



RDB-Fortbildungsseminar
„Folgen des Kohleverstromungsbeendigungsgesetzes“
Schloss Paffendorf, 11.01.2023

– Standsicherheit der zukünftigen Seeböschungen –

Prof. Dr.-Ing. Dieter Dahmen
RWE Power AG
Gebirgsmechanik



Überblick

Standssicherheit der zukünftigen Seeböschungen

Relevanz

Wasserbilanz eines Tagebausees / Konzept der Fremdbefüllung / Windwellen

Nachweis der Standssicherheit / Befüllungsphase / Endzustand / Erdbebeneinfluss

Fragestellungen gekippter Seeböschungen / Nachweis der Sicherheit gegenüber Bodenverflüssigung

Fragestellungen geschnittener Seeböschungen / Schichteinfallen / Verwerfungen / Verhalten von Kohle und bindigen Horizonten

Sonderfragen: Beispiel Sicherung der Schachtanlage Morschenich im Tagebau Hambach

Fazit und Ausblick

Rutschungsereignis Nachterstedt 18.07.2009



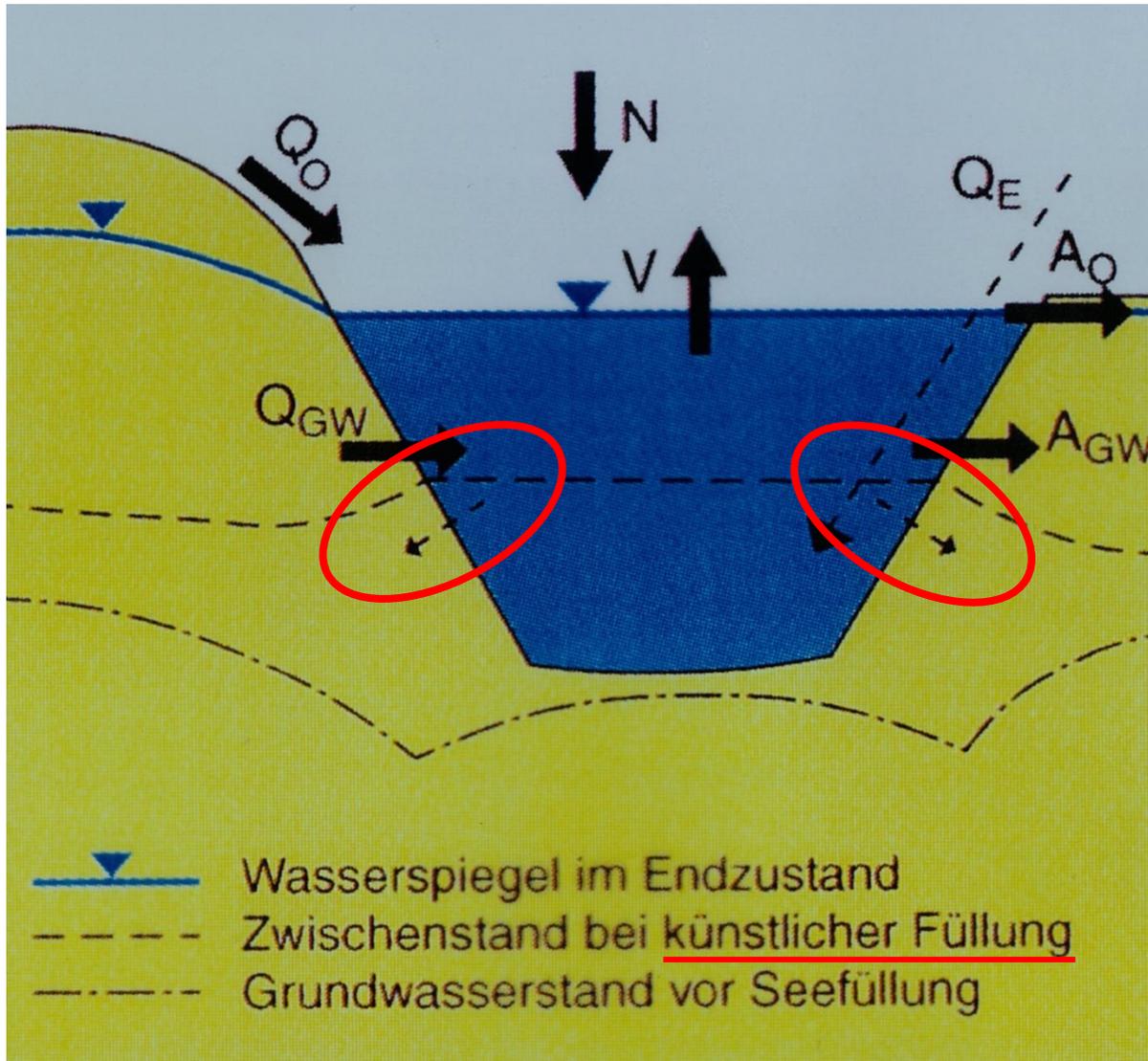
ungefährer Verlauf der Rutschungsoberkante

Rutschungsereignis Nachterstedt 18.07.2009



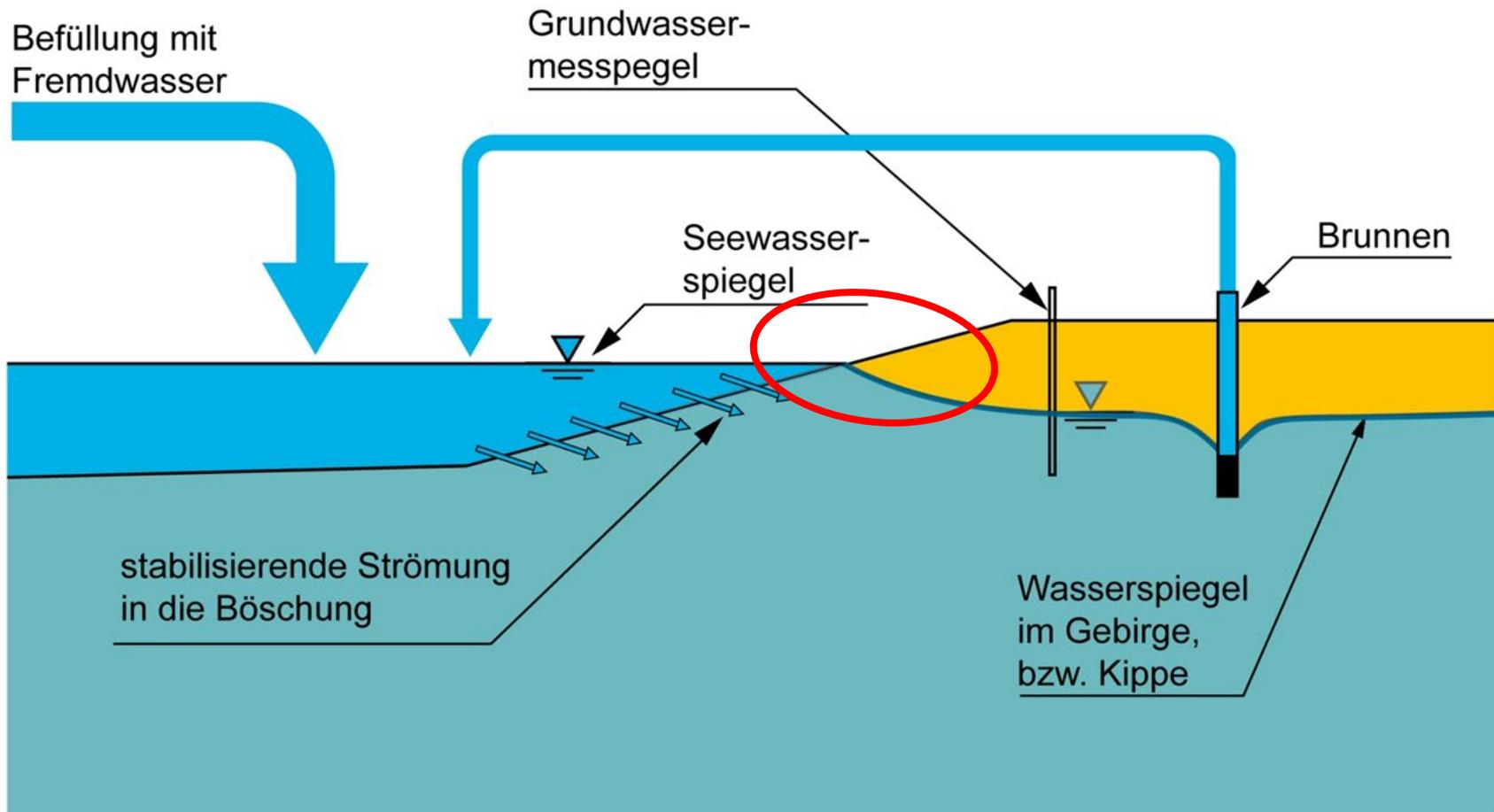
Rutschung am Concordia See, Rutschungsvolumen 4,5 Mio. m³

Wasserbilanz eines Tagebausees - Konzept der Fremdbefüllung

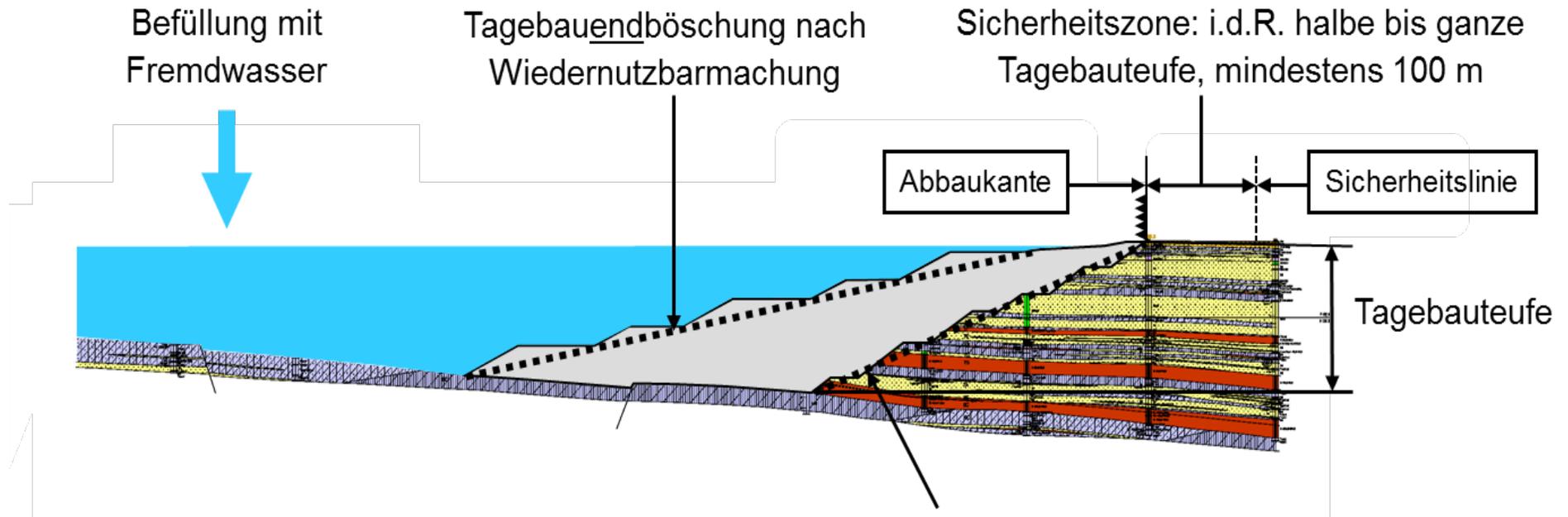


- Auffüllung des Grundwassers über die Seemulde mit Fremdwasser
- Tagebausee im Endzustand an das Grundwasser angebunden (keine Abdichtung, See wird vom Grundwasser durchströmt)
- Anlage einer Wellenschlagzone im Uferbereich nimmt natürliche Erosionsprozesse vorweg (dient zugleich dem erosionsfreien Grundwasserzustrom in den See)
- Keine „Speicher- oder Staulamelle“ vorgesehen, definierte Überlaufschwelle
- Keine wechselnden Wasserspiegel vorgesehen, bis auf natürliche jahreszeitliche Schwankungen
- Tagebausee ist (auch durch Lage unterhalb GOK) kein Stausee

