

Sanierungsbergbau

Vorlesung



Sommersemester 2023

I. Einleitung

II. Grundlagen

- Bergrecht / Wasserrecht
- Bergwirtschaft
- Geologie / Lagerstätten
- Tagebauentwicklung
- Beispiel Sanierung Berzdorf

III. Braunkohlesanierung / Wiedernutzbarmachung

- Geotechnische Sicherheit
- Altlasten
- Rekultivierung / Renaturierung
- Herstellung eines ausgeglichenen Wasserhaushalts / Klimafragen
- Schlussfolgerungen

III. Nachbergbauliche Aufgaben im Untertagebergbau

- Halden / Absetzanlagen
- Bergschäden / öffentliche Sicherheit
- Wasserbehandlungsanlagen

IV. Fazit

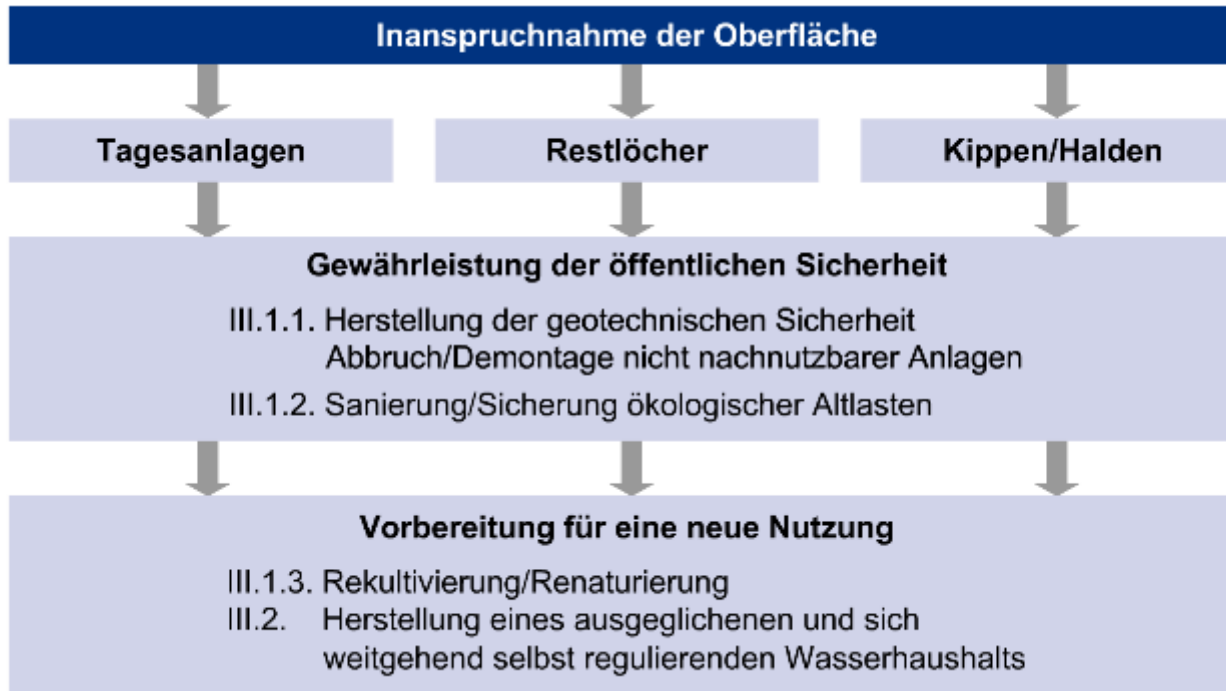
- Das Ende der Bergaufsicht?

Geotechnische Sicherheit

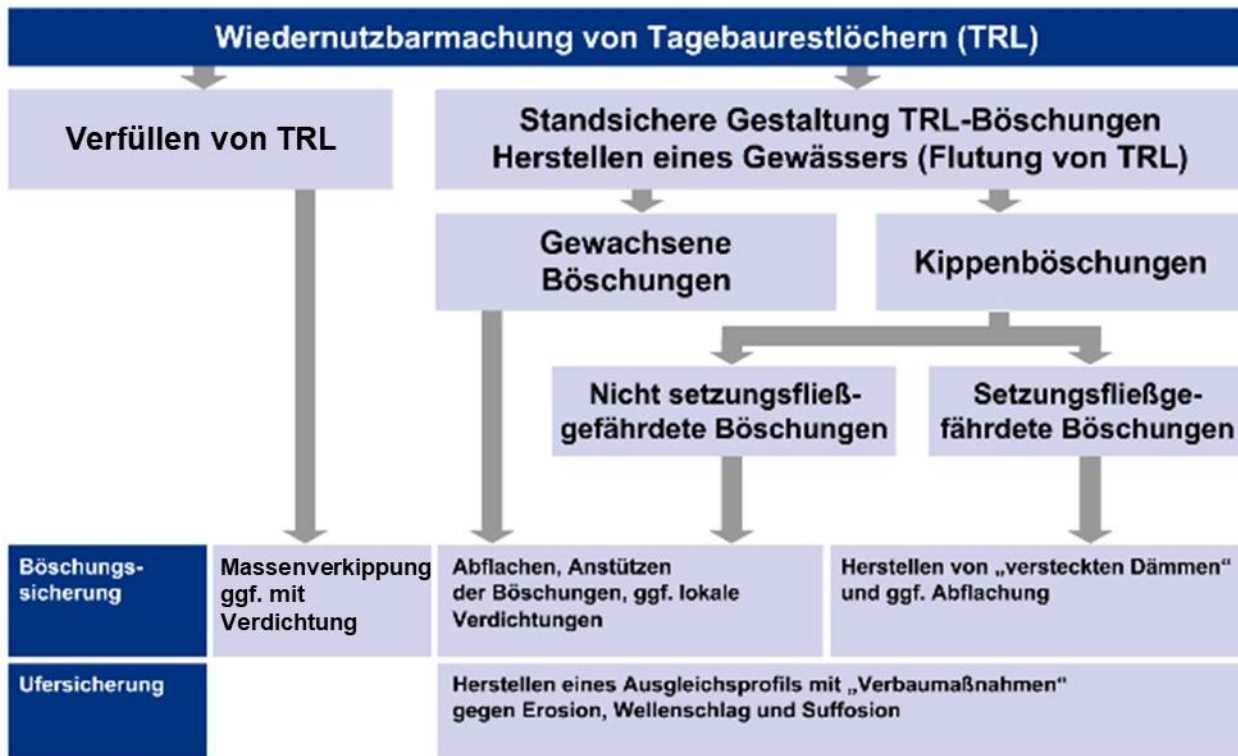
Schwallwelle infolge Setzungsfließbrutschung



41“



Wiedernutzbarmachung



Schließung von Tagebaurestlöchern mit Massen

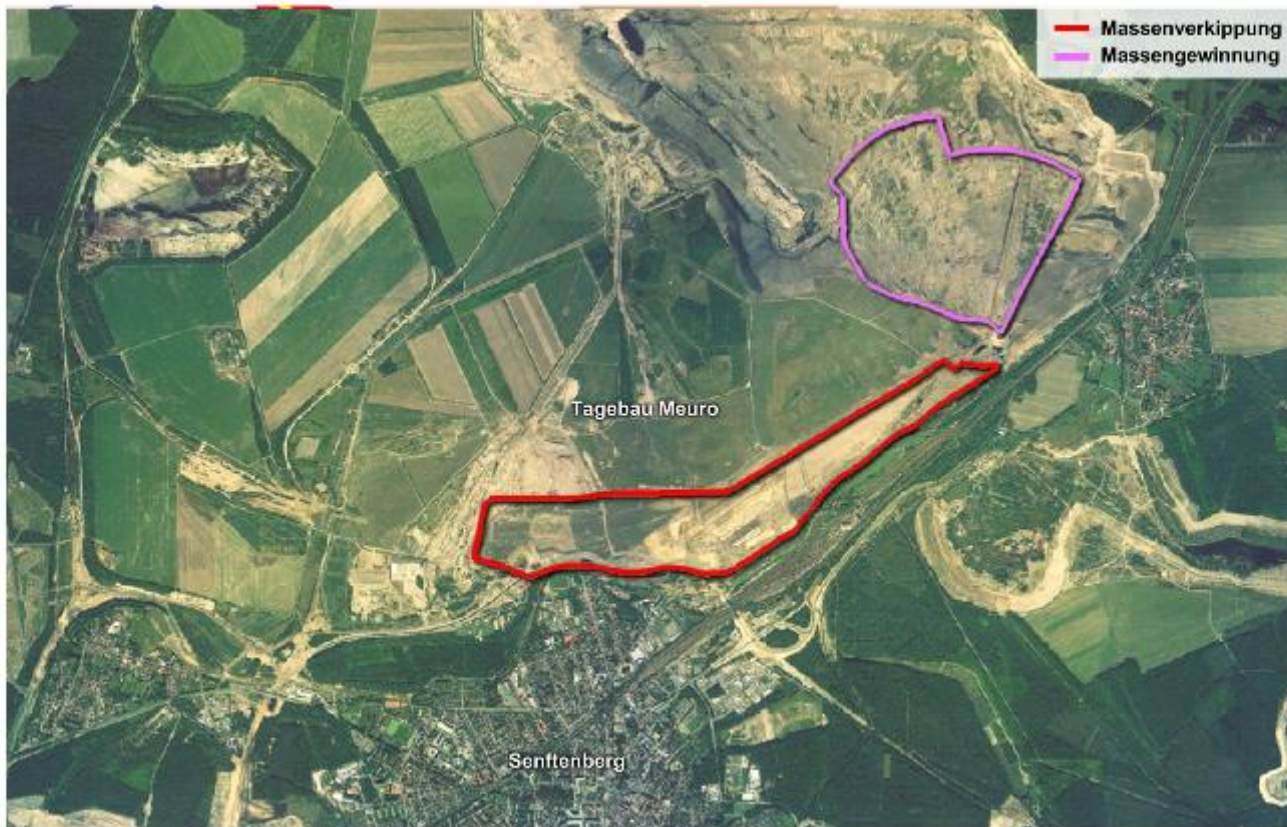
Revier	Restlöcher	davon Schließung/ Verfüllung	davon Bergbau- folgeseen
Lausitz	124	34	90
Mitteldeutschland	83	3	80
LMBV	207	37	170

Schließung von Randschläuchen mit Kippenmassen

Revier	Anzahl mit Volumen [Mio. m ³]				Volumen gesamt [Mio. m ³]
	gesamt	> 5	> 50	> 100	
Lausitz	14	12	1	1	314
Mitteldeutschland	4	3	-	-	54
LMBV	28	15	1	1	368

- **Tagebau Meuro:**
Südrandschlauch Senftenberg
- **Tagebau Klettwitz:**
Randschlauch Kostebrau
- **Tagebau Espenhain:**
Randschlauch Störmthal - Auenhain

Verkippung Südrandschlauch Tagebau Meuro 1998 bis 2003: 38 Mio. m³



Gründe der Randschlauchschließung mit Kippenmassen

Meuro:

■ Bodenmechanik:

- Abflachung der gewachsenen Böschungen aufgrund Bebauung/Infrastruktur nicht möglich
- Randschlauchschließung wirtschaftlicher als Ufersicherung von
 - 4,5 km Kippenböschung und
 - 4 km gewachsener Böschung
- Abtrag zu hoher Kippen zur Herstellung einer ausreichenden Wassertiefe

■ Landesplanung:

- Schaffung einer Trasse für Ortsumgehung B169 Senftenberg
- Anschluss der Stadt Senftenberg an die rekultivierten Tagebauflächen

Technologie: Nutzung der vorhandenen Tagebaugroßgeräte für die effiziente Massenbewegung



Verkippung Randschlauch Kostebrau Tagebau Klettwitz 1994 bis 2003: 122 Mio. m³



Klettwitz:

■ Bodenmechanik:

- aufgrund Ortslage Kostebrau keine Abflachung der 80 m hohen gewachsenen Böschungen möglich
- kostengünstige Lösung im Vergleich zur Ufersicherung von
 - 7,8 km setzungsfließgefährdeter Kippenböschung und
 - 5,3 km gewachsener Böschung

■ Hydrologie:

- Vermeidung eines Sees mit problematischer Wasserqualität (ausschließlich Zustrom aus Kippen)

■ Landesplanung:

- Wiederanschluss der Ortslage Kostebrau an die Umgebung

Technologie: Nutzung der vorhandenen Tagebaugroßgeräte für die effiziente Massenbewegung im Abraumbandbetrieb

Verfüllung Randschlauch Störmthäl - Auenhain



Gründe der Randschlauchschließung mit Kippenmassen

Espenhain:

■ Gründe:

- Herstellung von 2 Seen mit unterschiedlichen Endwasserständen im Tagebaurestloch Espenhain zur Begrenzung des Grundwasserstandes im Raum Leipzig (Markkleeberg +113mNN; Störmthal +117mNN)

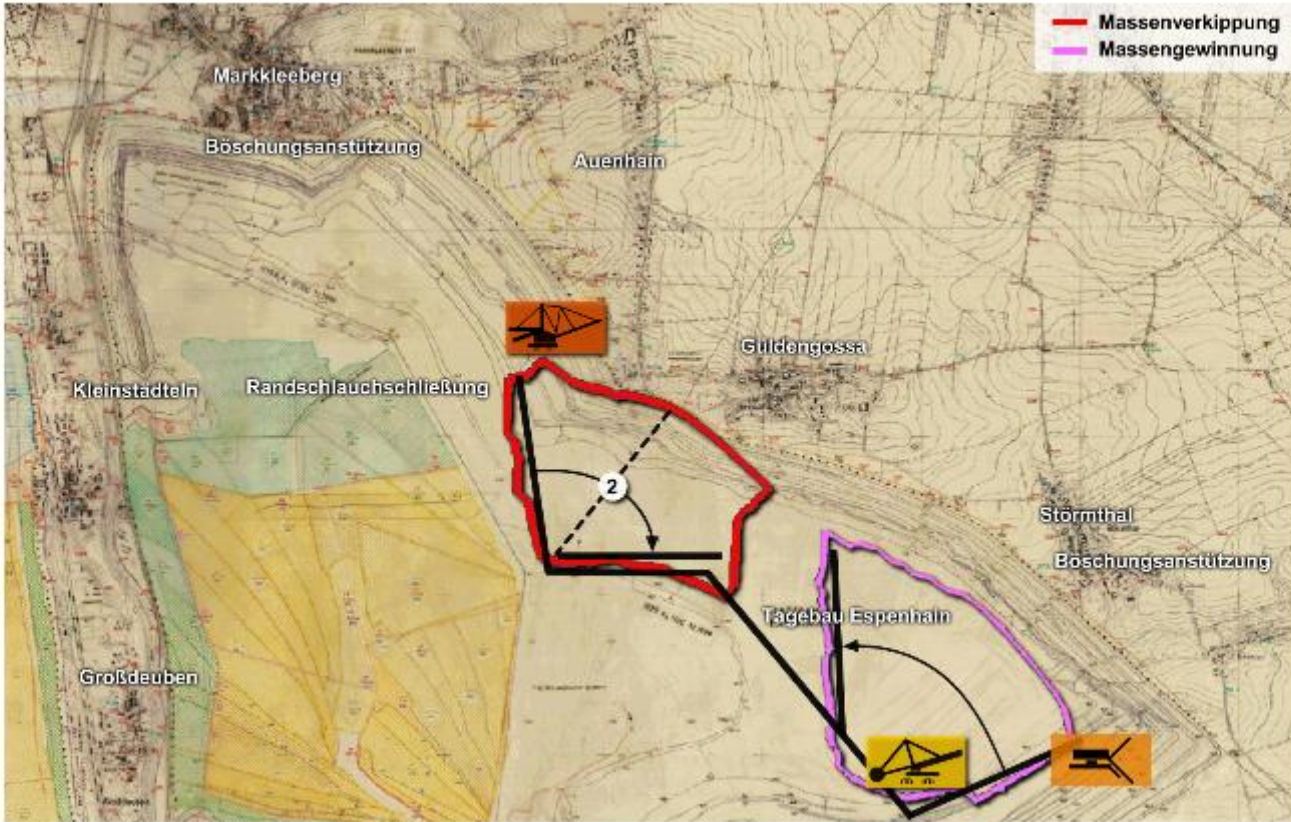
■ Bodenmechanik:

- Herstellung standsicherer Restlochböschungen als Voraussetzung für die Flutung:
 - Anstützung gewachsene Böschungen ohne zusätzliche Landinanspruchnahme
 - Anstützung setzungsfließgefährdeter gekippter Böschungen
- Abtrag zu hoher Kippenbereiche für ausreichende Wasserüberdeckung

■ Landesplanung:

