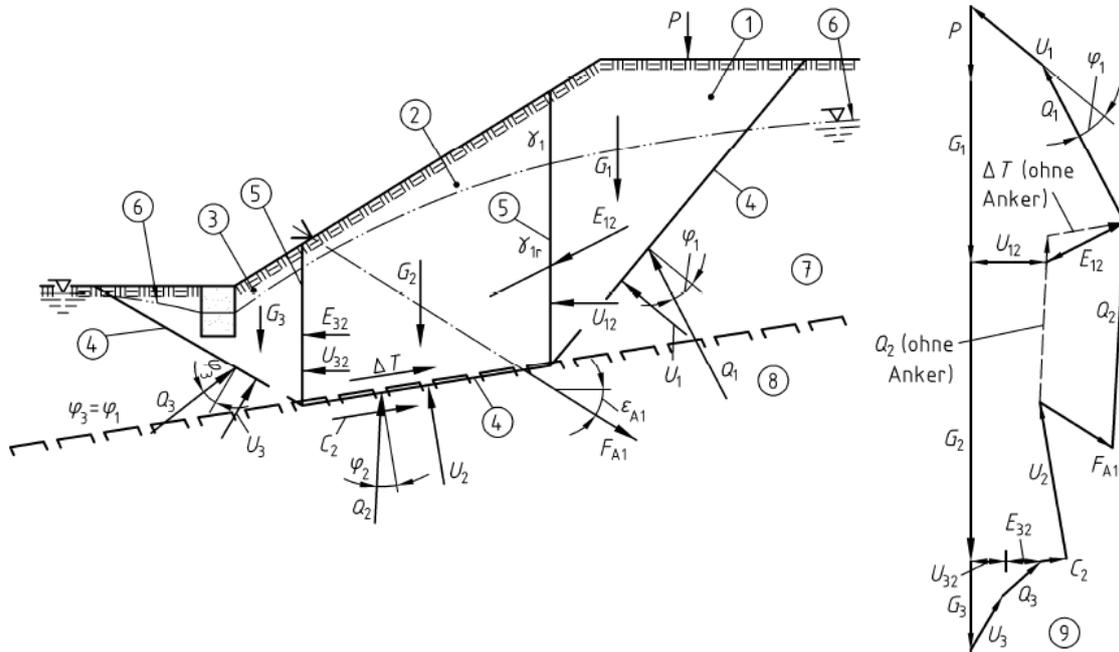
In vielen Fällen genügt es, einen Kreis als Gleitlinie zu wählen (siehe ANMERKUNG 1). [...]

Gleitlinien können durch die geologischen Verhältnisse vorgegeben sein [...] (siehe Abbildung 5.13 und Abbildung 5.14).

In homogenen kohäsionslosen Böden ohne Wasserdruck oder vollständig unter Wasser und ohne sonstige Einwirkungen fällt die ungünstigste Gleitfläche mit der Böschungsoberfläche zusammen.

Sofern bei Böschungen und Geländesprüngen eine oben liegende Schicht hohe Kohäsion aufweist, ist mit zusammengesetzten Bruchmechanismen mit geraden Gleitlinien zu prüfen, ob an inneren Gleitlinien rechnerische Zugkräfte auftreten. Bruchmechanismen, bei denen sich solche Zugkräfte ergeben, sind durch die Grenzbedingungen der Scherfestigkeit des Bodens ausgeschlossen und nicht am ungünstigsten. Es sind stattdessen Bruchmechanismen zu untersuchen, welche vollständig unterhalb der kohäsiven Schicht liegen. Auch in der kohäsiven Schicht dürfen Zugwiderstände nicht berücksichtigt werden.

ANMERKUNG 1 Die kreisförmige Gleitfuge stellt nicht immer die ungünstigste Bruchform dar. Gleitkreise können z. B. dann unrealistisch sein, wenn die Bodenschichtung [...] deren Ausbildung verhindert. In diesen Fällen ist bei Annahme einer nicht kreisförmigen Gleitlinie die ungünstigste Form durch Probieren zu ermitteln. Der dafür erforderliche Aufwand lässt sich durch Aufteilung des Gleitkörpers in mehrere starre Gleitkörper und gerade Gleitlinien [...] (siehe Abbildung 5.14) beschränken, weil sich durch geeignete Wahl der Gleitkörpergeometrie unter Erfüllung der kinematischen und statischen Bedingungen für deren Beweglichkeit Einschränkungen der Gleitflächenform leichter erkennen lassen. [...]



- Legende**
- 1, 2, 3 Gleitkörper
 - 4 äußere Gleitlinien
 - 5 senkrechte innere Lamellengrenze
 - 6 Grundwasseroberfläche
 - 7 Schicht 1: $\gamma_1, \gamma_{1r}, \varphi_1, c_1 = 0$
 - 8 Schicht 2: $\gamma_{2r}, \varphi_2, c_1 > 0$
 - 9 Krafteck

Abbildung 5.13: Bild 8 aus DIN 4084:2009-1: Beispiel für das Blockgleit-Verfahren

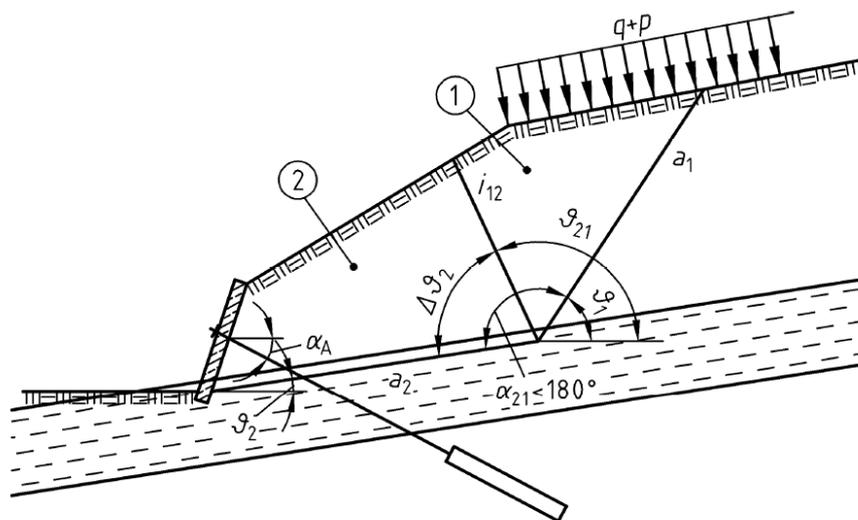


Abbildung 5.14: Bild 10(a) aus DIN 4084:2009-1: Beispiele zusammengesetzter Bruchmechanismen mit geraden Gleitlinien, geologisch bedingte Gleitlinie

11 Begrenzung der Verformungen von Böschungen und Geländesprüngen ohne Bebauungen

In mitteldicht bis dicht gelagerten nicht bindigen und bei steifen bis halbfesten bindigen Böden beinhalten die Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN 1054 für den Lastfall 1 [nach neuer Norm Bemessungssituation BS-P] in der Regel auch ausreichende Sicherheit gegen unzulässig große Verformungen von Geländesprüngen und Böschungen ohne Bebauung. Dies gilt auch für Stützkonstruktionen, deren Geländebruchsicherheit für die Dauer ihrer Nutzung nach DIN 1054 nur für den Lastfall 2 [aktuell BS-T] nachzuweisen ist.

Bei Böschungen in weichen bindigen Böden ist in der Regel die Grenze der Verformungen für die Bemessung maßgebend. Zur Einhaltung der Grenze der Verformungen ist bei Böden, die im undrännierten Triaxialversuch nach DIN 18137-2 Scherdehnungen von mehr als 20 % aufweisen, in der Regel der Ausnutzungsgrad mit einem Wert von 0,67 zu Grunde zu legen. Bei Böden, die im undrännierten Triaxialversuch nach DIN 18137-2 Scherdehnungen zwischen 10 % und 20 % aufweisen, darf zwischen den Werten 1 und 0,67 linear interpoliert werden.

5.5.3 Gesetze, Richtlinien und Merkblätter in Bayern

5.5.3.1 Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz: Richtlinien für Anlagen zur Gewinnung von Kies, Sand, Steinen und Erden, Stand 12. April 2002

In den Richtlinien für Anlagen zur Gewinnung von Kies, Sand, Steinen und Erden werden zwar keine direkten Standsicherheitsnachweise für Böschungen gefordert, es werden allerdings viele Informationen im Rahmen des empfohlenen Genehmigungsverfahrens abgefragt, die zur Beurteilung von Böschungen relevant sind. Dazu gehören Informationen zu

2.3.2.2 Genehmigungsverfahren

1. Bestand (Baugrund und Grundwasser)

- *Art und Mächtigkeit des abzubauenden Vorkommens und der grundwasserführenden Schichten mit einer geologischen Übersicht mit Längs- und Querschnitten auf Grund von Bohrungen und Schürfungen,*
 - *Geländeform mit Höhenlinien und Fläche, Mächtigkeit und Menge des abzutragenden Oberbodens,*
 - *bei Nasskiesabbau und Abbau in Grundwassernähe: Lage und Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels, Grundwassersohle, Grundwassergefälle, Grundwasserfließrichtung, Grundwasserbeschaffenheit;*
 - *bei Trockenabbau, sofern eine Grundwassergefährdung nicht zu erwarten ist: Lage des Grundwasserspiegels, evtl. weitere Angaben in Abhängigkeit vom Einzelfall,*
 - *Lage benachbarter oberirdischer Gewässer,*
- [...]

- *Überschwemmungsgebiete*
[...]

2. *Abbau*

- [...]
- *Abbautiefe, Böschungsoberkanten, Böschungsfuß im Grundriss sowie Böschungsprofile*
[...]
- *Geräteeinsatz*

3. *Renaturierung, Rekultivierung, Folgefunktionen*

- *Vorgesehene Folgefunktionen und Geländegestaltung*
[...]

Außerdem werden in der Richtlinie Sicherheitsabstände in Abhängigkeit von der angrenzenden Infrastruktur genannt, die auf Basis von Erfahrungswerten festgelegt wurden:

4.2.1.6 Sicherheitsabstände

Um benachbarte Grundstücke und Anlagen vor Beeinträchtigungen durch den Abbau zu schützen und die Gestaltung und künftige Nutzung der Abbaufäche zu sichern, müssen Abstandsflächen eingehalten werden. Wenn nicht gesetzliche oder sonstige Bestimmungen etwas Anderes vorschreiben, wird eine Beeinträchtigung bei Einhaltung folgender Abstandsflächen in der Regel nicht vorliegen:

- *vor Nachbargrundstücken*
bei Trockenabbau mindestens *5 m*
bei Naßabbau mindestens *10 m*
- *vor öffentlichen Straßen, Bahnlinien und Fernleitungen mindestens* *20 m*
- *vor Gebäuden und sonstigen baulichen Anlagen mindestens* *20 m*
- *vor Gewässern I. und II. Ordnung mindestens* *60 m*
- *vor Deichen* *mindestens die zehnfache Deichhöhe, mindestens der Mindestabstand zu Gewässern*
- *vor öffentlichen Trinkwassergewinnungsanlagen bei Trockenabbau mindestens das Wasserschutzgebiet oder, falls kein Wasserschutzgebiet ausgewiesen ist, die hydrogeologisch erforderliche Fläche (entsprechend engerer und weiterer Schutzzone), bei Naßabbau sind die Abstandsflächen entsprechend der hydrogeologischen Beurteilung im Einzelfall festzulegen.*

Diese Mindestwerte sind zu vergrößern, wenn es aus den in Satz 1 genannten Gründen erforderlich ist; sie sind immer von der Oberkante des Geländeanschnitts an zu messen.

Daneben werden auch übliche Nachnutzungsmöglichkeiten von Steine- und Erdengruben genannt.

4.3.1 Mögliche Folgefunktion und Auswahlkriterien

Die Folgefunktion eines Abbaugebiets ist von Bedeutung für die Genehmigungsfähigkeit des Abbaus, die Abbauplanung und die Rekultivierung oder Renaturierung.

Als Folgefunktion kommen in Betracht:

- Naturschutz und Landschaftspflege,*
- Land- und Forstwirtschaft,*
- Freizeit und Erholung,*
- Fischerei,*
- bauliche Nutzung,*
- Ablagerung von Abfall,*
- mehrere verschiedene Folgefunktionen.*

Für die Festlegung der Art der Folgefunktion sind insbesondere maßgeblich

- Erfordernisse des Gewässer-, insbesondere des Grundwasserschutzes;*
- Vorgaben der Landes-, Regional- und Bauleitplanung sowie der Landschafts- und Grünordnungsplanung;*
- Ausstattung, Bedeutung und Belastung von Natur und Landschaft im Abbaugebiet und in der näheren Umgebung vor dem Abbau der Abbaufäche;*
- Erfordernisse des Naturschutzes und der Landschaftspflege (Ausgleichs- und Ersatzpflichten);*
- fachliche Vorgaben in Programmen, Plänen und Konzepten des Naturschutzes und der Landschaftspflege);*
- Bedarf an Erholungsgebieten und Erholungseinrichtungen unter Berücksichtigung der räumlichen Zuordnung zu Bevölkerungsschwerpunkten und der verkehrsmäßigen Anbindung;*
- Interessen der Grundeigentümer.*

[...]

5.5.3.2 Bayerisches Abgrabungsgesetz, Stand 26. März 2019

Das Bayerische Abgrabungsgesetz enthält keine für eine Endstandsicherheitsbewertung relevanten Festlegungen.

5.5.3.3 Anforderungen an die Verfüllung von Gruben und Brüchen sowie Tagebauen: Verfüll-Leitfaden, Stand 23. Dezember 2019

Der Leitfaden enthält genaue Regelung der umwelttechnischen Anforderungen an das Verfüllmaterial sowohl in trockenen als auch in nassen Gruben, jedoch keine für eine Endstandsicherheitsbewertung relevanten Festlegungen.

5.5.3.4 Bundesberggesetz (BBergG)

Die Umsetzung des BBergG in Bayern ist über die Bayerische Bergverordnung (BayBergV) und über die Gemeinsame Bekanntmachung der Bayerischen Staatsministerien für Landesentwicklung und Umweltfragen und für Wirtschaft, Verkehr und Technologie zum Vollzug des Bundesberggesetzes und der Wassergesetze geregelt. Im Folgenden werden für die Standsicherheit der Endböschungen relevante Passagen wiedergegeben.

BBergG, Stand 20. Juli 2017:

§ 53 Betriebsplan für die Einstellung des Betriebes, Betriebschronik

(1) Für die Einstellung eines Betriebes ist ein Abschlußbetriebsplan aufzustellen, der eine genaue Darstellung der technischen Durchführung und der Dauer der beabsichtigten Betriebseinstellung, den Nachweis, daß die in § 55 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 bis 13 und Absatz 2 bezeichneten Voraussetzungen erfüllt sind, und in anderen als den in § 55 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 genannten Fällen auch Angaben über eine Beseitigung der betrieblichen Anlagen und Einrichtungen oder über deren anderweitige Verwendung enthalten muß. Abschlußbetriebspläne können ergänzt und abgeändert werden.

(2) Dem Abschlußbetriebsplan für einen Gewinnungsbetrieb ist eine Betriebschronik in zweifacher Ausfertigung beizufügen. Diese muß enthalten

[...]

- 3. die Bezeichnung der gewonnenen Bodenschätze nebst vorhandenen chemischen Analysen, bei Kohlen und Kohlenwasserstoffen unter Angabe des Heizwertes, eine Beschreibung der sonst angetroffenen Bodenschätze unter Angabe der beim Betrieb darüber gewonnenen Kenntnisse sowie Angaben über Erschwerungen des Betriebes in bergtechnischer und sicherheitstechnischer Hinsicht,*

[...]

- 5. eine Beschreibung der technischen und wirtschaftlichen Betriebsverhältnisse und, soweit ein Grubenbild nicht geführt wurde, eine zeichnerische Darstellung des Betriebes,*

[...]

- 7. eine lagerstättenkundliche Beschreibung der Lagerstätte nebst einem Verzeichnis der Vorräte an Bodenschätzen einschließlich der Haldenbestände,*

Satz 1 gilt nicht bei Gewinnungsbetrieben, die in Form von Tagebauen betrieben wurden, es sei denn, daß der Lagerstätte nach Feststellung der zuständigen Behörde noch eine wirtschaftliche Bedeutung für die Zukunft zukommen kann.

§ 55 Zulassung des Betriebsplanes

[...]

(2) Für die Erteilung der Zulassung eines Abschlußbetriebsplanes gilt Absatz 1 Satz 1 Nr. 2 bis 13 mit der Maßgabe entsprechend, daß

1. *der Schutz Dritter vor den durch den Betrieb verursachten Gefahren für Leben und Gesundheit auch noch nach Einstellung des Betriebes [...] sichergestellt sein müssen.*

[...]

BayBergV, Stand 6. März 2006:

§ 7 Sicherung der Erdoberfläche

(1) Der Unternehmer muss die Erdoberfläche in Bereichen, in denen durch betriebliche Maßnahmen gefährliche Bewegungen an Halden oder Böschungen oder an der sonstigen Erdoberfläche oder in denen durch Grubenbaue oder andere untertägige Einrichtungen gefahrdrohende Tagesbrüche, Rutschungen, Erdrisse oder Senkungen entstanden oder zu erwarten sind, durch geeignete Maßnahmen gegen Gefahren für Personen oder den öffentlichen Verkehr sichern. Im Vorfeld betrieblicher Maßnahmen, die geeignet sind, die Sicherheit der Oberfläche im Sinn von Satz 1 zu beeinträchtigen, sind auf Grundlage der geotechnischen oder gebirgsmechanischen Beurteilung Sicherheitsabstände zu Nachbargrundstücken und schutzwürdigen Betriebseinrichtungen festzulegen und im Betrieb einzuhalten.

Die Bekanntmachung der Bayerischen Staatsministerien für Landesentwicklung und Umweltfragen und für Wirtschaft, Verkehr und Technologie zum Vollzug des Bundesberggesetzes und der Wassergesetze enthält keine für die Beurteilung der Endstandsicherheit von Grubenböschungen relevanten Festlegungen.

5.5.4 Gesetze, Richtlinien und Merkblätter außerhalb Bayerns

5.5.4.1 Richtlinie des Sächsischen Oberbergamtes über die geotechnische Sicherheit im Bergbau über Tage (Richtlinie Geotechnik), Stand 08.04.2005

5 Standsicherheit von Böschungen und Böschungssystemen und Tragfähigkeit von Böschungsbereichen, Kippenoberflächen und Halden

5.1 Standsicherheit und Tragfähigkeit im Lockergestein

5.1.1 Die Standsicherheit von gewachsenen und gekippten Böschungen und Böschungssystemen sowie die Tragfähigkeit von Böschungsbereichen, Kippenoberflächen und Halden ist durch Standsicherheitsberechnungen im Sinne von Nummer 5.3 zu belegen, wenn

- a) die in Anlage 4 (siehe Tabelle 5.8 und Tabelle 5.9) vorgegebenen Parameter für fortschreitende und bleibende Böschungen überschritten werden;*
- b) rutschungsbegünstigende Verhältnisse [...] (siehe Kapitel 5.5.5) vorliegen;*
- c) Böschungen mit einer Böschungshöhe von mehr als 10 m ganz oder teilweise im Wasser stehen;*
- d) für Kippen, die mittels Lkw, Radlader, Raupen oder gleichgestellter Gerätetechnik aufgebaut werden oder wurden*
- e) und deren Kippenhöhe 10 m überschreitet;*

- f) es sich um bleibende Böschungen von Tagebaurestlöchern oder Halden handelt;
- g) sich zu schützende Objekte im unmittelbaren Einflussbereich von bleibenden Böschungen oder Böschungssystemen befinden, so dass Sicherheitsabstände im Rahmen des Oberflächenschutzes für diese Objekte festzulegen sind;
- h) eine Verringerung der Standsicherheit oder Tragfähigkeit durch Veränderungen der Grund- oder Oberflächenwasserstände oder durch korrelierende Faktoren (zum Beispiel Strömungen, Wellenschlag) zu besorgen ist.

5.1.2 Kann die Gefahr eines Verflüssigens oder Setzungsfließens in gekippten Bereichen nicht ausgeschlossen werden, hat die standsichere Gestaltung solcher Bereiche auf der Grundlage von Standsicherheitsberechnungen zu erfolgen. An die Standsicherheitsberechnungen sind in diesen Fällen zusätzliche Anforderungen gemäß Nummer 5.3.4 zu stellen.

[...]

5.3 Standsicherheitsberechnungen

[...]

5.3.2 Standsicherheitsnachweise

[...]

5.3.2.2 Für bleibende Böschungen ist ein Standsicherheitsnachweis zu erbringen.

5.3.2.3 Standsicherheitsnachweise sind auf Grundlage von repräsentativen geotechnischen Parametern anzufertigen. Das überwiegende verwenden von Schätzwerten, Hypothesen und Analogieschlüssen ist unzulässig. Das der Standsicherheitsberechnung zugrunde gelegte Berechnungsmodell muss bei einem Standsicherheitsnachweis auf einen für den betreffenden Standort repräsentativen Aufschluss zurückgeführt werden können. [...]

5.5.4.2 Sächsisches Oberbergamt: Merkblatt Böschungen im Lockergestein, Stand 20. August 2009

1. Anwendungsbereich

Nach § 14 Abs. 2 Allgemeine Bundesbergverordnung (ABergV) müssen Höhe und Neigung des Böschungssystems der Standfestigkeit der Gebirgsschichten sowie dem Abbauverfahren angepasst sein. [...] Nach Absatz 2 Satz 1 ist die Standsicherheit von Böschungssystemen nach § 14 Abs. 2 ABergV nach Maßgabe der Anlage 1 unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Verhältnisse nachzuweisen. In Anlage 1 wird unter Nr. 1.3 (siehe Kapitel 5.5.4.3) für die Gewinnung im Lockergestein [...] im Einzelnen aufgeführt, bei welchen Kriterien eine Standsicherheitsberechnung durch einen Sachverständigen zu erstellen bzw. zu bestätigen ist (siehe Kapitel 5.5.4.3).

Wenn keines dieser Kriterien, die eine Standsicherheitsberechnung erfordern, gegeben ist, insbesondere keine rutschungsbegünstigenden Verhältnisse vorliegen, wird im Regelfall auf eine

Vorlage einer Standsicherheitsberechnung bei einem Betriebsplan für einen Steine- und Erden-tagebau verzichtet, sofern die jeweiligen Grenzwerte (siehe Tabelle 5.8 und Tabelle 5.9) eingehalten werden.

[...]

3. Generalneigungen für bleibende Böschungssysteme in Steine- und Erden-Betrieben

Hinweis: Die in Tabelle 5.8 und Tabelle 5.9 gemachten Angaben stimmen mit denen in Anlage 4 der Richtlinie des Sächsischen Oberbergamtes über die geotechnische Sicherheit im Bergbau über Tage (Richtlinie Geotechnik) überein (siehe Kapitel 5.5.4.1).

3.1 im gewachsenen Lockergestein

Tabelle 5.8: Empfohlene Grenzwerte für Böschungswinkel im gewachsenen Lockergestein

Böschungshöhe	Standdauer	Neigungsverhältnis	Böschungswinkel
≤ 20 m	≤ 5 Jahre	1:1,0	45°
	> 5 Jahre	1:1,5	34°
≤ 30 m	≤ 5 Jahre	1:1,4	36°
	> 5 Jahre	1:1,9	28°
≤ 40 m	≤ 5 Jahre	1:1,7	30°
	> 5 Jahre	1:2,5	22°

3.2 im gekippten Lockergestein

Tabelle 5.9: Empfohlene Grenzwerte für Böschungswinkel im gekippten Lockergestein

Böschungshöhe	Standdauer	Neigungsverhältnis	Böschungswinkel
≤ 20 m	unbegrenzt	1:2,0	27°
≤ 30 m	unbegrenzt	1:3,0	18°
≤ 40 m	unbegrenzt	1:4,0	14°

5.5.4.3 Sächsische Bergverordnung

§ 8 Geotechnische Sicherheit

(1) Der Unternehmer muss die Erdoberfläche in Bereichen, in denen durch betriebliche Maßnahmen gefährliche Bewegungen an Halden oder Böschungen oder an der sonstigen Erdoberfläche oder in denen durch Grubenbaue oder andere untertägige Einrichtungen gefahrdrohende Tagesbrüche, Rutschungen, Erdrisse oder Senkungen entstanden oder zu erwarten sind, durch geeignete Maßnahmen gegen Gefahren für Personen oder den öffentlichen Verkehr sichern. Im Vorfeld betrieblicher Maßnahmen, die geeignet sind, die Sicherheit der Oberfläche im Sinne von Satz 1 zu beeinträchtigen, sind auf Grundlage der geotechnischen Berechnung oder gebirgsmechanischen Beurteilung Sicherheitsabstände zu Nachbargrundstücken und schutzwürdigen Betriebs-einrichtungen festzulegen und im Betrieb einzuhalten.

(2) Die Standsicherheit von Böschungssystemen nach § 14 Abs. 2 ABergV ist nach Maßgabe der Anlage 1 unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Verhältnisse nachzuweisen. Soweit dazu eine Berechnung notwendig ist, muss sie durch einen Sachverständigen geprüft werden, soweit sie nicht bereits von einem Sachverständigen erstellt wurde. Das Oberbergamt kann Ausnahmen zulassen, wenn die geotechnische Sicherheit in anderer Art und Weise sichergestellt ist.

[...]

Anlage 1

Anforderungen an die geotechnische Sicherheit

1. Standsicherheit von Böschungen

1.1 Die Standsicherheit von Böschungen ist grundsätzlich nachzuweisen.

[...]

1.3 im Lockergestein ist bei Vorliegen eines der nachstehenden Kriterien eine Standsicherheitsberechnung durch einen Sachverständigen zu erstellen beziehungsweise zu bestätigen:

1.3.1 Es liegen rutschungsbegünstigende Verhältnisse vor (siehe Kapitel 5.5.5)

1.3.2 Böschungen mit einer Böschungshöhe von mehr als 10 m stehen ganz oder teilweise im Wasser;

1.3.3 Kippen, die mittels Lkw, Radlader, Raupen oder gleichgestellter Gerätetechnik aufgebaut werden oder wurden, überschreiten eine Kippenhöhe von 10 m;

1.3.4 die Kippenhöhe bei feinsandigem oder bindigem Lockergestein mit hoher Gleichförmigkeit oder mit einem bindigen Anteil von mehr als 30 Prozent überschreitet 10 m;

1.3.5 Kippen aus Lockergestein mit hohem bindigem oder feinsandigem Anteil und hoher Wassersättigung werden überkippt;

1.3.6 im Böschungsbereich sind unterirdische Hohlräume (zum Beispiel Karsthohlräume) oder Grubenbaue vorhanden;

1.3.7 es handelt sich um bleibende Böschungen von Tagebaurestlöchern oder um fortlaufende (aktive) Böschungen in Braunkohletagebauen;

1.3.8 im unmittelbaren Einflussbereich von bleibenden Böschungen oder Böschungssystemen befinden sich zu schützende Objekte, so dass Sicherheitsabstände im Rahmen des Oberflächenschutzes für diese Objekte festzulegen sind;

- 1.3.9 *es ist eine Verringerung der Standsicherheit oder Tragfähigkeit durch Veränderungen der Grund- oder Oberflächenwasserstände oder durch korrelierende Faktoren (zum Beispiel Strömungen, Wellenschlag) zu besorgen;*
- 1.3.10 *es besteht Setzungsfließ-/Verflüssigungsgefahr;*
- 1.3.11 *die Kippenhöhe beim Überkippen von Böschungen überschreitet 5 m, wobei bei Annäherung der Kippe an die bestehende Böschungskante bereits ab einer Entfernung zwischen fortschreitendem Kippenfuß und bestehender Böschungskante, die der Höhe der Kippe beziehungsweise der Höhe der vorhandenen Böschung entspricht, eine Standsicherheitsgefährdung der vorhandenen Böschung auftreten kann;*
- 1.3.12 *Pfeiler temporärer Stützwirkung (Stützkörper) werden überkippt;*
- 1.3.13 *an Altkippen beziehungsweise an nicht fortlaufend betriebenen Kippen werden Verkippungs-, Erdbau- oder Nebenarbeiten durchgeführt;*
- 1.3.14 *geometrisch-stabile Böschungsverhältnisse werden durch (standsicherheitsmindernde) Eingriffe oder böschungsgestaltende Maßnahmen unterschritten oder durch Belastungsänderung (Lasteintrag) destabilisiert;*
- 1.3.15 *Anzeichen für Böschungs- und Bodenbewegungen werden erkannt oder andere Umstände bekannt oder wahrgenommen, welche die Standsicherheit oder Tragfähigkeit herabsetzen.*

5.5.5 Rutschungsbegünstigende Verhältnisse

5.5.5.1 Richtlinie des Sächsischen Oberbergamtes über die geotechnische Sicherheit im Bergbau über Tage (Richtlinie Geotechnik), Stand 08.04.2005:

Rutschungsbegünstigende Verhältnisse liegen vor, wenn:

- im Lockergestein Schichten geringer Scherfestigkeit sowie andere geologisch vorgegebene Schwächezonen auftreten,*
- im Festgestein wirksame Trennflächen oder Schnittflächen vorhanden sind, die in Richtung der Böschungsfäche einfallen und deren Fallwinkel kleiner als der der Böschungsfäche ist,*
- Böschungen ganz oder teilweise im Wasser stehen beziehungsweise eine hohe Wassersättigung aufweisen, beziehungsweise bei denen dieser Zustand im Rahmen der Wiedernutzbarmachung eintreten wird,*
- Strömungskräfte von Oberflächen- beziehungsweise Grundwasser im Böschungsbereich auftreten,*
- Setzungsfließgefahr besteht,*

- *Grubenbaue im Böschungsbereich verbleiben,*
- *Anzeichen für Rutschungen oder Bewegungen erkannt oder andere Umstände wahrgenommen werden, die die Standsicherheit der Böschung beeinträchtigen*
- *im Bereich von Altkippenböschungen und an nicht fortlaufend betriebenen Kippen Verkip-pungs-, Erd- und Nebenarbeiten durchgeführt werden.*

5.5.5.2 Richtlinie für die Untersuchung der Standsicherheit von Böschungen der im Ta-gebau betriebenen Braunkohlenbergwerke (RfS NRW), Stand 08.08.2013

Rutschungsbegünstigende Verhältnisse liegen vor bei:

- *tektonischen Beanspruchungszonen, Schichtgrenzen oder Schichten mit geringer Scher-festigkeit, insbesondere, wenn diese gleichsinnig mit der Böschungsneigung einfallen,*
- *ungünstigen hydrologischen Verhältnissen, (z. B. freie oder gespannte Restwasser-stände, Wasserzuflüsse, Wasseransammlungen am Böschungsfuß) welche die Standsi-cherheit durch Verminderung der Festigkeiten oder durch hydromechanische Wirkungen (z. B. Auftrieb, Strömungsdruck, Wellenschlag) herabsetzen,*
- *statischen Zusatzlasten oder Erschütterungen (z.B. durch Verkehrsanlagen),*
- *alten Grubenbauen, Kohlefeilern oder -festen und ehemaligen Kippen.*

5.5.5.3 Richtlinie der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI Praxishandbuch online), Stand 22.09.2020

C3.3 Uferböschung (Standsicherheit)

Rutschungsbegünstigende Verhältnisse von Böschungen liegen vor, wenn Böschungen aus bin-digem Lockergestein oder Böschungshöhen von mehr als 10 m ganz oder teilweise im Wasser stehen. Die Böschungsneigung richtet sich unter anderem nach der Bodenart, den vorhandenen Auflasten, den möglichen Erschütterungen, den Grundwasserverhältnissen sowie den geologi-schen Verhältnissen und wird durch einen Standsicherheitskoeffizienten ausgedrückt:

- *nicht bindiger oder weicher Boden (z. B. Mutterboden, Sande, Kiese): Neigung < 45°;*
- *steifer oder halbfester bindiger Boden (z. B. Lehm, Mergel, Ton, Böden mit festem Zu-sammenhang): Neigung < 60°;*

[...]

Diese Böschungswinkel dürfen [während des laufenden Abbaubetriebs] ohne rechnerischen Nachweis der Standsicherheit nicht überschritten werden.

5.5.6 Beobachtungsmethode

5.5.6.1 Aus Handbuch EC7 Kapitel 2.7

Beobachtungsmethode

(1) Wenn die Vorhersage des geotechnischen Verhaltens schwierig ist, kann es zweckmäßig sein, das als „Beobachtungsmethode“ bekannte Verfahren anzuwenden, bei dem der Entwurf der Bauausführung überprüft und gegebenenfalls angepasst wird.

(2)P Folgende Forderungen müssen erfüllt sein, ehe mit dem Bau begonnen wird:

- für das Verhalten des Bauwerks müssen zulässige Grenzen festgelegt werden;*
- die Bandbreite möglichen Verhaltens muss bewertet werden, und es muss gezeigt werden, dass eine annehmbare Wahrscheinlichkeit dafür besteht, dass das wirkliche Verhalten innerhalb dieser Grenzen bleiben wird;*
- ein Konzept für die Messungen muss geplant werden, mit denen erkannt werden kann, ob das wirkliche Verhalten in dem Toleranzbereich bleibt. Die Messungen das genügend früh anzeigen und in ausreichend kurzen Zeitabständen ausgeführt werden, damit Gegenmaßnahmen erfolgreich vorgenommen werden können;*
- die Reaktionszeiten der Messgeber und die Verfahren zur Auswertung der Ergebnisse müssen im Vergleich zu möglichen Systemveränderungen ausreichend kurz sein;*
- es muss ein Konzept von Gegenmaßnahmen geplant werden, die zur Anwendung kommen, wenn das Messsystem ein Verhalten außerhalb des Toleranzbereichs anzeigt.*

(3)P Während der Bauausführung müssen die Messungen planmäßig ausgeführt werden.

(4)P Die Ergebnisse der Messungen müssen in geeigneten Abständen bewertet werden. Die geplanten Gegenmaßnahmen müssen eingesetzt werden, falls die festgelegten Grenzen überschritten werden.

(5)P Die Messausrüstung muss entweder ersetzt oder erweitert werden, wenn sie keine zuverlässigen Daten in geeigneter Form oder in ausreichender Menge liefert.

5.5.7 Geotechnische Kategorien

Im Hinblick darauf, dass im Rahmen des Forschungsprojekts ebenfalls ein Konzept zur Einordnung der Grubenböschungen in Böschungskategorien in Anlehnung an die Definition der Geotechnischen Kategorien im EC7 entwickelt wird, werden hier die Hinweise dazu aus DIN EN 1997:2014-3 (EC7) und DIN 1054:2010 zusammengefasst im Handbuch EC7 sowie aus der DIN 4020:2010-12 wiedergegeben:

5.5.7.1 aus EC7 und DIN 1054

A 2.1.2.2 Geotechnische Kategorie GK1

(14) Die Geotechnische Kategorie 1 sollte nur kleine und relativ einfache Bauwerke umfassen, bei denen

- die grundsätzlichen Anforderungen auf Grund von Erfahrungen und qualitativen geotechnischen Untersuchungen erfüllbar sind;*
- ein vernachlässigbares Risiko besteht.*

A (14) Die Geotechnische Kategorie GK 1 umfasst Baumaßnahmen mit geringem Schwierigkeitsgrad im Hinblick auf Bauwerk und Baugrund.

(15) Verfahren für Bauwerke der Geotechnischen Kategorie 1 sollten nur dort angewendet werden, wo hinsichtlich Gefährdung durch Geländebruch oder Bewegung im Baugrund keine Bedenken bestehen, und bei Baugrundverhältnissen, für die vergleichbare örtliche Erfahrungen für ein einfaches Verfahren ausreichen. In solchen Fällen dürfen Planung und Bemessung der Gründung und des Bauwerks nach routinemäßigen Verfahren erfolgen.

(16) Verfahren für Bauwerke der Geotechnischen Kategorie 1 sollten nur dort angewendet werden, wo der Baugrubenaushub oberhalb des Grundwasserspiegels bleibt oder wo eine vergleichbare örtliche Erfahrung vorliegt, dass ein Aushub im Grundwasser unbedenklich ist.

A(16a) Die Geotechnische Kategorie 1 setzt einfache und überschaubare Baugrundverhältnisse voraus. Gegebenheiten, die diese Einstufung rechtfertigen, liegen vor, wenn der Baugrund in waagerechtem oder schwach geneigtem Gelände nach gesicherter örtlicher Erfahrung als tragfähig und setzungsarm bekannt ist.

A(16b) Die Einstufung in die Geotechnische Kategorie 1 setzt voraus, dass Grundwasser unterhalb der Baugruben- bzw. Gründungssohle liegt.

A(16c) Gegebenheiten des Bauwerks, die eine Einstufung in die Geotechnische Kategorie 1 rechtfertigen, liegen in der Regel vor, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- [...]*
- Es handelt sich um Bauwerke, bei denen nach DIN EN 1998-5/NA im Hinblick auf Erdbebenbelastung kein Nachweis der Standsicherheit erforderlich ist;*
- Nachbargebäude, Verkehrswege, Leitungen usw. werden durch das Bauwerk selbst oder durch die für seine Errichtung notwendigen Bauarbeiten nicht in ihrer Standsicherheit gefährdet oder in ihrer Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigt.*

A 2.1.2.3 Geotechnische Kategorie GK 2

(17) Die Geotechnische Kategorie 2 gilt für konventionelle Gründungen und Bauwerke ohne ungewöhnliches Risiko oder schwierige Baugrund- und Belastungsverhältnisse.

A(17) Die Geotechnische Kategorie GK 2 umfasst Baumaßnahmen mit mittlerem Schwierigkeitsgrad im Hinblick auf das Zusammenwirken von Bauwerk und Baugrund.

(18) Die Nachweise für Bauwerke der Geotechnischen Kategorie 2 sollten in der Regel zahlenmäßig ausgewiesene geotechnische Kenngrößen und Berechnungen enthalten, um die grundsätzlichen Anforderungen zu erfüllen.

A(18) Bauwerke der Geotechnischen Kategorie GK 2 erfordern eine ingenieurmäßige Bearbeitung und einen rechnerischen Nachweis der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit.

(19) Bei der Planung von Bauwerken oder Bauwerksteilen der Geotechnischen Kategorie 2 genügen Routineverfahren für die Feld- und Laborversuche sowie bei der Bemessung und Ausführung.

ANMERKUNG Konventionelle Bauwerke oder Bauwerksteile, die der Geotechnischen Kategorie 2 entsprechen, sind z.B.:

- [...]
- Aufschüttungen und Erdarbeiten;
- [...]

A(19a) Die Geotechnische Kategorie GK2 setzt durchschnittliche Baugrundverhältnisse voraus, die nicht in GK 1 oder GK 3 fallen.

A(19b) Die Geotechnische Kategorie GK2 setzt durchschnittliche Grundwasserverhältnisse voraus. Beispiele dafür sind:

- Die freie Grundwasseroberfläche liegt höher als die Bauwerkssohle;
- Grundwasserzutritte bzw. die Wasserhaltung sind mit üblichen Maßnahmen beherrschbar;
- Durch diese Maßnahmen sind keine ungünstigen Einflüsse auf die Umgebung zu befürchten.

[...]

A(19e) Als sonstige Baumaßnahmen zählen in der Regel zu Geotechnischen Kategorie GK2 auch

- Boden- und Felsdeponien ohne Kontamination und
- [...]

A 2.1.2.4 Geotechnische Kategorie GK 3

(20) Die Geotechnische Kategorie 3 sollte alle Bauwerke und Bauwerksteile umfassen, die nicht zu den Geotechnischen Kategorien 1 und 2 gehören.

(21) Die Geotechnische Kategorie 3 sollte im Allgemeinen nach anspruchsvolleren Vorgaben und Regeln als in dieser Norm genannten untersucht werden.

ANMERKUNG Beispiele für die Geotechnische Kategorie 3 sind:

- Sehr große und ungewöhnliche Bauwerke;
- Bauwerke mit außergewöhnlichen Risiken oder ungewöhnlich schwierigen Baugrund- oder Belastungsverhältnissen;
- Bauwerke in seismisch stark betroffenen Gebieten;
- Bauwerke in Gebieten, in denen mit instabilen Baugrundverhältnissen oder mit andauernden Bewegungen im Untergrund zu rechnen ist, so dass ergänzende Untersuchungen oder Sondermaßnahmen erforderlich sind.

A(22) Bauwerke der Geotechnischen Kategorie GK 3 erfordern über die Vorgaben von A(18) hinaus zusätzliche Untersuchungen sowie vertiefte geotechnische Kenntnisse und Erfahrungen in dem jeweiligen Spezialgebiet.

A(23) Die Geotechnische Kategorie GK 3 umfasst Baumaßnahmen mit hohem Schwierigkeitsgrad im Hinblick auf das Zusammenwirken von Bauwerk und Baugrund.

A(24) Gegebenheiten des Baugrunds, die in der Regel eine Einstufung in die GK 3 erfordern, sind ungewöhnliche oder besonders schwierige Baugrundverhältnisse wie:

- Geologisch junge Ablagerungen mit regelloser Schichtung bzw. geologisch wechselhafte Formationen;*
- Böden, die zum Kriechen, Fließen, Quellen oder Schrumpfen neigen;*
- bindige Böden ohne ausreichende Duktilität, [...], z.B. strukturempfindliche Seetone;*
- weiche organische und organogene Böden größerer Mächtigkeit;*
- Fels, der zur Auflösung oder zu starkem Zerfall neigt, z.B. Salz, Gips und verschiedene veränderlich feste Gesteine;*
- Fels, der in Bezug auf das Bauvorhaben ungünstig verlaufende Störungszonen oder Trennflächen enthält;*
- Bergsenkungsgebiete oder Gebiete mit Erdfällen oder Baugrund mit ungesicherten Hohlräumen;*
- unkontrolliert geschüttete Auffüllungen.*

A(25) Gespanntes Grundwasser, das durch Bodenaushub zu artesischem Grundwasser werden kann, ist der Geotechnischen Kategorie GK 3 zuzuordnen.

A(26) Ergänzend zur Anmerkung in (21) werden als Beispiele für Bauwerke der Geotechnischen Kategorie GK 3 genannt:

- Bauwerke mit hohem Sicherheitsanspruch oder hoher Verformungsempfindlichkeit;*
- Bauwerke mit ungewöhnlichen Lastkombinationen, die für die Gründung maßgebend werden;*
- Bauwerke, die durch Wasser mit einer Druckhöhe von mehr als 5 m belastet sind;*
- Einrichtungen und Baumaßnahmen, die den Grundwasserspiegel vorübergehend oder bleibend verändern, sofern damit ein Risiko für benachbarte Bauten entsteht;*
- Bauwerke der Bedeutungskategorie III und IV nach DIN EN 1998-5/NA, bei denen im Hinblick auf Erdbebenbelastung ein Nachweis der Standsicherheit erforderlich ist;*
- Bauwerke oder Baumaßnahmen, bei denen die Beobachtungsmethode zum Nachweis der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit angewendet wird.*

[...]

5.5.7.2 aus DIN 4020:2010-12

Die DIN 4020 gibt im Anhang Beispiele für Bauwerke der jeweiligen Geotechnischen Kategorie.

Tabelle AA.1: Situation Gesamtstandsicherheit:

Geotechnische Kategorie 1:

Geböschte Baugruben und nicht verbaute Gräben nach DIN4124 ohne Einwirkung von Grundwasser.

Geotechnische Kategorie 2:

Böschungshöhen bis 10 m bei nichtbindigen Böden, bindigen Böden mit mindestens steifer Konsistenz oder Fels mit bekannten geotechnischen Eigenschaften.

Geotechnische Kategorie 3:

Hänge, Böschungen und Dämme, nicht verankerte Stützbauwerke und Baugrubenwände sowie konstruktive Böschungssicherungen in folgenden Fällen:

- *allgemein bei mehr als 10 m Höhe*
- *bei ausgeprägter Kriechfähigkeit des Bodens*
- *bei Gefahr von Setzungsfließen*
- *bei Nichtausreichen ebener Betrachtungen von Bruchkörpern im Boden*
- *bei maßgeblichem Einfluss von Erdbeben*

[...]

5.5.8 Baugrunduntersuchungen

5.5.8.1 aus DIN EN 1997-2:2010-10 (EC7): Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik

2.2 Abfolge der Baugrunduntersuchungen

Baugrunduntersuchungen sollten normalerweise in Etappen abhängig von den Fragen durchgeführt werden, die sich während der Planung, des Entwurfs und der Baudurchführung des aktuellen Projektes ergeben. Die folgenden Etappen werden einzeln in Abschnitt 2 behandelt:

- *Voruntersuchungen für Lage und Vorentwurf für das Bauwerk (siehe 2.3);*
- *Hauptuntersuchungen (siehe 2.4);*
- *Kontrolluntersuchungen und baubegleitende Messungen (siehe 2.5).*

2.3 Voruntersuchungen

(1) Voruntersuchungen sollten so geplant werden, dass - soweit erforderlich – ausreichende Daten erhalten werden, für:

- *die Bewertung der Gesamtstandsicherheit und die grundsätzliche Eignung des Planungsbereiches;*
- *die Bewertung der Eignung des Planungsbereiches im Vergleich mit alternativen Bauplätzen;*
- *die Bewertung der geeigneten Lage des Bauwerkes;*

- die Beurteilung möglicher Auswirkungen der geplanten Arbeiten auf die Umgebung wie benachbarte Gebäude, Bauwerke und Gelände;
- die Beschreibung von Entnahmestellen;
- die Bewertung der möglichen Gründungsarten und jeder Art von Bodenverbesserung;
- die Planung der Haupt- und Kontrolluntersuchungen, einschließlich der Beschreibung der Verbreitung des Baugrundes, der das Verhalten des Bauwerks maßgebend beeinflussen kann.

(2) Eine Voruntersuchung des Baugrunds sollte eine Einschätzung des Baugrunds zu folgenden Punkten liefern, sofern sie von Bedeutung sind:

- Boden- und Felsart und ihrer Schichtung;
- Grundwasserspiegel oder dem Profil des Porenwasserdruckes;
- vorläufige Angaben zu den Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Boden und Fels;
- mögliches Auftreten von kontaminiertem Baugrund oder Grundwasser, die sich schädlich auf die Dauerhaftigkeit des Baumaterials auswirken könnten.

2.4 Hauptuntersuchungen

2.4.1 Felduntersuchungen

2.4.1.1 Allgemeines

(1)P Für den Fall, dass die Voruntersuchungen nicht die erforderlichen Informationen liefern, um die Aspekte in 2.3 zu bewerten, müssen ergänzende Untersuchungen in der Hauptuntersuchung ausgeführt werden.

(2) Falls erforderlich, sollten die Felduntersuchungen der Hauptuntersuchung Folgendes einschließen:

- Bohrungen, Schürfe, Schächte und/oder Stollen für die Probengewinnung;
- Grundwassermessungen;
- Feldversuche.

5.5.8.2 aus DIN 4020:2010-12: Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke

A 2.2.2 Geotechnische Kategorien

A (1) Die Einstufung in eine der drei Geotechnischen Kategorien ist vor Beginn der geotechnischen Untersuchungen vorzunehmen und mit fortschreitendem Kenntnisstand anzupassen, siehe DIN EN 1997-1:2009-09, 2.1 (11) (siehe Kapitel 5.5.7 und 6.8.11).

A (2) Die Festlegungen zu den Geotechnischen Kategorien in DIN EN 1997-1 und DIN 1054:2010-12, A 2.1.2 sind zu beachten.

A (3) Bei Baumaßnahmen der Geotechnischen Kategorie GK 2 oder GK 3 ist ein Sachverständiger für Geotechnik einzuschalten. Seine Mitarbeit ist bereits zum Zeitpunkt der Grundlagenermittlung oder der Vorplanung erforderlich.

A (4) Der Sachverständige für Geotechnik unterstützt die Planung von Bauwerken und Bauteilen im Erd- und Grundbau und weist deren Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit nach. Dafür muss er die erforderlichen Erkundungen und geotechnischen Untersuchungen sowie Messungen planen.

A (5) Der Sachverständige für Geotechnik hat die fachgerechte Ausführung der Aufschlüsse sowie der Feld- und Laboruntersuchungen zu überwachen, die aus dem Aufschluss und Untersuchungsbefund sich ergebenden Folgerungen für Planung und Konstruktion zu ziehen und die Wechselwirkung zwischen den angetroffenen Baugrundverhältnissen einerseits und der Planung, Konstruktion und Bauausführung andererseits dem Bauherrn sowie gegebenenfalls dem Entwurfsverfasser und den Fachplanern benachbarter Fachgebiete darzulegen. Er hat bei Baumaßnahmen der Geotechnischen Kategorie GK 2 oder GK 3 die Geotechnischen Berichte zu erstellen.

A (6) Die Geotechnische Kategorie GK 3 erfordert vertiefte Kenntnisse und Erfahrungen in dem jeweiligen Teilgebiet der Geotechnik, [...].

A 2.2.3 Untersuchungsumfang

Geotechnische Kategorie 1

A(1) Für Verhältnisse, die der Geotechnischen Kategorie 1 entsprechen, müssen als Mindestanforderungen an die geotechnische Untersuchung des Baugrunds folgende Maßnahmen getroffen werden:

- Einholen von Informationen über die allgemeinen Baugrundverhältnisse und die örtlichen Bauerfahrungen der Nachbarschaft;*
- Erkunden der Bodenarten bzw. Gesteinsarten und ihrer Schichtung;*
- Abschätzen der Grundwasserverhältnisse vor, während und nach der Bauausführung;*
- Besichtigen der ausgehobenen Baugrube.*

Art und Umfang dieser geotechnischen Untersuchungen müssen die Überprüfung der vorausgesetzten Baugrundverhältnisse nach der Geotechnischen Kategorie 1 ermöglichen, siehe A 2.2.2, A (1) und A (3). Bei der Geotechnischen Kategorie 1 wird nicht zwischen Vor- und Hauptuntersuchungen unterschieden.

Geotechnische Kategorie 2

A(2) Bei Verhältnissen, die der Geotechnischen Kategorie 2 entsprechen, sind direkte Aufschlüsse erforderlich. Die für die Beurteilung und die Berechnung notwendigen Baugrundkenngrößen müssen versuchstechnisch und/oder mit Hilfe von Korrelationen bestimmt werden.

Geotechnische Kategorie 3

A(3) Bei Verhältnissen nach der Geotechnischen Kategorie 3 ist zu prüfen, ob über den für die Geotechnische Kategorie 2 erforderlichen Umfang hinaus weitere Untersuchungen notwendig sind, die sich aus den besonderen Abmessungen, Eigenschaften und Beanspruchungen des Bauwerks oder aus Sonderfragen des Baugrunds, des Grundwassers oder der Umgebung ergeben.

Zu 2.4 Hauptuntersuchungen

[...]

Zu 2.4.1.3 Lage und Tiefe der Untersuchungspunkte

A (1) Die Abstände der Untersuchungspunkte und Tiefe der Aufschlüsse sind unter Berücksichtigung von DIN EN 1997-2:2010-10, Anhang B.3 (siehe Kapitel 5.5.8.3) festzulegen.

A (3) Bei schwierigen Baugrundverhältnissen oder zur Eingrenzung von Unregelmäßigkeiten sind geringere Abstände bzw. eine größere Anzahl von Aufschlüssen erforderlich.

A (2) Maßgebende Grundwasserstände sind unter Berücksichtigung von Art und Nutzungsdauer der baulichen Anlage anzugeben.

5.5.8.3 aus DIN EN 1997-2:2010-10, Anhang B.3

(1) Folgende Abstände von Aufschlusspunkten sollten als Richtwerte benutzt werden:

[...]

- bei großflächigen Bauwerken ein Rasterabstand von nicht mehr als 60 m;

[...]

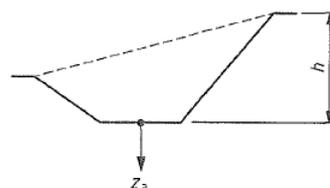
Mindestwerte für Aufschlusstiefe:

(7) Dämme und Einschnitte, der höhere Wert folgender Bedingungen sollte gewählt werden

Bei Einschnitten:

- $Z_a \geq 2,0 \text{ m}$
- $Z_a \geq 0,4 h$

Dabei ist h die Einschnittstiefe.



b) Einschnitt

Abbildung 5.15: Bild B.2: Dämme und Einschnitte aus DIN EN 1997-2:2010-10, Anhang B.3

5.6 Fazit zu den Regelwerken

Die Regelwerke aus Geotechnik und zu Regelungen im Bereich des Bergbaus legen die Grundlage zur Kategorisierung und Bewertung von Grubenböschungen. Allerdings verlangt es dazu nach einer Zusammendarstellung der Regelungen aus beiden Bereichen und einer Festlegung, wann welche Festlegungen und Methoden angewendet werden sollten. Dabei geht es auch darum abzuwägen zwischen den für geotechnische Bauwerke gemachten Regelungen zu Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit aus EC7 und DIN 1054 und den Anforderungen an nicht als klassische geotechnische Bauwerke definierte Grubenböschungen, die als Nebenprodukt der Rohstoffgewinnung entstehen. Dies geschieht in Kapitel 6.8 und dem zu diesem Schlussbericht gehörigen Handbuch.

6 Geotechnische Bewertung von Endböschungen über und unter Wasser

6.1 Grundlegendes

Zur Bewertung der Standsicherheit von Endböschungen muss aus geotechnischer Sicht die Böschungsgeometrie, das Bodenmaterial, aus dem die Böschung zusammengesetzt ist, sowie dessen in-situ Zustand (Dichte, Wassergehalt), die Grundwasserstände und die damit verbundenen Strömungsverhältnisse des (gespannten) Grundwassers sowie das bodenmechanische und hydraulische Verhalten der Böschungsmaterialien bekannt sein. Zusätzlich hängt die Bewertung der Standsicherheit von den gemäß dem Nachnutzungskonzept geplanten Belastungen der Böschung ab. In Gebieten, in denen eine seismische Beanspruchung der Böschungen nicht auszuschließen ist, müssen diese ebenfalls bei der Standsicherheitsuntersuchung mit einbezogen werden.

Vor allem unter Wasser sind die maßgebenden Böschungsgeometrien eine direkte Folge des Abbauprozesses (kontrollierter oder unkontrollierter Abbau). Unterwasserböschungen können sich im Laufe der Jahre infolge von äußeren Einflüssen vor allem bei unkontrollierten Abbauprozessen teils deutlich abflachen (MEYER & FRITZ, 2001; RICHWIEN, 2005) (siehe Kapitel 5.3). Infolge des Aushubs von ehemals durchströmten Bodenbereichen kann das Strömungsbild des Grundwassers gegenüber den natürlichen Verhältnissen langfristig verändert werden. Die Gefahr von Erosionserscheinungen infolge zu hoher Strömungskräfte muss untersucht werden. Zu beachten ist außerdem, dass es infolge des Abbauprozesses zu einer Entmischung und anschließender Korngrößenabhängiger Sedimentation der anstehenden Böden kommen kann, womit sich die hydraulischen und bodenmechanischen Eigenschaften des Böschungsmaterials ändern können. Wird auf diese Schichten angeschüttet, stellen vor allem Feinkornschichten potentielle Schwachstellen dar, die im Vorlauf des Abbauprozesses oder auch während des Abbauprozesses nicht erkundet werden können. Zudem kann es im Zuge der Förderung des Aushubmaterials zu Unterdrücken im gewachsenen Boden kommen, die infolge von Suffosion zu einer tiefgreifenden Veränderung des Böschungsmaterials führen würden (siehe Kapitel 5.4.1). Vor dem Anschütten von Böschungsfanken ist deshalb ggfs. eine Erkundung der Böschungsfanken und des Böschungsfußes nötig.

Überwasserböschungen können im Grundwasser mit Wasserhaltung oder über dem Grundwasser ohne Wasserhaltung ausgeführt werden. Sofern eine Wasserhaltung während des Abbauprozesses benötigt wird, sind zur Beurteilung der Standsicherheit der Endböschung die nach Abschaltung der Wasserhaltung ggfs. geänderten Grundwasserverhältnisse und die damit verbundene Gefahren zu überprüfen. Abbauböschungen sind aus betriebswirtschaftlichen Gründen zu meist so steil wie möglich angelegt. Vor allem in kohäsiven stark überkonsolidierten Böden oder Böden, die eine hohe Strukturfestigkeit aufweisen, werden teils sehr steile und hohe Böschungen erstellt.