Fremdbefüllung der Seemulde zur Gewährleistung der Böschungsstandsticherheit



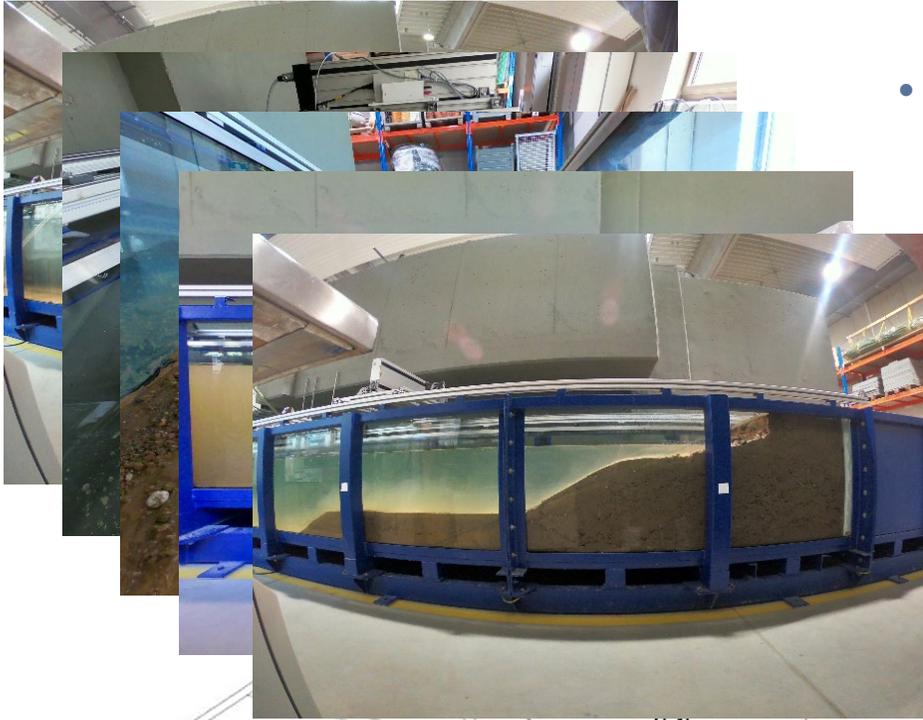
Bisheriges Konzept gekippter Seeböschungen mit kontrolliertem Materialaufbau vor den Randböschungen



Generelle Randbedingungen für die bleibenden Böschungen:

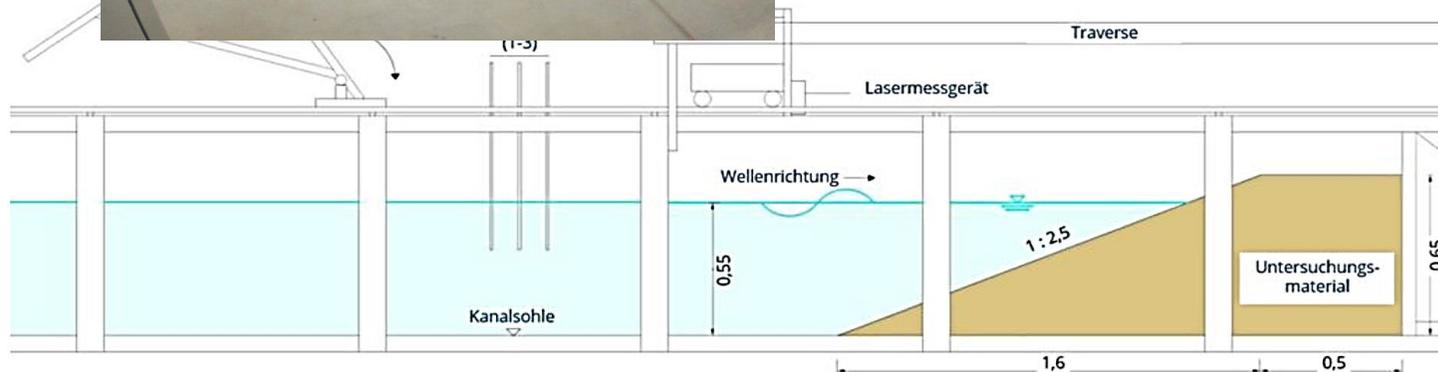
- Generalneigung für die Seeböschung von **1:5** (ab Unterkante Wellenschlagzone)
- Neigungen der Unterwasser-Einzelböschungen von **1:2,5**
- Neigung von **1:3** für die Überwasserböschungen.
- Neigung der Einzelböschung unmittelbar unterhalb der Wellenschlagzone von **1:5**
- Neigung der Wellenschlagzone von **1:20** bis **1:30** (Breite 100 m bis 150 m, d. h. $\Delta h = 5$ m)

Modellversuche zum Verhalten der Böschungen in Bezug auf Erosion durch Windwellen



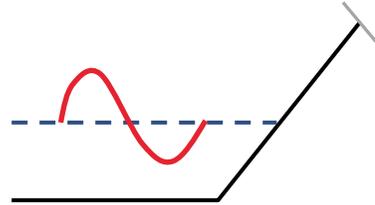
- Physikalische **Wellenkanalversuche** am IWD der TU Dresden im Modellmaßstab 1:10

Ermittlung des **Erosionsverhaltens** verschiedener Sedimente durch Wellenauflauf



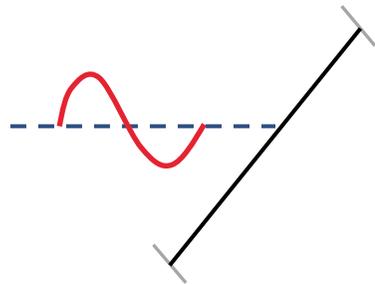
Modellversuche zum Verhalten der Böschungen in Bezug auf Erosion durch Windwellen

Bereich 1: Böschungsfuß



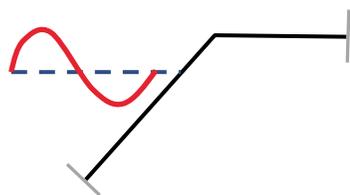
- beeinflusster Wellenanlauf (Flachwassereffekt)
- Wellenauflauf
- kein Wellenüberlauf

Bereich 2: Böschungsmitte

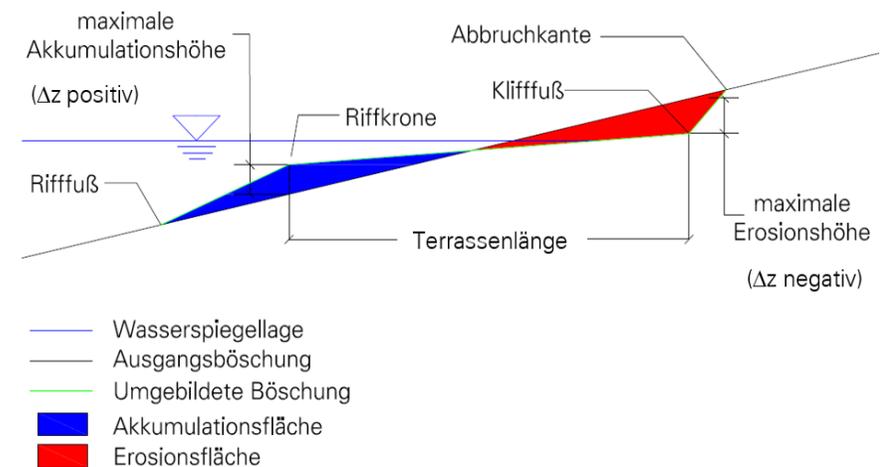
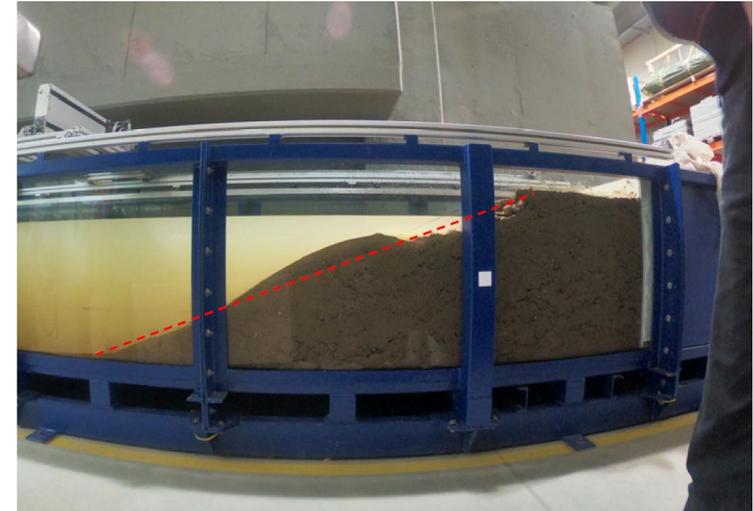


- weitgehend unbeeinflusster Wellenanlauf
- Wellenauflauf
- kein Wellenüberlauf

Bereich 3: Böschungskrone



- weitgehend unbeeinflusster Wellenanlauf
- Wellenauflauf
- mit Wellenüberlauf auf die Berme



Numerische Untersuchungen zum Verhalten der Böschungen in Bezug auf Erosion durch Windwellen

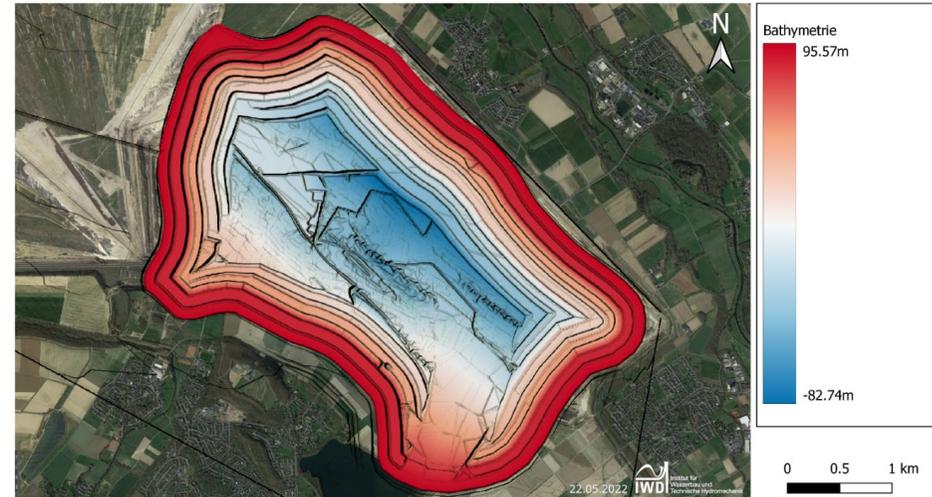
Beispiel Inden

Charakteristiken (Planstand 2020):

- Befüllzeitraum (voraussichtlich): 30 – 40 Jahre
- Zielwasserstand: +92 mNHN
- Fläche: ca. 1100 ha
- Volumen: ca. 800 Mio. m³
- Tiefe (mittlere / maximale): ca. 72 m / 149 m
- Max. Ausdehnung (in NW-SO): ca. 5 km