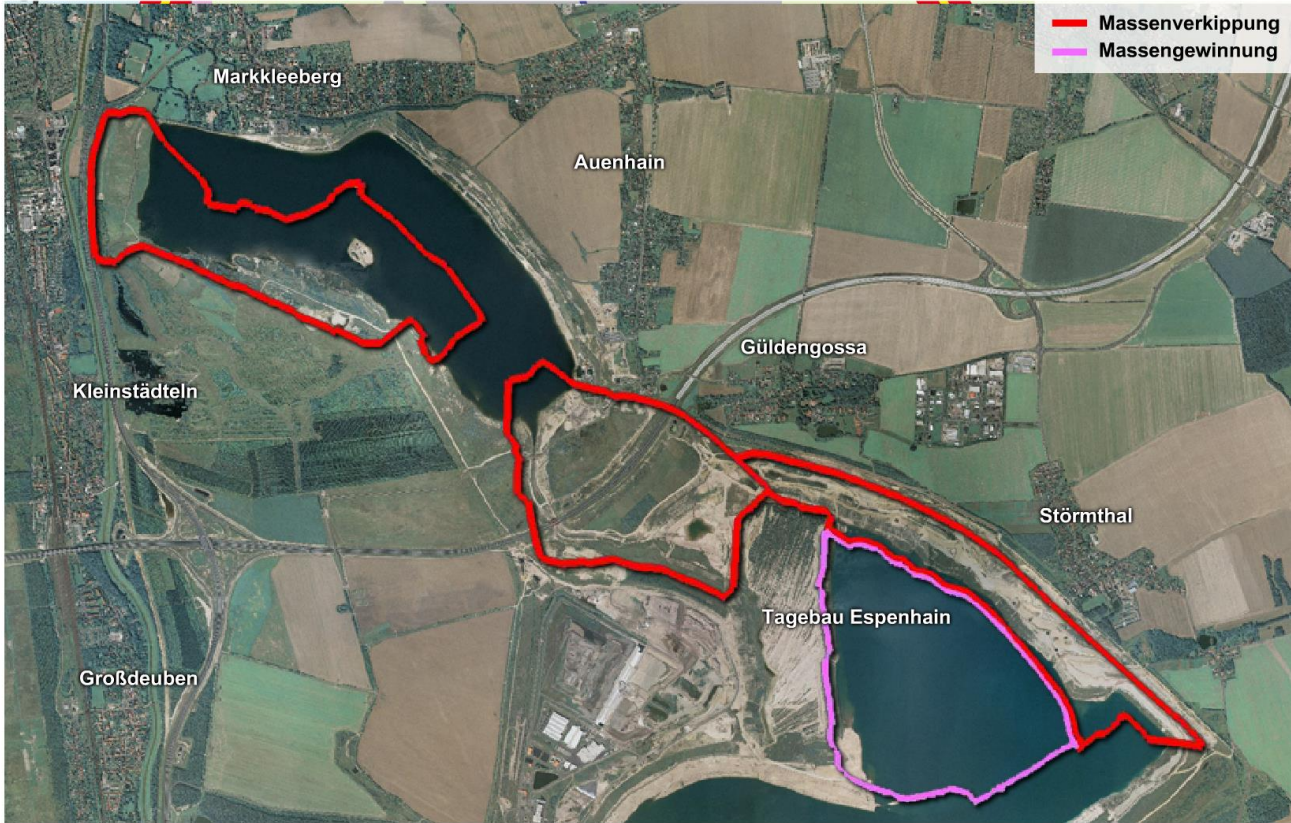
- Nutzung des verfüllten Randschlauches für die Bundesautobahn A38

Technologie: Nutzung der vorhandenen Tagebaugroßgeräte für die effiziente Massenbewegung





September 1999 Absetzer 1115



Randschlauch Störmthal - Auenhain

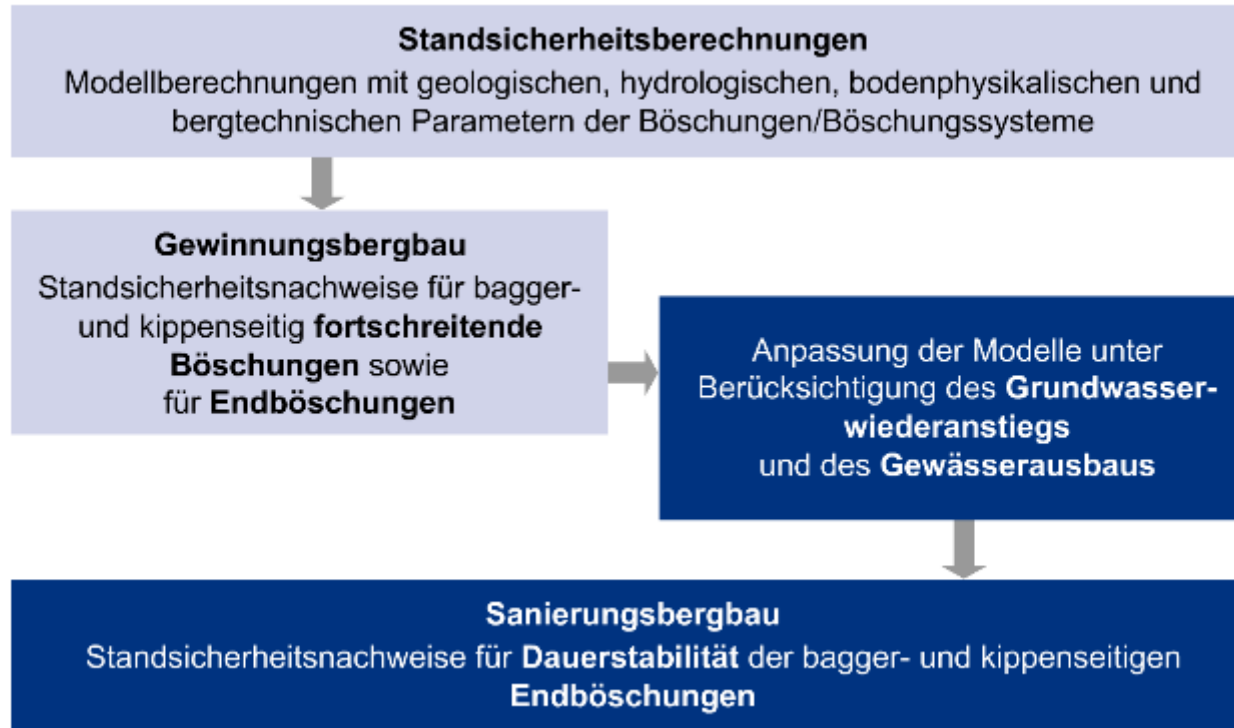
Gerät	Fördervolumen [Tm ³]	Einsatzbeginn	Einsatzende
SRs 1200n - 1498	28.950,00	II/1994	II/2001
ERs 710 - 336	3.400,00	II/1994	IV/1995
SRs 1000n - 1547	21.300,00	II/1994	II/2001
A2RsB 10000 - 1115	53.650,00	II/1994	II/2001

Stand sichere Gestaltung Restlöcher Bergbaufolgeseen, Allgemeines

Sicherung Tagebauböschungen

Revier	Böschungslänge in km			
	gesamt	gewachsen	gekippt	davon setzungsfließ- gefährdet
Lausitz	753	311	442	398
Mitteldeutschland	446	217	229	21
LMBV	1.199	528	671	419

Standssichere Gestaltung von Tagebauböschungen



Standssichere Gestaltung von Endböschungen

gewachsen

gekippt
ggf. gesichert gegen Setzungsfließen

Bodenmechanische Standsicherheit

Standssicherheitsberechnungen unter Berücksichtigung des Grundwasserwiederanstiegs und des Gewässerausbaus

Generell: Flachere Böschungsneigung als in der Betriebsphase

Angewandte Berechnungsverfahren: Kreiszyklindrische und polygonale Gleitflächenverfahren

- Abflachen durch Abtragen und Anstützen
- Herstellen von versteckten Dämmen bei setzungsfließgefährdeten Böschungen

Hydromechanische Standsicherheit

Ufersicherung gegen Wellenschlag und Strömungen des freien Seewassers

- Herstellen einer Ausgleichsneigung und gegebenenfalls Uferverbau (Ingenieurverbau und biologischer Verbau)

Böschungssicherung

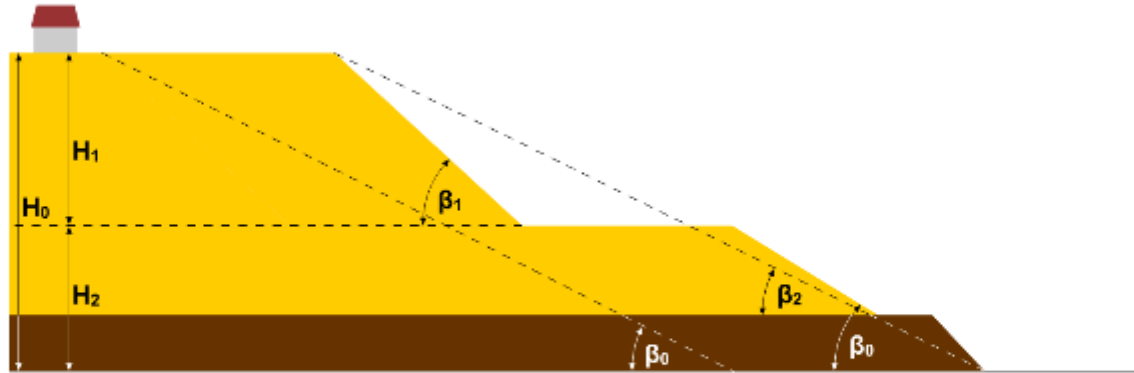
Anhaltswerte für Böschungen und Böschungssysteme ohne rutschungsbegünstigende Verhältnisse

Betriebsphase
Fortschreitende Böschungen

Nachbetriebsphase
Bleibende Böschungen

	Böschungswinkel/ Neigungsverhältnis	Höhe des Böschungssystems [m]	Böschungswinkel/ Neigungsverhältnis
gewachsen	40° bis 60° / 1 : 1,2 bis 1 : 0,6	bis 20	32° bis 36° / 1 : 1,6 bis 1 : 1,4
	38° bis 50° / 1 : 1,3 bis 1 : 0,8	20 bis 30	25° bis 32° / 1 : 2,1 bis 1 : 1,6
	36° bis 45° / 1 : 1,4 bis 1 : 1	30 bis 40	18° bis 24° / 1 : 3 bis 1 : 2,2
gekippt	27° bis 34° / 1 : 2 bis 1 : 1,5	bis 20	24° bis 29° / 1 : 2,2 bis 1 : 1,8
	22° bis 27° / 1 : 2,5 bis 1 : 2	20 bis 30	16° bis 20° / 1 : 3,5 bis 1 : 2,7
	18° bis 22° / 1 : 3 bis 1 : 2,5	30 bis 40	12° bis 16° / 1 : 4,7 bis 1 : 3,5

Betriebsphase



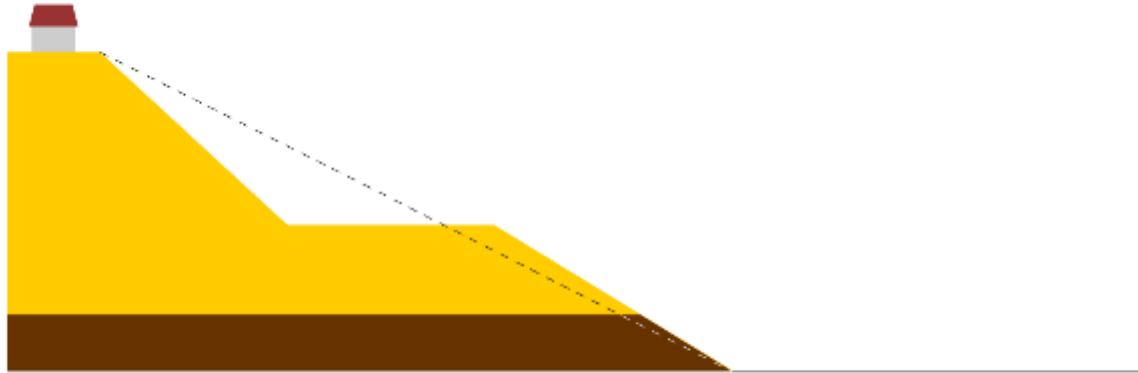
β_0 – Generalneigung des Böschungssystems

$\beta_{1...2}$ – Neigung der Einzelböschungen

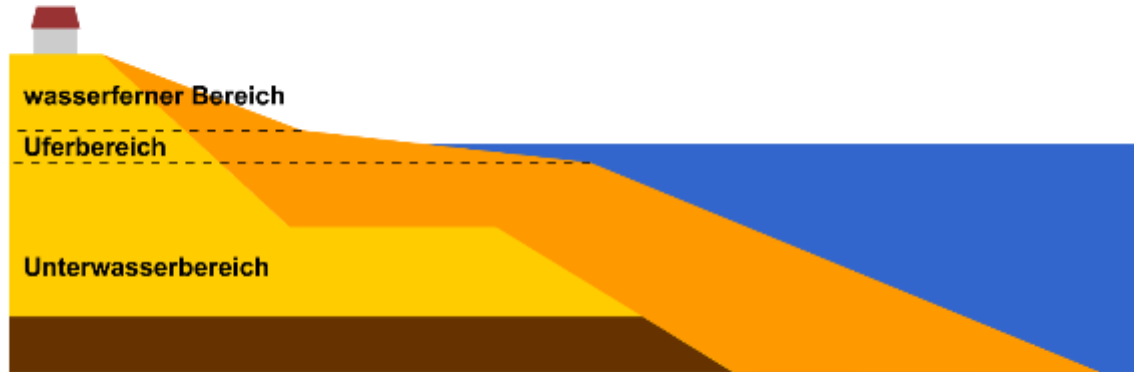
H_0 – Gesamthöhe des Böschungssystems

$H_{1...2}$ – Höhe der Einzelböschungen

Stilllegungsphase



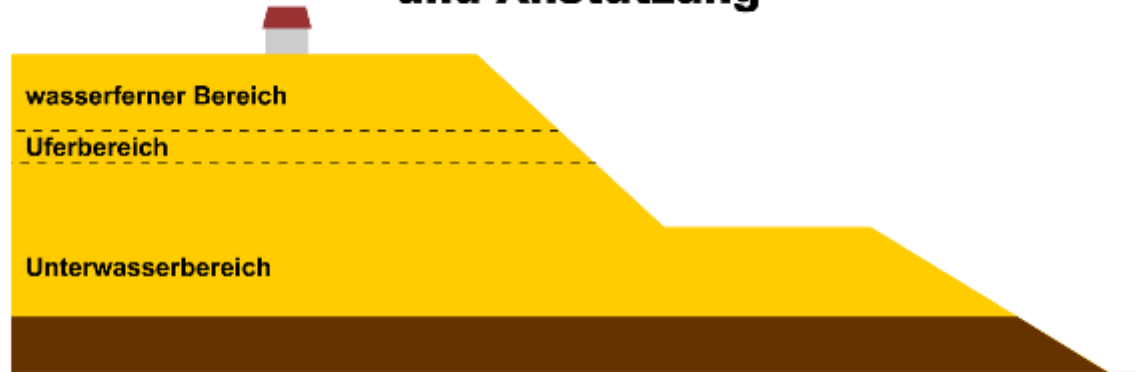
Stilllegungsphase Böschungsstabilisierung durch Anstützen



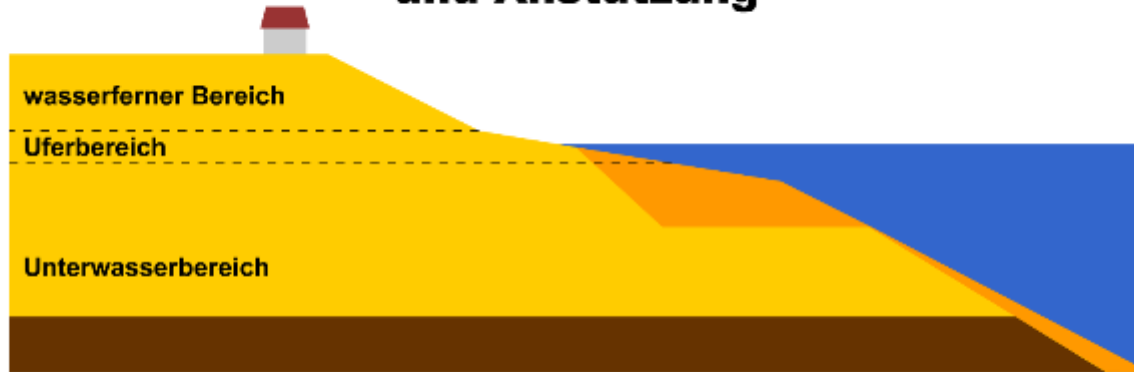
Stilllegungsphase Böschungsstabilisierung durch Kopfentlastung



Stilllegungsphase Böschungsstabilisierung durch Kopfentlastung und Anstützung



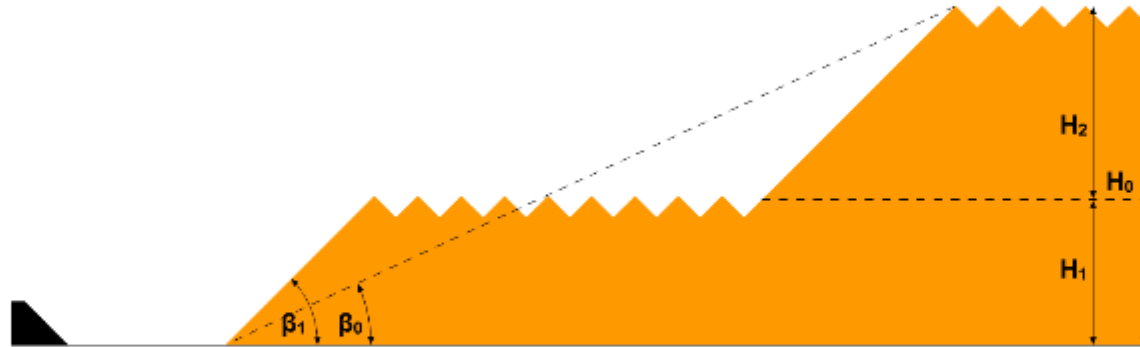
Stilllegungsphase Böschungsstabilisierung durch Kopfentlastung und Anstützung



Betriebsphase



Stilllegungsphase



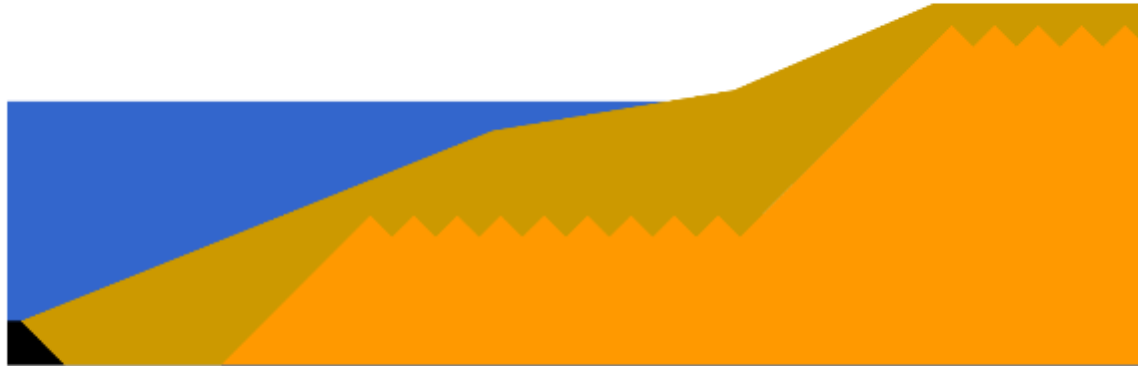
β_0 – Generalneigung des Böschungssystems

