

# Anlage 6.3

## Geotechnische Stellungnahme

zu

Stand sicherheitsuntersuchungen im Rahmen des  
Abschlussbetriebsplanes Tagebau Jänschwalde

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Veranlassung und Methodik.....</b>	<b>3</b>
1.1	Veranlassung.....	3
1.2	Geotechnische Teilmodelle und Planungsstufen .....	3
<b>2</b>	<b>Arbeitsunterlagen .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Untersuchungsgebiet und geotechnische Schwerpunkte .....</b>	<b>7</b>
3.1	Untersuchungsgebiet.....	7
3.2	Technologische Entwicklung.....	8
3.3	Geologische, hydrogeologische und bodenphysikalische Verhältnisse .....	8
3.4	Geotechnische Schwerpunkte .....	11
<b>4</b>	<b>Gewachsene Kopfböschungssysteme .....</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Kippengestaltung.....</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>25</b>

## 1 Veranlassung und Methodik

### 1.1 Veranlassung

Für die Belange der nachbergbaulichen Sicherung und Gestaltung des Restraumes Tagebau Jänschwalde wird unter Federführung des Referates Jänschwalde / Cottbus-Nord ein Abschlussbetriebsplan (ABP) erarbeitet.

Zur Vereinfachung und Unterstützung der bergamtlichen Prüfprozesse wurde gemäß [AU 2.10] vereinbart, mittels fachspezifischer Gutachten das Zusammenwirken vielfältiger bergbautypischer Aspekte darzustellen. Im Folgenden sind es die bodenmechanischen Aspekte der geplanten nachbergbaulichen Tagebaufolgelandschaft. Teile der vorliegenden Stellungnahme konnten aufgrund vergleichbarer bodenmechanischer Problemstellungen aus [AU 2.12] mit Verweis auf [AU 2.6] übernommen werden.

### 1.2 Geotechnische Teilmodelle und Planungsstufen

Um die nachstehenden Untersuchungen einordnen zu können, wird auf die Methodik der Standsicherheitsuntersuchungen speziell im Braunkohlenbergbau im Lausitzer Revier eingegangen. Einen schematischen Überblick zu den Inhalten und zum strukturellen Aufbau der hierfür notwendigen geotechnischen Teilmodelle enthält die Abbildung 1.

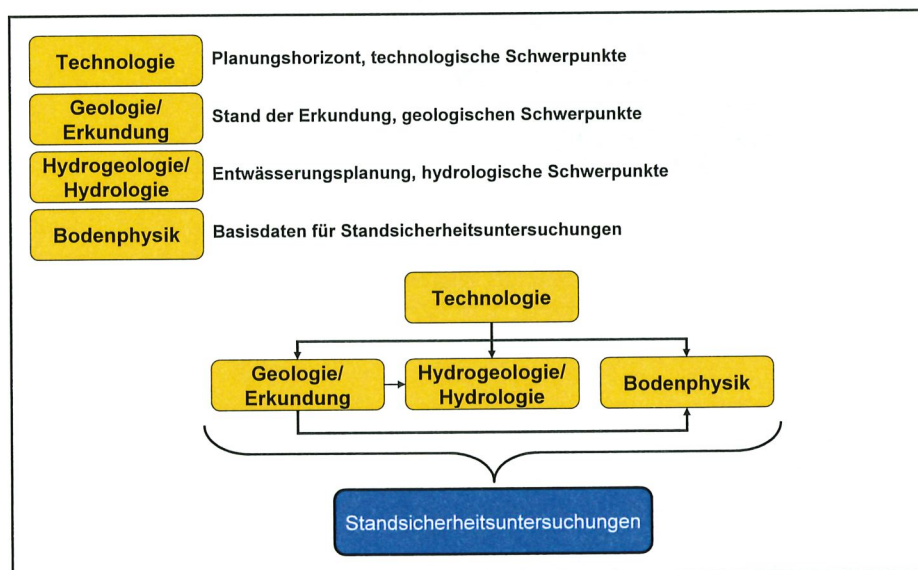


Abbildung 1: Geotechnische Teilmodelle für Standsicherheitsuntersuchungen

Die Detailschärfe der den einzelnen Teilmodellen zugrundeliegenden Planungsstufen sind vergleichbar mit den verschiedenen Planungsphasen im Bauwesen. Mit der zeitlich strukturierten Fortschreibung der Planungsaufgaben erfolgen die zur Erhöhung des Tiefgangs bzw. des Durchdringungsgrades der jeweiligen Planungsetappe notwendigen Erkundungs- und Untersuchungsmaßnahmen. Diese können im Einzelnen zusätzliche technische Alternativvarianten, den Grad der geologischen Erkundung und / oder der hydrologischen Modellierung sowie die Qualifizierung der bodenphysikalischen Grundlagen und der bodenmechanischen Modellierung umfassen.

Nicht zuletzt ist die jeweilige Finanzierung bzw. Budgetierung der Einzelprojekte als Instrument zur Unternehmenssteuerung zu erwähnen. Es wird dabei jeweils die vorhergehende Planungsphase vorausgesetzt, um auf Grundlage der Zielsetzungen die Handlungsalternativen des Unternehmens zu definieren, zu bewerten und letztlich festzulegen.

Den Ausgangspunkt der Standsicherheitsuntersuchungen bilden die restraumgestalterischen Schwerpunkte, die im Rahmen einer Auftaktveranstaltung bereits umrissen wurden [AU 2.10]. Darauf aufbauend werden der Stand der geologischen Erkundung, der Stand der Planungen zur Tagebautwässerung mit ggf. hydrologischen Besonderheiten und die bodenphysikalischen Basisdaten als Grundlage für die Standsicherheitsuntersuchungen geprüft und zusammengestellt.

Mit der Festlegung des zeitlichen Planungshorizontes ergibt sich somit in Verbindung mit dem geologischen, hydrologischen und bodenphysikalischen Erkundungsstand ein proportionaler Zusammenhang zum Grad der Bearbeitungstiefe der Standsicherheitsuntersuchungen. Das bedeutet, dass mit zunehmender Präzisierung der Eingangsdaten sowie mit steigendem Detaillierungsgrad der restraumgestalterischen Zielvorgaben in Verbindung mit einem erhöhten Erkundungsaufwand sich auch die Qualität der Aussagen in den Standsicherheitsuntersuchungen schrittweise erhöht. Die Zusammenhänge sind schematisch in der Abbildung 2 dargestellt.

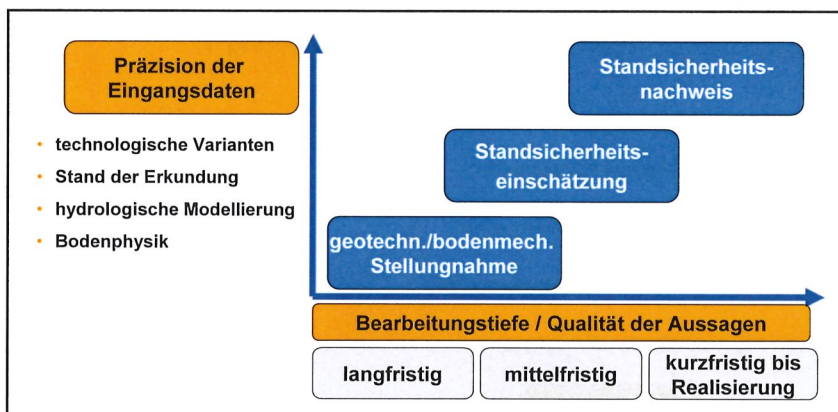


Abbildung 2: Zeitliche Einordnung von Standsicherheitsuntersuchungen

Gemäß Abb. 2 sind alle nachbergbaulich bleibenden gewachsenen und gekippten Böschungen, Kippenflächen und im Rahmen des ABP zu errichtende Bauwerke auf Kippen einzuordnen sowie die Bearbeitungszeitpunkte und die Detailschärfe der Standsicherheitsuntersuchungen zuzuordnen. Jede bodenmechanische Bearbeitung fußt auf einer Aufgabenstellung. Die zeitliche und räumliche Einordnung der bodenmechanischen Bearbeitungen, beginnend mit der Übergabe der bodenmechanischen Aufgabenstellungen liegt bereits im Wesentlichen fest und wird im ABP beschrieben.

Den Abschluss der bodenmechanischen Untersuchungen auf der Kippenseite mit Kippenverdichtungsmaßnahmen bilden die Verdichtungsnachweise. Es ist möglich, dass nach erfolgter Restraumsicherung die erreichte geotechnische Situation in Form von Haupt- und Abschlussgutachten noch einmal zusammenfassend und abschließend in Kurzform bewertet wird. Die Entscheidung über Gutachtenform und -inhalt trifft der zu diesem Zeitpunkt zuständige Sachverständige für Böschungen.



Gemäß Abb. 2 gehört die vorliegende Geotechnische Stellungnahme somit zur Bearbeitungstiefe „langfristig“. Inhaltlich bilden nicht die konkreten Nachweise den Schwerpunkt dieser Unterlage, sondern vielmehr das Aufzeigen der anzuwendenden geotechnischen Untersuchungsmethodiken sowie die Beschreibung des bodenmechanischen Untersuchungsumfanges im Rahmen des ABP, der in weiterführenden Standsicherheitseinschätzungen und -nachweisen auf der Basis von Aufgabenstellungen bearbeitet wird.

Die gemäß Ordinate zuzuordnende „Präzision der Eingangsdaten“ unterscheidet sich bezüglich der Bodenphysik zwischen der gewachsenen und gekippten Seite des nachbergbaulichen Restraumes signifikant:

Aus der bergbaulich aktiven Phase des Tagebaues Jänschwalde liegen für alle bleibenden gewachsenen Böschungen detaillierte Informationen zur Geologie und zur Bodenphysik vor. Somit ist jede, die gewachsene Seite betreffende Bearbeitung gemäß Abb. 2 in die höchste Kategorie „Standsicherheitsnachweis (SN)“ einzuordnen. Hier sind es die Aufwendungen die für die Erarbeitung der Aufgabenstellungen betrieben werden müssen, die es zulassen, bereits frühzeitig Standsicherheitsnachweise zu bearbeiten, die lange vor der Entlassung aus der Bergaufsicht belastbare, der Gewährleistung der Dauerstandsicherheit genügende Aussagen beinhalten.

Das Hauptaugenmerk der weiteren Präzisierung der Eingangsdaten (vgl. Abb. 2) liegt auf der Erkundung der bodenphysikalischen Eigenschaften der Kippe, wobei grundsätzliche Eigenschaften, wie zum Beispiel das Sackungsverhalten und die Verflüssigungsneigung bekannt sind.

Die hydrologische Modellierung für den nachbergbaulichen Zustand ist abgeschlossen. Technologische Varianten bestehen lediglich in Details, wie zum Beispiel die ortskonkrete Anpassung der Dammbreite versteckter Dämme an die bodenphysikalischen Eigenschaften der Kippe oder die abschließende Bemessung der Böschungswinkel für Einzelböschungen im Bereich der zukünftigen Nordmarkscheide.