Während der Betriebsphase oder im Anschluss daran werden sowohl bei der Nassgewinnung als auch bei der Trockengewinnung die Abbauböschungen im Hinblick auf innerbetriebliche Erfordernisse oder hinsichtlich des Nachnutzungskonzepts häufig angeschüttet. Das Einbringen der An-(Vor-)schüttung erfolgt dabei entweder erdbautechnisch kontrolliert (verdichtet), oder aber unkontrolliert. Die damit einhergehende Veränderung der Böschungsgeometrie sowie des Böschungsmaterials muss bei der Standsicherheitsbeurteilung berücksichtigt werden. Zu beachten ist ggfs. zudem eine Sedimentation von Feinkornschichten mit geringer Scherfestigkeit z.B. in Schlammteichen. Diese Feinkornschichten stellen bei Anschüttung auf diese Schicht eine potentielle Schwachstelle dar.

Sofern die Grube oder der Tagebau nach der Betriebsphase geflutet werden soll, sind ggfs. veränderliche hydraulische und bodenmechanische Eigenschaften des gewachsenen und verkipperten Böschungsmaterials bei Wasserzufuhr festzustellen und bei der Standsicherheitsbewertung zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist das Potential des gewachsenen Bodens sowie des Anschüttmaterials hinsichtlich Setzungsfließen und Bodenverflüssigung zu bewerten.

Bei Anschüttungen ist allgemein die Möglichkeit des Aufbaus von Porenwasserüberdrücken infolge des Einbringens von abdichtenden Bodenbereichen oder Grundwasserstauern z.B. durch die Wahl eines geeigneten Verfüllmaterials oder durch das Anbringen von Dränagen zu vermeiden. Ggfs. ist ein Aufbau von Porenwasserüberdrücken in der Standsicherheitsanalyse zu berücksichtigen.

6.2 Risikobewertung

Zentraler Bestandteil der Bewertung einer Böschung ist die Risikobewertung. Dabei wird das Risiko R_i bei Versagen einer Böschung in der Regel als das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit E_i und dem Schadensausmaß S_i definiert.

$$R_i = E_i \cdot S_i \quad (1)$$

Risiken werden eingeteilt in Bereiche, die als „sicher“ und „unsicher“ bewertet werden. Der Übergang zwischen den beiden Bereichen wird als das sogenannte Grenzrisiko R_G definiert, das auf Basis sozioökonomischer Überlegungen festgelegt werden muss. Selbst bei Risiken die kleiner sind als das Grenzrisiko verbleibt immer ein nicht auszuschließendes Restrisiko.

Eine ausführliche Erläuterung der Ermittlung der genannten verschiedenen Risiken, Eintrittswahrscheinlichkeiten unerwünschter Ereignisse und Schadensausmaße in Bezug auf Bergbauaktivitäten wird in DGGT (2020) gegeben, die hier in Bezug auf die Fragestellung der Böschungsstandsicherheit zusammengefasst wiedergegeben wird. Zunächst müssen unerwünschte Ereignisse, die eine Schadens- oder Gefahrenquelle darstellen, definiert werden. In Bezug auf die Böschungen wären dies beispielsweise:

- Versagen der Böschung mit tiefgreifenden Bruchmechanismen
- Grundbruch

- Oberflächliches Abrutschen der Böschung (Hautrutschungen)
- Unerwünschte Baugrundverformungen im Bereich der Böschung inklusive eines Bereichs um den Böschungsfuß und die Böschungsschulter.

Basierend auf den örtlichen Randbedingungen müssen Eintrittswahrscheinlichkeiten E_i unter Berücksichtigung möglicher Ursachen (bspw. Grundwasserschwankungen, außerplanmäßige Belastungen) für alle unerwünschten Ereignisse definiert werden. Zur quantitativen Festlegung von Eintrittswahrscheinlichkeiten fehlen bislang die Verfahren, so dass eine qualitativ verbale Kategorisierung vorgenommen werden muss. Beispiele hierfür wären:

- sehr wahrscheinlich
- wahrscheinlich
- wenig wahrscheinlich
- praktisch unmöglich

Die Schadensmaße S_i müssen in ähnlicher Form kategorisiert werden, wobei zwischen Personen-, Sach- und Umweltschäden zu unterscheiden ist. Beispiele hierfür wären:

- sehr hoch
- hoch
- klein
- unbedeutend

Auf Basis dieser Kategorisierungen können Risikoklassen festgelegt werden. Im hier wiedergegebenen Beispiel wird zwischen vier Klassen unterschieden (siehe Abbildung 6.1).

↑ Eintrittswahrscheinlichkeit	sehr wahrscheinlich	IV	III	II	I	
	wahrscheinlich	IV	IV	III	II	$R_i > R_G$
	wenig wahrscheinlich	IV	IV	IV	III	$R_i = R_G$
	praktisch unmöglich	IV	IV	IV	IV	$R_i < R_G$
		unbedeutend	klein	hoch	sehr hoch	
	Schadensausmaß →					

Abbildung 6.1: Risikoklassen (nach DGGT (2020) und angepasst)

In der folgenden Tabelle 6.1 werden in Anlehnung an DGGT (2020) Beispiele für Risikoklassen bei der Bewertung der Böschungsstandsicherheit angegeben.

Tabelle 6.1: Bewertungsbeispiele für Risikoklassen bei Grubenböschungen

Risiko- klasse	Schadensbild	Nutzung	Standsicherheit	Empfohlene Maßnahmen
I	<ul style="list-style-type: none"> – Großflächiges, tiefgreifendes Böschungsver-sagen – Oberflächliche Rutschungen (Hautrutschungen) – Risse im Böschungsbereich – Größere Verformungen an Böschungsschulter und -Fuß – Flutungs bzw. Überflutungsgefahr – Starke Wasserstands-schwankun-gen 	<ul style="list-style-type: none"> – Unmittelbare Bebauung, Be-reiche mit er-höhter stati-scher und dy-namischer Be-lastung – Verkehrswege – Stark frequen-tierte öffentliche Bereiche 	<ul style="list-style-type: none"> – Nicht dauerhaft standsicher – Akute Versagens-gefahr – Akute Gefährdung der öffentlichen Sicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> – Sofortige Sper-rung der Bö-schung und Um-gebung – Sofortsicherung – Handlungsbedarf für Sicherungs-und Sanierungs-maßnahmen
II	<ul style="list-style-type: none"> – Oberflächliche Rutschungen (Hautrutschungen) – Risse im Böschungsbereich – Verformungen an Böschungsschulter und -Fuß 	<ul style="list-style-type: none"> – Nicht unmittel-bar angren-zende Bebau-ung – Land- und forst-wirtschaftliche Flächen – Gering frequen-tierte öffentliche Bereiche (Feld-wege) 	<ul style="list-style-type: none"> – Nicht dauerhaft standsicher – Hohe Gefährdung der öffentlichen Sicherheit 	<ul style="list-style-type: none"> – Sofortige Sper-rung der Bö-schung und Um-gebung – Sofortsicherung – Handlungsbedarf für Sicherungs-und Sanierungs-maßnahmen
III	<ul style="list-style-type: none"> – Risse im Böschungsbereich – Kleine Verformun-gen an Böschungsschulter und -Fuß 	<ul style="list-style-type: none"> – Randlage von Bebauungen, jedoch außer-halb deren un-mittelbarer Nut-zung – Land- und forst-wirtschaftliche Flächen 	<ul style="list-style-type: none"> – Mittel- und lang-fristig ist keine dauerhafte Stand-sichert gegeben 	<ul style="list-style-type: none"> – Periodische Kon-trollen werden empfohlen (mo-natlich bis jäh-rlich) – Mittel- und lang-fristig sind Unter-suchungs-und Sanierungsarbei-ten vorzusehen

Tabelle 6.1: Bewertungsbeispiele für Risikoklassen bei Grubenböschungen

Risiko-klasse	Schadensbild	Nutzung	Standsicherheit	Empfohlene Maßnahmen
IV	<ul style="list-style-type: none"> – Kein Böschungsver-sagen – Keine oberflächli-chen Rutschungen (Haut-rutschungen) – Keine Risse im Böschungsbereich – Keine Verformun-gen an Böschungs-schulter und –Fuß 	<ul style="list-style-type: none"> – keine Nutzungs-einschränkung 	<ul style="list-style-type: none"> – Dauerhaft standsi-cher 	<ul style="list-style-type: none"> – Periodische Kon-trollen in größe-ren Intervallen werden in Einzel-fällen empfohlen

Das komplette Vorgehen empfohlen in DGGT (2020) zur Bewertung von Risiken und dem Handlungsbedarf in von Bergbau betroffenen Gebieten ist in Abbildung 6.2 zusammengefasst.

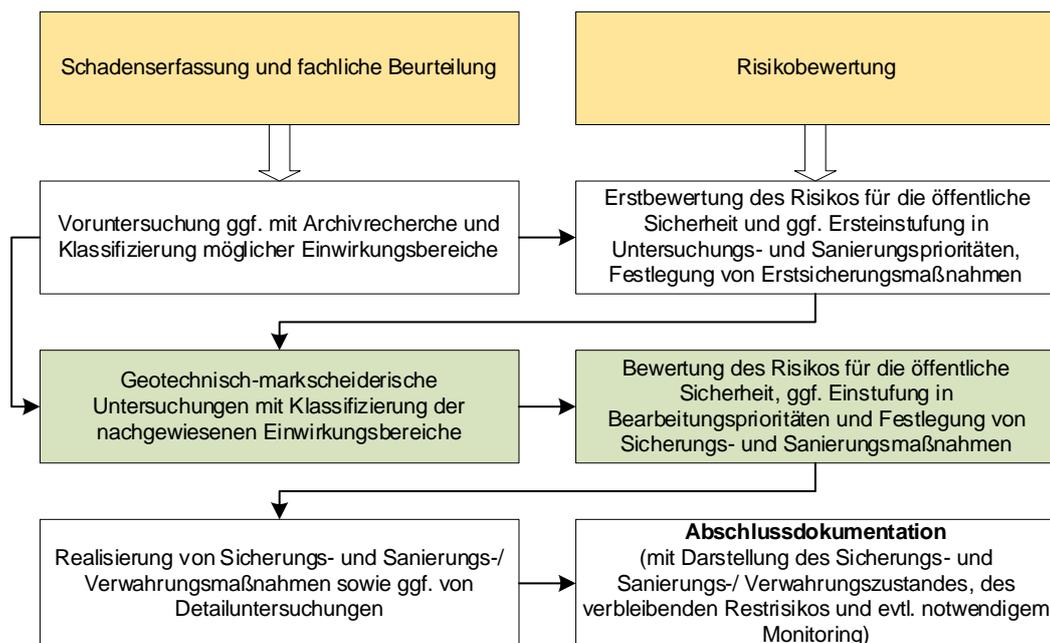


Abbildung 6.2: Grundlegende Schritte bei der Risikountersuchung und –bewertung sowie der Gefahrenabwehr in Altbergbaugebieten (DGGT, 2020)

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass eine umfangreiche Risikobewertung nur im Falle von komplizierten oder sehr großen Gruben und Tagebauen realisierbar ist. Für kleine Gruben, die auch im Hinblick auf ihre Nachnutzung kein großen Gefährdungspotenzial besitzen, ist der Aufwand einer Risikobewertung wie oben beschrieben in der Regel nicht zu rechtfertigen. Das im Folgenden in Kapitel 7 beschriebene Vorgehen zur Kategorisierung von Grubenböschungen in sogenannte Böschungskategorien beinhaltet zudem auch schon eine Art Risikobewertung, die in

der Regel ausreicht, um das Risiko abschätzen zu können und in der Folge Maßnahmen festlegen zu können, um das Restrisiko unter das tolerierbare Restrisiko zu drücken. Dies ist bei einfachen Fällen (BöK 1) in der Regel dann gegeben, wenn man sich bei der Böschungsgestaltung an Erfahrungswerten orientiert. Bei komplizierteren Fällen (BöK 2) muss die Sicherheit nach geotechnischen Normen nachgewiesen werden, und bei sehr komplizierten Randbedingungen (BöK 3), bei denen unter Umständen auch eine Sicherheit nach geotechnischen Normen nicht gesichert eingehalten werden kann, muss eine ausführliche Risikobewertung nach dem beschriebenen Verfahren durch einen geotechnischen Sachverständigen erfolgen.

6.3 Erkundung und Probenahme

Die Erkundung und Probenahme kann sich an Festlegungen des EC7, der DIN 1054 und der DIN 4020 orientieren. Weitere Details dazu werden in Kapitel 6.8.12 genannt.

6.4 Potentielle Versagensmechanismen

Auf potentielle Versagensmechanismen und Versagensformen in Abhängigkeit von der Bodenart wird in Kapitel 5.1 näher eingegangen.

6.5 Berechnung der Standsicherheit

Wenn alle benötigten Daten vorliegen, wird die Standsicherheit der Endböschungen in maßgebenden Schnitten durch das Untergrundmodell ggfs. unter Berücksichtigung der Wasserdrücke und Strömungsverhältnisse aus dem Grundwassermodell beurteilt.

Es gibt vielfältige Methoden zur Berechnung der Standsicherheit von Böschungen (siehe Kapitel 5.1). Die meisten Methoden bringen die Böschung rechnerisch in ein Grenzgleichgewicht, so dass sie gerade nicht versagt (*engl: Limit Equilibrium Techniques, LET*). Üblicherweise werden die zur Erzielung des Grenzgleichgewichts im Boden zu mobilisierenden, minimal erforderlichen Scherfestigkeiten mit den tatsächlich vorhandenen, maximal mobilisierbaren Scherfestigkeiten verglichen und das Verhältnis von beiden als Ausnutzungsgrad oder Sicherheit definiert. Grundgedanke dieser Berechnungsverfahren ist, mögliche Bruchkörper, die eventuell rutschen könnten, daraufhin zu untersuchen, ob sie unter Berücksichtigung möglicher Widerstände ein stabiles Gleichgewicht aufweisen. Sofern die zu untersuchenden Bruchkörper nicht aus den Randbedingungen der Baugrundsichtung und der Qualität der beteiligten Schichten festliegen, werden systematisch möglichst viele denkbare Körper untersucht. Maßgebend ist die Bruchgeometrie, für welche die geringste Sicherheit bzw. der größte Ausnutzungsgrad vorliegt.

Ein weiteres Verfahren zur Bewertung der Sicherheit einer Böschung ist die Methode der Finiten Elemente, mit welcher der Spannungs- und Verformungszustand einer Böschung infolge ihrer Herstellung berechnet werden kann. Um ein Maß für die Sicherheit bzw. den Ausnutzungsgrad

zu erhalten, werden die Scherparameter aller beteiligten Schichten im selben Maß schrittweise soweit reduziert, bis sich rechnerisch ein Versagen ergibt. Das Maß der dazu erforderlichen Reduzierung der Parameter definiert den Ausnutzungsgrad der Böschung bei Verwendung der Entwurfs-Scherfestigkeiten.

Andere numerische Verfahren, wie netzfreie Verfahren (Material Point Method, Discrete Element Method), sind momentan noch überwiegend Forschungszwecken zuzuordnen und werden standardmäßig zur Bewertung der Standsicherheit von Böschungen nicht eingesetzt.

Im Folgenden wird zum einen auf die Schnittführung und die maßgebende Neigung von Grubenböschungen näher eingegangen. Außerdem wird eine numerische Sensitivitätsanalyse vorgestellt, in deren Rahmen der Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen und Parametervariationen auf die Böschungsstandsicherheit mit dem Ziel untersucht wurden, ihre Einflussgröße besser abschätzen zu können.

6.5.1 Einfluss der Schnittführung und Neigung

Zur Berechnung der Standsicherheit von Böschungen ist es entscheidend, den maßgebenden Berechnungsschnitt richtig zu wählen. Bei Böschungen, die als geotechnische Bauwerke errichtet werden, ist dies in der Regel einfach festzulegen, da die Böschungen normalerweise eine einheitliche Neigung bzw. Kontur haben. Bei Böschungen, die im Rahmen von Rohstoffgewinnungsmaßnahmen entstehen, ist die Festlegung des maßgebenden Bemessungsschnitts oftmals nicht so eindeutig, da die Böschungskontur uneinheitlich sein kann. Im Folgenden wird am Beispiel einer ca. 20 m hohen Böschung einer Sandgrube untersucht, wie der maßgebende Schnitt gefunden werden kann und welche Neigung maßgebend ist. Dabei wird unterschieden zwischen zwei verschiedenen Methoden der Schnittführung, des sogenannten „steilsten Wegs“ und des „geraden Schnitts“ (siehe Abbildung 6.3). Beim steilsten Weg handelt es sich um den Pfad zwischen einem gewählten Punkt an der Oberkante der Böschung und einem sich ergebenden Punkt an der Unterkante der Böschung, den ein Ball entlang des jeweils ortsabhängig steilsten Wegs aufgrund der Gravitation hinabrollen würde. Der gerade Schnitt wurde so gewählt, dass er den Hoch- und den Tiefpunkt des steilsten Wegs mit einem linearen Schnitt verbindet.

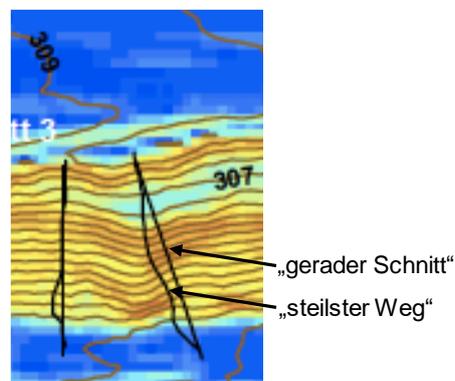


Abbildung 6.3: Unterscheidung zwischen Schnittführung: „steilster Weg“, „gerader Schnitt“

Neben der Schnittführung wurde der Einfluss der Böschungsneigung bzw. –Kontur auf die Standsicherheitsberechnung untersucht. Dabei wurde unterschieden zwischen der tatsächlichen Böschungskontur, der Generalneigung und der mittleren Neigung (siehe Abbildung 6.4). Die Böschungskontur stellt den tatsächlichen Schnitt durch die Böschung dar. Die Generalneigung ist die lineare Verbindung der Tangentenschnittpunkte an Böschungsschulter und Böschungsfuß. Und die mittlere Neigung ist der Mittelwert aller Neigungen der Vermessungspunkte entlang der Böschungskontur. Oftmals ist es schwierig, ohne großen vermessungstechnischen Aufwand die tatsächliche Böschungskontur zu ermitteln, weswegen es hilfreich sein kann, die Böschungskontur vereinfacht über die Generalneigung in der Standsicherheitsberechnung abzubilden. Im Folgenden wird untersucht, welche Neigung maßgebend ist.

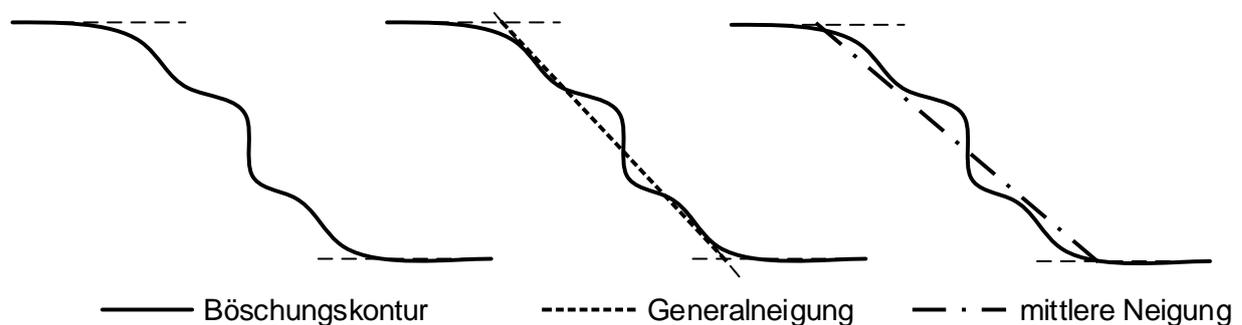


Abbildung 6.4: Exemplarische Darstellung der Böschungskontur, Generalneigung und mittleren Neigung

Bei der betrachteten Böschung handelt es sich um eine trockene Sandgewinnung, in der der Sand mittels Tieflöffelbagger abgebaut wurde. Die anstehenden Sande sind sehr homogen in ihrer Kornverteilung und werden als schwach schluffige, kiesige Sande (si'grSa gemäß DIN EN ISO 14688; SU nach DIN 18196) angesprochen bzw. eingruppiert. Aufgrund des geringen Schluffgehalts haben diese Böden keine nennenswerte effektive Kohäsion c' . Dennoch stehen die Böschungen über sehr lange Zeiträume (> 10 a), obwohl sie abschnittsweise nahezu senkrecht sind, stabil. Einzig oberflächliche Abbröckelungen sind an den übersteilten Abschnitten erkennbar (siehe Abbildung 6.5). Aus konsolidierten drainierten Triaxialversuchen an aufbereiteten dichten Proben konnten ein Spitzen-Reibungswinkel $\varphi' = 35^\circ$ und eine Kohäsion $c' = 0,0 \text{ kN/m}^2$ ermittelt werden. Auf Basis dieser Scherparameter dürfte die Böschung in der gegebenen Form nicht standsicher sein. Ihre Standsicherheit muss daher bedingt sein durch eine Strukturfestigkeit (siehe Kapitel 5.2.3) und / oder erhöhte Festigkeit aufgrund von Teilsättigungsbedingungen (siehe Kapitel 5.2.4).



Abbildung 6.5: Foto der Grubenböschung

Zur Analyse des maßgebenden Schnitts wurde mit Hilfe eines digitale Geländemodells insgesamt 17 Schnitte entlang der Grubenböschung ausgewertet (siehe Abbildung 6.6). Dabei wurden jeweils der gerade Schnitt und der steilste Weg analysiert. Aus diesen Schnitten wurden wiederum vier ausgewählt. Es wurden der Schnitt mit der höchsten maximalen Steigung (Schnitt 10), der Schnitt mit der höchsten Generalneigung (Schnitt 3) sowie zwei weitere Schnitte, die sich durch eine hohe lokale Neigung (Schnitt 11) und eine hohe Generalneigung (Schnitt 12) auszeichnen, ausgewählt.

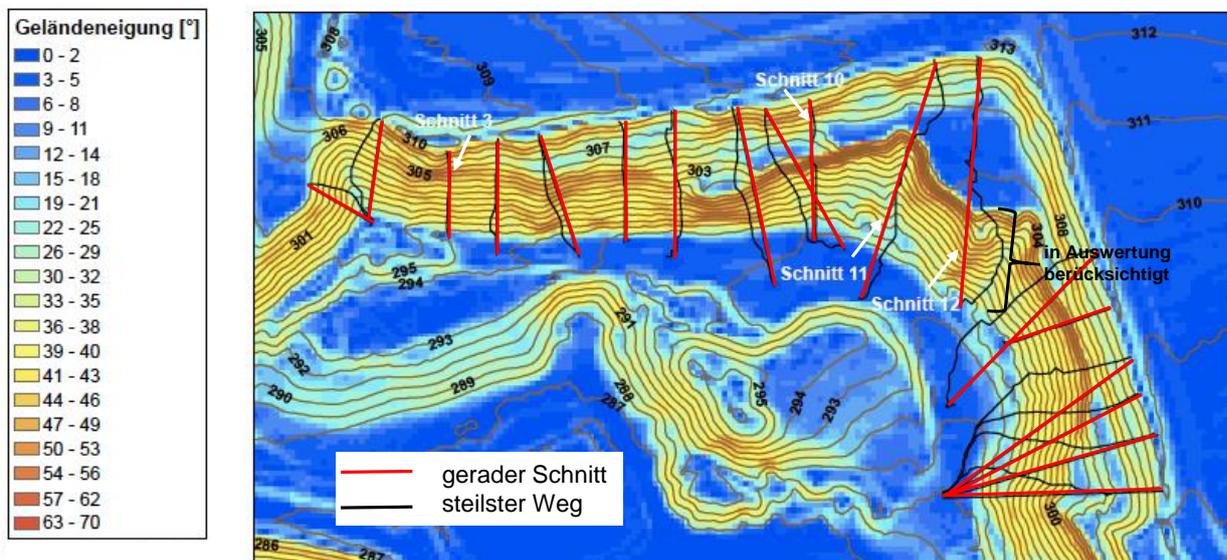


Abbildung 6.6: Schnittführung durch Grubenböschung

Die Schnitte entlang des steilsten Wegs sind in Abbildung 6.7 und Abbildung 6.8 dargestellt. Die entsprechenden Darstellungen für den geraden Schnitt sind zur besseren Übersicht im Anhang in Abbildung A. 7.1 und Abbildung A. 7.2 dargestellt. In den Diagrammen sind jeweils auch die Generalneigung, die mittlere Neigung und die steilsten Neigungen dargestellt. Die Werte sind zusammenfassend in Tabelle 6.2 eingetragen. Daraus wird ersichtlich, dass die geraden Schnitte kürzer oder gleich lang sind und entsprechend auch ihre Generalneigungen höher sind als die

der Schnitte des steilsten Wegs. Für die mittleren Neigungen trifft dies mit Ausnahme von Schnitt 11 auch zu. Bei den steilsten Neigungen ist das Bild uneinheitlich, aber die Neigungswerte sind mit Ausnahme von Schnitt 12 zwischen den beiden Schnitttypen sehr ähnlich. Des Weiteren ist erkennbar, dass die Generalneigung in den gegebenen Fällen immer steiler als die mittlere Neigung ist. Dies muss jedoch nicht immer der Fall sein, wenn beispielsweise ein steiler Versatz in einer Böschung bei sonst konstanter Neigung vorhanden ist.

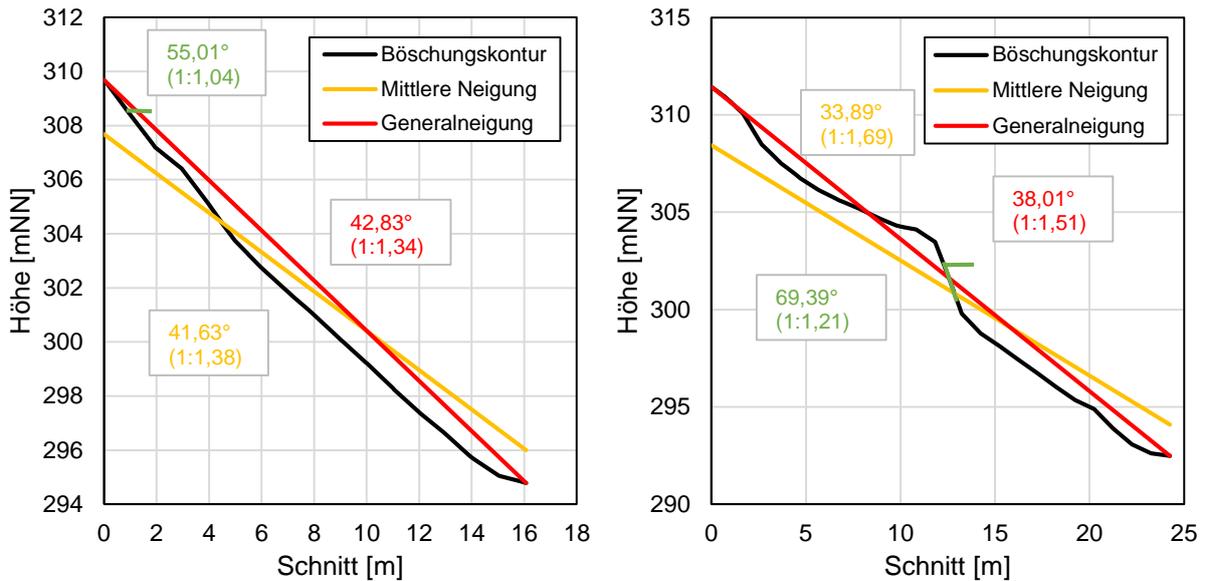


Abbildung 6.7: Steilster Weg: Schnitt 3 (links), Schnitt 10 (rechts)

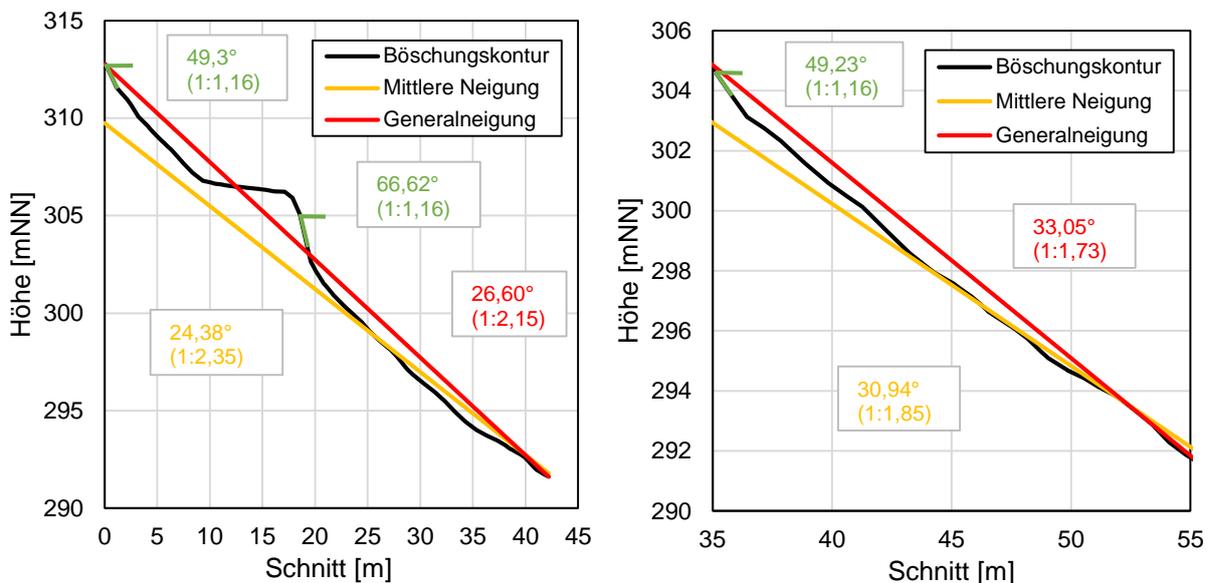


Abbildung 6.8: Steilster Weg: Schnitt 11 (links), Schnitt 12 (rechts)

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Schnittdaten, steilster Weg und (gerader Schnitt)

	Schnitt- bezeichnung	General- neigung [°]	mittlere Neigung [°]	steilste Neigung [°]	Schnittlänge [m]
steilster Weg (gerader Schnitt)	Schnitt 3	43 (43)	42 (42)	55 (54)	16 (16)
	Schnitt 10	38 (40)	34 (37)	69 (70)	27 (27)
	Schnitt 11	27 (29)	24 (27)	67 (65)	52 (37)
	Schnitt 12	33 (39)	31 (36)	49 (55)	20 (15)

Unter Zugrundelegung der tatsächlichen Böschungskontur und des im Triaxialversuch ermittelten Reibungswinkels wurde die maximal notwendige Kohäsion ermittelt, um den Schnitt mit dem steilsten Abschnitt, Schnitt 10, ins Grenzgleichgewicht zu bringen. Daraus ergab sich, dass mindestens eine Kohäsion $c' = 5,0 \text{ kN/m}^2$ notwendig ist, um den Schnitt 10 sowohl im Falle des geraden Schnitts als auch im Falle des steilsten Weges in ein Grenzgleichgewicht zu bringen. Alle übrigen Schnitte benötigen geringere Werte. Die ermittelte Kohäsion liegt im Bereich der in Kapitel 5.2.3 genannten Erfahrungswerte für eine Strukturfestigkeit.

Die gleiche Berechnung wurde auch für die Generalneigung und mittlere Neigung für alle Schnitte durchgeführt. Die Kohäsionswerte, die sich für die Generalneigung zum Erreichen eines Grenzgleichgewichts ergaben, waren generell höher, als die für die mittlere Neigung. Beide Werte waren bei allen Schnitten, die eine deutliche Diskontinuität in der Neigung aufwiesen (Schnitt 10 und 11) deutlich geringer als die, die sich aus der Berechnung mit der Böschungskontur ergaben. Bei Schnitt 3 und Schnitt 12 hingegen war der Unterschied zwischen der Kohäsion, die sich aus der Berechnung mit der Böschungskontur ergab nur unwesentlich höher als bei Berechnung mit der Generalneigung.

Dies zeigt, dass Böschungen mit uneinheitlicher Kontur nicht in jedem Fall mit dem Ansatz einer General- oder mittleren Neigung vereinfacht erfasst werden können. Böschungen ohne große Neigungsänderung können in der Regel mit Hilfe der Generalneigung vereinfacht erfasst werden. Die Vereinfachung der Böschungskontur mit Hilfe der mittleren Neigung birgt den Nachteil in sich, dass zur korrekten Ermittlung der mittleren Neigung auch eine genaue Vermessung der Böschungskontur notwendig wäre, was häufig einen zu großen Aufwand darstellt. Des Weiteren zeigen die Auswertungen, dass der gerade Schnitt durch die Böschung im Vergleich zum steilsten Weg im Hinblick auf die Standsicherheitsberechnung in der Regel auf der sicheren Seite liegt. Die Unterschiede in den Kohäsionswerten, die zum Erreichen des Grenzgleichgewichts notwendig waren, waren sehr klein. Auch dies vereinfacht die Festlegung des maßgebenden Berechnungsschnitts erheblich.

Die Beurteilung, ob Böschungen übersteilt oder abschnittsweise übersteilt, d.h. steiler als es die klassischerweise angesetzten Scherparameter ohne Berücksichtigung einer Strukturfestigkeit, einer Teilsättigung oder eines erhöhten Reibungswinkels bei niedrigen Spannungen erlauben würden, bei der Gestaltung der Endböschungen einer Grube akzeptiert werden, hängt mit der Nachnutzung der Grube zusammen. Bei Nachnutzungen geringer Sensitivität, in denen beispielsweise Naturschutz vorrangig ist, kann es durchaus möglich sein, übersteilte Abschnitte in einer Bö-

schung zuzulassen. Dieses Thema wird gesondert in Kapitel 8 bei Anforderungen an Grubenböschungen behandelt. Das heißt bei der Festlegung des maßgebenden Schnitts ist auch immer die Nachnutzung mit einzubeziehen. Sind oberflächliche kleine Rutschungen oder Abbröckeln der Böschung zulässig und müssen nur tiefgreifende Kinematiken und großflächiges Abrutschen ausgeschlossen werden, kann ein anderer Schnitt, hier Schnitt 3, maßgebend sein, als wenn keinerlei zeitliche Veränderung der Böschung zulässig ist. In diesem Fall wäre hier Schnitt 10 maßgebend.

6.5.2 Sensitivitätsanalyse (numerische Untersuchungen)

Im Folgenden werden weitere numerische Untersuchungen zu verschiedenen Szenarien, die die Böschungsstabilität beeinflussen können, vorgestellt. Der Ausgangszustand aller Berechnungen ist eine Böschung nach einem unkontrollierten Abbau. Dabei ist die Böschung im Grenzgleichgewicht und hat damit eine Neigung gleich oder nahe dem Reibungswinkel. Folgende Szenarien wurden untersucht:

1. Nachvollzug der zeitabhängigen Abflachung einer Unterwasserböschung
2. Einfluss des Wasserstands in der Böschung, ohne Potentialunterschied
3. Einfluss eines Wasseraufstaus hinter einer Teilverfüllung
4. Einfluss einer Bodenschicht mit reduzierten Scherparametern
5. Einfluss einer Kohäsion auf die Bruchkörperform
6. Einfluss der Bodenwichte auf die Standsicherheit
7. Einfluss des hydraulischen Gradienten auf die Standsicherheit

6.5.2.1 Zeitabhängige Abflachung einer Unterwasserböschung

Unterwasserböschungen stellen sich oftmals wesentlich flacher ein, als es der kritische Reibungswinkel (Reibungswinkel bei Volumentreue) zulassen würde. Grund dafür sind Wasserstandsschwankungen, Wellenschlag und Einwirkungen aufgrund von Grundwasserströmungen (siehe Kapitel 5.3 und 6.7). Die zeitabhängige Abflachung einer Unterwasserböschung wurde zur Verdeutlichung numerisch nachvollzogen. In diesem Fall wurde nur der Einfluss einer Wasserstandsänderung auf die Stabilität einer initial im Grenzgleichgewicht stehenden Böschung betrachtet. Einwirkungen aus Wellenschlag und Grundwasserströmung wurden vernachlässigt. Die Ausgangssituation ist eine nach dem Abbau im Grenzgleichgewicht stehende Böschung. Der Böschungsbruch wird in diesem Fall durch eine leichte Absenkung des Seewasserspiegels um 25 cm ausgelöst, wobei keine Strömung berücksichtigt wird. Die Entwicklung ist in Abbildung 6.9 dargestellt.

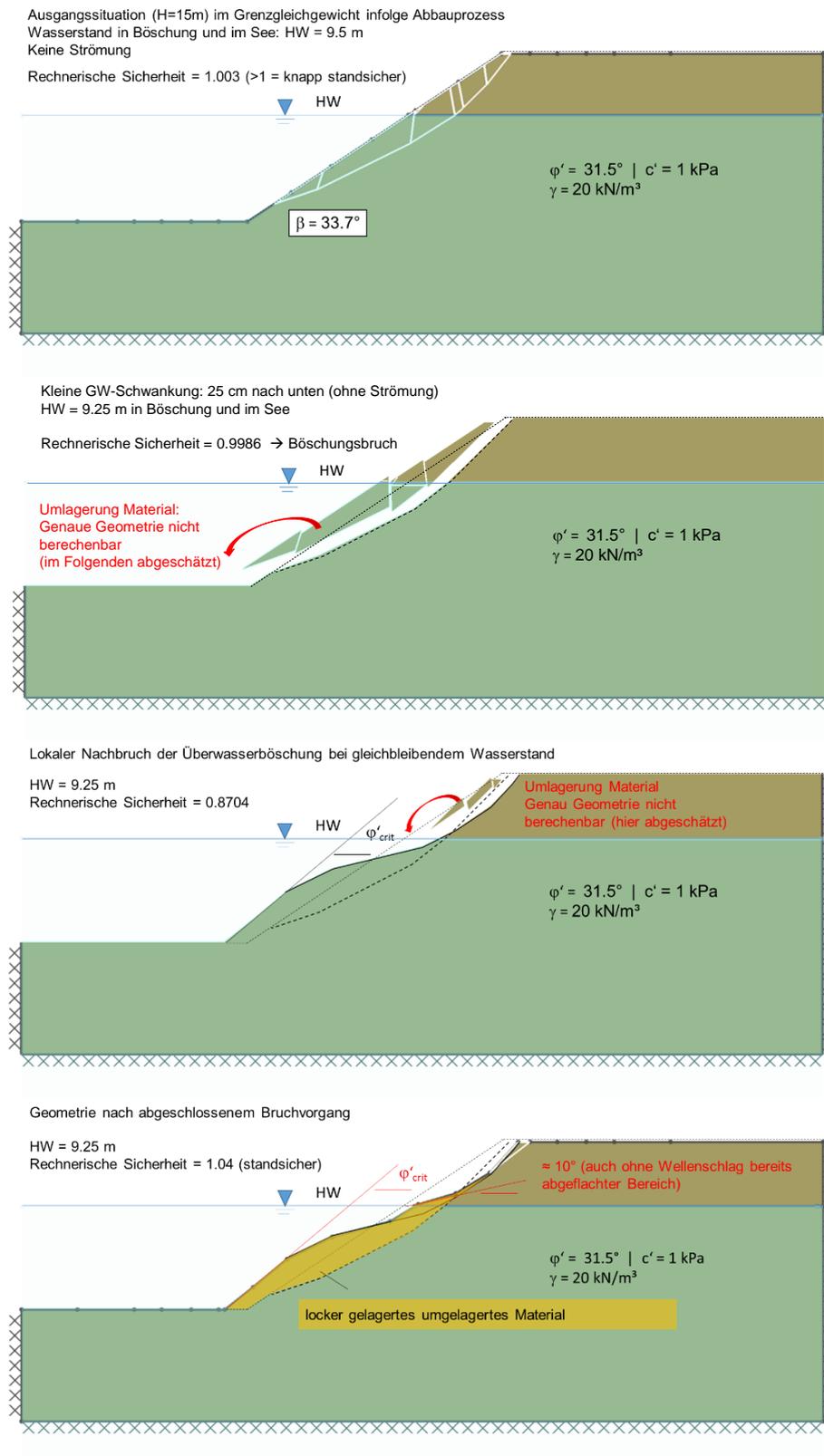


Abbildung 6.9: Abflachung einer Unterwasserböschung numerisch nachvollzogen

Das rutschende Material lagert sich am Böschungsfuß locker ab, wobei in der Berechnung eine Ablagerungsgeometrie angenommen wurde, da eine genaue Berechnung nicht möglich ist. Im oberen Bereich der Böschung treten aufgrund der Übersteilung beim ersten Abbruch lokale Nachbrüche auf. So kommt es mit der Zeit auf die Generalneigung bezogen zu einer deutlichen Abflachung der Böschung. Bei zusätzlichem Auftreten einer Grundwasserströmung in Richtung See kommt es zu einer weiteren Abflachung (siehe Abbildung 6.10). Solche zeitlich verzögerte Abflachungsprozesse laufen in erster Linie bei gekippten oder unkontrolliert abgebauten Böschungen ab.

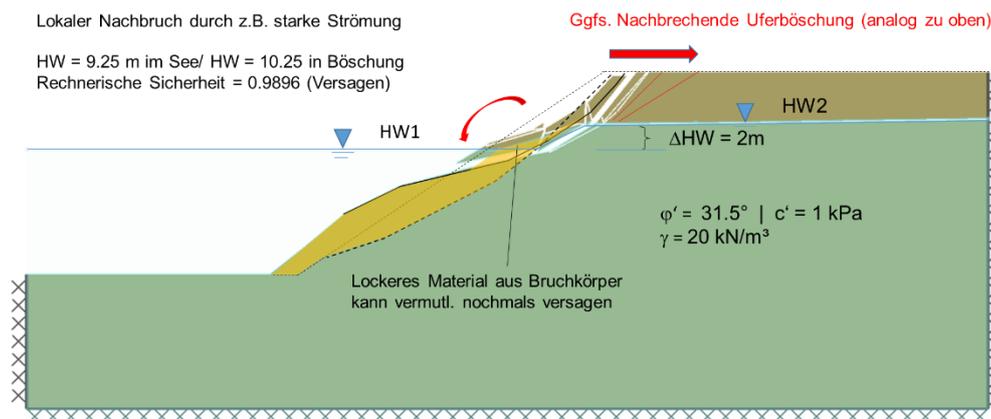


Abbildung 6.10: Nachbrechen durch Grundwasserschwankungen

6.5.2.2 Einfluss des Wasserstands in der Böschung, ohne Potentialunterschied

Abbildung 6.11 zeigt das Ergebnis der Berechnungen zum Einfluss des Wasserstands in einer Böschung ohne Potentialunterschied. Bei der gegebenen Böschungsgeometrie und den Scherparametern befindet sich die Böschung ohne Wassereinfluss mit einem Ausnutzungsgrad $\mu = 0,96$ nahe dem Grenzgleichgewicht. Mit Wasser ist erkennbar, dass je nach Wasserstand die Böschung stabil bleibt oder bei einem Ausnutzungsgrad $\mu > 1.0$ rechnerisch versagt. Der Einfluss des Wassers auf die Standsicherheit hängt davon ab, wie der Wasserstand das Eigengewicht des Bodens beeinflusst. Das Eigengewicht stellt bei Böschungsbrüchen zum einen eine abtreibende Einwirkung und zum anderen eine über die Reibung entlang der Scherfuge stabilisierende Größe dar. Bei steigendem Wasserstand sinkt durch den Auftrieb das effektive Eigengewicht des Bodens. Im Bereich zwischen ca. 4 und 10 m Wasserstand über dem Böschungsfuß ist das Verhältnis zwischen reduzierter Übertragung der Reibung in der Scherfuge durch das niedrigere effektive Eigengewicht des Bodens im unteren Bereich der Böschung und dem Eigengewicht des nicht unter Auftrieb stehenden Bodens so ungünstig, dass der Ausnutzungsgrad über 1.0 liegt. Grundsätzlich ist erkennbar, dass Wasserstände in Höhe der halben Böschungshöhe den ungünstigsten Fall darstellen.

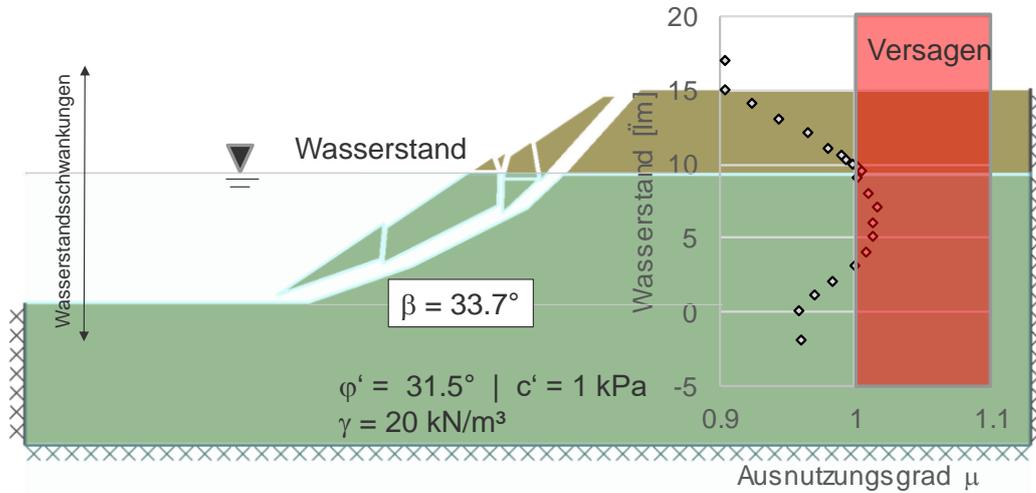


Abbildung 6.11: Böschungsstandsicherheit bei Schwankungen des Wasserstands in der Böschung ohne Potentialunterschied

6.5.2.3 Einfluss eines Wasseraufstaus hinter einer Teilverfüllung

Abbildung 6.12 zeigt das Ergebnis der Berechnungen zum Einfluss eines Wasseraufstaus hinter einer Teilverfüllung. Die Abbauböschung befindet sich zum Zeitpunkt der Anschüttung im modellierten Fall im Grenzgleichgewicht, da angenommen wird, dass unkontrolliert abgebaut wurde.

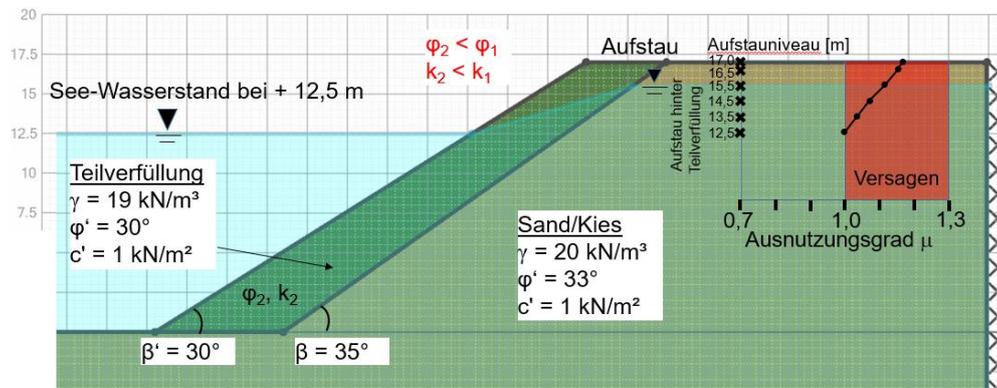


Abbildung 6.12: Böschungsstandsicherheit bei Wasseraufstau hinter einer Teilverfüllung

Teilverfüllungen werden häufig zur Böschungsprofilierung und zur Herstellung der Endböschungsgeometrie angewendet. Sie werden als Anschüttungen an der Böschungsschulter der Abbauböschung eingebracht. Bei der nach eigenen Untersuchungen häufigsten Verfüllmethode wird das Material abgeladen und anschließend von einem Radlader o.ä. verteilt und rutscht dabei unkontrolliert die Abbauböschung hinab (siehe Abbildung 6.13). Dadurch ist auch die teilverfüllte Böschung unmittelbar nach Herstellung im Grenzgleichgewicht. Im vorliegenden Fall wurde angenommen, dass das Material der Teilverfüllung einen geringeren Reibungswinkel hat, als der natürlich anstehende Boden, weswegen die teilverfüllte Böschung flacher ist. Das in Teilverfüllungen eingebrachte Material ist in der Regel sehr heterogen in seinen Eigenschaften. Es stammt

normalerweise aus Erdaushüben in der näheren Umgebung und muss nach aktuellem Stand keine geotechnischen Eigenschaften erfüllen. Es wird in der Regel nur auf umweltrelevante Bestandteile hin untersucht.



Abbildung 6.13: Herstellung einer Teilverfüllung im Nassabbau

Abbildung 6.14 zeigt beispielhaft wie heterogen das Material rein schon von der Anschauung her erscheint. Da häufig auch bindige Anteile im Material der Teilverfüllungen enthalten sind, können diese eine geringere Durchlässigkeit als der natürlich anstehende Boden haben. Dadurch kann es zu einem Grundwasseraufstau unmittelbar hinter der Teilverfüllung kommen. Im vorliegenden Fall kommt es dadurch aufgrund der sich im Grenzgleichgewicht befindlichen Böschung schon bei geringen Potentialunterschieden zu einem Versagen und einer weiteren Abflachung der Böschung. Ob die Abflachung als kritisch zu bewerten ist, hängt stark von der Nachnutzung des Sees ab. Im Falle einer Nachnutzung mit mittlerer oder hoher Sensitivität sollten angekippten Böschungen daher u. U. kontrolliert eingebaut werden (siehe dazu Kapitel 9 und 10).



Abbildung 6.14: Material einer angekippten Böschung

6.5.2.4 Einfluss einer Bodenschicht mit reduzierten Scherparametern

Abbildung 6.15 zeigt das Ergebnis der Berechnungen zum Einfluss einer Bodenschicht mit reduzierten Scherparametern auf die Böschungsstabilität. Die Lage der Schicht wurde von -7,5 m unter dem Böschungsfuß bis 15 m über dem Böschungsfuß verändert. Wie erkennbar ist, führt eine Schicht mit reduzierten Scherparametern, die im Bereich des Böschungsfußes liegt, zu einer deutlichen Reduktion der Standsicherheit der Böschung und im vorliegenden Fall, aufgrund des im Grenzgleichgewicht stehenden Ausgangszustands, zu einem Versagen der Böschung. Auf derartige Schwächezonen, die häufig an Schichtgrenzen beim Übergang von bindigen zu nichtbindigen Böden oder in bindigen Schichten auftreten, muss besonders im Rahmen der Erkundung und Kategorisierung der Böschungen geachtet werden.

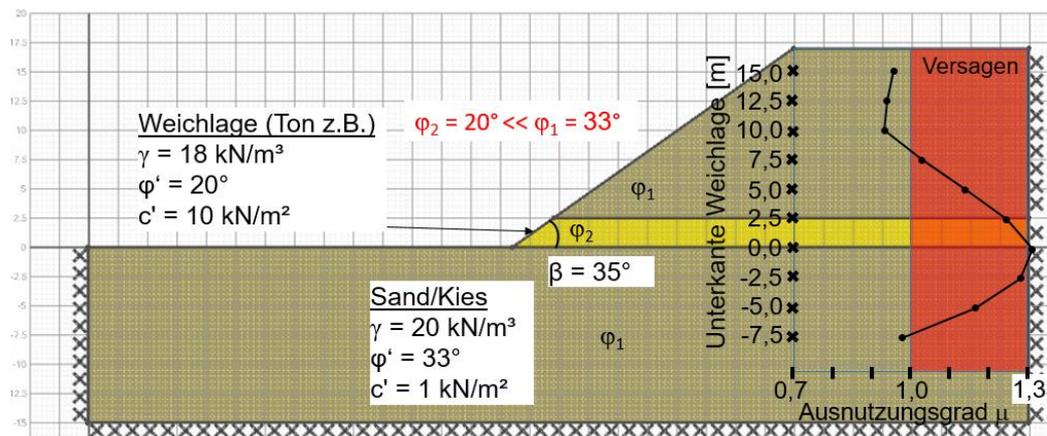


Abbildung 6.15: Böschungsstandsicherheit unter Berücksichtigung des Einflusses einer Bodenschicht mit reduzierten Scherparametern

6.5.2.5 Einfluss einer Kohäsion auf die Bruchkörperform

Zur Festlegung eines Sicherheitsabstands ab der Böschungsschulter ist es von Interesse, neben dem grundsätzlichen Nachweis einer Standsicherheit auch eine Abschätzung darüber zu machen, wie sich der Bruchkörper im Falle eines Versagens wahrscheinlich ausbildet. Es ist bekannt, dass Böschungen in kohäsionslosen Materialien ohne Wassereinfluss in der Regel durch oberflächennahe Rutschungen versagen und abflachen. Mit dem Einfluss von Wasser und einer Kohäsion verändern sich die oberflächennahen Bruchmechanismen zu tiefer reichenden Bruchkörpern, die folglich auch einen höheren Sicherheitsabstand verlangen. In der numerischen Untersuchung wurde daher betrachtet, wie sich eine Kohäsion auf die Bruchkörperform auswirkt. Dabei wurde die Kohäsion zwischen $c' = 0, 5, 10$ und 15 kN/m^2 variiert. Der Reibungswinkel blieb konstant und die Böschungsneigung wurde so angepasst, dass sich die Böschung im Grenzgleichgewicht bei $\mu = 1,0$ befand. Der Wasserstand blieb konstant auf halber Böschungshöhe, ohne den Einfluss einer Strömung. Verglichen wurden die Abstände a und b gemäß der Definition in Abbildung 6.16. Abbildung 6.17 zeigt die Auswertung der Abstandsentwicklung für a und b mit Zunahme der Kohäsion. Abbildung 6.18 zeigt die dazugehörigen Bruchkörper. Es ist zu erkennen,

dass der Abstand a nahezu unbeeinflusst ist von der Kohäsion, während der Abstand b zwischen $c' = 0,0 \text{ kN/m}^2$ von 1,0 m auf 4,0 m bei $c' = 15 \text{ kN/m}^2$ ansteigt. Alle Bruchkörper gehen durch den Böschungsfuß. Tendenziell werden also kohäsive Böden tiefer in die Böschungsschulter eingreifende maßgebende Bruchmechanismen haben und somit auch größere Sicherheitsabstände benötigen.