$\beta_{1...2}$ – Neigung der Einzelböschungen

H_0 – Gesamthöhe des Böschungssystems

$H_{1...2}$ – Höhe der Einzelböschungen

Stilllegungsphase Sicherung durch Anstützung



Stilllegungsphase

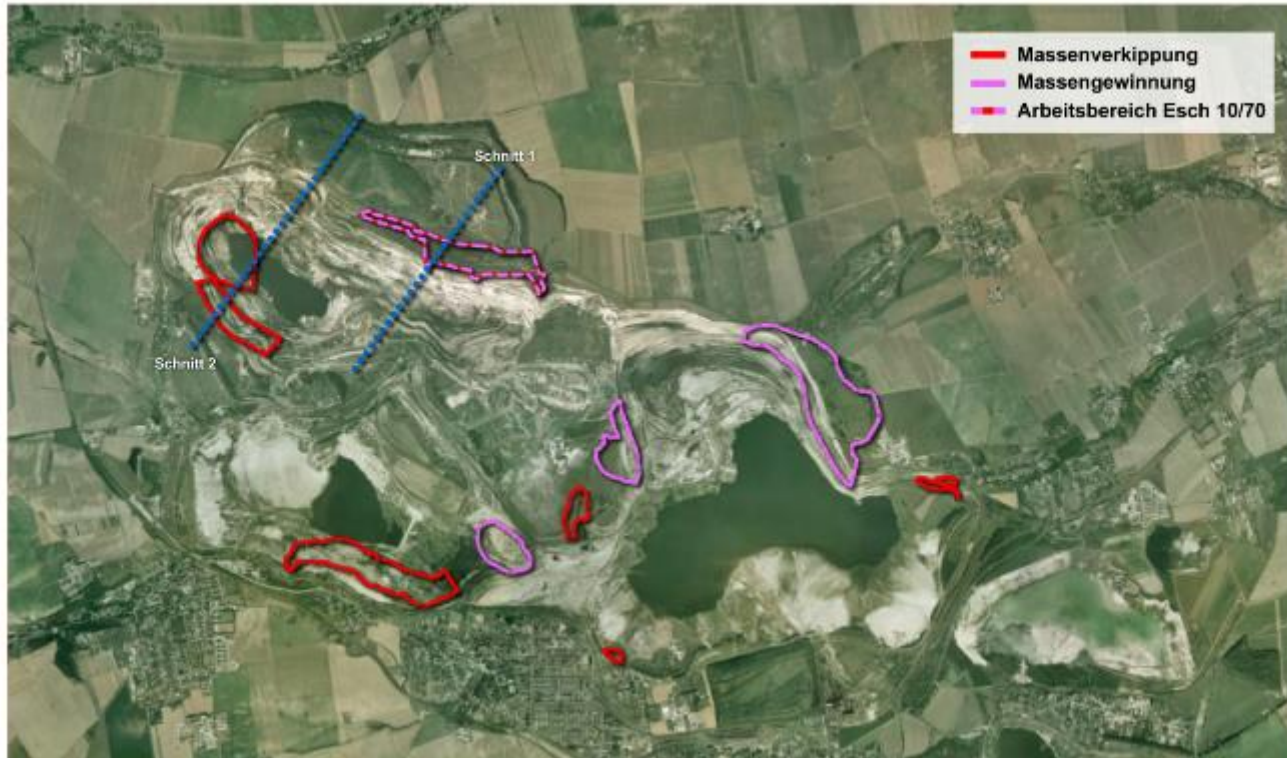
Sicherung durch Kopfentlastung und Anstützung



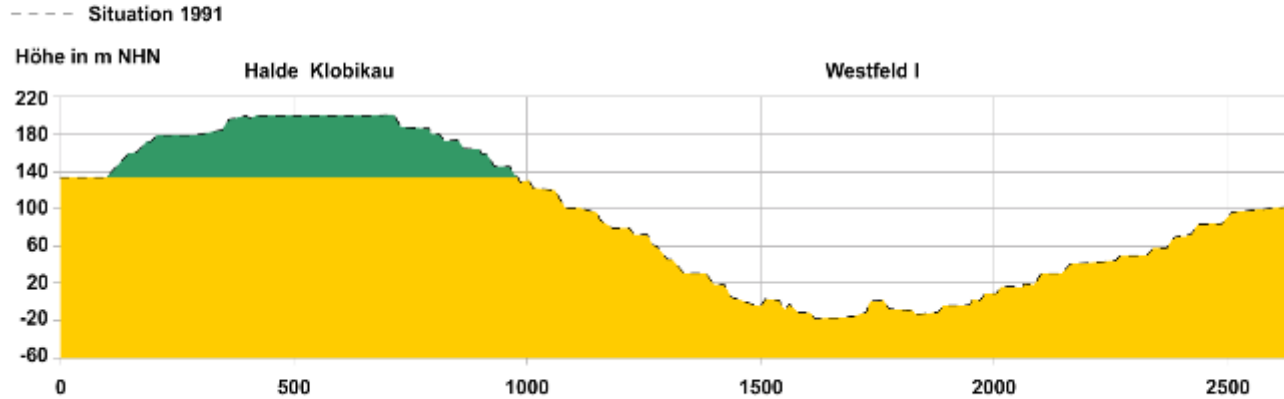
Stilllegungsphase

Sicherung durch Kopfentlastung und Anstützung

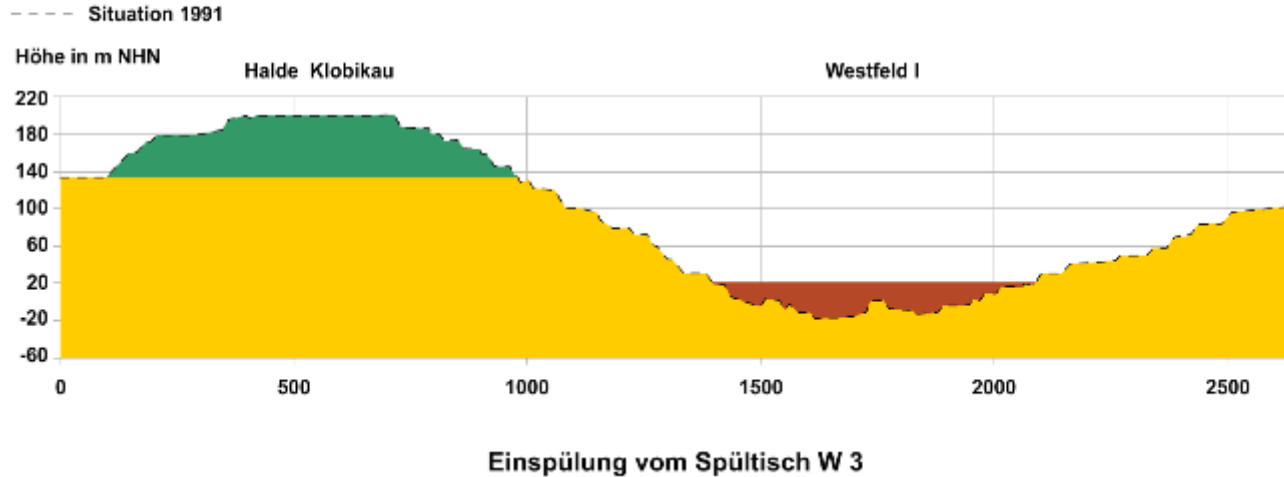


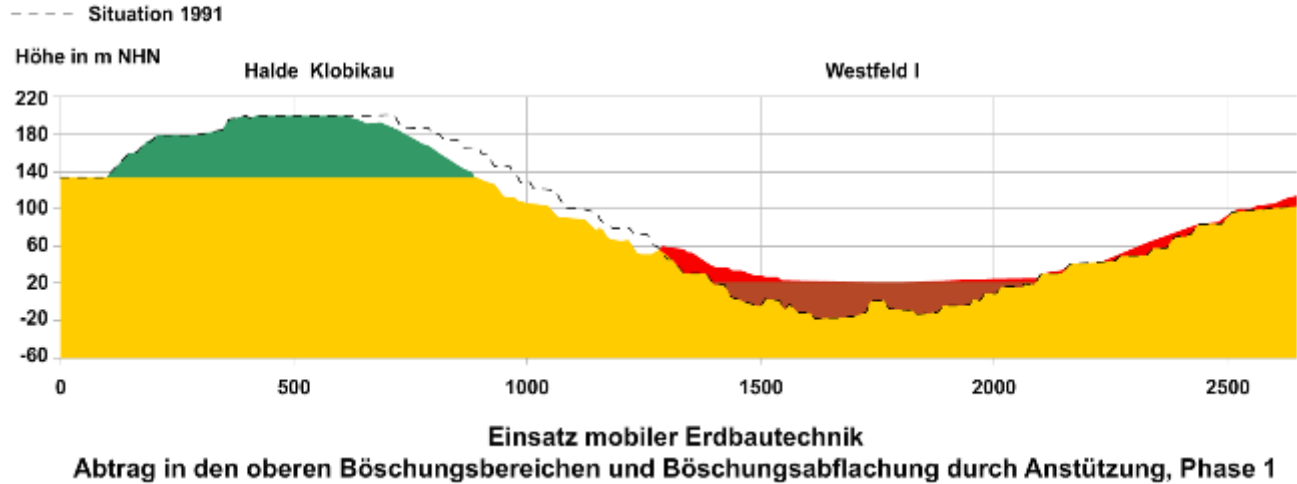


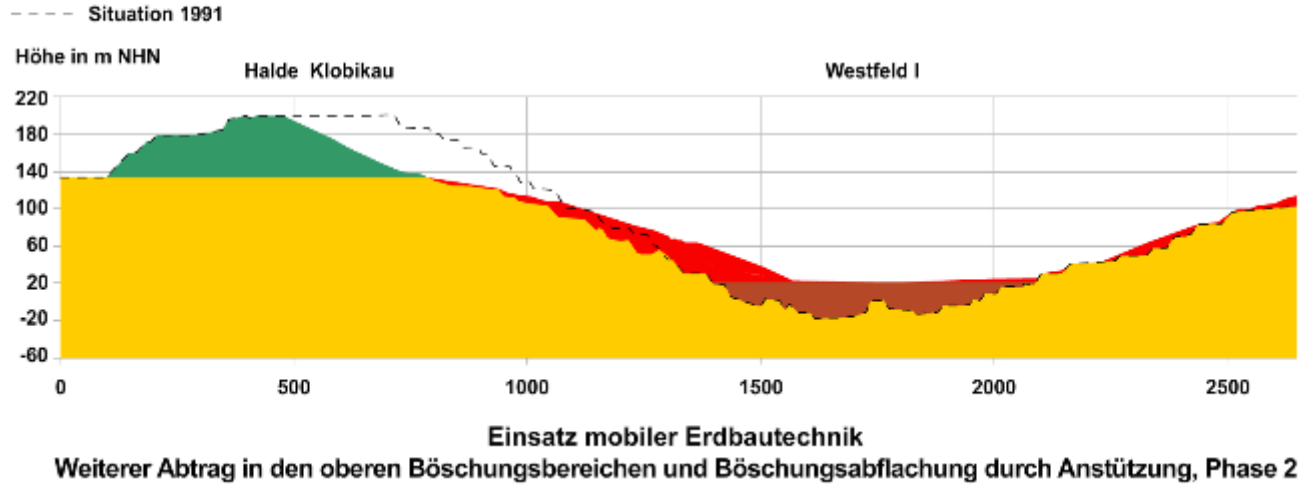
Schnitt 2



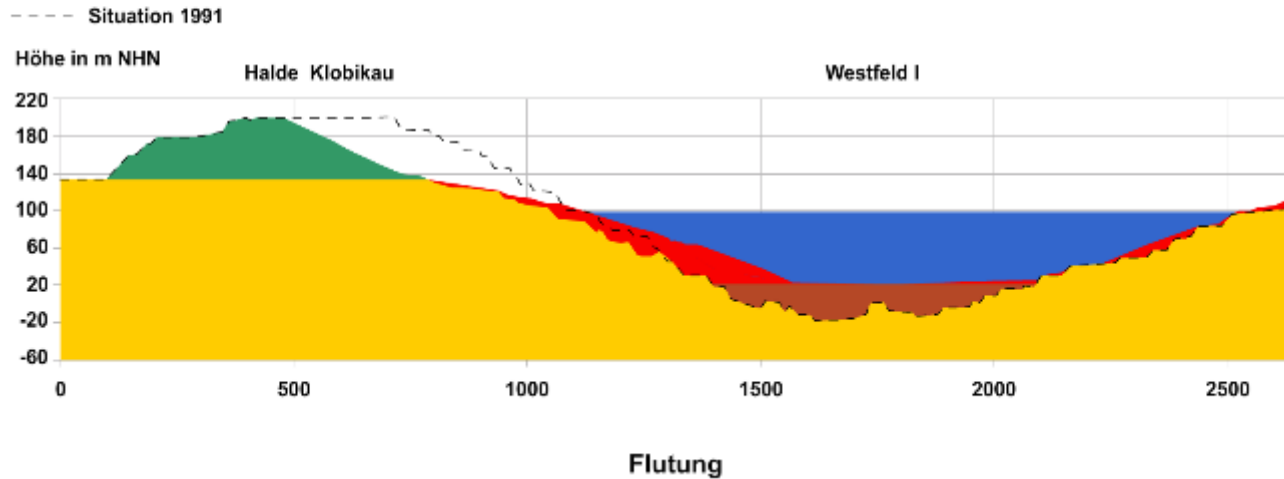
Schnitt 2







Schnitt 2





Böschungsabflachung mit mobiler Erdbautechnik



Setzungsfließen durch Absprengung von Überhöhen Nordschlauch Spreetal 1999



Knappensee: Geotechnisches Ereignis vom 11.03.2021



Tagebau Nachterstedt, Südböschung mit Slipanlage und „Siedlung am Ring“ 2008



Tagebau Nachterstedt, Luftbild der Rutschung vom 18.07.2009

- Massenumlagerung: 2,8 Mio m³
- Gesamtmassenbewegung: 4,5 Mio m³
- Von der Rutschung erfasst wurden:
 - ein Doppelhaus
 - eine Doppelhaushälfte
 - Informationsgebäude mit E-Lok
 - Ortsverbindungsstraße Frose – Nachterstedt
 - Slipanlage für Fahrgastschiff
- Es sind 3 Personen ums Leben gekommen





Sanierungsabschnitt IV

Sanierung Südwestböschung

Zur Stabilisierung des Böschungssystems waren zwei Rüttelstützkörper geplant. Die Länge des realisierten Stützkörpers beträgt auf dem Niveau +103 m NHN ca. 700 m und sollte auf dem Niveau +95 m NHN ca. 450 m betragen.

Die Setzungsfließrutschung wurde durch die Rüttellanze ausgelöst.



Rüttelstopfverdichtung Tagebau Nachterstedt



48''



■ Materialeigenschaften

- **Kornform:** Rund, glatt, gleichförmig
- **Korngrößenverteilung:** Mit schmaler Bandbreite

■ Zustandsgrößen:

- **Lagerungsverhältnisse, Lagerungsdichte:** Lockere Lagerung

- Porosität $n = \frac{V_P}{V_{\text{gesamt}}} > 38\%$ bzw. bezogene Lagerungsdichte $ID = \left(\frac{e_{\text{max}} - e}{e_{\text{max}} - e_{\text{min}}} \right) < 0,6$
mit Porenzahl $e = \frac{V_P}{V_{\text{Feststoff}}}$

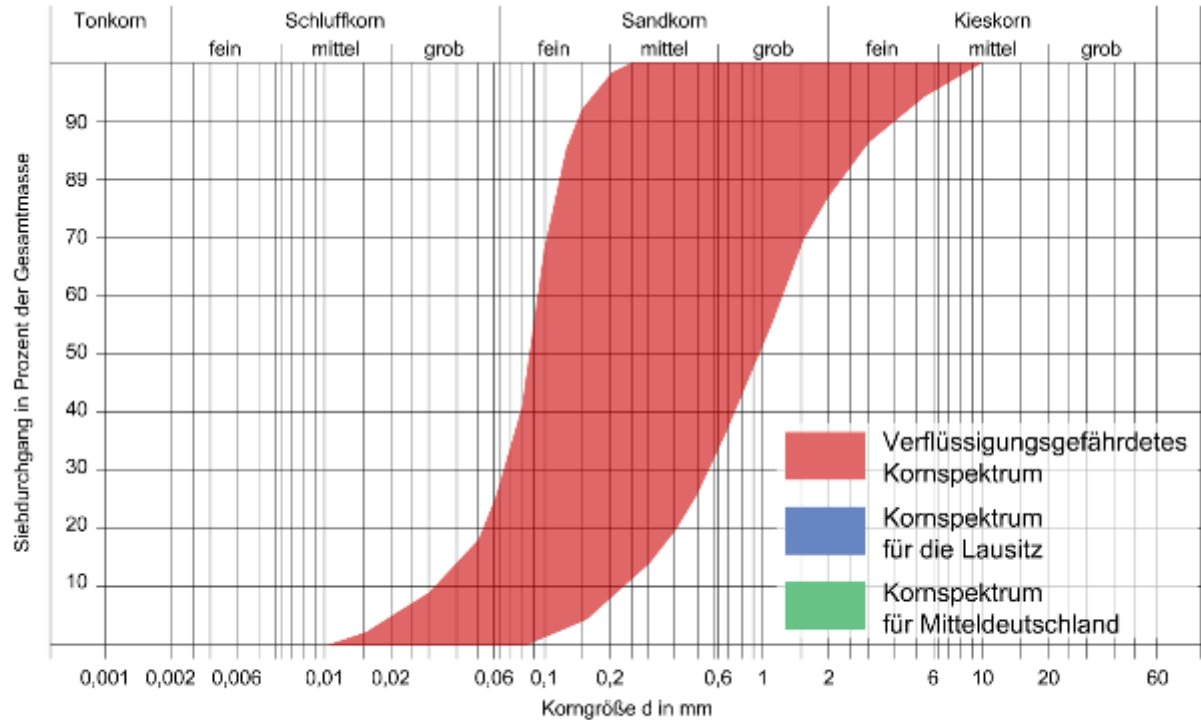
e_{max} = lockerste Lagerung, e_{min} = dichteste Lagerung, e = natürliche Lagerung