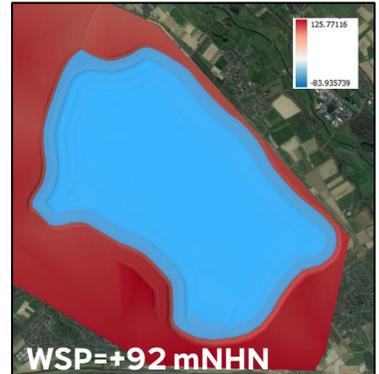
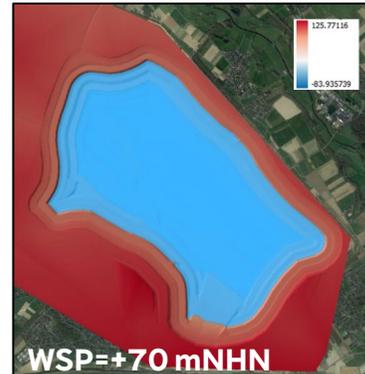
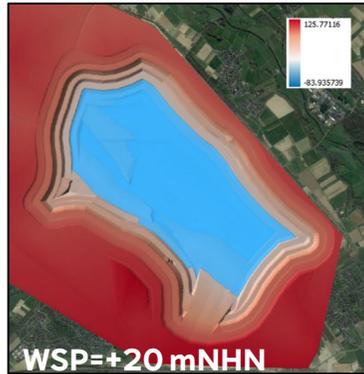
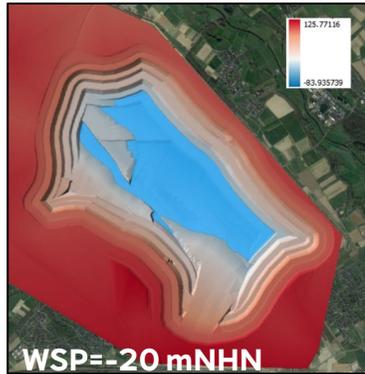
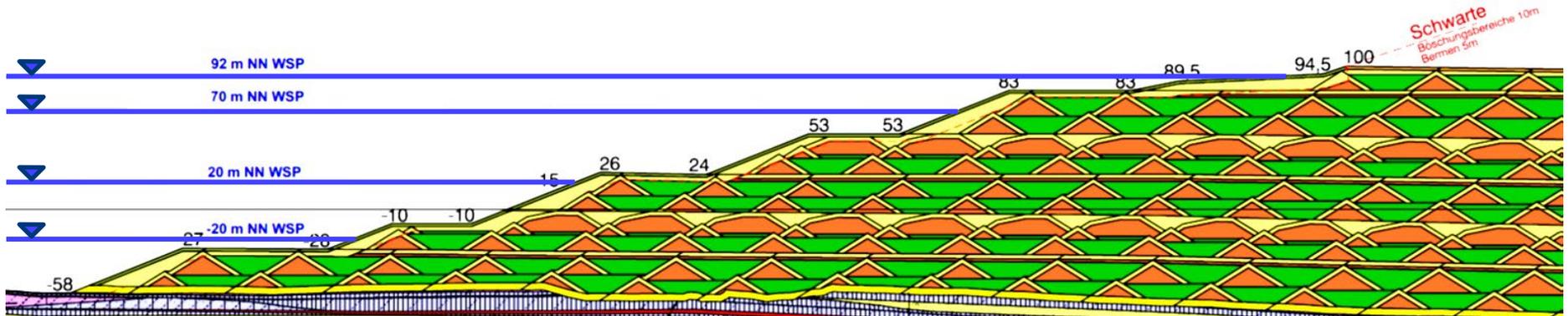
Datengrundlage:

- bathymetrische Informationen
- DWD-Winddaten (Nörvenich, Geilenkirchen)
 - seetransformierte w_{10} -Geschwindigkeiten (Stundenmittelwerte)
 - Richtungsabhängigkeit, Wiederkehrintervalle
- Sedimentdaten
 - kohäsives und/oder nicht-kohäsives Sediment
 - Geschiebe und Schwebstoffe
 - bereichsweise Definition möglich



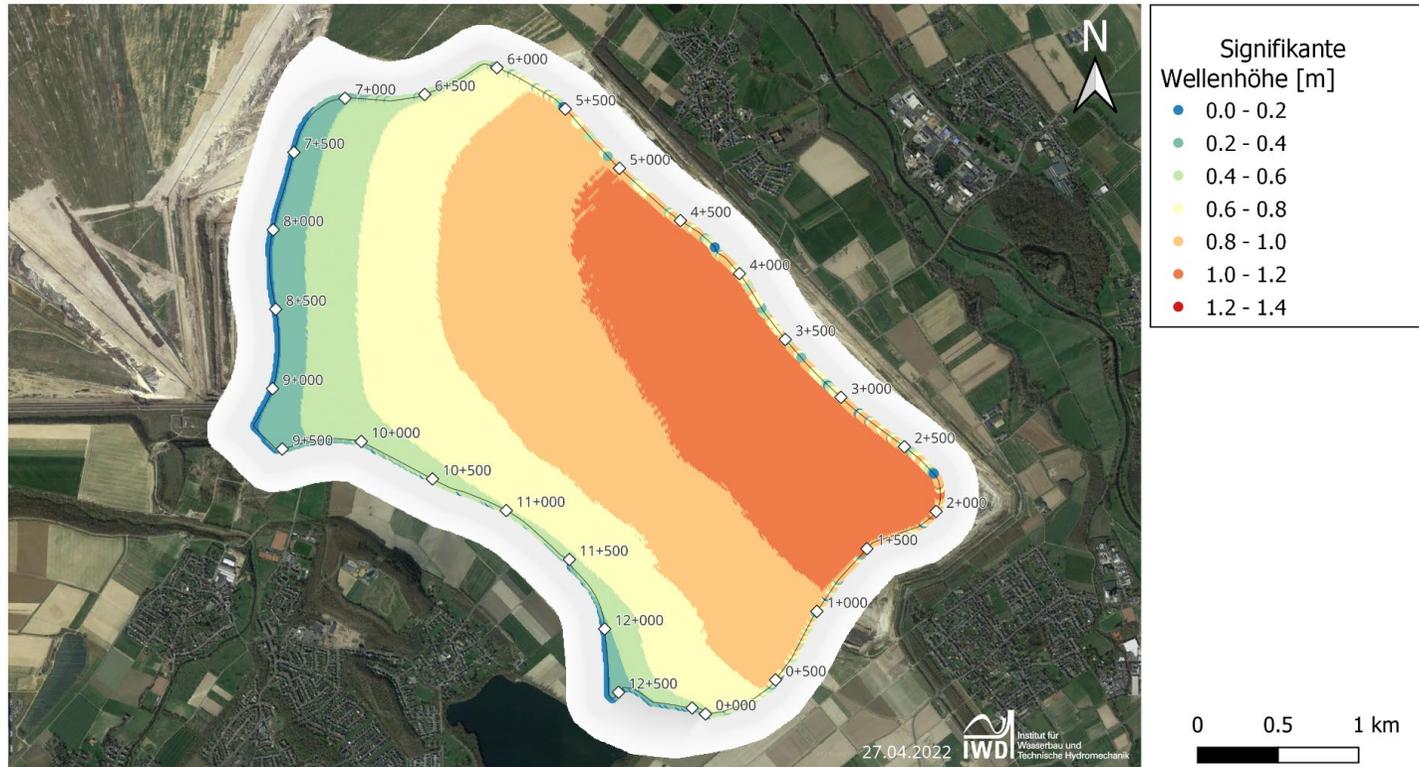
Böschungsgeometrie mit Befüllzuständen

Beispiel Inden



Seegangsprognose Beispiel Inden

$W_{10,max} = 27 \text{ m/s}$

WSP=+70m NHN; Sturm 270° (50a)

Standsticherheit ist für unterschiedliche Befüllzustände der Seen zu prüfen

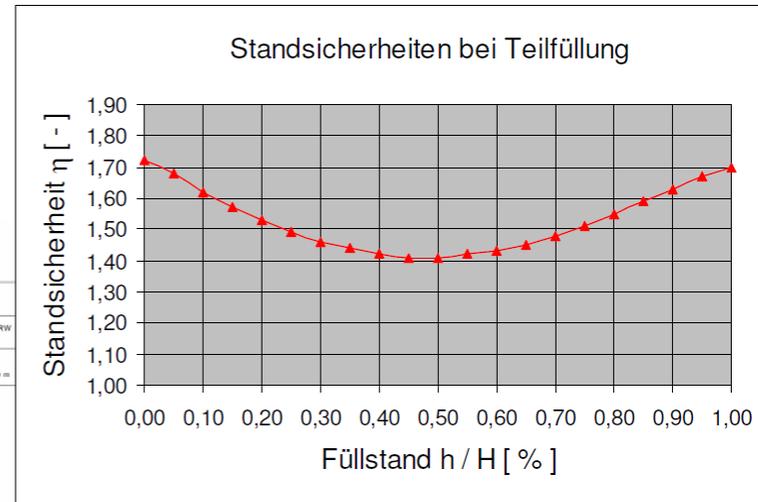
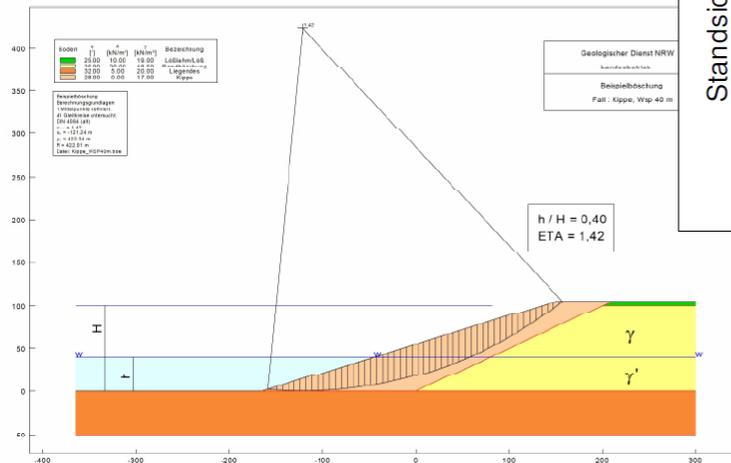
Standsticherheit abhängig von ...

Geometrie, Scherfestigkeit, Wasserstand, Verkehrslasten, Füllstand (Befüllungsphase)

Beispiel:

Teilfüllung $h / H = 0,40$

$\eta = 1,42$



Berücksichtigung von Erdbeben bei Standsicherheitsberechnungen gemäß RfS

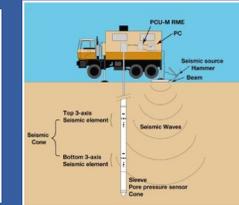
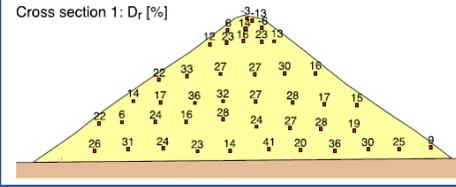
- > Für die Braunkohlentagebaue in NRW maßgebende Richtlinie für Standsicherheitsuntersuchungen (RfS) - Braunkohlenbergbau zählt nicht zum Anwendungsbereich von EC 7/DIN 1054 - fordert in der Fassung von 2003 erstmalig eine angemessene Berücksichtigung möglicher seismischer Einwirkungen bei bleibenden Böschungen
- > RWE Power entwickelt mit gutachterlicher/wissenschaftlicher Unterstützung ein Verfahren zur quasistatischen Berücksichtigung von Erdbeben bei Standsicherheitsberechnungen
- > Nachfolgend: Wissenschaftliche Überprüfung des entwickelten Erdbebenansatzes durch Geologischen Dienst NRW (Erdbebeneinwirkung) und KIT/IBF (Berechnungsansatz)
- > Ergebnis:
 - > Neufassung RfS mit Ergänzung zu Erdbeben vom 08.08.2013
 - > Erdbebeneinwirkung für das Böschungssystem im Endzustand in Anlehnung an die Stauanlagennorm DIN 19700 auf Wiederkehrperiode 2475 a angepasst (trotz der Lage unterhalb des Geländes)
 - > Quasistatischer Koeffizient angepasst
 - > Nachweis der Sicherheit gegenüber **Bodenverflüssigung** zu erbringen

Entwicklung eines Nachweisverfahrens zur Sicherheit gegenüber Bodenverflüssigung

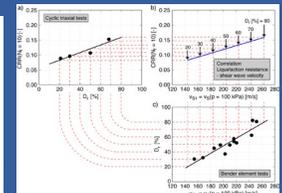
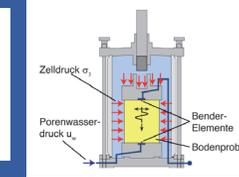
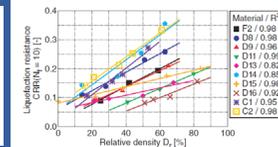
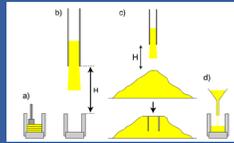
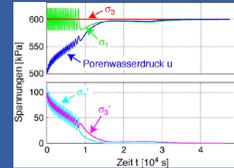
Felduntersuchungen