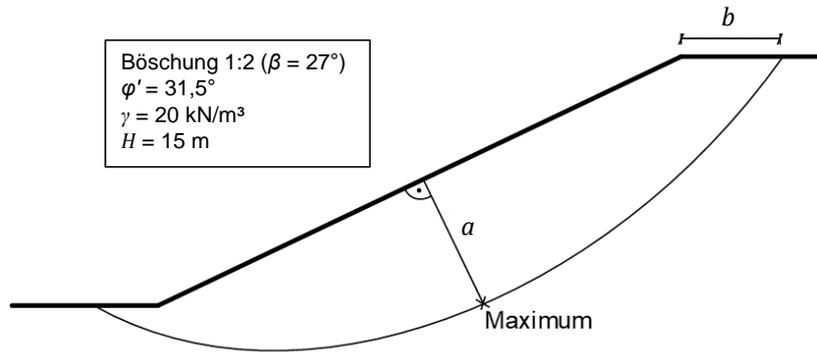


Abbildung 6.16: Definition der Abstände a und b zur Bewertung der Bruchkörpergeometrie

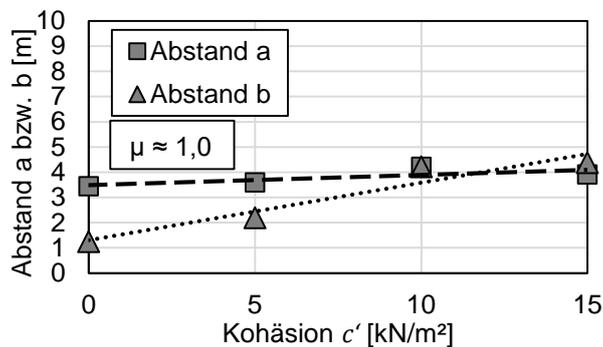


Abbildung 6.17: Einfluss der Kohäsion c' auf die Bruchkörperform

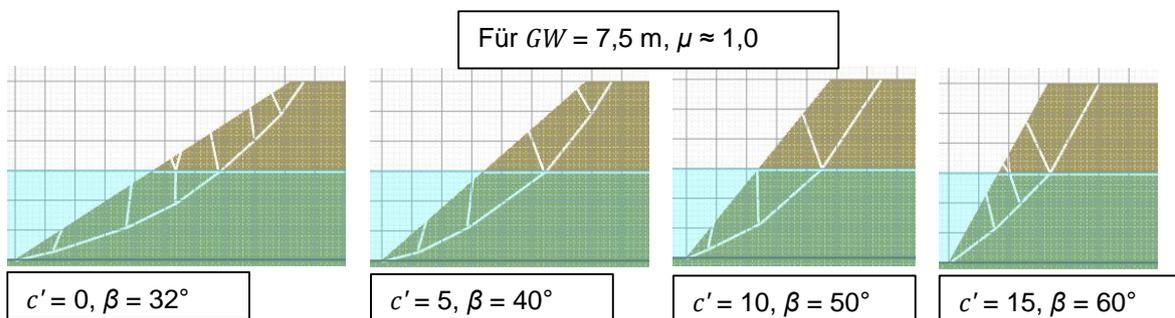


Abbildung 6.18: Einfluss der Kohäsion c' auf die Bruchkörperform

6.5.2.6 Einfluss der Bodenwichte auf die Standsicherheit

Es wurde untersucht welchen Einfluss eine ungenaue Bestimmung der Bodenwichte auf die Standsicherheitsberechnung einer Böschung hat. Dazu wurde die Wichte γ von 18 bis 24 kN/m³ im Bereich üblicher Erfahrungswerte variiert. Es wurde der Fall mit einem Wasserstand auf halber Böschungshöhe und der Fall ohne Wasser betrachtet. Die Auftriebswichte wurde berechnet über

$$\gamma' = \gamma_r - \gamma_w \quad (12)$$

mit γ_r der Sättigungswichte des Bodens und γ_w der Wichte von Wasser. Zusätzlich wurde angenommen, dass $\gamma = \gamma_r$. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.19 dargestellt. Wie zu erkennen ist, hat die Wichte grundsätzlich nur einen geringen Einfluss auf den Ausnutzungsgrad und damit auf die Standsicherheitsberechnung der Böschung. Im Falle eines Wasserstands auf halber Böschungshöhe nimmt der Ausnutzungsgrad mit zunehmender Wichte leicht ab. Das liegt daran, dass mit zunehmender Wichte γ das Verhältnis γ/γ' unter Zugrundelegung von (12) und der Annahme von $\gamma = \gamma_r$ zunimmt und somit im gesättigten Bereich im Verhältnis zur Feuchtwichte im oberen Böschungsabschnitt größere widerstehende Kräfte mobilisiert werden können. Im Fall ohne Wasser nimmt der Ausnutzungsgrad leicht zu mit steigender Wichte.

Grundsätzlich ergibt die Untersuchung, dass eine genaue Bestimmung der Wichte des Baugrunds für die Standsicherheitsberechnung von untergeordneter Rolle ist, solange man sich in üblichen Erfahrungswertbereichen befindet.

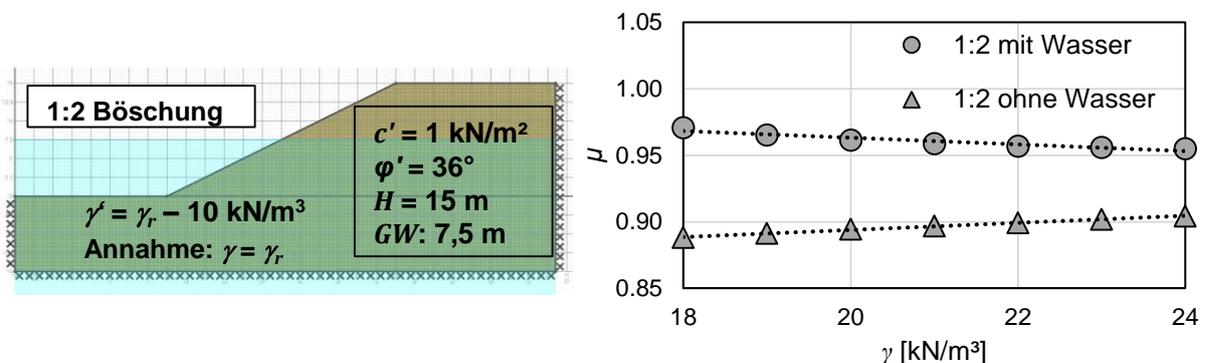


Abbildung 6.19: Einfluss der Bodenwichte auf die Standsicherheit

6.5.2.7 Einfluss des hydraulischen Gradienten auf die Standsicherheit

Gemäß BÖTTGER (1978) zitiert in BODE (2005) bewegen sich die Erfahrungswerte für hydraulische Gradienten in Böschungen von Baggerseen zwischen von $i = 0,05$ und $0,10$ und sind damit verhältnismäßig gering. Der Höhenunterschied zwischen freiem Wasserspiegel und ungestörtem Grundwasserspiegel beträgt dabei selten über $0,5$ m. Dies liegt daran, dass das ungestörte Grundwassergefälle in der Regel gering ist und die Böden eine relativ hohe hydraulische Durchlässigkeit haben.

Es wurde untersucht, wie groß der Einfluss des aus den hydraulischen Gradienten sich ergebenden Strömungsdrucks auf die Böschungsstandsicherheit ist, wenn man sich im Bereich der zitierten Erfahrungswerte bewegt. Dazu wurde der Höhenunterschied Δh zwischen freiem Wasserspiegel ungestörtem Grundwasserspiegel konstant bei 0,5 m gehalten und die Länge Δl , auf der sich der Potentialunterschied abbaut, variiert (siehe Abbildung 6.20). Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.21 dargestellt. Wie zu erkennen ist, hat der hydraulische Gradient bei Variation im üblichen Erfahrungswertebereich nur einen geringen Einfluss auf die Böschungsstandsicherheit. Dies setzt grundsätzlich geringe Grundwasserstandsschwankungen voraus, wie sie beispielsweise in der Böschungskategorie BK1 vorausgesetzt werden (siehe Kapitel 7.1.2).

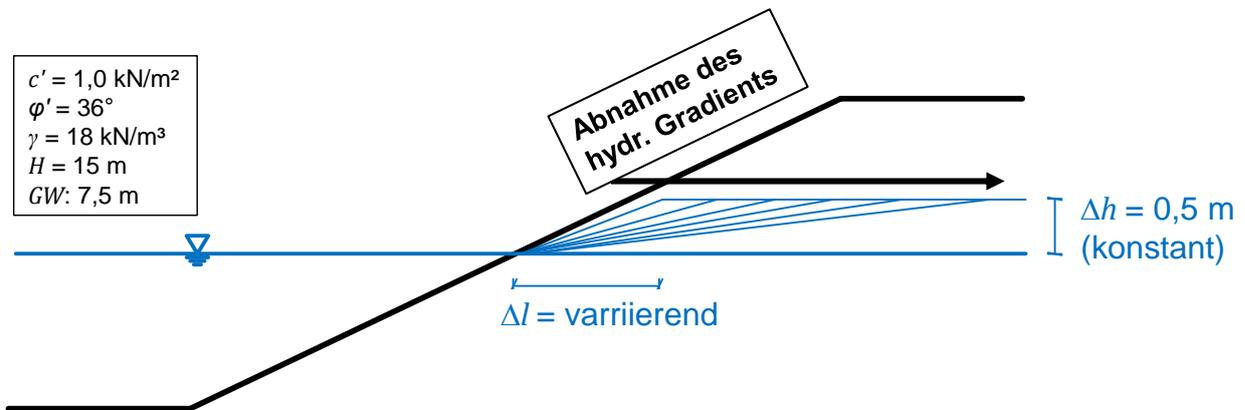


Abbildung 6.20: Variation des hydraulischen Gradienten in der Böschung

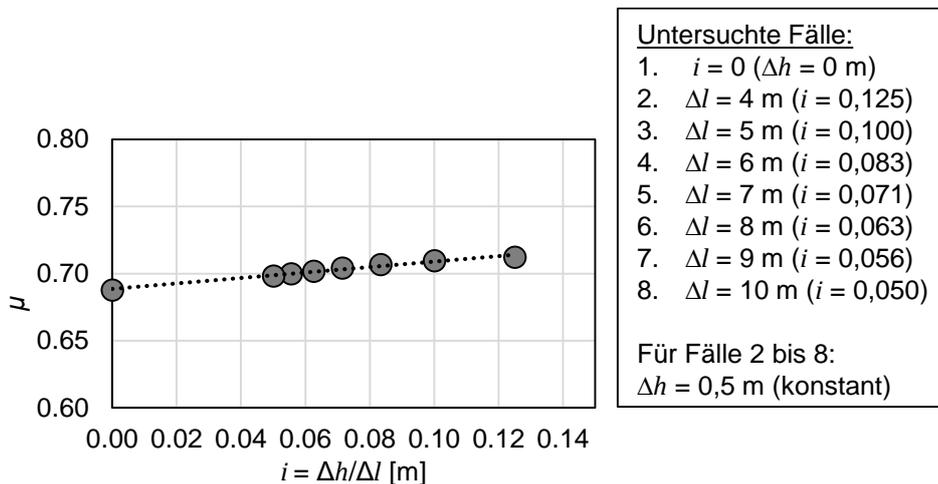


Abbildung 6.21: Variation des hydraulischen Gradienten in der Böschung

6.5.2.8 Zusammenfassung Sensitivitätsanalyse

Folgende Punkte können zusammenfassend aus der numerischen Sensitivitätsanalyse festgehalten werden:

- Wasserstände in Höhe der halben Böschungshöhe stellen den ungünstigsten Fall dar. Derartige Zwischenzustände sind insbesondere bei Flutung Gruben oder bei großen Grundwasserstandsschwankungen zu beachten.
- Ein Aufstau des Grundwassers sollte grundsätzlich bei Auffüllungen bei Nachnutzung mit mittlerer oder hoher Sensitivität in den Standsicherheitsbetrachtungen mitberücksichtigt werden. Angekippte Böschungen sollten u. U. kontrolliert eingebaut werden (siehe dazu Kapitel 9 und 10).
- Auf Schwächezonen insbesondere im Bereich des Böschungsfußes, die häufig an Schichtgrenzen beim Übergang von bindigen zu nichtbindigen Böden oder in bindigen Schichten auftreten, muss besonders im Rahmen der Erkundung und Kategorisierung der Böschungen geachtet werden.
- Tendenziell treten in kohäsiven Böden tiefer in die Böschungsschulter eingreifende maßgebende Bruchmechanismen ein. Somit sind in diesen Fällen größere Sicherheitsabstände festzulegen.
- Eine Variation der Bodenwichte im Rahmen üblicher Erfahrungswerte hat nur geringen Einfluss auf die Böschungsstandsicherheit.
- Der hydraulische Gradient hat bei Variation im üblichen Erfahrungswertebereich nur einen geringen Einfluss auf die Böschungsstandsicherheit. Dies setzt grundsätzlich geringe Grundwasserstandsschwankungen voraus.

6.6 Böschungen in bindigem Baugrund

Im Rahmen der Beispielprojektauswertung zur Überprüfung des Kriterienkatalogs und der Checkliste zur Einteilung der Gruben in Böschungskategorien (BöK 1, 2, 3) wurde eine Tongrube im Raum Moosburg untersucht. Die Grube war deswegen von Interesse, da sie über dem Grundwasser liegt – der Abbau also im Trockenen geschieht – und während des Abbaus eine großflächige Böschungsrutschung auftrat (siehe Abbildung 6.22). Die Grube wird im Endzustand wieder vollständig verfüllt sein. Es ist also ein Beispiel, das eigentlich für das Forschungsprojekt nicht relevant ist, da nur Endzustände von geböschten Gruben beurteilt werden sollen. Dennoch kann es als Beispiel für andere Tongruben dienen, die eventuell nicht wieder verfüllt werden und in denen ähnlich Randbedingungen angetroffen werden.



Abbildung 6.22: Böschungsrutschung in der Tongrube

Bei der Ortsbegehung der Grube und auf Hinweis des Betreibers konnte festgestellt werden, dass die Böschung auf einer klaren und gut erkennbaren Gleitschicht abrutscht (siehe Abbildung 6.23 links). Dabei entsteht durch den Rutschvorgang eine Art Harnischfläche, die sich durch eine stark reduzierte Scherfestigkeit auszeichnet. Ähnliche Flächen konnten im Rutschkörper selber ebenfalls festgestellt werden (siehe Abbildung 6.23 rechts).

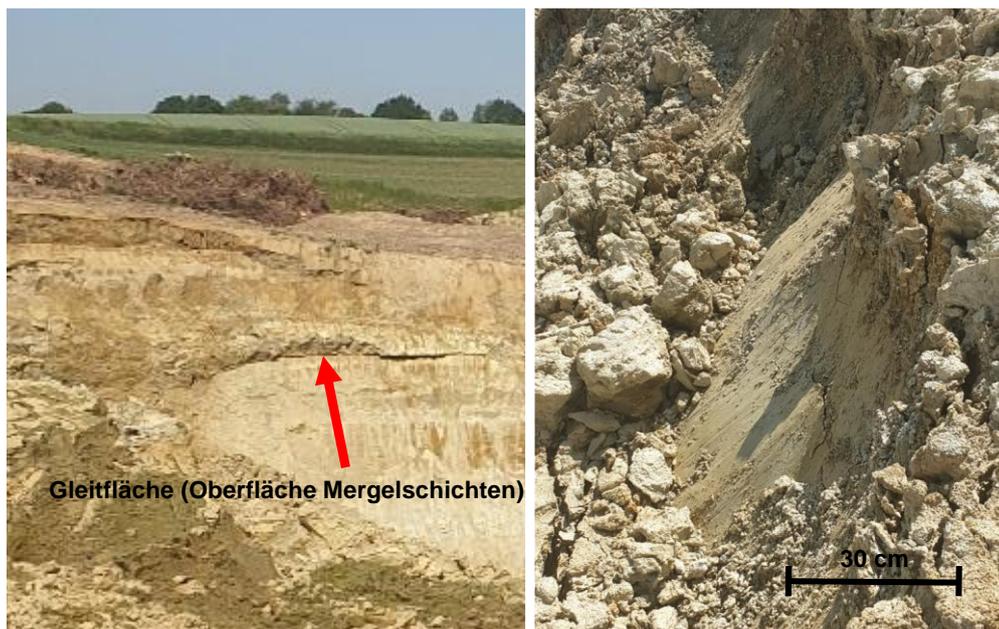


Abbildung 6.23: Gleitfläche auf der es zur Rutschung kam (links), sichtbare Harnischflächen im Böschungsbruch (rechts)

Um nachvollziehen zu können wie es zu der Rutschung kam, wurden die vorhandenen Baugrundaufschlüsse, die ursprünglich zu Erkundung der Lagerstätte ausgeführt wurden, ausgewertet. Es handelt sich dabei um Schneckenbohrungen, auf deren Basis die Bodenschichten angesprochen wurden. Es standen insgesamt vier Bohrungen zu Verfügung, deren Lage in Abbildung 6.24 eingetragen ist. Außerdem ist der Bereich eingetragen, in dem die Rutschung stattfand.



Abbildung 6.24: Topographische Karte der Grube mit Lage der Bohrpunkte sowie Rutschung und für Modell gewähltem Schnitt durch den Baugrund

Zur näheren Analyse wurden die Anspracheergebnisse der Bohrungen 321 und 519 herangezogen. Bohrung 321 wurde bis in 14 m unter GOF und Bohrung 519 bis 27 m unter GOF abgeteuft. In den Bohrungen (siehe Tabelle 6.3) wurden im oberen Bereich vorwiegend Sande und Kiese mit unterschiedlich hohen Feinkornanteilen (sandiger Kies, Sand, „klebriger“ Sand) angesprochen. Darunter steht Mergel bzw. Ton an, der als Mergel blau, Kalkmergel, Ton blau oder Mergel angesprochen wurde.

Im Bereich von im Feld festgestellten Gleitschichten im Rutschkörper (siehe Abbildung 6.23 rechts) wurden Eimerproben entnommen. Diese wurden im Labor mittels Beurteilung nach DIN EN ISO 14688-1, Sedimentationsanalyse nach DIN 17892-4 und der Bestimmung der Zustandsgrenzen nach DIN EN ISO 17892-12 näher analysiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.25 und Tabelle 6.4 zusammengefasst. Der Boden entnommen im Bereich der Gleitschicht wurde nach DIN 18196 als ausgeprägt plastischer Ton (TA) angesprochen.

Tabelle 6.3: Bodenansprachen in Schneckenbohrungen 519 und 321 aus Lagerstettenerkundung

Bohrung 519		Bohrung 321	
Teufe [m]	Ansprache	Teufe [m]	Ansprache
0,3	Humus	5	sandiger Kies
1,5	klebriger Sand	5,6	Sand
20	Mergel	10,6	klebriger Sand
21,3	Mergel blau	11	Ton blau
22,8	Mergel blau	13	Mergel blau
24,3	Mergel blau	13,5	Ton blau
24,8	Mergel blau	14	Mergel
25,6	Mergel blau		
25,8	Kalkmergel		
26,6	Mergel blau		
27,6	Mergel		

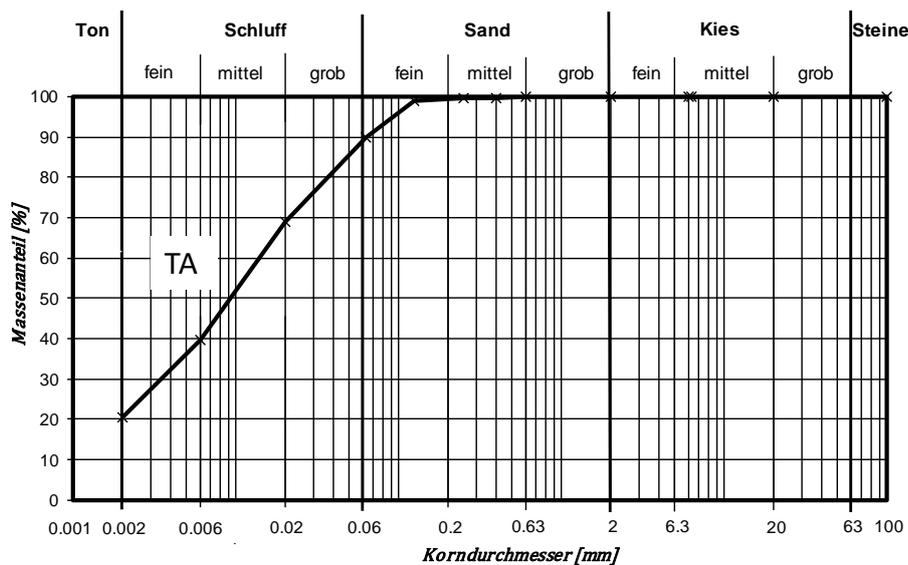


Abbildung 6.25: Kornverteilung einer Bodenprobe entnommen im Bereich der Gleitfläche

Tabelle 6.4: Zustandsgrenzen nach DIN 18122 Blatt 1

Wassergehalt w [%]	9,2
Fließgrenze w_L [%]	58,9
Ausrollgrenze w_P [%]	19,8
Plastizitätszahl I_p	39,1
Konsistenzzahl I_c	1,27

⇒ ausgeprägt plastischer Ton (TA) nach DIN 18196

Zur Ermittlung der Scherparameter im Bereich der Mergel und Tonschichten wurde ein konsolidierter undrainierter Triaxialversuch durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.26 dargestellt. Die Scherparameter wurden zu $\varphi' = 17,8^\circ$ und $c' = 26,3 \text{ kN/m}^2$ bestimmt.

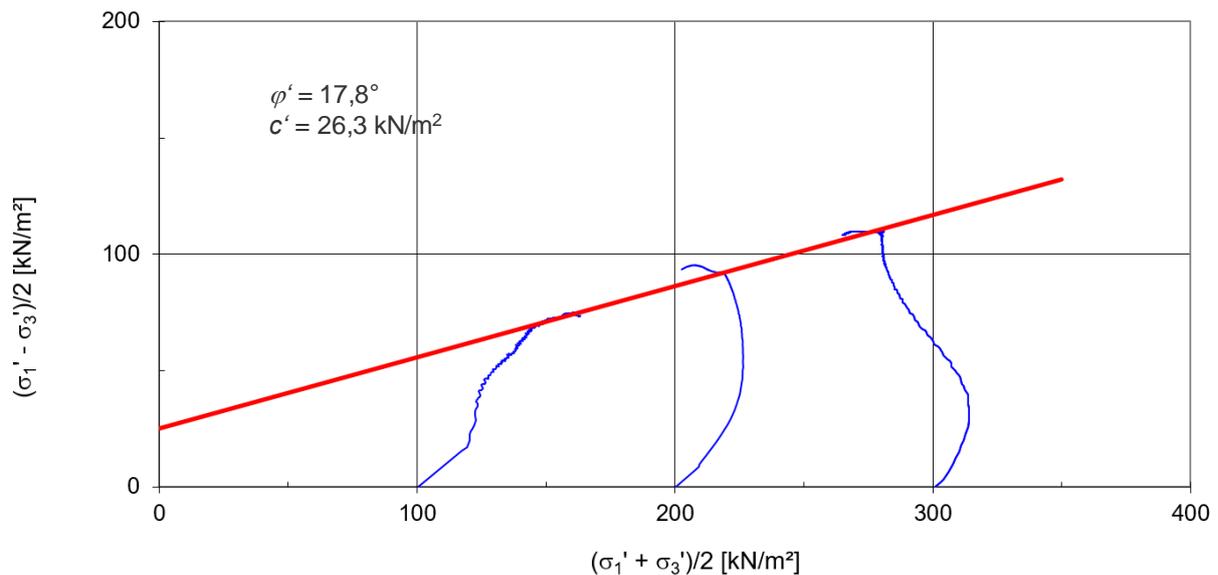


Abbildung 6.26: Ergebnis des undrainierten konsolidierten Triaxialversuchs (CU-Versuch) an entnommener Eimerprobe

Der auf Basis der Ortbegehung und den Baugrundaufschlüssen vermutete Mechanismus, der zur Rutschung führte, ist das Gleiten auf der obersten Mergelschicht, die durch eingesickertes Regenwasser aus den darüber liegenden Sandschichten aufgeweicht war. Die Vermutung ist, dass es durch den hohen Wassergehalt bei entzogener horizontaler Stützung durch Herstellung der Böschung temporär zu undrainierten Verhältnissen kam, die zu einer Reduktion der Scherparameter führten. Durch den dadurch ausgelösten Rutschvorgang, entstand im Bereich der obersten Mergelschicht die Gleitschicht (Harnischfläche), die selbst unter drainierten Bedingung sehr geringe Scherparameter aufweist.

Um den Mechanismus nachzuvollziehen, wurde eine Berechnung mit der Software Limit State Geo durchgeführt. Die auf Basis der Feldbegehung, von Laborversuchen und Erfahrungswerten angenommene Geometrie und Scherparameter sind in Abbildung 6.27 dargestellt. Das Baugrundprofil wurde auf Basis der Bohrungen 519 und 321 angenommen und ergab, dass die Mergelschicht in Richtung der Böschung mit ca. 10° einfällt. Zur Wiedergabe der undrainierten Verhältnisse im Bereich der obersten Mergelschicht wurde hier der Reibungswinkel zu null gesetzt und eine undrainierte Kohäsion von $c_u = 12 \text{ kN/m}^2$ angesetzt.

Das Berechnungsergebnis unter Zugrundelegung von charakteristischen Kennwerten ist in Abbildung 6.28 dargestellt. Der Ausnutzungsgrad liegt mit $\mu = 1,24$ deutlich über eins, sprich die Böschung versagt. Der Versagensmechanismus geht entlang der obersten Mergelschicht, wie es auch im Feld beobachtet wurde. Auch die im Feld beobachteten schollenartigen Brüche im Rutschkörper können mit Limit State Geo nachvollzogen werden.

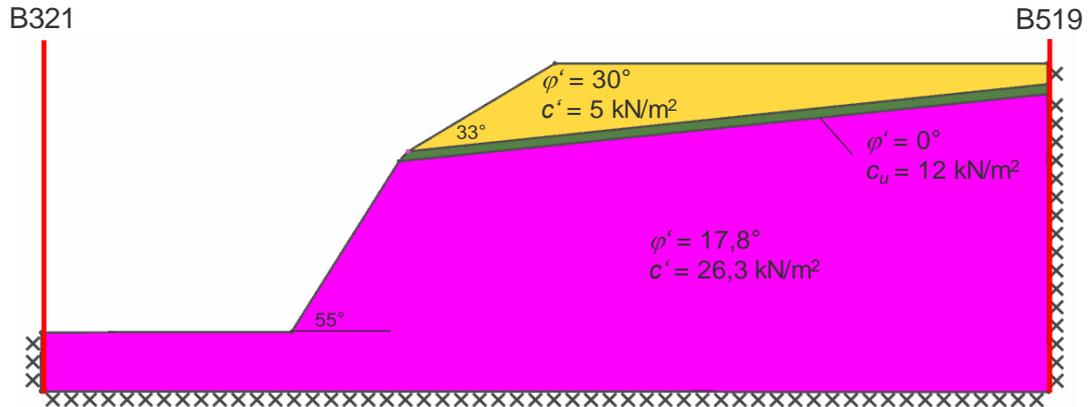


Abbildung 6.27: Angenommene Böschungsgeometrie und Scherparameter

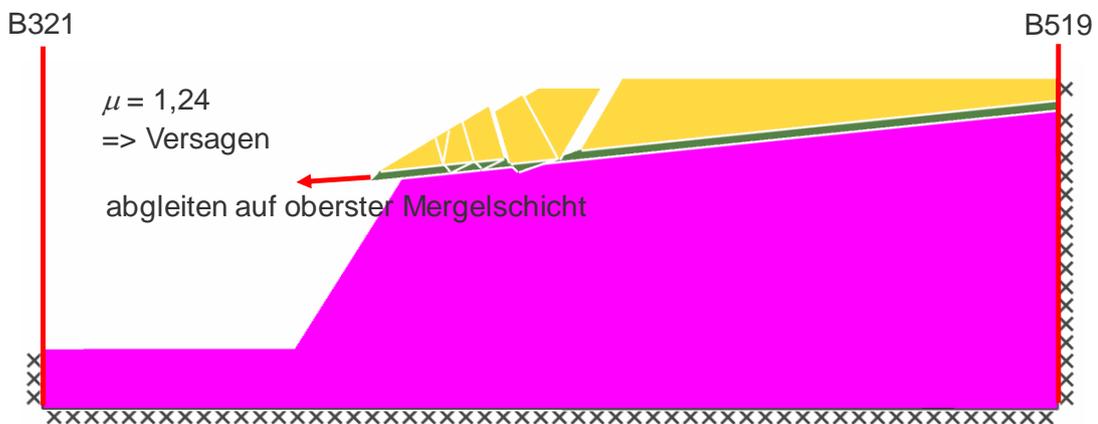


Abbildung 6.28: Berechnungsergebnis unter Annahme charakteristischer Kennwerte

Die Fallstudie zeigt, dass bei Böschungen in bindigem Untergrund oder bei Schichtwechseln von bindigen zu nichtbindigen Böden besondere Aufmerksamkeit geboten ist. Bei derartigen Untergrundverhältnissen ist es daher in der Regel geboten die Böschungen die Böschungskategorie BK2 oder BK3 einzustufen (siehe Kapitel 7).

6.7 Unterwasserböschungen

Unterwasserböschungen stellen eine sehr häufige Böschungsart in Gruben dar, da eine Vielzahl von insbesondere Kies- und Sandgewinnungen bis unter das Grundwasser reichen und somit Baggerseen entstehen. Die Bemessung von Unterwasserböschungen kann in der Regel nicht nach bekannten Bemessungsverfahren erfolgen, wie in Kapitel 5.3 näher erläutert wurde. Zum aktuellen Zeitpunkt ist man daher auf empirische Bemessungsverfahren und Erfahrungswerte bei der Bemessung der Unterwasserböschungen angewiesen. Im Folgenden werden Bemessungsverfahren in Abhängigkeit von der Einstufung in eine der drei Böschungskategorien BK1, 2 oder 3 vorgeschlagen.

6.7.1 Erfahrungswerte

Eine Auflistung von Erfahrungswerten für die Generalneigung von Unterwasserböschungen und der Wasserwechselzone kann Tabelle 5.4 und Tabelle 5.5 entnommen werden. Diese sollten insbesondere zur Verifizierung der bei einer Bemessung ermittelten Neigungswerte herangezogen werden.

6.7.2 Bemessungsverfahren

Bei der Bemessung wird die Unterwasserböschung in die drei in Kapitel 5.3 erläuterten Bereiche Unterwasserböschung, Wasserwechselzone und Berme unterteilt. Die jeweiligen Bereiche werden je nach Böschungskategorie Bök unterschiedlich bemessen.

Unterwasserböschung:

BK1:

Die Bemessung in der BK1 kann anhand von tabellierten Erfahrungswerten erfolgen (siehe Tabelle 6.5 und Tabelle 6.6). Die Werte in Tabelle 6.5 sind für Böschungen in gewachsenem Lockergestein bei kontrolliertem Abbau und wurden anhand der Untergrenze der nach BODE (2005) zulässigen Böschungsneigungen bei kontrollierter Abbaumethode abgeleitet. Die Werte aus Tabelle 6.6 gelten für gekippte oder unkontrolliert abgebaute Böschungen und wurden anhand von konservativ gewählten Erfahrungswerten der Reibungswinkel der jeweiligen Bodenart und dem Ansatz der böschungsparellen Strömung nach Formel (8) ermittelt.

Tabelle 6.5: Grenzwerte der Generalneigung in gewachsenem Lockergestein und bei kontrollierter Abbaumethode *

Bodenart	H:L	β [°]
Kies	1:2,4	23
Kies - Sand	1:2,7	20
Sand	1:3,1	18

* für Böschungen in bindigen gewachsenen Böden werde keine Erfahrungswerte angegeben, da bei vorwiegend bindigen Böden die Böschung in BK2 oder 3 eingeteilt werden muss.

Tabelle 6.6: Grenzwerte der Generalneigung in gekipptem Lockergestein oder bei unkontrollierter Abbaumethode

Bodenart	H:L	β [°]
Kies	1:3,1	18
Kies - Sand	1:3,5	16
Sand	1:4,0	14
Bindige Böden	1:7,0	8

BK2 und BK3:

Bei einer Kategorisierung in BK2 oder 3 kann die Bemessung der Unterwasserböschung folgendermaßen erfolgen:

- Unkontrollierte Abbaungsweise bzw. gekippte Böschungen: Ansatz der böschungsp parallelen Strömung nach Formel (8).
- Kontrollierte Abbaungsweise im gewachsenen Lockergestein: Ansatz nach BODE (2005)

$$\beta_{erf} = \arctan \left(\eta_{tab} \cdot \alpha_{dyn} \cdot \tan \frac{\varphi'}{\gamma_{\varphi}} \right) [^{\circ}] \quad (13)$$

mit $\gamma_{\varphi} = 1,10$, η_{tab} dem Sicherheitsbeiwert nach Bodenart und Grundwassergefälle (siehe Anhang A.2) und α_{dyn} dem Beiwert für die Baggerung (0,70 für Box-Cut Baggerung nicht zwangsgeführt, 0,8 für Box-Cut Baggerung zwangsgeführt und 0,9 für profilgerechte Baggerung).

Wasserwechselzone

Die Generalneigung der Wasserwechselzone kann in allen geotechnischen Kategorien nach Tabelle 6.7 festgelegt werden.

Tabelle 6.7: Empfehlungen für Generalneigungen der Wasserwechselzone in Abhängigkeit von der Bodenart (BODE, 2005)

Bodenart	H:L	$\beta [^{\circ}]$
Kies	1:5	11,3
Kies - Sand	1:6	9,5
Sand	1:8	7,1

In BK1 kann die Breite der Wasserwechselzone abgeschätzt werden zu

$$b_{erf} = \frac{1}{n} (HW - NW) [m] \quad (14)$$

mit $n = H:L$, HW dem Hochwasserstand und NW dem Niedrigwasserstand. HW und NW sind aus den üblichen jährlichen Grundwasserstandsschwankungen zu ermitteln.

Die notwendige Breite der Wasserwechselzone kann in BK2 und 3 abgeschätzt werden über

$$b_{erf} = \frac{1}{n} \left(HW + z_{98} - NW + \frac{H_s}{2} \right) [m] \quad (15)$$

mit H_s der signifikanten Wellenhöhe (i.d.R. $\leq 0,5$ m) und z_{98} der Wellenaufbauhöhe mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 2%:

$$z_{98} = 3,2 \cdot \gamma_f \cdot H_s [-] \quad (16)$$

mit γ_f einem empirischen Beiwert für die Böschungsrauhheit nach Tabelle 6.8.

Tabelle 6.8: Empirischer Beiwert für die Böschungsrauheit γ (BODE, 2005, Tabelle 5)

	γ
Asphaltbeton	1,00
Glatte und geschlossene Pflasterung	1,00
Gras	0,90 – 1,00
Deckwerk (Basalt)	0,90
Vergossenes Schüttsteindeckwerk	0,75
Blöcke	0,75
Schüttsteine	0,60

Sicherheitsabstand

In BK1 kann der notwendige Sicherheitsabstand pauschal zu 5 m angenommen werden.

In BK2 und BK3 kann der Sicherheitsabstand unter Berücksichtigung von Baggertoleranzen aus Anhang A.3 abgeschätzt werden. Bei Erdbebenbeanspruchungen oder einer möglichen Bodenverflüssigung sind die Breiten durch einen geotechnischen Sachverständigen festzulegen.

6.7.3 Seegrundvermessungen im Raum München

6.7.3.1 Charakteristika der vermessenen Seen

Ende Oktober 2019 wurden im Rahmen des Forschungsprojekts mehrere Baggerseen im Nordwesten von München mit Hilfe einer Echolotmessung vermessen. Es handelt sich um insgesamt 6 Seen, die alle in der Münchener Schotterebene liegen und in denen Kies und Sand mit unterschiedlichen Abbaumethoden gewonnen wird. Ziel war es, den Einfluss unterschiedlicher Abbaumethoden und der nachträglichen Böschungsgestaltung durch Anschüttung auf die sich einstellende Böschungsneigung zu untersuchen. Die geologischen Randbedingungen der Gruben waren in etwa vergleichbar. Die anstehenden Böden können als sandige Kiese mit teilweise starken bindigen Anteilen (bis zu 40 Masse-%) beschrieben werden.

Die Vermessung der Seen erfolgte mit einem sogenannten Fächerecholot, womit der Seegrund mit einer sehr hohen Ortsauflösung abgebildet werden kann. So kann eine nahezu flächendeckende Abtastung des Seegrunds erreicht werden. Das ausführende Vermessungsbüro gibt die Genauigkeit der Tiefenmessungen mit 0,02 m bei 10 m Wassertiefe bzw. 0,2 m bei 100 m Wassertiefe an. Die vermessenen Seen haben Tiefen zwischen 6 m und 12 m. Daher ist von einer Genauigkeit von 0,02 m auszugehen. Die gewonnenen Daten wurden hinsichtlich der Böschungsneigungen und des morphologischen Bildes des Seegrunds ausgewertet. Die morphologische Auswertung sollte Rückschlüsse auf Einflüsse der Abbaumethode ermöglichen. Die Auswertung der Böschungsneigung erfolgte auf Basis von Höhenlinien, die mit Hilfe eines mit Triangulation mit linearer Interpolation erstellten Netzes berechnet wurden. Diese Interpolationsmethode wird dann empfohlen, wenn man gleichmäßig über den Vermessungsbereich verteilte Vermessungspunkte hat. Die Punktedichte bei der Vermessung betrug in etwa 4 Messpunkten pro Quadratmeter vermessener Wasserfläche.

Tabelle 6.9 listet die vermessenen Seen mit Fläche, ungefähre Tiefe, Abbaumethode etc. auf. Die Abbaumethoden mittels Schwimmgreifer, Schürfkübel und Saugbagger werden den sogenannten unkontrollierten Abbaumethoden zugewiesen, während der Abbau mittels Eimerkettenbagger als kontrolliert eingestuft wird (siehe Kapitel 5.4).

Tabelle 6.9: Vermessene Seen

Standort	See	Fläche ca. [ha]	Tiefe ca. [m]	in Betrieb	Abbaumethode
Pliening (Gerharding)	See 1	10	10	nein, Anschüttung südliche Böschung	Schwimmgreifer
Pliening (Gerharding)	See 2	5	8	nein	Schwimmgreifer
Berglern	See 8 nord	2,2	9	nein	Schürfkübel
Berglern	See 8 süd	2,8	6	ja	Schürfkübel
Berglern	See 12	7,2	10-12	nein	Saugbagger, teilweise Schürfkübel
Eichenkofen	-	12,8	9-10	nein, Anschüttung nördliche Böschung	Eimerkettenbagger, teilweise Schürfkübel

Um die Entwicklung der Böschungsneigung nachzuvollziehen, ist insbesondere der zeitliche Verlauf der Rohstoffgewinnung und der erfolgten Anschüttung wichtig. Dazu wurden Satellitenaufnahmen und Informationen, die von den Betreibern zur Verfügung gestellt wurden, ausgewertet. In Abbildung 6.29, Abbildung 6.35, Abbildung 6.38 und Abbildung 6.41 sind die jeweiligen Entwicklungen der Seen abgebildet. Die angegebenen Jahreszahlen geben Zeiträume oder Zustände zum Datum des ausgewerteten Satellitenbildes an. Neben dem Abbau wurden auch Auffüllungen, die an den Böschungen durchgeführt wurden, eingetragen und zeitlich nachvollzogen. Bei den Auffüllungen wurde zudem unterschieden, ob sie mit Eigenmaterial, also mit Material aus derselben Kiesgrube, oder mit Fremdmaterial (beispielsweise Baugrubenaushub) hergestellt wurden. Das Material der Auffüllungen hat einen starken Einfluss auf die sich einstellende Böschungsneigung. Auffüllungen aus Fremdmaterial zeichnen sich dabei durch eine hohe Heterogenität in der Zusammensetzung und einen hohen Feinkornanteil aus, da dies Böden sind, die häufig nicht bei Baumaßnahmen weiterverwendet werden können.

Im Folgenden werden die Vermessungen je nach Standort getrennt ausgewertet. Für alle Standorte befinden sich zusätzlich zu den im Folgenden gezeigten Abbildungen jeweils eine Darstellung der Topographie des Seegrunds in Form von Höhenlinienkarten, eine Auswertung der Geländeneigung als Kontourdarstellung, die Auswertungen von ausgewählten Schnitten durch die Grubenböschungen und eine Kontourdarstellung der Generalneigung der Grubenböschungen in Anhang A.7.

6.7.3.2 Fa. Ebenhöf, Standort Pliening (Gerharding)

Abbildung 6.29 zeigt den zeitlichen Verlauf der Rohstoffgewinnung und Auffüllung am Standort Gerharding. Dort werden sandige Kiese mit teils starken Feinkornanteilen (> 15m.-%) gewonnen. Der Abbau erfolgt mit Hilfe eines Schwimmbaggers in sogenannter unkontrollierter Weise. Die ersten zur Verfügung stehenden Informationen zum Abbau stammen aus dem Jahr 2001. Die Seen 1 und 2 wurden im Zeitraum 2001 bis April 2018 abgebaut. Der See 2 wurde durch eine Anschüttung von Eigenmaterial im Zeitraum 2011 bis 2015 vom See 1 getrennt. Ab ca. 2015 waren die beiden Seen dann vollständig durch eine Anschüttung voneinander getrennt. Das südliche Ufer des Sees 1 wird aktuell weiterhin angekippt. Die Anschüttung begann hier im März 2018 und hatte zum Zeitpunkt der Vermessung die südöstliche Ecke des Sees erreicht. Diese Anschüttung wird mit Fremdmaterial aus der näheren Umgebung hergestellt. Es handelt sich dabei um Aushübe mit sehr unterschiedlichen Zusammensetzungen und tendenziell hohen Feinkornanteilen (> 40 Masse-%) (siehe Abbildung 6.30).

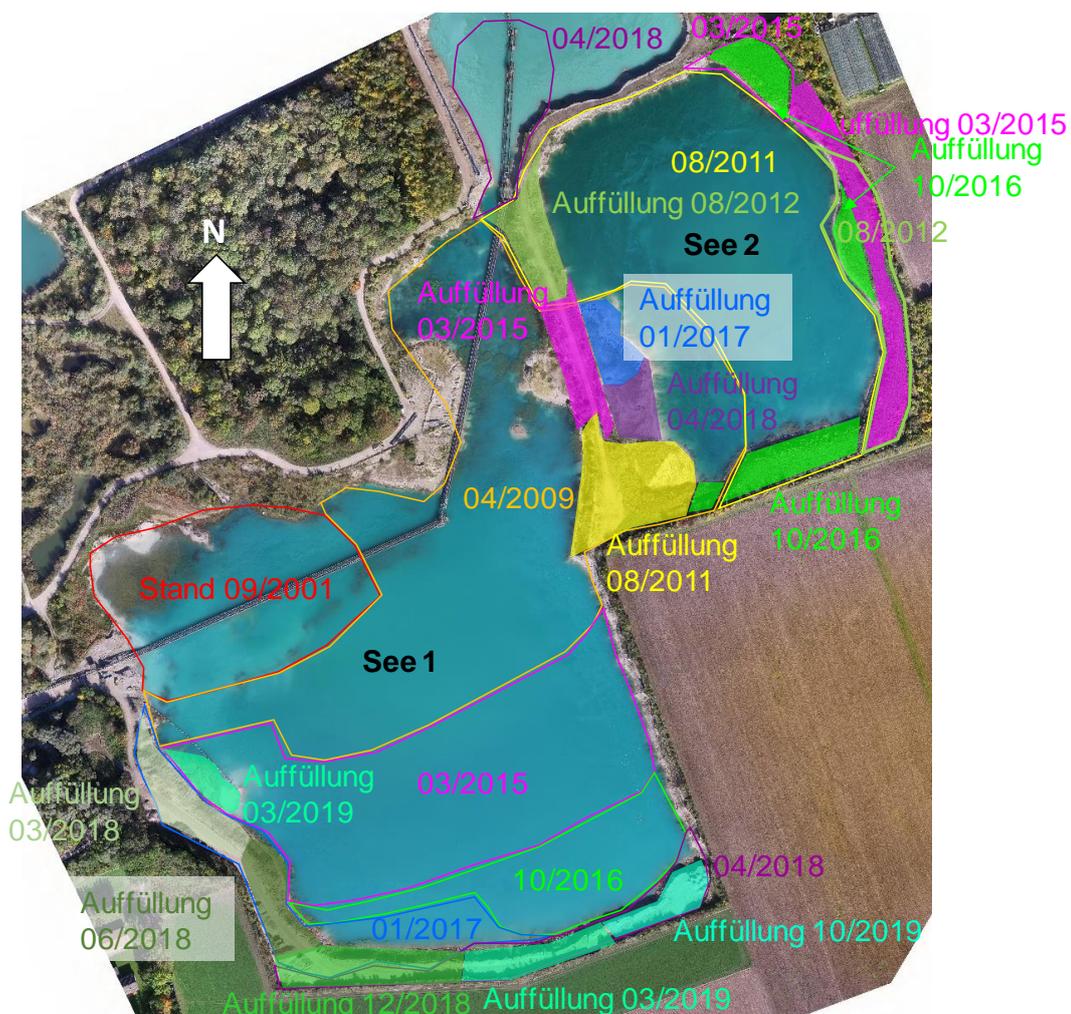


Abbildung 6.29: Zeitlicher Verlauf der Rohstoffgewinnung und Auffüllung, Fa. Ebenhöf, Gerharding



Abbildung 6.30: Anschüttung mit Fremdmaterial an südlicher Böschung

Bei See 2 wurden alle Böschungen bis auf die nördliche durch Ankippen mit Eigenmaterial hergestellt. Die letzten Auffüllungen wurden hier im Jahr 2016 an der südlichen und östlichen Böschung hergestellt.

Während des Abbaus entstehen kurzfristig sehr steile (70° bis 90°) Böschungen, die sich mit der Zeit auf Neigungen von ca. 26° bis 30° abflachen (siehe Abbildung 6.31). Die Auffüllungen wurden durch Einschleppen des Schüttgutes mit Hilfe einer Raupe oder eines Frontladers in den See hergestellt. Dabei entstehen Böschungen, die auch kurzfristig relativ steil ($> 30^\circ$) sein können, sich in der Folge aber sehr stark auf Neigungen von ca. 10° bis 14° abflachen.



Abbildung 6.31: Foto Standort Gerharding, steile Abbauböschung

Abbildung 6.32 zusammen mit Abbildung A. 8.3 und Abbildung A. 8.4 zeigen die Auswertung der Böschungsneigung der Unterwasserböschungen und Teilen der Uferböschung auf Basis der Vermessungsdaten. Die Neigung wird in Abbildung 6.32 als H:L-Verhältnis und im Anhang in Grad angegeben. Bereiche ohne farbliche Markierung in Abbildung 6.32 weisen eine Neigung flacher als 1:4 (14°) auf. Bereiche, die rot markiert sind, weisen eine Neigung von 1:1 (45°) oder steiler auf, wobei steilere Neigungen als 1:1 kaum festgestellt wurden. Es ist jeweils angetragen, wann

und wie die Böschung hergestellt wurde. Außerdem sind Bereiche markiert, in denen im Laufe der Zeit Feinteile aus der Kieswäsche in den See eingeleitet wurden. An Stellen, die mit „Bewuchs“ markiert sind, können die Messergebnisse durch Pflanzenbewuchs unter Wasser beeinflusst sein.

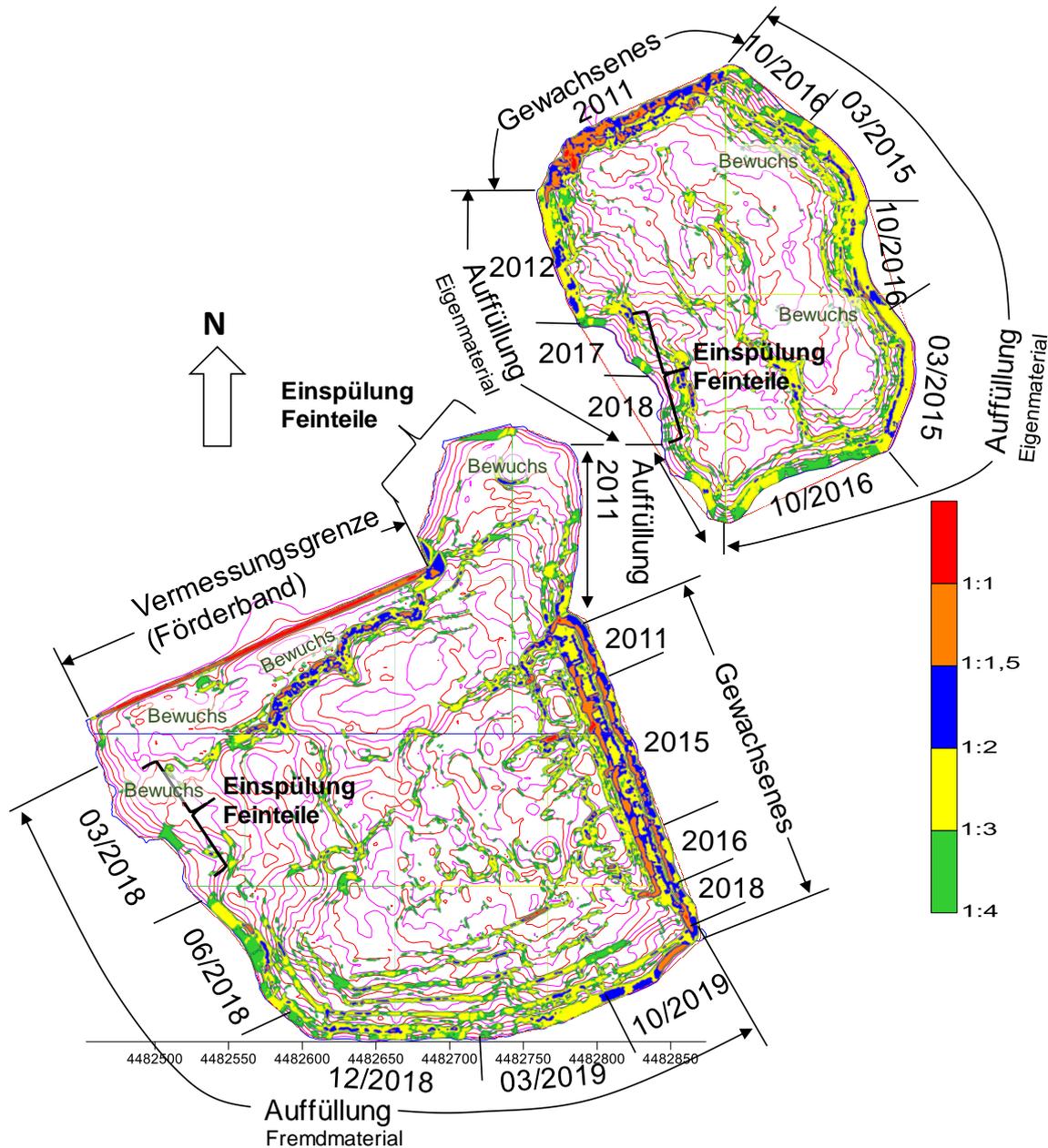


Abbildung 6.32: Seegrundvermessung, Fa. Ebenhöf Gerharding, Auswertung der Böschungsneigung unter Wasser

Grundsätzlich fällt auf, dass die Böschungen, die im gewachsenen Untergrund hergestellt wurden, wesentlich steiler sind als angekippte Böschungen. Die Böschungen im Gewachsenen am östlichen Ufer des Sees 1 und am nördlichen Ufer des Sees 2 haben Neigungen von 1:3 (18,4°),

häufig 1:2 (26,6°) oder 1:1,7 (30,5°) und stellenweise sogar 1:1 (45°) oder steiler. Diese Neigungen können, bei Beibehaltung des aktuellen Lastzustands, vielfach als stabil bewertet werden, da sie abschnittsweise bereits seit 2011 stehen und sich offensichtlich keine weitere Abflachung einstellt. In beiden Seen wurden Schnitte in gekippten Bereichen und in Böschungen ausgewertet, die im gewachsenen Boden hergestellt wurden. Die Lage der Schnitte ist in Abbildung A. 8.1 und Abbildung A. 8.2 dargestellt. Die Schnittdarstellungen finden sich in Abbildung A. 8.5, Abbildung A. 8.6, Abbildung A. 8.7 und Abbildung A. 8.8. Die Auswertungen hinsichtlich Generalneigung, minimaler / maximaler lokaler Neigung im jeweiligen Schnitt und Unterscheidung zwischen der Böschung über Wasser (ÜW) und unter Wasser (UW) sind in Abbildung 6.33 dargestellt. Die Böschungen sind nach steigendem Alter nummeriert. Bei den Böschungen im gewachsenen Boden liegen die Generalneigungen bei ca. 1:2 (24,4° bis 26,7°). Bei den gekippten Böschungen lässt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Böschungsneigungen ÜW und UW erkennen. ÜW liegen die Generalneigungen zwischen 1:2,3 und 1:1,7 (23,1° bis 30,1°) und UW zwischen 1:6,2 und 1:3,9 (9,1° bis 14,4°).

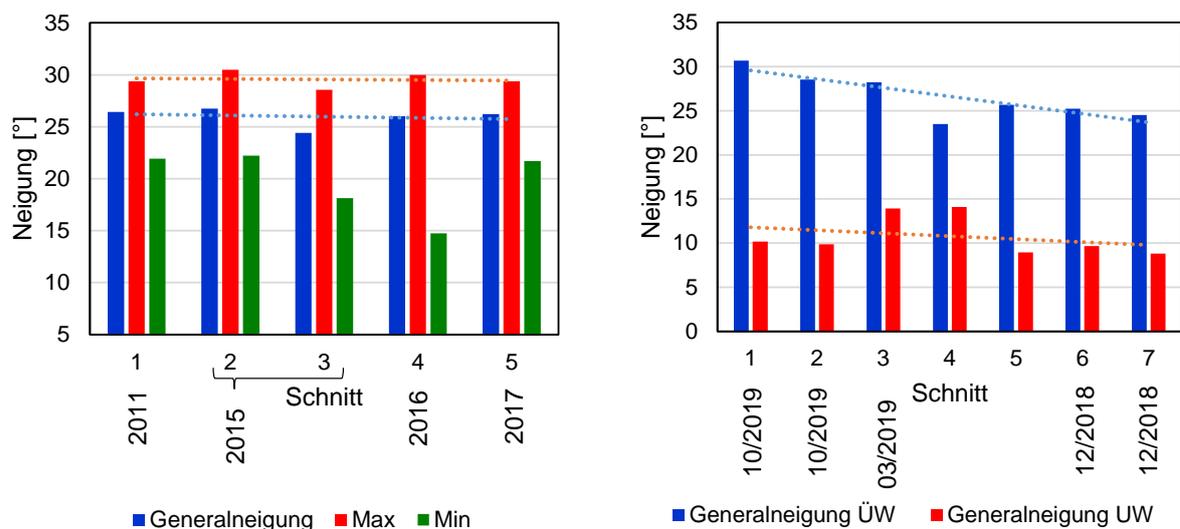


Abbildung 6.33: Links: Neigungen im gewachsenen Untergrund (östliche Böschung See 1), Rechts: Neigungen im gekippten Untergrund (südliche Böschung See 1), nach Böschungsalter aufgereiht

Böschungen, die durch Ankipptungen aus Eigenmaterial hergestellt wurden, weisen langfristig stabile Generalneigungen von 1:6 (9°) bis 1:4 (14°) auf. Lokal wurden aber auch Neigungen von 1:2 gemessen. Interessant ist die Neigungsentwicklung der südlichen Böschung des Sees 1, die im Zeitraum März 2018 bis Oktober 2019 durch Anschüttung von Fremdmaterial hergestellt wurde. In Abbildung 6.33 ist zu erkennen, wie die Generalneigung über Wasser vom älteren Teil im Westen zum jüngeren Teil im Osten zunimmt von ca. 24° auf 30°. Diese Entwicklung lässt sich für den UW-Bereich nicht feststellen. Aber auch der UW-Bereich, der im Zeitraum von März bis Oktober 2019 hergestellt wurde, zeigt lokal Neigungen von 1:2 und sogar 1:1,5 (vgl. Abbildung 6.32). Die Generalneigungen sind jedoch auch hier mit ca. 10° sehr flach (vgl. Abbildung A. 8.3 und Abbildung A. 8.6).

6.7.3.3 Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Standort Berglern, See 8

Abbildung 6.35 zeigt den zeitlichen Verlauf der Rohstoffgewinnung und Auffüllung des Sees 8 am Standort Berglern. Dort werden Kiese und Sande mit unterschiedlichen Anteilen von Feinkorn gewonnen.

Die ersten zur Verfügung stehenden Informationen zum Abbau stammen aus dem Jahr 2001. Zu diesem Zeitpunkt existierte der rot markierte Bereich der Seen. Der Abbau im nördlichen See endete 2015. Im Zeitraum zwischen April 2017 und Oktober 2019 wurden die beiden Seen durch eine Auffüllung mit Eigenmaterial voneinander getrennt. Der Abbau im südlichen See war zum Zeitpunkt der Messungen noch nicht abgeschlossen und fand im Bereich des orange markierten östlichen Ufers statt. Der Abbau im See 8 erfolgt mit Hilfe eines Wurfkübelbaggers in unkontrollierter Weise. Während des Abbaus entstehen kurzfristig sehr steile ($70^\circ - 90^\circ$) Böschungen, die sich mit der Zeit abflachen (siehe Abbildung 6.36). Die Auffüllungen wurden durch Einschieben des Schüttgutes mit Hilfe einer Raupe oder eines Frontladers in den See hergestellt.

Abbildung 6.37 zeigt die Auswertung der Böschungsneigung der Unterwasserböschungen auf Basis der Vermessungsdaten von See 8 in gleicher Weise wie vorab zum Standort Gerharding erläutert. Auch hier ist erkennbar, dass die Böschungen, die im gewachsenen Untergrund hergestellt wurden, deutlich steiler stehen, als die Böschungen die künstlich angekippt wurden (vgl. Abbildung 6.34 und Schnittlage in Abbildung A. 8.11).