---

## 2        **Arbeitsunterlagen**

- [AU 2.1] Richtlinie vom 01.07.2014 des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg - Geotechnische Sicherheit (GeSi) (mit Verweis auf die Referenzliste)
- [AU 2.2] Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV), Hrsg.; TU Bergakademie Freiberg; Universität Karlsruhe: Beurteilung der Setzungsfließgefahr und Schutz von Kippen gegen Setzungsfließen. ("Grünes Heft"). Senftenberg, 1998
- [AU 2.3] Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV): Empfehlungen und Bemessungsgrundlagen für die Gestaltung von Tagebaurestseen, Berlin/Senftenberg/Frankfurt (Oder)/Freiberg/Dresden 2001
- [AU 2.4] TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Professur für Erdbau und Spezialtiefbau: Untersuchungen zur Bodenverflüssigung und zu Sackungen in flachwelligen Kippenbereichen Abschlussbericht vom 28.04.2017 im Auftrag der Lausitz Energie Bergbau AG
- [AU 2.5] Handlungsgrundlage vom 04.12.2019 zur Beurteilung der Gefährdung von flachwelligen Kippenbereichen durch Setzungsfließen und Geländeeinbrüche im bergrechtlichen Verantwortungsbereich der LEAG
- [AU 2.6] Ingenieurbüro für Geotechnik Dr.-Ing. Friedrich: Standsicherheitsnachweis vom 08.05.2018 Tagebau Nochten Flächenareal nördlich von Nochten, Gutachten im Auftrag der Lausitz Energie Bergbau AG
- [AU 2.7] Grosser, R.; Meinig, H-J.; Fincke, M. (22.03.2013): Auswertung von Standsicherheitsberechnungen für die Planung von Geländeerhebungen auf Kippen, Vortrag zum Geotechnischen Symposium des LBGR Cottbus am 22. und 23. März 2013 in Cottbus
- [AU 2.8] LEAG Abt. Geotechnik: Geotechnische Stellungnahme vom 15.05.2019 zur Planungsphase des Bergbaufolgesees Heinersbrück - Schnitt W 30, gewachsene Seite und Kippenabtrag
- [AU 2.9] LEAG Abt. Geotechnik: Geotechnische Anforderungen vom 11.12.2014 an die kippenseitige Tagebaurestrraumgestaltung - Sicherung verflüssigungsempfindlicher Kippen; zzgl. 1. Ergänzung vom 03.02.2017
- [AU 2.10] LEAG Referat Jänschwalde/Cottbus-Nord: Festlegungen der Arbeitsgruppe Gesamtbericht Abschlussbetriebsplan Jänschwalde 2019
- [AU 2.11] LEAG Abt. Geotechnik: Geologische Zuarbeit vom 23.10.2019
- [AU 2.12] LEAG Abt. Geotechnik: Bodenmechanische Stellungnahme vom 10.09.2019 zum obligatorischen RBP zum Änderungsvorhaben TF Mühlrose, Tgb. Nochten
- [AU 2.13] LEAG Abt. Geotechnik: Standsicherheitseinschätzung vom 17.03.2008 Endgestaltung und Sicherung von Kippenoberflächen des Tgb. Jänschwalde zzgl. 1. Nachtrag vom 22.11.2019 und 2. Nachtrag vom 19.10.2020



### 3 Untersuchungsgebiet und geotechnische Schwerpunkte

#### 3.1 Untersuchungsgebiet

Die LEAG plant eine Bergbaufolgelandschaft mit drei Bergbaufolgeseen dem Heinersbrücker, Jänschwalder und Taubendorfer See (vgl. Abb. 3). Die drei geplanten Bergbaufolgeseen verfügen auf der gekippten Seite über Uferabschnitte, deren Längenanteil bezogen auf die Gesamtuferlänge ca. 52 % beträgt.

Den größten Flächenanteil besitzen planerisch vorbestimmt die Flächen für die Forst- und Landwirtschaft sowie Flächen für den Naturschutz. Im Bereich der Kippenoberfläche sind rückzuverlegende Gewässer wie die Malxe und der Düringsgraben teilweise bereits geotechnisch sicher vorbereitet und weitere kleinere Entwässerungsgräben geplant. Verbindungsstraßen und Wirtschaftswege sind hinsichtlich ihrer Linienführung vorgegeben. Im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes ist ein als „Betriebsstraße“ bezeichneter Kippenabschnitt verdichtet und somit abschließend geotechnisch sicher gestaltet.

Weitere, jedoch außerhalb der bergbauplanerischen Verantwortung der LEAG stehende Bauwerke auf der Innenkippe sind fünf Windenergieanlagen und ein Gärrestbehälter.

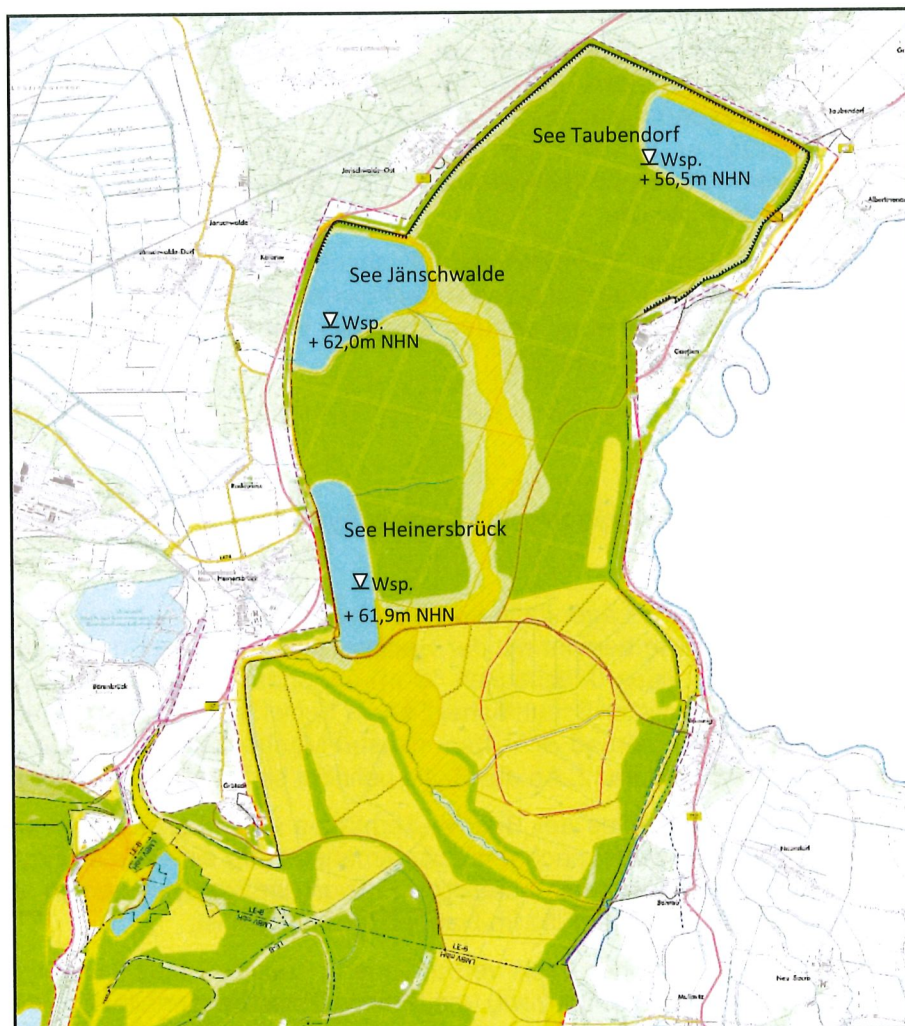


Abbildung 3: Untersuchungsgebiet

Die ca. 30 km lange Schnittlinie zwischen dem ehemaligen Tagebau Jänschwalde und dem gewachsenen Umland ist durch drei grundlegend verschiedene Gestaltungsvarianten gekennzeichnet. Innerhalb der drei Bergbaufolgeseen (Abb. 3) ist es die Ufergestaltung im oberen Teil der ehemaligen gewachsenen Kopf- bzw. Endböschungen. Kennzeichnend für den südlichen Teil des ABP ist eine spezifische, den örtlichen Gegebenheiten der Kippe entsprechende Gestaltung und Sicherung des Übergangsbereiches von der geodätisch höher liegenden Innenkippe auf das Gewachsene durch Überschüttung oder Materialauswahl. Im nördlichen Teil verbleibt die abgeflachte Vorschnittböschung als dauerhaft bestehendes Landschaftselement.

Im Süden grenzt die Innenkippe des Tagebaues Jänschwalde an die bergrechtlich in Verantwortung der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH stehende Kippe an.

### 3.2 Technologische Entwicklung

Bis zum Erreichen der geplanten Endstellung zu Ende 2023 entwickelt sich der Tagebau im Parallelabbau in nordöstliche Richtung.

Im Vorschnittbetrieb wird ein Schaufelradbagger als Gewinnungsgerät, eine Bandanlagenkombination zur Förderung des Abraums und ein Absetzer als Verkippungsgerät eingesetzt. Nachfolgend legt die Abraumförderbrücke das 2. Lausitzer Flöz frei. Im Grubenbetrieb wird die Rohbraunkohle des 2. Lausitzer Flözes durch Schaufelrad- und Eimerkettenbagger gewonnen. Bandanlagen fördern die Rohbraunkohle zum Übergabeplatz auf die Werkbahn in der Nähe des Kraftwerkes Jänschwalde.

Die daran anschließende im Januar 2024 beginnende nachbergbauliche Phase sieht eine umfangreiche bergmännische Umverlagerung von Innenkippenmaterial vor. Die zum großen Teil großgerätetechnisch bewegten Massen werden ebenfalls innerhalb der Randschläuche zur räumlichen Ausgestaltung der Seen benötigt.

### 3.3 Geologische, hydrogeologische und bodenphysikalische Verhältnisse

#### Geologie und Erkundung

Regionalgeologisch befindet sich die Lagerstätte im Bereich der Ostbrandenburgischen Kreidesenke. Die tertiäre Schichtenfolge beginnt mit der Sedimentation von Sanden (Grundwasserleiter 8), die der Cottbus-Formation (Mächtigkeit 50 m) angehören. Die darüber lagernde Spremberg-Formation (Älterer Lausitzer Schuttfächer) ist ein Schichtkomplex, bestehend aus Sanden (Grundwasserleiter 7), Tonen und Schluffen, dessen Mächtigkeit vom Süden (25 m) nach Norden (5 m) kontinuierlich abnimmt. An der Basis befindet sich das 4. Lausitzer Flöz.

Mit Ablagerung des unteren Abschnittes der Brieske-Formation (Mächtigkeit 50 m) beginnt eine neue Sedimentationsetappe, wobei nach der Zusammensetzung eine Zweiteilung in einen *unteren*, meist schluffigen Teil (mit dem 3. Lausitzer Flöz an der Basis) und einen *oberen*, meist sandigen Teil (mit dem 2. Lausitzer Flöz im Hangenden) typisch ist.

Zum *schluffigen Teil* gehören das an der Basis vorhandene 3. Lausitzer Flöz sowie typische Schluffhorizonte (z.B. B-Komplex mit Leithorizont) und Sande (Grundwasserleiter 6.2 und 6.3). Der *sandige Teil* setzt sich zusammen aus einer Wechsellagerung von Schluffen und Sanden (Grundwasserleiter 5 und 6.1) sowie dem Unterbegleiterkomplex. Alle bisher beschriebenen Sedimente sind den Liegendschichten des 2. Lausitzer Flözes zu zuordnen.



Das im Tagebau gewonnene 2. Lausitzer Flöz ist durch zwei Zwischenmittel in drei Flözbänke aufgespalten. Die Kohlemächtigkeit beträgt 10 m. Territorial begrenzt treten im Bereich der Flözbänke 2 und 3 Verschleppungszonen (sogenannte Mäander) auf, in denen eine Kohlebildung nicht stattfand und die genetisch durch fossile Flussläufe entstanden sind (Abb. 4).

Die Hangendschichten des 2. Lausitzer Flözes beginnen mit den tertiären Ablagerungen des oberen Abschnittes der Brieske-Formation (Mächtigkeit 40 m, wenn vollständig erhalten). Dabei handelt es sich um Schluffe (Hangendschluff, Oberbegleiter) und um Feinsande (Grundwasserleiter 3 und 4). Mit den in Relikten auftretenden Sedimenten (Schluffe) der Rauno-Formation (Jüngerer Lausitzer Schuttfächer) ist die tertiäre Schichtenfolge im Braunkohlenfeld Jänschwalde abgeschlossen.