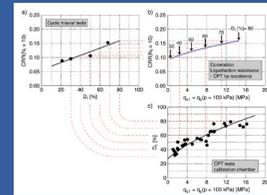
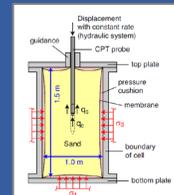
Cross section 1: D_r [%]



Laborversuche

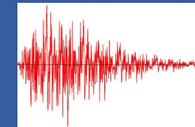
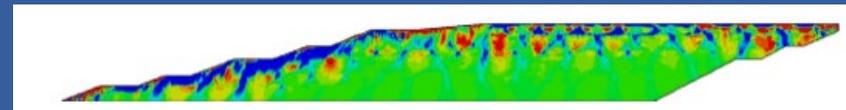
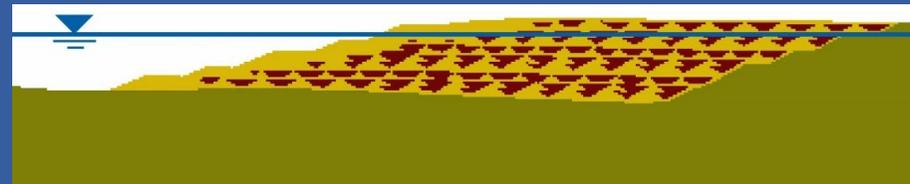


Technikumsversuche

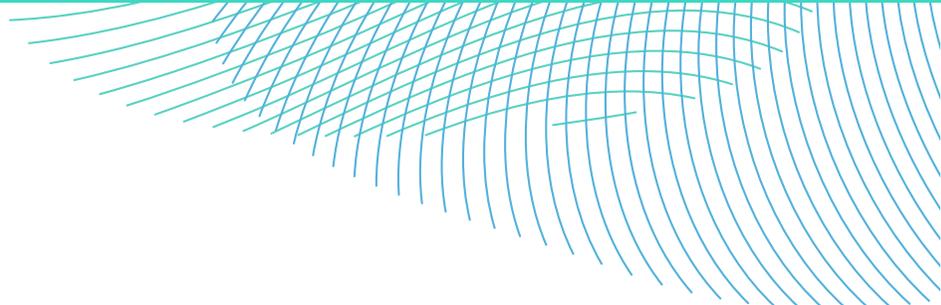


Validierung mittels Technikumsversuchen in mittlerem/größerem Maßstab und Zentrifugenversuchen

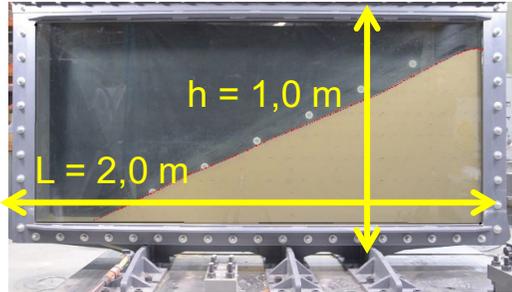
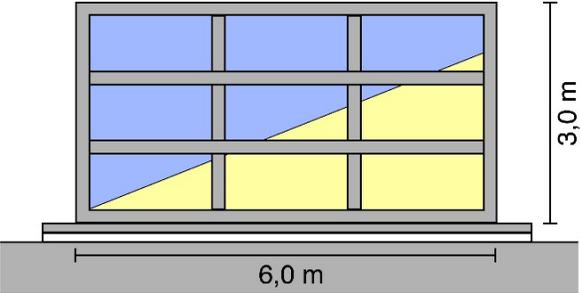
Numerische Berechnungen



Versuchstechnische Validierung des Verfahrens an der RUB

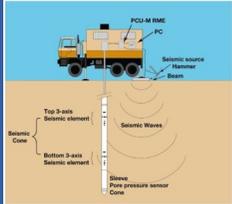


Ziel: Validierung des Nachweisverfahrens durch Versuche an Böschungen in unterschiedlichen Maßstäben und mit unterschiedlichen Spannungsniveaus

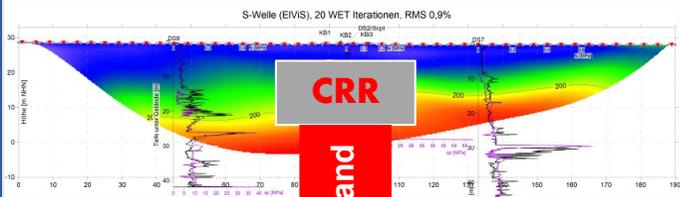
Mittlerer Maßstab	Größerer Maßstab	Zentrifugenversuche
<p>Vorteil: Parameterstudien mit einer größeren Anzahl an Versuchen möglich</p> 	<p>Vorteile: Näher an Abmessungen realer Böschungen, größeres Spannungsniveau im Boden, Sondierungen + Messungen der Wellengeschwindigkeit möglich</p> 	<p>Vorteil: Realistisches Spannungsniveau, kleine Modelle, Parameterstudien möglich</p> 
Derzeit in Durchführung	In Detail-Planung	Start I/2023 (Univ. Nantes)

Spätere Anwendung des Nachweisverfahrens zur in situ-Verifizierung der Sicherheit gegenüber Bodenverflüssigung

Feldversuche



=> q_c, v_s





Verdichtung

✓ ← ⊕ ← **CRR ≥ CSR**

← ⊗ ← **CRR < CSR**

↓

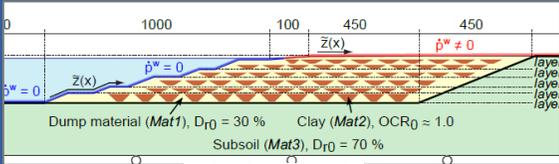
Widerstand

Vergleich

↑

Einwirkung

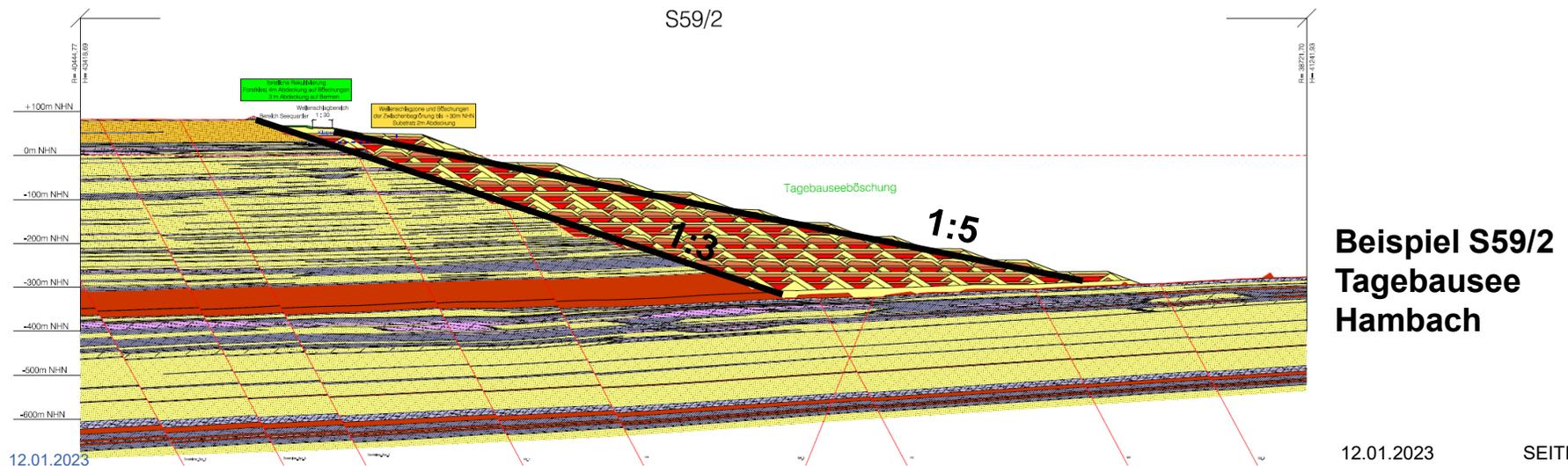
Numerische Berechnungen





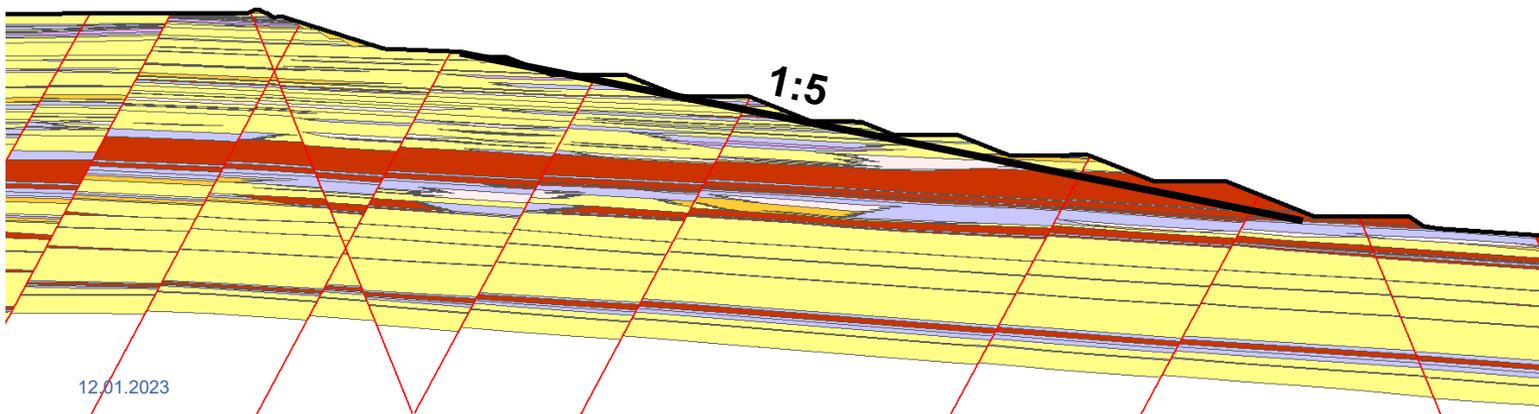
Zusammenfassende Bewertung - gekippte Seeböschungen

- > Vorteile:
 - > gezielter Materialaufbau möglich (im Rahmen der Verfügbarkeit) in Bezug auf Standsicherheit und Erosionssicherheit in der Befüllungsphase => Optimierungspotential
 - > Mischbodenbereiche in den Regelprofilen haben „dämpfende“ Wirkung in Bezug auf Erdbeben
 - > Mischböden in den Regelprofilen konzeptbedingt mit M1-Massen abgedeckt, zusätzlich „Seeschwarte“ aus Substrat erlaubt Bepflanzung und damit Erosionsschutz
- > Nachteile:
 - > geringe Lagerungsdichte => Nachweis der Sicherheit gegenüber Bodenverflüssigung im Erdbebenfall erforderlich