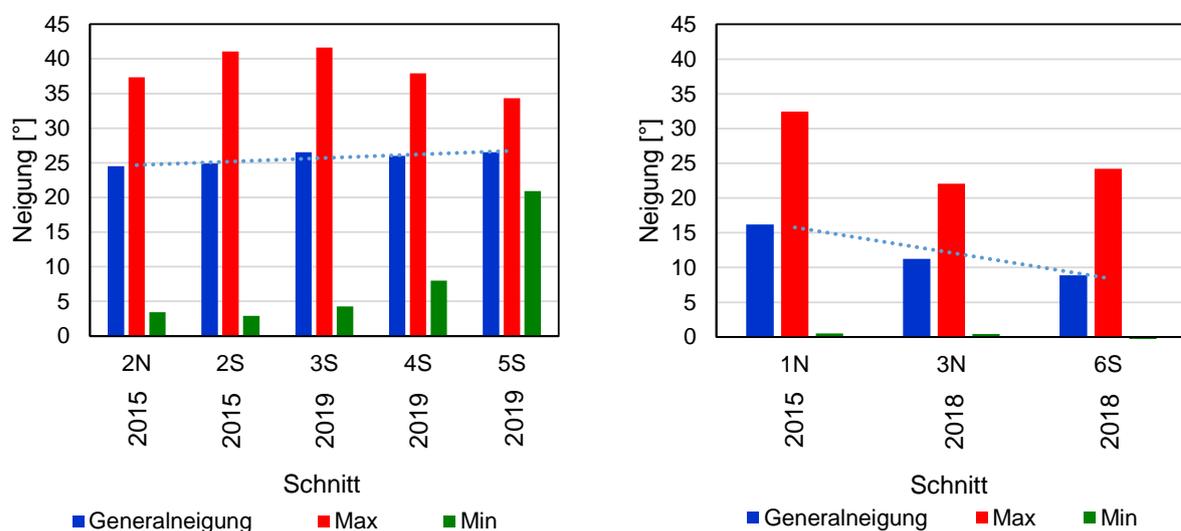


Abbildung 6.34: Links: Neigungen im gewachsenen Untergrund, Rechts: Neigungen im gekippten Untergrund, nach Böschungsalter aufgereiht

Bei den Böschungen im Gewachsenen kann festgestellt werden, dass ältere Böschungen wie die östlichen Ufer der beiden Seen, die ca. 2015 hergestellt wurden, eine etwas flachere Generalneigung (1:3, stellenweise 1:1,5) aufweisen, als die Böschungen im südlichen See (1:2, stellenweise 1:1,5), die erst im Jahr 2019 hergestellt wurden (vgl. Abbildung 6.34 und Abbildung A. 8.12).

Beide Böschungsbereiche zeigen Bänder mit einer erhöhten Neigung von ca. 1:1,5, die sich unabhängig vom Alter einstellt (vgl. Abbildung 6.37 und Abbildung A. 8.12). Dies deutet daraufhin, dass es sich um Schichten mit einer erhöhten Festigkeit, möglicherweise verstärkt bindigen Anteilen, handelt. Die angekippten Böschungen weisen Generalneigungen von 1:3,5 oder 1:6 und stellenweise flacher auf. Eine altersbedingte Neigungsentwicklung, wie am Standort Gerharding, lässt sich nicht nachvollziehen. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der zeitliche Abstand zwischen Auffüllung und Messung bereits so groß ist, dass ein Einfluss nicht mehr erkennbar ist. Relativ steil zeigt sich die Böschung in der südwestlichen Ecke des südlichen Sees, die nach den vorliegenden Informationen in einem Bereich hergestellt wurde, der im Zeitraum zwischen 2009 und 2015 verfüllt wurde. Die Neigungen entsprechen nahezu einer Böschung im Gewachsenen. Dies deutet darauf hin, dass Böschungen, die in bereits lange liegenden Auffüllungen hergestellt werden, bei ähnlichen Neigungen stabil stehen, wie Böschungen, die im Gewachsenen hergestellt werden.

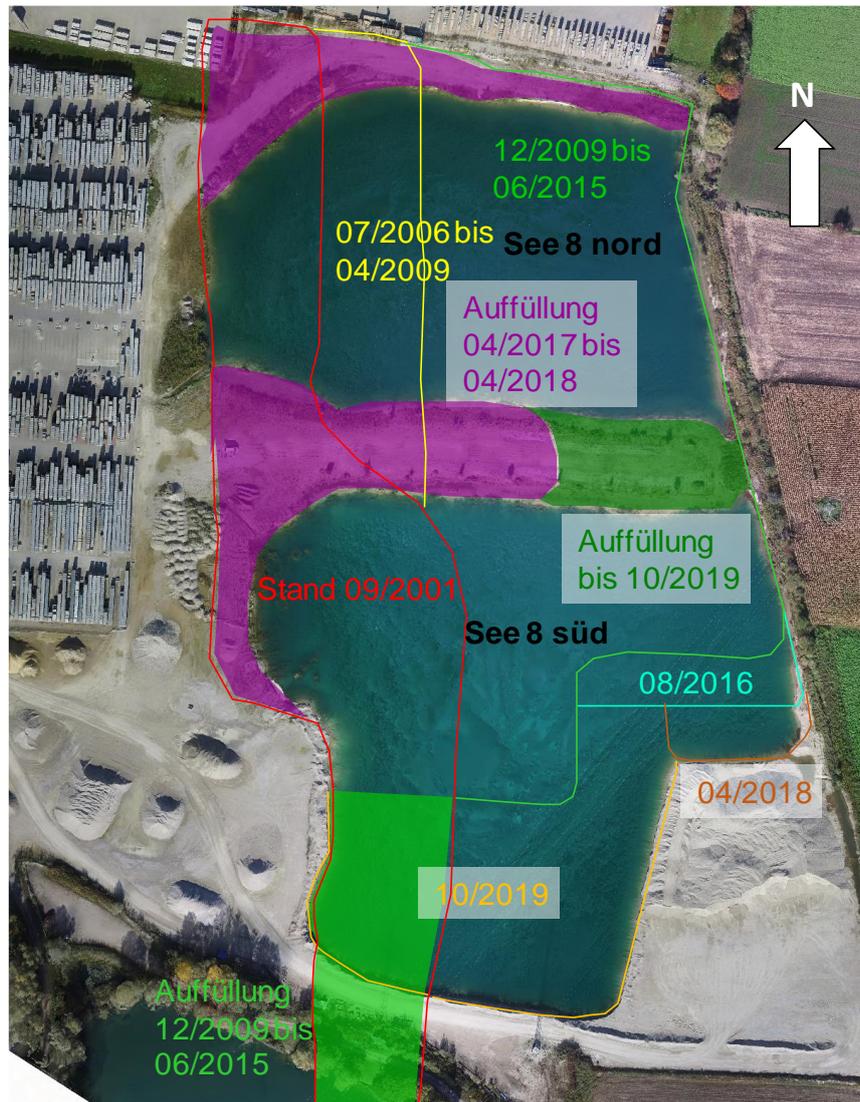


Abbildung 6.35: Zeitlicher Verlauf der Rohstoffgewinnung und Auffüllung, Fa. Rohrdorfer, Berglern See 8 (Nord und Süd)



Abbildung 6.36: Fotos aufgenommen vom südöstlichen (links) und südlichen (rechts) Ufer des Sees 8

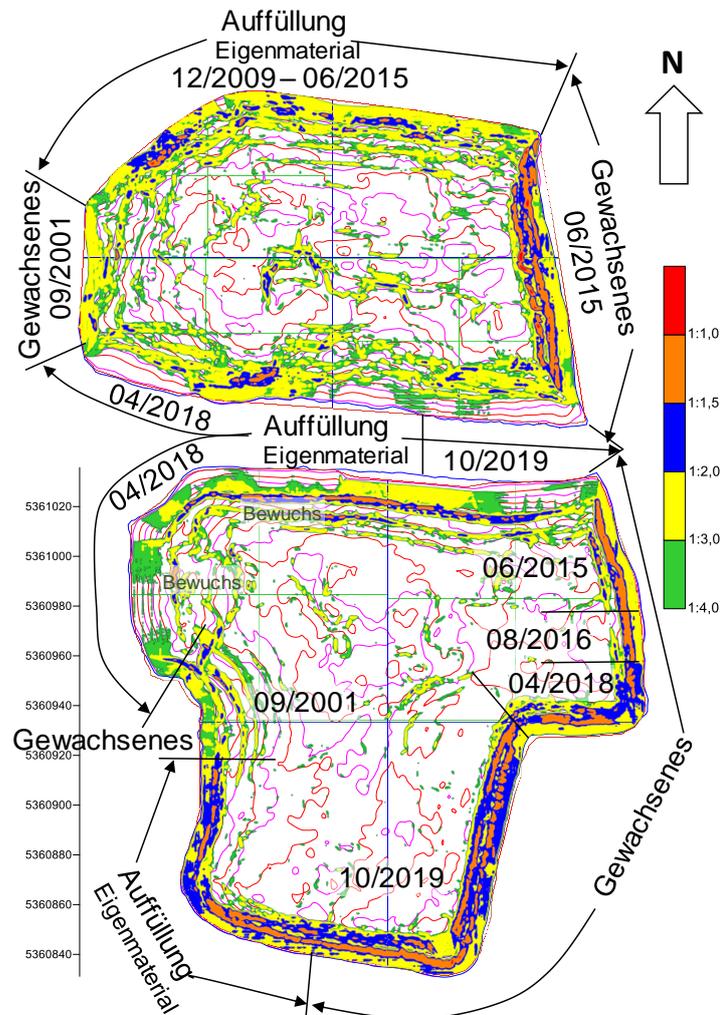


Abbildung 6.37: Seegrundvermessung, Fa. Rohrdorfer, Berglern, See 8, Auswertung der Böschungsneigung

6.7.3.4 Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Standort Berglern, See 12

Am gleichen Standort wie See 8 wurde noch ein weiterer See (See 12) vermessen. Abbildung 6.38 zeigt den zeitlichen Verlauf der Rohstoffgewinnung und Auffüllung des Sees 12. Dort wurden Kiese und Sande mit unterschiedlichen Anteilen von Feinkorn gewonnen.

Die ersten zur Verfügung stehenden Informationen zum Abbau stammen aus dem Jahr 2001. Zu diesem Zeitpunkt existierten die rot markierten Bereiche des Sees. Der Abbau endete im Jahr 2018 am südlichen Ufer des Sees. Ankippungen der Uferböschungen wurden nur in Teilbereichen des westlichen und östlichen Ufers eingebracht. Die übrigen Böschungen stehen im Gewachsenen. Der Abbau erfolgte mit Hilfe eines Saugbaggers und an vereinzelt Stellen mit einem Wurfkübelbagger.

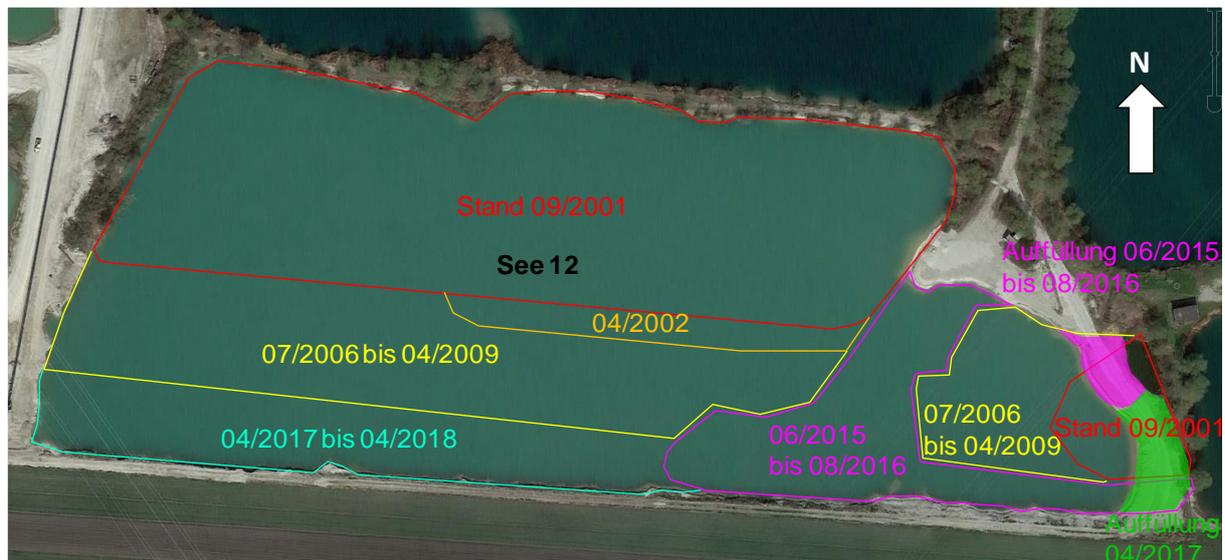


Abbildung 6.38: Zeitlicher Verlauf der Rohstoffgewinnung und Auffüllung, Fa. Rohrdorfer, Berglern See 12

Abbildung 6.40 zusammen mit Abbildung A. 8.17 zeigen die Auswertung der Böschungsneigung der Unterwasserböschungen auf Basis der Vermessungsdaten von See 12 in gleicher Weise wie vorab erläutert. Auch hier sind die Generalneigungen der Böschungen im Gewachsenen deutlich steiler als die angekippten Böschungen. Die Neigungen liegen bei den Böschungen im Gewachsenen in der Regel bei 1:2, stellenweise 1:1,5 oder 1:3. Die angekippten Böschungen haben Generalneigungen von 1:4 und 1:5, stellenweise Neigungen von 1:3. Eine Änderung der Neigungen in Abhängigkeit vom Böschungsalter lässt sich hier nicht erkennen, was auf das relativ hohe Alter der gekippten Böschungen zurückzuführen ist. Generell zeichnet sich See 12 durch eine höhere Heterogenität der Morphologie im Bereich der Böschungen und insbesondere des See-grunds im Vergleich zu See 8 oder den Seen am Standort Gerharding aus (vgl. dazu Abbildung

A. 8.17 mit Abbildung A. 8.3, Abbildung A. 8.4 und Abbildung A. 8.12). Dies ist auf den Abbau mittels Saugbagger zurückzuführen.

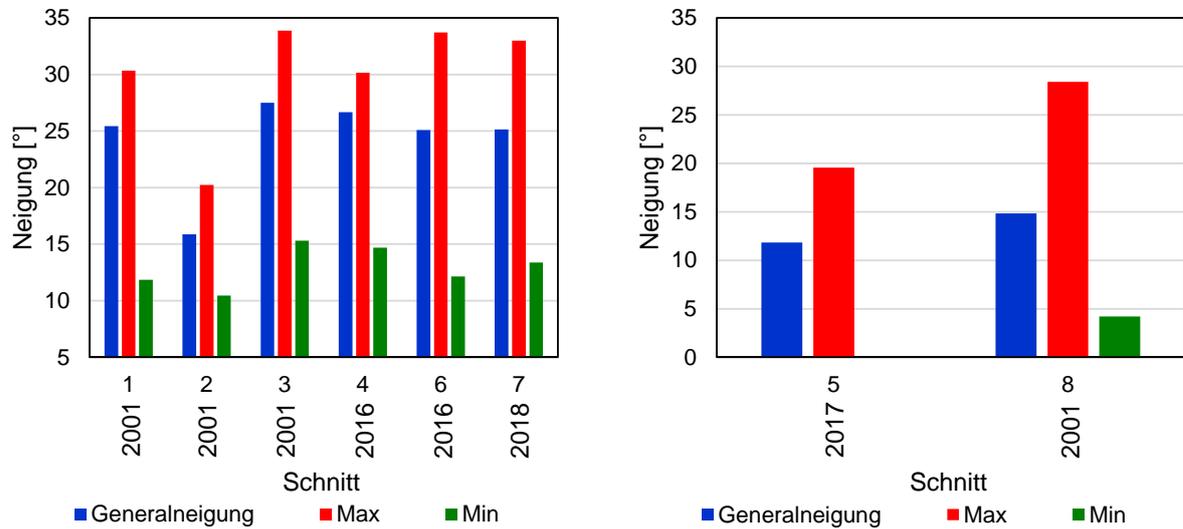


Abbildung 6.39: Links: Neigungen im gewachsenen Untergrund, Rechts: Neigungen im gekippten Untergrund, nach Böschungsalter aufgereiht

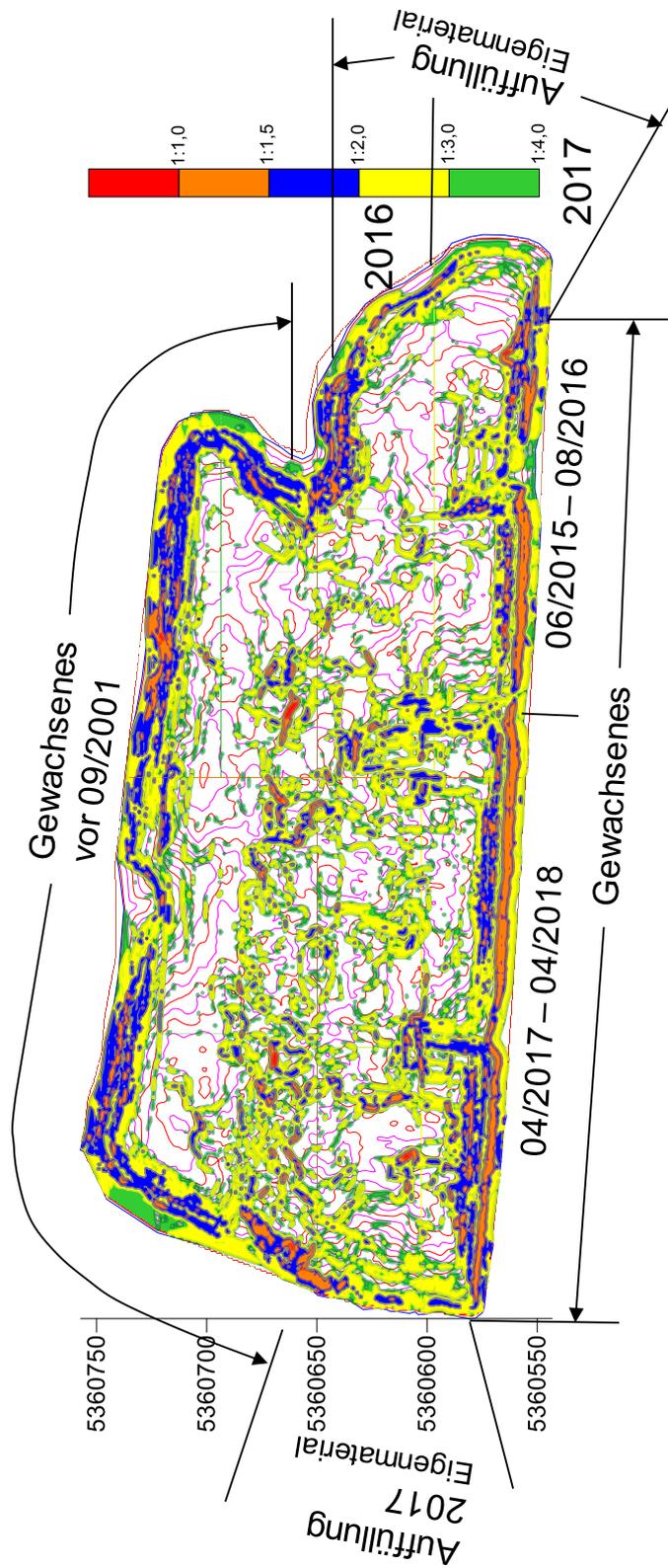


Abbildung 6.40: Seegrundvermessung, Fa. Rohrdorfer, Berglern, See12, Auswertung der Böschungsneigung

6.7.3.5 Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Standort Eichenkofen

Abbildung 6.41 zeigt den zeitlichen Verlauf der Rohstoffgewinnung und Auffüllung am Standort Eichenkofen. Dort wurden Kiese und Sande mit unterschiedlichen Anteilen von Feinkorn gewonnen.

Die ersten zur Verfügung stehenden Informationen zum Abbau stammen aus dem Jahr 2009. Zu diesem Zeitpunkt existierten die rot markierten Bereiche des Sees. Der Abbau endete im Jahr 2015 am südlichen Ufer des Sees. Auffüllungen wurden danach weiterhin eingebracht. Insbesondere am nördlichen Ufer wurden noch im Laufe des Jahres 2019 Auffüllungen eingebracht. Die Auffüllungen bestehen aus Eigenmaterial vom Standort. Der Abbau erfolgte hauptsächlich mittels Eimerkettenbagger in kontrollierter Weise. Dort wo sie bekannt sind, sind in Abbildung 6.41 die Abbaurichtungen des Eimerkettenbaggers eingetragen. Einzig am südlichen Ufer wurde das Material abschnittsweise mittels Wurfkübelbagger gewonnen. In der nordöstlichen Ecke des Sees ist es nach Angaben des Betreibers zu einer Rutschung der Böschung gekommen.

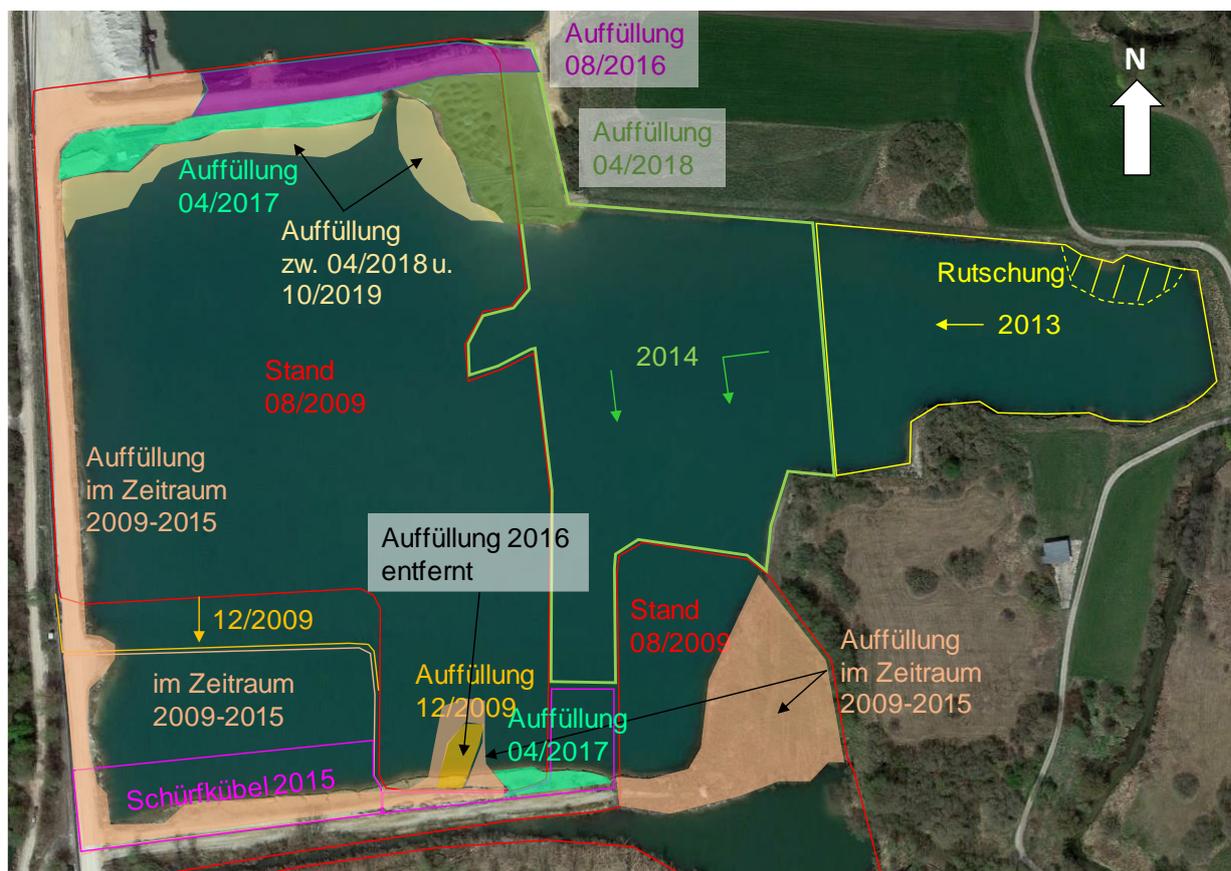


Abbildung 6.41: Zeitlicher Verlauf der Rohstoffgewinnung und Auffüllung, Fa. Rohrdorfer, Eichenkofen

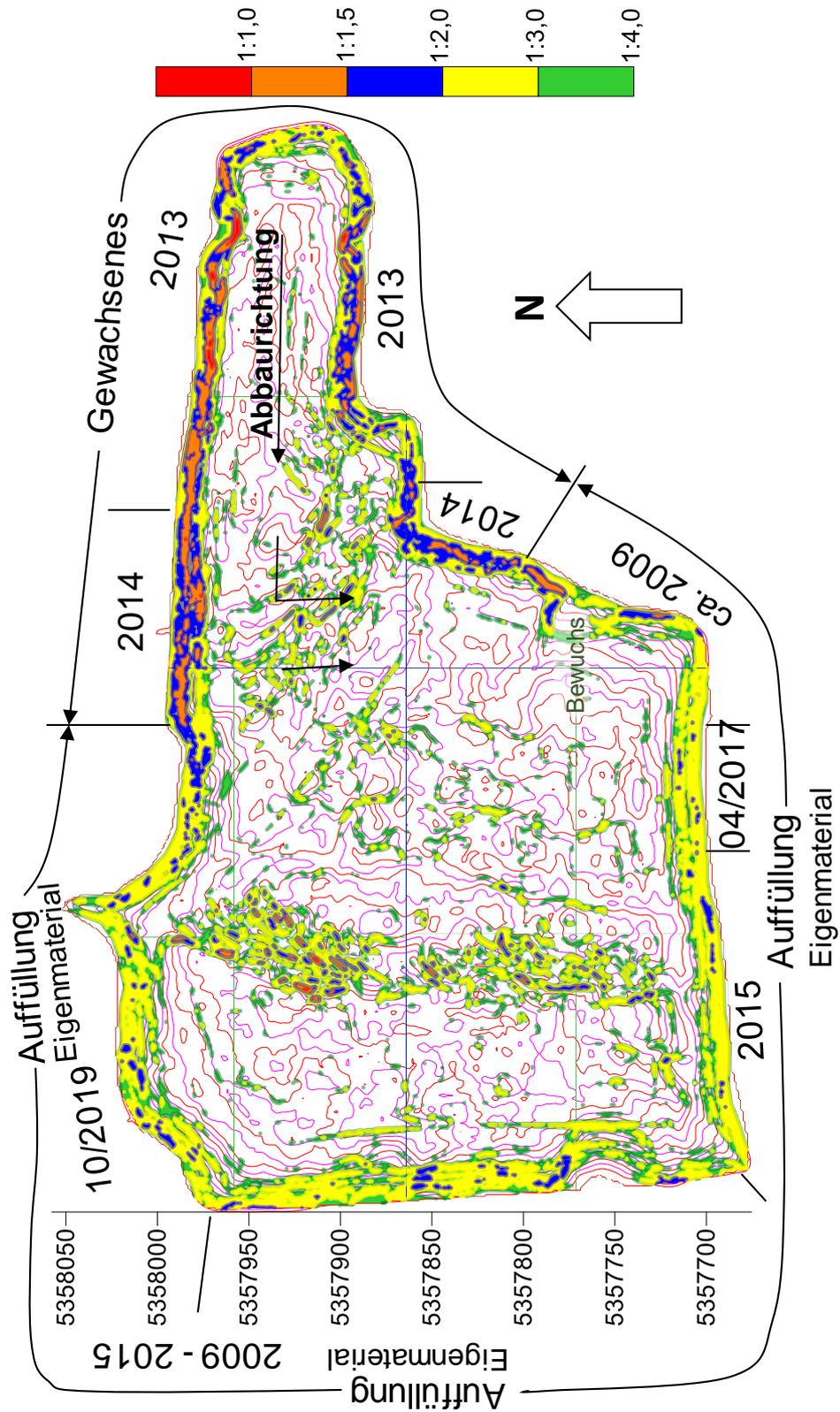


Abbildung 6.42: Seegrundvermessung, Fa. Rohrdorfer, Berglern, Eichenkofen, Auswertung der Böschungsneigung

Abbildung 6.42 zusammen mit Abbildung A. 8.22 zeigen die Auswertung der Böschungsneigung der Unterwasserböschungen auf Basis der Vermessungsdaten vom Standort Eichenkofen in gleicher Weise wie vorab erläutert. Auch hier sind die Neigungen der Böschungen im Gewachsenen deutlich steiler als die angekippten Böschungen. Die Neigungen liegen bei den Böschungen im Gewachsenen in der Regel bei 1:2, stellenweise 1:1,5 und 1:1. Die angekippten Böschungen haben sehr homogene Neigungsverhältnisse von 1:3. Die Auswertung der Schnitte aus Abbildung A. 8.21 ist in Abbildung 6.43 dargestellt.

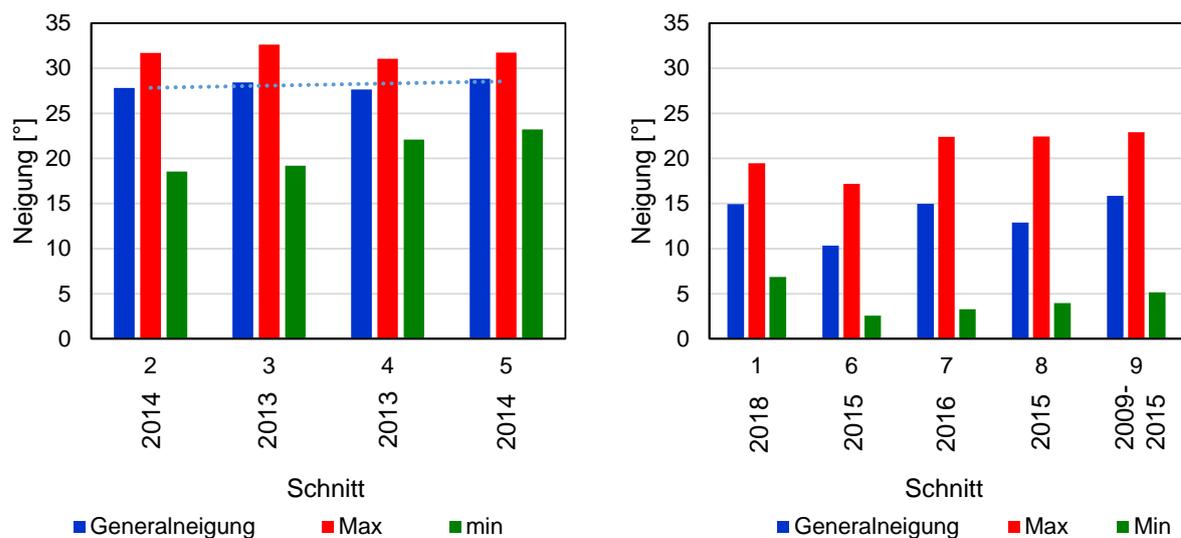


Abbildung 6.43: Links: Neigungen im gewachsenen Untergrund, Rechts: Neigungen im gekippten Untergrund, nach Böschungsalter aufgereiht

Die Böschungen, die parallel zur Abbaurichtung stehen, stellen sich bei der Abbaumethode mittels Eimerkettenbagger jedoch auch nicht in kontrollierter Weise ein, sondern wie bei der unkontrollierten Abbaumethode durch Nachbrüche. Daher ist im Vergleich zu den vorab ausgewerteten Böschungsneigungen der Standorte, an denen unkontrolliert abgebaut wurde, kein nennenswerter Unterschied in den Neigungen der entsprechenden Böschungen zu erkennen. Die in der nordöstlichen Ecke des Sees aufgetretene Rutschung zeigt sich durch die in diesem Abschnitt noch sehr steilen Böschungsstellen mit Neigungen von 1:1 oder steiler.

6.7.3.6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Seegrundvermessungen zeigen, dass es bei den Böschungen insbesondere einen Unterschied macht, ob diese im Gewachsenen oder durch eine Anschüttung hergestellt wurden. Böschungen im Gewachsenen zeigen im vorhandenen Material der Standorte stabile Generalneigungen von 1:2, während angekippte Böschungen langfristig stabile Generalneigungen von 1:3 bis 1:6 aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der gewachsene Baugrund eine zusätzliche Festigkeit aufgrund einer zeitabhängig entstandenen Strukturierung und/oder Zementierung des Bodens aufweist. Diese zusätzliche Festigkeit kann sich auch in angekippten

Bereichen zeitabhängig wieder einstellen, wie die Böschung am Standort Berglern See 8 (Süd) in der südwestlichen Ecke des Sees zeigt, die in angekipptem Material, das 4 bis 10 Jahre vorher abgelagert wurde, hergestellt wurde.

Ein signifikanter Unterschied in der Morphologie und Neigungen der Böschungen und des Seegrunds resultierend aus kontrollierter oder unkontrollierter Abbaumethode lässt sich nicht erkennen. Einzig die Gewinnung mittels Saugbagger ergibt eine größere Heterogenität in der Morphologie der Böschungen und des Seegrunds im Vergleich zu den anderen betrachteten Abbaumethoden. Vergleiche dazu beispielsweise Abbildung A. 8.17 und Abbildung A. 8.22.

Ein signifikanter Unterschied zwischen den Böschungsneigungen bei kontrolliertem Abbau mit Eimerkettenbagger und den übrigen unkontrollierten Abbaumethoden lässt sich nicht feststellen. Die Böschungen, die mit Eimerkettenbagger abgebaut wurden, weisen nur eine leicht steilere Neigung auf und zeichnen sich durch eine große Einheitlichkeit der Neigungen in allen ausgewerteten Schnitten aus (vgl. Abbildung A. 8.23). Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Böschungen, die noch nicht angekippt wurden, parallel zur Abbaurichtung stehen und sich die Neigungen nicht in kontrollierter Weise einstellen, sondern wie bei der unkontrollierten Abbaumethode durch Nachbrüche.

Der Vergleich zwischen den gemessenen Neigungen und den anhand von Vermessungen an 126 Baggerseen zusammengetragenen Werten von BODE (2005) zeigt, dass die Neigungen der Böschungen im gewachsenen Lockergestein gut zu den Werten von BODE (2005) für Unterwasserböschungen in Sand-Kies passen (vgl. Tabelle 6.10 und Tabelle 6.11). Bode macht hingegen keine Unterscheidung zwischen gekippten Böschungen und solchen, die in gewachsenes Lockergestein geschnitten wurden. Daher ist ein direkter Vergleich zwischen den Daten von BODE und den gemessenen Werten für gekippte Böschungen nicht möglich. Ein Vergleich mit den Daten von BODE zur Wasserwechselzone in Kies-Sand-Böschungen zeigt aber, dass die gemessenen Neigungen der gekippten Böschungen nur geringfügig steiler sind als die Werte für die Wasserwechselzone (vgl. Tabelle 6.10 und Tabelle 6.11).

Tabelle 6.10: Zusammenfassung der gemessenen Generalneigungen

Bodenart	Neigung [°]	Neigung 1:x	Bemerkung
gewachsenes Lockergestein Kies-Sand mit Feinkorn	26,7 bis 24,4°	1:2,0 bis 1:2,2	Gerharding Seilgreifer Standzeit 1 bis 8 a
Gekipptes Lockergestein heterogener Abraum	14,4 bis 8,8°	1:3,9 bis 1:6,5	Gerharding eingeschoben Standzeit 2 bis 9,5 a
gewachsenes Lockergestein Kies-Sand mit Feinkorn	26,5 bis 24,5°	1:2 bis 1:2,2	Berglern Schürfkübel Standzeit 5 a

Tabelle 6.10: Zusammenfassung der gemessenen Generalneigungen

Bodenart	Neigung [°]	Neigung 1:x	Bemerkung
Gewachsenes Lockergestein Kies-Sand mit Feinkorn	27,5 bis 25,1°	1:1,9 bis 1:2,1	Berglern Saugbagger Standzeit 1 bis 18 a
Gekipptes Lockergestein Kies-Sand mit Feinkorn	14,8 bis 11,8°	1:3,8 bis 1:4,8	Berglern Standzeit 2 bis 4 a
Gewachsenes Lockergestein Kies-Sand mit Feinkorn	28,8 bis 27,7°	1:1,8 bis 1:1,9	Eichenkofen Eimerkettenbagger Standzeit 5 bis 6 a
Gekipptes Lockergestein Kies-Sand mit Feinkorn	15,9 bis 10,3°	1:3,5 bis 1:5,5	Eichenkofen Standzeit < 1 bis 10 a

Tabelle 6.11: Auswertung der Neigungsmessungen an 126 Baggerseen nach maximaler, minimaler und mittlerer Neigung sowie der Streuungsbreite (Stabw / Mittel), Daten aus BODE (2005)

	Max	Min	Mittel	Stabw/Mittel
Unterwasserböschung				
Kies-Sand	1:2,00 (27°)	1:3,00 (18°)	1:2,57 (21°)	12%
Wasserwechselzone				
Kies-Sand	1:3,60 (16°)	1:6,20 (9°)	1:5,08 (11°)	21%

6.7.4 Seegrundvermessung einer Sandgrube in der Oberpfalz

Neben den Seegrundvermessungen bei München standen Daten der Seegrundvermessung einer Sandgrube in der Oberpfalz zur Verfügung. Die Messungen wurden in den Jahren 2014, 2016 und 2018 durchgeführt und hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Böschungsneigungen ausgewertet.

In der Grube werden enggestufte quartäre Quarzsande mittels Saugbagger gewonnen (siehe Abbildung 6.44). Sande mit dieser Korngrößenverteilung und ca. mitteldichter Lagerungsdichte besitzen erfahrungsgemäß einen kritischen Reibungswinkel von ca. $\varphi_c = 30^\circ$ bis 33° . Der Abbau erfolgt bis ca. 20 m unter Geländeoberfläche. Grundwasser steht ab ca. 8 bis 12 m unter Geländeoberfläche an.

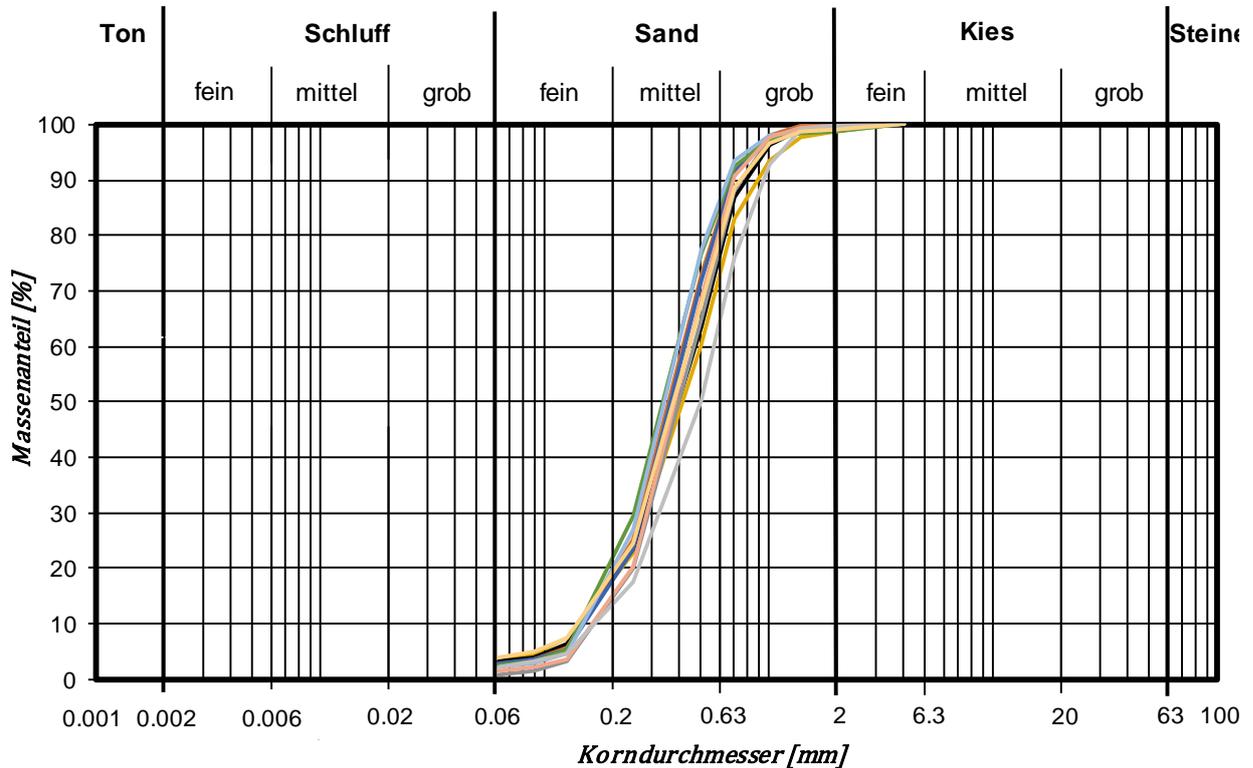


Abbildung 6.44: Korngrößenverteilungen der Sande aus der Grube in der Oberpfalz

Die Böschungsneigungen unter und über Wasser sind kurze Zeit nach dem Abbau in etwa gleich groß und sehr steil mit Neigungen von 70° bis 90°. Laut dem Saugbaggerführer flacht sich die Böschung über etwa einen Winter deutlich ab und nimmt über Wasser in etwa den Wert des kritischen Reibungswinkels an (siehe Abbildung 6.45), während sie sich unter Wasser teilweise deutlich flacher ausbildet. Die Ergebnisse der Seegrundvermessungen sind in Abbildung A. 9.1, Abbildung A. 9.2 und Abbildung A. 9.3 dargestellt.



Abbildung 6.45: Böschungsneigung über Wasser: (links) letzte Abbauaktivität ca. 6 Monate oder länger zurückliegend, (rechts) Böschung kürzlich abgebaut

Die Seegrundvermessungen wurden hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Böschungsneigung ausgewertet. Zunächst wurde eine Böschung in einem Bereich, der vor 2014 abgebaut aber noch nicht rekultiviert bzw. modelliert worden war, betrachtet (siehe Abbildung 6.46). Der gleiche Schnitt durch die Böschung wurde in den Vermessungsergebnissen aus den Jahren 2014, 2016 und 2018 ausgewertet. Die Auswertungsergebnisse sind in Abbildung 6.47 dargestellt. Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die Messergebnisse kaum. Die vorhandenen Unterschiede stammen vermutlich aus Mess- und Auswertungsungenauigkeiten. Die Böschung hat sich auf einen mittleren Neigungswinkel von $\beta = 20,7^\circ$ (1:2,6) abgeflacht, der als stabil angesehen werden kann, da sich im Zeitraum 2014 bis 2018 keine weitere Abflachung eingestellt hat. Der stabile Böschungswinkel ist damit deutlich kleiner als der erfahrungsgemäß vorliegende kritische Reibungswinkel des Sandes.

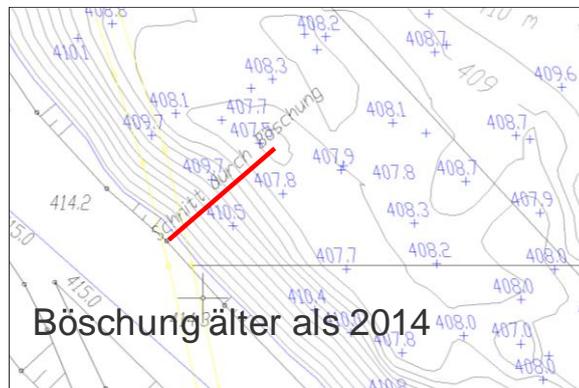


Abbildung 6.46: Böschung, die vor 2014 hergestellt wurde

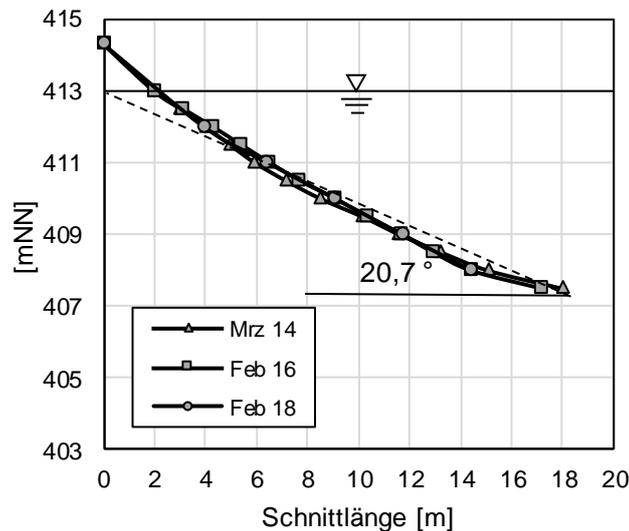


Abbildung 6.47: Neigungsmessungen aus den Jahren 2014, 2016 und 2018 an einer Böschung, die vor 2014 hergestellt worden war

Zusätzlich wurden mehrere Schnitte in einem Böschungsbereich ausgewertet, dessen Abbau erst kürzlich (im Jahr 2018) erfolgt war. In den Böschungsabschnitt wurden drei Schnitte gelegt

(02/2018 – 4, 02/2018 – 3 und 02/2018 – 1), deren Alter in Richtung des in Abbildung 6.48 dargestellten Pfeils sinkt. Das genaue Alter ist unbekannt, aber die Böschung wurden im Laufe des Jahres 2018 in Richtung des Pfeils abgebaut. Oberhalb von Schnitt 02/2018 – 4 ist zu erkennen, dass die Höhenlinien wieder zusammenlaufen, also die Steigung zunimmt. Das liegt daran, dass in diesem Bereich die Böschung bereits wieder angekippt wurde. Abbildung 6.49 zeigt die Neigungen entlang der verschiedenen Schnitte. Zum Vergleich ist auch die Steigung der Böschung aus Abbildung 6.46 eingetragen. Entlang den Schnitten wurden abschnittsweise mittlere Neigungswerte ausgewertet. Es ist deutlich erkennbar, wie sich die steilen Böschungsabschnitte abflachen und durch die Abflachung sich die Gesamtneigung der Böschungen homogenisiert. Die jüngeren beiden Böschungen haben steilste Neigungen von 57° und 45°. Der älteste Schnitt (02/2018 – 4) hat bereits eine nahezu gleichbleibende Steigung von 24°, die fast der als endgültig stabil bewerteten Neigung von 21° der Böschung aus Abbildung 6.46 entspricht.

Die initial sehr steilen Böschungen unter wie über Wasser stellen sich unter anderem aufgrund der Abbaumethode mittels Saugbagger ein (siehe Kapitel 5.4.1).

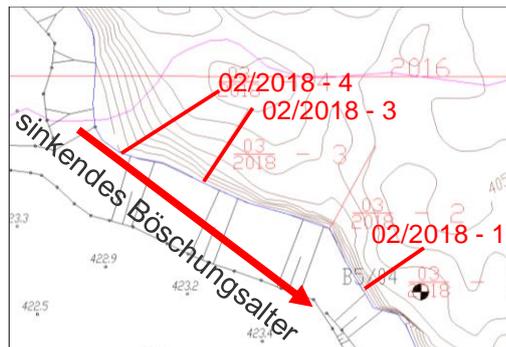


Abbildung 6.48: Böschungsabschnitt kurz nach Abbau mit verschiedenen Schnitten

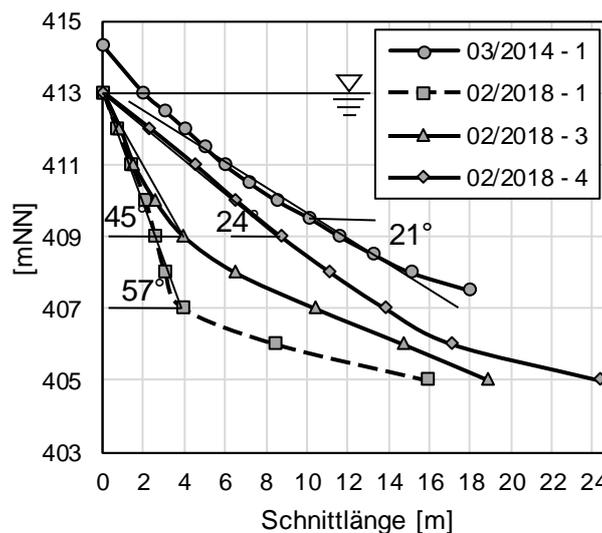


Abbildung 6.49: Neigungsmessungen aus dem Jahr 2018 in unterschiedlich alten Böschungsschnitten

6.8 Übertragung der Regelwerke (Kapitel 5.5) auf Grubenböschungen

In diesem Kapitel wird darauf eingegangen, welche in Kapitel 5.5 zusammengefassten Regelungen aus Normen, Gesetzen, Richtlinien und Merkblättern für die Beurteilung der Endstandsicherheit von Grubenböschungen hilfreich sind und welche beachtet werden sollten bzw. welche zu einer Kategorisierung in eine der drei Böschungskategorien (BöK) führen.

6.8.1 zu Kapitel 5.5.2.1: EC7 + DIN 1054: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik

Die Hinweise und Festlegungen aus EC7 und DIN1054 in Kapitel 5.5.2.1 sind grundsätzlich bei der Berechnung der Böschungsstandsicherheit zu beachten. Allerdings kann hier eine Differenzierung je nach BöK der Grubenböschung erfolgen. Die Hinweise unter 11.3 sind hilfreich für die Kategorisierung in BK1, 2 oder 3 und sollten immer beachtet werden. Die weiteren Hinweise unter Punkt 11.5 jedoch sind nur dann zu beachten, wenn eine Kategorisierung in BK2 oder 3 vorliegt. Im Folgenden wird darauf eingegangen, welche Punkte bei BK2 und 3 zu beachten sind bzw. welche Punkte zu einer Kategorisierung in die entsprechende BöK führen, sollten sie vorliegen:

- 11.5.1 (1)P: BK2 + BK3
- 11.5.1 (2)P: BK2 + BK3
- 11.5.1 (3): BK2 + BK3
- 11.5.1 (4): BK2 + BK3
- 11.5.1 (5): BK2 + BK3
- 11.5.1 (6): BK2 + BK3
- 11.5.1 (7): Wenn dreidimensionale Betrachtungen notwendig sind, liegt BK3 vor.
- 11.5.1 (8): BK3
- 11.5.1 (9): BK3
- 11.5.1 (12): BK2 + BK3
- 11.5.1 (13)P: BK3
- 11.5.1 A(14): siehe Kapitel 5.2.4.
- 11.5.1 A(15): BK3
- 11.5.1 A(16): BK2 + BK3
- 11.5.1 A(18): BK2 + BK3

Die Hinweise unter 11.6 sind nur dann zu beachten, wenn BK3 vorliegt. Unter BK1 und BK2 sind keine Gebrauchstauglichkeitsnachweise zu erbringen, bzw. wenn sie zu erbringen wären, würde dies automatisch zur Einstufung in die BK3 führen. Dies hängt damit zusammen, dass Verformungsprognosen mit „*derzeitig verfügbaren analytischen und numerischen Verfahren gewöhnlich keine zuverlässigen Voraussagen zur Verformung eines natürlichen Hanges*“ (aus EC7) geben können. Auch bei unverdichteten Auffüllungen in Gruben sind Verformungsprognosen

schwierig. Hierzu müsste dementsprechend ein geotechnischer Sachverständiger herangezogen werden, was zu einer Einstufung in BK3 führt.

Punkt 11.7 sollte bei BK2 und BK3 beachtet werden.

6.8.2 zu Kapitel 5.5.2.2: DIN 4084 Baugrund – Geländebruchberechnungen

Die DIN 4084 regelt die Berechnung der Geländebruchsicherheit mit Verfahren, die auf der kinematischen Methode basieren. Grundsätzlich müssen nur Geländebruchberechnungen im Falle einer Kategorisierung in BK2 und BK3 durchgeführt werden. Demnach sind auch die Punkte unter Kapitel 5.5.2.2 nur im Falle einer Kategorisierung in BK2 und BK3 zu beachten.

Dies trifft auch auf den Punkt 11 zu, der die Begrenzung der Baugrundverformungen betrachtet.

6.8.3 zu Kapitel 5.5.3.1: Richtlinien für Anlagen zur Gewinnung von Kies, Sand, Steinen und Erden

Die nach den *Richtlinien für Anlagen zur Gewinnung von Kies, Sand, Steinen und Erden* für eine Genehmigung vorzulegenden Informationen sollten unbedingt beachtet werden, da sie ein Mindestmaß an Daten festlegen, das für eine Kategorisierung und Beurteilung der Böschungen nötig ist. Insgesamt liegt bei Einhaltung der Richtlinie im Hinblick auf die geotechnisch relevanten Informationen schon eine gute Datenlage vor. Eine Einteilung und Beurteilung von Gruben in BK1 und BK2 sollte damit weitgehend möglich sein. Für BK3 sind in jedem Fall zusätzliche Informationen notwendig. Bei der Betrachtung der Nachnutzung spielt der Naturschutz die vorrangige Rolle. Geotechnische Langzeitkriterien für die Böschungsstandsicherheiten werden nur indirekt festgelegt, bspw. durch Ausschluss von für die Natur nachteiligen Grundwasserstandsänderungen. Anforderungen wie zum Beispiel die Ausbildung unregelmäßiger Böschungen mit bspw. Steilwänden können auch standsicherheitsgefährdend sein. Es werden auch möglich Folgefunktionen von Gruben genannt. Bei der Festlegung der Art der Folgenutzung werden jedoch keine geotechnischen Entscheidungskriterien genannt, die jedoch je nach Art der Folgenutzung entscheidend sein können.

Die festgelegten Sicherheitsabstände können nur eingeschränkt in Ansatz gebracht werden. Sie basieren auf Erfahrungswerten, die aber im Einzelfall auch auf der unsicheren Seite liegen können. Es wird empfohlen, die Sicherheitsabstände, wenn gewollt, nur bei einer Kategorisierung in BK1 anzuwenden. Bei BK2 und BK3 sind Standsicherheitsberechnungen für den Endzustand notwendig, sodass daraus die notwendigen Sicherheitsabstände hervorgehen. Es kann aus wirtschaftlichen Gründen auch im Falle einer Kategorisierung in BK1 für den Betreiber von Interesse sein, eine Standsicherheitsbetrachtung durchführen zu lassen, um ggf. die definierten Sicherheitsabstände, die in der Regel auf der sicheren Seite liegen, unterschreiten zu können. Erfahrungsberichte von Betreibern, die dies bereits versucht hatten, ergaben jedoch, dass bei den Genehmigungsbehörden, trotz vorgelegter Standsicherheitsbeurteilungen, auf die in den Richtli-

nien für Anlagen zur Gewinnung von Kies, Sand, Steinen und Erden definierten Sicherheitsabstände bestanden wurde. Dies sollte im Sinne der möglichst vollständigen Ausbeutung von Rohstoffvorkommen vermieden werden.

6.8.4 zu Kapitel 5.5.3.4: Bundesberggesetz

Das BBergG und die BayBergV finden nur Anwendung, wenn der gewonnene Rohstoff unter das Bergrecht fällt. Entsprechend sind in diesem Fall auch die Festlegungen des BBergG zu beachten. Allerdings sind die genannten Bestimmungen von recht allgemeinem Charakter und die hier wiedergegebenen Festlegungen zum Abschlussbetriebsplan und seiner Zulassung hinsichtlich des Schutzes Dritter und der Beschreibung des Endzustands der Grube sollten auch im Falle von Rohstoffen, die nicht unter das Bergrecht fallen, beachtet werden.

6.8.5 zu Kapitel 5.5.4.1: Richtlinie Geotechnik des Sächsischen Oberbergamtes

Unter Punkt 5.1.1 werden Punkte aufgelistet unter deren Voraussetzung ein Nachweis der Böschungsstandsicherheit durch Standsicherheitsberechnungen zu erbringen ist. Grundsätzlich ist dies bei der hier vorgeschlagenen Kategorisierung der Böschungen nur für BK2 und 3 vorgesehen. Bei BK1 können die Böschungsneigungen nach Erfahrungswerten festgelegt werden.