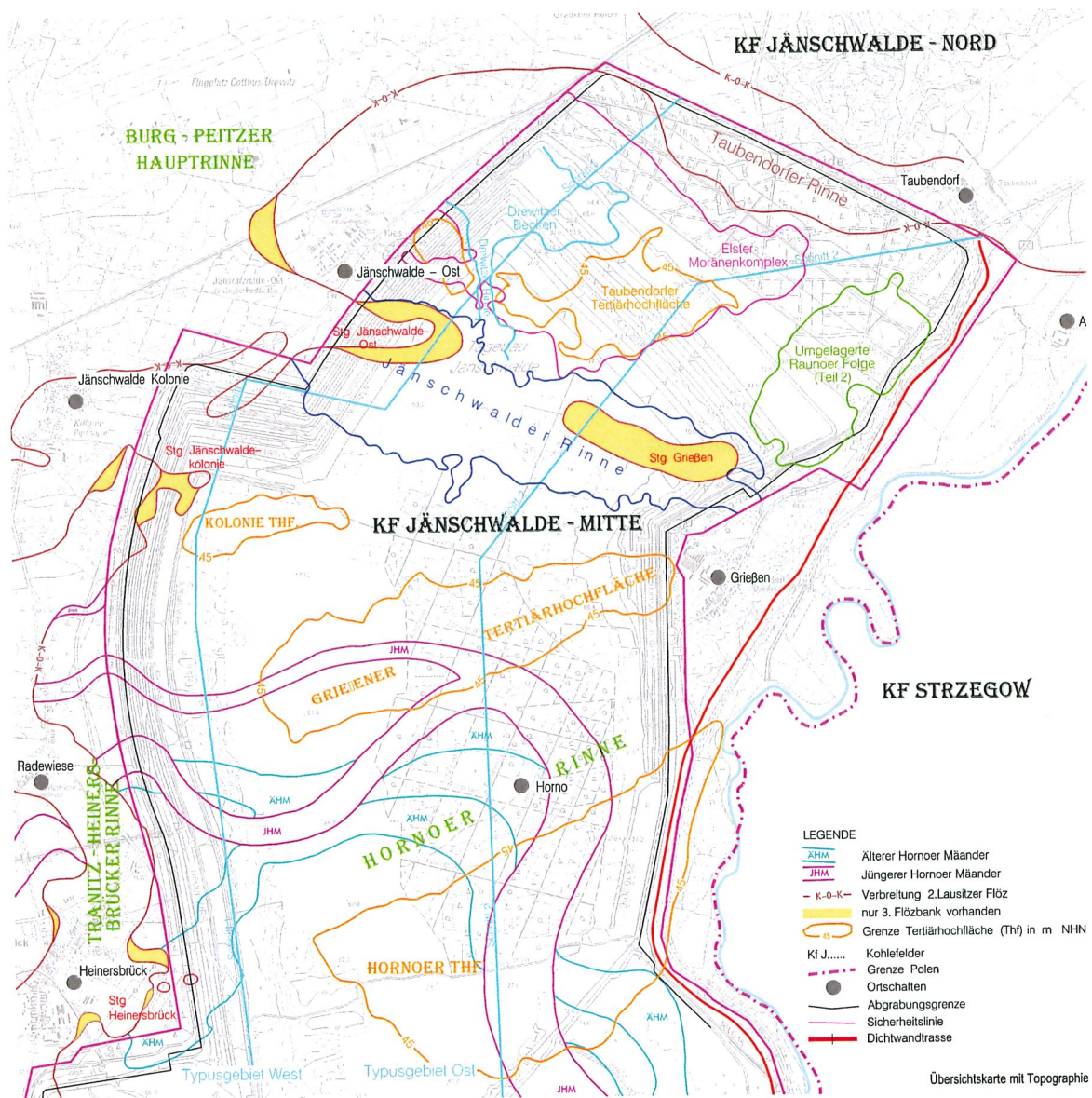


Abbildung 4: Lage der das Kohlenfeld Jänschwalde kennzeichnenden geologischen Strukturen



Der quartäre Anteil am Deckgebirge ist durch das Auftreten von Ablagerungen (Sande/Kiese, Schluffe/Tone, Geschiebemergelhorizonte) verschiedener Eiszeiten geprägt. Die Sedimente gehören zum Baruther Urstromtal, Taubendorfer Sander und Altmoränengebiet der Hornoer Hochfläche.

In Abhängigkeit von der Oberflächenmorphologie schwankt die Mächtigkeit des Deckgebirges, dass sich aus quartären und tertiären Sedimenten zusammensetzt, zwischen 45 m (Baruther Urstromtal) und 95 m (Hornoer Hochfläche).

Im Bereich des Braunkohlenfeldes Jänschwalde sind nach bisherigem Kenntnisstand endogen bedingte Lagerungsstörungen im quartären und tertiären Schichtverband nicht bekannt. Lokale Deformationen und Auffaltungen einzelner Komplexe sind auf eine glazigene Beeinflussung zurückzuführen.

Das Untersuchungsgebiet wurde im Rahmen der Revier- und Betriebserkundungen umfangreich mit ca. 5.700 Erkundungsbohrungen (Stand Oktober 2020) erkundet. Die Lagerstätte gilt als erkundet. Die Erkundungsergebnisse wurden u. a. in Form von geologischen Schnitten dargestellt und fanden Eingang in die Standsicherheitsnachweise (SN) für die bleibenden Böschungen. Da zukünftig jede weitere Standsicherheitsuntersuchung für nachbergbaulich bleibende gewachsene Böschungen auf bereits bestehende SN aufbaut, ist eine eigenständige Erkundung für die Belange der Restraumgestaltung auf der gewachsenen Seite zur Thematik der Standsicherheit von Böschungen nicht erforderlich. Bezüglich der Kippenseite gelten die Aussagen unter der Teilüberschrift Bodenphysikalische Kennwerte am Ende des aktuellen Abschnittes.

### Hydrologie und Entwässerung

Die bergmännisch und geotechnisch erforderliche Entwässerung erfolgt mittels Filterbrunnen-entwässerung und reicht in die tiefliegenden Grundwasserleiter GWL 7 und 8 hinein. Während das Gebirge im Hangenden auf ein geotechnisch zulässiges Restwasserstandsniveau von  $h_{W,100} = 4$  m (Restwasserstandshöhe in einem Abstand von 100 m zur jeweiligen Böschungunterkante) entwässert wird, erfolgt im Liegenden eine Druckentspannung auf ein ebenfalls durch geotechnische Vorgaben reglementiertes Liegenddruckniveau. Das unmittelbar der Auskohlung nachfolgende Kippensystem wird nach Erfordernis wasserfrei gehalten. Insbesondere im Bereich der westlichen Kippenkopfböschungen werden Filterbrunnen zur Entwässerung der Kippe im Bereich eigens hierfür in Sonderschüttung abgesetzter Drainagen betrieben.

Die linienförmig angeordneten Filterbrunnen werden zusammengefasst als Brunnenriegel betrieben. Unterschieden wird in die dem Abbaufeld vorlaufende Feldriegel, an den Abbaufeldgrenzen dauerhaft betriebene Randriegel und rückwärtig in Kippenriegel. Ergänzend erfolgt die Anlage von Entwässerungsgräben bei Erfordernis auf Bermen und Arbeitsebenen sowie obligatorisch die Führung des Liegengrabens auf dem betrieblichen Liegenden. Mit der östlich des Tagebaues errichteten Dichtwand wird die Reichweite der Entwässerung im Hangenden begrenzt.

Die Kontrolle des Entwässerungszustandes erfolgt über ein weitreichendes Netz von Grundwassermessstellen. Seitens der Bodenmechanik folgen hierzu für ausgewählte Kontrollpegel als Ergebnis bodenmechanischer Berechnungen Vorgaben zu entsprechenden hydrologischen Melde- und Grenzwerten.

Der gesamte zu untersuchende Restraum des Tagebaues Jänschwalde wird durch das bestehende Netz an Entwässerungsbrunnen im ausreichendem Maße entwässert. Auf der gewachsenen Seite wird der zu betreibende Entwässerungsaufwand in Abhängigkeit vom



Schließen der tiefen Randschläuche schrittweise abzumindern und im Bereich der drei Bergbaufolgeseen in Abhängigkeit vom Flutungsstand jedoch noch relativ lange zu betreiben sein. Die Melde- und Grenzwerte werden schrittweise entsprechend des Sicherungsfortschrittes angepasst.

Auf der Kippenseite ist von neu aufzubauenden Kippenriegel auszugehen.

### Bodenphysikalische Kennwerte

Das Untersuchungsgebiet wurde im Rahmen der Revier- und Betriebserkundungen im Zeitraum zwischen 1970 und 2020 umfangreich beprobt. Es wurden mehr als 3.100 Proben aus ca. 600 Erkundungsbohrungen im bodenphysikalischen Labor untersucht (Stand 10/2020). Die Parameter sind für statistische Auswertungen in einer Datenbank gespeichert. Die hieraus folgenden, statistisch ausgewerteten und den Lockergesteinsvarietäten zugeordneten bodenphysikalischen Kennwerte zur Wichte und Festigkeit bilden eine der wichtigsten Grundlagen für bodenmechanische Berechnungen. Eine eigenständige bodenphysikalische Erkundung für die Belange der Restraumgestaltung auf der gewachsenen Seite ist im geringen Umfang zum Beispiel für die Ufergestaltung notwendig. Hierzu sind aus dem späteren Uferbereich Bodenproben zur Ermittlung der Kornverteilungskurven zu untersuchen. Für die Bergbaufolgeseen Heinersbrück und Jänschwalde fand dies bereits abschließend statt.

Für die gekippte Seite sind weiterführende bodenphysikalische Untersuchungen zwingend erforderlich. Grundsätzlich bekannt sind die Eigenschaften der Kippe zum Sackungsverhalten und zur Verflüssigungsneigung mit Restfestigkeit. Anhand bereits vorliegender Erkundungsetappen für die Betriebsstraße, Depot Jänschwalde II, Windenergieanlagen, Rückverlegung Malxe und Düringsgraben liegen bereichsweise bodenphysikalische Kennwerte in herausragender Qualität vor. Über den Umfang der weiteren bodenphysikalischen Erkundung entscheidet der zuständige Sachverständige für Böschungen.

### 3.4 Geotechnische Schwerpunkte

Auf Grund des gegenwärtigen Planungsstadiums basieren die folgenden Darlegungen zu den geotechnischen Schwerpunkten überwiegend auf Grundlage von schematisierten Modellen. Um die Modelle weiter zu präzisieren und letztlich ortskonkret zu parametrisieren, sind weitere Präzisierungen im Sinne der in Abschnitt 1.2 dargelegten Methodik zur zeitlichen Einordnung von Standsicherheitsuntersuchungen notwendig.

Zu unterscheiden sind Baggerböschungen, die Einschnitte in den geologisch gewachsenen Untergrund darstellen, und Kippenböschungen, die aus den durch Bagger-, Transport- und Verkippungsprozesse beeinflussten Lockergesteinen aufgebaut werden. Die bodenmechanische Beurteilung der folgend genannten Problemstellungen basiert auf bodenphysikalischen Kennwerten unter Integration der geologischen, hydrologischen und technologischen Randbedingungen.

Die Standsicherheitsuntersuchungen basieren auf bodenphysikalischen Kennwerten, die fortlaufend mit der Tagebauentwicklung im Rahmen der Erkundungsetappen gewonnen und geostatistisch ausgewertet werden. Die Wichte, der Reibungswinkel und die Kohäsion der jeweilig am Gebirgs- bzw. Kippenaufbau beteiligten Materialien stellen die wesentlichen Eingangsgößen dar. Von besonderem Interesse sind dabei die Parameter potentieller Schwächeflächen im Gebirgsverband. Die langjährigen Erfahrungen zeigen, dass sich infolge geologischer Prozesse und/oder der Entlastung durch den Tagebauaushub insbesondere in bin-

digen Bodenschichten vorgegebene Gleitflächen (VG) ausbilden können, deren Scherfestigkeit zum Teil weniger als 30% der intakten Bodenschichten beträgt. Die Scherfestigkeit dieser Gleitflächen wird als Restscherfestigkeit bezeichnet.