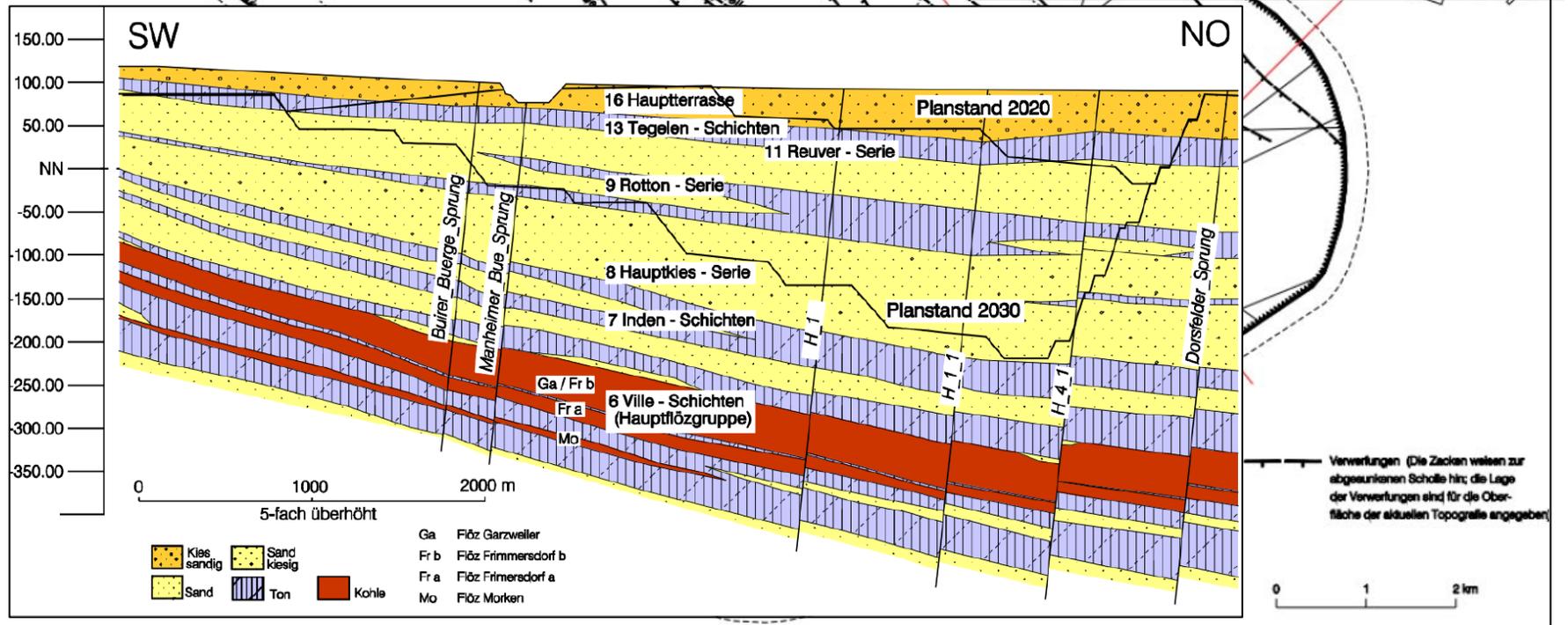
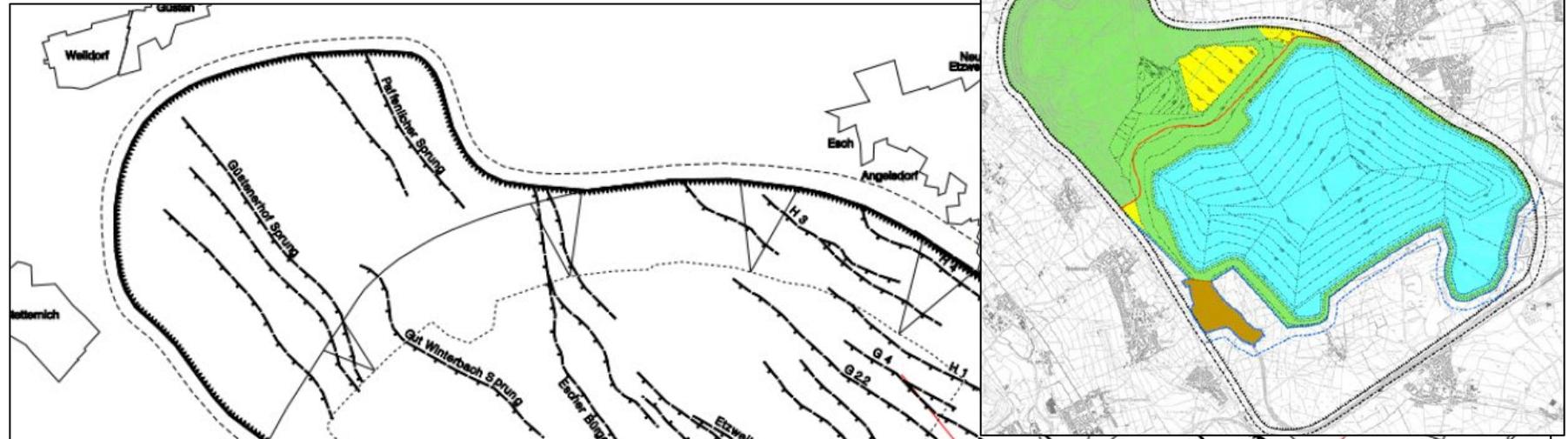
Fragestellungen geschnittener Seeböschungen

- > Vorteile:
 - > hohe Lagerungsdichte gewachsener Böden -> Sicherheit gegenüber Bodenverflüssigung im Erdbebenfall als gegeben anzunehmen
- > Nachteile:
 - > Materialaufbau in der Böschung ist geologisch vorgegeben (Anpassung von Sohlenlagen in Grenzen gleichwohl möglich)
 - > Erosionssicherheit und dauerhafte Beständigkeit ist für die gewachsenen Materialien jeweils zu prüfen (insbesondere für bindige Horizonte)
 - > Schichteinfällen und Tektonik „verbleiben“ dauerhaft in der Böschung und sind standsicherheitslich zu berücksichtigen
 - > Erfordernis von Anschüttungen bei bindigen Horizonten ist zu prüfen



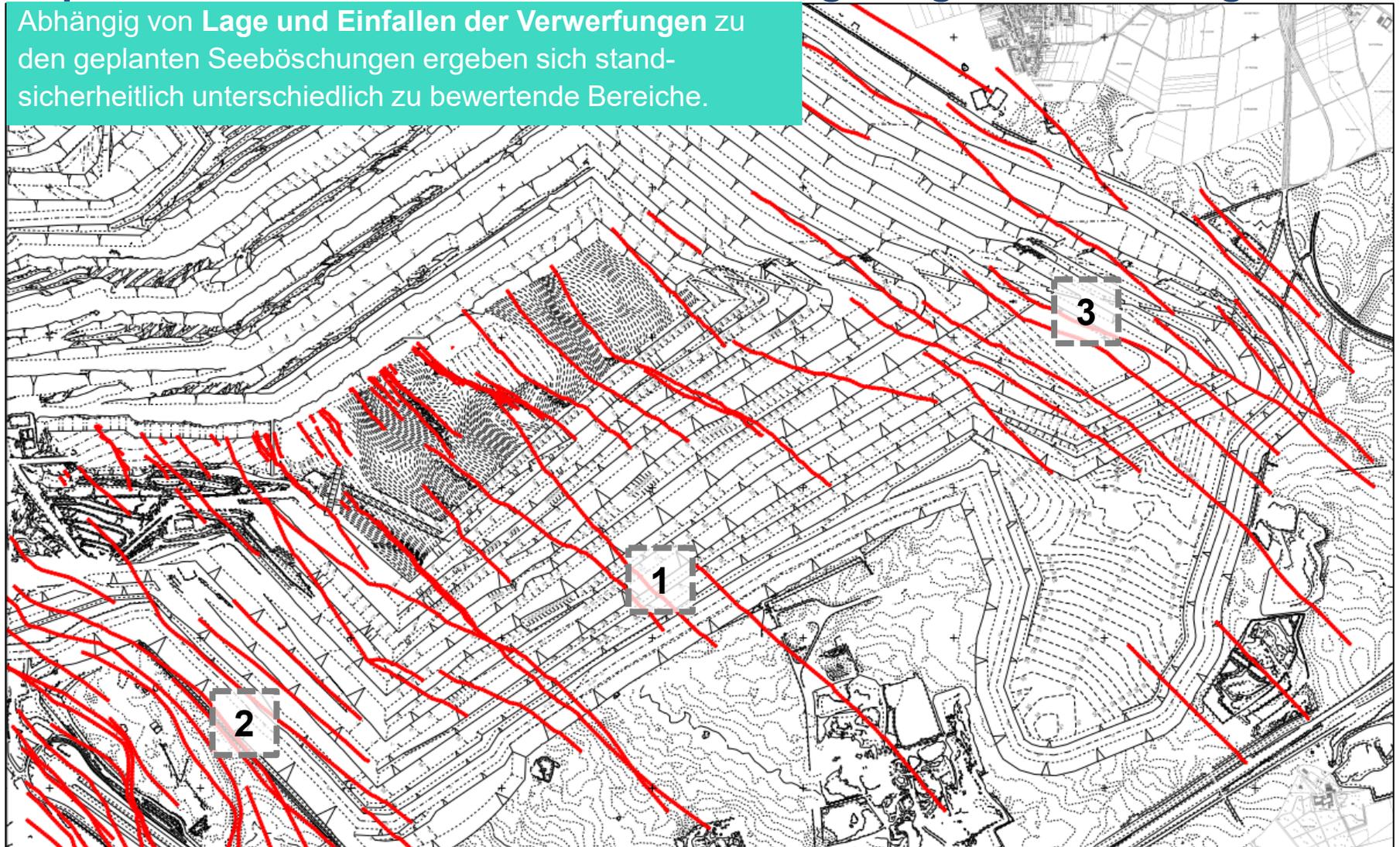
Beispiel S 129
Tagebausee
Hambach

Verwerfungen im Abbaufeld Hambach



Geplante Seemulde Hambach mit Verlauf geologischer Störungen

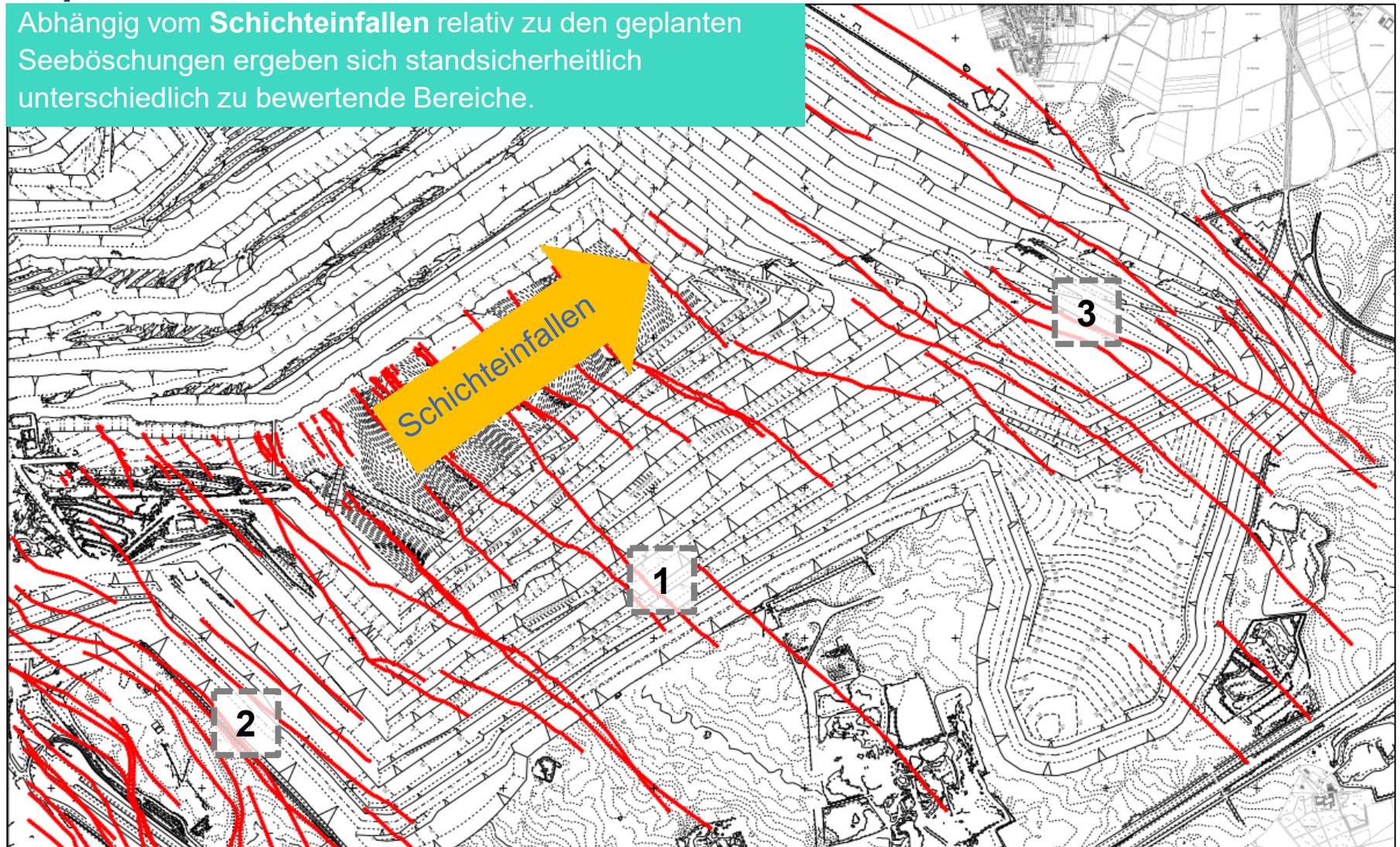
Abhängig von Lage und Einfallen der Verwerfungen zu den geplanten Seeböschungen ergeben sich standortsicherheitlich unterschiedlich zu bewertende Bereiche.