- **Wassersättigung im Lockergesteinsmassiv:** Hoch
- **Porenwasserdrücke:** Kritisch

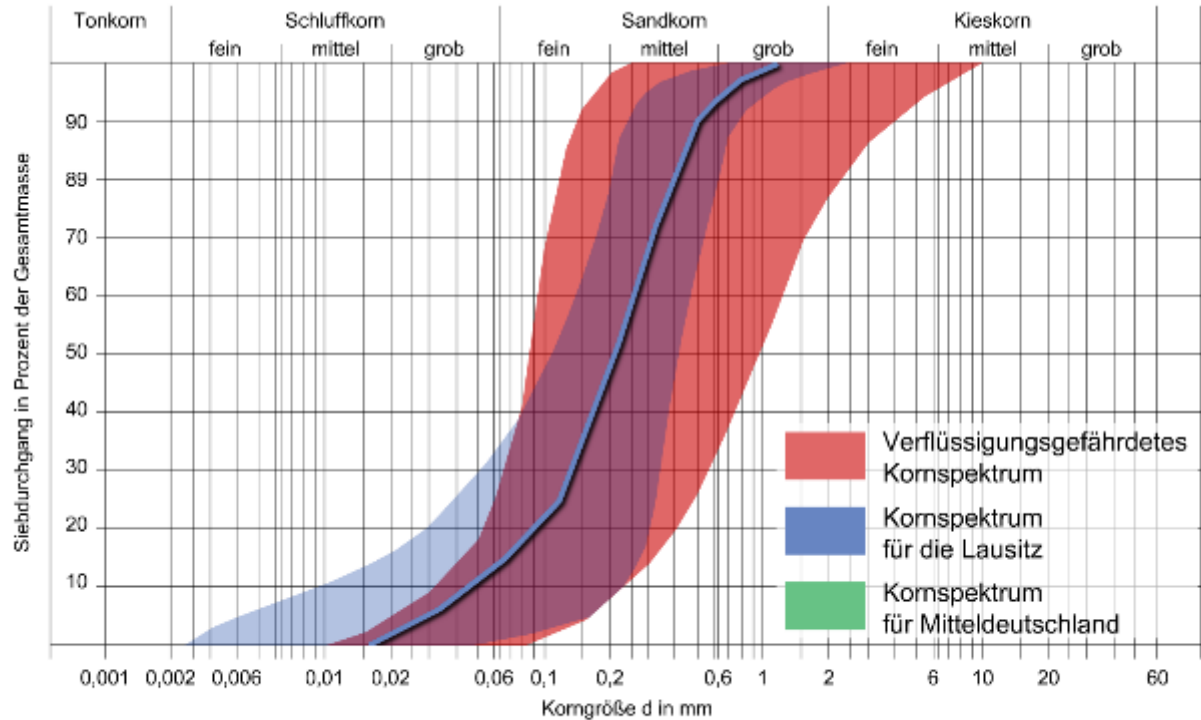
Beurteilung der Setzungsfließgefahr:

Ermittlung der -vorherrschenden- Kornform und Korngrößenverteilungen sowie Durchführung von Triaxialversuchen an ungestörten Proben, z. B. Gefrierproben, Drucksondierungen und Porenwasserdruckmessungen

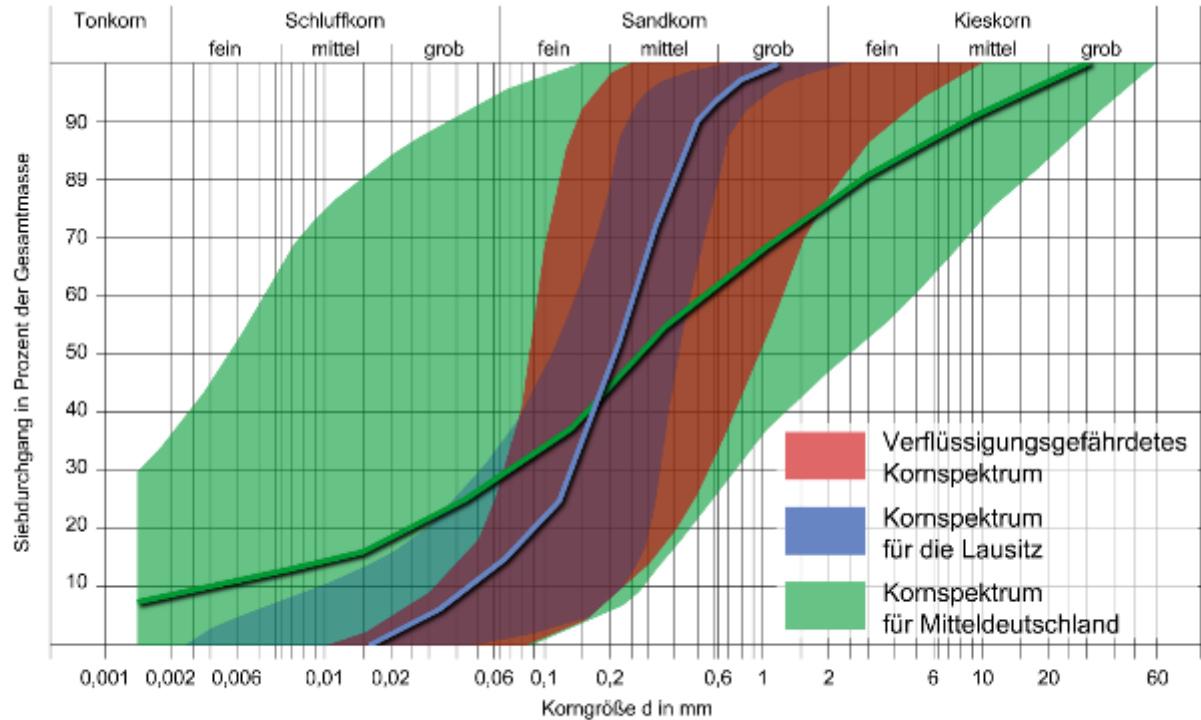
Korngrößenverteilung nach DIN 18123



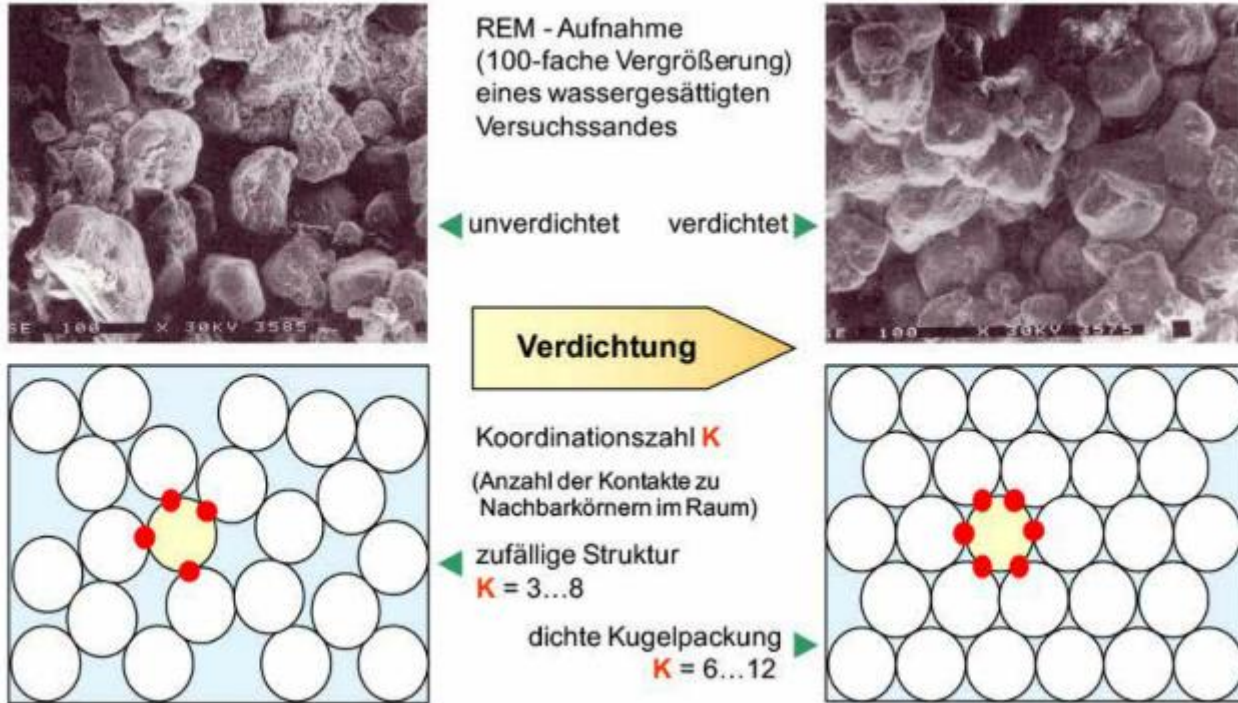
Korngrößenverteilung nach DIN 18123



Korngrößenverteilung nach DIN 18123



Veränderung des Korngerüstes von Lockergesteinen durch Verdichtung



im Zuge von Veränderungen in Zustandsgrößen durch

- Äußere Einwirkungen / Energieeinträge
- Veränderungen bei den –inneren- Zustandsgrößen im Kippenmassiv (z.B. durch rasche Veränderungen im Grundwasserstand, in der Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit, durch lokalen Kollaps des Korngefüges im Kippenmassiv, Entstehung kritischer Porenwasserdrücke etc.)

Beseitigung Setzungsfließgefahr

- Erhöhung der Lagerungsdichte durch Verdichtung des Lockergesteins



**Verdichtung von über 1,0 Mrd. m³ Kippenböden,
Bau versteckter Dämme in Gesamtlänge von 400 km
zur langzeitsicheren Gestaltung von Kippenböschungen**

Verdichtungsverfahren für locker gelagerte Kippen

Sprengverdichtung - SPV

Rütteldruckverdichtung - RDV

Rüttelstopfverdichtung - RSV

Fallgewichts- und Impulsverdichtung - FGV, IVD

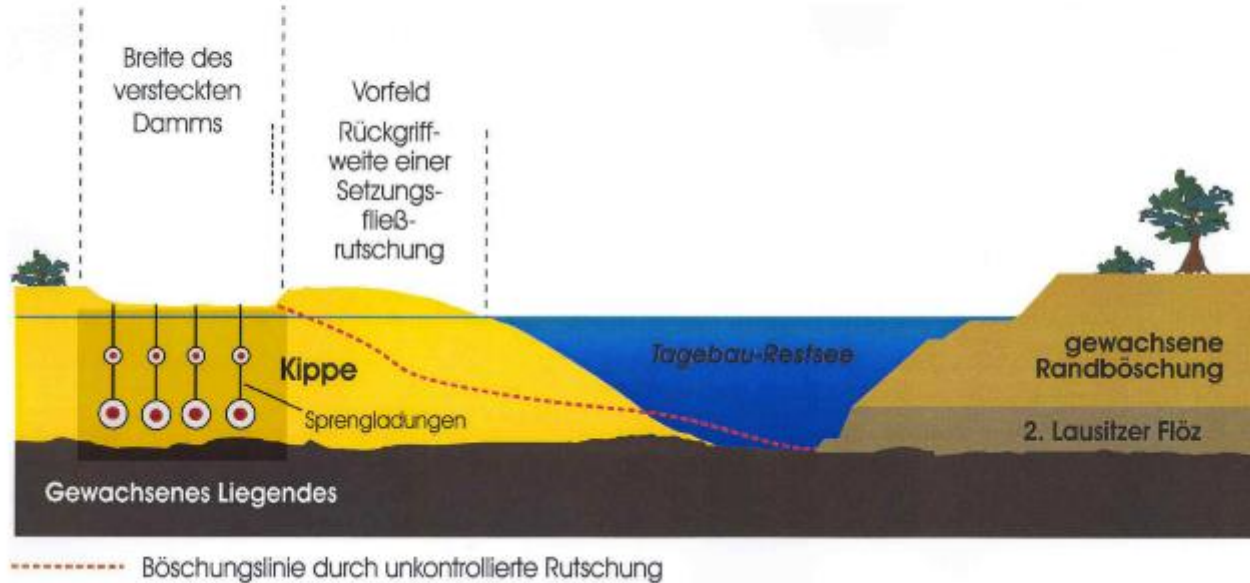
Verdichtung mit Vibrationswalze - VIW

Leichte Rüttelverdichtung - LRV

Verdichtungsverfahren für locker gelagerte Kippen

	Anwendung	Vor- und Nachteile
Spreng- verdichtung SPV	Stützkörper; wassergesättigte Sande, sandige Mischböden mit bindigen Einlagerungen	Großflächige Anwendung mit hoher Verdichtungs- leistung und -tiefe, geringe Kosten, hoher Erschüt- tungseintrag (Abstand zu Bauwerken mind. 500 m und zu labilen Böschungen), Einsatz nur tagsüber
Rütteldruck- verdichtung RDV	Stützkörper; erdfeuchte und wassergesättigte Sande, sandige Mischböden mit bindigen Einlagerungen	Verlässliches Verfahren, Verdichtungstiefe bis 60 m, erschütterungsarm, teuer weil Verdichtung nur sukzessive auf ca. 10 m ² (gilt auch für RSV und LRV)
Rüttelstopf- verdichtung RSV	Stützkörper und Baugrundstabilisierung auch bei geschichteten Auffüllungen mit feinkörnigen Lagen	hohe Verdichtungswirkung, erschütterungsarm, zeitaufwendiger und teurer als RDV, hoher Bedarf an Schottersplittgemisch
Fallgewichts- und Impulsverdichtung FGV	Baugrundstabilisierung , erdfeuchte Sande mit nicht wassergesättigtem setzungsfließgefährdeten Untergrund	Verdichtungstiefe ≤ 10 m , Mindestmächtigkeit erdfeuchter Schichten erforderlich, hoher Erschütterungseintrag, Einsatz nur tagsüber
Vibrations- walzen- verdichtung ViW	Verdichtung oberflächennaher Partien , erdfeuchte Sande und Kippenmischböden	Verdichtungstiefe $\leq 3 - 1$ m in Abhängigkeit vom Walzengewicht- und art (Glatt- und Stammfußwalzen, Walzen mit Polygonbandagen, Gewichtsverlagerung...)
Leichte Rütteldruck- verdichtung	Verdichtung von Flachwasserzonen , auch zur Herstellung von Trittsicherheit , erdfeuchte Sande und wassergesättigter Untergrund	Verdichtungstiefe ≤ 5 m , geringer Verdichtungsgrad, Einsatz von Amphibienfahrzeug teuer