In Abhängigkeit vom Vorhandensein der VG und von deren räumlichen Lage und Restscherfestigkeit sowie der weiteren im geotechnischen Modell zu integrierenden Randbedingungen (Geologie, Hydrologie, Technologie) erfolgen für die Baggerseite Untersuchungen verschiedener Versagensszenarien. Solche Szenarien können beispielsweise Böschungsbrüche infolge des Abgleitens auf einer VG oder Böschungsbrüche auf kreiszylindrischen Prüfflächen (KZP) sein. Beispielhaft sind die Mechanismen unter zusätzlichem Einfluss einer Belastung auf einer Einzelböschung und die Wirkung eines Wasserdruckes im Liegendgrundwasserleiter in Abbildung 5 schematisch dargestellt.

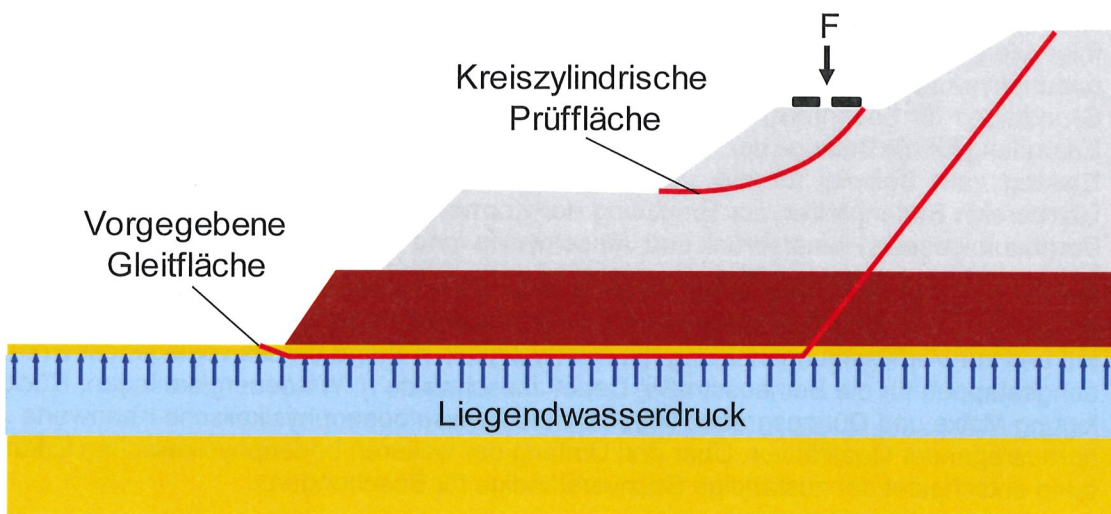


Abbildung 5: Schematische Darstellung möglicher Versagensmechanismen

Weitere mögliche Versagensszenarien sind in Abhängigkeit standortspezifischer Besonderheiten, wie sie beispielsweise Störungszonen darstellen, abzuleiten und zu untersuchen.

Die gebräuchlichsten Berechnungsverfahren mit einer Zuordnung zu den jeweiligen Versagensformen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Berechnungsverfahren für verschiedene Versagensformen

Berechnungsmethode (Programme)	Versagensform
BOROWICKA (TBOME, STANDBOME)	KZP und VG
Morgenstern-Price (GeoSlope)	KZP und VG
Schubspannungsvergleich mit Erddruckermittlung nach RENDULIC/ENGESSER (UNIBM5)	VG
JANBU (GEOSLOPE, STANDBOME, TBOME)	VG
BISHOP (GEOSLOPE, STANDBOME, TBOME)	KZP
Phi-c-Reduktion im Elasto-plastischen Stoffgesetz nach Mohr-Coulomb in Finiten Elemente oder Finiten Differenzen Programmen (PLAXIS, FLAC)	Beliebige Form und VG, zwei- und dreidimensional



Bei den Standsicherheitsuntersuchungen für die Baggerböschungen wird weiterhin zwischen den fortschreitenden und den bleibenden Böschungssystemen unterschieden. Während für die fortschreitenden Böschungssysteme im Allgemeinen nur betriebsinterne Zusammenhänge, Abhängigkeiten und Randbedingungen zu berücksichtigen sind, bilden die End- und Kopfböschungssysteme mit den unmittelbaren Abgrabungsgrenzen und Sicherheitslinien die Schnittstelle zwischen bergrechtlicher Verantwortung und öffentlichem Recht. Die oben beschriebenen Verfahrensweisen zu den Standsicherheitsuntersuchungen finden grundsätzlich für fortschreitende und bleibende Böschungssysteme gleichermaßen Anwendung. Bezogen auf den Untersuchungsumfang zum ABP werden die weiteren Betrachtungen im Abschnitt 4 ausschließlich auf die Standsicherheit der Kopfböschungssysteme beschränkt:

- Gewachsene Kopf- und Endböschungssysteme im Bereich der drei Bergbaufolgeseen und
- gewachsene Kopfböschungen außerhalb der Bergbaufolgeseen.

Neben den geotechnischen Schwerpunkten auf der Baggerseite bilden die Aufgaben zur Kippenendgestaltung im Zuge der Sicherung der gekippten Seeböschungen sowie zur Rekultivierung und Wiedernutzbarmachung der bergbaulich in Anspruch genommenen Flächen weitere Schwerpunkte der geotechnischen Arbeiten. Die Beherrschung der in Folge des Tagebauprozesses entstehenden Abraumkippen und insbesondere deren potentielle Verflüssigungsempfindlichkeit stellt die wesentliche Herausforderung bei der Sicherung der Kippenkörper in Seenähe und bei der Gestaltung der Lausitzer Kippenoberflächen dar.

Die Prozesse der Verflüssigung sind an spezielle Randbedingungen gebunden. Das in Folge der Verkippung von erdfeuchten, überwiegend gleichförmigen Sanden mit entsprechend runden Kornformen entstehende Makroporengefüge führt prinzipiell zu einer sehr lockeren Lagerung der Kippenkörper. Steigt nachbergbaulich das Grundwasser in solchen Kippen wieder an, kann, verursacht durch ein Initial, der Verflüssigungsprozess ausgelöst werden. Die Konsequenz ist ein Festigkeitsverlust, der sich vom lokalen Entstehungsort schnell und weitreichend in die Kippe fortsetzen kann.

Mit der Berücksichtigung wichtiger Grundsätze zur Kippenendgestaltung ist die geotechnisch sichere Gestaltung von Kippen auch unter den schwierigen Randbedingungen eines vorhandenen Verflüssigungspotentials gegeben. Die weiteren Ausführungen im Abschnitt 5 beziehen sich auf die Schwerpunktbereiche:

- Kippengestaltung im Einflussbereich der drei Bergbaufolgeseen,
- Gestaltung der Kippenoberfläche einschließlich des Überganges auf das Gewachsene und
- Gestaltung der Kippenoberfläche im Bereich von Linienbauwerken wie Malxe und Straßen.

Sämtlichen geotechnischen Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Braunkohlenbergbau ist gemein, dass sie gegenüber dem üblichen geotechnischen Spektrum beispielsweise im Bauwesen einen besonderen Charakter insbesondere im Hinblick auf die geometrischen Dimensionen aufweisen. Diesem Sachverhalt Rechnung tragend, wird im Land Brandenburg der Status des Sachverständigen für Böschungen in der Richtlinie Geotechnische Sicherheit [AU 2.1] mit Verweis auf die Referenzliste der anerkannten Sachverständigen rechtlich verankert. Das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg stellt somit sicher, dass den außergewöhnlichen und besonderen geotechnischen Bedingungen im Braunkohlenbergbau der notwendige Sachverstand entgegengebracht wird.

- Sichtvermerk -  
Landesamt für Bergbau,  
Geologie und Rohstoffe,  
Brandenburg

Eine weitere aus den oben genannten Besonderheiten in der geotechnischen Praxis im Braunkohlenbergbau erwachsene Vorgehensweise ist die Festlegung und Begründung des erforderlichen Sicherheitskoeffizienten durch den jeweiligen Sachverständigen. Im Allgemeinen beschreibt der Sicherheitskoeffizient das Verhältnis zwischen den aufnehmbaren Beanspruchungen (Spannung, Kraft, Moment, etc.) und den tatsächlich vorhandenen Beanspruchungen auf ein Bauwerk. Gelegentlich werden auch die Begriffe haltende Kräfte/Momente und treibende Kräfte/Momente verwendet. Unabhängig von diesen Bezeichnungsfragen ist festzustellen, dass der Sicherheitskoeffizient streng an das den Versagensmechanismus beschreibende mathematisch-physikalische Modell gekoppelt ist.

Werden die aufnehmbaren Beanspruchungen mit **R** und die tatsächlich vorhandenen Beanspruchungen mit **E** bezeichnet, lässt sich der Sicherheitskoeffizient **Si** wie folgt darstellen:

$$S_i = \frac{R}{E} \quad (1)$$

Bei einem ermittelten Sicherheitskoeffizienten von  $S_i = 1,0$  stehen also die Kräfte/Momente exakt in einem Gleichgewicht.

Durch den Sicherheitskoeffizienten  $S_i$  sollen alle unvorhergesehenen und zahlenmäßig nicht im Modell erfassten Einflüsse quantitativ berücksichtigt und damit beherrscht werden.

Je höher die bei der Berechnung nicht oder ungenügend berücksichtigten Einflüsse einzuschätzen sind, umso größer muss der erforderliche Standsicherheitskoeffizient gewählt werden.

Zu berücksichtigen sind ebenfalls die wirtschaftlichen Folgen, die stets mit dem Eintreten des Versagensfalls verbunden sind, wobei der erforderliche Sicherheitskoeffizient mit steigendem potentielltem Schadensausmaß zu erhöhen ist.

Die Einschätzung der Modellunschärfe muss dabei durch den Sachverständigen erfolgen, da besonders im Bereich der bergmännischen Geotechnik diese in erheblichem Maße vom Kenntnisstand und den Erfahrungen zur geologischen, hydrologischen Situation und zu den bodenphysikalischen Parametern abhängt.

Für die Wahl und die Begründung eines erforderlichen Standsicherheitskoeffizienten können folgende Kriterien beachtet werden:

- Kenntnisstand und Erfahrungen mit gleichen oder ähnlichen Aufgabenstellungen,
- Risikobeurteilung, wirtschaftliche Folgen des Versagens (Personen, Geräte und zu schützende Objekte) und
- Nachweiszeitraum oder Geltungsdauer.



#### 4 Gewachsene Kopfböschungssysteme

Bereits im Abschnitt 3.4 wurde auf die allgemein angewendete Vorgehensweise bei Untersuchung der Standsicherheit von gewachsenen Böschungen und Böschungssystemen eingegangen.

Die Kopfböschungssysteme besitzen auf Grund der Tatsache, dass sie eine Schnittstelle zwischen bergrechtlicher Verantwortung und öffentlichem Recht bilden, eine besondere Bedeutung. Dieser Tatsache wird unter anderem bei der Festlegung der erforderlichen Standsicherheitskoeffizienten im Bereich der drei zukünftigen Bergbaufolgeseen Rechnung getragen.

Die Dimensionierung der Kopfböschungssysteme für das Freischneiden während der aktiven Bergbauphase erfolgt ausgehend von einem vorprojektierten und im Allgemeinen sich auf langjährige Erfahrungen und grundsätzlichen Annahmen stützenden Böschungssystem. Darauf aufbauend erfolgen zum Nachweis der Standsicherheit des gewachsenen Böschungssystems unter den besonderen geotechnischen Verhältnissen der geplanten Flutung weitere umfangreiche Standsicherheitsberechnungen. Beispielhaft ist ein solches vorprojektiertes Böschungssystem für die Flutungsphase in Abbildung 6 dargestellt.