Nach Punkt 5.1.1 a) und f) ist ein Nachweis der Böschungsstandsicherheit durch Standsicherheitsberechnungen zu erbringen, wenn die angegebenen Erfahrungswerte für stabile Böschungsneigungen (siehe Tabelle 5.8 und Tabelle 5.9) überschritten werden und es sich gleichzeitig um eine bleibende Böschung handelt. Die Bewertung der Erfahrungswerte in Tabelle 5.8 und Tabelle 5.9 erfolgt in Kapitel 6.8.6.

6.8.6 zu Kapitel 5.5.4.2: Sächsisches Oberbergamt: Merkblatt Böschungen im Lockergestein

Auch gemäß dem Merkblatt darf unter Voraussetzung bestimmter Randbedingungen, die in Anlage 1 der Sächsischen Bergverordnung näher aufgeführt werden, die Böschungsneigung nach Erfahrungswerten, die in Tabelle 5.8 und Tabelle 5.9 aufgelistet werden, festgelegt werden.

In Tabelle 5.8 (gewachsenes Lockergestein) wird unterschieden zwischen verschiedenen Böschungshöhen und der Standdauer \leq oder $>$ 5 Jahre. Die Unterscheidung nach verschiedenen Böschungshöhen ist sinnvoll, wohingegen einer Unterscheidung nach der Standdauer für bleibende Böschungen, die eine Standdauer von \gg 5 Jahren haben, als nicht sinnvoll erscheint. Die festgelegten Böschungswinkel sind wesentlich höher, als die Werte, die sich auf Basis von Erfahrungswerten aus geotechnischen Regelwerken ergeben würden und es wird außerdem keine Unterscheidung zwischen Böschungen über und unter Wasser gemacht. In den Erfahrungswerten in Tabelle 5.8 wird berücksichtigt, dass gewachsenes Lockergestein in der Regel eine nicht ohne Weiteres quantifizierbare über die Zeit entstandene Festigkeit besitzt (Strukturfestigkeit).

Diese wird bei geotechnischen Bauwerken nicht planmäßig angesetzt und daher auch in den Erfahrungswerten bspw. der DIN 1055 nicht berücksichtigt.

Auch in Tabelle 5.9 (gekipptes Lockergestein) wird zwischen verschiedenen Böschungshöhen unterschieden. Die Standdauer wird jedoch als unbegrenzt angegeben. Die vorgeschlagenen Werte sind im Bereich der Erfahrungswerte aus DIN 1055. Jedoch erscheinen sie im Hinblick darauf, dass sie pauschal für Lockergestein festgelegt sind, als zu steil. Hier muss eine genauere Differenzierung nach der Bodenart erfolgen. Dies ist jedoch oft schwierig, da sie in der Regel aus heterogenem Abraum gekippt werden.

Grenzwerte für Böschungsneigungen auf Basis von Erfahrungswerten für Böschungen der BK1, die anwendbar erscheinen, werden in Kapitel 6.7.2 für Unterwasserböschungen und in Kapitel 8.1 für Böschungen über Wasser festgelegt.

6.8.7 zu Kapitel 5.5.4.3: Sächsische Bergverordnung

§ 8 (1): zu beachten bei BK1 + BK2 + BK3

§ 8 (2): BK3

Anlage 1: 1.1.1: zu beachten bei BK1 + BK2 + BK3. Bei BK1 ist die Standsicherheit über Erfahrungswerte (siehe Tabelle 8.1 und Tabelle 8.2) und bei BK2 und BK3 über Standsicherheitsberechnungen nachzuweisen.

Anlage 1: 1.1.3.1: nicht zwingend auf eine Kategorie anzuwenden.

Anlage 1: 1.1.3.2: BK2 + BK3

Anlage 1: 1.1.3.3: BK2 + BK3

Anlage 1: 1.1.3.4: BK2 + BK3

Anlage 1: 1.1.3.5: BK3

Anlage 1: 1.1.3.6: BK3

Anlage 1: 1.1.3.7: nicht zwingend, wenn die Böschung zur BK1 kategorisiert wird.

Anlage 1: 1.1.3.8: BK2 + BK3

Anlage 1: 1.1.3.9: BK2 + BK3

Anlage 1: 1.1.3.10: BK3

Anlage 1: 1.1.3.11: bei bleibenden Böschungen nicht relevant

Anlage 1: 1.1.3.12: bei bleibenden Böschungen nicht relevant

Anlage 1: 1.1.3.13: bei bleibenden Böschungen nicht relevant

Anlage 1: 1.1.3.14: bei bleibenden Böschungen nicht relevant

Anlage 1: 1.1.3.15: BK2 + BK3

6.8.8 zu Kapitel 5.5.5: Rutschungsbegünstigende Verhältnisse

Rutschungsbegünstigende Verhältnisse liegen auf Basis der in Kapitel 5.5.5 genannten Punkte vor, wenn / bei:

- im Lockergestein Schichten geringer Scherfestigkeit sowie andere geologisch vorgegebene Schwächezonen auftreten;
- Setzungsfließgefahr besteht;
- Anzeichen für Rutschungen oder Bewegungen erkannt oder andere Umstände wahrgenommen werden, die die Standsicherheit der Böschung beeinträchtigen;
- tektonischen Beanspruchungszonen, Schichtgrenzen oder Schichten mit geringer Scherfestigkeit, insbesondere, wenn diese gleichsinnig mit der Böschungsneigung einfallen;
- ungünstigen hydrologischen Verhältnissen, (z. B. freie oder gespannte Restwasserstände, Wasserzuflüsse, Wasseransammlungen am Böschungsfuß) welche die Standsicherheit durch Verminderung der Festigkeiten oder durch hydromechanische Wirkungen (z. B. Auftrieb, Strömungsdruck, Wellenschlag) herabsetzen;
- alten Grubenbauen, Kohlefeilern oder -festen.

6.8.9 zu Kapitel 5.5.6: Beobachtungsmethode

Die im EC7 definierte Beobachtungsmethode wird in der Geotechnik in der Regel im laufenden Bauprozess eingesetzt. Im Endzustand müssen die Bauwerke in der Regel jedoch als standsicher nachgewiesen sein, da grundsätzlich gilt, dass die Beobachtungsmethode kein Ersatz für eine ausreichende rechnerische Standsicherheit ist. Außerdem ist es nach EC7 nur zulässig, die Beobachtungsmethode in der Geotechnischen Kategorie 3 anzuwenden. Das bedeutet, es wird vorausgesetzt, dass sowohl Grenzwerte der Verformungen, als auch Handlungsweisen bei Eintreten bestimmter Grenzwerte mit einem Sachverständigen für Geotechnik festgelegt werden.

Im Falle von Gruben kann es jedoch geboten und sinnvoll sein die Beobachtungsmethode auch auf eine längerfristige Beobachtungsdauer im Endzustand der Grubenböschungen und in den Böschungskategorien Bök 1 und 2 anzuwenden. Um hier eine Verwechslung mit der Beobachtungsmethode definiert in EC7 zu vermeiden, wird die Begrifflichkeit „Beobachtungsmethode“ in BK1 und BK2 auf „Böschungsaudit“ geändert. Lediglich in BK3, in der planmäßig ein geotechnischer Sachverständiger hinzugezogen werden muss, kann die Beobachtungsmethode nach EC7 angewendet werden.

Für Bök 3 gilt, dass bei erfahrungsgemäß standsicheren Endböschungen, die rechnerisch jedoch nicht nachweisbar sind oder nicht exakt prognostizierbaren Standsicherheiten bzw. bei nicht gesicherten Rechenmodellen die Beobachtungsmethode angewandt werden kann. Diese beinhaltet die messtechnische Überwachung in festgelegten Intervallen von rechnerisch nicht standsicheren Endböschungen oder rechnerisch standsicheren Böschungen unter sehr komplexen Randbedingungen. Sofern sie angewendet wird, müssen vorab Konzepte zur unmittelbaren Sanierung der Böschungen entwickelt werden, um im Falle von kritischem Böschungsverhalten sofort eingreifen zu können. Dabei müssen im Vorhinein Grenzwerte festgelegt werden und Konzepte entwickelt werden, die angewendet werden, wenn die Grenzwerte überschritten werden. Dies muss

in Zusammenarbeit mit einem geotechnischen Sachverständigen erfolgen. Bei den Grenzwerten wird klassischerweise unterschieden zwischen

- a) Schwellenwert = definierter Abstand Messwert zu Eingreifwert => erhöhte Beobachtungsrate bei Erreichen
- b) Eingreifwert => sofortige Zusatzmaßnahmen
- c) Alarmwert => Havariekonzept greift

Des Weiteren kann festgelegt werden, ab welcher Dauer der Beobachtung, in der keine Auffälligkeiten an den Böschungen bzw. keine Grenzwertüberschreitung aufgetreten sind, die Beobachtung eingestellt wird.

6.8.10 Definition eines Böschungsaudits für BK1 und BK2:

Im Rahmen eines Böschungsaudits für Bök1 und Bök 2 kann die Böschung auch von nicht geotechnisch oder vermessungstechnisch geschultem Personal überwacht werden. Dabei geht es primär darum, Veränderungen der Böschungen zu dokumentieren und bei Eintreten größerer Veränderungen einen Fachmann einschalten zu können, um die Böschung genauer zu untersuchen. Das probate Mittel für ein Böschungsaudit ist eine Fotodokumentation, bei der immer von den gleichen Standorten aus die Böschung oder Böschungsabschnitte aufgenommen werden und so Veränderungen zeitlich nachvollzogen werden können. Veränderungen, die so dokumentiert werden können, sind größere Böschungsbewegungen, Risse, Erosionserscheinungen und Wasseraustritte. Da ein Böschungsaudit nur bei erfahrungsgemäß standsicheren Böschungen angewendet werden darf, kann das Auditintervall auf einmal jährlich festgelegt werden. Sollten sich in einem Zeitraum von 5 Jahren keine Änderungen an den beobachteten Endböschungen feststellen lassen, kann das Böschungsaudit eingestellt werden.

6.8.11 zu Kapitel 5.5.7: Geotechnische Kategorien

nach EC7 und DIN 1054

Geotechnische Kategorie (GK) 1:

A 2.1.2.2 (14): Kann so für BK1 übernommen werden.

A 2.1.2.2 A(14): Kann so für BK1 übernommen werden.

A 2.1.2.2 (15): Kann so für BK1 übernommen werden.

A 2.1.2.2 (16): Kann so für BK1 nicht übernommen werden, da es nach der hier definierten Kategorisierung auch zulässig ist Grubenböschungen in BK1 zu kategorisieren, wenn die Böschung ganz oder teilweise im Wasser steht.

A 2.1.2.2 A(16a): Kann so für BK1 übernommen werden.

A 2.1.2.2 A(16b): Kann so für BK1 nicht übernommen werden, da es nach der hier definierten Kategorisierung auch zulässig ist Grubenböschungen in BK1 zu kategorisieren, wenn die Böschung ganz oder teilweise im Wasser steht.

A 2.1.2.2 A(16c): Kann so für BK1 übernommen werden.

Geotechnische Kategorie (GK) 2:

A 2.1.2.3 (17): Kann so für BK2 übernommen werden.

A 2.1.2.3 A (17): Kann nur bedingt übernommen werden, da die Grubenböschungen nicht als Bauwerk definiert werden, sondern als Nebenprodukt der Rohstoffgewinnung.

A 2.1.2.3 (18) und A 2.1.2.3 A(18): Können so für BK2 übernommen werden und sind kongruent mit der Bestimmung, dass bei einer Kategorisierung in BK2 die Standsicherheit der Böschungen von einem geotechnischen Ingenieurbüro rechnerisch nachgewiesen werden muss.

A 2.1.2.3 (19): Kann so für BK2 übernommen werden.

A 2.1.2.3 A (19a): Kann so für BK2 übernommen werden.

A 2.1.2.3 A (19b): Kann so für BK2 übernommen werden.

Geotechnische Kategorie (GK) 3:

A 2.1.2.4 (20): Bezogen auf Grubenböschungen kann der Absatz für BK3 übernommen werden.

A 2.1.2.4 (21): Bei BK3 muss das gesamte Vorgehen zur Sicherung der Endböschungen mit einem geotechnischen Sachverständigen abgestimmt sein. Daraus kann auch resultieren, dass die Grubenböschungen nach anspruchsvolleren Vorgaben und Regeln, als sie im EC7 und der DIN1054 festgelegt sind, erfolgen muss.

A 2.1.2.4 A (22): Diese Vorgabe entspricht der Forderung nach Hinzuziehung eines geotechnischen Sachverständigen bei BK3.

A 2.1.2.4 A (23): Kann so für BK3 übernommen werden.

A 2.1.2.4 A (24): Die angegebenen Randbedingungen würden auch die Einstufung einer Grubenböschung in BK3 zur Folge haben. Ausgenommen sind die genannten *unkontrolliert geschütteten Auffüllungen*. Diese bewirken in der hier definierten Kategorisierung nicht automatisch eine Einstufung in BK3, sondern nur in Kombination mit anderen Kriterien.

A 2.1.2.4 A (25): Kann so für BK3 übernommen werden.

A 2.1.2.4 A (26): Die genannten Beispiele für Bauwerke sollten bei der Kategorisierung berücksichtigt werden. Die Beispiele sind bei entsprechender Nachnutzung relevant.

nach DIN 4020:2010-12:

Geotechnische Kategorie (GK) 1:

Die Beschränkung auf Böschungen ohne Einwirkung von Grundwasser, wird in der hier definierten Kategorisierung nicht übernommen. Es sind grundsätzlich auch Böschungen mit Einwirkungen von Grundwasser in der BK1 zulässig.

Geotechnische Kategorie (GK) 2:

Die Beschränkung auf Böschungshöhen in nichtbindigen Böden < 10 m wird in der hier definierten Kategorisierung nicht übernommen, da das Kriterium bei Grubenböschungen als zu konservativ gewählt erscheint.

Der Hinweis bei bindigen Böden auf eine mindestens steife Konsistenz für eine Einstufung in BK2 kann als *Soll*-Kriterium (siehe Kapitel 7.1), das keine zwingende Kategorisierung zur Folge hat, berücksichtigt werden.

Geotechnische Kategorie (GK) 3:

Folgende angegebene Punkte würden nach der hier gegebenen Definition eine Einstufung in BK3 zur Folge haben:

- *bei ausgeprägter Kriechfähigkeit des Bodens*
- *bei Gefahr von Setzungsfließen*
- *bei Nichtausreichen ebener Betrachtungen von Bruchkörpern im Boden*
- *bei maßgeblichem Einfluss von Erdbeben*

6.8.12 zu Kapitel 5.5.8: Baugrunduntersuchungen

aus DIN EN 1997-2:2010-10 (EC7)

Nach EC7 wird unterschieden zwischen Voruntersuchungen, Hauptuntersuchungen und gegebenenfalls Kontrolluntersuchungen. Dieser Aufwand ist nur bei BK3 gerechtfertigt und in Ausnahmefällen und in Abstimmung mit dem bewertenden geotechnischen Ingenieurbüro umzusetzen. Hilfreiche Angaben zur Vorgehensweise liefert die DIN 4020. Grundsätzlich ist es nach den im Forschungsvorhaben gesammelten Erfahrungen so, dass die für gewöhnlich vorliegenden Informationen aus bspw. der Genehmigungsplanung oder den Berichten der Betreiber für eine Einstufung in BK1 und BK2 ausreichen und bei einer Einstufung in BK3 zusätzliche Untersuchungen durchgeführt werden müssen (siehe Kapitel 7.2.1).

aus DIN 4020:2010-12: A 2.2.3 Untersuchungsumfang

Hier wird der Untersuchungsumfang in Abhängigkeit von der Einstufung in einer der nach EC7 definierten geotechnischen Kategorien (GK) festgelegt. Die gemachten Angaben können aber auch auf die Definition für die Böschungskategorien (Bök) übernommen werden:

A 2.2.3 A (1): BK1

A 2.2.3 A (2): BK2

A 2.2.3 A (2): In Abstimmung mit einem geotechnischen Sachverständigen in BK3 umzusetzen.

zu EC7 2.4 Hauptuntersuchungen: Diese Hinweise und auch die Angaben aus EC7 Anhang B.3 (siehe Kapitel 5.5.8.3) sollten bei Untersuchungen, die bei einer Kategorisierung in BK2 oder 3 initiiert werden, grundsätzlich beachtet werden.

7 Kriterienkatalog und Checkliste

Das Konzept zur Bewertung der Standsicherheit von Grubenböschungen sieht eine Einteilung der zu betrachtenden Tagebaue und Gruben in drei Böschungskategorien (BK1 bis BK3) anhand verschiedener Kriterien vor. Die Böschungskategorien repräsentieren in diesem Zusammenhang die geotechnische Komplexität sowie das damit zu bewertende Gefahrenpotential (niedrig / mittel / hoch). In Kapitel 7.1 werden dazu beispielhafte Kriterienkataloge für jede BöK genannt, die aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit haben und je nach lokalen Randbedingungen individuell angepasst werden müssen.

Aufbauend auf der Einteilung in eine Böschungskategorie ist die Standsicherheit der Böschungen zu bewerten. Dies erfolgt entweder über rechnerische Nachweise oder mit Hilfe von Erfahrungswerten. Eine hohe geotechnische Komplexität oder sehr sensible Nachnutzung und die damit einhergehende komplexe Bewertung des Gefahrenpotentials erfordert die Einbeziehung von geotechnischen Sachverständigen. Neben diesem Aspekt hängt der zur Bewertung der Standsicherheit nötige geotechnische Erkundungsaufwand von der Böschungskategorie ab. So kann es zur Einteilung in Böschungskategorien oder im Zweifelsfall erforderlich sein, den Erkundungsaufwand zu erhöhen. Dazu wird in Kapitel 7.2 eine Checkliste präsentiert, anhand derer die je nach BöK notwendigen Informationen abgefragt werden können.

7.1 Kriterienkatalog

Die Einordnung in die geotechnischen Kategorien (BK1 bis BK3) ist fließend und muss für den jeweiligen Einzelfall festgelegt werden. Allgemeine immer gültige Kriterien zur Einteilung von Endböschungen in Böschungskategorien können nicht vorgegeben werden. Im Folgenden werden Randbedingungen aufgezählt, unter denen eine Einteilung in die jeweiligen Kategorien als sinnvoll erscheint. Eine sinnvolle Einteilung in Böschungskategorien erfordert einen gewissen Grad an geotechnischer Erfahrung. Die Kriterien für Kategorien werden untergliedert in

- Muss-Kriterien (Anforderungen): Kriterien, die zur Einordnung in eine bestimmte Kategorie eingehalten sein müssen oder die automatisch dazu führen und
- Soll-Kriterien (Empfehlungen): Kriterien, die zur Einordnung in eine bestimmte Kategorie eingehalten sein sollten, u.U. in Kombination mit anderen.

Die Einteilung in eine Böschungskategorie legt auch die notwendigen Informationen fest, die zur Beurteilung der Grubenböschung vorliegen müssen. Eventuell führt die Sichtung vorhandener Information oder durch Erkundungsmaßnahmen neu vorliegender Informationen zu einer Neukategorisierung. Die Einteilung ist also ein iterativer Prozess (siehe Abbildung 7.1). Für eine erste Datenakquise kann der in Anhang A.2 angegebene Auskunftsbogen dienen. Außerdem können die in Anhang A.4 und A.5 genannten Datenquellen genutzt werden.

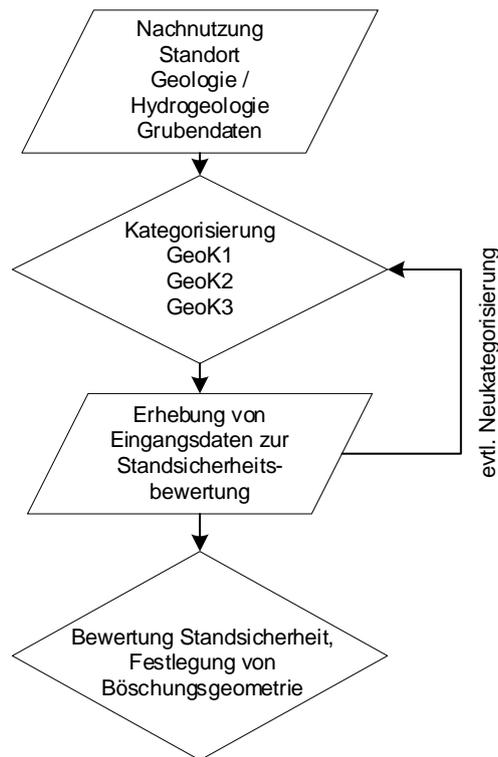


Abbildung 7.1: Ablauf einer Kategorisierung und Standsicherheitsbewertung

7.1.1 Nachnutzung

Ein entscheidender Faktor bei der Kategorisierung ist die vorgesehene Nachnutzung der Grube und bestehende bzw. geplante Nutzung angrenzender Bereiche. Im Folgenden werden hierfür Beispiele für drei (Nach-)Nutzungskategorien (wenig sensibel, mittlere Sensibilität und sensibel) genannt. Diese Auflistung hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

wenig sensible Nachnutzung:

- Naturschutz
- landwirtschaftliche Nutzflächen
- Spazier- und Feldwege in der Nähe der Böschung
- Forstwirtschaft
- Landschaftssee
- Angelsee

Nachnutzung mittlerer Sensibilität:

- Badesee
- Gebäude mit temporärer oder wenig anspruchsvoller Nutzung (Scheunen, Ställe, Gartenanlagen) in Böschungsnähe
- Kreis- und Gemeindestraßen in Böschungsnähe

Sensible Nachnutzung:

- Wohn- oder Betriebsgebäude mit dauerhafter Nutzung in Böschungsnähe
- See mit Schifffahrt
- Ortschaften in Böschungsnähe
- Sensible Bauten in Böschungsnähe (bspw. Windkraftanlagen)
- Staatsstraßen, Bundesstraßen oder Bundesautobahnen in Böschungsnähe
- Bahnlinien in Böschungsnähe

In der Richtlinie des Sächsischen Oberbergamtes über die geotechnische Sicherheit im Bergbau über Tage vom März 2005 werden außerdem folgende Dinge als sogenannte *zu schützende Objekte* genannt. In Klammern wird die aus unserer Sicht damit verbundene Sensibilität angegeben:

- *Gebäude und Anlagen, die für den ständigen oder zeitweiligen Aufenthalt von Personen bestimmt sind* (sensibel),
- *öffentliche und betriebliche Verkehrsanlagen, wie Straßen und Bahnlinien* (sensibel),
- *Versorgungsleitungen* (sensibel),
- *Entsorgungsleitungen (zum Beispiel Kanalisation)* (sensibel),
- *Vorfluter und andere Gewässer* (mittlere Sensibilität bis sensibel),
- *Dichtwände* (sensibel),
- [...]
- *besonders geschützte Teile von Natur und Landschaft* (wenig sensibel bis sensibel).

Die in einer Kategorisierung hinsichtlich der Nutzung einzubeziehende Umgebung der Grube wird hier definiert als mindestens 60 m horizontaler Abstand ab Endböschungsschulter oder bei Anschüttung ab Böschungsschulter der Abbauböschung, mindestens aber zweimal die maximale Grubentiefe.

Hinweis: Die im Folgenden in den Kriterienkatalogen genannten Gewässer der I., II. und III. Ordnung beziehen sich auf die Definition des Bayerischen Landesamtes für Umwelt:

- Gewässer I. Ordnung sind Gewässer, die wasserwirtschaftlich, insbesondere wegen ihrer Wasser-, Geschiebe-, Schwebstoff- oder Eisführung oder wegen ihrer Nutzbarkeit von größter Bedeutung sind.
- Gewässer II. Ordnung sind mittelgroße Gewässer, die nicht zur ersten Ordnung gehören, jedoch im Hinblick auf oben genannte Eigenschaften wasserwirtschaftlich von größerer Bedeutung sind.
- Gewässer III. Ordnung sind alle anderen zumeist kleinen Gewässer und Bäche.

Eine tabellarische Zusammenstellung aller Gewässer der entsprechenden Ordnungen befindetet sich unter <https://www.lfu.bayern.de/>.

7.1.2 Böschungskategorie 1

Für einfache Baugrundverhältnisse und Böschungsgeometrien kann die Einteilung in die Böschungskategorie BK1 erfolgen. Die Einteilung in BK1 kann z.B. erfolgen, sofern die nachfolgend genannten Voraussetzungen erfüllt sind:

BöK 1 über GW

Anforderungen:

- homogener Baugrund
- keine seismische Beanspruchung
- keine sensible Bestandsbebauung in Umgebung
- wenig sensible Nachnutzung
- Langsame Lastaufbringung auf Böschung
- Ausschluss des Einbringens nennenswerter Wassermengen in den Baugrund
- Es dürfen keine nach Kapitel 6.8.8 definierte rutschungsbegünstigende Verhältnisse vorliegen.

Empfehlungen:

- Grubentiefe < 10 m
- die Endböschung langfristig nicht verändert werden
- Standzeit der Böschung seit Herstellung > 10 a
- keine Infrastruktur oder Fließgewässer I. und II. Ordnung in der Umgebung

BöK 1 unter GW

Anforderungen:

- homogener Baugrund, keine bindigen Schichten
- keine seismische Beanspruchung
- keine sensible Bestandsbebauung in Umgebung
- keine sensible Nachnutzung
- Langsame Lastaufbringung auf Böschung
- Flache Böschungsneigungen unter Wasser und in Wasserwechselzone.
- keine nennenswerten Grundwasserschwankungen
- Böden neigen nicht zur Verflüssigung
- Es dürfen keine nach Kapitel 6.8.8 definierte rutschungsbegünstigende Verhältnisse vorliegen.

Empfehlungen:

- Grubentiefe < 10 m
- die Endböschung langfristig nicht verändert werden
- Standzeit der Böschung seit Herstellung > 10 a
- keine Anschüttung
- keine Infrastruktur oder Fließgewässer I. und II. Ordnung in der Umgebung

Sind die maßgeblichen Voraussetzungen erfüllt, kann die Endböschung unter oder über Wasser BK1 zugeordnet werden. Es müssen dann keine Standsicherheitsberechnungen durchgeführt werden und die Böschungen können auf Basis von Erfahrungswerten bemessen und hergestellt werden. Gegebenenfalls kann es sinnvoll sein, die Böschungen im Rahmen eines Böschungsaudits nach Kapitel 6.8.12 zu überwachen.

7.1.3 Böschungskategorie 2

Randbedingungen, die eine Zuordnung von Endböschungen in die BK2 sinnvoll machen, sind:

BöK 2 über GW

Anforderungen:

- bei geschichtetem Baugrund mit bindigen Schichten
- keine sensible Bestandsbebauung in Umgebung
- Nachnutzung ohne sensible Bestandteile
- bei schneller Lastaufbringung auf Böschung
- keine seismische Beanspruchung
- wenn nach Kapitel 6.8.8 definierte rutschungsbegünstigende Verhältnisse vorliegen.

Empfehlungen:

- Grubentiefe < 20 m
- bei Durchströmung der Böschung
- bei nennenswerter Änderung des Ist-Zustands
- bei Infrastruktur oder Fließgewässern I. oder II. Ordnung in der Umgebung

BöK 2 unter GW

Anforderungen:

- bei geschichtetem Baugrund mit bindigen Schichten
- keine sensible Bestandsbebauung in Umgebung
- Nachnutzung ohne sehr sensible Bestandteile
- bei schneller Lastaufbringung auf Böschung
- bei nennenswerten Grundwasserschwankungen
- Böden neigen nicht zur Verflüssigung
- keine seismische Beanspruchung
- wenn nach Kapitel 6.8.8 definierte rutschungsbegünstigende Verhältnisse vorliegen.

Empfehlungen:

- Grubentiefe < 20 m
- bei hohem Grundwassergefälle ($i > 0,1$)
- bei nennenswerter Änderung des Ist-Zustands
- bei Anschüttungen, insbesondere geschüttet und nicht verdichtet
- bei Infrastruktur und/oder Fließgewässern I. oder II. Ordnung in der Umgebung

Die Standsicherheit von Böschungen der BöK 2 ist von geotechnischen Ingenieurbüros rechnerisch zu ermitteln oder die bei der Bemessung zugrunde gelegten Erfahrungswerte der Böschungsneigung sind durch ein geotechnisches Ingenieurbüro zu bestätigen. Die Erkundungsmaßnahmen, maßgebenden Bemessungsquerschnitte, Wasserdrücke und Belastungen sind unter Berücksichtigung aller Randbedingungen von einem geotechnischen Ingenieurbüro festzule-

gen. Die Erosionsgefahr muss ausgeschlossen werden. Zur Freigabe der Endböschungen müssen die entsprechend der vorliegenden Randbedingungen zu führenden Nachweise gegen die unterschiedlichen Versagensmechanismen erbracht worden sein. Es ist durch Zusammenarbeit von Genehmigungsbehörde und Grubenbetreiber eine geeignete Vorgehensweise zur Gestaltung von standsicheren Endböschungen schon während des Betriebs festzulegen. Gegebenenfalls kann es sinnvoll sein, die Böschungen im Rahmen eines Böschungsaudit nach Kapitel 6.8.12 zu überwachen. Alternativ zum rechnerischen Nachweis der Standsicherheit kann auch die Beobachtungsmethode nach Kapitel 6.8.12 angewendet werden. Hierbei wäre dann allerdings ein geotechnischer Sachverständiger hinzuzuziehen, um Grenzwerte und Vorgehensweisen beim Eintreten von Grenzwerten festzulegen.

7.1.4 Böschungskategorie 3

Komplexe Fälle oder Fälle, bei denen bisher wenig Erfahrungen vorliegen, sind durch ein hohes Gefährdungspotential gekennzeichnet und müssen in BK3 eingeordnet werden. Zur Bewertung der Standsicherheit erfordern sie die Hinzuziehung eines geotechnischen Sachverständigen². Die maßgebenden Bemessungssituationen sind unter Berücksichtigung aller Randbedingungen von einem geotechnischen Sachverständigen festzulegen.

Randbedingungen, die eine Einteilung in die BK3 sinnvoll machen, sind:

BöK 3 über GW

Anforderungen:

- bei benachbarten Ortschaften, sensibler Bebauung
- bei Nachnutzungskonzepten mit sensiblen Bestandteilen
- bei Flutung von Gruben
- bei Gruben in veränderlich festen Gesteinen

Empfehlungen:

- bei Grubentiefe > 20 m
- bei Anschüttungen, insbesondere geschüttet und nicht verdichtet
- bei Böschungen in seismisch aktiven Gebieten
- bei Böschungen mit temporären Schichtwässern
- bei Gewässern I. Ordnung oder Bundeswasserstraßen in der Umgebung
- wenn nach Kapitel 6.8.8 definierte rutschungsbegünstigende Verhältnisse vorliegen.

² „Sachverständiger für Geotechnik nach EASV“, DGGT e.V. Fachsektion „Erd- und Grundbau“ Empfehlung Arbeitskreis AK 2.11

BöK 3 unter GWAnforderungen:

- bei benachbarten Ortschaften, sensibler Bebauung
- Nachnutzungskonzept mit sensiblen Bestandteilen
- Flutung von Gruben durch bspw. Einleitung von Oberflächenwasser oder Wiederanstieg des Grundwassers
- Unterwasserböschungen in feinkörnigen Böden
- Unterwasserböschungen in locker gelagerten grobkörnigen Böden, die setzungsfließgefährdet sind
- Gruben in veränderlich festen Gesteinen
- bei Böden, die zur Verflüssigung neigen

Empfehlungen:

- bei Grubentiefe > 20 m
- bei Anschüttungen, insbesondere geschüttet und nicht verdichtet
- Böschungen in seismisch aktiven Gebieten
- bei Gewässern I. Ordnung oder Bundeswasserstraßen in der Umgebung
- wenn nach Kapitel 6.8.8 definierte rutschungsbegünstigende Verhältnisse vorliegen.

7.2 Erhebung von Eingangsdaten zur Standsicherheitsbewertung

Grundsätzlich hängt der Umfang der notwendigen Informationen für die Standsicherheitsbewertung einer Grubenböschung von der Kategorisierung in eine der drei Kategorien BK1, 2 oder 3 ab. Die im Folgenden dargelegte Vorgehensweise zur Dokumentation und Beschaffung von Informationen über die Grubenrandbedingungen stellen daher eine Übersicht über mögliche Quellen und Methoden dar. Der Aufwand zur Informationsbeschaffung ist je nach BöK anzupassen (siehe Checkliste in Kapitel 7.2.2).

Zur Beurteilung einer Böschungssituation unter Berücksichtigung der in Kapitel 7.1 genannten Punkte sind zunächst gründliche Erhebungen erforderlich, die in der Regel in Zusammenarbeit mit Geodäten, Geologen und Geotechnikern vorgenommen werden. Außer geometrischen Daten, die durch eine Vermessung bereitgestellt werden müssen oder sich aus einer Planung ergeben, müssen die Bodenverhältnisse geklärt werden. Die Bodenverhältnisse werden typischerweise in einem Baugrundgutachten dargestellt. Als Informationsquellen insbesondere für Gruben mit langer Betriebszeit werden zum Nachvollziehen der Grubenentwicklung von DGGT (2020) folgende Informationsquellen genannt:

- markscheiderische Altrisse
- bergmännisches Risswerk und Bergbaukartenwerk
- bergbehördliches Kartenwerk
- historische Karten und Stadtpläne
- geologische, ingenieurgeologische und hydrogeologische Karten mit Beschreibungen
- textliche und bildliche Archivalien (z.B. Behörden- und Betriebsakten)

- Literatur (z.B. Fachbuch, Heimat- und Regionalliteratur)
- historische Luftbilder
- archäologische Quellen

In Tabelle A. 4.1 ist eine weitere ausführliche Zusammenstellung möglicher Informationsquellen nach DGGT (2020) zu finden. Die darin genannten Informationsquellen gehen teilweise über das hinaus, was zur Beurteilung von Grubenböschungen benötigt wird, da sich die Zusammenstellung auch auf den untertägigen Bergbau bezieht. Geotechnisch-markscheiderische Verfahren zur Erhebung von Eingangsdaten für die Standsicherheitsbewertung sind in Tabelle A. 5.1 zusammengestellt.

Nachdem der Untergrund im Feld durch Schürfe, Bohrungen und Sondierungen aufgeschlossen ist, wird unter Berücksichtigung geologischer und geotechnischer Zusammenhänge ein Untergrundmodell erarbeitet und in Form von Profilen, Schnitten und Schichtlagerungskarten dargestellt. Außerdem ist es empfehlenswert, Abbauböschungen während der Aushubarbeiten geologisch und geotechnisch aufnehmen zu lassen, um Störungen, Wasseraustritte, ein ungünstiges Kluftgefüge im Gebirge oder andere Einflüsse auf die Standsicherheit frühzeitig erkennen zu können. Bei schonendem Abbaumethoden kann zudem ggfs. der in situ Zustand des Bodenmaterials (Dichte, Wassergehalt) bewertet werden. Angefüllte Bereiche stellen zuvor nicht erkundete Gebiete dar und müssen deshalb kontrolliert hergestellt oder nach Herstellung erkundet und vermessen werden.

Generell muss der Einfluss der Abbaumethode sowohl auf den in situ Zustand des Böschungsmaterials (z.B. Auflockerungen) sowie auf die Böschungsgeometrie (z.B. Bermen, Saugtrichter) sowie die langfristige Entwicklung der Böschungsgeometrie (z.B. Abflachung von Unterwasserböschungen) berücksichtigt werden (BODE, 2005).

Die maßgebenden bodenmechanischen und hydraulischen Eigenschaften der Schichten können durch Labor- oder Feldversuche bestimmt werden. Für den Nachweis der Standsicherheit der Grubenböschungen muss mindestens die Scherfestigkeit des jeweiligen Bodens für den in situ Zustand bestimmt werden. Wesentlicher Eingangsparameter sind dabei die Lagerungsdichte von nichtbindigen Böden und der Überkonsolidierungsgrad von bindigen Böden. Weiterhin ist zur Bestimmung der Scherfestigkeit in Laborversuchen der Spannungsbereich, den die Böden in der Böschung ausgesetzt sind, experimentell zu berücksichtigen.

Die Grundwasserverhältnisse müssen erhoben und gemeinsam mit dem Abfluss des Wassers geklärt werden. Nötig sind hydrogeologische Angaben zum Verbleib der Niederschläge, Schichtwasser, Kluftwasser, Vernässungen, Quellen, Wasserstauer. Eventuell muss ergänzend die Wasserentsorgung bergseitig stehender Häuser kontrolliert werden. Für durchsickerte Böschungen muss die maßgebende Verteilung des Porenwasserdrucks bekannt sein. Dazu kann z.B. ein Potentialliniennetz erstellt werden. Sofern in der Böschung Schichtwasser angetroffen werden, ist eine mögliche Ausbildung von Porenwasserüberdrücken in diesen Schichten infolge von z.B.

starken Niederschlagsereignissen ggfs. mit zeitgleicher Schneeschmelze zu bewerten und in der Standsicherheitsbetrachtung zu berücksichtigen.

Für Gruben im Grundwasser und für geflutete Gruben sollte ein Grundwassermodell erstellt werden, das auf dem Untergrundmodell aufbaut. Dazu sind die Grundwasserstände sowie Wasserspiegelhöhen bestenfalls bereits vor und während, auf jeden Fall aber nach der Betriebsphase zu erfassen. Mit Hilfe des Grundwassermodells können die für die Standsicherheitsbetrachtungen erforderlichen Wasserdrücke und Strömungskräfte ermittelt werden. Außerdem können im Rahmen des Nachnutzungskonzepts ggfs. anfallende Eingriffe in das Grundwasser bewertet werden.

Während der Betriebsphase ist eine regelmäßige Überprüfung von alten Abbauböschungen hinsichtlich ihrer Standsicherheit sowie hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Böschungsgeometrie sinnvoll. Zudem lässt jede Rutschung nach Aufmessen der Geometrie und Feststellung der Randbedingungen hinsichtlich äußerer Lasten und der Schichtung Rückschlüsse auf die Scherfestigkeit des abgerutschten Materials in der Bruchfuge zu. Rutschungen während der Betriebsphase sollten deshalb ggfs. unter Einbeziehung von geotechnischen Sachverständigen unter Erfassung der zum Rutschungszeitpunkt vorherrschenden Randbedingungen dokumentiert werden.

Daten, die nicht oder nicht mit vertretbarem Aufwand erhoben werden können, müssen abgeschätzt und evtl. in Bandbreiten berücksichtigt werden.

7.2.1 Auswertung der Auskunftsbögen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde bei einer Vielzahl von Grubenbetreibern der Informationsstand zu geotechnisch relevanten Randbedingungen mit Hilfe eines Auskunftsboogens abgefragt. Dies diente dazu, zu erfahren, wie der Informationsstand bei aktueller Rechtslage bei den Betreibern ist und wie auf Basis dieses, bereits ohne weiteren Aufwand für die Betreiber vorhandenen Informationen, eine Beurteilung der Grubenböschungen erfolgen kann. Der dazu verwendete Auskunftsbogen ist in Anlage A.6 angegeben.

Die Auswertung der Auskunftsbögen von 9 Gruben hat ergeben, dass die Datenlage bei den Betreibern sehr unterschiedlich ist. Einige Betreiber haben genaue Informationen zu beispielsweise Baugrund, Grundwasser und Böschungsgeometrie, während andere scheinbar kaum Daten dazu haben. In einigen Fällen ergab wohl die Analyse des Frageboogens eine eher schlechte Datenlage, wohingegen bei gezielter Nachfragen während des Ortsbesuchs die relevanten Informationen dann doch vorgelegt werden konnten.

Als Ergebnis der Befragung kann festgehalten werden, dass es in der Regel möglich ist, Kategorisierungen der BK1 und BK2 aufbauend auf Daten durchzuführen, die bei den meisten Betreibern schon vorliegen, ohne dafür für die Betreiber einen Mehraufwand zu generieren. Insbesondere bei Gruben, die der BK3 zugeordnet werden müssen und die nicht dem Bergrecht unterstehen, sind jedoch in der Regel weitere Erkundungsmaßnahmen notwendig, um einen ausreichenden Informationsstand zur Beurteilung der Gruben zu haben. Gruben, die dem Bergrecht

unterliegen und damit vom zuständigen Bergamt betreut werden, haben nach den gewonnenen Erkenntnissen durch Vorgaben des Bergamts in der Regel einen sehr guten Informationsstand über die Baugrundverhältnisse.

7.2.2 Checkliste

In der im Folgenden präsentierten Checkliste (siehe Tabelle 7.1) wird das Mindestmaß an Aufschlüssen und Informationen festgelegt, dass zur Einteilung in eine der drei Böschungskategorien und zur Bewertung der Standsicherheit der Endböschungen erforderlich ist. Dabei sei auch hier wieder darauf hingewiesen, dass diese Auflistung keinen Anspruch auf Vollständigkeit haben kann, da ortsabhängige Randbedingungen (Geologie, Hydrogeologie, Nachnutzung, etc.) unter Umständen maßgebend sind und daher berücksichtigt werden müssen.

Tabelle 7.1: Checkliste

Nr.	Information	Quelle	Erforderlich für		
			BK1	BK2	BK3
1	Nachnutzungskonzept				
	Belastung auf Böschung	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Dynamische oder zyklische Einwirkungen	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Flutung der Grube	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Ein-/Ausleitung von Wasser in den Baugrund	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Schad-/Fremdstoffeintrag	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Chemismus	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Wärmeeintrag	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Regionaler Standort				
	Seismik	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Bergbaugesamt	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Verkarstungen	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Erfahrungen aus umliegenden Gruben	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Bodenverhältnisse				
	Bodenschichtung	Erkundungsbohrung, Schürfe, Sondierungen, Qualitätsmanagement während Abbauphase	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Tabelle 7.1: Checkliste

Nr.	Information	Quelle	Erforderlich für		
			BK1	BK2	BK3
	<i>inkl. während Betriebsphase hergestellter</i>				
	<i>Böschungsbereiche: z.B. Anfüllungen, Sedi-</i>				
	<i>mentiertes Feinkorn, Dränagen, etc.</i>				
	Kornverteilungen und Klassifikation der Bodenarten nach DIN EN ISO 14688	Laborversuche	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Dichte	Sondierung, Erkundungsbohrung, Qualitätsmanagement	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Bodenstruktur	Erkundungsbohrung, indirekte Bewertung, Qualitätsmanagement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Räumliches Untergrundmodell	Aufschlüsse, Sondierungen, Laborversuche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Grundwasserverhältnisse				
4	<i>bei Nassabbau, GW-Haltung, Flutung der Grube</i>				
	GW führende Schichten unter Angabe der GW-Ganglinien	Aufschlüsse, GW-Messstellen, Qualitätsmanagement	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Ganglinien Seewasserspiegel	Messung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Durchlässigkeiten des Böschungsmaterials	Feld-, Laborversuche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Grundwassermodell	Sachverständigengutachten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	5 Scherverhalten				
	Scherfestigkeitsparameter des Böschungsmaterials unter Berücksichtigung der Dichte und des Spannungsniveaus	Erfahrungswerte, Rückrechnung Böschungsrutschungen, Feld- und Laborversuche	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Scherverhalten des Böschungsmaterials unter Berücksichtigung der Dichte, des Spannungsniveaus und der Bodenstruktur	Rückrechnung Böschungsrutschungen, Feld-, Laborversuche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Böschungsgeometrie	Vermessung, Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Abbauverfahren	Chronologische Auflistung und Zuordnung zu Bodenverhältnissen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Bisherige Standzeit der Endböschung	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

7.3 Beispielkategorisierungen

In diesem Abschnitt werden Beispiele für Kategorisierungen vorgestellt. Die ausgewählten Gruben wurden bei Ortsbesuchen begutachtet und die Betreiber waren so freundlich die verfügbaren Daten zu geotechnisch relevanten Informationen zur Verfügung zu stellen. Die Gruben werden im Folgenden aus Datenschutzgründen nicht namentlich benannt. Die Beispielkategorisierungen werden anhand der vorher vorgestellten Kriterien (siehe Abschnitt 7.1) durchgeführt. Dazu werden die vorhandenen Informationen mit Hilfe der Checkliste (siehe Tabelle 7.1) gesichtet.

7.3.1 Böschungskategorie 1 - Kiesgrube bei München

Bei der betrachteten Kiesgrube handelt es sich um eine Nassauskiesung mittels Schwimmgreifer mit Wassertiefen von ca. 9 bis 11 m. Die Grube besteht aus zwei zu beurteilenden Seen. An den nördlichen der beiden Seen grenzt mit minimal 30 m Abstand zur Böschungsschulter eine Gärtnerei an. Die beiden Seen wurden außerdem im Rahmen der Seegrundvermessung im Raum München (siehe Abschnitt 6.7.3) vermessen, was einen Vergleich der Böschungsneigungen mit Erfahrungswerten ermöglicht.

Vorliegende Informationen (Checkliste):

- Nachnutzungskonzept aus Genehmigungsplanung
- Hydrogeologische Standortbeurteilung inklusive Bohransprachen aus Grundwassermessstellen
- Informationen aus eigener Begehung und Gespräch mit Betreiber
- Laborversuche zur Bestimmung der Kornverteilung mit an der Oberfläche entnommenen Eimerproben.

Nr.	Information	Quelle	Erforderlich für		Information vorhanden?
			BK1	BK2	
1	Nachnutzungskonzept				
	Belastung auf Böschung	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Dynamische oder zyklische Einwirkungen	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Flutung der Grube	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Ein-/Ausleitung von Wasser in den Baugrund	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Schad-/Fremdstoffeintrag	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Chemismus	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	nein
	Wärmeeintrag	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-

Nr.	Information	Quelle	Erforderlich für		Information vorhanden?
			BK1	BK2	
2	Regionaler Standort				
	Seismik	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Bergbaugebiet	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Verkarstungen	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Erfahrungen aus umliegenden Gruben	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	nein
3	Bodenverhältnisse				
	Bodenschichtung <i>inkl. während Betriebsphase hergestellter Böschungsbereiche: z.B. Anfüllungen, Sementiertes Feinkorn, Dränagen, etc.</i>	Erkundungsbohrung, Schürfe, Sondierungen, Qualitätsmanagement während Abbauphase	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Kornverteilungen und Klassifikation der Bodenarten nach DIN EN ISO 14688	Laborversuche	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Dichte	Sondierung, Erkundungsbohrung, Qualitätsmanagement	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	nein
	Bodenstruktur	Erkundungsbohrung, indirekte Bewertung, Qualitätsmanagement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
	Räumliches Untergrundmodell	Aufschlüsse, Sondierungen, Laborversuche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
4	Grundwasserverhältnisse <i>bei Nassabbau, GW-Haltung, Flutung der Grube</i>				
	GW führende Schichten unter Angabe der GW-Ganglinien	Aufschlüsse, GW-Messstellen, Qualitätsmanagement	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Ganglinien Seewasserspiegel	Messung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Durchlässigkeit des Böschungsmaterials	Feld-, Laborversuche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	ja
	Grundwassermodell	Sachverständigengutachten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
5	Scherverhalten				
	Scherfestigkeitsparameter des Böschungsmaterials unter Berücksichtigung der Dichte und des Spannungsniveaus	Erfahrungswerte, Rückrechnung Böschungsrutschungen, Feld- und Laborversuche	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	nein
	Scherverhalten des Böschungsmaterials unter Berücksichtigung der Dichte, des Spannungsniveaus und der Bodenstruktur	Rückrechnung Böschungsrutschungen, Feld-, Laborversuche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
6	Böschungsgeometrie	Vermessung, Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja, aus Nachnutzungs-konzept und

Nr.	Information	Quelle	Erforderlich für		Information vorhanden? See- grund- vermes- sung
			BK1	BK2	
7	Abbauverfahren	Chronologische Auflistung und Zuordnung zu Bodenverhältnissen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
8	Bisherige Standzeit der Endböschung	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja

Bewertung der Informationslage: Die Informationslage ist hinsichtlich der sich nach einer ersten Sichtung andeutenden Kategorisierung in BK1 oder BK2 weitgehend ausreichend für eine Bewertung. Bei Kategorisierung in BK2 könnten ggf. weitere Baugrunduntersuchungen zur Erstellung einer Standsicherheitsberechnung für Böschungen notwendig werden.

Grube:

- Südlicher See:
 - Abbautiefe: ca. 11 m unter Wasser, ca. 5 m über Wasser, insgesamt 16 m
- Nördlicher See:
 - Abbautiefe: ca. 9 m unter Wasser, ca. 3 m über Wasser, insgesamt 12 m
- Genehmigung nach Wasserrecht
- Abbau mit Schwimmgreifer (unkontrolliert)
- Böschungen stehen während des Abbaus über Wasser zeitweise senkrecht.
- Informationen aus der Seegrundvermessung:
 - Böschungen im gewachsenen Lockergestein stehen seit Jahren stabil mit Neigungen von 1:2 bis 1:2,2.
 - Böschungen im gekippten Lockergestein aus Fremdmaterial stehen seit Jahren stabil mit Neigungen von 1:5,9 bis 1:6,5.
 - Böschungen im gekippten Lockergestein aus Eigenmaterial stehen seit Jahren stabil mit Neigungen von 1:3,4 bis 1:4,1.
- Nach Anschüttung der Böschungen wurden laut Betreiber keine Rutschungen beobachtet.

Nachnutzung:

- Seen und angrenzende Bereiche: Landschaftsseen / Naturschutz
- Kein allgemeiner Zugang vorgesehen.
- Südlicher See:
 - Westliche, südliche und östliche Böschung wurden/werden mit Fremdmaterial angekippt. Die Breite des Verkippungstreifens bis zu Böschungsschulter beträgt ca. 10 m.
 - Angekippt wird durch seitliches Einschieben des Abraums
 - An der nördlichen sowie Teilen der westlichen Böschung wurde Feinmaterial aus der Kieswäsche durch Einspülen abgelagert.

- Nördlicher See:
 - Nördliche, westliche und südliche Böschung wurden/werden mit Eigenmaterial angekippt. Die Breite des Verkippsstreifens bis zur Böschungsschulter beträgt ca. 10 m bis 20 m.
 - Angekippt wird durch seitliches Einschieben
 - Entlang der westlichen Böschung wurden Feinanteile aus der Kieswäsche eingespült.
- Böschungsneigungen: Unter Wasser 1:2, Flachwasserbereich ca. 1:10, über Wasser 1:2,5.
- Es werden keine Angaben dazu gemacht, wie das zu verkippende Material eingebaut werden soll.

Umgebung:

- Südlicher See: In der Umgebung des südlichen Sees befinden sich landwirtschaftlich genutzte Flächen und Gehölzflächen. Am nördlichen Ufer grenzen ehemalige Grubenflächen, die als Naturschutzflächen ohne allgemeinen Zugang genutzt werden sowie ein Feldweg an.
- Nördlicher See:
 - In 30 m Abstand zur nordöstlichen Böschungsschulter befindet sich eine Gärtnerei mit Glas-Gewächshäusern. Ein permanent bewohntes Gebäude befindet sich in ca. 125 m Abstand zur Böschungsschulter.
 - In 40 m Abstand zur südöstlichen Böschungsschulter befindet sich ein landwirtschaftliches Betriebsgebäude. Ein permanent bewohntes Gebäude befindet sich in ca. 80 m Abstand von der Böschungsschulter.
 - Am südlichen und östlichen Ufer grenzen landwirtschaftlich genutzte Flächen an. Nördlich und westlich befinden sich stillgelegte Baggerseen, die als Landschaftsseen / Naturschutz genutzt werden.

Geologie:

- Münchener Schotterebene (Abbau quartärer Kiese und Sande)
- Quartäre Kiese und Sandschicht (cl'si'saGr, si'saGr, si'Sa) zwischen ca. 503 mNN (GOF) und 487 mNN
- Bindige tertiäre Schichten (gr'saclSi) ab ca. 487 mNN

Hydrogeologie:

- Grundwasserfließrichtung von Süd nach Nord.
- Ungestörtes Grundwassergefälle 0,43%.
- Höchster Grundwasserstand im Zustrom 499,76 mNN am 12.08.2010.
- Saisonale Grundwasserschwankungen liegen im Bereich von 0,5 m.
- Mittelfristig stellt sich ein Wasserspiegel im See ein, der dem Grundwasserspiegel im Zustrom entspricht.

Kategorisierung:

Südlicher See:

Auf Basis der vorliegenden Informationen für den südlichen See spricht grundsätzlich nichts gegen eine Kategorisierung in die BK1 und die Bemessung der Grubenböschungen auf Basis von Erfahrungswerten. Zu beachten ist allerdings, dass die im Nachnutzungskonzept vorgeschlagenen Böschungsneigungen unter Wasser von 1:2 für die gekippten Böschungen aus Fremd- und Eigenmaterial sich so nicht einstellen werden. Bei Herstellung der Anschüttung durch Einschieben des Materials längs der Abbauböschung stellen sich langfristig nach Auswertung der Seegrundvermessung Böschungsneigungen von ca. 1:5,9 bis 1:6,5 in Böschungen aus Fremdmaterial und Neigungen von 1:3,4 bis 1:4,1 in Böschungen aus Eigenmaterial ein. Die unterschiedlichen Neigungen sind dadurch begründet, dass das Fremdmaterial, das aus Baugrubenaushüben etc. der Umgebung stammt, teilweise einen sehr hohen Feinkornanteil (ca. 40%) und damit geringere Scherparameter als das Eigenmaterial aufweist. Außerdem führt der hohe Feinkornanteil beim Einschieben in das Wasser zu einer verzögerten Sedimentation und damit flacheren Böschungen. Im vorliegenden Fall ist es außerdem so, dass die südliche gekippte Böschung aus Fremdmaterial eine potentielle hydraulische Barriere orthogonal zur natürlichen Fließrichtung des Grundwassers durch eine vergleichsweise niedrigere hydraulische Durchlässigkeit darstellt. Dies kann zusätzlich zu einer längerfristigen Abflachung der Böschungen führen. Dies kann jedoch aufgrund der wenig sensiblen Nachnutzung des Sees und des Umlands als unkritisch eingestuft werden. Es ist in diesem Fall aber zu empfehlen, dass die Böschung im Rahmen eines Böschungsaudits beobachtet wird, um Veränderungen zu erkennen. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Informationen aus Seegrundvermessungen, wie sie in diesem Fall vorliegen, üblicherweise nicht zu Informationen gehören, die für Gruben, die unter Wasserrecht stehen, vorliegen. Daher muss man sich in der Regel auf die Erfahrungswerte für gekippte Böschungen aus Tabelle 6.6 beziehen. Eine Wasserwechselzone sollte beim Entwurf der Endböschungen ebenfalls auf Basis von Erfahrungswerten nach Tabelle 6.7 berücksichtigt werden.

Kriterienkatalog südlicher See:

Bei Überprüfung des Kriterienkatalogs sind alle *muss*-Kriterien für die BK1 erfüllt. Lediglich bei den *soll*-Kriterien werden die Bedingungen zur Grubentiefe, der Standzeit und der Anschüttung verletzt. In Abwägung mit dem Nachnutzungskonzept und der Nutzung der Umgebung ist eine Einstufung in BK1 dennoch gerechtfertigt.

BöK 1 unter GW

Anforderungen

- homogener Baugrund, keine bindigen Schichten
- keine seismische Beanspruchung
- keine sensible Bestandsbebauung in Umgebung
- keine sensible Nachnutzung
- Langsame Lastaufbringung auf Böschung
- Flache Böschungsneigungen unter Wasser und in Wasserwechselzone.
- keine nennenswerten Grundwasserschwankungen
- Böden neigen nicht zur Verflüssigung
- Es dürfen keine nach Kapitel 6.8.8 definierte rutschungsbegünstigende Verhältnisse vorliegen.

Empfehlungen

- Grubentiefe < 10 m
- Endböschung wird langfristig nicht verändert
- Standzeit der Böschung seit Herstellung > 10 a
- keine Anschüttung
- keine Infrastruktur oder Fließgewässer I. und II. Ordnung in Umgebung

... erfüllt / vorhanden, ... nicht erfüllt, ... nicht vorhanden

Nördlicher See:

Kriterienkatalog nördlicher See:

BöK 1 unter GW

Anforderungen

- homogener Baugrund, keine bindigen Schichten
- keine seismische Beanspruchung
- keine sensible Bestandsbebauung in Umgebung
- keine sensible Nachnutzung
- Langsame Lastaufbringung auf Böschung
- Flache Böschungsneigungen unter Wasser und in Wasserwechselzone.
- keine nennenswerten Grundwasserschwankungen
- Böden neigen nicht zur Verflüssigung
- Es dürfen keine nach Kapitel 6.8.8 definierte rutschungsbegünstigende Verhältnisse vorliegen.