1. Seeböschungsbereiche vor dem Hambacher Forst => mögliche „Schubladeneffekte“
2. Süd-Westliche Seeböschungsbereiche => „günstiges“ Einfallen der Verwerfungen
3. Nord-Östliche Seeböschungsbereiche => „ungünstiges“ Einfallen der Verwerfungen

Geplante Seemulde Hambach mit Schichteinfällen

Abhängig vom **Schichteinfällen** relativ zu den geplanten Seeböschungen ergeben sich standsicherheitlich unterschiedlich zu bewertende Bereiche.

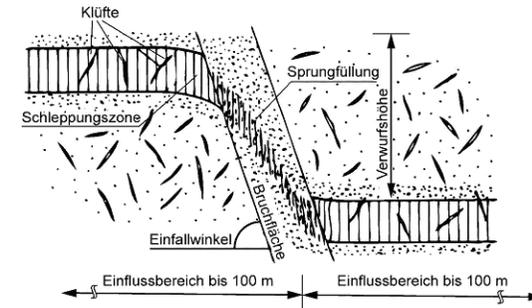


1. Seeböschungsbereiche vor dem Hambacher Forst => „neutraler“ bis günstiger Effekt
2. Süd-Westliche Seeböschungsbereiche => „ungünstiges“ Schichteinfällen, vgl. 1:7-Kegel
3. Nord-Östliche Seeböschungsbereiche => „günstiges“ Schichteinfällen

Standsicherheitliche Aspekte von Tektonik und Schichteinfallen

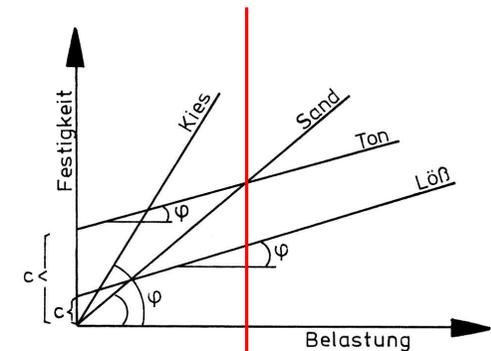
▪ Berücksichtigung von Verwerfungen bei Standsicherheitsberechnungen

- In den geologischen Unterlagen verzeichnete Verwerfungen werden als vorgegebene Schwächezonen im Gebirge berücksichtigt, da sie insbesondere für tiefe Bruchmechanismen in Verbindung mit bindigen Horizonten geringere Scherfestigkeit bevorzugte Gleitflächen darstellen.
- Als Festigkeitsansatz wird die sog. „Sprungfüllung“ ($\varphi = 12^\circ$ und $c = 0$ kPa) zugrunde gelegt.
- Dieser Festigkeitsansatz ist für das Rheinische Revier versuchstechnisch sowie durch Rückrechnungen von Rutschungen langjährig bestätigt.
- An „hydraulisch wirksamen Verwerfungen“ werden basierend auf Angaben der Wasserwirtschaftlichen Planung auf den Hangend- und Liegendschollen unterschiedliche Wasserspiegellagen berücksichtigt (für Tagebauseen im Endzustand nicht relevant).



▪ Berücksichtigung des Schichteinfallens bei Standsicherheitsberechnungen

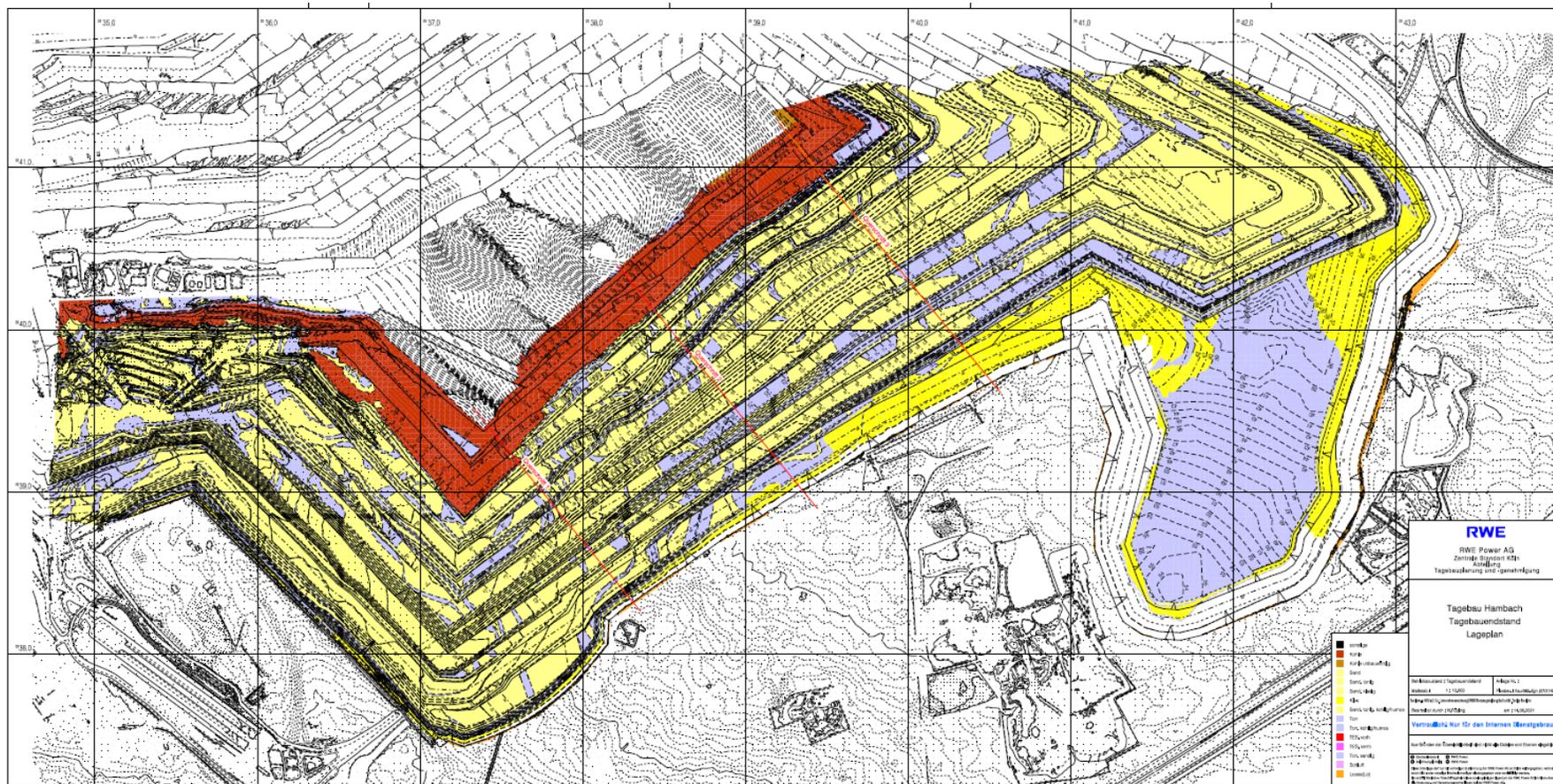
- Das in den geologischen Schnitten dargestellte Schichteinfallen wird durch den Ansatz von geraden Basisgleitlinien berücksichtigt.
- Für die in den Tagebauen vorherrschenden hohen Spannungsniveaus sind insbesondere die bindigen Horizonte relevant.
- Hier erfolgt ein Ansatz von Restscherfestigkeiten, bzw. minimalen Festigkeiten.



Der standsicherheitliche Einfluss von Schichteinfallen und Verwerfungen wird mit der Methode der zusammengesetzten Bruchmechanismen mit geraden Gleitlinien („Starrkörpermethode“) geprüft; bei Bedarf erfolgt eine Anpassungen der Böschungsgeometrie.

Umgang mit Bereichen bindiger Horizonte

Seeböschungsplan der geschnittenen Böschungen im Tagebau Hambach mit geologischen Horizonten



Umgang mit Bereichen bindiger Horizonte

> Befüllungsphase (temporäres Verhalten)

- Standsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung von Aussenwasseranstieg
- Erdbebeneinwirkung 500 a
- Statische Wirkung des Wassers (Wasserkontakt, Wasserdruck, Wassersättigung, Konsistenzänderung)
- Dynamische Wirkung des Wassers (Erosionseffekte durch Seewasser (Wellenschlag) und Niederschlags-/Oberflächenwasser)

Lösungsansatz: Vorschüttungen vor den Böschungsbereichen mit bindigen Horizonten

> Endzustand (langfristiges Verhalten)

- Standsicherheitsnachweis mit Berücksichtigung von bis zu rd. 300 m Aussenwasser im Endzustand
- Erdbebeneinwirkung 2500 a für das Böschungssystem
- Berücksichtigung einer zeitabhängigen Reduktion der Scherfestigkeit von bindigen Horizonten => Versagensmechanismus „progressiver Bruch“

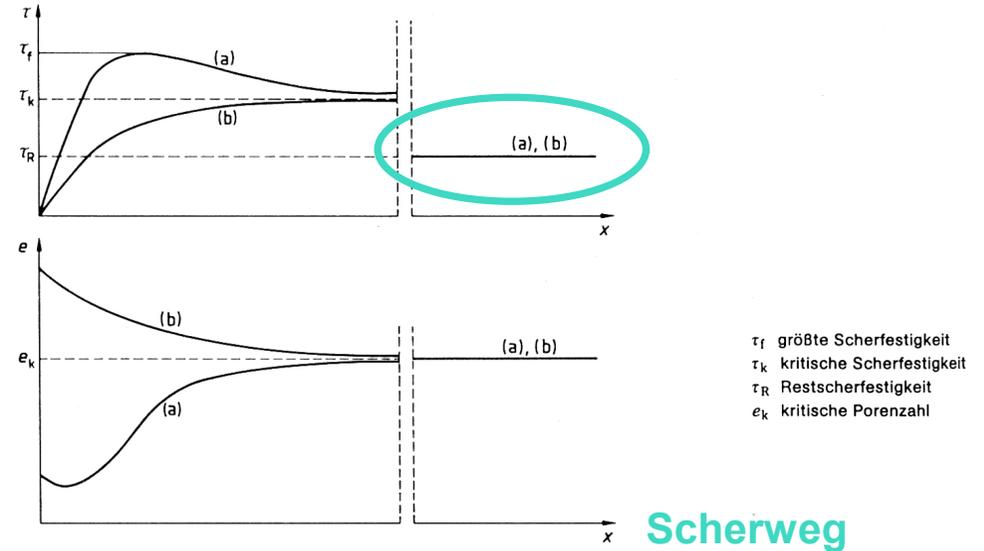
Lösungsansatz: Bemessung der Böschungen unter Ansatz von Restscherfestigkeiten

Umgang mit Bereichen bindiger Horizonte

Scherfestigkeit von Tonen in Abhängigkeit von Zeit bzw. Scherweg



Abnahme der Scherfestigkeit durch zeitabhängige Entfestigung
 [SMOLTCZYK U. et al. (1985): Determination of the shear strength of partially decomposed mudstone. Proc. of the 11th ICSMF, San Francisco, vol. 2, pp. 1055-1059]



Schubspannung und Porenzahl in Abhängigkeit vom Scherweg unter konstanter effektiver Normalspannung für einen Ton mit der Lagerung
 (a) überkritisch dicht (überkonsolidiert),
 (b) unterkritisch dicht (normalkonsolidiert)
 (nach DIN 18137, 1990, aus Diss. T. Vittinghoff, 2003)

Lösungsansatz: Ermittlung von Restscherfestigkeiten nach langen Verformungswegen mittels Kreisringscheranlagen, begleitend und ergänzend Scherfestigkeitsuntersuchungen an aufbereiteten Tonen