In den bodenmechanischen Berechnungen erfolgt die Variation der Böschungsgeometrie bezüglich der Lage des Ufers und der Lage spezifischer Stützkörper. Die Stützkörper können notwendig sein, da die für die aktive Phase freigeschnittenen Böschungssysteme in vielen Fällen unter Beachtung der Flutung zu steil freigeschnitten wurden. Dieses Phänomen tritt im Bereich der geplanten Bergbaufolgeseen Heinersbrück und Jänschwalde auf, da diese zum Zeitpunkt der Böschungsprojektierung noch nicht in Planung waren. Die gewachsene Endböschung für den Bergbaufolgesee Taubendorf kann bereits mit dem noch erfolgenden Freischneiden gezielt sicher, d. h. ohne Stützkörper, für die Flutung gestaltet werden.

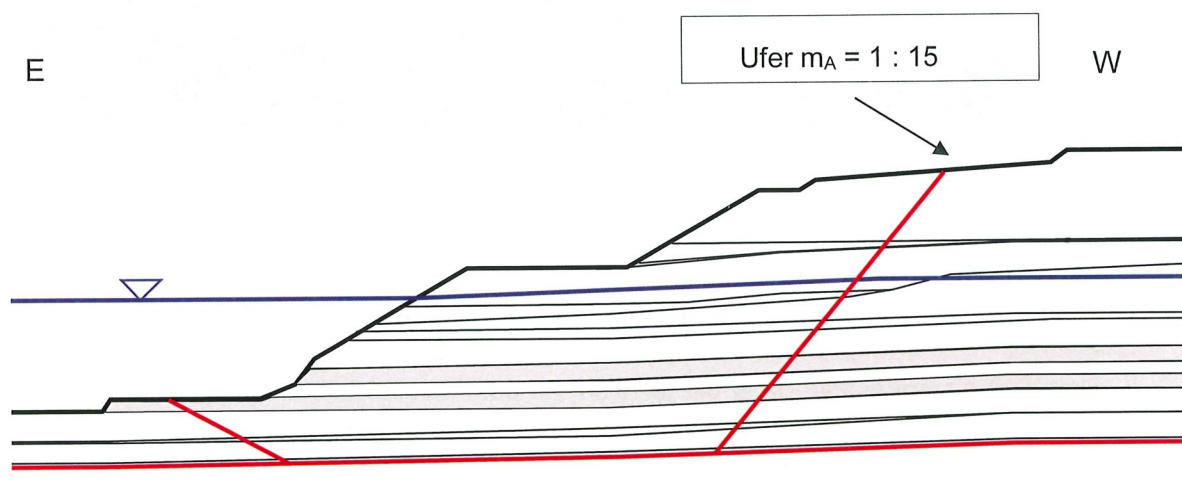


Abbildung 6: Vorprojektiertes Kopfböschungssystem, aufbereitet für Standsicherheitsberechnungen für die Flutungsphase im Schnitt W 30, zukünftiger Tagebausee Heinersbrück

Jede Dimensionierung startet für jeden maßgeblichen geologischen Schnitt mit einer Betrachtung der jeweiligen Einzelböschungen unter Berücksichtigung von kreiszylindrischen Prüfflächen und den zumeist bemessungswirksam werdenden geologisch vorgegebenen Gleitflächen. Sind die Böschungswinkel der Einzelböschungen durchgehend festgelegt, wird mit der Variation des Gesamtsystems begonnen. Dabei werden die Bermenbreiten so variiert, dass die Standsicherheit des Gesamtsystems mit dem erforderlichen Standsicherheitskoeffizienten nachgewiesen werden kann. Insbesondere für das Gesamtböschungssystem werden die Wasserdrücke aus den Liegendgrundwasserleitern berücksichtigt.

Kennzeichnend für die Standsicherheit des Böschungssystemes während der Flutung ist das Erreichen eines Sicherheitsminimums während der Flutungsphase bei Einstauhöhen von  $1/3 \dots 1/2$  der geplanten Endstauhöhe. Auch während der Einstauphase erfolgen Vorgaben für einzuhaltende Liegendwasserdrücke und Restwasserstände im Hangenden. Ein Großteil der Entwässerungsanlagen wird auch während der Einstauphase weiterbetrieben und erst mit Annäherung an das Stauziel schrittweise außer Betrieb genommen.

Die Berechnungen erfolgen in der Regel mit konventionellen Verfahren, deren gebräuchlichsten Varianten in Tabelle 1, Seite 12 zusammengefasst sind.

Neben der Anwendung klassischer bodenmechanischer Berechnungsverfahren erfolgen in geologischen Schwerpunktbereichen gesonderte Untersuchungen mit Hilfe komplexer numerischer Verfahren (bspw. Methode der Finiten Differenzen). Damit können unter anderem die in den konventionellen Berechnungen vorzugebenden Bruchmechanismen überprüft, nachempfunden und nachgewiesen werden. Dies erfolgt unter Anwendung der sogenannten  $\phi$ -c-Reduktion, einer Berechnungsmethode, bei der die Festigkeitsparameter sukzessive soweit herabgesetzt werden, bis ein Systemversagen (Grenzwerte der Verschiebungsvektoren) einsetzt.

Beispielhaft zeigt die Abbildung 7 die Ausbildung versagensrelevanter Bruchmechanismen an Hand der sich mit der Kennwertreduktion einstellenden Scherbänder.

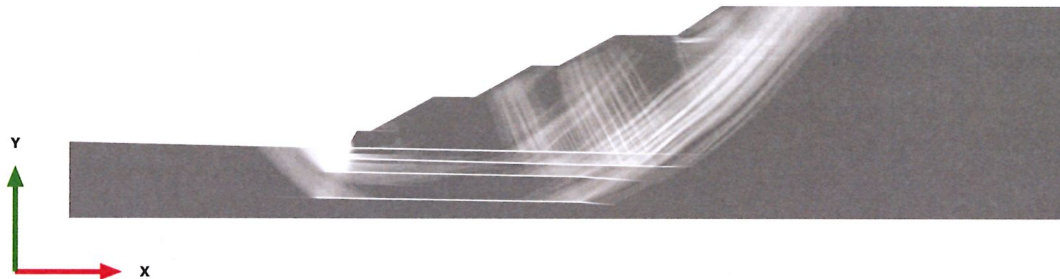


Abbildung 7: Scherbänder infolge  $\phi$ -c-Reduktion

Mit den ergänzenden Untersuchungen kann sowohl die Methodik der Standsicherheitsuntersuchungen als auch das Sicherheitsniveau mit voneinander unabhängigen Verfahren überprüft und nachgewiesen werden.

Damit ist sichergestellt, dass die letztlich mit dem Abschlussbetriebsplan vorliegenden und noch zu erarbeitenden Standsicherheitsnachweise die entscheidenden Randbedingungen berücksichtigen und das geforderte Sicherheitsniveau gewährleistet wird.



## 5 Kippengestaltung

Zur bodenmechanischen Nachweisführung mit Bezug auf die Kippengestaltung lassen sich prinzipiell zwei Kategorien unterscheiden, deren differierende Berechnungsfälle gleichermaßen auf die Verflüssigungsempfindlichkeit der verkippten Lockergesteine zurückzuführen sind. Während die erste Kategorie die Bewertung der kippenseitigen Seeböschungen umfasst, behandelt die Kategorie 2 die zumeist ebenen bis flachwelligen Kippenflächen im Hinterland der Bergbaufolgeseen und die Übergangsbereiche zum gewachsenen Gelände.

An den kippenseitigen Seeböschungen sind in den unmittelbaren Böschungsbereichen der späteren Ufer verdichtete Bereiche als Stützkörper (versteckte Dämme) anzulegen und so zu bemessen, dass eine Verflüssigung im Hinterland nicht zum Abfließen der Kippenmassen in den offenen Restsee führt. Die Dimensionierung der versteckten Dämme erfolgt nach erdstatischen Verfahren. Dabei werden Gleichgewichtsbetrachtungen zwischen den Erd- und Wasserdruckkräften sowie den wirkenden Gewichtskräften aufgestellt. Aus den Berechnungen geht unter Beachtung des geforderten Sicherheitsniveaus die erforderliche Breite  $B$  des Verdichtungskörpers hervor. In Abbildung 8 ist beispielhaft ein solches Bemessungsszenario skizziert.

Die Herstellung der versteckten Dämme erfolgt durch erprobte Verdichtungsverfahren. eingesetzt werden können beispielsweise die Rütteldruck- und Rüttelstopfverdichtung, die Sprengverdichtung und die Fallgewichtsverdichtung. Neben den praktischen Erfahrungen aus der vielfachen Herstellung der versteckten Dämme liegen Empfehlungen zu deren Dimensionierung [AU 2.2] und zur Gestaltung der Uferböschungen [AU 2.3] vor.

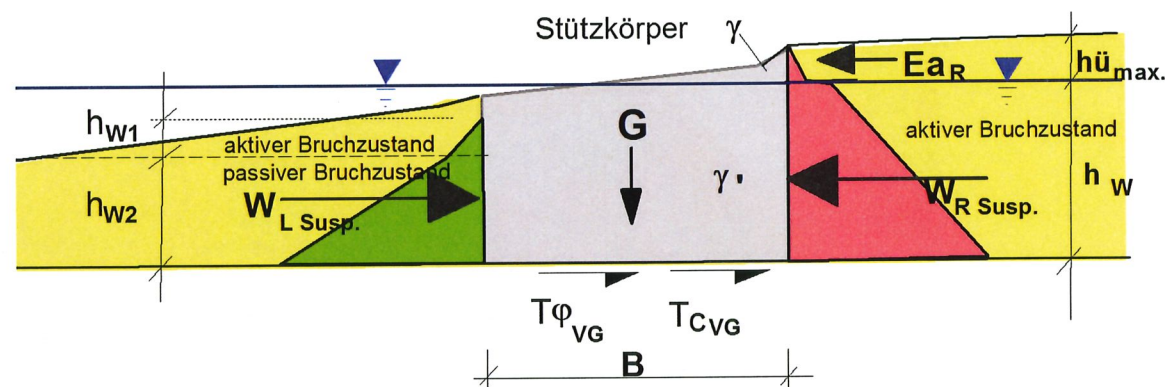


Abbildung 8: Prinzipskizze Bemessung eines versteckten Damms zur Ufersicherung an gekippten Seeböschungen

Bezüglich der flachwelligen Kippenbereiche im Hinterland lag bereits 2008 mit der Standsicherheitseinschätzung [AU 2.13] eine für die Kippe Jänschwalde gültige Bemessungsgrundlage vor, die in allen bergbauplanerischen Arbeiten Berücksichtigung fand. Kennzeichen dieser Bearbeitung ist die Erkenntnis, dass die Kippenoberfläche grundsätzlich mit sehr geringer Neigung zu gestalten ist. Darüber hinaus **wurde seit 2010 durch die Lausitz Energie Bergbau AG bzw. deren Vorgängerunternehmen ein Forschungsprojekt über einen Gesamtzeitraum von 6 Jahren initiiert, dass insbesondere die Zusammenhänge zwischen dem Grundwasserwiederanstieg und den eine Verflüssigung auslösenden Initialen in Kippenbereichen hinter den gesicherten Restseeböschungen thematisierte**. Ausgehend von den in den Jahren 2005 bis 2010 hauptsächlich auf den Innenkippen der ehemaligen Tagebaugebiete Schlabendorf und Seese aufgetretenen Bodenverflüssigungsereignisse im ebenen bis flachwelligen Gelände, die weder in der Größe noch in ihrer Häufigkeit erwartet worden waren, erfolgte u. a. eine



umfangreiche Auswertung der Schadensereignisse, die die Basis für weitere Untersuchungen darstellte.