Empfehlungen

- Grubentiefe < 10 m
- Endböschung wird langfristig nicht verändert
- Standzeit der Böschung seit Herstellung > 10 a
- keine Anschüttung
- keine Infrastruktur oder Fließgewässer I. und II. Ordnung in Umgebung

... erfüllt / vorhanden, ... nicht erfüllt, ... nicht vorhanden

Im Fall des nördlichen Sees ist die Kategorisierung nicht so eindeutig vorzunehmen wie beim südlichen See. Dies ist bedingt durch die mit 30 m Abstand zur nordöstlichen Böschungsschulter existierende Gärtnerei und das mit 40 m Abstand zur südöstlichen Böschungsschulter angrenzende landwirtschaftliche Betriebsgebäude. Gemäß der *Richtlinie für Anlagen zur Gewinnung von Kies, Sand, Steinen und Erden* ist zu solchen Anlagen pauschal ein Abstand von 20 m einzuhalten. Da solche pauschalen Festlegungen jedoch aus geotechnischer Sicht nicht immer sinnvoll sind, sollte in diesem Fall der Baugrund und die einzuhaltende Böschungsgeometrie von einem geotechnischen Ingenieurbüro kontrolliert werden. Die östliche Grubenböschung ist daher der BK2 zuzuordnen. Die übrigen Böschungen können der BK1 zugeordnet und entsprechend bewertet werden.

Bewertung der östlichen Böschung:

Auf Basis der Kenntnis des Böschungsmaterials (angekipptes Eigenmaterial, quartäre Kiese und Sande cl'si'saGr, si'saGr, si'Sa) sowie der Böschungsgeometrie, die aufgrund der Seegrundvermessung bekannt ist, kann in diesem Fall schon eine Bewertung der Standsicherheit der Böschung vorgenommen werden. Der Reibungswinkel kann auf Basis von Erfahrungswerten für das gekippte Material zu $\varphi' = 32^\circ$ bis 35° auf der sicheren Seite abgeschätzt werden (VON SOOS, 2009). Eine Kohäsion wird bei dem gekippten Material nicht angesetzt. Die Vermessung der UW-

Böschung in diesem Bereich hat ergeben, dass die Böschungsneigungen kleiner 1:4 ($< 14^\circ$) sind. Die Neigungen der Böschung über Wasser ist kleiner 1:2 ($< 26,5^\circ$).

Bei Zugrundelegung von Designwerten des Reibungswinkels für den Grenzzustand GEO-3 Bemessungssituation „persistent“ (BS-P) (DIN 1054:2010-12)

$$\tan \varphi'_d = \frac{\tan \varphi'_k}{\gamma_{\varphi'}} = \frac{\tan 32^\circ}{1,25} = 0,5$$

$$\Rightarrow \varphi'_d = 26,56^\circ$$

gilt $\beta \leq \varphi_d$ im Böschungsbereich, womit der Standsicherheitsnachweis - wenn auch nur knapp - erbracht ist.

7.3.2 Böschungskategorie 2 - Kies- und Sandgrube in Franken

Bei der betrachteten Grube handelt es sich um eine Kies- und Sandgrube mit geringer Tiefe (3 m bis 6 m), die unter einer Wasserhaltung abgebaut wurde. Die Grube grenzt unmittelbar an ein Gewässer I. Ordnung. In der näheren Umgebung existiert sonst keine Infrastruktur abgesehen von Feldwegen.

Vorliegende Informationen (Checkliste):

- Nachnutzungskonzept aus Genehmigungsplanung
- Hydrogeologisches Gutachten
- Bohransprachen aus Grundwassermessstellen
- Absenkversuche
- Informationen aus eigener Begehung und Gespräch mit Betreiber
- Keine Informationen über Kornverteilungen des angekippten Materials

Nr.	Information	Quelle	Erforderlich für		Information vorhanden?
			BK1	BK2	
1	Nachnutzungskonzept				
	Belastung auf Böschung	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Dynamische oder zyklische Einwirkungen	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Flutung der Grube	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Ein-/Ausleitung von Wasser in den Baugrund	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Schad-/Fremdstoffeintrag	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Chemismus	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	nein
	Wärmeeintrag	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	nein

Nr.	Information	Quelle	Erforderlich für		Information vorhanden?
			BK1	BK2	
2	Regionaler Standort				
	Seismik	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Bergbaugebiet	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Verkarstungen	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Erfahrungen aus umliegenden Gruben	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	nein
3	Bodenverhältnisse				
	Bodenschichtung <i>inkl. während Betriebsphase hergestellter Böschungsbereiche: z.B. Anfüllungen, Seditimentiertes Feinkorn, Dränagen, etc.</i>	Erkundungsbohrung, Schürfe, Sondierungen, Qualitätsmanagement während Abbauphase	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	aus GWM-Bohrungen
	Kornverteilungen und Klassifikation der Bodenarten nach DIN EN ISO 14688	Laborversuche	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	nein
	Dichte	Sondierung, Erkundungsbohrung, Qualitätsmanagement	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	nein
	Bodenstruktur	Erkundungsbohrung, indirekte Bewertung, Qualitätsmanagement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
	Räumliches Untergrundmodell	Aufschlüsse, Sondierungen, Laborversuche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
4	Grundwasserverhältnisse <i>bei Nassabbau, GW-Haltung, Flutung der Grube</i>				
	GW führende Schichten unter Angabe der GW-Ganglinien	Aufschlüsse, GW-Messstellen, Qualitätsmanagement	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Ganglinien Seewasserspiegel	Messung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	nein
	Durchlässigkeit des Böschungsmaterials	Feld-, Laborversuche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
	Grundwassermodell	Sachverständigengutachten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-
5	Scherverhalten				
	Scherfestigkeitsparameter des Böschungsmaterials unter Berücksichtigung der Dichte und des Spannungsniveaus	Erfahrungswerte, Rückrechnung Böschungsrutschungen, Feld- und Laborversuche	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	nein
	Scherverhalten des Böschungsmaterials unter Berücksichtigung der Dichte, des Spannungsniveaus und der Bodenstruktur	Rückrechnung Böschungsrutschungen, Feld-, Laborversuche	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	Böschungsgeometrie	Vermessung, Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja, aus Nachnutzungs-konzept
7	Abbauverfahren	Chronologische Auflistung und Zuordnung zu Bodenverhältnissen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ja

Nr.	Information	Quelle	Erforderlich für		Information vorhanden?
			BK1	BK2	
8	Bisherige Standzeit der Endböschung	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	nein

Bewertung der Informationslage: Die Informationslage ist hinsichtlich der sich nach einer ersten Sichtung andeutenden Kategorisierung in BK1 oder BK2 weitgehend ausreichend für eine Bewertung. Bei Kategorisierung in BK2 könnten ggf. weitere Baugrunduntersuchungen zur Erstellung einer Standsicherheitsberechnung für Böschungen notwendig werden.

Grube:

- Abbauprodukt: Sand und Kies.
- Genehmigung nach Wasserrecht.
- Grubentiefe 3 m bis 6 m.
- Abbau mit Tieflöffelbagger unter Wasserhaltung.
- Böschungen während Abbau teilweise senkrecht stehend.
- Laut Betreiber wurden keine Rutschungen nach erfolgter Anschüttung beobachtet.

Nachnutzung:

- Nördlicher See: Naturschutz.
- Südlicher See: Naturschutz und am südöstlichen Ufer Angelsee.
- Angrenzende Flächen: Naturschutz, Landwirtschaft (in kleinem Teilbereich), Wasserschutz.
- Böschungen werden am westlichen und südöstlichen Ufer angekippt, teilweise mit bis zu 20 m breiten Verkippsstreifen.
- Verkippt wird nicht genutztes Eigenmaterial und Z0 Fremdmaterial.
- Es werden keine Angaben dazu gemacht, wie das zu verkippende Material eingebaut werden soll.
- Laut Betreiber wird längs des Ufers unmittelbar nach erfolgtem Abbau durch Einschieben angekippt.
- Böschungskontur wird heterogen ausgebildet, Naturschutz vorrangig.
- Böschungsneigungen: Unter Wasser 1:2, Wasserwechselzone 1:3, Flachwasserzone 1:10.

Umgebung:

- Westlich unmittelbar angrenzend Fließgewässer der I. Ordnung.
- Gemäß Nachnutzungskonzept soll ein 60 m breiter Damm zwischen Fließgewässer und Baggersee geschaffen werden. Die Dammkrone liegt ca. 1,1 m über dem Mittelwasserstand des angrenzenden Fließgewässers. Die Dammbreite während des Abbaus war auf 40 m festgelegt (20 m angekippter Streifen).
- Damm soll mit Auwald bewachsen werden.

- An nördlichen See grenzt ein Feldweg (Sackgasse) als Zugang zur landwirtschaftlich genutzten Fläche.
- Am westlichen Ufer verläuft ein Feldweg, der für den allgemeinen Zugang gesperrt werden soll (Ruhebereich für Tiere).
- Keine Bebauung, Straßen oder sensible Infrastruktur in der Umgebung der Grube.
- Südlich angrenzend befinden sich bereits stillgelegte Baggerseen.

Geologie

- Bis ca. 0,9 m Tiefe Auffüllungen und Schluffe steif bis halbfest.
- Unterhalb von ca. 0,9 m Tiefe wird der Untergrund dominiert von Fein- bis Mittelkiesen mit teilweise stark feinkörnigen Anteilen (bis zu 20%).
- Zwischengelagerte Schluff und Tonschichten.
- In ca. 7,0 m Tiefe unter GOF steht Sandstein an.

Hydrogeologie:

- Bei den holozänen und pleistozänen Lockersedimenten handelt es sich um einen \pm isotropen Porengrundwasserleiter, dessen Durchlässigkeiten nach DIN 18300/1 als „durchlässig“ bis „stark durchlässig“ einzustufen sind (k_f -Werte im Bereich 10^{-4} m/s). Der Grundwasserflurabstand liegt zwischen einem und vier Metern.
- Die Grundwasserfließrichtung im obersten Aquifer ist generell von Ost nach West gerichtet.
- Der obere Grundwasserleiter zeichnet sich durch starke natürliche Grundwasserstandsschwankungen zwischen $\pm 1,42$ m und $\pm 2,83$ m aus.
- Der Flurabstand schwankt zwischen minimal 1,57 m und maximal 4,4 m.
- Darunter folgen die Sandsteine und Letten des Sandsteins, die das nächsttiefere Grundwasserstockwerk bilden. Dieses ist als anisotroper Kluftgrundwasserleiter einzustufen, die Durchlässigkeiten liegen zwischen „schwach durchlässig“ und „durchlässig“ (k_f -Werte im Bereich 10^{-4} bis 10^{-8} m/s).
- Die gesamte Grube liegt im Überflutungsbereich eines HQ100 des angrenzenden Fließgewässers.

Kategorisierung:

Hinsichtlich der Nachnutzung des Baggersees ist dieser der BK1 zuzuordnen, da er ausschließlich für Naturschutz und als Angelsee vorgesehen ist. Zudem sind weite Teile des Ufers für den allgemeinen Zugang gesperrt. Die geringe Abbautiefe von 3 m bis 6 m deutet ebenfalls auf die BK1 hin. Im Nachnutzungskonzept sind Böschungsneigungen von 1:2 unter Wasser und 1:3 in der Wasserwechselzone definiert. Die Neigungen sind bei verkippten Böschungen einzuhalten. Auf Basis der in Kapitel 6.7.2 genannten Erfahrungswerte für verkipptes Material, das in den See eingeschoben wird, sind deutlich flachere Böschungsneigungen unter Wasser zu erwarten. Auch am betrachteten Standort ist aufgrund des Herstellprozesses der Böschungen davon auszugehen, dass sich diese deutlich flacher als 1:2 ausbilden werden. Da dieser Prozess zeitlich verzögert eintritt, ist dies unter Berücksichtigung der wenig sensitiven Nachnutzung als unkritisch zu

bewerten. Das vorgeschriebene Neigungsverhältnis von 1:3 für die Wasserwechselzone ist auch nicht als langfristig standsicher zu bewerten, sondern wird sich mit der Zeit erfahrungsgemäß weiter abflachen auf Werte von ca. 1:5 bis 1:6 (siehe Kapitel 6.7.2). Da auch diese Abflachungen zeitlich verzögert erfolgen, ist unter Berücksichtigung der geplanten Nachnutzung auch dies als unkritisch zu bewerten. Die Abflachung auf Werte kleiner 1:2 bzw. 1:3 ist auch deswegen zu erwarten, da die Böschungen aus nicht verwendetem Eigenmaterial und Fremdmaterial hergestellt werden. Das nicht verwendete Eigenmaterial wird unter Zugrundelegung der anstehenden Geologie vorwiegend feinkörnig (Ton und Schluff) sein. Auch das Fremdmaterial, das verkippt wird, ist erfahrungsgemäß häufig stark feinkörnig. Feinkörnige Materialien weisen weit geringere Reibungswinkel auf als grobkörnige Materialien und Neigen bei Verkipfung zu einer verzögerten Sedimentation unter Wasser, was zu flachen Böschungsneigungen führt. Ungünstig in Bezug auf die Böschungsstandsicherheit kann in diesem Zusammenhang auch der Aufstau von Grundwasser hinter der Verkipfung durch die reduzierte Durchlässigkeit des feinkörnigen Materials im Vergleich zum natürlich anstehenden Material sein, was zu einem höheren Potentialunterschied und Wasserdruck auf die Böschung führen kann. Dies ist im Fall der betrachteten Grube insbesondere deswegen relevant, da die natürlichen Grundwasserschwankungen mit bis zu 2,86 m groß sind und zu einem hohen Potentialunterschied führen können. Auch aufgrund dessen ist mit einer weiteren Abflachung der Grubenböschungen zu rechnen.

Einen Hinweis auf eine mögliche Einstufung in die BK2 gibt das unmittelbar angrenzende Fließgewässer I. Ordnung, das durch einen 60 m breiten und 1,1 m über dem Mittelwasser-Stand hohen Damm vom Baggersee getrennt wird. 20 m des Damms bestehen aus verkipptem Material. Die 60 m Breite des Damms erfüllen die Vorgaben zu Sicherheitsabständen zu Gewässern I. und II. Ordnung aus der *Richtlinie für Anlagen zur Gewinnung von Kies, Sand, Steinen und Erden*, wobei sie während des Abbaus unterschritten wurden. Der Baggersee und damit auch der Damm werden im Falle eines HQ100 überflutet. In diesem Fall kann es durch starke Erosion zu einem Versagen des Damms kommen. Die starke Erosion kann durch geeignete Sicherungsmaßnahmen durch entsprechenden Bewuchs weitgehend verhindert werden.

Kriterienkatalog:

Im Folgenden wird der Kriterienkatalog für die BK1 und BK2 ausgewertet, um die Einteilung eindeutiger zu machen.

BöK 1 unter GW

Anforderungen

- homogener Baugrund, keine bindigen Schichten
- keine seismische Beanspruchung
- keine sensible Bestandsbebauung
- keine sensible Nachnutzung
- Langsame Lastaufbringung auf Böschung
- Flache Böschungsneigungen unter Wasser und in Wasserwechselzone.
- keine nennenswerten Grundwasserschwankungen
- Böden neigen nicht zur Verflüssigung
- Es dürfen keine nach Kapitel 6.8.8 definierte rutschungsbegünstigende Verhältnisse vorliegen.

Empfehlungen

- Grubentiefe < 10 m
- Endböschung wird langfristig nicht verändert
- Standzeit der Böschung seit Herstellung > 10 a
- keine Anschüttung
- keine Infrastruktur oder Fließgewässer I. und II. Ordnung in Umgebung

... erfüllt / vorhanden, ... nicht erfüllt, ... nicht vorhanden

BöK 2 unter GW

Anforderungen

- bei geschichtetem Baugrund
- keine sensible Bestandsbebauung
- Nachnutzung ohne sehr sensible Bestandteile
- bei schneller Lastaufbringung auf Böschung
- bei nennenswerten Grundwasserschwankungen
- Böden neigen nicht zur Verflüssigung
- keine seismische Beanspruchung
- wenn nach Kapitel 6.8.8 definierte rutschungsbegünstigende Verhältnisse vorliegen.

Empfehlungen

- Grubentiefe < 20 m
- bei hohem Grundwassergefälle ($i > 0,1$)
- bei nennenswerter Änderung des Ist-Zustands
- bei unkontrollierter Abbaumethode
- bei Anschüttungen, insbesondere geschüttet und nicht verdichtet
- bei Infrastruktur und/oder Fließgewässern I. oder II. Ordnung in der Umgebung

... erfüllt / vorhanden, ... nicht erfüllt, ... nicht vorhanden

Unter Berücksichtigung der gegebenen Informationen und des Kriterienkatalogs wird die Grube der BöK 2 zugeordnet. Dies ist insbesondere der heterogenen Untergrundsituation, den starken

Grundwasserstandsschwankungen und der Nähe zu einem Gewässer I. Ordnung geschuldet. Damit sollten die Böschungen durch geotechnische Nachweise in ihrer Standsicherheit bestätigt werden. Alternativ und aufgrund der wenig sensiblen Nachnutzung können die Böschungen auch auf Basis von Erfahrungswerten hergestellt werden, die von einem geotechnischen Ingenieurbüro zu prüfen sind. Die zu erwartenden Böschungsabflachungen können mit Hilfe eines nach Kapitel 6.8.9 definierten Böschungsaudits kontrolliert werden und bei Bedarf und zu starker Absenkung der Böschungsschulter kann insbesondere im Bereich des Damms zwischen dem Gewässer I. Ordnung und dem Baggersee Material oberflächlich nachverkippt werden. Die Abflachungen reduzieren sich erfahrungsgemäß nach 1,0 bis 1,5 Jahren auf ein zu vernachlässigendes Maß, was den zu berücksichtigenden Kontrollzeitraum einschränkt.

Das Beispiel zeigt, dass trotz einer Einstufung in die BK2, die eine genauere Betrachtung der Böschungen vorsieht, eine Bemessung auf Basis von Erfahrungswerten erfolgen kann, solange diese von einem geotechnischen Ingenieurbüro festgelegt und überprüft werden. Dieses Verfahren vereinfacht die Bemessung, legt aber durch die Überprüfung durch Geotechniker ein höheres Sicherheitsniveau als bei BK1 fest. Dieses Vorgehen ist nur aufgrund der wenig sensiblen Nachnutzung und Umgebung der Grube möglich.

7.3.3 Böschungskategorie 3 - Tongrube in der Oberpfalz

Bei der betrachteten Grube handelt es sich um eine Tongrube mit großer Abbautiefe von bis zu 100 m. Der Ton wird trocken unter einer Wasserhaltung in der Formation des Mittleren Buntsandsteins abgebaut. Der Abbau erfolgt mittels unterschiedlicher kontrollierter Abbaumethoden. Aktuell wird mittels Tieflöffelbagger abgebaut. Die Gesamtfläche der Grube beträgt ca. 300 ha mit einer offenen Grubenfläche von ca. 200 ha. Insgesamt besteht die Grube aus mehreren Teilgruben mit insgesamt 12 in Betrieb befindlichen oder bereits stillgelegten Abbaufeldern. An die Gruben grenzen mit Abständen von ca. 30 m Wohngebiete an die Böschungsschulter an. Staatstraßen befinden sich nach Umsetzung des Nachnutzungskonzepts in Abständen von ebenfalls ca. 30 m von der Böschungsschulter. Eine Bundesstraße grenzt in 40 m Abstand an die Grube an.

Die Gruben, die nicht vollständig wiederverfüllt werden, werden nach Beendigung des Abbaubetriebs geflutet. Vorgesehen ist eine Wassereinleitung aus Grundwasser und Oberflächenwasser aus nahegelegenen Fließgewässern. So soll sichergestellt werden, dass während des Flutungsvorgangs der Wasserspiegel in den Seen immer höher ist als der Grundwasserspiegel in den umliegenden Böschungen und somit, eine Strömung in die Böschungen hinein gewährleistet ist, die keine destabilisierende Wirkung hat.

Die verbleibenden Böschungen, die im Abbau abschnittsweise mit Neigungen von bis zu 60° (1:0,58) hergestellt werden, werden vor der Flutung mit Vorschüttungen gesichert. Der dazu verwendete Abraum ist teilweise stark feinkornhaltig. Die Vorschüttung soll, außer den obersten 5 m, nicht kontrolliert eingebaut und verdichtet werden, sondern wird unkontrolliert geschüttet. Die obersten 5 m der Vorschüttung sollen verdichtet eingebaut werden.

Vorliegende Informationen (Checkliste):

- Nachnutzungskonzept aus Genehmigungsplanung
- Hydrogeologische Standortbeurteilung
- Informationen aus eigener Begehung und Gespräch mit Betreiber
- Gutachterliche Stellungnahmen zu Standsicherheit von Betriebs- und Endböschungen.
- Gutachterliche Stellungnahmen zum Einbau von Schüttungen und Verfüllung von Restlöchern.

Nr.	Information	Quelle	Erforderlich für BK3	Information vorhanden?
1	Nachnutzungskonzept			
	Belastung auf Böschung	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Dynamische oder zyklische Einwirkungen	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	-
	Flutung der Grube	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Ein-/Ausleitung von Wasser in den Baugrund	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Schad-/Fremdstoffeintrag	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	-
	Chemismus	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	-
	Wärmeeintrag	Auswertung Nachnutzungskonzept	<input checked="" type="checkbox"/>	-
2	Regionaler Standort			
	Seismik	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Bergbaugebiet	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Verkarstungen	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Erfahrungen aus umliegenden Gruben	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	nein
3	Bodenverhältnisse			
	Bodenschichtung <i>inkl. während Betriebsphase hergestellter Böschungsbereiche: z.B. Anfüllungen, Sementiertes Feinkorn, Dränagen, etc.</i>	Erkundungsbohrung, Schürfe, Sondierungen, Qualitätsmanagement während Abbauphase	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Kornverteilungen und Klassifikation der Bodenarten nach DIN EN ISO 14688	Laborversuche	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Dichte	Sondierung, Erkundungsbohrung, Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	ja

Nr.	Information	Quelle	Erforderlich für BK3	Information vorhanden?
	Bodenstruktur	Erkundungsbohrung, indirekte Bewertung, Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Räumliches Untergrundmodell	Aufschlüsse, Sondierungen, Laborversuche	<input checked="" type="checkbox"/>	nein
4	Grundwasserverhältnisse bei Nassabbau, GW-Haltung, Flutung der Grube			
	GW führende Schichten unter Angabe der GW-Ganglinien	Aufschlüsse, GW-Messstellen, Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Ganglinien Seewasserspiegel	Messung	<input checked="" type="checkbox"/>	-
	Durchlässigkeiten des Böschungsmaterials	Feld-, Laborversuche	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
	Grundwassermodell	Sachverständigengutachten	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
5	Scherverhalten			
	Scherfestigkeitsparameter des Böschungsmaterials unter Berücksichtigung der Dichte und des Spannungsniveaus	Erfahrungswerte, Rückrechnung Böschungsrutschungen, Feld- und Laborversuche	<input type="checkbox"/>	
	Scherverhalten des Böschungsmaterials unter Berücksichtigung der Dichte, des Spannungsniveaus und der Bodenstruktur	Rückrechnung Böschungsrutschungen, Feld-, Laborversuche	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
6	Böschungsgeometrie	Vermessung, Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	ja
7	Abbauverfahren	Chronologische Auflistung und Zuordnung zu Bodenverhältnissen	<input checked="" type="checkbox"/>	teilweise
8	Bisherige Standzeit der Endböschung	Qualitätsmanagement	<input checked="" type="checkbox"/>	teilweise

Bewertung der Informationslage: Die Informationslage kann für eine Einteilung in die Bök 3 als ausreichend angesehen werden. Lediglich detailliertere Informationen dazu, wo wie abgebaut wurde und wie lange die Betriebsböschungen schon stehen, fehlen. Ein räumliches Untergrundmodell ließe sich aus den vorhandenen Informationen erstellen.

Grube

- Abbauprodukt: Kaolin
- Genehmigung nach Bergrecht.
- Grubentiefe bis 100 m.
- Abbau aktuell kontrolliert mit Tieflöffelbagger im Hochschnitt unter Wasserhaltung. Früher auch mittels Lockerungssprengungen, Schaufelradbagger und Lösung durch Hochdruckwasser.
- Böschungen während Abbau abschnittsweise bis zu 60° (1:0,58) steil.

- Betriebsböschungen stehen über Jahrzehnte stabil mit Neigungen zwischen 55° und 60° . Oberflächlich bilden sich Erosionsrinnen durch ablaufendes Regenwasser mit Tiefen bis ca. 30 cm.
- Betriebsböschungen werden regelmäßig im Rahmen eines sogenannten Böschungsaudits durch Sichtkontrollen überwacht.

Nachnutzung:

- Nicht verkippte Restlöcher werden geflutet.
- Nachnutzung als Landschaftsseen, Angelseen, Badeseen, Seen zum Segeln und Surfen mit Yachthafen.
- Die Ufer werden entsprechend als Badebereiche, Naturschutzbereiche (u.a. Flachwasserbereiche), Bereiche mit Gehwegen, Bereiche mit Straßen, Bereiche mit Schrebergärten genutzt.
- Verkippte Restlöcher werden als landwirtschaftliche Nutzflächen und in einem Bereich auch für Wohnbauflächen vorgesehen.
- Endböschungen werden angekippt auf eine Neigung von 1:3. Dabei sollen die obersten 5 m (horizontal gemessen) verdichtet ($D_{Pr} \geq 95\%$) eingebaut werden. Dies dient in erster Linie der Vermeidung einer Abflachung der Böschungen während der Befüllung. Der übrige Vorschüttungskörper wird unkontrolliert gekippt.
- Die Wasserwechselzone soll mit Neigungen von 1:5 erstellt werden. In Badebereichen wird die Neigung im Bereich der Böschungsschulter auf 1:10 abgeflacht. Genaue Böschungsgeometrien liegen nicht vor.

Umgebung:

- Unmittelbar nördlich an die Grube grenzen in Abständen von ca. 30 m zur Böschungsschulter drei Ortschaften an.
- Nördlich in einem Abstand von ca. 40 m zur Böschungsschulter grenzt eine Bundesstraße
- Insgesamt 5 Staats- und Zufahrtsstraßen kreuzen die Gruben auf künstlich errichteten Schüttungen
- Südlich grenzt in ca. 300 m Abstand zum zukünftigen Ufer eine 120 m hohe Halde aus Sand an die Grube an.

Geologie:

Aus Angaben des Betreibers:

In der Lagerstätte wurden während des Perm und der Trias die Granite und Gneise des Grundgebirges einer intensiven Verwitterung ausgesetzt. Während des Buntsandstein (vor etwa 245 Mio. Jahren) wurden die Verwitterungsprodukte, vorwiegend feldspatreiche Sande (Arkosen), durch Flüsse abtransportiert und als Deltaschüttungen im Vorland abgelagert. Insbesondere während des Mittleren Buntsandstein und der Kreide setzte eine Kaolinisierung (Feldspatverwitterung) durch zirkulierende saure Grundwässer ein.

Die Lagerstätte ist nach Norden durch eine wirtschaftliche Grenze (Bebauung und zunehmende Abraumbereckung) und nach Süden durch eine geologische Grenze (Ausstreichen gegen Abraum und Kristallin) relativ scharf abgegrenzt. Im Osten bildet eine in Bohrungen nachgewiesene, Nord-Süd verlaufende Verwerfung die Vorkommensgrenze. Nach Westen ist die Abgrenzung unscharf. Hier ist die Grenzziehung eher ökonomischen Kriterien (höherer Anteil an internem Abraum) unterworfen. Ein vereinfachter geologischer Schnitt ist in Abbildung 7.2 dargestellt.

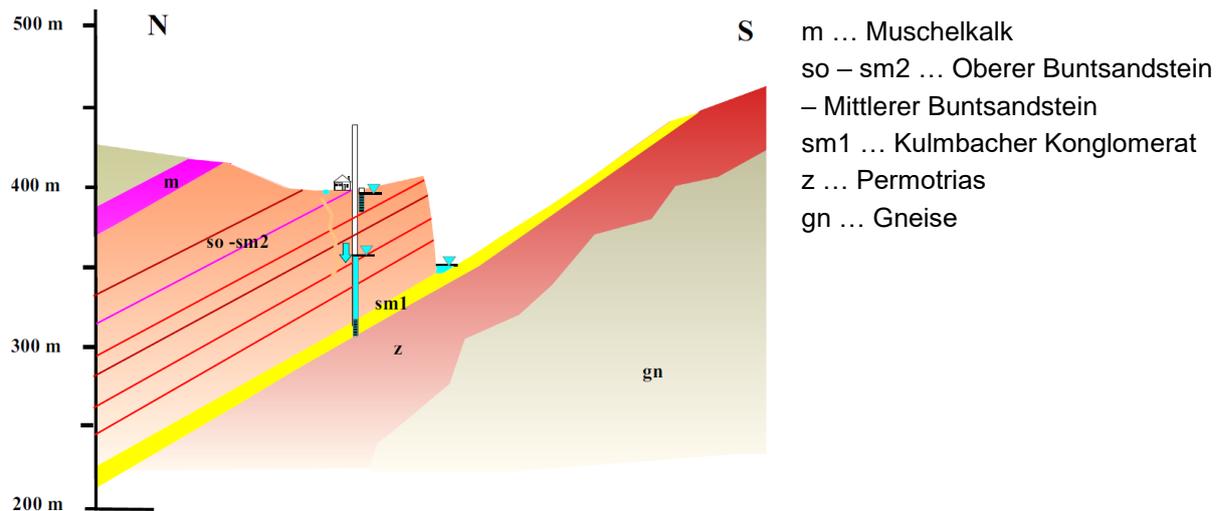


Abbildung 7.2: Vereinfachter geologischer Schnitt durch die Lagerstätte während des Abbaus

Untersuchungen an ungestörten Proben des Oberen und Mittleren Buntsandsteins ergaben Scherparameter zwischen $\varphi' = 35^\circ$ und 47° und $c' = 45 \text{ kN/m}^2$ und 290 kN/m^2 . Im Kulmbacher Konglomerat wurden Scherparameter von $\varphi' = 35^\circ$ und $c' = 40 \text{ kN/m}^2$ ermittelt. Die Parameter für verkippten Abraum wurden zu $\varphi' = 32,5^\circ$ und $c' = 29 \text{ kN/m}^2$ bestimmt.

Hydrogeologie:

- Die maximalen Absenkungen der Grundwasserspiegel werden vorwiegend im Hauptbuntsandstein und im Kulmbacher Konglomerat am Grubenrand registriert.
- Im Oberen Buntsandstein wird keine Absenkung durch den Tagebau registriert, auch nicht an den Grubenrändern der aktiven Tagebaue.
- Die Grundwasserstände der Trinkwasserbrunnen der Wasserversorger in der Umgebung bewegen sich im Monitoringzeitraum 1999 bis 2017 innerhalb der wetter- und entnahmebedingten Grundwasserspiegelschwankungen. Sie zeigen keine signifikante Beeinflussung durch den fortschreitenden TGB.

Kategorisierung:

Die Kategorisierung der Tongrube in der Oberpfalz ist ein eindeutiger Fall. Es kommt hier nur die Böschungskategorie BK3 in Frage. Dies liegt an der sensiblen Nachnutzung, der sensiblen Infrastruktur und Wohnbebauung in der Umgebung, der Geologie mit teils veränderlich festen Gesteinen, der großen Grubentiefe und den aufgrund der Flutung u.U. vorliegenden Rutschungsbe-

günstigen Verhältnissen. Damit sind, wie sich der folgenden Auflistung entnehmen lässt, nahezu alle muss-Kriterien und die meisten soll-Kriterien für BK3 unter Wasser erfüllt. Auch wenn aufgrund der Größe der Gewinnungsstelle mit diversen Teilgruben nicht an allen Stellen alle der unten angegebenen Kriterien zutreffen, so ist es in dieser Grube jedoch nicht möglich für verschiedene Böschungen unterschiedliche Böschungskategorien zu vergeben, da überall einige muss-Kriterien für BK3 zutreffen.

BöK 3 unter GW

Anforderungen

- bei benachbarten Ortschaften, sensibler Bebauung
- Nachnutzungskonzept mit sensiblen Bestandteilen
- Flutung von Gruben durch bspw. Einleitung von Oberflächenwasser oder Wiederanstieg des Grundwassers
- Unterwasserböschungen in feinkörnigen Böden
- Unterwasserböschungen in locker gelagerten grobkörnigen Böden, die setzungsfließgefährdet sind
- Gruben in veränderlich festen Gesteinen
- bei Böden, die zur Verflüssigung neigen

Empfehlungen

- bei Grubentiefe > 20 m
- bei Anschüttungen, insbesondere geschüttet und nicht verdichtet
- Böschungen in seismisch aktiven Gebieten
- bei Gewässern I. Ordnung oder Bundeswasserstraßen in der Umgebung
- wenn nach Kapitel 6.8.8 definierte rutschungsbegünstigende Verhältnisse vorliegen.

... erfüllt / vorhanden, ... nicht erfüllt, ... nicht vorhanden

Die Beurteilung der Standsicherheit der Endböschungen benötigt hier die Hinzuziehung eines geotechnischen Sachverständigen und eine langfristige und schon während des Abbaus stattfindende Planung des Endzustands und der notwendigen Gestaltungsmaßnahmen der Endböschungen.

Im vorliegenden Fall wurde dies auch so umgesetzt und von langer Hand in Zusammenarbeit mit geotechnischen Sachverständigen der Endzustand geplant. Dazu zählen umfangreiche Feld- und Laboruntersuchungen des anstehenden Bodens, eine genaue Langzeitbeobachtung der hydrogeologischen Verhältnisse und umfangreiche Standsicherheitsberechnungen für den Endzustand basierend auf den im Labor und Feld ermittelten Baugrundparametern.

8 Anforderungen an die Böschungen

Je nach Nachnutzung der Grube oder Böschung werden unterschiedliche Anforderungen an die maximal tolerierbaren Verformungen im Bereich der Böschungsschulter gestellt.

wenig sensible Nachnutzung:

⇒ oberflächliche kleine Rutschungen oder Abbröckeln der Böschung, die zu weiterer Abflachung führen sind zulässig. Tiefgreifende Kinematiken und großflächiges Abrutschen müssen ausgeschlossen sein.

Nachnutzung mittlerer Sensibilität:

⇒ keine weitere Abflachung und daher auch keine oberflächlichen Rutschungen zulässig!

Sensible Nachnutzung:

⇒ keine weitere Abflachung und daher auch keine oberflächlichen Rutschungen zulässig!

In der festgelegten Kategorisierung in BK1, 2 und 3 (siehe Kapitel 7) ist eine Bemessung der Böschung nach Erfahrungswerten nur in der BK1 vorgesehen. Bei BK2 und BK3 muss der Standsicherheitsnachweis durch Standsicherheitsberechnungen geführt werden. Alternativ kann hier bei begründeten Fällen auch die Beobachtungsmethode nach Kapitel 6.8.9 angewendet werden.

8.1 Böschungskategorie 1

In Tabelle 8.1 und Tabelle 8.2 werden Erfahrungswerte für Böschungsneigungen in gewachsenem Lockergestein und gekipptem Lockergestein über Wasser in Abhängigkeit von der Boden- gruppe nach DIN 18196:2011 festgelegt, die in BK1 angewendet werden können. Die BK1 limitiert die Böschungshöhe auf 10 m, daher werden die Erfahrungswerte nur bis zu dieser Böschungshöhe angegeben.

Erfahrungswerte, die zur Bemessung von Unterwasserböschungen, der Wasserwechselzone und des Sicherheitsabstands an der Böschungsschulter verwendet werden können, sind in Kapitel 6.7.2 in Tabelle 6.5, Tabelle 6.6 und Tabelle 6.7 angegeben.

Tabelle 8.1: Grenzwerte der Generalneigung für Böschungen der BK1 über Wasser in gewachsenem Lockergestein und bei kontrolliertem Abbau, abgeleitet aus Erfahrungswerten der DIN 1055:2010 Teil-2, sowie dem Merkblatt Böschungen im Lockergestein des Sächsischen Oberbergamtes und der Bemessung einfacher Böschungen ohne Porenwasserdruck nach TAYLOR (1948)

	Bodengruppe nach DIN 18196:2011	Konsistenz	Grenzwert für Böschungsneigung			
			h ≤ 5 m	5 m < h ≤ 10 m	h ≤ 5 m	5 m < h ≤ 10 m
nichtbindig						
	GE, GW, GI, SE, SW, SI, GU, GT, SU, ST	-	34°		1/1,5	
bindig*	UL	steif	30°	28°	1/1,7	1/1,9
		halbfest	40°	32°	1/1,2	1/1,6
	UM	steif	35°	27,5°	1/1,4	1/1,9
		halbfest	45°	34°	1/1,0	1/1,5
	TL	steif	32,5°	27°	1/1,6	1/2,0
		halbfest	45°	32,5°	1/1,0	1/1,6
	TM	steif	45°	27,5°	1/1,0	1/1,9
		halbfest	45°	30°	1/1,0	1/1,7
TA	steif	41°	22,5°	1/1,2	1/2,4	
	halbfest	45°	32°	1/1,0	1/1,6	

* Anmerkung: Für Böden mit breiiger oder weicher Konsistenz ist die Angabe von Erfahrungswerten schwierig. Böden dieser Konsistenz führen in der Regel auch zu einer Einstufung in BK2 oder 3 und damit ist eine Bemessung auf Basis von Erfahrungswerten nicht mehr möglich.

Tabelle 8.2: Grenzwerte der Generalneigung für Böschungen der BK1 über Wasser in gekipptem Lockergestein und / oder bei unkontrolliertem Abbau, abgeleitet aus Erfahrungswerten der DIN 1055:2010 Teil-2

	Bodengruppe nach DIN 18196:2011	Lagerungsdichte / Konsistenz	Grenzwert für Böschungsneigung	
			h ≤ 10 m	h ≤ 10 m
nichtbindig	GE, GW, GI, SE, SW, SI, GU, GT, SU, ST	locker	25°	1/2,2
		mitteldicht	27°	1/2,0
		dicht	29°	1/1,8
bindig*	UL	steif bis halbfest	23°	1/2,4
	UM	steif bis halbfest	18°	1/3,0
	TL	steif bis halbfest	18°	1/3,0

Tabelle 8.2: Grenzwerte der Generalneigung für Böschungen der BK1 über Wasser in gekipptem Lockergestein und / oder bei unkontrolliertem Abbau, abgeleitet aus Erfahrungswerten der DIN 1055:2010 Teil-2

	Bodengruppe nach DIN 18196:2011	Lagerungsdichte / Konsistenz	Grenzwert für Böschungsneigung	
	TM	steif bis halbfest	14°	1/4,0
	TA	steif bis halbfest	12°	1/4,7

* Anmerkung: Bindige Böden steifer bis halbfester Konsistenz werden selten verkippt, da sie an anderer Stelle höherwertig wiederverwendet werden können. Für Böden mit breiiger oder weicher Konsistenz ist jedoch die Angabe von Erfahrungswerten schwierig. Böden dieser Konsistenz führen in der Regel auch zu einer Einstufung in BK2 oder 3 und damit ist eine Bemessung auf Basis von Erfahrungswerten nicht mehr möglich.

Die Sicherheitsabstände ab Böschungsschulter in der BK1 können sich aufgrund der wenig sensiblen Nachnutzung und Umgebung der Grube an den in Kapitel 5.5.3.1 pauschal angegebenen Abständen aus den *Richtlinien für Anlagen zur Gewinnung von Kies, Sand, Steinen und Erden* orientieren.

8.2 Böschungskategorie 2

In der BK2 müssen die Bewertungen der Böschungen durch eine Standsicherheitsberechnung oder qualifizierte Festlegung von Erfahrungswerten der Neigung durch ein geotechnisches Ingenieurbüro erfolgen. Eine Festlegung der Böschungsneigung auf Basis der genannten Erfahrungswerte ist nicht zulässig. Auch Festlegungen der Breiten der Sicherheitsabstände ab Böschungsschulter müssen auf Basis einer Standsicherheitsberechnung oder qualifizierten Beurteilung erfolgen. Dies kann im Vergleich zu den pauschalen Festlegungen der Böschungsneigung und Sicherheitsabstände in der BK1 auch zu höheren Neigungen bzw. geringeren notwendigen Sicherheitsabständen führen, da die Erfahrungswerte der BK1 naturgemäß konservativ festgelegt sind. Dies kann zu einer besseren Ausnutzung der Lagerstätte und zu wirtschaftlichen Vorteilen für den Betreiber führen. Ein Gebrauchstauglichkeitsnachweis hinsichtlich maximaler zulässiger Verformungen der Böschungen und angrenzender Bereiche, wie er beispielsweise in der Bök 3 häufig notwendig ist, kann in der BK2 in der Regel entfallen. Hinweise zur Berechnung der Standsicherheit von Böschungen der BK2 unter und über Wasser werden in Kapitel 6.7 und 6.5 gegeben.

8.3 Böschungskategorie 3

Auch in der BK3 muss der Bewertung der Böschungen durch eine Standsicherheitsberechnung oder qualifizierte Festlegung von Böschungsneigungen erfolgen. Bei der Planung des Endzustands der Grube ist, wie bereits in Kapitel 7.1.4 erwähnt, ein geotechnischer Sachverständiger³ hinzuzuziehen. Die Böschungen müssen aufgrund der sensiblen Nachnutzung und/oder Umgebung neben der grundsätzlich erforderlichen Standsicherheit auch häufig hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit bemessen werden. Dazu sind maximal zulässige Verformungen im Bereich der Böschungen festzulegen und mit geeigneten Methoden nachzuweisen. Da einfache analytische Berechnungsverfahren bei komplexeren Baugrundverhältnissen insbesondere auch bei bindigem Baugrund keine Verformungsprognose von Böschungen und anliegenden Oberflächen ermöglichen, sind hier unter Umständen komplexere Bemessungsverfahren anzuwenden, die eine besondere geotechnische Erfahrung voraussetzen. In Frage kommen hier beispielsweise Verformungsprognosen mittels der Methode der Finiten Elemente. Hinweise zur Berechnung der Standsicherheit von Böschungen der BK3 unter und über Wasser werden in Kapitel 6.7 und 6.5 gegeben.

³ „Sachverständiger für Geotechnik nach EASV“, DGGT e.V. Fachsektion „Erd- und Grundbau“ Empfehlung Arbeitskreis AK 2.11

9 Böschungsgestaltung im Vorhinein

Wenn der Endzustand der Grubenböschungen schon während des Abbaus und der Teilverfüllung einer Grube geplant wird, kann die Böschung gezielt gestaltet werden, um Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsanforderungen zu erfüllen. Die meisten Grubenböschungen werden zur Herstellung des Endzustands angekippt, um Vorgaben hinsichtlich Neigung und Sicherheitsabstand zur Nachbarschaft zu erfüllen. Der Aufwand, der hierbei betrieben wird, hängt unmittelbar mit der Sensitivität der Nachnutzung zusammen. Nachnutzungen wie Naturschutz oder Landschaftsseen verlangen geringere Anforderungen an die Böschungen und insbesondere verfüllte Bereiche als sensible Nachnutzungen wie Wohnbebauung, Infrastruktur oder Nutzung der Flächen bspw. zur Erzeugung elektrischen Stroms aus Windenergie.

Im Folgenden werden Gestaltungsmöglichkeiten für Grubenböschungen, die schon während der Abbau- und Verkipphungsphase in Frage kommen, erläutert. Dabei wird für gekippte Böschungen unterschieden zwischen dem Einbau unter Wasser und dem Einbau oberhalb des Grundwasserspiegels.

9.1 Einbau unter Wasser

Möglichkeiten des Einbaus von Abraum unter Wasser sind Einspülen, Einschleiben oder qualifizierter Einbau durch gezieltes Einbringen bestimmter Schüttgüter beispielsweise mit Hilfe von Schüttröhren. Insbesondere das Einspülen von Sand und Schlack wurde schon häufig im Rahmen von Hafenbau- oder Landgewinnungsmaßnahmen umgesetzt. Die so entstehenden Flächen müssen nachträglich zur Beschleunigung der Konsolidation und Vorwegnahme von Verformungen mittels Überlastschüttungen und / oder Vertikaldrainagen versehen werden (ABWASSESTECHNISCHE VEREINIGUNG e.V., 2004).

Relevantere Einbaumöglichkeiten bei Gruben sind das Einschleiben oder das qualifizierte Einbauen mittels Schüttrohr. Dies ist insbesondere dadurch begründet, dass der verkippte Abraum sehr heterogen, häufig nicht zum Einspülen geeignet und stark bindig ist. Die bindigen Anteile können dabei alle Konsistenzen von breiig bis fest haben, die sich, je nach Einbauart, währenddessen ändern können. Im Folgenden wird aufgrund ihrer Relevanz näher auf die Einbaumöglichkeiten mittels Einschleiben und den qualifizierten Einbau eingegangen.

9.1.1 Einschleiben am Grubenrand

Das Schütten vom Rand der Kiesgrube ist eine einfache und kostengünstige Möglichkeit, den Einbau unterhalb des Grundwasserspiegels vorzunehmen und stellt eine sehr häufig angewendete Einbauart dar. Dabei wird das Material in der Regel durch einen LKW böschungsnah abgeladen und dann mittels Radlader oder Raupe über die Böschungskante geschoben, so dass das Material unkontrolliert die Böschungsflanke hinunterrutscht. Bei Einbau unter dem Grundwasserspiegel kommt es dabei zum einen zu einer Separierung des Materials, da Feinanteile wesentlich länger brauchen, um zu sedimentieren. Zum anderen wird das Material vollständig von Wasser

durchspült, was zu einer hohen Wassersättigung und bei feinkörnigen Materialien zum Aufweichen und in der Folge zu einer Verringerung der Konsistenz führt. Aufgrund der durch den Einbringvorgang geringen Lagerungsdichte und des hohen Sättigungsgrads in Kombination mit einer häufig geringen hydraulischen Durchlässigkeit des Materials, ist während der Herstellung und bei Belastung durch eventuelle Bebauung mit großen und unter Umständen lange anhaltenden Konsolidationssetzungen zu rechnen. Der zeitliche Verlauf der Konsolidationsvorgänge, die dabei eintretenden Verformungen und die folglich zu erwartende Verbesserung der bodenmechanischen Eigenschaften des Verfüllkörpers im Grundwasserbereich sind u.a. von folgenden Randbedingungen abhängig:

- Steifigkeit des Verfüllkörpers im Grundwasserbereich unmittelbar nach Herstellung
- Durchlässigkeitsbeiwert des Verfüllkörpers im Grundwasserbereich
- Mächtigkeit des überlagernden Verfüllkörpers und sonstiger setzungswirksamer Spannungen
- Dauer der Konsolidation
- Länge des Abflusswegs des auszupressenden Porenwassers

Zusätzlich zu den hohen zu erwartenden Konsolidationssetzungen können Verfüllkörper aus vorwiegend feinkörnigem Material eine hydraulische Barriere im Grundwasserleiter bilden, was zu einem Aufstau desselben und einem böschungsendestabilisierenden höheren hydraulischen Gradienten führen kann.

Bei vorab bekannten Nachnutzungen mit erhöhten Anforderungen an die Verformungen des Baugrunds sollte diese Einbauart möglichst vermieden werden und eine Verfüllung qualifiziert eingebaut werden (siehe Kapitel 9.1.2). Wenn dies nicht in Frage kommt, kann durch gezielten Einbau nichtbindigen Verfüllmaterials die Konsolidation beschleunigt und ein nachteiliger Grundwasseranstau vermieden werden (siehe Abbildung 9.1). Dies ist allerdings mit einem erheblichen Aufwand verbunden, da entsprechendes Verfüllmaterial, das filterstabil zu den angrenzenden Verfüllmassen sein muss, in großen Mengen vorgehalten werden muss, um es in regelmäßigen Abständen in den Verfüllkörper einbringen zu können. Weitere Maßnahmen, die zur nachträglichen Verbesserung eines eingeschobenen Verfüllkörpers ergriffen werden können, werden in Kapitel 10 erläutert.

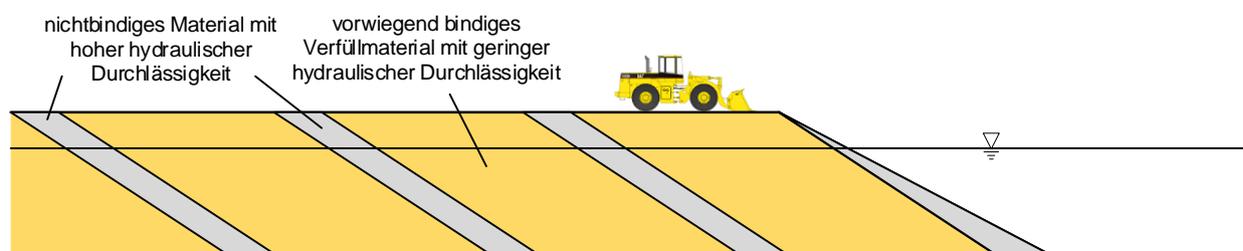


Abbildung 9.1: Längsschnitt durch Randverkipfung an Baggersee mit Einbau von Drainagerippen aus grobkörnigem Material

9.1.2 Qualifizierter Einbau

Als Alternative zum Einschleiben vom Grubenrand kommt das gezielte Einbringen und Absetzen der Bodenmaterialien auf der Grubensohle und damit eine qualifizierte Einbringung in Frage. Denkbar ist hierfür der Einsatz eines großformatigen Schüttrohres das auf dem Seegrund aufsetzt und das Verfüllgut durch Ziehen des Rohres unmittelbar und schichtweise auf dem Seegrund abgelegt wird. Denkbar ist ggf. auch der Einsatz einer umgekehrt laufenden Förderschnecke. Die Vor- und Nachteile dieser Einbaumethode gegenüber dem Schütten über die Kante werden nachfolgend diskutiert.

Wie bereits erwähnt sind beim Einschleiben des Verfüllmaterials die eingebrachten bindigen Böden während des Absinkens nahezu vollständig dem Grundwasser ausgesetzt, können so ungehindert Wasser aufnehmen, was folglich zu einer deutlichen Konsistenzveränderung der bindigen Bestandteile führt und den Zerfall fester und halbfester Tonbrocken begünstigt. Ziel einer qualifizierten Einbringung (z.B. mittels Schüttrohr) ist das Erreichen günstigerer bodenmechanischer Eigenschaften des Verfüllkörpers im Grundwasserbereich, zum Beispiel indem ein Zerfall halbfester und fester bindiger Brocken während der Einbringung ins Grundwasser und während der Liegezeit im Grundwasser verhindert wird. Dies ist zu erwarten, wenn halbfeste und feste Tonbrocken schon vor dem Einbringen in einer Matrix aus Sand und Ton eingebettet sind und in entsprechender Zusammensetzung auch gezielt und kompakt (ohne Entmischung) eingebracht werden. So würde die für den Wasserzutritt zur Verfügung stehende Oberfläche und der Porenraum verringert, was die Möglichkeit der Wasseraufnahme zunächst verlangsamt und bei zunehmender Überschüttung verhindert. Ein Zerfall der halbfesten und festen Tonbrocken wäre stark reduziert.

Die bodenmechanischen Eigenschaften der entstehenden grobstückigeren Schüttung im Grundwasserbereich wären weniger mit einem bindigen Boden zu vergleichen, sondern vielmehr mit einem gemischtkörnigen Boden, bei dem das grobkörnige Korngerüst aus festen und halbfesten Tonbrocken besteht. Es ist zu erwarten, dass die Steifigkeiten eines solchen Verfüllkörpers nennenswert über denen liegen, die durch ein Einschleiben des Schüttgutes zu erreichen sind. Diese würde zu geringeren Verformungen bei Lasteintragungen führen.

Wenn es also möglich ist, die Wasseraufnahme während des Einbaus zu reduzieren, könnten Maßnahmen zur Beschleunigung der Konsolidation verringert, ggf. sogar vermieden werden und eine Bebaubarkeit der Fläche schneller realisiert werden.

Durch die Möglichkeit einer punktuellen gezielten Einbringung besteht die Option, bestimmte Bodenarten (z.B. Sande) als Drainagen an vorab definierte Stellen zu platzieren. Auch könnte eine evtl. erforderliche Zwischenschicht zur Gewährleistung einer horizontalen Durchlässigkeit in den Verfüllvorgang gezielt integriert werden.

9.2 Einbau oberhalb des Grundwasserspiegels

Die Randbedingungen beim Einbau oberhalb des Grundwasserspiegels sind im Vergleich zum Unterwassereinbau grundlegend verschieden. Für den Einbau der Aushubmassen oberhalb des Grundwasserspiegels ist die erdbautechnische Verwendbarkeit zu beurteilen. Dabei wesentliche Fragestellungen sind die Zusammensetzung der einzubauenden Böden und deren bodenmechanischen Eigenschaften. Es wird empfohlen bei entsprechend sensibler Nachnutzung, den Aufbau des Verfüllkörpers oberhalb des Grundwasserspiegels nach den Regeln der Erdbautechnik mit entsprechendem Einbau und anforderungsgerechter Verdichtung herzustellen, um spätere Setzungs- und Tragfähigkeitsunterschiede zu minimieren.

Wenn das Verfüllgut in einer Grube sowohl unterhalb als auch oberhalb des Grundwasser eingebaut wird, ist es anzustreben, für den Verfüllkörper oberhalb des Grundwassers eine möglichst hohe Steifigkeit zu erzielen, um die aus dem Verfüllbereich oberhalb des Wasser resultierenden Setzungen zu minimieren und Setzungen aus dem Bereich unter Wasser auszugleichen. Dies bedingt unter anderem Böden mit zu hohen Wassergehalten schon vor dem Einbau zu verbessern. Außerdem sollte der Verfüllbereich oberhalb des Grundwasserspiegels von dem im Grundwasserbereich durch eine wasserdurchlässige grobkörnige Zwischenschicht (Sand oder Kies) getrennt sein. Diese Zwischenschicht wirkt als Flächendrän und Kapillarsperre und muss zu den über- und unterlagernden bindigen Böden filterstabil ausgebildet werden.

Ein Möglichkeit Ankippungen über Wasser vor Flutung einer Grube qualifiziert einzubauen, um das Abflachen bei Flutung zu verhindern, ist die Teilverdichtung. Hierbei kann der Hauptverfüllkörper unverdichtet gekippt werden und ein festzulegender oberflächennaher Bereich verdichtet werden. Dies verhindert, dass während des Flutungsvorgangs, der je nach Grubengröße Monate oder Jahre dauern kann, die Böschungen durch Wellenschlag oder Wasserstandsschwankungen abflachen. Eine Erhöhung der Gesamtstandsicherheit der Böschung wird mit dieser Einbaumethode allerdings nicht erzielt.

10 Böschungsgestaltung im Nachhinein

Wenn sich die Nachnutzung einer Grube im Endzustand erst nach Beendigung des Betriebs und der Abbau- und Auffüllarbeiten ändert, können die Böschungsbereiche nur nachträglich verbessert werden. Dies wird den weitaus häufigeren Fall darstellen, da sich eine qualifizierte Herstellung der Böschungen und der Verfüllbereiche in der Regel für einen Betreiber wirtschaftlich nicht darstellen lässt. Zur nachträglichen Verbesserung bieten sich verschiedene je nach Sensibilität der Nachnutzung auszuwählende Methoden an. Hierzu zählen Verfahren zur Oberflächen- und Tiefenverdichtung, die im Folgenden näher erläutert werden.