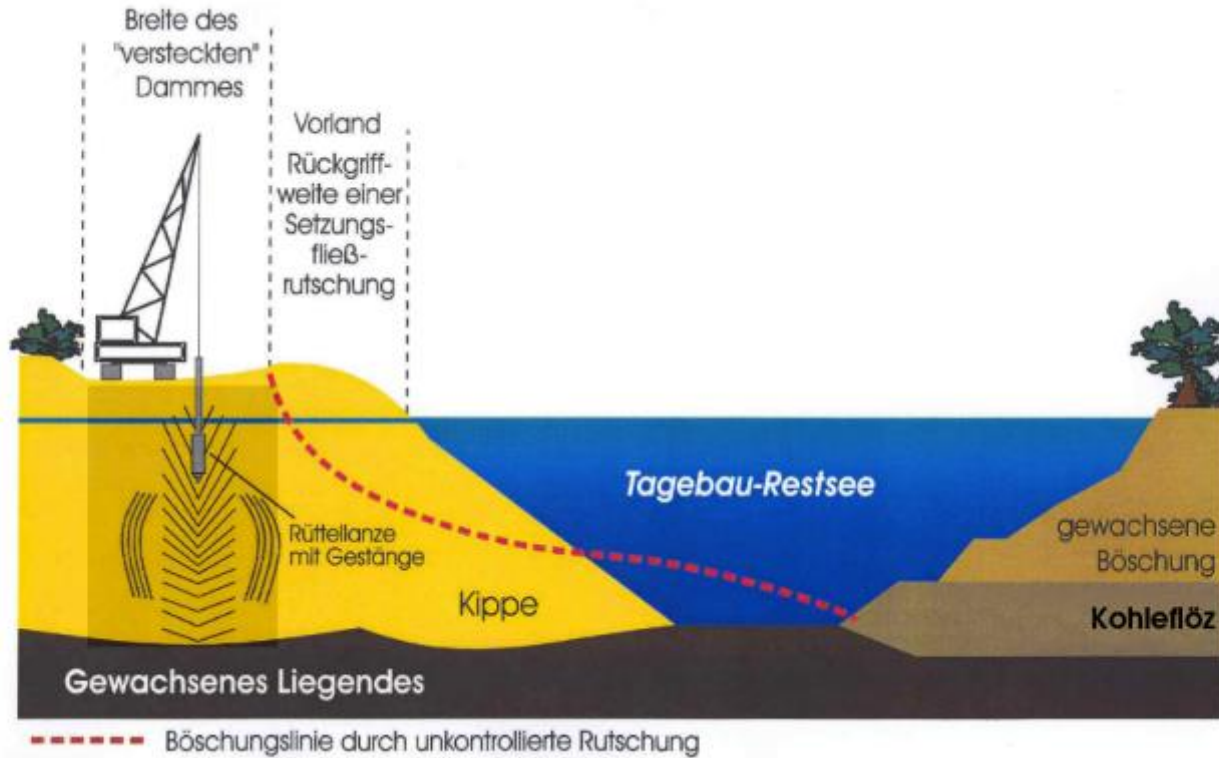
Prinzipschema Sprengverdichtung



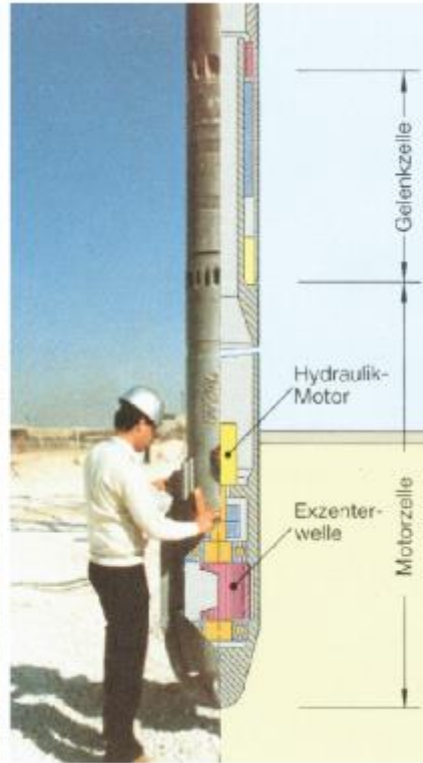


20“

Prinzipschema Rütteldruckverdichtung



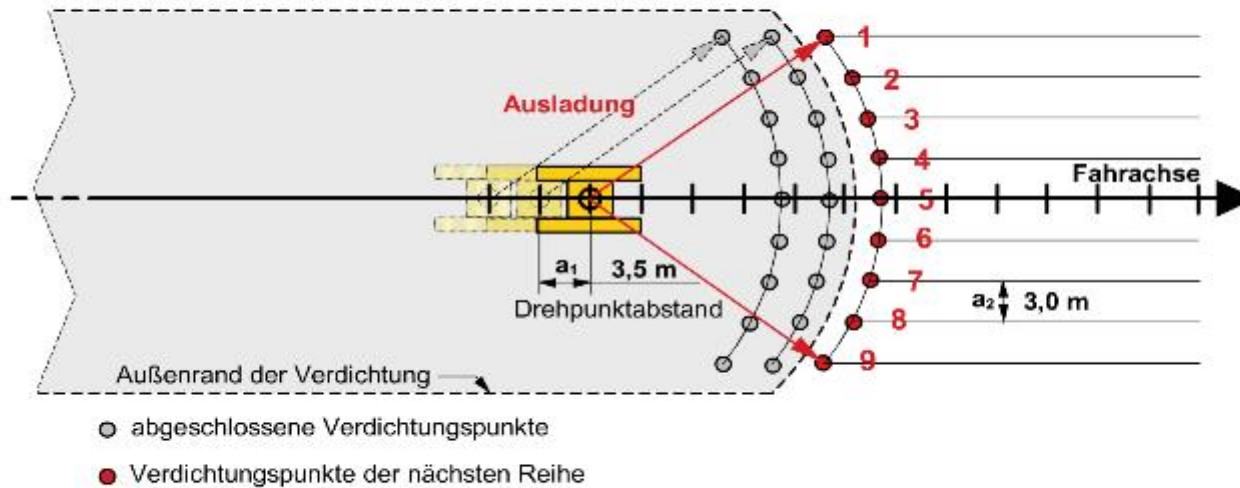
Kennzahlen einer Rüttellanze für tiefe Rütteldruckverdichtung



Elektromotor	kW	130 bis 175
Leistung		
Drehzahl	U/min.	1030 - 1745
Spannung	V	270 - 440
Nennstrom	A	219 - 373
Frequenz	Hz	35 - 60
Schlagkraft	kN	230 - 470
Amplitude	mm	23 - 48
Durchmesser	mm	359 - 384
Länge	mm	3569 - 4081
Gewicht	kg	2100 - 3000

Angaben Tiefenrüttler : Firma Vibroflotation AG

RDV im Regelbetrieb mit 9 Ansatzpunktlinien



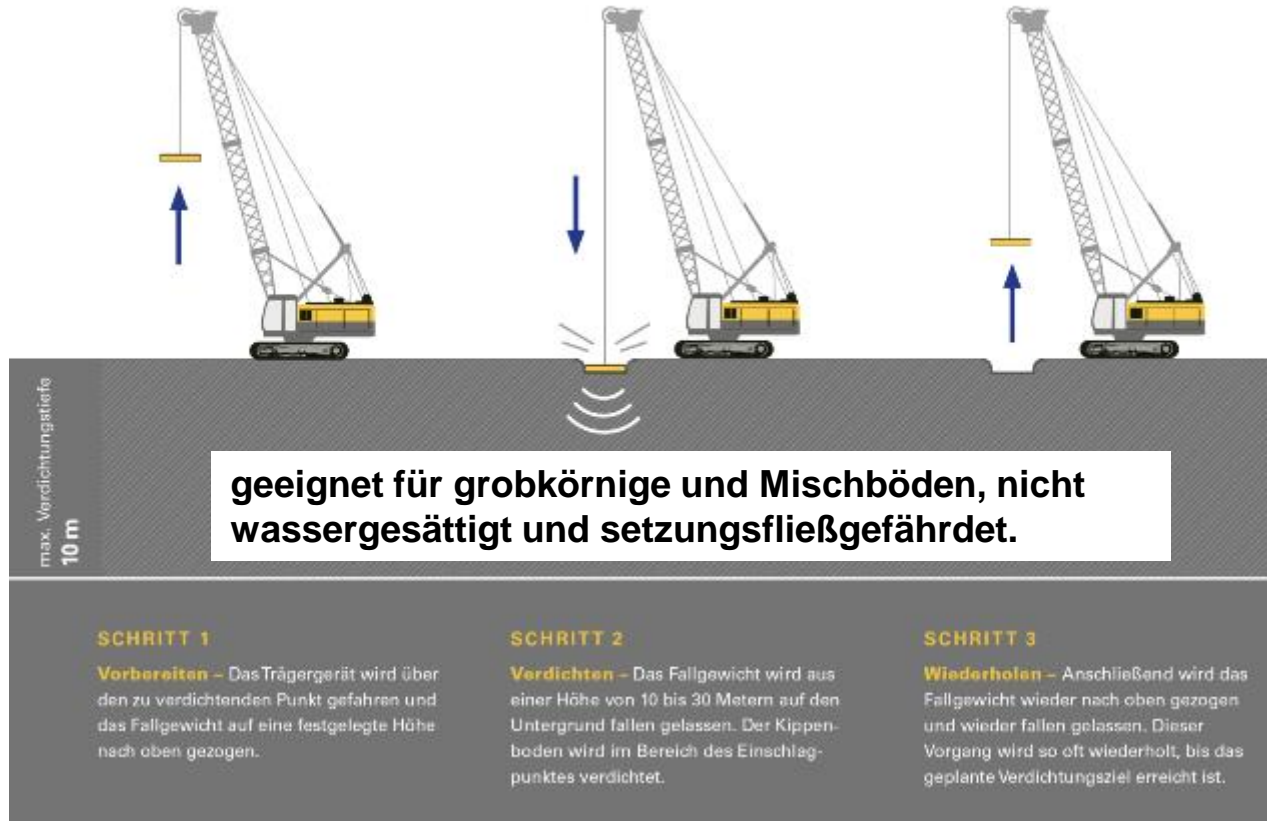
(Tragraupe oder Seilbagger, Lanze mit Schleusenrüttler, Hilfsgerät)

Anwendung	Baugrundstabilisierung in Form eines Stützkörpers bei geschichteten Auffüllungen mit feinkörnigen Lagen bzw. Einlagerungen (z. B. Kohletrübe, Asche)
Vorzüge	<ul style="list-style-type: none">■ „vor Kopf“- Technologie ist möglich,■ hohe Verdichtungswirkung und hoher Verdichtungsgrad auch im oberflächennahen Bereich (für Baugrundstabilisierung günstig),■ wirkt verlässlich auch in Mischbodenkippen,■ relativ erschütterungsarmes Verfahren■ Abstände ≥ 100 m zu Bauwerken sind nötig.
Einschränkungen	<ul style="list-style-type: none">■ RDV- Ansatzpunktraster von (2 ... 3) m,■ relativ hohe Verweilzeiten der Lanze im Boden,■ Kippenoberfläche wird durchgängig verritzt,■ relativ hoher Bedarf an Schottersplittgemisch.
Kippen-/Bodenarten	erdfeuchte und wassergesättigte Kippen mit feinkörnigen Deckschichten, oder nur Spülgutablagerungen (z. B. Kohletrübe, Asche)

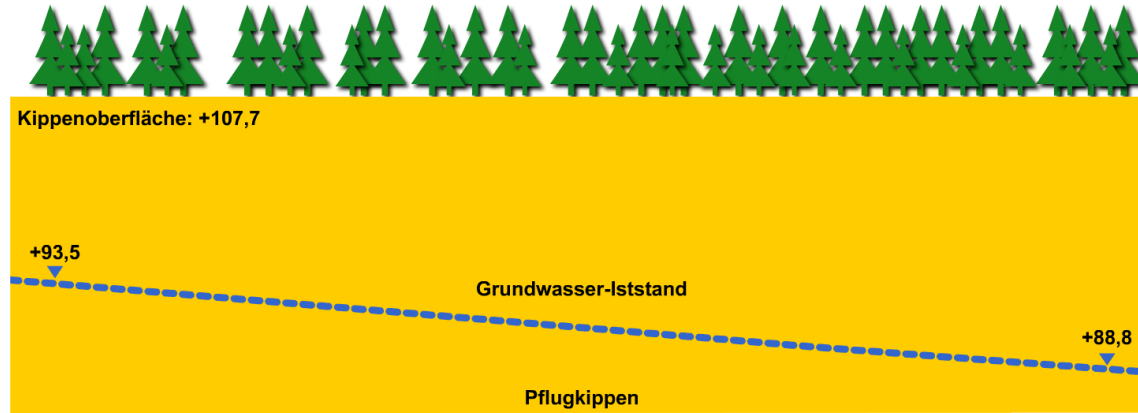
(Seilbagger, Fallmasse, Hilfsgerät)

Anwendung	Baugrundstabilisierung in Form eines Stützkörpers (auch in Kombination mit SPV, RDV, RSV), uferböschungsparell verlaufender Stützkörper (in Kombination mit SPV, RDV)
Vorzüge	<ul style="list-style-type: none">■ relativ hohe Verdichtungsleistung ist möglich,■ „vor Kopf“- Technologie ist möglich,■ erzielt hohen Verdichtungsgrad im oberflächennahen Bereich (für Baugrundstabilisierung günstig),■ wirkt verlässlich auch in Mischbodenkippen.
Einschränkungen	<ul style="list-style-type: none">■ Verdichtungstiefe auf ≈ 10 m begrenzt,■ eine bestimmte Mächtigkeit der erdfeuchten Kippe ist dringend notwendig,■ markanter Erschütterungseintrag<ul style="list-style-type: none">■ Abstände > 150 m zu Bauwerken sind nötig,■ Einsatz nur am Tag.
Kippen-/Bodenarten	erdfeuchte Sande mit z. T. wassergesättigtem Untergrund (Auffüllung), SE bis SU nach DIN 18 196, Mischböden mit Sandmatrix und klumpigen Einlagerungen bindiger Böden