**Aus den Forschungsergebnissen, die in einem Abschlussbericht [AU 2.4] dokumentiert wurden**, erarbeitete das Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg im Auftrag der Lausitz Energie Bergbau AG ein Grundkonzept zur Einschätzung und Bemessung der Morphologie von Kippenoberflächen als Handlungsgrundlage (HGL) [AU 2.5] für die praktische Anwendung (erstmalig angewandt in [AU 2.6]). **Mit der in der HGL vorgeschlagenen Methodik steht somit auch für die Bewertung der** flachwelligen Kippenflächen im Hinterland der Bergbaufolgeseen eine praktisch erprobte Vorgehensweise auf wissenschaftlicher Grundlage zur Verfügung, die bezüglich der sehr kleinen zulässigen Neigungen der Kippenoberfläche die SE [AU 2.13] bestätigt.

Grundsätzlich sind die bodenmechanischen Untersuchungen zur Kippenendgestaltung zunächst auf Grundlage der vorbergbaulichen geologischen Verhältnisse sowie der im Tagebaubetrieb eingesetzten Technologien zu beginnen. Besonders hervorzuheben ist dabei die Verteilung bindiger und nichtbindiger Lockergesteine, die aus dem Bohrbestand und der Modellierung der gewachsenen Strukturen im Kontext zur angewendeten bergtechnologischen Abbaukonzeption eine quantitative Analyse des Verflüssigungsverhaltens ermöglicht. Beispielhaft und auszugsweise ist eine solche Verteilungskarte in Abbildung 9 für das Tagebaufeld Jänschwalde dargestellt.

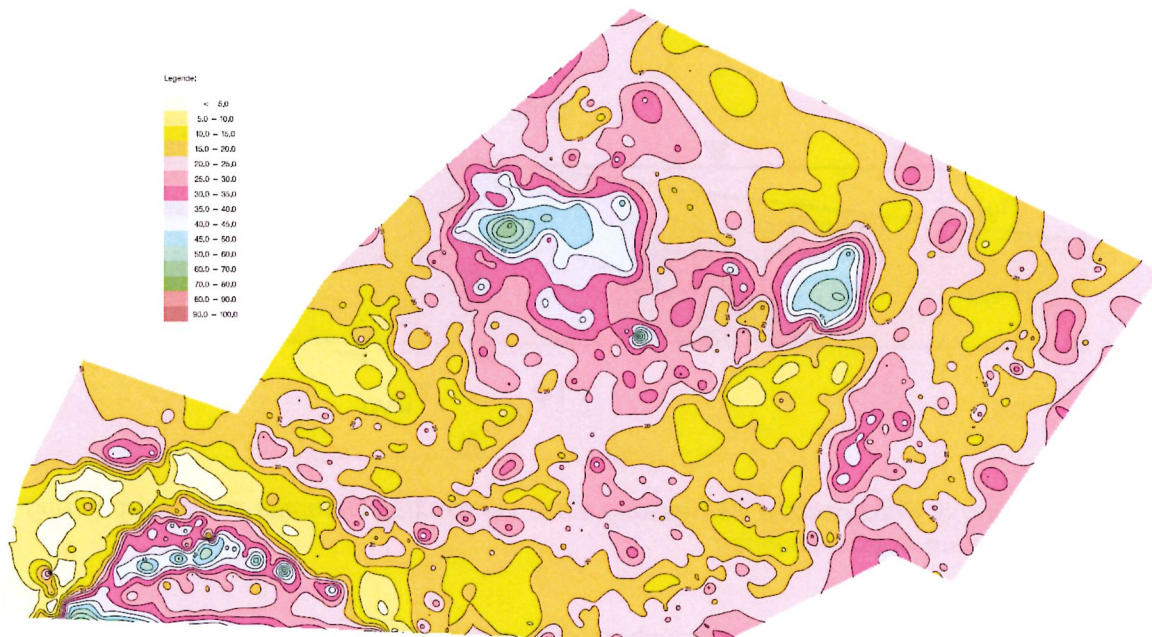


Abbildung 9: Tagebau Jänschwalde - Bindigkeitsverteilung im Brückenabraum im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes

Als bergtechnologische Randbedingungen werden dabei insbesondere die Verkippungstechnologie, die Lage der Arbeitsebenen, der Einsatz von Sondertechnologien und sämtliche marktscheiderische Informationen aus dem Risswerk berücksichtigt.

Während am Förderbrückenkomplex die Baggereinheiten mehr oder weniger starr mit den Verkippungseinheiten gekoppelt sind und somit ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen



den gewachsenen Strukturen und den Kippenmaterialien leicht hergestellt werden kann, wären für die Analyse der Absetzerverkippung die Lagekoordinaten des Vorschnittbaggers, des Absetzers und der geologischen Bohrungen mit den Informationen der Sedimentzusammensetzung zu verschneiden.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Standsicherheitsuntersuchungen ist die Analyse der aktuell vorliegenden sowie der sich nachbergbaulich einstellenden hydrologischen Verhältnisse. Dabei ist es wichtig, mögliche Schwankungsbreiten anzugeben, in denen ggf. Abweichungen liegen können. Eine entscheidende Rolle spielen die angesetzten Randbedingungen für die umgebenden Gewässer wie Seen, Restseen und Flüsse.

Zur geotechnischen Modellierung sind die erdfeuchten und die wassergesättigten, verflüssigungsempfindlichen Kippenmaterialien bodenphysikalisch zu charakterisieren. Für die Liegendschichten und die erdfeuchten Kippenmaterialien liegen dazu prinzipiell umfangreiche Erkenntnisse aus dem Gewinnungs- und Verkippungsprozess im Tagebaubetrieb vor.

Die bodenphysikalische Charakterisierung der wassergesättigten, verflüssigungsempfindlichen Kippenmaterialien erfolgt in der Regel durch Untersuchungen an strukturgestörten Proben an Hand von Triaxialversuchen unter Anwendung einer speziell entwickelten Mehrstufenversuchstechnik. Durch geeignete Materialmodelle sind Abhängigkeiten sowohl vom Spannungs- als auch vom Sättigungszustand der Kippenmaterialien darstellbar. Dabei zielen die Untersuchungen auf die Setzungs- und Sackungseigenschaften sowie auf das Festigkeitsverhalten bei Verflüssigung ab.

Ist verflüssigungsempfindliches, sich kontraktil verhaltendes Material vorhanden, kann eine Entfestigung unterhalb der Grundwasseroberfläche eintreten, wenn die Bruchfestigkeit durch ein Initial überschritten wird. In einer Initialdiskussion sind differenziert nach natürlichen und anthropogen Initialen die verschiedenen Auslösemomente und Eintrittswahrscheinlichkeiten für eine Verflüssigung zu betrachten und einzuschätzen. Ein rechnerischer Nachweis, dass keine Bodenverflüssigung eintritt, ist nur möglich, wenn neben dem auslösenden Initial auch der Spannungszustand in der Kippe bekannt und physikalisch-mathematisch beschreibbar sind. Die weiteren Bemessungsschritte erfolgen deshalb ungeachtet der Eintrittswahrscheinlichkeit einzelner Initiale und der Zustand der Verflüssigung wird, auf der sicheren Seite liegend, in den wassergesättigten Kippenmaterialien vorausgesetzt.

Für das Festigkeitsverhalten im Fall der Verflüssigung kann für bestimmte Kippenmaterialien vorausgesetzt werden, dass für einen Teil der Körner die Korn-zu-Korn-Kontakte erhalten bleiben. Durch diese wenigen Korn-zu-Korn-Kontakte bleibt auch in den verflüssigten Kippenmassen eine geringe Festigkeit als Restfestigkeit im Verflüssigungsfall erhalten. Die nachstehende Gleichung liefert beispielhaft einen spannungsabhängigen Festigkeitsansatz auf der Basis des Restreibungswinkels  $\varphi_{u,R}$ .

$$\varphi_{u,R} = 1^\circ \left[ a \cdot \left( \frac{\sigma'_z}{\bar{\sigma}} \right)^2 + b \cdot \left( \frac{\sigma'_z}{\bar{\sigma}} \right) + c \right] \quad (2)$$

Die in diesem quadratischen Ansatz enthaltenen Konstanten können aus der Regression der spannungsabhängigen Restfestigkeitswerte, die sich bspw. aus der Auswertung radiometrischer Kombinationsdrucksondierungen ergeben, bestimmt werden. Die Spannungsabhängigkeit bezieht sich dabei auf die wirksamen Vertikalspannungen. In der Abb. 10 sind in einem Beispiel für die Berechnung der zulässigen Neigungen der Kippenoberfläche die Reibungswinkel unterhalb der Böschung für den Fall der Verflüssigung mit Restfestigkeit dargestellt. Gleichwertig zu dem hier vorgestellten Ansatz kann die Restscherfestigkeit auch als scheinbare Kohäsion unter undrainierten Bedingungen abgebildet werden.



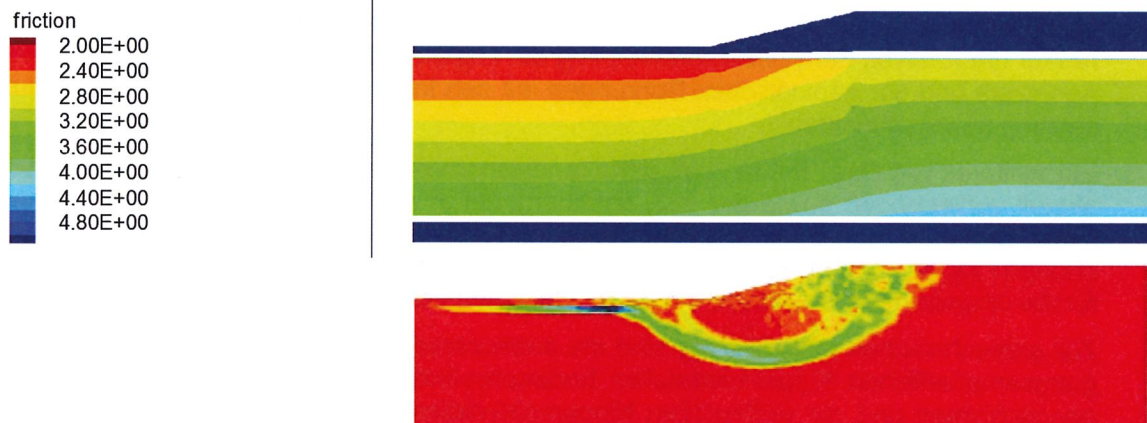


Abbildung 10: Zugeordnete Reibungswinkel zwischen 2,0° und 4,8° als Funktion der Vertikalspannung (im Bild oben) und Bruchfigur (unten)

Für die ebenen bzw. flachwelligen Kippenflächen ergeben sich infolge des Verflüssigungspotentials der Kippenmaterialien als grundsätzliche bodenmechanische Aufgaben:

- die Berechnung erforderlicher tragfähiger Überdeckungen,
- die Erstellung von Setzungs- und Sackungsprognosen und
- die Dimensionierung der Kippenmorphologie.

Unter Beachtung, dass in den wassergesättigten Kippenmaterialien eine Verflüssigung vorausgesetzt wird, werden mit den nachfolgend vorgestellten Nachweisen die Auswirkungen einer Verflüssigung im Hinblick auf die geplante Nutzung beurteilt.

Die Bemessung tragfähiger erdfeuchter Überdeckungen ist auf ein Durchstanzproblem als Sonderfall einer Grundbruchbetrachtung unter Berücksichtigung der Zielstellungen aus der geplanten Nachnutzung zurückzuführen. Das heißt, es müssen konkrete Belastungsfälle bspw. für den geplanten Fahrzeugeinsatz entsprechend dem Nachnutzungskonzept zu Grunde gelegt werden. Abbildung 11 zeigt in einer schematischen Darstellung das Durchstanzan.