10.1 Tiefenverdichtung

Rüttelstopf- und Rütteldruckverdichtung

Die klassischerweise in Lockergesteinen zur Tiefenverdichtung zum Einsatz kommenden Verfahren sind die Rütteldruckverdichtung (RDV) und die Rüttelstopfverdichtung (RSV) nach DIN EN 14731. Bei letzterer gibt es eine Reihe unterschiedlicher Ausführungsvarianten wie beispielweise vermörtelte Säulen oder geokunststoffummantelte Säulen. Abbildung 10.1 zeigt die Kornverteilungsbereiche, in denen RDV und RSV prinzipiell zum Einsatz kommen können. Während RSV über einen weiten Bereich von Schluff bis Kieskorn einsetzbar ist, kann RDV nur bei nichtbindigen Böden eingesetzt werden. Bei RDV wird über einen Tiefenrüttler der Baugrund durch Vibrationen um den Verdichtungspunkt herum verdichtet und die an der Oberfläche entstehende Absenkung, die aufgefüllt und nachverdichtet werden müssen, um ein gleichmäßiges Planum zu erstellen. Vibrationsverdichtung ist nur bei nichtbindigen Bodenarten mit Feinanteilen < 10% möglich. Bei RSV hingegen wird der Baugrund durch den Rüttler verdrängt und der Hohlraum mit Schotter oder ähnlichem Material aufgefüllt, so dass säulenartige Trag- und Drainageelemente entstehen. In manchen Fällen kann auch eine Kombination aus RDV und RSV zum Einsatz kommen. Dies bietet sich beispielsweise bei der Gründung von Windenergieanlagen an, bei denen unmittelbar unterhalb des Flachfundaments eine Kombination aus RDV und RSV und in angrenzenden Bereich nur noch RDV zum Einsatz kommen können (MORITZ, 2020). Vorab zum großmaßstäblichen Einsatz sollten für beide Verdichtungsarten Vorversuche durchgeführt werden, um die jeweils vor Ort erreichbare Verdichtungswirkung zu bestimmen.

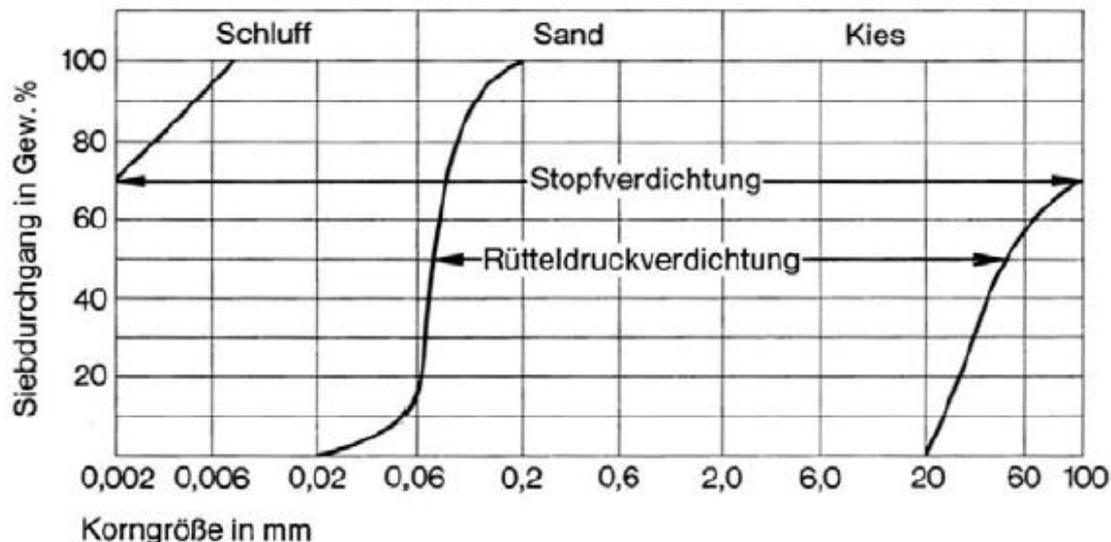


Abbildung 10.1: Kornverteilungsbereiche zur Anwendung von Rütteldruck- und Rüttelstopfverdichtung (MAYBAUM *et al.*, 2011)

Sprengverdichtung

Sprengverdichtung wird im Bereich von Tagebaukippen des Braunkohletagebaus eingesetzt. Insbesondere bei Verflüssigungsgefahr oder Setzungsfließgefahr der Kippen bietet sich die Sprengverdichtung zur Verbesserung an. Dabei werden über Bohrlöcher Sprengladungen in den Untergrund eingebracht und unterirdisch gezündet. Die Sprengung führt zu einem Porenwasserüberdruck wodurch ein gezieltes Setzungsfließen ausgelöst wird und sich der Boden verdichtet und setzt. Das Verfahren kann nur unterhalb des Grundwasserspiegels ausgeführt werden. Das Verfahren kann nicht zur Herstellung eines kontrolliert homogenen Verdichtungskörpers eingesetzt werden, sondern nur zur Prävention von Setzungsfließerscheinungen. Bei Bebauung nach Sprengverdichtung muss in der Regel eine Nachverdichtung vorgenommen werden, um homogene Baugrundverhältnisse zu garantieren.

Das Verfahren ist verhältnismäßig kostengünstig, kann jedoch aufgrund der massiven Erschütterungen nicht im Bereich bestehender Infrastruktur eingesetzt werden.

10.2 Oberflächenverdichtung

Zur Oberflächenverdichtung bieten sich Walzen oder die Fallgewichtsverdichtung an, die auch eine gewisse Tiefenwirkung entfalten können.

Fallgewichtsverdichtung

Die Fallgewichtsverdichtung wird auch dynamische Intensivverdichtung genannt. Dabei werden Gewichte mit 30 bis 50 t im freien Fall aus bis zu 40 m Höhe fallengelassen und so der darunter

liegende Baugrund verdichtet (PRINZ & STRAUß, 2012). Neben dem Fallgewicht können auch sogenannte Impulsverdichter, ähnlich einer Ramme, zum Einsatz kommen. Der Verdichtungsprozess kann mehrere Male an vorbestimmten Punkten im Baufeld durchgeführt werden und so eine Verdichtung bis zu 10 m Tiefe erreicht werden. Ähnlich wie bei der RSV entstehen an der Oberfläche Trichter die verfüllt und nachverdichtet werden müssen. Vorab zum großmaßstäblichen Einsatz sollten Vorversuche durchgeführt werden, um die jeweils vor Ort erreichbare Verdichtungswirkung zu bestimmen. Grundsätzlich ist diese Verdichtungsmethode auch nur bei nichtbindigen Böden einsetzbar.

Oberflächenverdichtung mittels Walze

Die häufigste Form der Oberflächenverdichtung ist die Walzenverdichtung. Die Verdichtung erfolgt mittels Eigenwicht des Verdichtungsgerätes, sowie durch die entstehende Vibration der Bandagen. Die Tiefenwirkung beläuft sich auf ca. 60 cm (MAYBAUM *et al.*, 2011) bis ca. 1,0 m. Sollten Kippenkörper mit größeren Mächtigkeiten verdichtet werden müssen, wäre das Material lagenweise einzubauen und zu verdichten. Dies ist jedoch bei Herstellung eines tiefen Kippenkörpers mit großem Aufwand verbunden. Häufig kommt die Oberflächenverdichtung mittels Walze in Kombination mit Tiefenverdichtungsverfahren zum Einsatz, um die Geländeoberfläche, an der die Tiefenverdichtungsverfahren in der Regel keine Verdichtungswirkung haben, nachzuverdichten.

11 Darstellung und Bewertung der erzielten Ergebnisse und ihrer praktischen Anwendbarkeit, durch praxisorientierte Umsetzbarkeit.

Die Erläuterung der praxisorientierten Umsetzbarkeit der erzielten Ergebnisse erfolgt im zu diesem ausführlichen Forschungsbericht gehörigen Handbuch, in dem die Ergebnisse in zusammengefasster und anwendungsorientierter Weise dargestellt werden.

12 Schlussbemerkung

Die in diesem Schlussbericht vorgeschlagenen Methoden zur Kategorisierung und Bewertung von Grubenböschungen basieren auf Vorgehensweisen bei der Bewertung von Grubenböschungen aus anderen Bundesländern, den Erkenntnissen aus Gesprächen mit Betreibern und Genehmigungsbehörden in Bayern, der eigenen Beurteilung von Gruben, der Vermessung und Auswertung von Vermessungsdaten aus Nassgewinnungen und der Berücksichtigung des geotechnischen Stands des Wissens hinsichtlich Böschungsstabilität.

Die beschriebenen Vorgehensweisen sind ein Versuch die teilweise gegenläufigen Interessen der maximalen Ausbeutung der Rohstoffvorkommen und möglichst wirtschaftlichen Förderung der Rohstoffe auf der einen Seite und auf der anderen Seite das allgemeine Interesse an stand-sicheren und gebrauchstauglichen Grubenböschungen in Einklang zu bringen. Da Grubenböschungen keine geotechnischen Bauwerke im klassischen Sinne sind, sondern vielmehr ein Nebenprodukt aus der Rohstoffgewinnung, ist es nicht immer zielführend die geotechnischen Standards und Normen uneingeschränkt anzuwenden. Es muss eine Abwägung zwischen den Interessen der Betreiber sowie der Notwendigkeit der Rohstoffförderung und dem geforderten Umfang der Sicherungsmaßnahmen getroffen werden. Dazu dienen die in diesem Bericht entwickelten Böschungskategorien, auf deren Basis eine Standsicherheits- sowie ggf. Gebrauchstauglichkeitsbewertung der Grubenböschung je nach Nachnutzung und geotechnischer Komplexität durchgeführt werden kann. Das beschriebene Vorgehen soll insbesondere Genehmigungsbehörden dienen, in denen das notwendige geotechnische Fachwissen nicht immer vorhanden sein kann, um selbstständig die Beurteilung vorzunehmen. Es soll die Genehmigungsbehörden befähigen Grubenböschungen kategorisieren zu können sowie je nach Komplexität der Randbedingungen zu wissen, wann eine Unterstützung durch entsprechendes Fachpersonal wie ein geotechnisches Ingenieurbüro oder einen geotechnischen Sachverständigen hinzugezogen werden sollte.

Die Hoffnung ist, den Betreibern so mehr Sicherheit bei Stilllegung der Gruben und dem Verantwortungsübergang bzw. nach der Entlassung aus der Aufsichtspflicht zu geben und den Genehmigungsbehörden eine Handlungsanweisung zu geben, mit der das grundsätzliche Interesse stabiler und gebrauchstauglicher Grubenböschungen sichergestellt werden kann, ohne einen unangemessen hohen Aufwand betreiben zu müssen.

Danksagung

Für die Zusammenarbeit, die fachlichen Diskussionen und die Bereitstellung von Daten und Kontakten zu Grubenbetreibern bedanken wir uns herzlich bei Herrn Benedikt Chlosta und Herrn Rainer Zimmer (Bayer. Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie), Herrn Markus Kügler (Bayerisches Landesamt für Umwelt), Frau Stephanie Gillhuber (Bayeri-

scher Industrieverband Baustoffe, Steine und Erden e.V.), Frau Svenja Kahl (Bergamt Südbayern), Herrn Johann Eicher (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr), Herrn Daniel Kaminski und Herrn Hubert Posset (Amberger Kaolinwerke Eduard Kick GmbH & Co. KG), Prof. Dr. Matthias Reimann (Knauf Gruppe) und Herrn Dr. Andreas Hofmann (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz).

Für die Möglichkeit Seegrundvermessungen an ausgewählten Baggerseen durchführen zu können bedanken wir uns außerdem herzlich bei der Ebenhöf GmbH & Co Kies- u. Sandwerke KG und der Rohrdorfer Sand und Kies GmbH.

Literatur

- Abwassertechnische Vereinigung and E.V. (2004) *Merkblatt ATV – M 362-2, Umgang mit Baggergut, Teil 2: Fallbeispiele.*
- Aderhold, G. (2001) *Standsicherheit von hessischen Tagebauen*, Zeitschrift für angewandte Geologie, 47(1), pp. 34–37.
- Angerer, L. (2020) *Experimental evaluation of the suction-induced effective stress and the shear strength of as-compacted silty sands*. Technische Universität München.
- BAW (2011) *BAW Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen.*
- Bergbehörde, O. (1985) *Arbeitshinweise für die Gestaltung von Unterwasserböschungen bei der Gewinnung aus dem Wasser in der Steine- und Erdenindustrie. - Anweisungen und Mitteilungen der Bergbehörde der Deutschen Demokratischen Republik.*
- Bilz, P. and Vieweg, J. (1993) *Zur Größe der Kapillarkohäsion von Sanden*, Geotechnik1, 16, pp. 65–71.
- Bishop, A. W. (1954) *The use of the slip circle in the stability analysis of slopes*, in Proceedings of European Conference on Stability Earth Slopes. Stockholm, pp. 1–13.
- Bode, G. (2005) *Zur Ausbildung und Gestaltung von Böschungssystemen bei der Gewinnung von Sand und Kies Entwicklung eines Planungssystems*, Dissertation, Universität Hannover.
- Böttger, M. (1978) *Böschungsschäden und ihre Verhinderung in Kiesgruben. Dargestellt an Beispielen aus dem Oberrheingebiet*, Garten und Landschaft, 88(3), pp. 160–166.
- Böttger, M. (1983) *Die Böschungsgestaltung in Baggerseen der Sand- und Kiesvorkommen des mittleren Oberrheingebietes*, Caroleinea, 4, pp. 21–32.
- Brandl, H. (2015) *Vom Grundbau zur Bodenmechanik - von der Bodenmechanik zur Geotechnik*, in Aktuelle Forschung in der Bodenmechanik 2015, Tagungsband zur 2. Deutschen Bodenmechanik Tagung. Bochum: Schanz, T., Hettler, A., pp. 3–23.
- Cui, Y.-J. and Delage, P. (2009) *Water Balance and Evapotranspiration Monitoring in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils, pp. 171–186.
- Delage, P., Audiguier, M., Cui, Y.-J. and Howat, M. D. (2008) *Recent Developments in the Techniques of Controlling and Measuring Suction in Unsaturated Soils*, in Toll, D. G., Augarde, C. E., Gallipoli, D., and Wheeler, S. J. (eds) Unsaturated Soils. Advances in Geo-Engineering (E-Unsat 2008). Durham, pp. 33–52.
- Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (2020) *Geotechnisch-Markscheiderische Untersuchung, Bewertung und Sanierung Von Altbergbaulichen Anlagen - Empfehlungen des Arbeitskreises 4. 6 Altbergbau*. Newark: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, A. und A. e. V. D. (1992) *Gestaltung und Nutzung von Baggerseen - Baggerseen durch Abrabung im Grundwasserbereich. - Regeln zur Wasserwirtschaft. 4th edn*. Hamburg, Berlin: Paul Parey.
- Dingethal, F.-J., Jürging, P., Kaule, G. and Weinzierl, W. (1985) *Kiesgrube und Landschaft. 1st edn*. Hamburg, Berlin: Paul Parey.
- Engel, J. and Lauer, C. (2017) *Einführung in die Boden- und Felsmechanik: Grundlagen und Berechnungen*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG.
- FGSV (2020) *Merkblatt Böschungen im Lockergestein M BLG*.
- Floss, R. (1997) *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau ZTVE-StB 94*, Kommentar mit Compendium Erd- und Felsbau.
- De Groot, M. B. (1988) *The interaction between soil, water and bed or slope protection*, in Kolkman (ed.) Modelling Soil-Water-Structure Interactions. Rotterdam: A. A. Balkema.
- Gudehus, G., Keßler, J. and Lucke, B. (2015) *Setzungsfliessen*, Geotechnik, 38(4), pp. 255–266.
- Heyne, K.-H. and Meixner, H. (1992) *Probleme der Bergbausicherheit in Nasstagebauen*, Neue Bergbautechnik, 22(3/4), pp. 83–88.
- Horn, A. (1969) *Der Gleichgewichtszustand von Kiesgruben unter Grundwasser. Zulässiger Grenzabstand bei Baggerungen*, Wasser und Boden, 8, pp. 237–239.

- Katzenbach, R. (2013) *Böschungsbewegung in Nachterstedt am 18.07.2009. Zusammenfassende Darstellung der durchgeführten Maßnahmen und der Bewertung der Ergebnisse der Ursachenforschung*, in Gutachten im Auftrag der LMBV – Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH. Senftenberg.
- Köhler, H.-J. (1989) *Messung von Porenwasserüberdrücken im Untergrund*, Mitteilungsblatt der BAW, 66.
- Krey, H. D. (1926) *Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes*. Berlin: Verlag W. Ernst u. Sohn.
- Maybaum, G., Mieth, P., Oltmanns, W. and Vahland, R. (2011) *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau. Baugrund - Baugruben - Baugrundverbesserung - Pfahlgründungen - Grundwasserhaltung. 2*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Meyer, H. and Fritz, L. (2001) *Unterwasserböschungen aus Sicht der Bodenmechanik*, Zeitschrift für angewandte Geologie, 47(1), pp. 4–7.
- Moritz, T. (2020) *Untersuchung zu Gründungskonzepten für Großwindenergieanlagen auf Tagebaukippen mit wirtschaftlicher Baukostenbetrachtung*. Technische Universität München.
- Otto, F. and Frommenkord, B. (2001) *Sanderosion als Ursache von Böschungsbrüchen*, Zeitschrift für angewandte Geologie, 47(1), pp. 28–31.
- Patzold, V. and Bode, G. (2001) *Herstellung und Ausbildung von Unterwasserböschungen in Baggerseen*, Zeitschrift für angewandte Geologie, 47(1), pp. 17–22.
- Prinz, H. and Strauß, R. (2012) *Ingenieurgeologie. 5*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- van Rhee, C. and Bezuijen, A. (1993) *Influence of seepage on stability of sandy slope*, Journal of Geotechnical Engineering, 119(12), pp. 2006–2007.
- Richwien, A. (2005) *Untersuchungen zur Standsicherheit von Unterwasserböschungen aus nichtbindigen Böden*, Dissertation, Technische Universität Clausthal.
- Runge, S. (2003) *Grundsatzuntersuchung zur Neigung von Unterwasserböschungen*. Universität Hamburg-Harburg.
- Scharek, G. and Müller, W. (1997) *Genehmigungsverfahren für Anlagen zur Gewinnung von Steinen und Erden im Überblick*, Bundesverband Steine und Erden.
- Schubert, K. (1972) *Böschungen: Dämme, Halden, Kippen*. Leipzig.
- Von Soos, P. (2009) *Eigenschaften von Boden und Fels; ihre Ermittlung im Labor*, in Grundbautaschenbuch. 7th editio. Berlin: Ernst & Sohn.
- Taylor, D. W. (1948) *Fundamentals of Soil Mechanics*. New York: Wiley.
- Triantafyllidis, T. (2013) *Gutachterliche Stellungnahme zu Standsicherheitsberechnungen mit Ansatz von 'Erdbebenbeschleunigungen für Böschungen im Rheinischen Braunkohlenbergbau'*.
- Umweltministerium, N. (2003) *Leitfaden zur Zulassung des Abbaus von Bodenschätzen unter besonderer Berücksichtigung naturschutzrechtlicher Anforderungen - Graue Reihe*. Hannover.
- Wagenbreth, O. (1970) *Beitrag zur Bestimmung der Größe der Kapillarkohäsion nichtbindiger Böden*. TU Dresden.
- Yao, Y.-S., Zheng, J.-L., Chen, Z.-S., Zhang, J.-H. and Li, Y. (2016) *Field Measurements and Numerical Simulations of Temperature and Moisture in Highway Engineering Using a Frequency Domain Reflectometry Sensor*, Sensors, 16(6), p. 857.
- Zweck, H. and Lehmann, G. (1971) *Qualmwasserverhältnisse bei flussnahen Kiesgruben und Standsicherheit der Böschungen*, Die Bautechnik, 48(8).

Anhang

A.1 Verfahrenstechnik: Abbaumethoden für Unterwasserböschungen

Tabelle A. 1.1: Gewinnungsgeräte bei der Nassgewinnung

Abbaumethode	kontrolliert / unkontrolliert	Box-Cut Baggerung möglich?
Wurfkübelbagger	kontrolliert bis unkontrolliert	nein
Schrapper	kontrolliert	nein
Eimerkettenbagger	kontrolliert	ja
Schwimmgreifer	unkontrolliert	ja
Saugbagger	unkontrolliert	ja
Tieflöffelhydraulikbagger	unkontrolliert	ja
Stelzenpontonbagger	unkontrolliert	ja

Tabelle A. 1.2: Gewinnungsgeräte bei der Trockengewinnung

Abbaumethode	kontrolliert / unkontrolliert
Eimerkettenbagger	kontrolliert
Tieflöffelhydraulikbagger im Tiefschnitt	kontrolliert
Tieflöffelhydraulikbagger im Hochschnitt	kontrolliert
Radlader	unkontrolliert
Schaufelradbagger	kontrolliert bis unkontrolliert
Raupe	kontrolliert bis unkontrolliert

A.2 Sicherheitsbeiwert nach Bodenart und Grundwassergefälle nach BODE (2005)

Tabelle A. 2.1: Sicherheitsbeiwert η_{tab} nach Bodenart und Grundwassergefälle (BODE, 2005 Tabelle 43)

Bodenkennwerte		Grundwassergefälle i		
Reibungswinkel φ' [°]	Feuchtwichte γ [kN/m ³]	0,10	0,05	0,00
30	18,5	0,88	0,94	1,00
30	19,0	0,89	0,94	1,00
30	19,5	0,89	0,94	1,00
32,5	18,5	0,89	0,94	1,00
32,5	19,0	0,89	0,94	1,00
32,5	19,5	0,90	0,94	1,00
32,5	20,5	0,91	0,95	1,00
32,5	21,5	0,92	0,95	1,00
35	19,5	0,91	0,96	1,00
35	20,5	0,92	0,96	1,00
35	21,5	0,92	0,96	1,00
35	22,0	0,92	0,96	1,00
35	23,5	0,93	0,96	1,00
37,5	19,5	0,92	0,96	1,00
37,5	20,5	0,92	0,96	1,00
37,5	21,5	0,93	0,96	1,00
37,5	22,0	0,93	0,97	1,00
37,5	23,5	0,94	0,97	1,00
40	20,5	0,93	0,97	1,00
40	22,0	0,94	0,97	1,00
40	23,5	0,94	0,97	1,00

A.3 Gestaltung von Bermen an Böschungsschultern (Sicherheitsabstände) nach BODE (2005)

$$b_{erf} = \sum t_{h,i}$$

mit b_{erf} ... erforderliche Bermenbreite
 t_h ... horizontale Baggertoleranz

A.3.1 Berücksichtigung von Baggertoleranzen

Tabelle A. 3.1: Richtwerte zu Baggertoleranzen in der Horizontalen t_h in Abhängigkeit von der Ausführung der Gewinnung (BODE, 2005 Tabelle 49)

Gewinnungsgerät	t_h [cm]	t_h [cm]
	Box-Cut Baggerung	unkontrollierte Baggerung
Eimerkettenbagger	25	150
Stelzenpontonbagger	25	150
Schwimmgreiferbagger	250	500
Grundsaugbagger	150	250
Druckwasseraktivierter Saugbagger	150	250
Traktorkettensaugbagger	150	250
Schneidkopfsaugbagger	25	150
Schneidradsaugbagger	25	150
Druckluftbagger	150	250
Landgestützter Eimerkettenbagger	25	150
Tieflöffelhydraulikbagger	25	150
Wurfkübelbagger	Ausführung nicht möglich	250
Schrapper		250

Tabelle A. 3.2: Richtwerte zu Baggertoleranzen in der Horizontalen t_h in Abhängigkeit von der Ausführung der Gewinnung bei Wassertiefen > 30 m (BODE, 2005 Tabelle 50)

Gewinnungsgerät	t_h [cm]
Schwimmgreiferbagger	1000
Grundsaugbagger	500
Druckwasseraktivierter Saugbagger	500
Schneidkopfsaugbagger	300
Schneidradsaugbagger	300
Druckluftbagger	600

Tabelle A. 3.3: Richtwerte zu Baggertoleranzen in der Horizontalen t_h beim Auftreten einer Querströmung mit Strömungsgeschwindigkeiten von $\leq 1,5$ m/s (BODE, 2005 Tabelle 51)

Gewinnungsgerät	t_h [cm]		
	50	75	100
Eimerkettenbagger	50	75	100
Eimerinhalt [m ³]	0,05 – 0,20	0,20 – 0,50	0,50 – 0,80
Stelzenpontonbagger	50	75	100
Löffelinhalt [m ³]	1,80 – 4,50	4,50 – 7,50	7,50 – 12,00
Schwimmgreiferbagger	25	50	75
Greiferinhalt [m ³]	0,50 – 2,00	2,00 – 4,00	4,00 – 7,00
Grundsaugbagger	50		
Druckwasseraktivierter Saugbagger	50		
Traktorkettensaugbagger	50		
Schneidkopfsaugbagger	50	75	100
Kopfdurchmesser [m]	0,75 – 1,50	1,50 – 2,50	2,50 – 3,50
Schneidradsaugbagger	50	75	100
Raddurchmesser [m]	1,25 – 2,00	2,00 – 3,50	3,50 – 5,00
Druckluftbagger	50		

Tabelle A. 3.4: Richtwerte zu Baggertoleranzen in der Horizontalen t_h beim Auftreten von Wind und Wellengang mit Wellenhöhen von $\geq 0,5$ m und Wellenlängen von $\geq 5,0$ m (BODE, 2005 Tabelle 51)

Gewinnungsgerät	t_h [cm]		
	25	50	75
Eimerkettenbagger	25	50	75
Eimerinhalt [m ³]	0,05 – 0,20	0,20 – 0,50	0,50 – 0,80
Stelzenpontonbagger	25	50	75
Löffelinhalt [m ³]	1,80 – 4,50	4,50 – 7,50	7,50 – 12,00
Schwimmgreiferbagger	25	50	75
Greiferinhalt [m ³]	0,50 – 2,00	2,00 – 4,00	4,00 – 7,00
Grundsaugbagger	50		
Druckwasseraktivierter Saugbagger	50		
Traktorkettensaugbagger	50		
Schneidkopfsaugbagger	25	50	75
Kopfdurchmesser [m]	0,75 – 1,50	1,50 – 2,50	2,50 – 3,50
Schneidradsaugbagger	25	50	75
Raddurchmesser [m]	1,25 – 2,00	2,00 – 3,50	3,50 – 5,00
Druckluftbagger	50		

A.3.2 Berücksichtigung der Saugbaggerung nach BODE (2005)

Für Böden mit Suffosionspotential (GW bis GI nach DIN 18196) bei Saugbaggerung mit Saugrohren DN400 bis DN800 und Verharrung des Lösewerkszeugs am Böschungsfuß.

$$t_h \cong 5 \text{ m}$$

A.4 Geotechnisch-markscheiderische Untersuchung und Bewertung von Altbergbau (DGGT, 2020, Seite 9), Zusammenstellung der Informationsquellen

Tabelle A. 4.1: Zusammenstellung der Informationsquellen

1	Karten	
1.1	Landeskartenwerke	
1.1.1	Topografische Karten 1:10000 / 1:25000 / 1:50000	Landesvermessungsämter
1.1.2	Deutsche Grundkarte 1:5000 DGK / TK5 / Höhenflurkarte	Landesvermessungsämter
1.1.3	Ausgabe Staat / Volkswirtschaft	Landesvermessungsämter
1.2	Historische Karten	
1.2.1	Karten des Deutschen Reiches	Institut für angewandte Geodäsie
1.2.2	Karten der Landesaufnahme	Verm.- und Katasterämter, Landesarchive; Stiftung Preußischer Kulturbesitz
1.2.3	Karten der einzelnen Bergbauregionen	Verzeichnis der FABERG
1.3	Katasterkarten	
1.3.1	Aktuelles Kartenwerk des Katasters / Liegenschaften	Kataster / Vermessungsämter
1.3.2	Alte Flurkarten	Kataster / Vermessungsämter
1.3.3	Uraufnahme	Kataster / Vermessungsämter
1.4	Stadtpläne	
1.4.1	Historische Stadtpläne	Stadtverwaltung / Stadtarchiv
1.4.2	Aktuelle Stadtpläne	Stadtverwaltung / Stadtarchiv
1.5	Geologie	
1.5.1	Geologisches Kartenwerk (mit Beschreibungen)	Geologische Landesämter, geologische Dienste
1.5.2	Profile und Schnitte	Geologische Landesämter, geologische Dienste
1.6	Bergmännisches Risswerk	
1.6.1	Risswerk	
1.6.1.1	Urrisse / Zulegerisse	Bergbehörden / Staatsarchive
1.6.1.2	Grubenbild	Bergbehörden / Unternehmen
1.6.1.3	Sonstige Unterlagen	Bergbehörden / Unternehmen
1.6.2	Betriebliche Risse, Karten und Pläne	
1.6.2.1	Betriebspunktrisse	Unternehmen

1.6.2.2	Lagerstättenarchive	Unternehmen
1.6.2.3	Borlochprofile	Unternehmen
1.6.3	Behördlich erforderliche Risse, Karten und Pläne (z.B. Betriebsplanunterlagen)	
1.6.4	Bergbehördliche Kartenwerke	Bergbehörden
1.6.4.1	Mutungsübersichtskarten	Bergbehörden
1.6.4.2	Berechtsamskarten	Bergbehörden
1.6.4.3	Karte der Tagesöffnungen des Bergbaus	Bergbehörden
1.6.4.4	Karte des oberflächennahen Abbaus	Bergbehörden
1.6.4.5	Karte der Tagesbrüche / der nicht bergbaulichen Tagesöffnungen	Bergbehörden
1.6.4.6	Übersichtskarte der bergschadenkundlichen Analysen Gefährdungsabschätzungen	Bergbehörden
2	Luftbilder	
2.1	Aktuelle	Landesvermessungsamt, Kommunen
2.2	Historische	Landesvermessungsamt, Kommunen
3	Sonstiges	
3.1	Betriebsakten (z.B. Abschlussbetriebspläne)	Zuständige Behörden
3.2	Ergebnisse bisher durchgeführter Untersuchungs- und Sicherungsmaßnahmen, Gefährdungsabschätzungen	Bergbehörden, Unternehmer, Fachstellen, Kommunen, Private
3.3	Firmenchroniken	Unternehmen, Archive
3.4	Ortschroniken	Gemeinden, Heimat- bzw. Geschichtsvereine
3.5	Rissarchive	Rissarchive der Länder
3.6	Mündliche Aussagen / Beschreibungen von Zeitzeugen	Anwohner
3.7	Revierbeschreibungen / Zeitungen	Büchereien
3.8	Fotografien	Gemeinden, Heimat- bzw. Geschichtsvereine, Private

A.5 Geotechnisch-markscheiderische Untersuchung und Bewertung von Altbergbau (DGGT, 2020, Seite 34), Verfahren und Anwendungsbereiche geotechnisch-markscheiderischer Untersuchungsmethoden

Tabelle A. 5.1: Zusammenstellung der Informationsquellen

	Verfahren	Anwendungsbereiche
Markscheiderische Messungen	Lage- und Höhenvermessung	Lagepläne Schnitte Digitale Geländemodelle
	Überwachungsmessungen	Punktlagemessungen Riss- und Spaltbreitenmessungen Neigungsmessungen Kovergenzmessungen Extensometermessungen Inklinometermessungen
	Sonstige Messungen	Photogramm. Messungen Laserscanning u.a.
Felduntersuchungen	Kartierungen	Ingenieurgeologische Pläne Kluftmessungen Gebrigsklassifikation
	Direkte Aufschlüsse	Bohrungen Schürfe u.a.
	Indirekte Aufschlüsse	Geophysik Ramm- und Drucksondierungen
	Bohrloch- / Pegelmessungen	Grundwasserverhältnisse Durchlässigkeiten Geophysikalische Messungen
Laboruntersuchungen	Beschreibende Kennwerte	Z.B. Dichte, Wassergehalt, Kornverteilung, Plastizitätsgrenzen, Quell- und Schrumpfvermögen, Glühverlust
	Festigkeitskennwerte	Druck- und Zugfestigkeiten, Scherfestigkeitsparameter
	Verformungskennwerte	Steifezahl, Verformungsmodul, Poissonzahl Längs- und Scherwellengeschwindigkeit

A.6 Auskunftsbogen zur Datenakquise

Firma

Ansprechpartner

Telefon

Email

Bezeichnung und Lage der Grube bzw. des Tagebaus (ggfs. Adresse)?

Welches Abbauprodukt?

Unterliegt der Abbau dem Bergrecht?

Ja Nein

Grube/Tagebau noch in Betrieb?

Ja Nein

Außer Betrieb seit (Jahr):

Wiederverfüllt? ja nein teilweise

*Art und Weise
der Wiederverfüllung:*

Abbau über Wasser oder unter Wasser?

Über Wasser ohne Wasserhaltung

Über Wasser mit Wasserhaltung

Unter Wasser

Anmerkungen:

Abbauverfahren?

Verfahren:

Anmerkungen:

Aktuelle Bilder der Grube oder des Tagebaus

Bild 1

Bild 2 (optional)

Liegen fließende Gewässer in unmittelbarer Umgebung bzw. sind stark schwankende Grundwasserpegel bekannt?

Ja

Nein

Liegen erschütterungsintensive Gewerbe in unmittelbarer Umgebung?

Ja

Nein

Liegen Verkehrsstraßen unmittelbarer Umgebung?

Ja

Nein

Geohydrologische Aufschlüsse?

Rotationskernbohrung

Ja

Nein

Rammkernbohrung

Ja

Nein

Kleinbohrungen

Ja

Nein

Bohrlochrammsondierung

Ja

Nein

Rammsondierung

Ja

Nein

Drucksondierung

Ja

Nein

Flügelsondierung

Ja

Nein

Bohrlochaufweitungsversuch

Ja

Nein

Schürfe

Ja

Nein

Grundwassermessstellen

Ja

Nein

Wasserdurchlässigkeitsversuche

Ja

Nein

Liegen Angaben zur Dichte des Böschungsmaterials vor?

Ja

Nein

Rutschungen in eigener Grube oder Nachbargruben beobachtet?

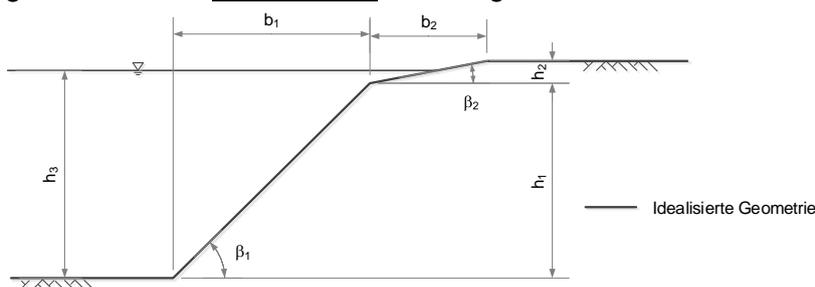
- | | | | | |
|-----------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| Während Betriebsphase | kleinflächig, lokal | <input type="checkbox"/> | großflächig, global | <input type="checkbox"/> |
| Nach Betriebsphase | kleinflächig, lokal | <input type="checkbox"/> | großflächig, global | <input type="checkbox"/> |
| In Nachbargruben | kleinflächig, lokal | <input type="checkbox"/> | großflächig, global | <input type="checkbox"/> |

Abflachung der Böschungsneigungen beobachtet?

- | | | | | |
|-----------------------|----|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| Während Betriebsphase | Ja | <input type="checkbox"/> | Nein | <input type="checkbox"/> |
| Nach Betriebsphase | Ja | <input type="checkbox"/> | großflächig, global | <input type="checkbox"/> |

Aktuelle Böschungsgeometrie: Unterwasserböschungen?

Bitte machen Sie anhand von unten gegebener Skizzen Angaben zu den aktuellen Böschungsgeometrien der Unterwasserböschungen. Schätzwerte können angegeben werden.



Böschung 1 (Zustrombereich Grundwasser, sofern bekannt):

- | | | |
|---------|---------|-------------|
| $b_1 =$ | $h_1 =$ | $\beta_1 =$ |
| $b_2 =$ | $h_2 =$ | $\beta_2 =$ |
| $h_3 =$ | | |

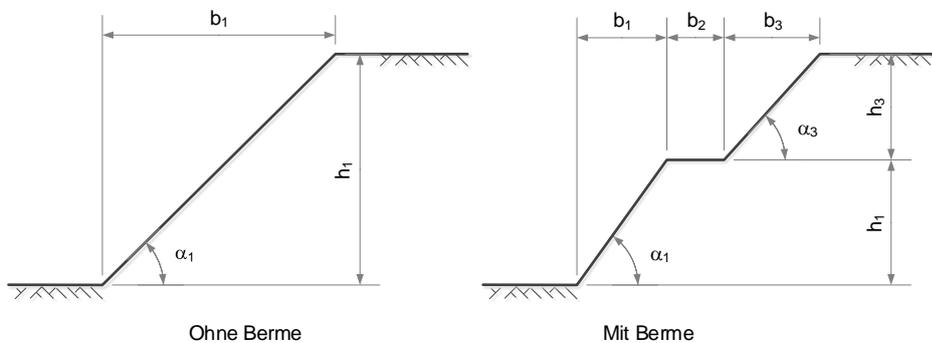
Böschung 2 (Abstrombereich Grundwasser, sofern bekannt):

- | | | |
|---------|---------|-------------|
| $b_1 =$ | $h_1 =$ | $\beta_1 =$ |
| $b_2 =$ | $h_2 =$ | $\beta_2 =$ |
| $h_3 =$ | | |

Weitere Böschungsgeometrien, sofern vorliegend, bitte unter Angabe oder Abschätzung der Maße entsprechend skizzieren.

Aktuelle Böschungsgeometrie: Überwasserböschungen

Bitte machen Sie anhand von unten gegebener Skizzen Angaben zu den aktuellen Böschungsgeometrien der Überwasserböschungen. Schätzwerte können angegeben werden.



Böschung ohne Berme:

$b_1 =$

$h_1 =$

$\alpha_1 =$

Böschung mit Berme:

$b_1 =$

$h_1 =$

$\alpha_1 =$

$b_2 =$

$b_3 =$

$h_3 =$

$\alpha_3 =$

Weitere Böschungsgeometrien, sofern vorliegend, bitte unter Angabe oder Abschätzung der Maße entsprechend skizzieren.

Anmerkungen/Verbesserungsvorschläge zum Auskunftsbogen

A.7 Standsicherheitsberechnung: Einfluss Schnitt und Neigung

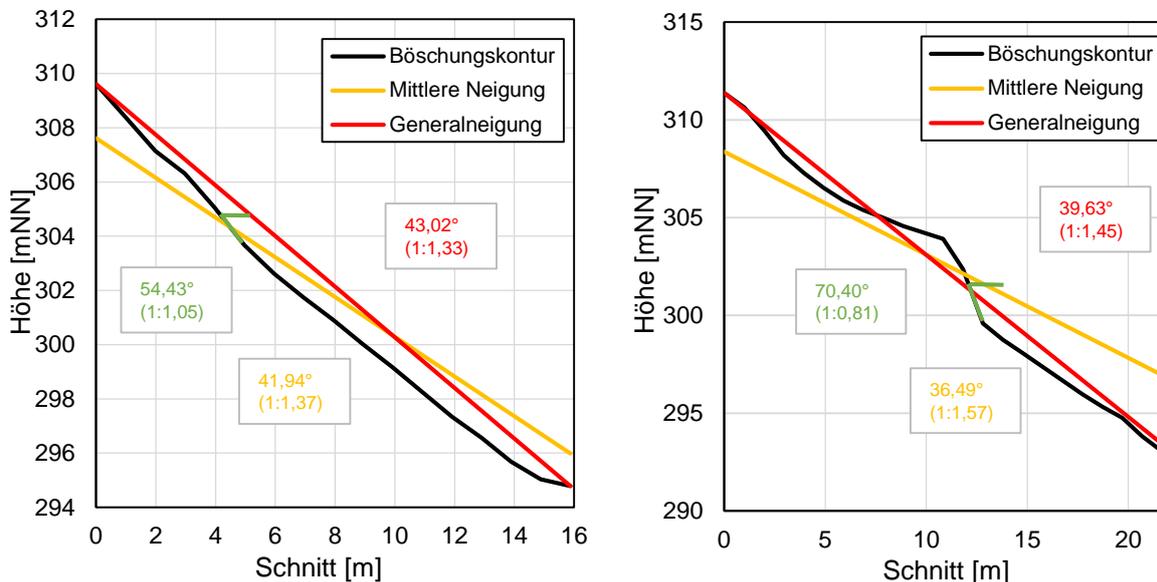


Abbildung A. 7.1: Gerader Schnitt: Schnitt 3 (links), Schnitt 10 (rechts)

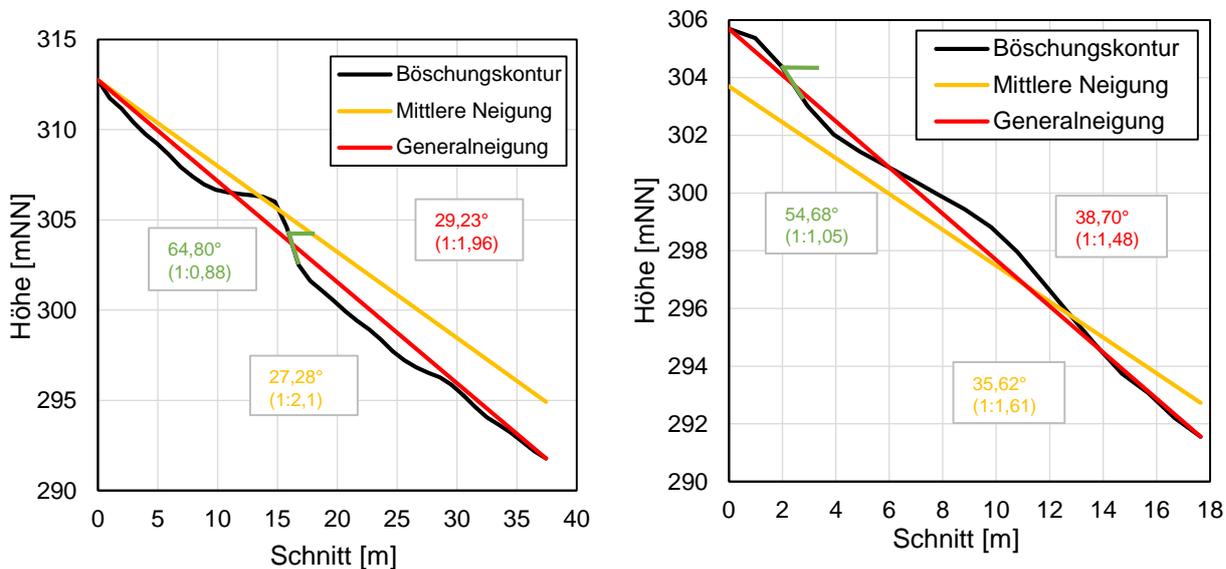


Abbildung A. 7.2: Gerader Schnitt: Schnitt 11 (links), Schnitt 12 (rechts)

A.8 Seegrundvermessung im Raum München

A.8.1 Seegrundvermessung Fa. Ebenhöh, Gerharding



Abbildung A. 8.1: Topographie des Seegrund mit Höhenlinien (0,5 m) mit Darstellung ausgewerteter Schnitte, Fa. Ebenhöh, Gerharding, See 1



Abbildung A. 8.2: Topographie des Seegrund mit Höhenlinien (0,5 m) mit Darstellung ausgewerteter Schnitte, Fa. Ebenhöf, Gerharding, See 2

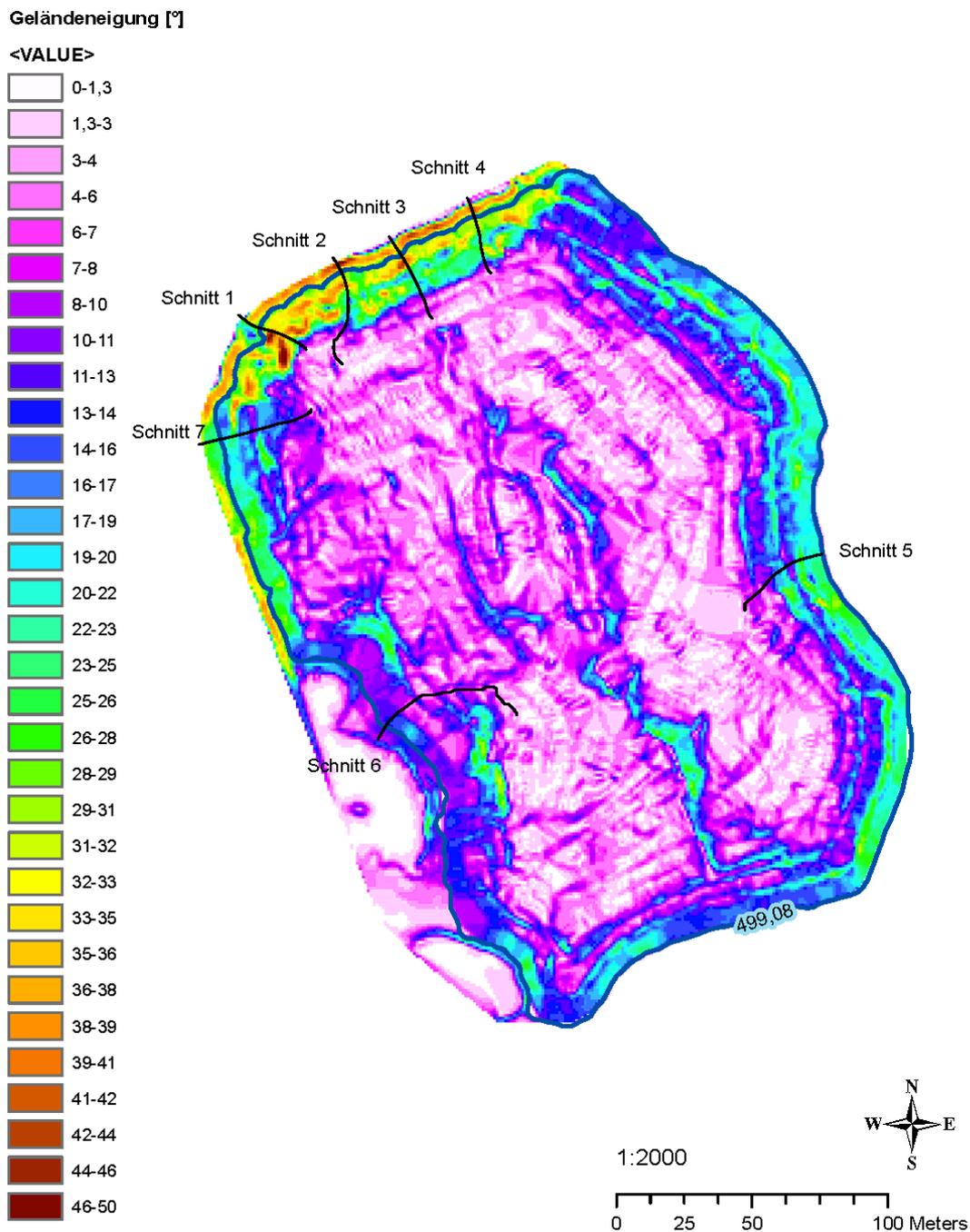


Abbildung A. 8.4: Geländeneigung [°] mit Darstellung ausgewerteter Schnitte, Fa. Ebenhö, Gerharding, See 2

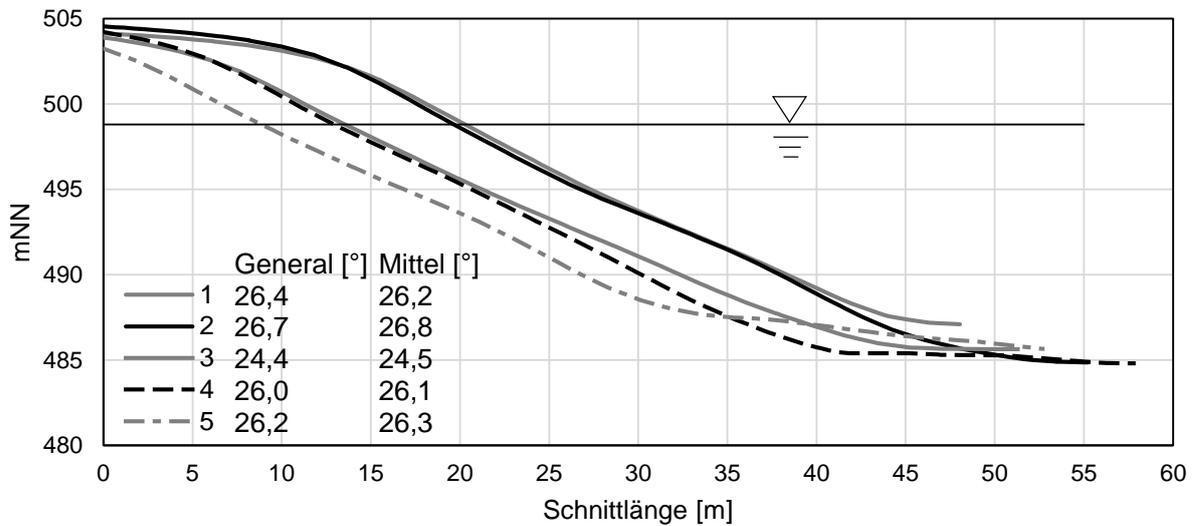


Abbildung A. 8.5: Schnittauswertung im gewachsenen Untergrund, Fa. Ebenhöf, Gerharding, See 1

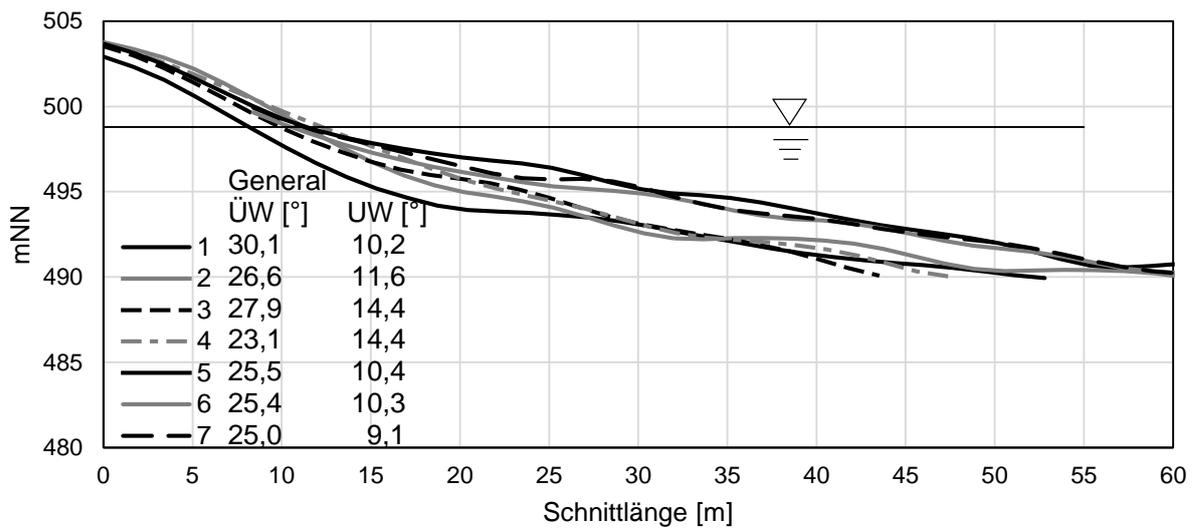


Abbildung A. 8.6: Schnittauswertung im gekippten Untergrund, Fa. Ebenhöf, Gerharding, See 1

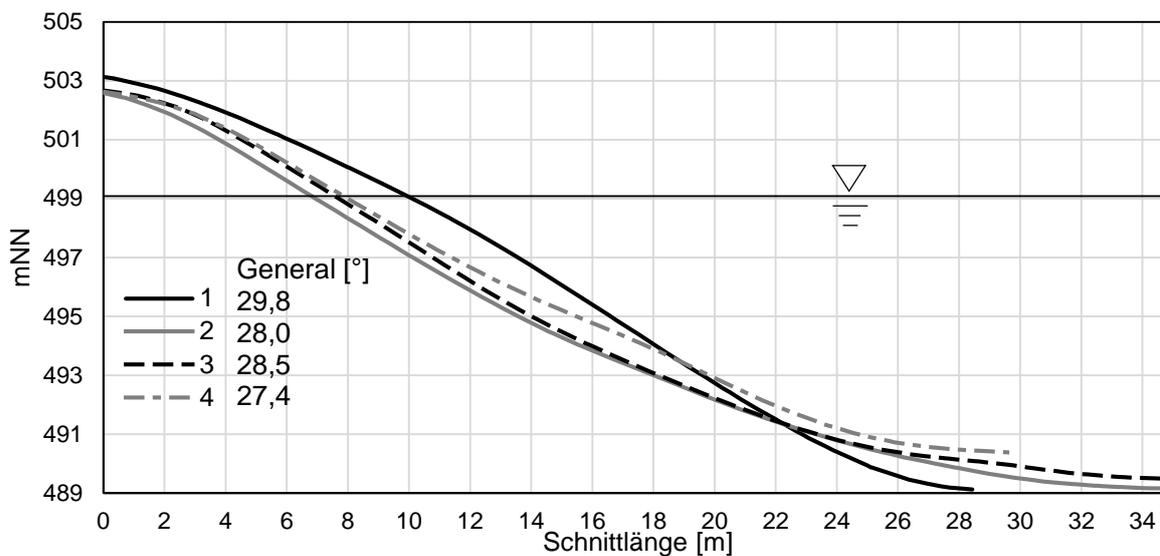


Abbildung A. 8.7: Schnittauserwertung im gewachsenen Untergrund, Fa. Ebenhöf, Gerharding, See 2

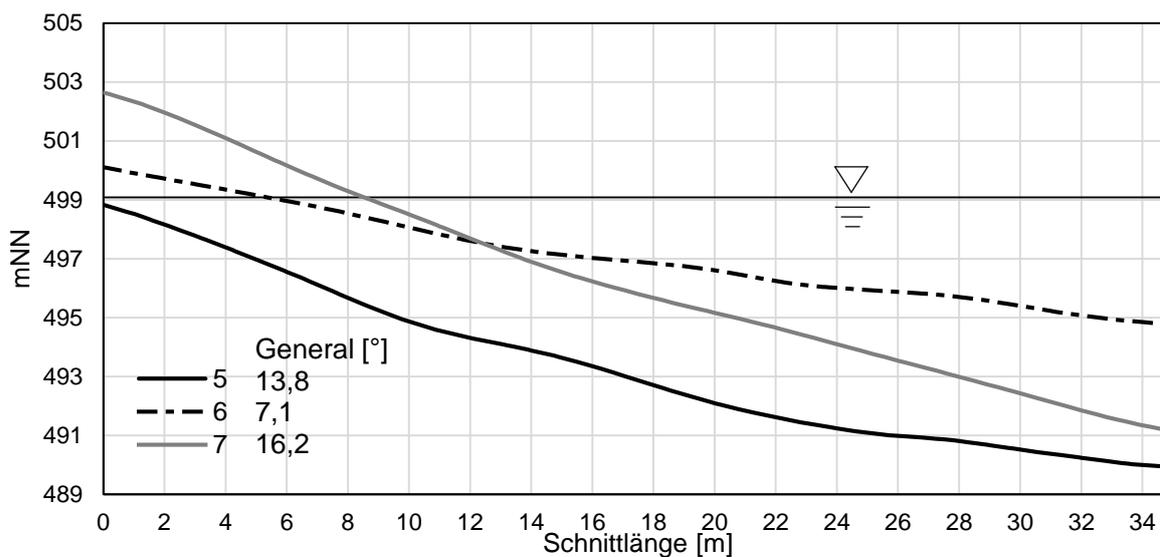


Abbildung A. 8.8: Schnittauserwertung im gekippten Untergrund, Fa. Ebenhöf, Gerharding, See 2