Fallgewichtsverdichtung - FGV



Fallgewichtsverdichtung Auslauf Sedlitzer See zur Rainitz



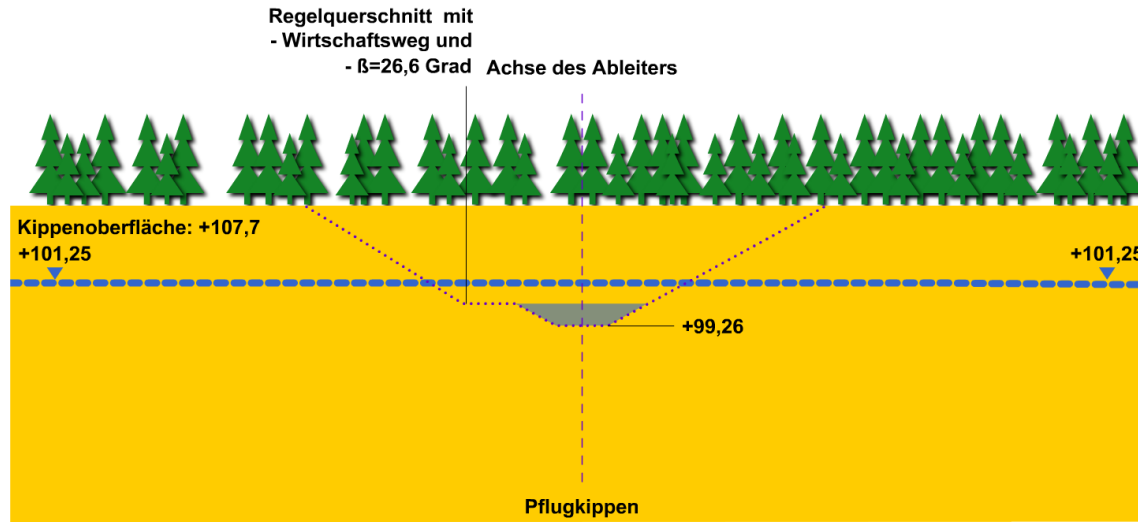
Höhenangaben in m NHN

Fallgewichtsverdichtung Auslauf Sedlitzer See zur Rainitz



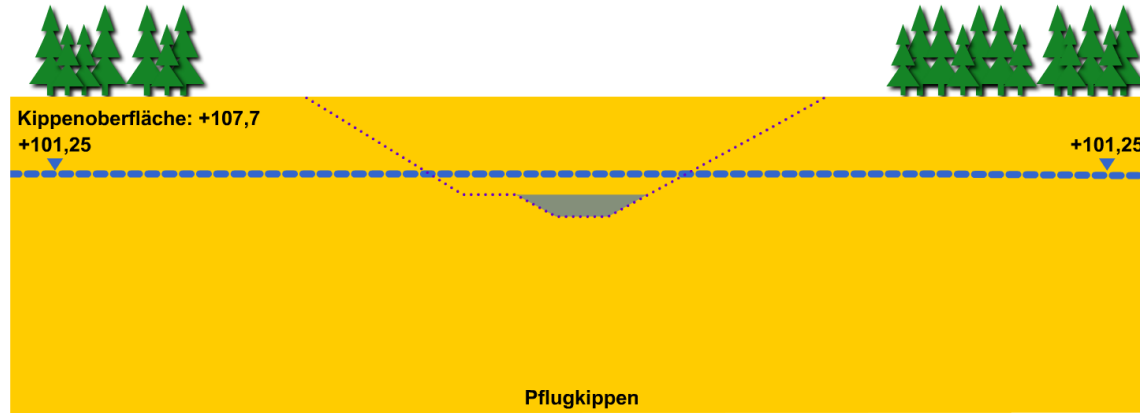
Höhenangaben in m NHN

Fallgewichtsverdichtung Auslauf Sedlitzer See zur Rainitz



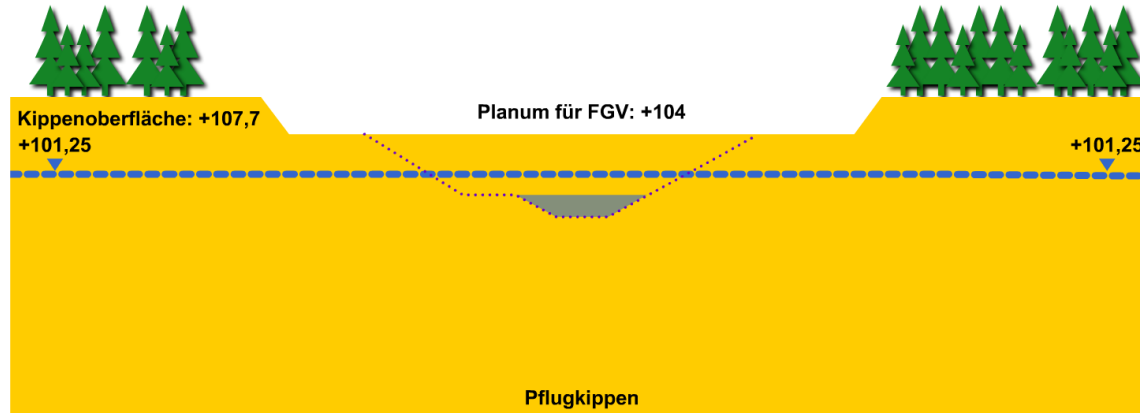
Höhenangaben in m NHN

Fallgewichtsverdichtung Auslauf Sedlitzer See zur Rainitz



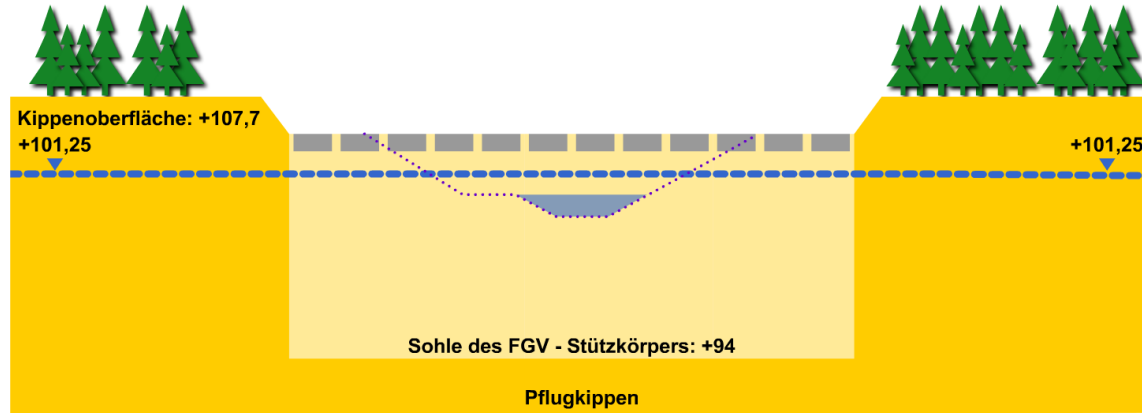
Höhenangaben in m NHN

Fallgewichtsverdichtung Auslauf Sedlitzer See zur Rainitz

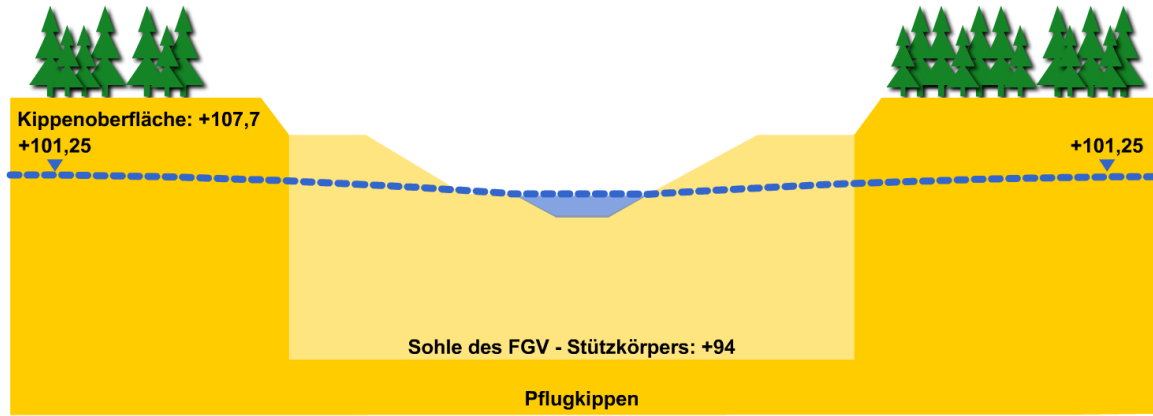


Höhenangaben in m NHN

Fallgewichtsverdichtung Auslauf Sedlitzer See zur Rainitz

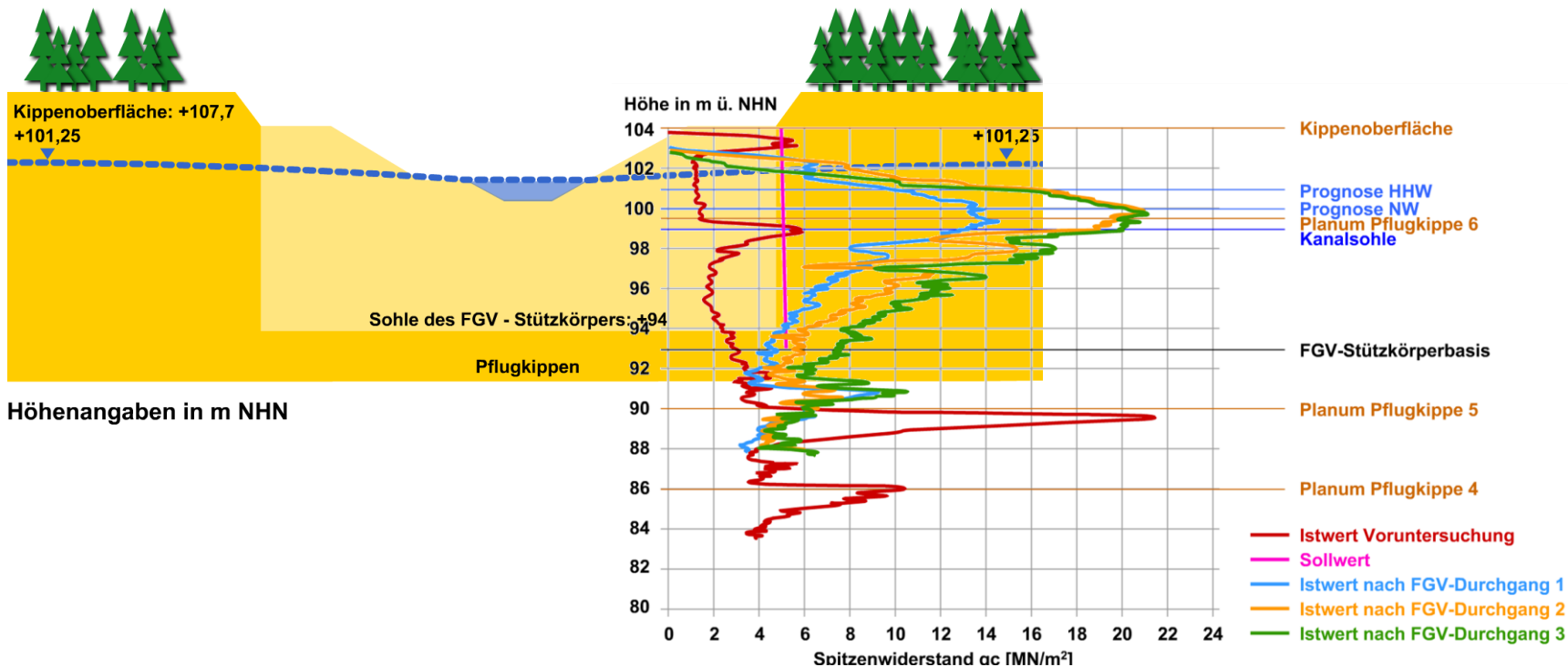


Höhenangaben in m NHN



Höhenangaben in m NHN

Fallgewichtsverdichtung Auslauf Sedlitzer See zur Rainitz



Fallgewichtsverdichtung für den Auslauf des Sedlitzer Sees zur Rainitz

Aufschlagpunktraster und Seilbaggerfahrachsen



Verdichtung mit Vibrationswalze - VIW

(Vibrationswalzenzug)

Anwendung	Verdichtung oberflächennaher Bodenpartien zur Gewährleistung der Tragfähigkeit der Oberfläche beim Begehen und Befahren <ul style="list-style-type: none">■ künftiger Uferbereich
Vorzüge	<ul style="list-style-type: none">■ hohe Verdichtungswirkung und hoher Verdichtungsgrad im oberflächennahen Bereich,■ relativ hohe Verdichtungsleistung ist möglich.
Einschränkungen	<ul style="list-style-type: none">■ Verdichtungstiefen begrenzt auf ≤ 1 m,■ in Kombination mit konstruktivem Erdbau kann Verdichtungstiefe erweitert werden.
Kippen-/Bodenarten	erdfeuchte Sande und Kippenmischböden

Oberflächenverdichtung mittels Walzen



max. Verdichtungstiefe
1-2 m

max. Verdichtungstiefe
1-3 m

max. Verdichtungstiefe
3-5 m

GLATTWALZE

Die klassische Glattwalzenverdichtung wird in der Braunkohlesanierung vorrangig für die Untergrundherstellung für wasserbauliche Anlagen und beim Bau von Verkehrsanlagen angewendet. Die Glattwalze schafft flächenhaft gleichmäßige Verdichtungsleistungen, die Verdichtungstiefe ist allerdings begrenzt.

STAMPFFUSSWALZE

Die am Walzenkörper angebrachten Stampffüße bewirken eine hohe punktuelle Verdichtung. Die zwischen den Stampffüßen liegenden Bodenteile werden so unter eine hohe Horizontalspannung gesetzt, was eine flächenhafte Verdichtung bewirkt. In Kippan- und Mischböden erreichen diese Walzen eine hohe Wirtschaftlichkeit. Nach der Stampffußwalzenverdichtung erfolgt meist eine Nachbehandlung mit Glatt- oder Polygonwalzen.

POLYGONWALZE

Polygonwalzen haben sich für größere Verdichtungstiefen von drei bis fünf Metern etabliert. Sie werden in der Sanierung zur großflächigen Nachverdichtung von Tiefenverdichtungsflächen als auch zur Verdichtung von Auffüllungen oder nach der schonenden Sprengverdichtung eingesetzt. Wegen ihres hohen dynamischen Energieeintrages sind diese Walzen besonders geeignet auch sehr lockere Bereiche bis in einige Meter Tiefe zu verdichten.

klassische Baugrundverdichtung der Geländeoberfläche, in der Bergbausanierung zur Sicherung der Tragfähigkeit für besondere Nutzungen

Oberflächenverdichtung mit Polygonwalzen



max. Verdichtungstiefe
3-5 m

POLYGONWALZE

Polygonwalzen haben sich für größere Verdichtungstiefen von drei bis fünf Metern etabliert. Sie werden in der Sanierung zur großflächigen Nachverdichtung von Tiefenverdichtungsflächen als auch zur Verdichtung von Auffüllungen oder nach der schonenden Sprengverdichtung eingesetzt. Wegen ihres hohen dynamischen Energieeintrages sind diese Walzen besonders geeignet auch sehr lockere Bereiche bis in einige Meter Tiefe zu verdichten.



7“

Impulsverdichtung: bis 60 Schläge/min, Fuß-Ø: bis 2 m, Verdichtungstiefe: bis 7 m



(Amphibienraupenfahrzeug mit Rüttlergalerie und Flaschenrüttler an flexibler Aufhängung)

Anwendung	Stabilisierung von Auffüllungen mit hoch liegendem Seebodenareal zur Gewährleistung der Tragfähigkeit beim Begehen („Trittsicherheit“)
Vorzüge	<ul style="list-style-type: none">■ „vor Kopf“- Technologie ist möglich,■ Amphibienfahrzeug benötigt nur bedingt Planum.
Einschränkungen	<ul style="list-style-type: none">■ Verdichtungstiefen begrenzt auf ≤ 5 m,■ Verdichtungsgrad relativ gering (Boden weitgehend unter Auftrieb), aber Erfolg genügt den Anforderungen.
Kippen-/Bodenarten	erdfeuchte Sande geringer Mächtigkeit mit wasser-gesättigtem sandigen Untergrund (Auffüllung), SE bis SU nach DIN 18 196

Leichte Rüttelverdichtung



Leichte Rütteldruckverdichtung, Herstellung der Trittsicherheit auf Flachwasserzonen aus Amphibienfahrzeug

Leichte Rüttelverdichtung



Leichte Rütteldruckverdichtung, Herstellung der Trittsicherheit auf Flachwasserzonen aus Amphibienfahrzeug

Leichte Rüttelverdichtung

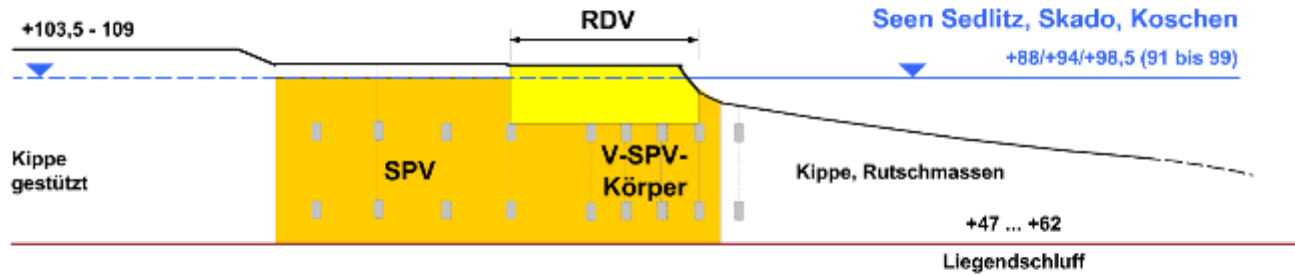


Leichte Rütteldruckverdichtung, Herstellung der Trittsicherheit auf Flachwasserzonen aus Amphibienfahrzeug

- **Sprengverdichtung im wassergesättigten Bereich (unterhalb der Grundwasseroberfläche)**
- **Rütteldruckverdichtung oberhalb der vorhandenen Grundwasseroberfläche im erdfeuchten Bereich bis nahe zur Geländeoberfläche**
- **Vibrationswalzenverdichtung zur Herstellung der Trittsicherheit in der Uferzone**
- **Abschlussgestaltung der Oberfläche, Standsicherheitsnachweis und Wiedernutzbarmachung des beanspruchten Gebietes**

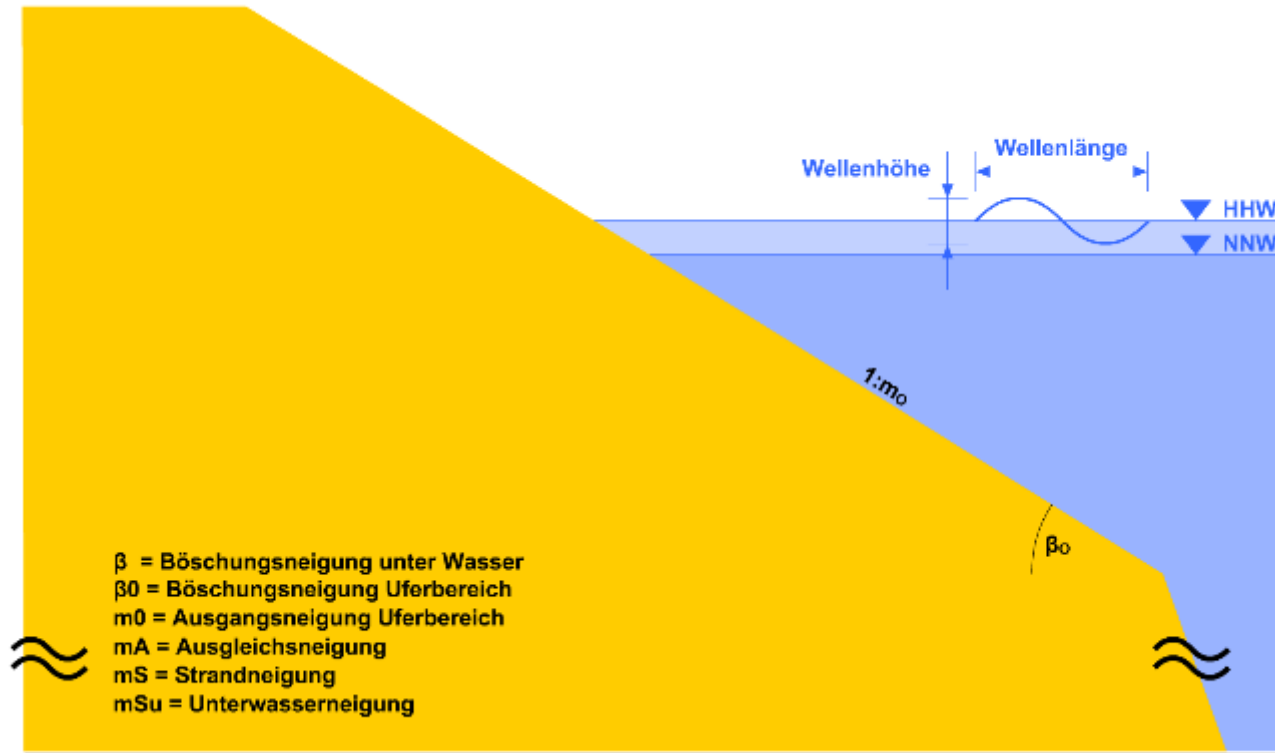
Böschungssicherung mit SPV- und RDV-Verfahren

- Minimierung der Verdichtungsaufwendungen -

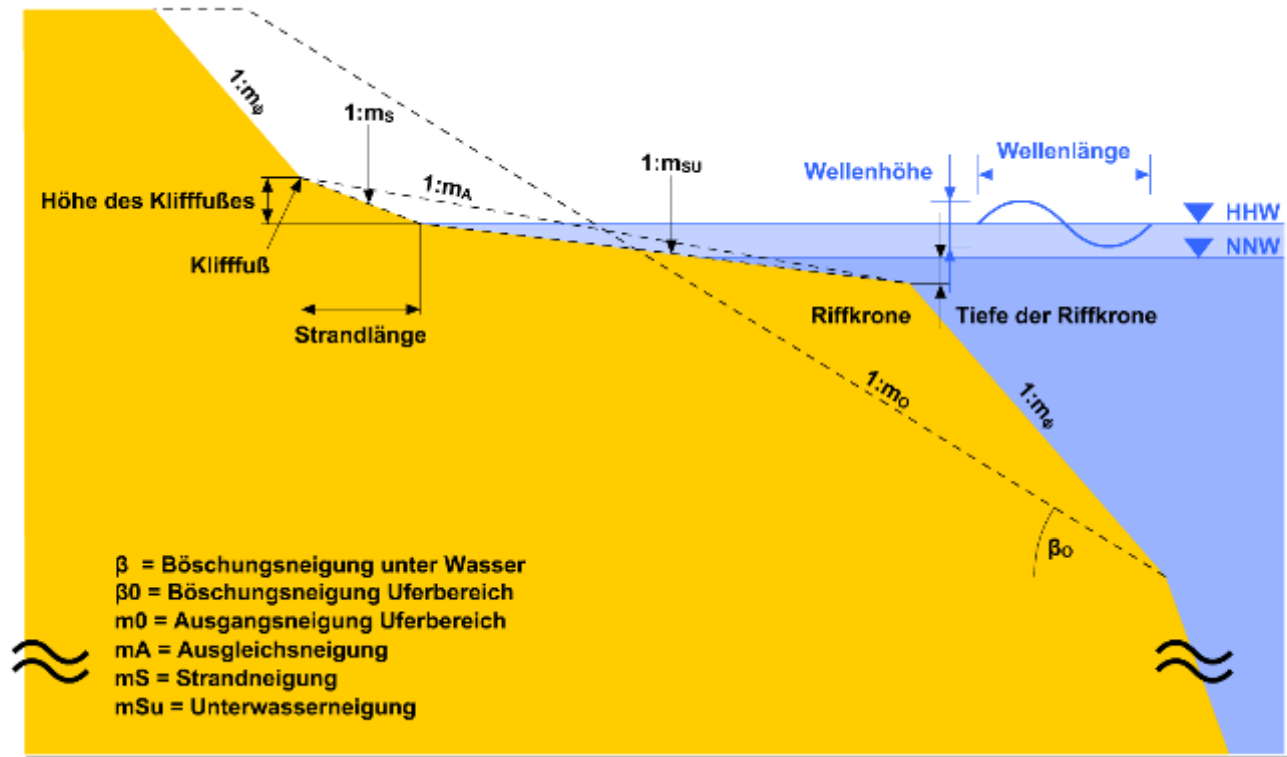


Geotechnisch-hydraulische Sicherung Uferbereiche gegen Wellenerosion

Gestaltung von Uferböschungen



Gestaltung von Uferböschungen



- Steinschüttungen
- Steinschüttungen mit Betonverklammerung
- Gabionen
- Geotextilien
- Spundwände
- Buhnen
- Bepflanzung mit Gehölzen, Schilf etc.

Steinschüttung auf Geotextil



Ufersicherung Geiseltal mit Steinschüttung auf Geotextil, 2009



- Die geotechnisch gesicherte Böschung wurde gegen Erosion mit Totholzfaschinen verbaut und mit Mulchsaat abgedeckt.
- Das frisch gemähte Mähgut wird mit dem Saatgut auf die Fläche aufgebracht. Die Samen in der Mulchsaat sind so vor Austrocknung, Verwehung und Verspülung geschützt.