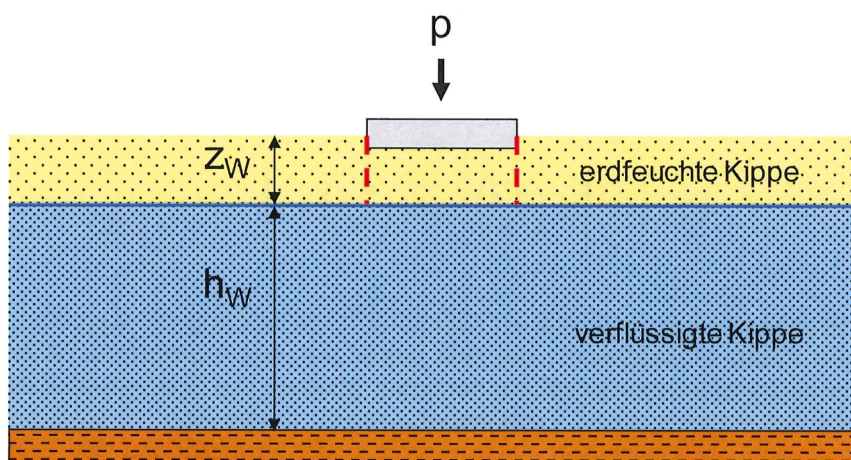


Abbildung 11: Schema zur Bemessung der erforderlichen erdfeuchten Überdeckung  $z_w$



Zur langfristigen Gewährleistung der aus den Grundbruchbetrachtungen resultierenden erforderlichen erdfeuchten Überdeckungen werden Setzungs- und Sackungsprognosen auf Basis vorliegender langjähriger Messreihen und der Auswertung der Laborergebnisse zum Materialverhalten erstellt. Die so prognostizierten Setzungs- und Sackungsbeträge werden zu den aus den Grundbruchbetrachtungen ermittelten Beträgen für die tragfähigen erdfeuchten Überdeckungen addiert und bilden damit gemäß [AU 2.13] die Basis der Bergbauplanung für die Vorgaben der erforderlichen Schütthöhen.

Zur Dimensionierung der nachbergbaulichen Kippenmorphologie werden Nachweise gegen Setzungsfließen und Ausgleichsdeformationen geführt.

In Abbildung 12 ist beispielhaft ein schematisches Berechnungsmodell für den Nachweis gegen Setzungsfließen dargestellt.

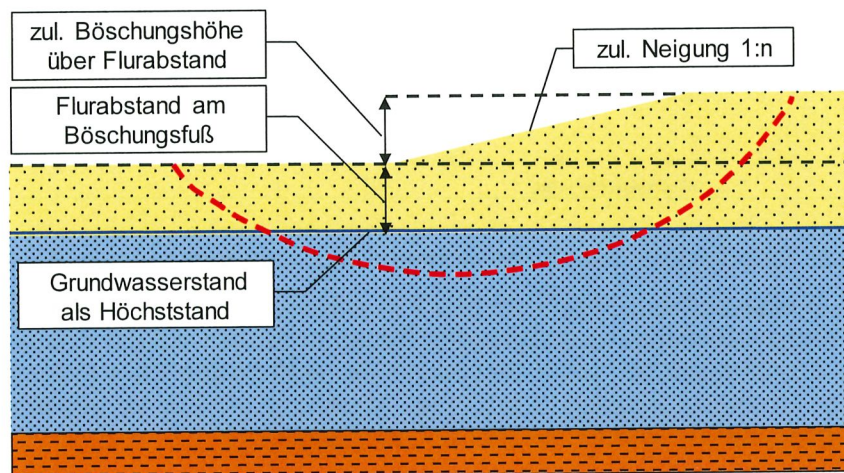


Abbildung 12: Modell zur Bemessung der zulässigen Kippenmorphologie, übernommen aus [AU 2.13]

Beim Nachweis gegen Setzungsfließen kommen die bereits genannten klassischen bodenmechanischen Berechnungsverfahren, vor allem die Lamellenverfahren, zur Anwendung. Alternativ können die Untersuchungen mit Hilfe numerischer Verfahren (bspw. Methode der Finiten Differenzen, vgl. Abb. 10, Seite 20) geführt werden.

Mit dem dargestellten Berechnungsmodell wurden bereits umfangreiche Berechnungen durchgeführt. Es erfolgten vielfältige Variationen der Kippenhöhen, der Neigungen sowie der Flurabstände am Böschungsfuß. Aus den Ergebnissen konnten Planungsvorgaben entwickelt werden. Mit Hilfe der Darstellung der Berechnungsergebnisse in Diagrammform ist man nunmehr in der Lage, eine geplante oder bereits endgestaltete Kippenoberfläche hinsichtlich der bodenmechanischen Kriterien zu überprüfen. Beispielhaft ist in Abbildung 13 ein Bemessungsdiagramm dargestellt, das Vorgaben zu den zulässigen Neigungen und Böschungshöhen in Abhängigkeit des Flurabstandes für die Kippenendgestaltung enthält.

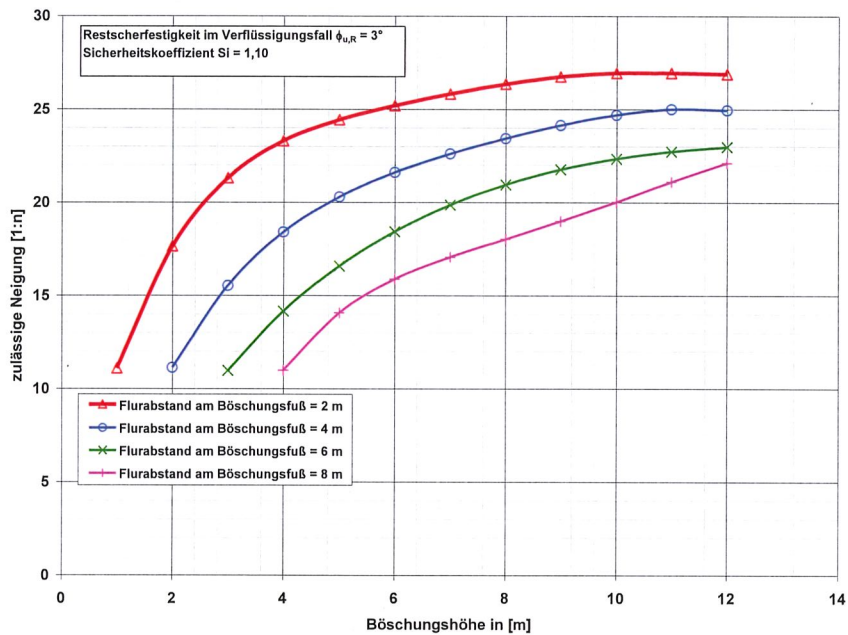


Abbildung 13: Bemessungsdiagramm zur Kippenendgestaltung, übernommen aus [AU 2.13]

Hierfür wurde bei LE-B eine Software KippScan [AU 2.7] entwickelt, die auf Grundlage von Netzpunktkarten die Kippenoberfläche in festgelegten Rasterabständen auf die Kriterien zulässige Neigung und Böschungshöhen unter Beachtung der erdfeuchten Überdeckung und des nachbergbaulichen Grundwasserspiegels prüft (vgl. Abbildung 14). Die Vorgehensweise und erste Überprüfungsergebnisse wurden mit [AU 2.7] vorgestellt.

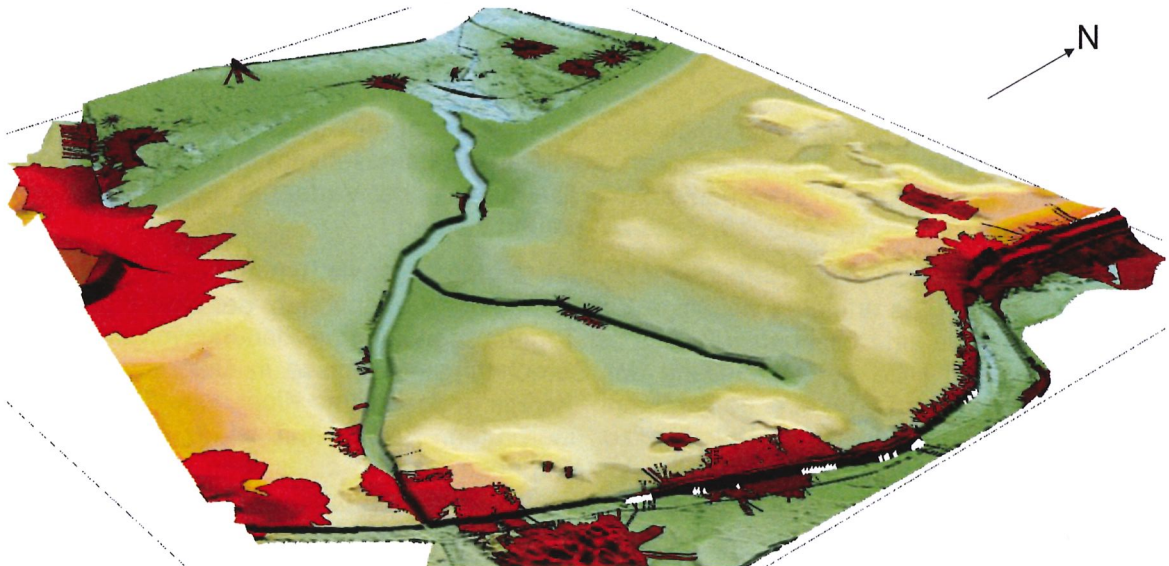


Abbildung 14: KippScan-Auswertung Beispiel Jänschwalde Südteil, mit noch zu sicherndem Ostrand (Hinweis: Es erfolgte noch keine Differenzierung der verritzten/unverritzten Bereiche.)



Kann der Nachweis gegen Setzungsfließen erfolgreich geführt werden, ist anschließend zu überprüfen, inwieweit durch Gelände Höhenunterschiede horizontale Ausgleichsdeformationen im verflüssigten Untergrund stattfinden können, die an der Geländeoberfläche überwiegend vertikale Verschiebungen verursachen. Im Rahmen der Untersuchungen in [AU 2.4] wurden diese Ereignisse unter dem Begriff Geländeeinbruch mit Hebungen zusammengefasst. Mit 3D-FE-Berechnungen konnte gezeigt werden, dass große horizontale Verschiebungen und die Ausbildung einer zusätzlichen Scherfläche im verflüssigten Bereich (vgl. obere Scherfläche in Abb. 15) notwendig sind, um den Versagensmechanismus nachzuempfinden. In der Abbildung 15 ist das zur Nachweisführung entwickelte Berechnungsmodell schematisch dargestellt.

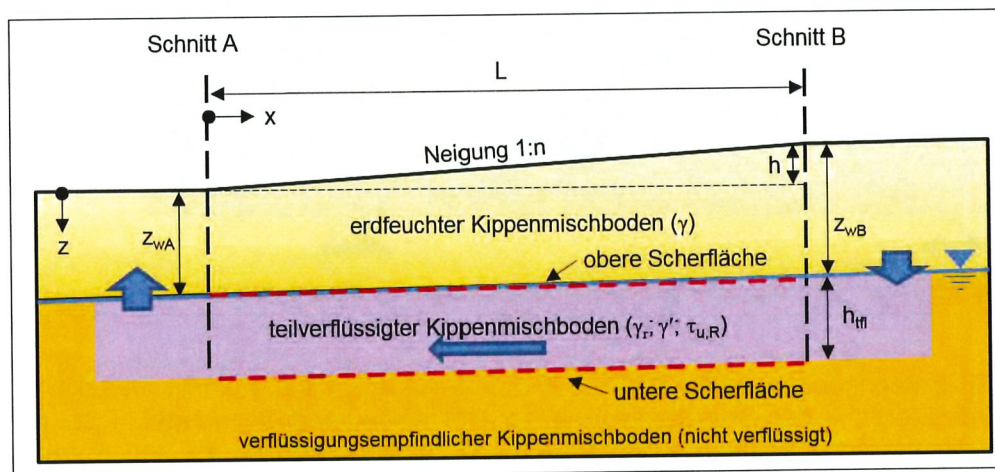


Abbildung 15: Berechnungsmodell zum Nachweis gegen Ausgleichsdeformationen

Mit den Standsicherheitsuntersuchungen erfolgt die Nachweisführung, ob die Restscherfestigkeit im Fall einer Teilverflüssigung ausreichend groß ist, um diese Ausgleichsdeformationen zu verhindern.