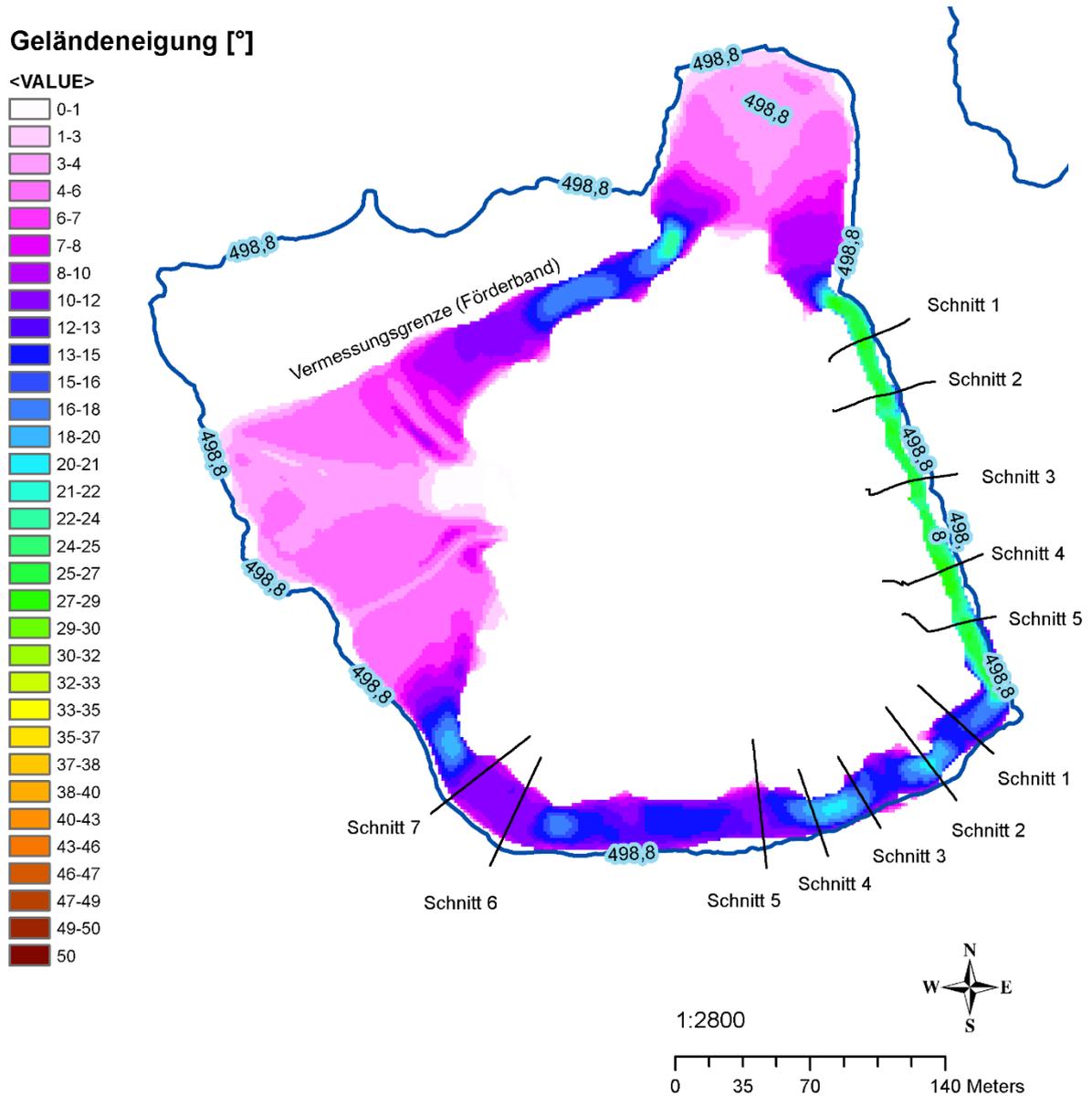


Abbildung A. 8.9: Generalneigung zwischen 498,3 mNN und 492,3 mNN [°] mit Darstellung ausgewerteter Schnitte, Fa. Ebenhöf, Gerharding, See 1

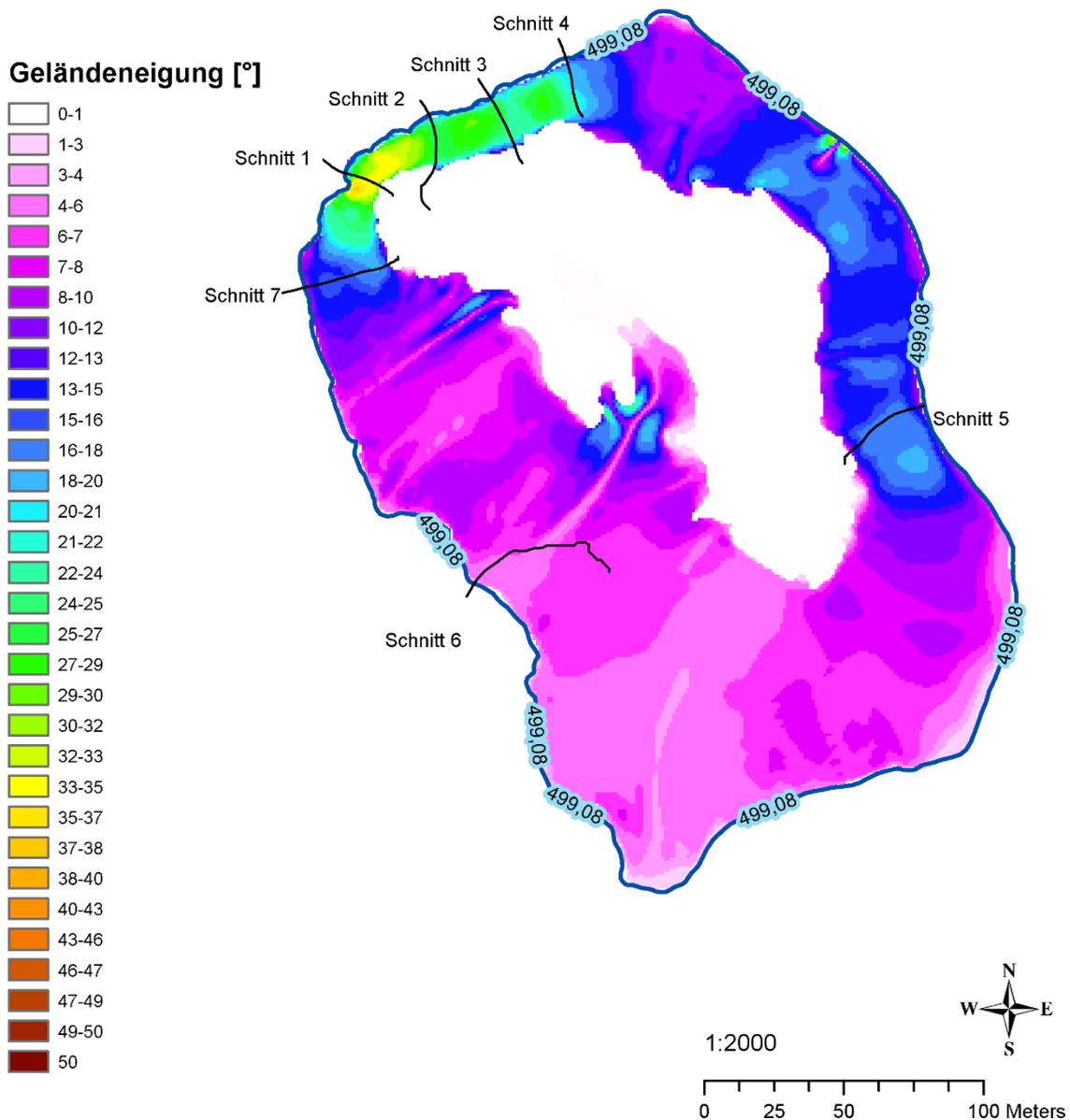


Abbildung A. 8.10: Generalneigung zwischen 499,08 mNN und 490,08 mNN [°] mit Darstellung ausgewerteter Schnitte, Fa. Ebenhöf, Gerharding, See 2

A.8.2 Seegrundvermessung, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Standort Berglern, See 8

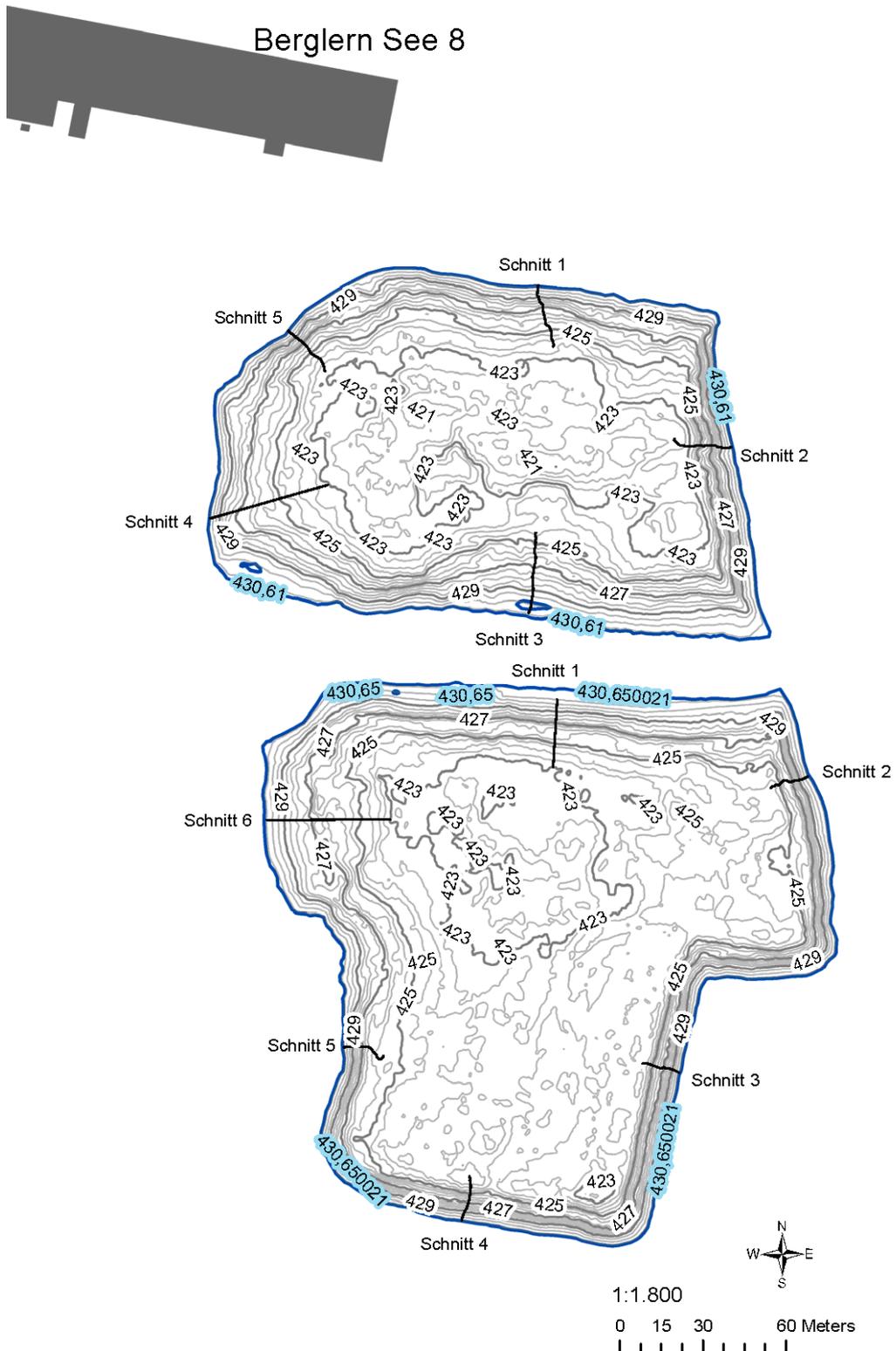


Abbildung A. 8.11: Topographie des Seegrund mit Höhenlinien (0,5 m) mit Darstellung ausgewerteter Schnitte, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Berglern, See 8

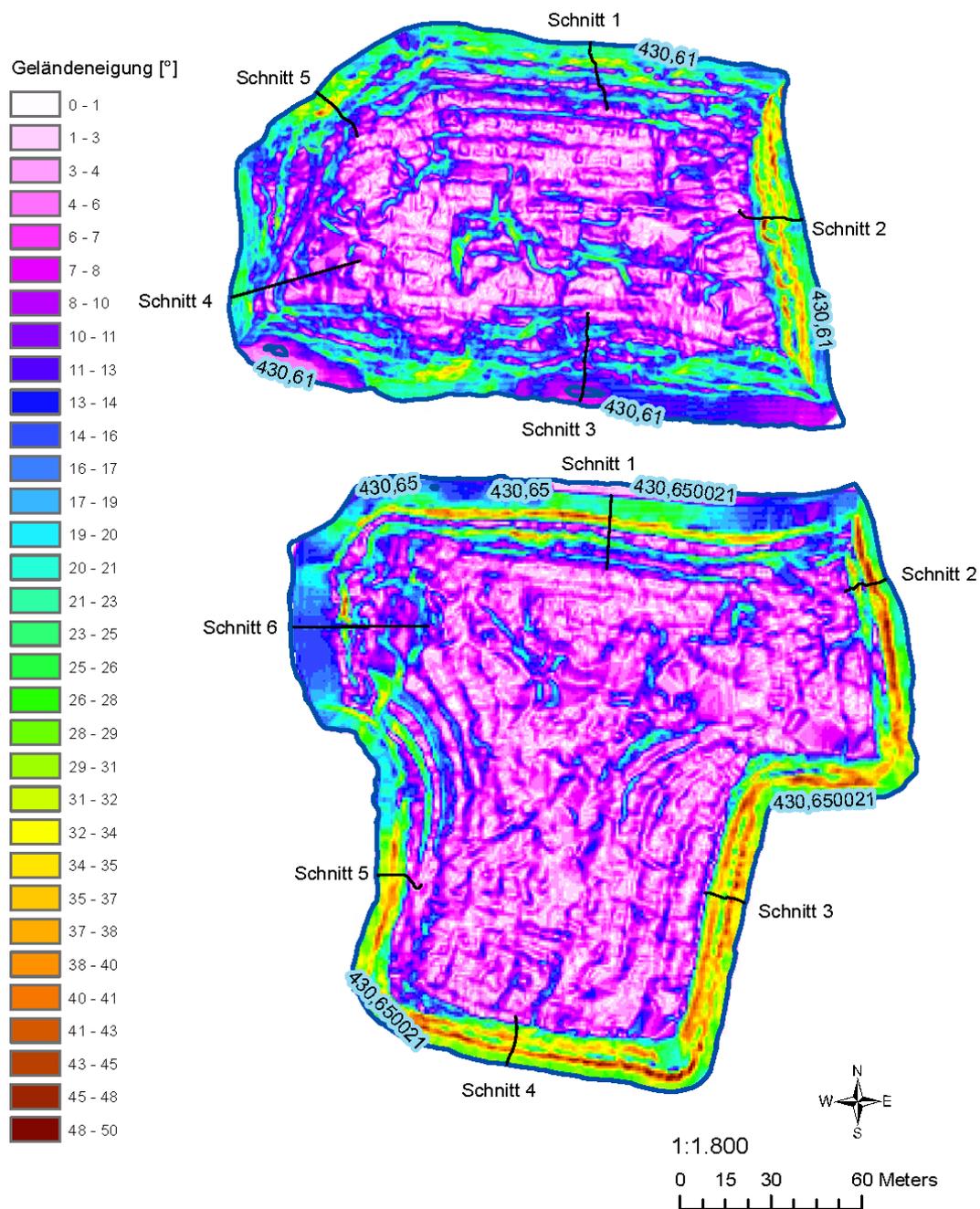
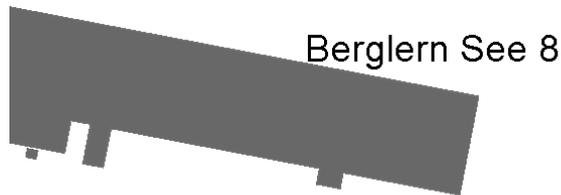


Abbildung A. 8.12: Geländeneigung [°] mit Darstellung ausgewerteter Schnitte, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Berglern, See 8

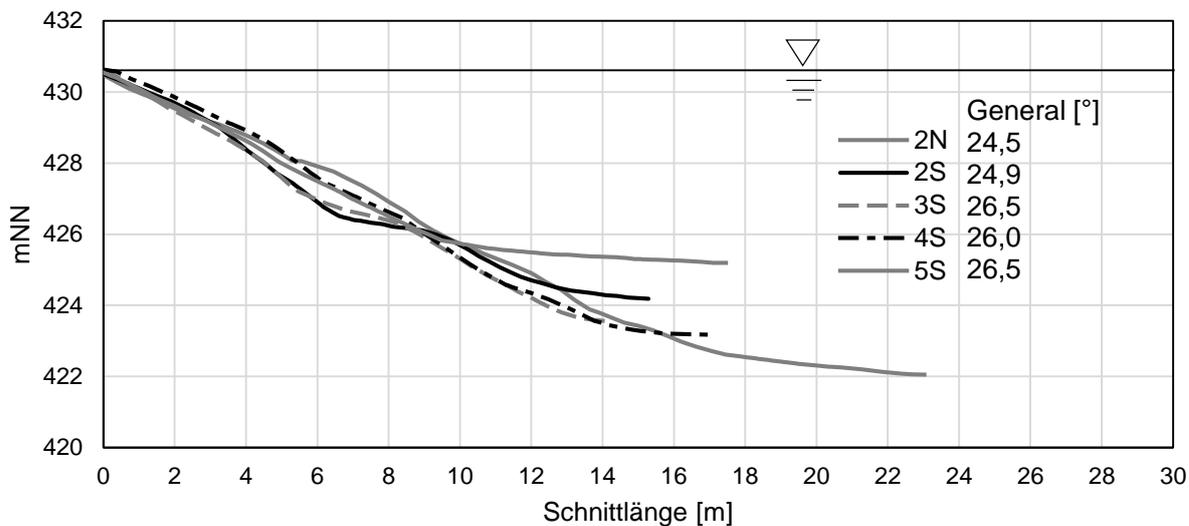


Abbildung A. 8.13: Schnittauswertung im gewachsenen Untergrund, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Berglern, See 8

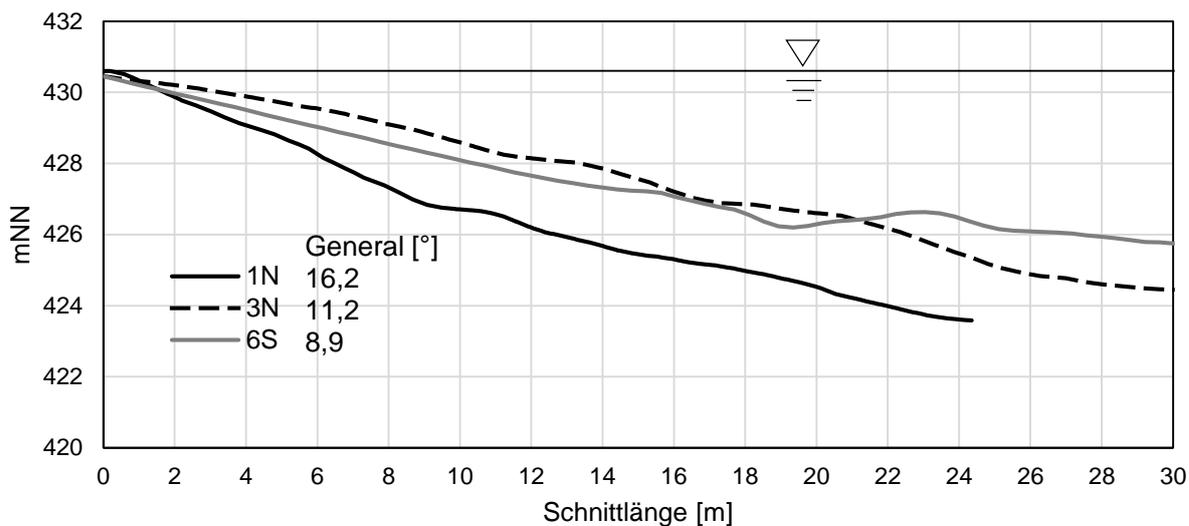


Abbildung A. 8.14: Schnittauswertung im gekippten Untergrund, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Berglern, See 8

Geländeneigung [°]

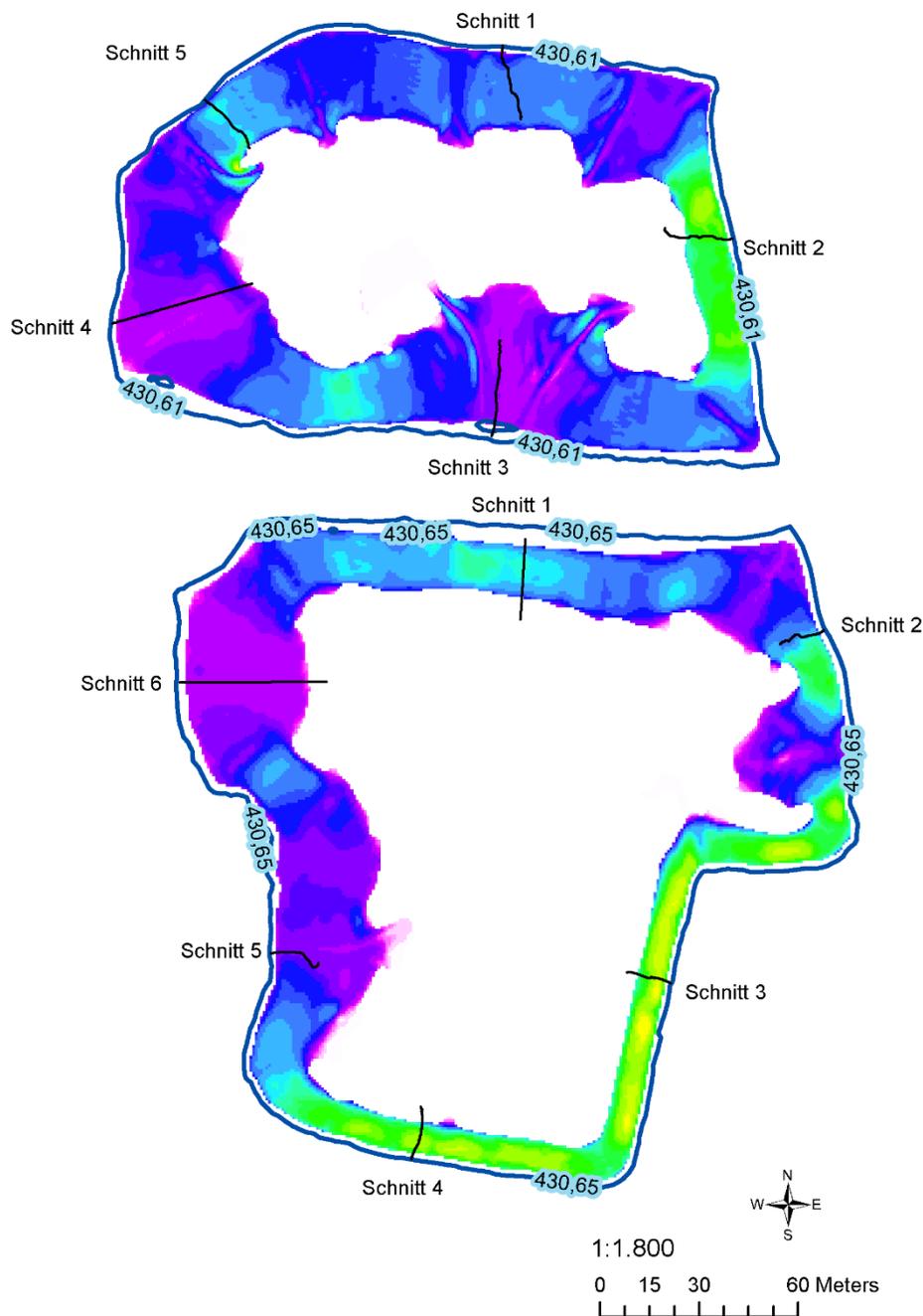
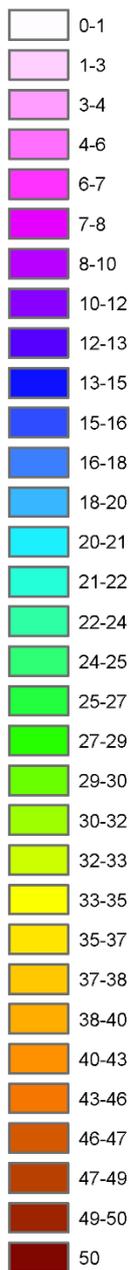


Abbildung A. 8.15: Generalneigung zwischen 430,1 mNN und 423,1 mNN (nördlicher See) und 430,15 mNN und 424,15 mNN (südlicher See) mit Darstellung ausgewerteter Schnitte, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Berglern, See 8

A.8.3 Seegrundvermessung, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Standort Berglern, See 12



Abbildung A. 8.16: Topographie des Seegrund mit Höhenlinien (0,5 m) mit Darstellung ausgewerteter Schnitte, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Berglern, See 12

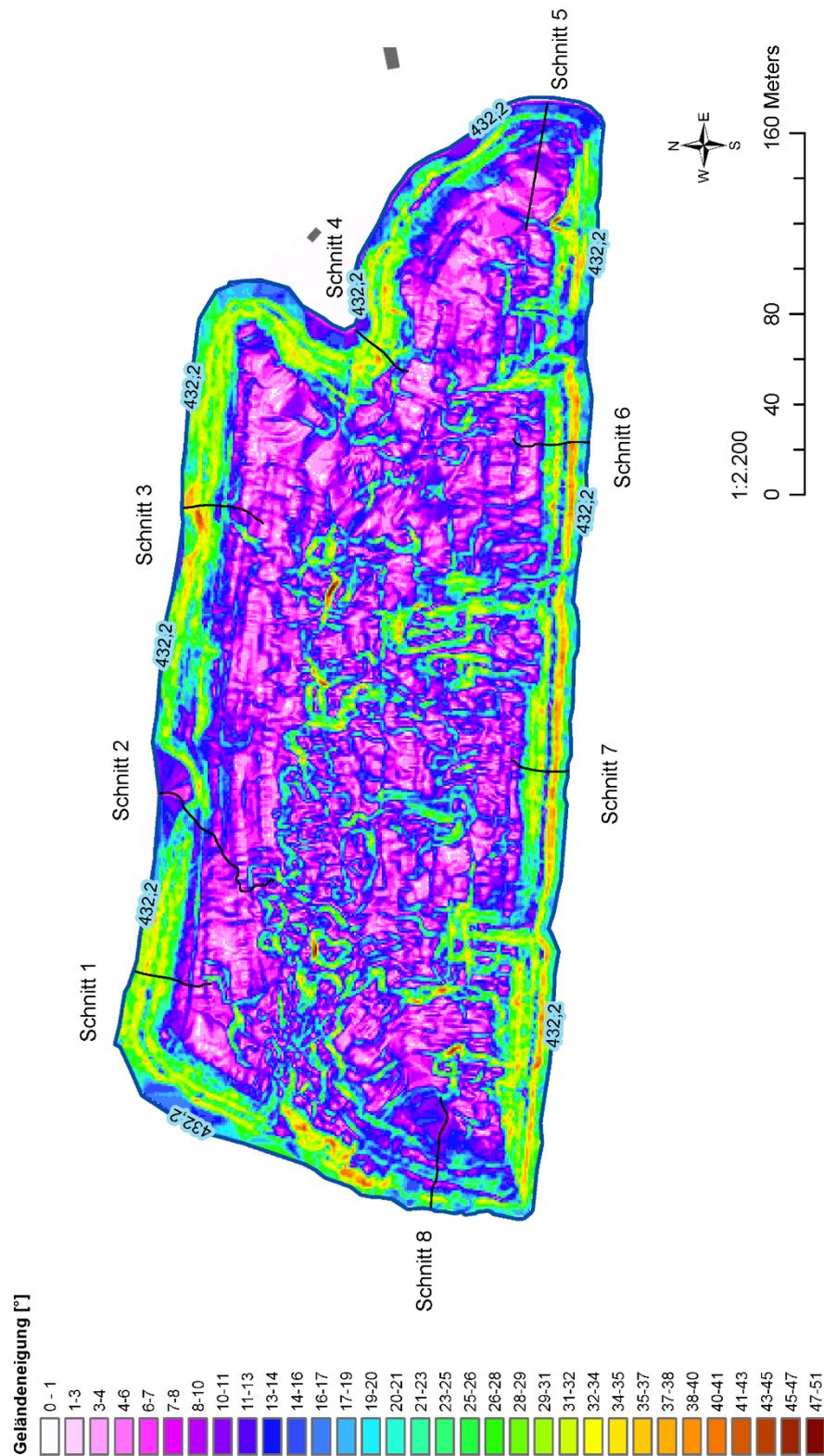


Abbildung A. 8.17: Geländeneigung [°] mit Darstellung ausgewerteter Schnitte, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Berglern, See 12

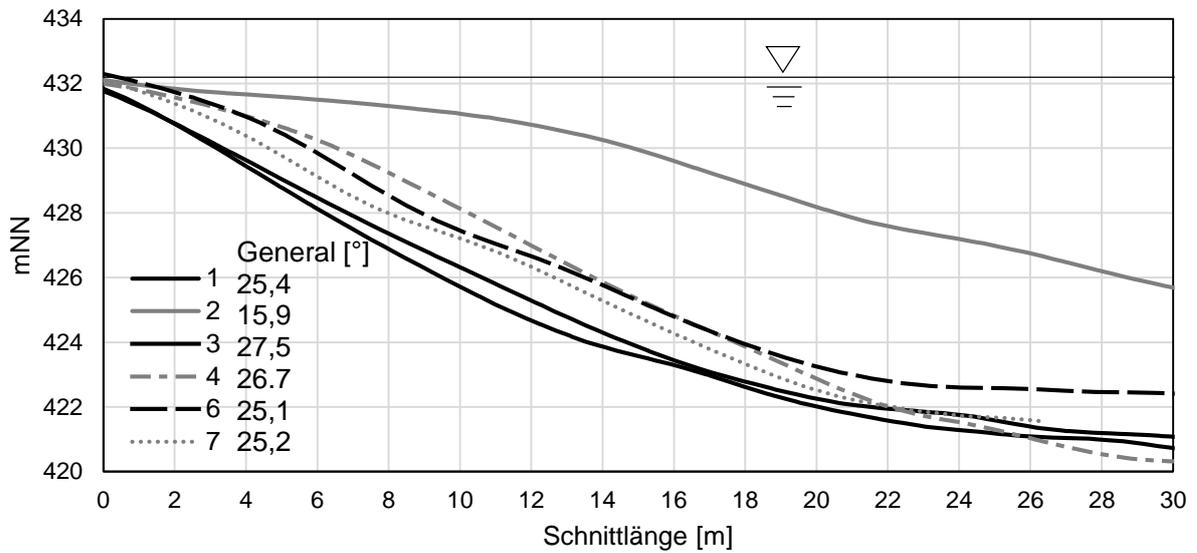


Abbildung A. 8.18: Schnittauswertung im gewachsenen Untergrund, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Berglern, See 12

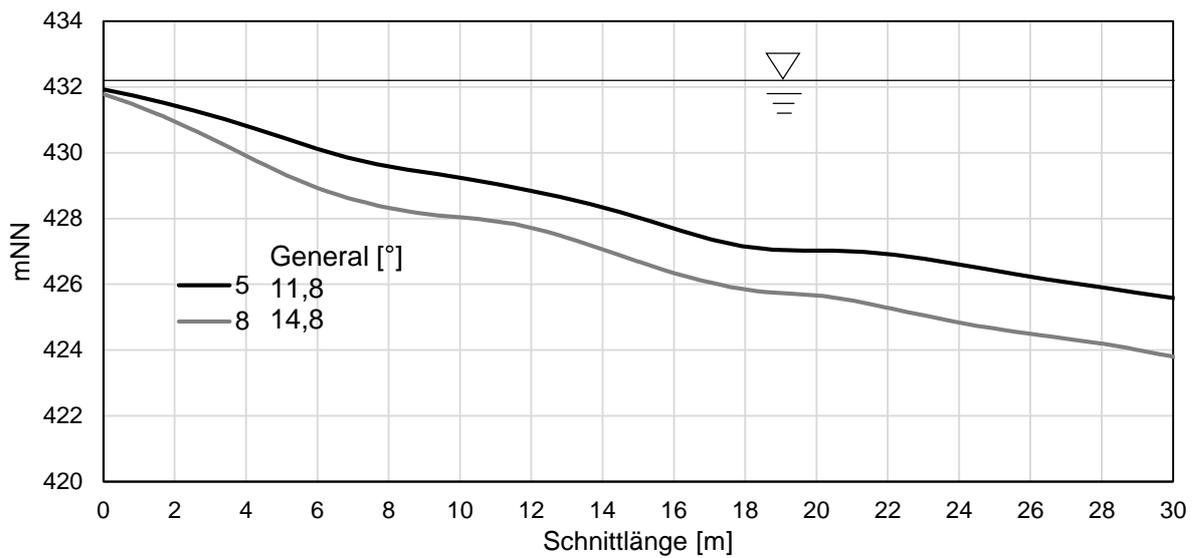


Abbildung A. 8.19: Schnittauswertung im gekippten Untergrund, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Berglern, See 12

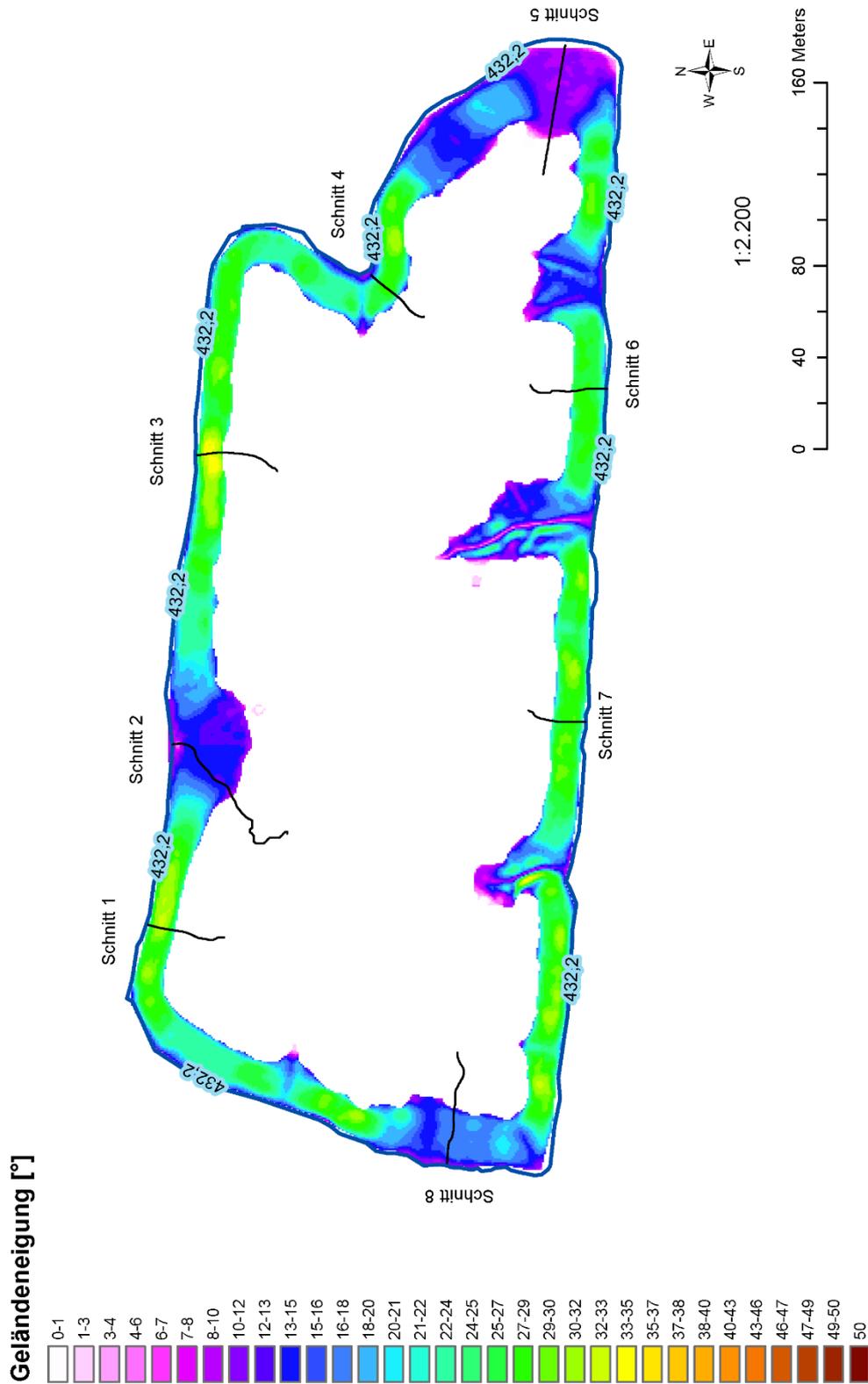


Abbildung A. 8.20: Generalneigung zwischen 431,7 mNN und 424,7 mNN [°] mit Darstellung ausgewerteter Schnitte, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Berglern, See 12

A.8.4 Seegrundvermessung, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Standort Eichenkofen



Abbildung A. 8.21: Topographie des Seegrund mit Höhenlinien (0,5 m) mit Darstellung ausgewerteter Schnitte, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Eichenkofen

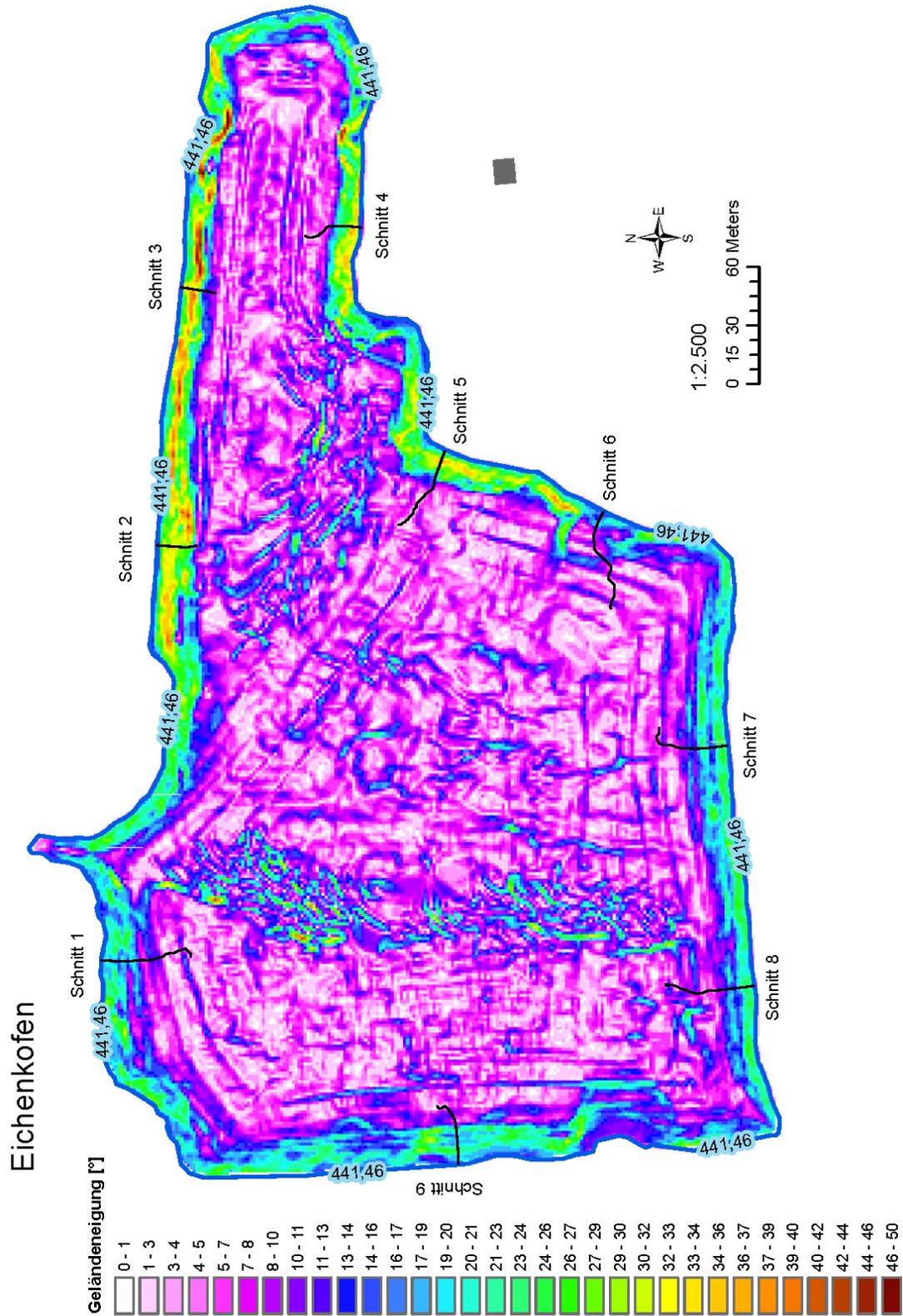


Abbildung A. 8.22: Geländeneigung [°] mit Darstellung ausgewerteter Schnitte, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Eichenkofen

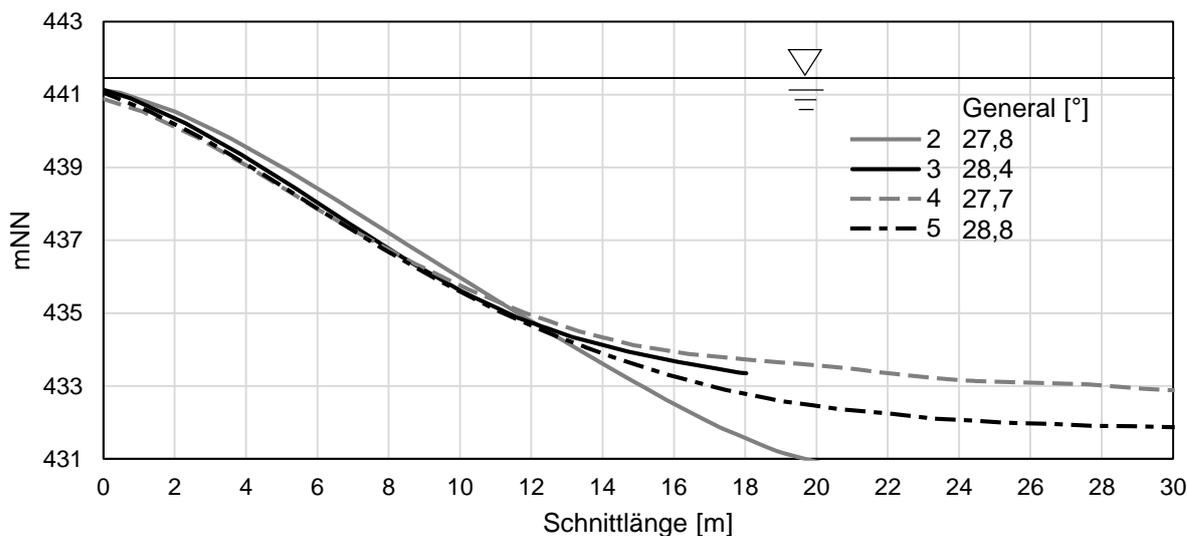


Abbildung A. 8.23: Schnittauswertung im gewachsenen Untergrund, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Eichenkofen

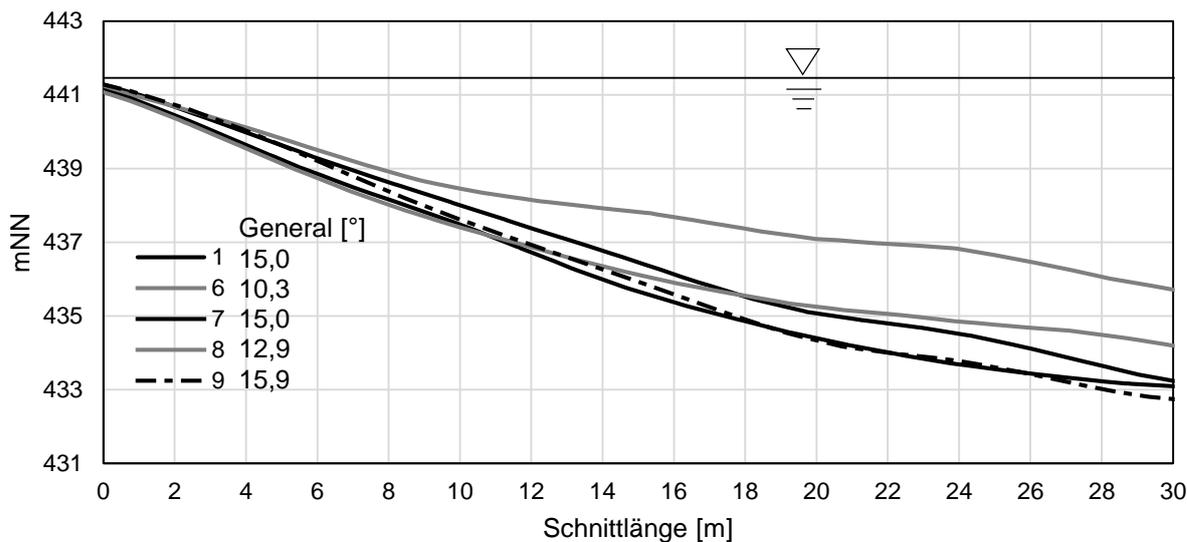


Abbildung A. 8.24: Schnittauswertung im gekippten Untergrund, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Eichenkofen

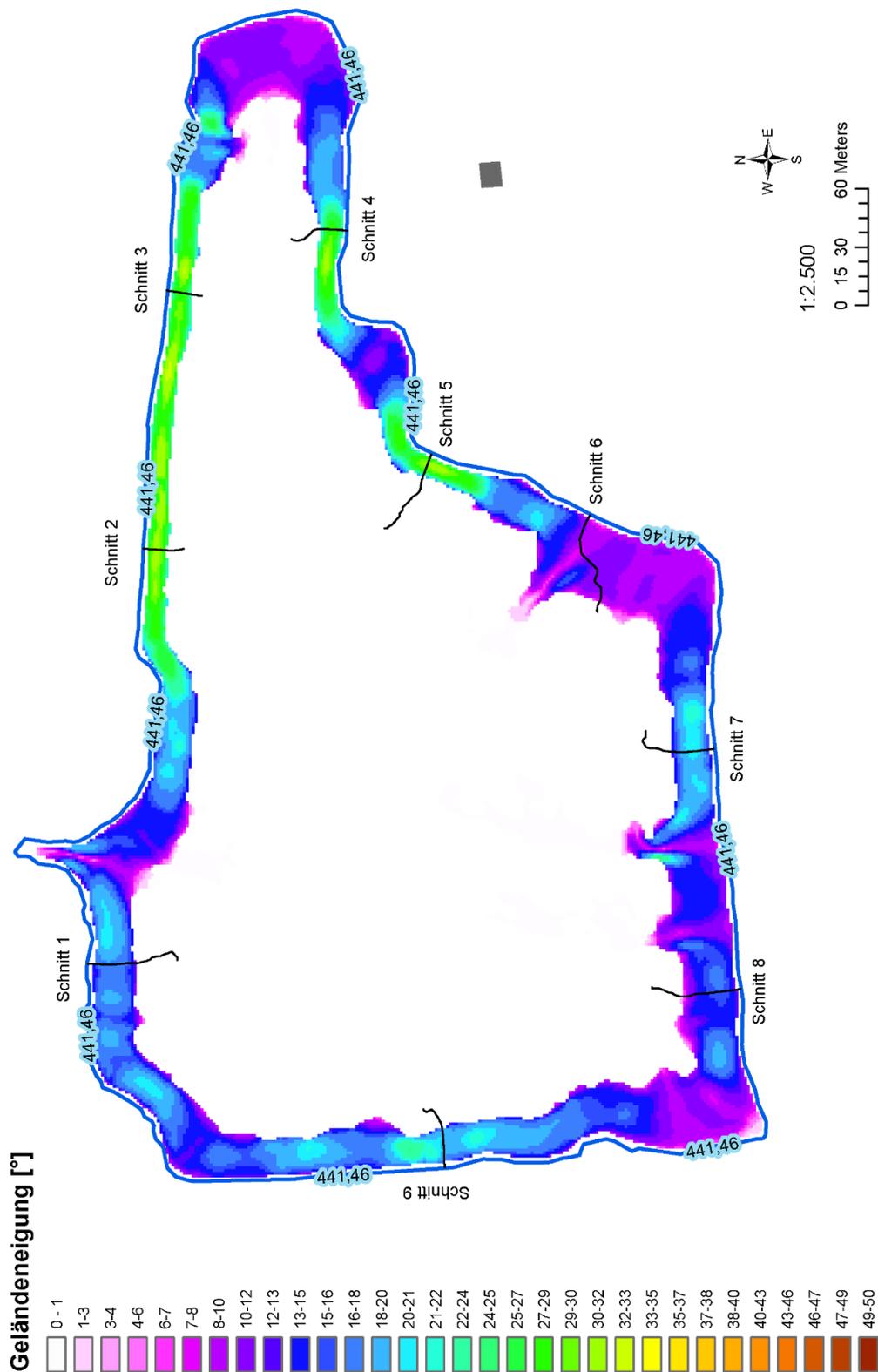


Abbildung A. 8.25: Generalneigung zwischen 441,45 mNN und 434,45 mNN [°] mit Darstellung ausgewerteter Schnitte, Fa. Rohrdorfer Sand & Kies, Eichenkofen

A.9 Seegrundvermessung einer Sandgrube in der Oberpfalz

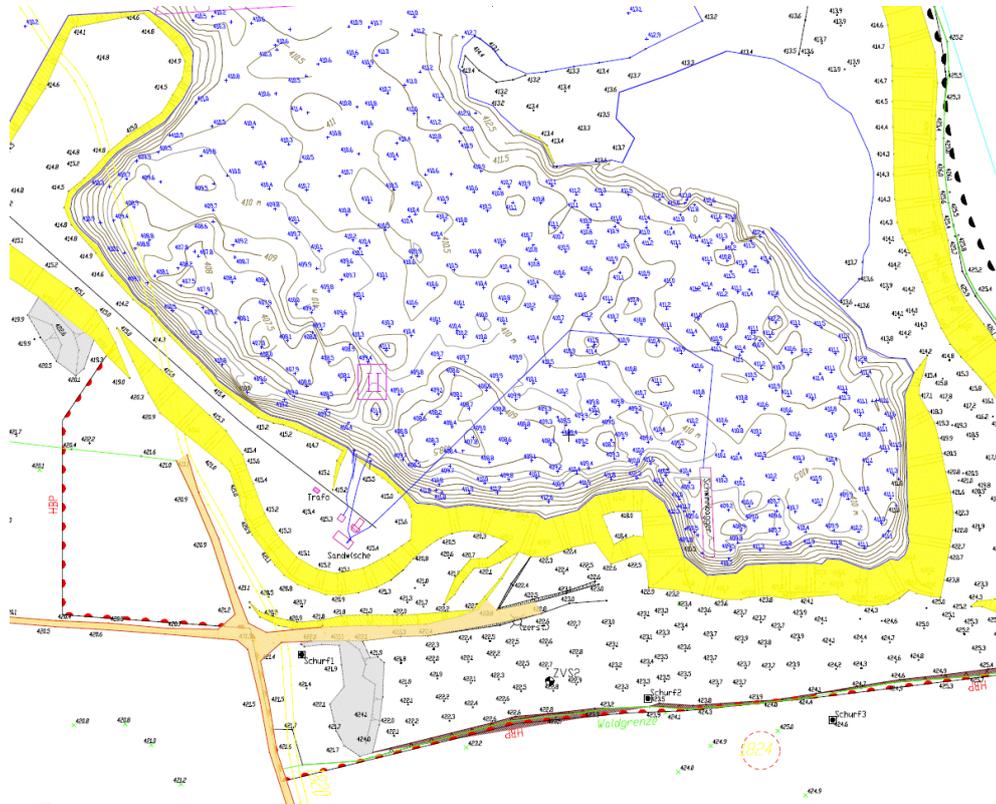


Abbildung A. 9.1: Seegrundvermessung März 2014

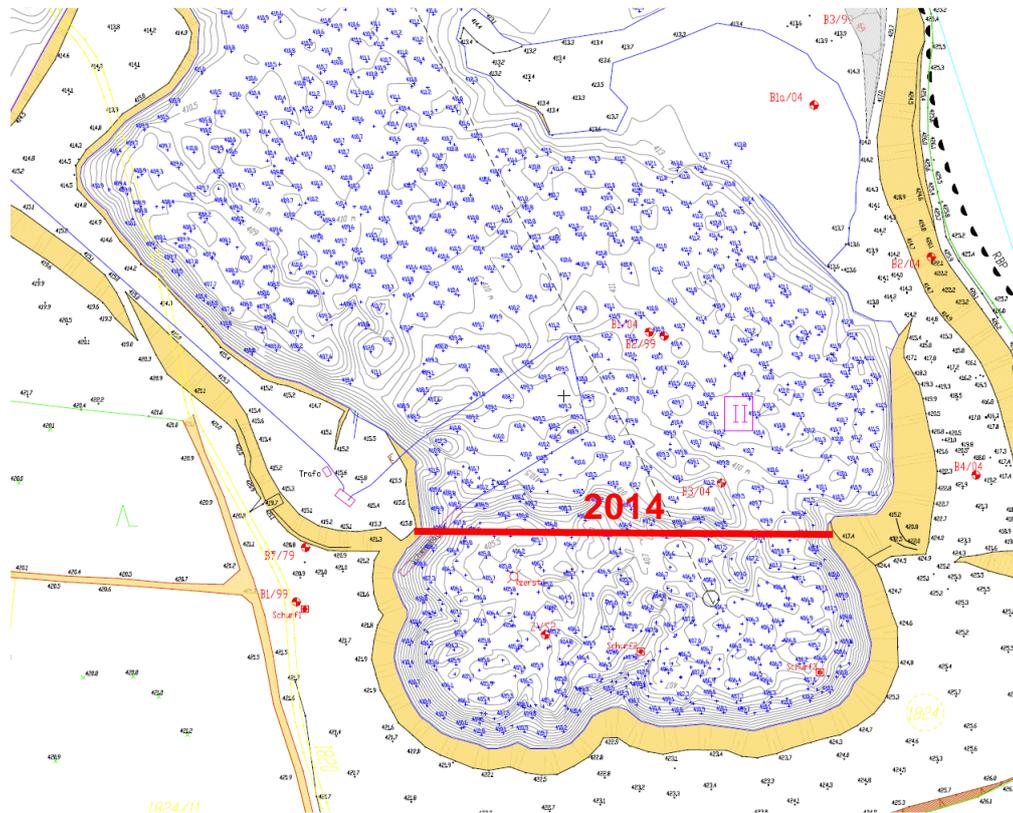


Abbildung A. 9.2: Seegrundvermessung Februar 2016

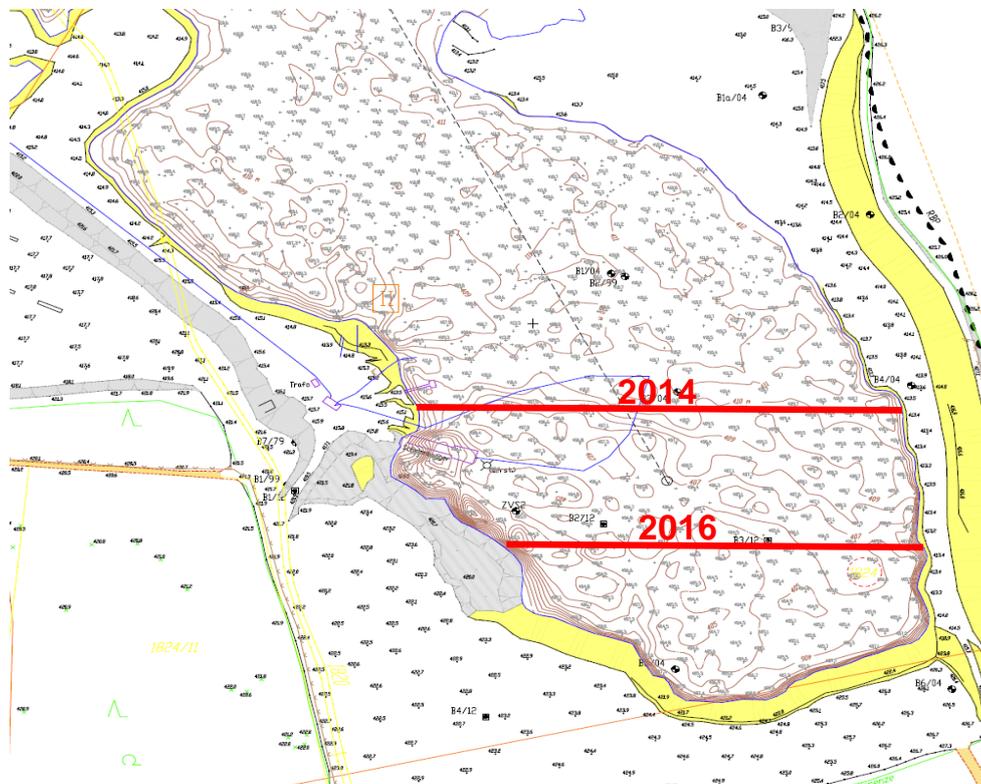


Abbildung A. 9.3: Seegrundvermessung Februar 2018