Umgang mit Bereichen bindiger Horizonte

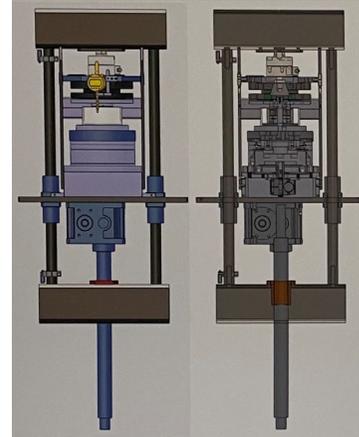
Laboranlagen zur Ermittlung von Restscherfestigkeiten



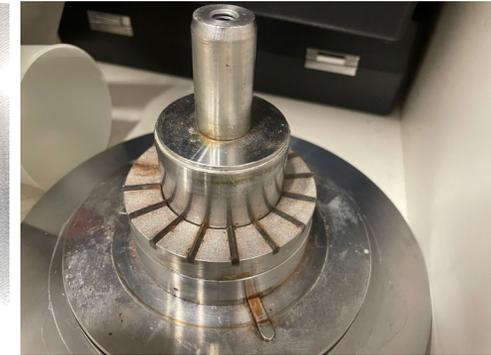
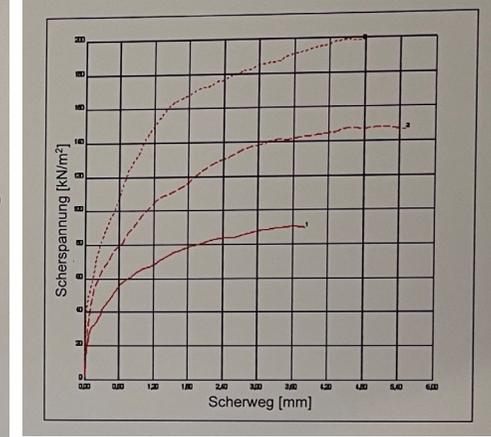
Aufbereitungs-
anlage



Vorkonsolidationsanlage



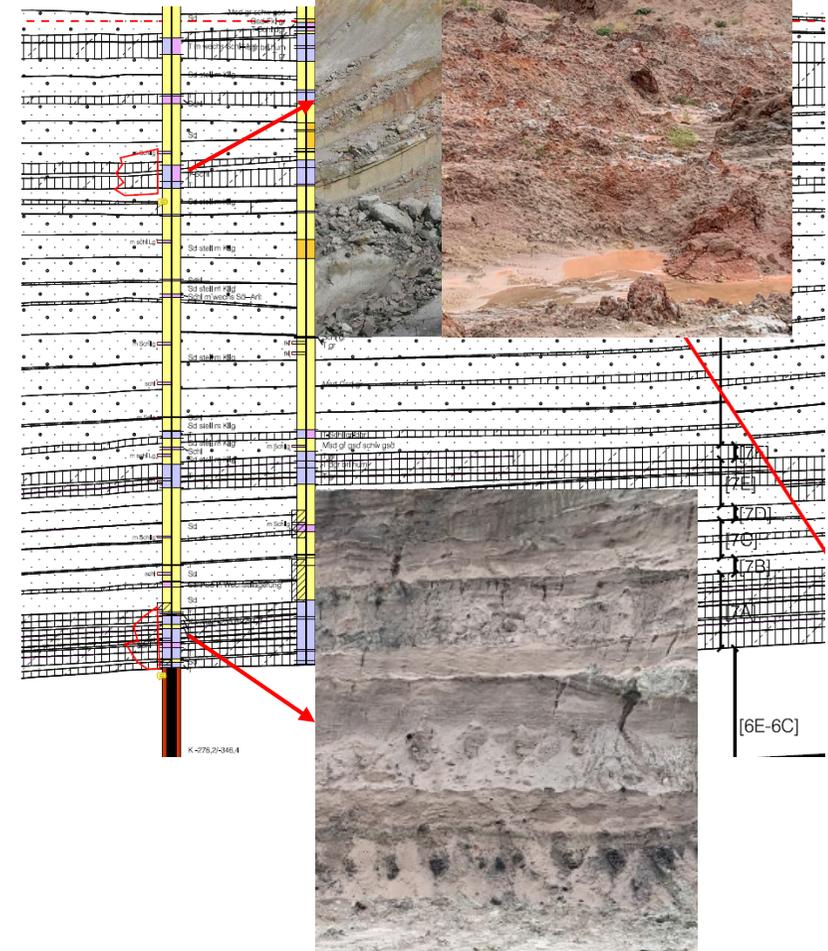
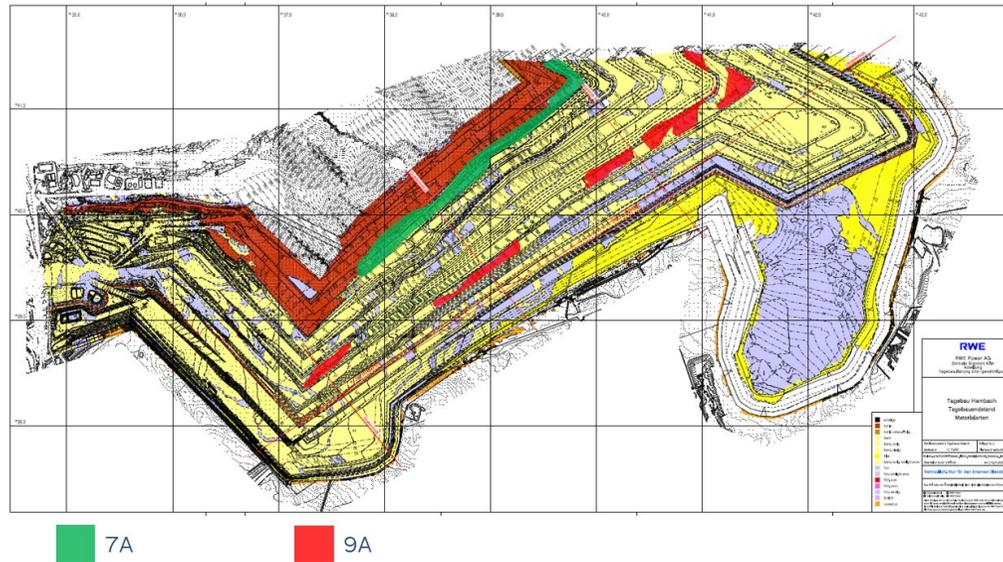
Kreisringscheranlage



Lösungsansatz: Ermittlung von Restscherfestigkeiten nach langen Verformungswegen mittels Kreisringscheranlagen, begleitend und ergänzend Scherfestigkeitsuntersuchungen an aufbereiteten Tonen

Umgang mit Bereichen bindiger Horizonte

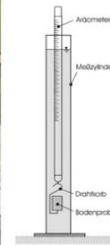
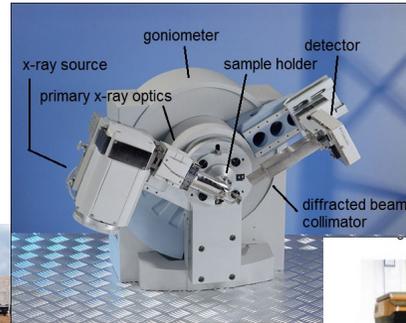
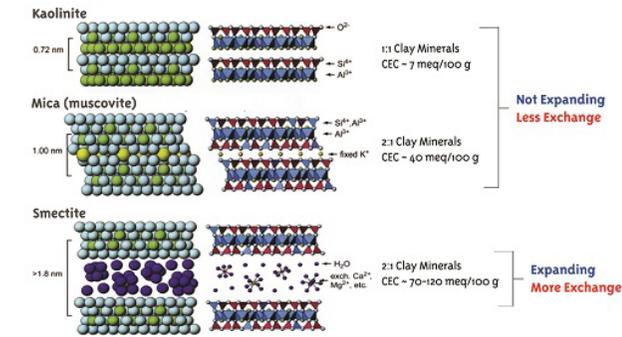
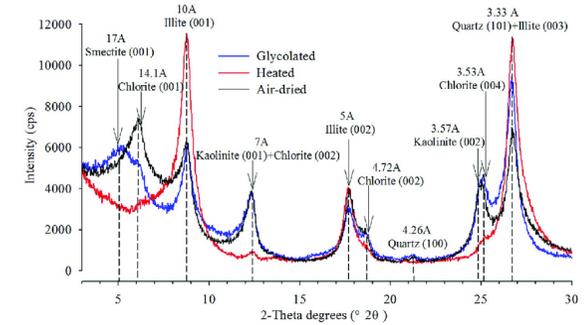
Brunnenbohrungen in den Tagebauen zeigen Nachfall in Tonhorizonten 9A (Rotton) und 7A



Effekt weist darauf hin, dass diese bindigen Horizonte in Gegenwart von „fremdem“ Wasser dispergieren können.

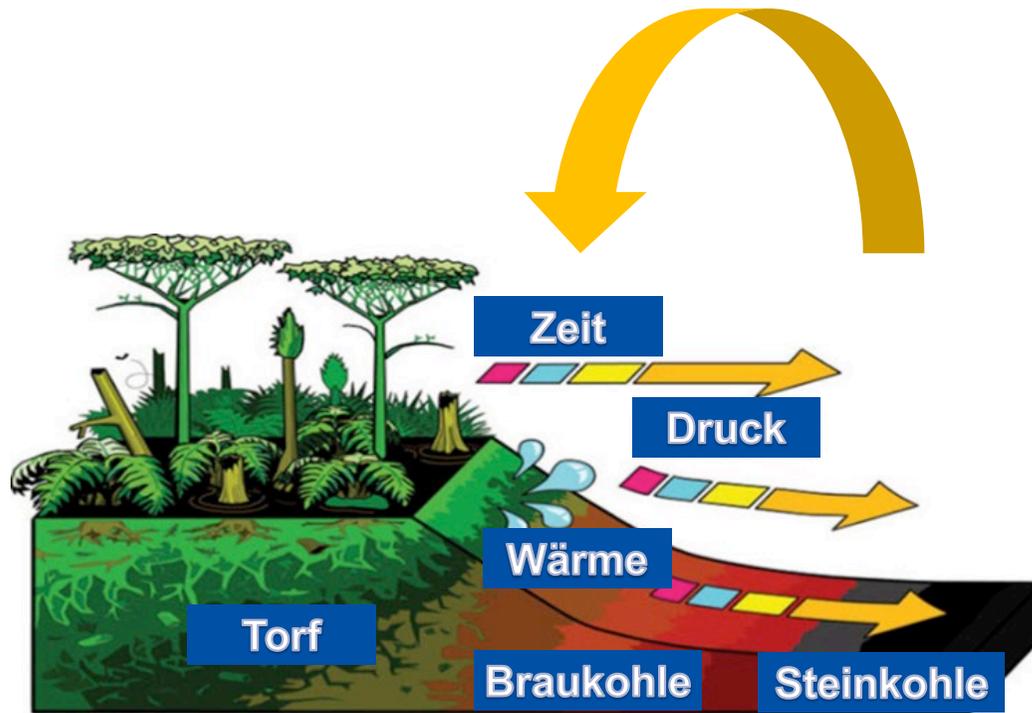
Umgang mit Bereichen bindiger Horizonte

Chemische und mineralogische Untersuchung	Geotechnische Untersuchung
Mineralogie der Tone	Zerfallsversuche, Hydrometerversuch
Zusammensetzung der Tone	Quellversuche (versch. Lösungen)
Kationenaustauschkapazität (KAK)	Direkte Scherversuche (versch. Lösungen)



Vorgehen: Mineralogische und bodenmechanische Untersuchung an 6 verschiedenen bindigen Horizonten mit Unterstützung der RWTH Aachen

Umgang mit Bereichen freigeschnittener Kohleböschungen



Prüfung, ob eine Selbstentzündung der Braunkohle zu erwarten ist

- Ergebnis der Bewertung unserer Abteilungen für Lagerstätte und Mineralogie zeigt, dass eine Selbstentzündung zwar möglich ist, aber nur eine geringe Wahrscheinlichkeit hat.
- Maßgeblich ist der Zeitraum bis zur Lage der Kohle unterhalb des Seewasserspiegels