Mit den vorgestellten Nachweisen erfolgt die Bewertung der Standsicherheit der Kippenmorphologie unter den aus der Nachnutzung resultierenden Belastungsansätzen. Die Analyse der eingetretenen Schadensereignisse [AU 2.4] ergab, dass neben den bislang diskutierten Versagensformen auch Geländeeinbrüche ohne Hebungen zu verzeichnen waren. Das bedeutet, dass auch bei nachgewiesener Standsicherheit im Fall einer Teilverflüssigung Verformungen an der Geländeoberfläche auftreten können.

Mit dem nachfolgend beschriebenen Gebrauchstauglichkeitsnachweis kann die Größenordnung der maximalen Senkung  $s_{v, \max}$  ermittelt werden, die im Fall einer Verflüssigung zu erwarten ist. Zusätzlich kann die Form der Senkungsmulde abgeschätzt werden. Die ermittelten Verformungen sind abschließend im Hinblick auf die geplante Nachnutzung der Kippenflächen zu bewerten.

Die Verformungen im Fall einer Teilverflüssigung werden vereinfachend über zweidimensionale Finite-Elemente-Berechnungen mit einem rotationssymmetrischen Modell ermittelt. Im Querschnitt wird unterhalb der Grundwasseroberfläche ein teilverflüssigter Bereich mit der Breite  $b_{fl}$  und der Höhe  $h_{fl}$  modelliert. Das Berechnungsmodell ist in Abbildung 16 schematisch dargestellt.



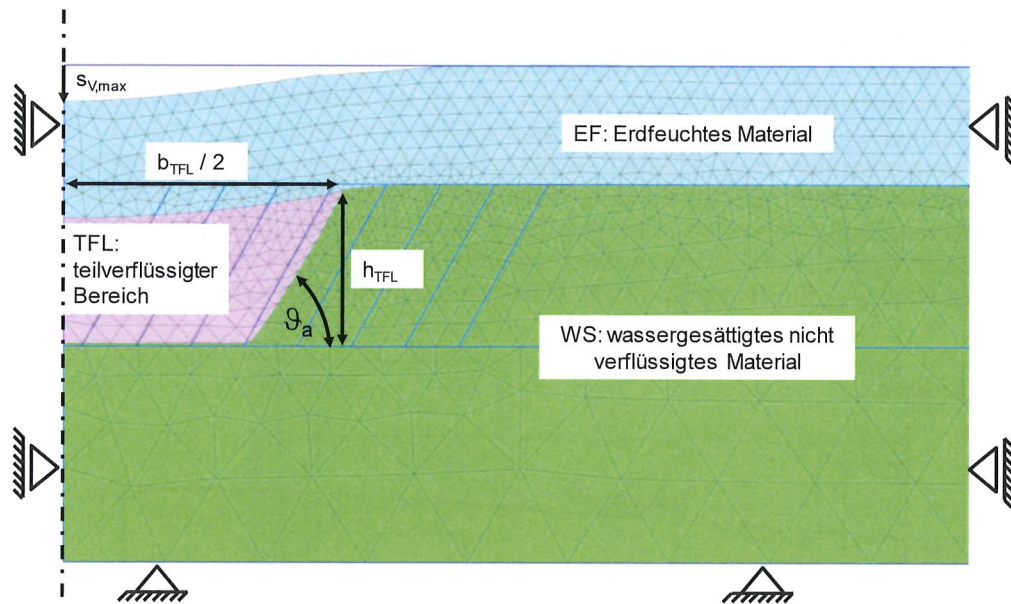


Abbildung 16: Modell für die 2D-FE-Berechnungen zur Ermittlung von  $s_{v, \max}$

Bei den FE-Berechnungen in [AU 2.4] und [AU 2.5] wurde ein linear elastisches, ideal plastisches Stoffgesetz mit der Grenzbedingung nach Mohr/Coulomb verwendet. Trotz der Verwendung dieses relativ einfachen Stoffgesetzes wurde im Vergleich mit den eingetretenen Schadensfällen eine gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Vertikalverschiebungen der Geländeoberfläche erzielt. Die unterschiedlich angesetzten Stoffgesetze zur Abbildung des Materialverhaltens sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Materialverhalten bei den FE-Berechnungen

Bereich	Materialverhalten
Kippe erdfeucht	dränirt, elastisch/plastisch
Kippe wassergesättigt teilverflüssigter Bereich	undränirt, plastisch
Kippe wassergesättigt, nicht verflüssigt	dränirt, elastisch

Zur Bewertung der Senkungsmulden im Hinblick auf die geplante Nutzung ist nicht allein die maximale Senkung  $s_{v, \max}$  sondern auch die Form einer möglichen Senkungsmulde maßgebend. In der HGL [AU 2.5] wird daher empfohlen, auf Grundlage der Berechnungsergebnisse zusätzliche Parameter zu ermitteln, um die berechneten Senkungsmulden zu charakterisieren. Die entsprechenden Vorschläge sind in Abbildung 17 enthalten.

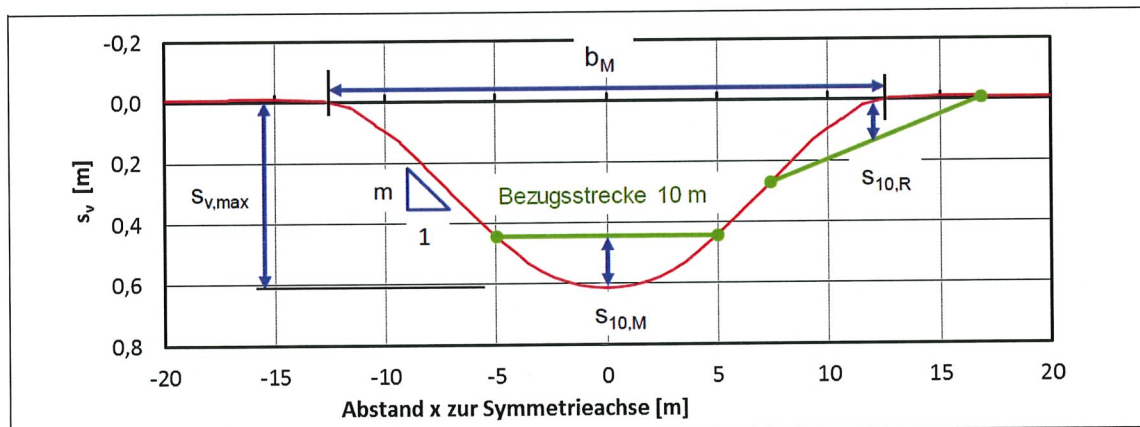


Abbildung 17: Vorschläge für Parameter zur Beschreibung der Senkungsmulden

Mit der beschriebenen Methodik für flachwellige Kippenflächen im Hinterland ist es möglich, Vorgaben für die morphologische Gestaltung der Kippenoberflächen abzuleiten. Mit der Begrenzung des Schubspannungseintrages durch die Vorgabe zulässiger Böschungshöhen und deren Neigungen können eintretende lokale Verflüssigungsprozesse im Untergrund in ihrem Ausmaß auf der Kippenoberfläche ausgeschlossen werden.

Einzelereignisse, insbesondere Geländeeinbrüche im dm-Bereich ohne Hebungen in weitgehend ebenen Gelände, können bislang noch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Jedoch ist es mit dem vorgestellten Nachweis der Gebrauchstauglichkeit möglich, die sich einstellenden Verschiebungsbeträge zu prognostizieren, entsprechend einzuschätzen und ggf. erforderliche Maßnahmen einzuleiten.

Mit der Anwendung der dargelegten Grundsätze zur Kippenendgestaltung für die Kippenflächen im Tagebau Jänschwalde ist die geotechnisch sichere Gestaltung von Kippenoberflächen auch unter den schwierigen Randbedingungen eines vorhandenen Verflüssigungspotentials gegeben.

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Unterlage werden die wesentlichen geotechnischen Schwerpunkte aufgezeigt, die den räumlichen Geltungsbereich des Abschlussbetriebsplanes betreffen.

Wegen des mit dem Abschlussbetriebsplan angestrebten zeitlichen Planungshorizontes erfolgte die Dokumentation der hier geführten Standsicherheitsbetrachtungen in Form einer geotechnischen Stellungnahme. Weitere tiefere Untersuchungen bis hin zur Erarbeitung ortskonkreter Standsicherheitsnachweise erfolgen in den weiteren Planungsschritten.

Zur Einordnung der Untersuchungen wurden die Abläufe der Geologisch-Geotechnischen Fachplanung speziell im Braunkohlenbergbau des Lausitzer Reviers erläutert. Inhaltlich bilden nicht die konkreten Nachweise den Schwerpunkt dieser Unterlage, sondern die Darstellung der angewendeten Methodik sowie die Beschreibung möglicher Szenarien, die in weiterführenden Unterlagen behandelt werden müssen.

Zur allgemeinen Beschreibung der geotechnischen Randbedingungen im räumlichen Geltungsbereich des Abschlussbetriebsplanes wurde auf die Lage des Untersuchungsgebietes, die bergtechnologische Entwicklung der geplanten Restraumgestaltung und die geologischen sowie hydrogeologischen Verhältnisse eingegangen.



Als Schwerpunkte dieser Bearbeitung wurden die gewachsenen Kopfböschungssysteme im Bereich der drei Bergbaufolgeseen und die Thematik der Kippenendgestaltung einschließlich der Restraumgestaltung identifiziert.

Die Kopfböschungssysteme besitzen auf Grund der Tatsache, dass sie die Schnittstelle zwischen bergrechtlicher Verantwortung und öffentlichem Recht bilden, eine besondere Bedeutung. Die Bemessung erfolgt auf Grundlage einer Vorprojektierung. Einzelböschungen und Böschungssysteme werden auf kreiszylindrischen Prüfflächen und vorgegebenen Gleitflächen untersucht. Bei den Berechnungen werden die Böschungsgeometrien bzw. die hydrologischen Randbedingungen variiert.

Die Standsicherheitsuntersuchungen zur Kippenendgestaltung werden auf Basis der durch die TU Bergakademie Freiberg erarbeiteten Handlungsgrundlage [AU 2.5] geführt.

Ausgangspunkt der Untersuchungen sind die vorbergbaulichen geologischen Verhältnisse sowie die im Tagebaubetrieb eingesetzten Abbau- und Verkippungstechnologien. Wichtiger Bestandteil der Untersuchungen sind die aktuell vorliegenden sowie die sich nachbergbaulich einstellenden hydrologischen Verhältnisse. Für die geotechnische Modellierung ist es erforderlich, die erdfeuchten und die wassergesättigten, verflüssigungsempfindlichen Kippenmaterialien bodenphysikalisch zu charakterisieren.

An den Restseeböschungen sind die verdichteten Bereiche so zu bemessen, dass eine Verflüssigung im Hinterland nicht zum Abfließen der Kippenmassen in den offenen Restsee führt.

Als grundsätzliche Bemessungsaufgaben für die ebenen bzw. flachwelligen Kippenflächen ergeben sich infolge des Verflüssigungspotentials die Berechnung tragfähiger Überdeckungen, die Erstellung von Setzungs- und Sackungsprognosen und letztlich die Dimensionierung der Kippenmorphologie. Mit der Anwendung der dargelegten Grundsätze zur Kippenendgestaltung für die Kippenflächen im Tagebau Jänschwalde ist die geotechnisch sichere Gestaltung von Kippenoberflächen auch unter den schwierigen Randbedingungen eines vorhandenen Verflüssigungspotentials gegeben.

Mit der vorliegenden Unterlage wurden die wesentlichen geotechnischen Schwerpunkte im räumlichen Geltungsbereich des Abschlussbetriebsplanes aufgezeigt. Mit den geschilderten Nachweismethoden ist es möglich, eine geotechnisch sichere Gestaltung der Bergbaufolgelandschaft des Tagebaues Jänschwalde zu gewährleisten.

- - -