Waldbegründung mit Ansaat
Mulchsaatfläche im Tagebau Mücheln, Situation nach einer Vegetationsperiode

Böschungssicherung mit Stroh-Faschinen





Gemisch aus Wasser, Kleber, Saatgut und Dünger



Innenkippen

Geotechnische Ereignisse auf Innenkippenflächen



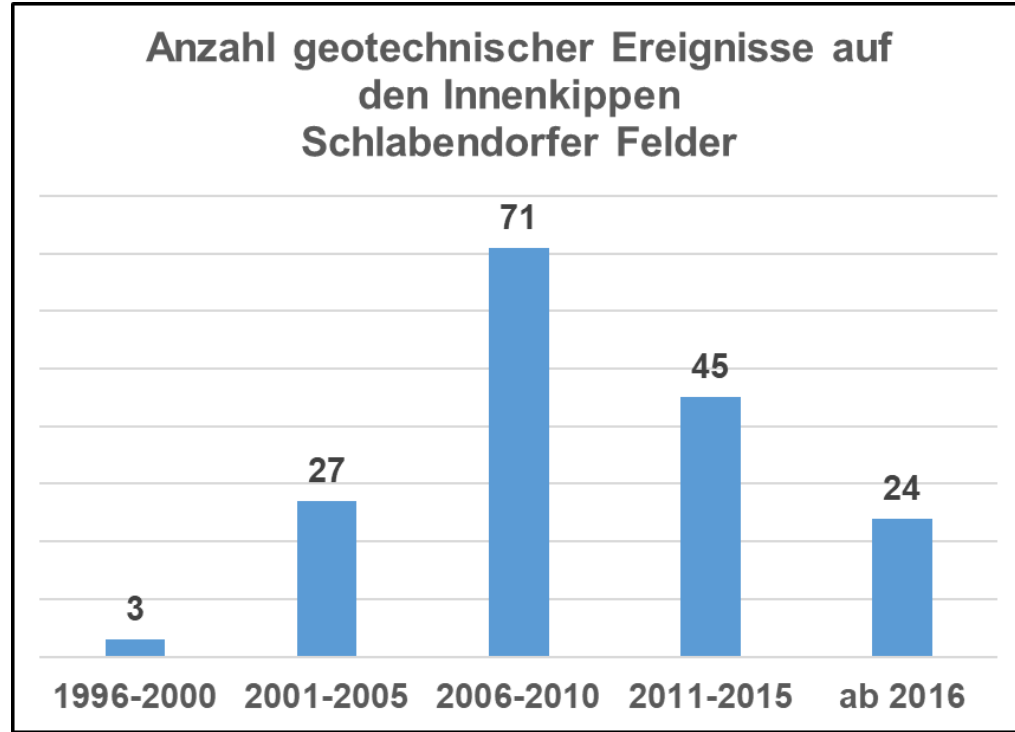
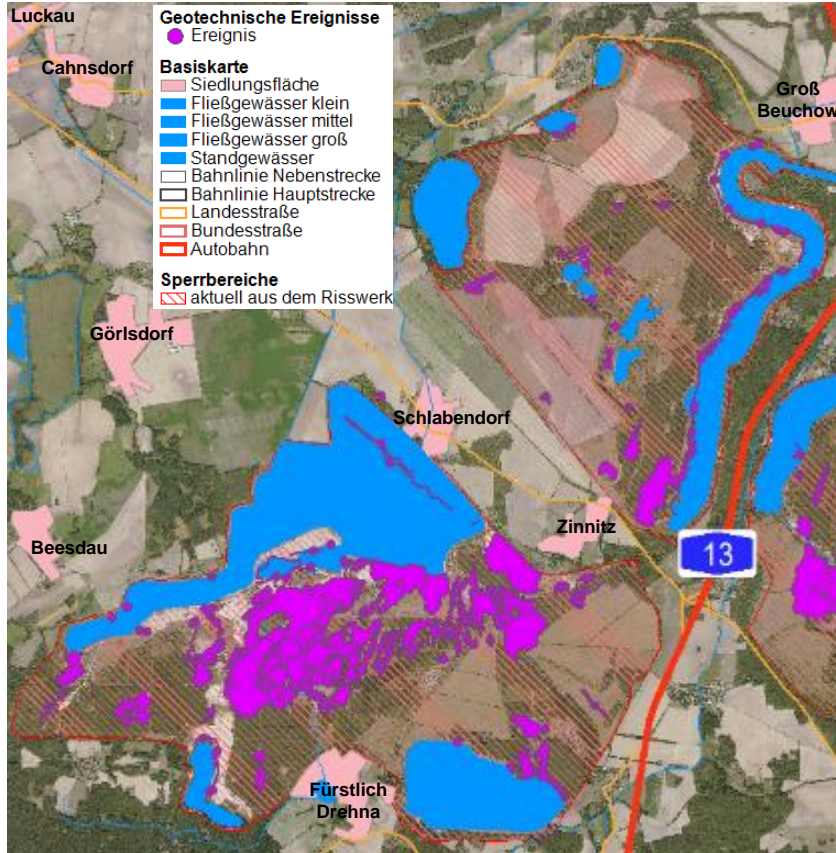
Geländeeinbruch Innenkippe Spreetal
12.10.2010, ca. 160 ha

Geotechnische Ereignisse auf Innenkippenflächen

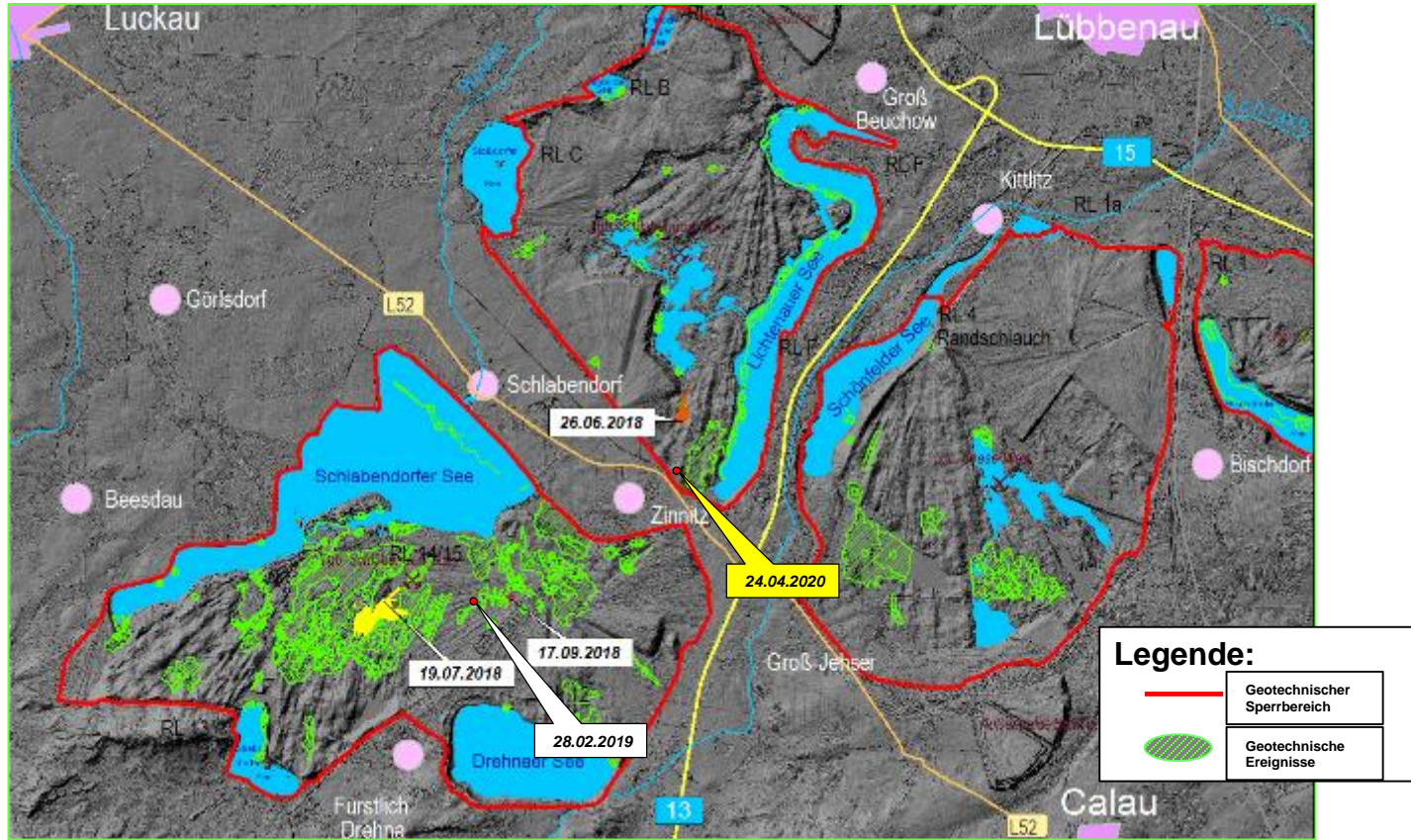
Geländeeinbruch Innenkippe Schlabendorf-Süd, ehemalige Kippenstraße Bergen – Mallenchen 19.12.2017, ca. 50 ha



Geotechnische Ereignisse Tagebaufelder Schlabendorf



Ereignis Innenkippe Schlabendorf-Nord 24.04.2020, gesperrter Hauptwirtschaftsweg





Geotechnisches Ereignis während der Rütteldruckverdichtungsarbeiten am 24.04.2020

- **Abmessungen ca. 50 x 200 m, Geländeabsenkung von max. 6 m**
- **Der Ereignisort liegt innerhalb des geotechnischen Sperrbereiches**



Ereignis Innenkippe Schlabendorf-Nord, gesperrter Hauptwirtschaftsweg



Innenkippe Schlabendorf-Süd

Ziel:

Stabilitätsveränderungen des Kippenmaterials seismisch verfolgen und durch Korrelation mit hydraulischen, bodenmechanischen, hydrologischen, markscheiderischen, meteorologischen Daten Ausweisung spezifischer Instabilitätsbereiche

- Verifizierung der Festlegung von Sperrbereichen sowie der Dauer zeitlich begrenzter Kippensperrungen am speziellen Beispiel der Innenkippe Schlabendorf-Süd

Ergebnisse

1. Es konnten keine systematisch auftretenden Vorläuferereignisse nachgewiesen werden, d.h. Verflüssigungsereignisse treten **spontan** ohne seismische Vorankündigung ein. Eine **Vorwarnung** für das Eintreten geotechnischer Ereignisse ist somit **nicht möglich**.
2. Erstmals sekundengenaue Registrierung von Verflüssigungsereignissen und damit Möglichkeit der exakten Bestimmung der meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen.

3. Erkenntnisse aus meteorologischen und geotechnischen Messungen in den Messfeldern im Zeitraum 11/2017 – 12/2019:

- hoher Luftdruck und tiefe Lufttemperatur (weniger signifikant) sind relevante meteorologische Parameter, bei denen Verflüssigungen häufiger auftreten
- Wind und Wellenschlag können keine Verflüssigungen auslösen
- unterhalb einer Frostdecke (bis 87 cm dick) wurde keine Porengasdruckerhöhung festgestellt
- Verflüssigungsereignisse treten häufig von Dezember bis März auf
- unter der Absenkung von Geländeeinbrüchen ist Boden nicht homogen, sondern meist sehr heterogen verflüssigt

4. Empfehlung von 2 Warnsystemen

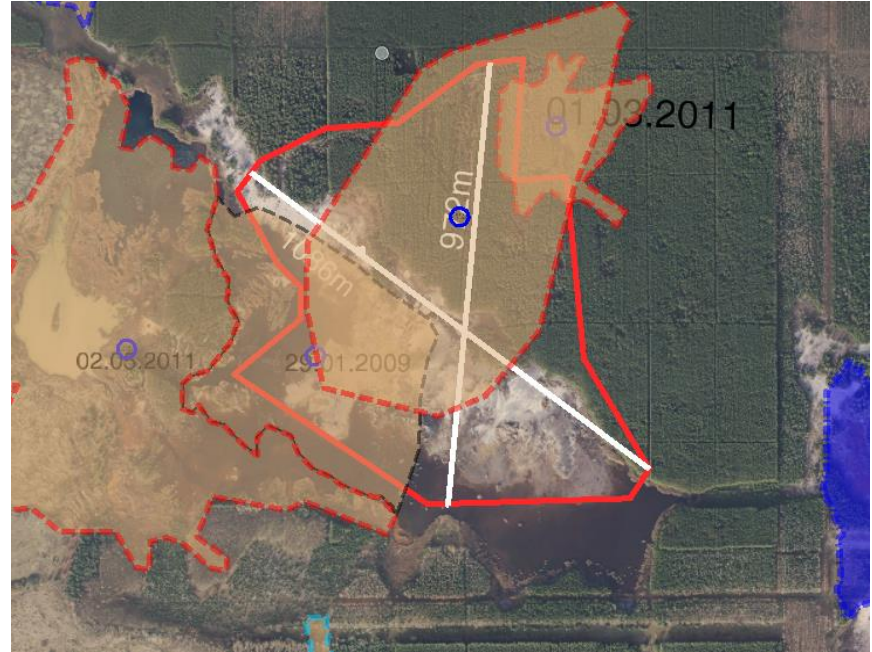
- Seismisches Warnsystem
 - bei Magnitude $> 1,1$ ist von sichtbaren Verflüssigungsereignissen an GOF auszugehen
- Meteorologisches Warnsystem

Das SHGM-Projekt hat wesentliche Erkenntnisse zu Bodenverflüssigungsereignissen erbracht

Vorläufige Rutschungsmarkierung 10.11.2021:

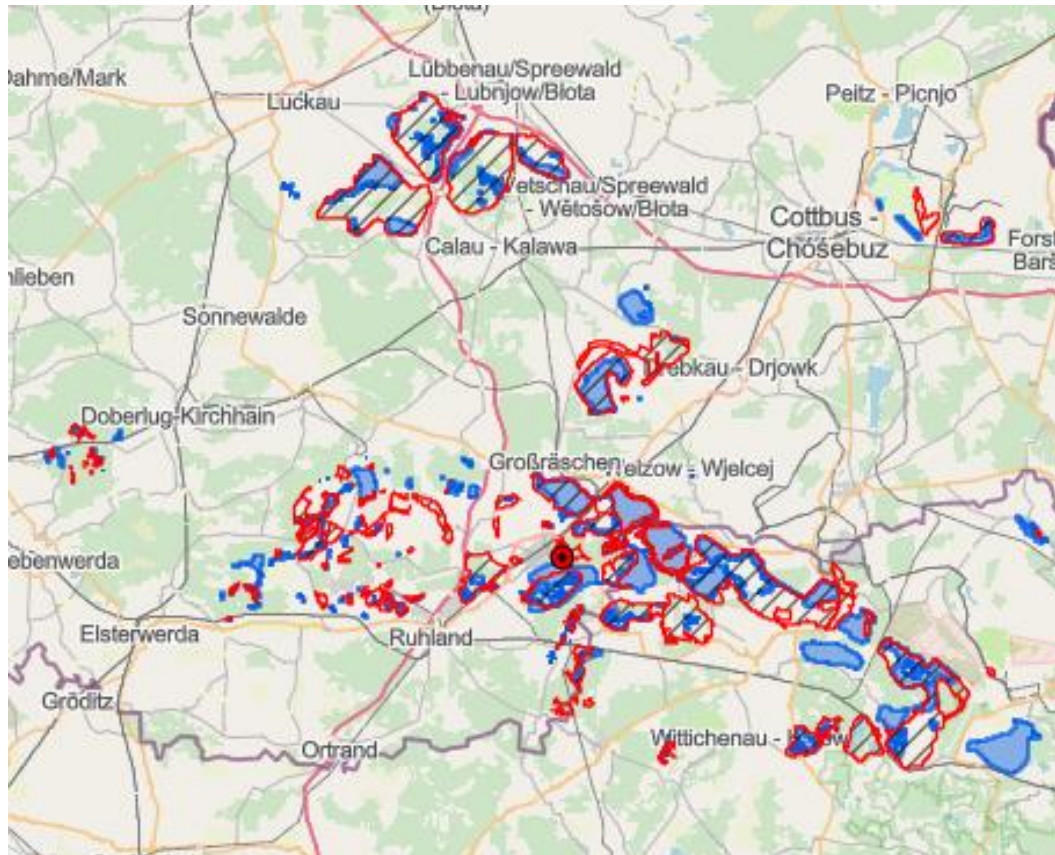


Darstellung Rutschungsgebiet mit den früheren Rutschungen aus geotechnischer Ereignis-Datenbank:



Erkenntnis: Die Verflüssigung von Kippensanden führt nicht zu einem hinreichend stabilen Korngefüge. Erneute Verflüssigungen sind nicht auszuschließen.