> Prüfung, ob eine Zersetzung der Braunkohle zu erwarten ist

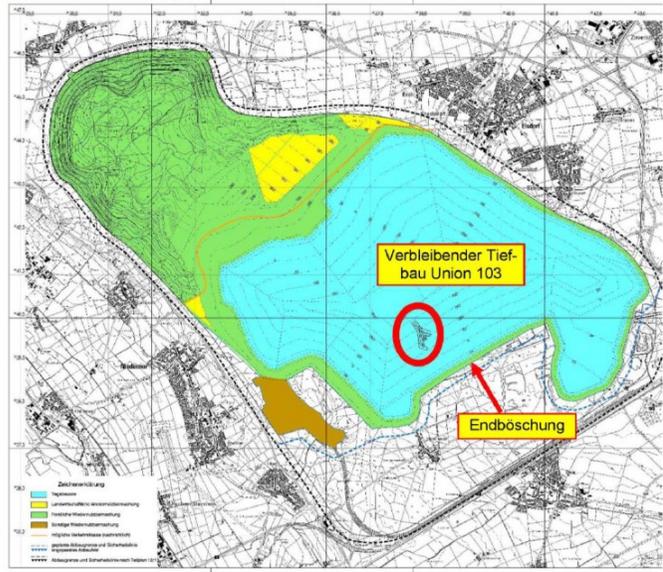
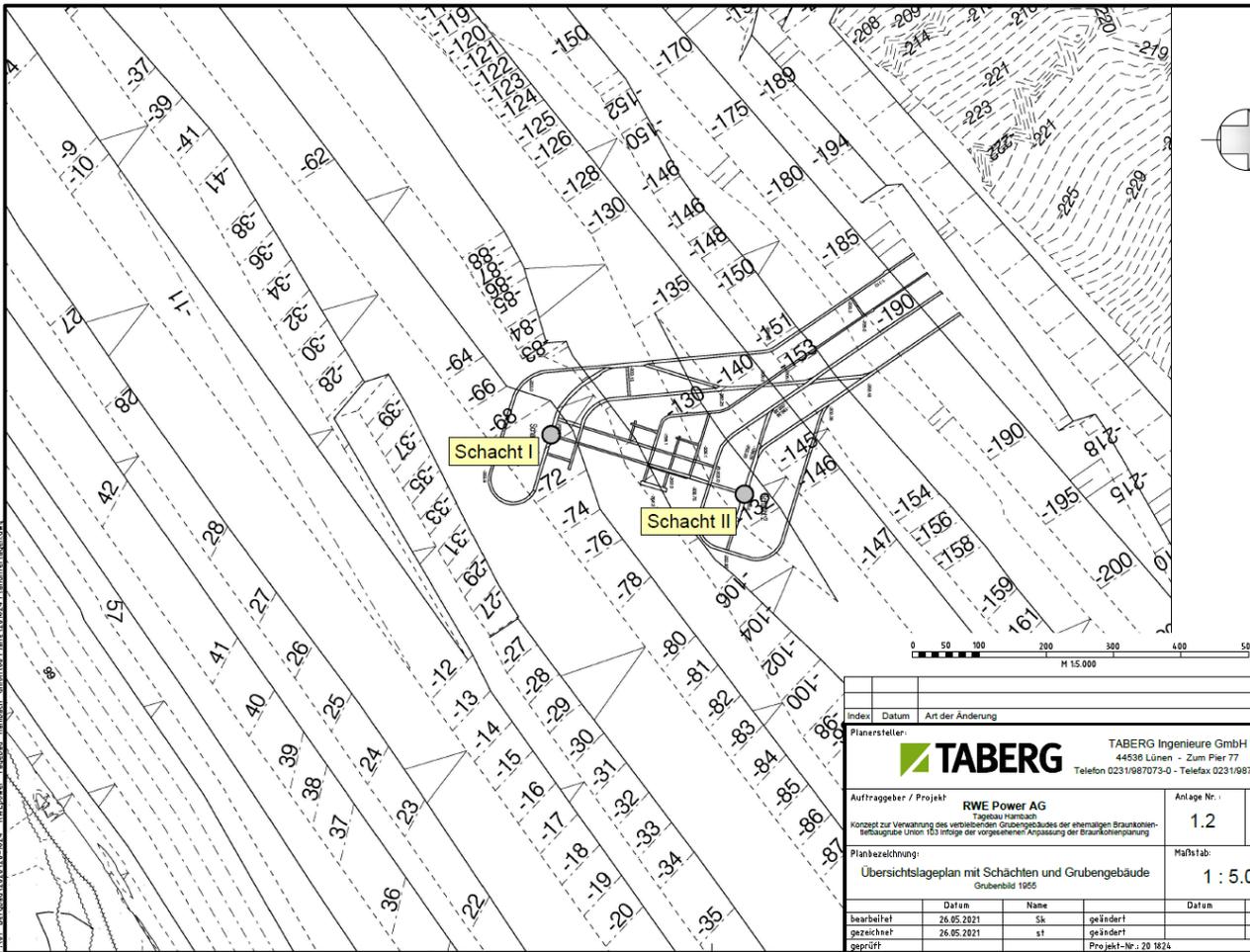
- Mikrobiologisch
- Verwitterung
- Chemische Zersetzung durch Kontakt mit Wasser

University of Kentucky

Fragestellungen

- Ist das Abdecken von Kohle im Tagebausee erforderlich?
- Wie ist das langfristige geomechanische und petrophysikalische Verhalten von Braunkohle?
- Verändern sich die Eigenschaften der Braunkohle durch die Freilegung und nachfolgenden Wassereinfluss?
- Gibt es einen Einfluss auf die langfristige Festigkeit der Braunkohle und damit auf die Standsicherheit der Seeböschungen?

Sonderthema in Hambach: Sicherung der Schachtanlage Morschenich

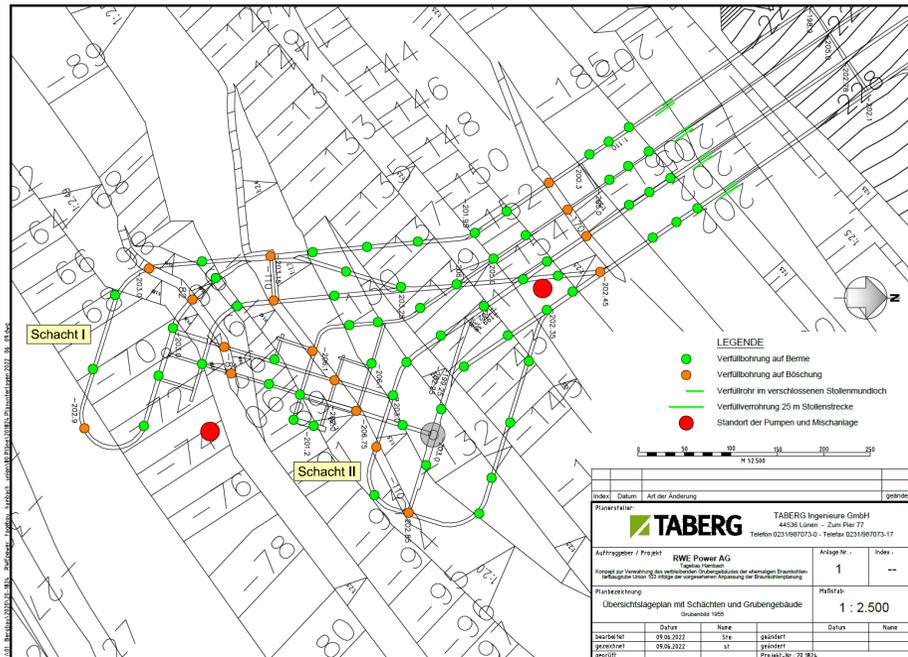
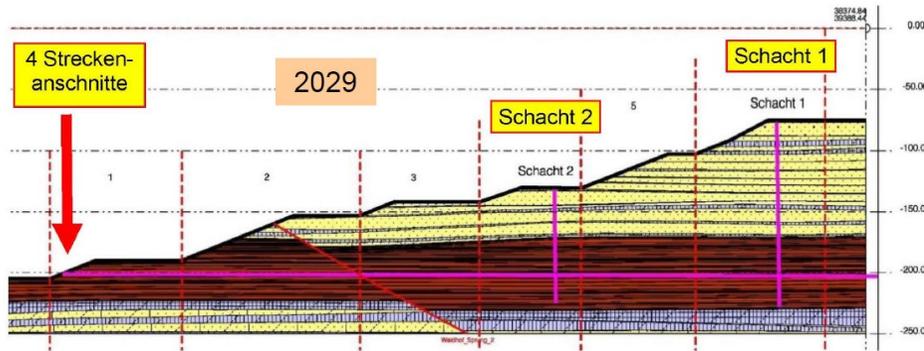


**4.400 m Streckensystem
250 m Schachtsäulen**

Index	Datum	Art der Änderung	geändert
Planersteller:			
TABERG		TABERG Ingenieure GmbH 44536 Lünen - Zum Pier 77 Telefon 0231/987073-0 - Telefax 0231/987073-17	
Auftraggeber / Projekt		Anlage Nr.:	Index:
RWE Power AG Tagebau Hambach Konzept zur Verwahrung des verbleibenden Grubengebäudes der ehemaligen Braunkohlen- Beltgrube Union 103 infolge der vorgesehener Anpassung der Braunkohlenplanung		1.2	--
Planbezeichnung:		Maßstab:	
Übersichtslageplan mit Schächten und Grubengebäude Grubenbild 1955		1 : 5.000	
bearbeitet	Datum	Name	geändert
gezeichnet	26.05.2021	st	geändert
geprüft			
		Projekt-Nr.: 20 1824	

**In der geschnittenen Seeböschung verbleibende Teile des
Grubengebäudes der Schachtanlage Union 103**

Sonderthema in Hambach: Sicherung der Schachtanlage Morschenich



- Vorgesehen ist die vollständige Verfüllung der verbleibenden Hohlräume mit abbindendem Baustoff.
- Hintergrund:
 - Gewährleistung der dauerhaften Standsicherheit der Böschung.
 - Vermeidung von Wasserwegsamkeiten, bzw. unkontrollierten Wasserumläufigkeiten.
 - Gewährleistung der Sicherheit gegenüber weiteren denkbaren Effekten aus dem Grubengebäude (z. B. Methan ausgasung, Selbstentzündung der Kohle).
- Die insgesamt zu verfüllende Kubatur beträgt rd. 39.000 m³.
- Die Einbringung des Baustoffs soll nach Herstellung der finalen Böschungen über die beiden Schächte, bzw. über Bohrungen in die Strecken erfolgen.

Fazit und Ausblick

- **Durch den politisch beschlossenen Ausstieg Deutschlands aus der Braunkohle ergibt sich für das Rheinische Braunkohlenrevier die Aufgabe, in den Tagebauen Hambach und Inden sowie Garzweiler frühzeitig große bleibende Böschungssysteme zur Gestaltung der zukünftigen Tagebauseen anzulegen.**
- **So wird in diesem Zusammenhang im Tagebau Hambach der zukünftig tiefste (und vom Volumen zweitgrößte) See Deutschlands entstehen.**
- **Für alle Tagebaue im Rheinischen Revier ist die dauerhafte Standsticherheit der über und unter Wasser anzulegenden bleibenden Böschungen auch unter dem Einfluss von Erdbebeneinwirkungen zu gewährleisten.**
- **Die geotechnischen Untersuchungen zur Bemessung der bleibenden Böschungen in Bezug auf Standsticherheit, Erdbebeneinwirkungen, Bodenverflüssigung und Windwellen laufen planmäßig bereits seit vielen Jahren und sind auf sehr gutem Weg.**
- **Für die im Zuge des Kohleausstiegs geplanten geschnittenen Seeböschungen ergeben sich insbesondere für die bindigen geologischen Horizonte vielfältige neue Fragestellungen.**
- **Diese Fragestellungen sind identifiziert und bereits angegangen. Aus dem engen Zeitplan (Herstellung der Böschungen, Beginn der Befüllung in Hambach und Inden) ergibt sich die Notwendigkeit, die erforderlichen umfangreichen Untersuchungen möglichst zeitnah abzuschließen.**



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Glückauf!