Aktuelle Kippensperrungen in der Lausitz



	Brandenburg	Ost-sachsen	Lausitz
gesperrt	19.462 ha	11.440 ha	30.902 ha
davon Land	13.764 ha	7.647 ha	21.411 ha
Wasser	5.698 ha	3.793 ha	9.491 ha
eingeschränkt nutzbar	12 %	14 %	12 %
davon Land	75 %	33 %	57 %
Wasser	25 %	67 %	43 %

Stand 05.04.2023

Vertikaldräns Trasse B 97 – Testfeld Technik

Veranlassung:

- veränderter Grundwasserflurabstand (Ist: > 3,7 m / End: > 2,9 m)

Ziel:

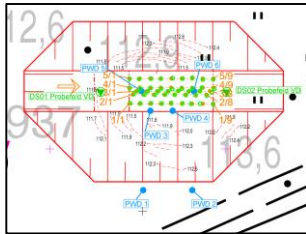
- Feststellung Einfluss der Gerätetechnik und des Einbringens der Vertikaldräns auf die Porenwasserüberdrücke im verflüssigungsgefährdeten Kippenboden an der B97

Voraussetzung:

- hinreichend ähnlicher und sicherer Standort am Spreetaler See

PWD-Messungen:

- PWD-Geber 2 m ... 3 m unter dem Grundwasserspiegel
- Abklingen auf ca. 10 % des Peakwertes nach ca. drei Minuten
- Aufpumpen des Porenwasserüberdrucks (PWÜD) bei schnellem Einbringen und Herausziehen
- kritischer Wert für Bodenverflüssigung im Umkreis von 1 m erreicht, in 5 m Entfernung nur 10% des kritischen Wertes
- Erhöhung des hydrostatischen Wasserstandes um ca. 15 cm



Risse / Setzung:

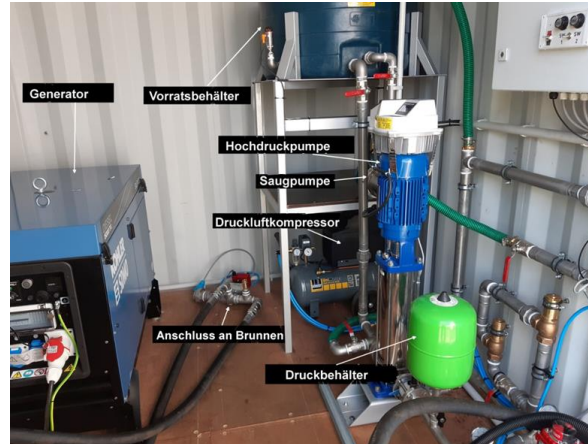
- kurz nach Einbringen der ersten Drains (Breite < 5 mm / kein Höhenversatz)
- Ableitung Setzungsbeträge aus PWD-Messungen nach Einbringen Vertikaldräns
- Setzung in der Trasse ca. 15 cm und in 2 m bis 4 m Entfernung ca. 5 cm
- Absenkungen und Rissbildungen in der Straße, Kippenboden dort lockerer als angenommen.



Gerät mit 35 t bei 4 m erdfechter Überdeckung standsicher!

Vertikaldrains als mittelfristige Sicherungsmaßnahme

- Messprogramm zum Nachweis der Dauerwirksamkeit der Geodrains
- Durchlässigkeitsmessungen am ummantelten Vertikaldrain (05/2020, 08/2021 und 10/2022)
- Einfluss möglicher Verockerung der umhüllenden Filtervliessschicht
- Porenwasserdruckmessungen nach Druckimpulsen (05/2020, 02/2023)



Ergebnisse und Schlussfolgerungen

- Systemdurchlässigkeit des Testdrains lässt nach, bei weiterem Absinken keine wirksame Begrenzung plötzlicher PWD-Anstiege mehr möglich (vermutliche Ursache: Verockerung)
- aber: laut SfG keine akute Gefahr und kein akuter Handlungsbedarf aufgrund
 - Vielzahl der eingebrachten Vertikaldrains
 - Verdichtung des anstehenden Bodens beim Einbringen der Drains
 - Überwachung GW-Verhältnisse und PWD-Entwicklung über installiertes Messsystem (B 97, S130) mit Sperrfunktion bei Grenzwertüberschreitung
 - unkritischer PWD-Verläufe im Ergebnis der Druckimpulse
- weiterführende Untersuchungen
 - Ziehen von Drains und Untersuchung eventueller Verockerungen
 - Errichtung zusätzlicher Messstellen zur Kontrolle der Wirkung der Gesamtanlage
 - Drucksondierungen zur Kontrolle der Verdichtung des anstehenden Bodens infolge Eindrücken der Drains
 - Fortführung der Tests

Fazit: ➡ Bestätigung als mittelfristige Sicherungsmaßnahme
➡ weitere Untersuchungen erforderlich



Ziel

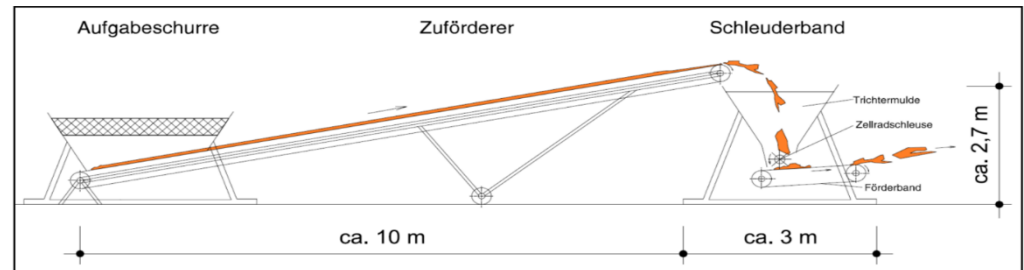
- Umsetzung der Erkenntnisse der Testphasen I und II durch Optimierung und Erweiterung der Technologie (technische Anpassungen u. Verbesserung der Abläufe)
- praxistaugliches Verbringen von Kippenmaterialien

Neuerungen

- technisch und technologisch optimiertes Schleuderband → neu herzustellen (z.B. Aufgabeschurre, Zuförderer, stärkerer Motor, Raupenfahrwerk, Zuförderer)

Zeitplan

- Projektskizze (GMB, 15.04.2021) liegt vor
- 2022 + 2023 – Planung und Genehmigung
- II. / III. Quartal 2024 - Herstellung der Geräte + Feldversuch
- Ende 2024 - Abschlussbericht Testphase III



Testfeld Perlite Innenkippentieflage Kippenrandgraben Spreetal

Veranlassung:

- Technikeinsatz und Auffüllung in der Kippentieflage mit Böschungen nicht zulässig wegen Grundwasserflurabstand 0,5 m und Gefahr für Geländeeinbrüche/Setzungsfließen

Lösungsansatz:

- Nutzung eines Leichtbaustoffes zur Erhöhung des Grundwasserflurabstand

Testprogramm:

- pneumatischer Perlit-Einbau
- Test Oberflächenstabilität Perlite mit Geogitter und Befahrbarkeit nach Bodenauftrag
- Untersuchung der Auftriebssicherheit

Testfeld:

Kippenrandgraben:

- ca. 1.000 lang, bis 6 m tief
- Böschungen 1:4 bis 1:14
- locker gelagerter sandiger Kippenboden, stark verflüssigungsempfindlich
- geotechnische Ereignisse mit Rückgriffweiten bis zum Windpark möglich

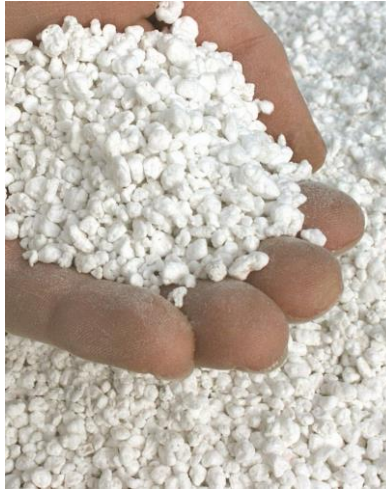
Perlit:

Superlite 06

- Ausgangsmaterial: vulkanischen Glas, Endprodukt nicht schadstoffbelastet
- 60...70 % Feinkies-Korngröße, 4...7 % Feinkorn-Korngröße
Schüttdichte: 90 kg/m³, E = 0,5 MN/m², $\varphi^{\circ} = 33,4^{\circ}$, $c^{\circ} = 20,7$ kN/m² (Scherversuch)



Testfeld Perlite Innenkippentieflage Kippenrandgraben Spreetal



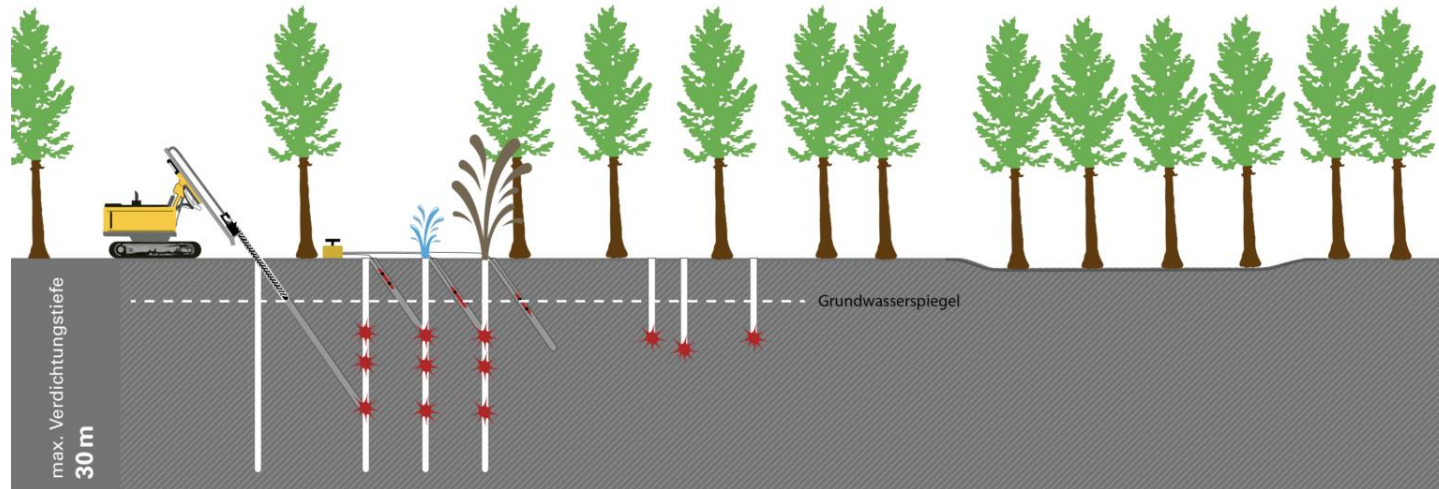
Ergebnis:

- durch die geringe Dichte trägt die Perlite-Verfüllung nur in geringen Maßen zusätzliche Spannungen in den Boden ein
→ Verhinderung von Bodenverflüssigung

Fazit:

- praktikable, aber teure Sondertechnologie zur Sicherung von grundwassernahen, setzungsfließgefährdeten Kippentieflagen (117 €/m³ bzw. 10.600 € pro Silofahrzeug a 91 m³)

Schonende Sprengverdichtung



SCHRITT 1

Vorbereiten – Mit einem leichten Bohrgerät werden Sprenglöcher vertikal bzw. bis 30° geneigt in den Kippenboden gebohrt. In diese werden die Sprengladungen eingebracht. Bei sehr flurnahen Grundwasserständen wird mit der OnsSPV der Boden vorverdichtet, um ausreichende Tragfähigkeit für das Bohrgerät herzustellen.

SCHRITT 2

Sprengen – Die Sprengladungen werden gestaffelt unterirdisch zur Detonation gebracht, wodurch der Kippenboden im Umfeld der Sprengung verdichtet wird. Zur Erzielung besserer Verdichtungsergebnisse in der Fläche werden jeweils 3 bis 4 Bohrlöcher in einer Sprenggruppe angeordnet.

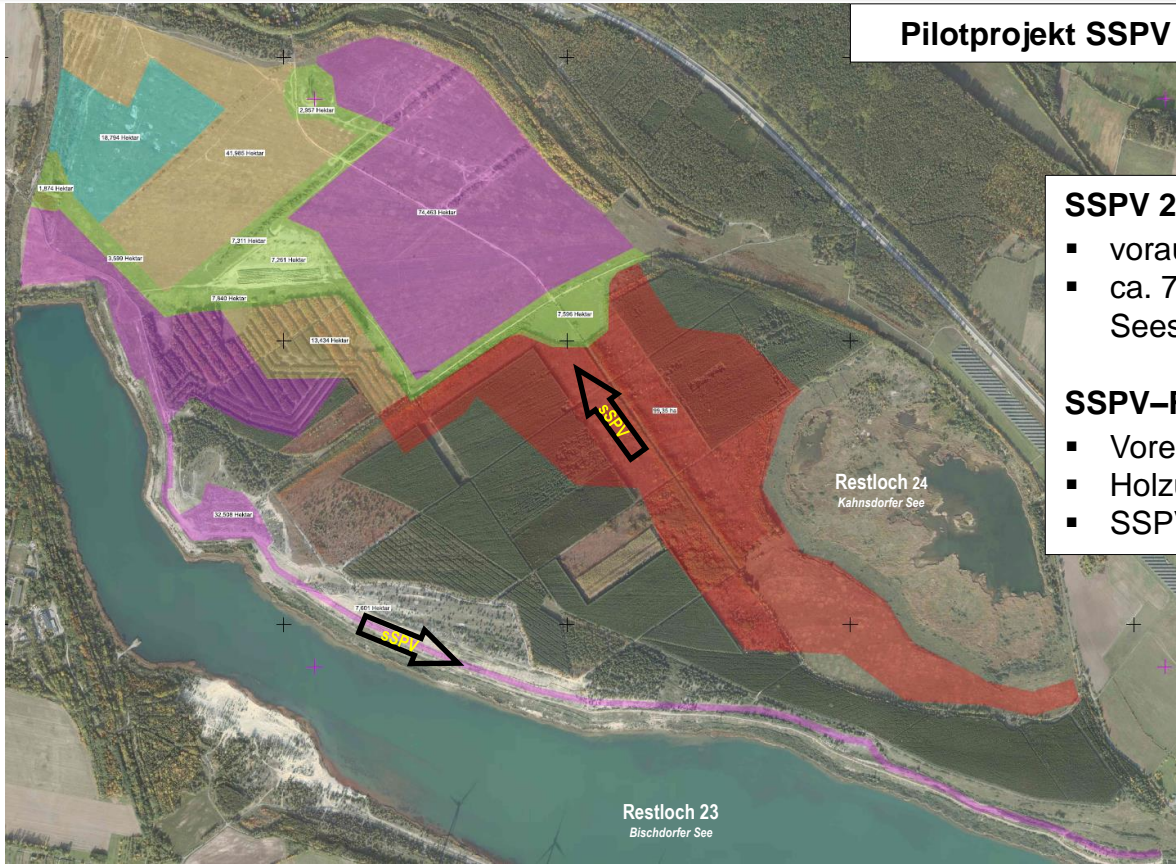
SCHRITT 3

Verdichten – Der Boden im Bereich der Sprengung senkt sich durch den Verdichtungseffekt in einem Radius von 10 bis 15 Metern ab. Diese Sprengmulden werden in der Regel mit Erdboden aufgefüllt.

Schonende Sprengverdichtung



Schonende Sprengverdichtung Innenkippe Seese-Ost

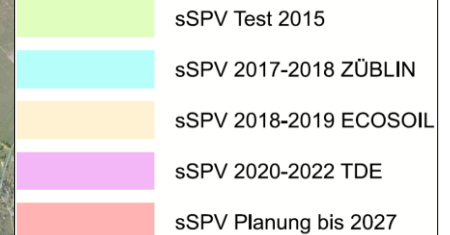


SSPV 2020 – 2022:

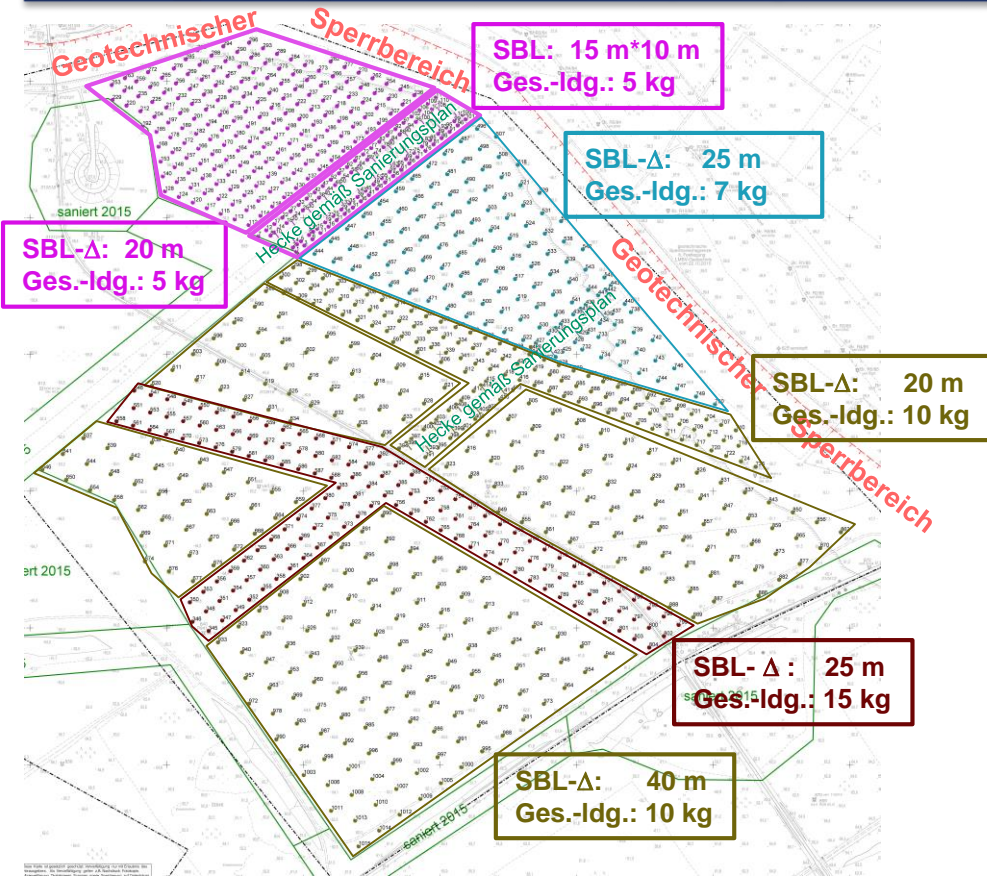
- voraussichtliches Ende: 09/2023
- ca. 70 % der gesamten IK-Fläche Seese-Ost gesichert

SSPV-Folgemaßnahme:

- Vorerkundung ist abgeschlossen
- Holzung ab 10/2023
- SSPV ab 02/2024



Schonende Sprengverdichtung Innenkippe Seese-Ost



Anforderungen an den Sprengstoff:

- patronierter gelatinöser Sprengstoff,
- Dichte zwischen 1,4 und 1,6 g/cm³
- Detonationsgeschwindigkeit im Einschluss 5.000 bis 6.500 m/s
- spezifische Energie 900 bis 1.200 kJ/kg
- Schwadenvolumen 800 bis 1.000 l/kg
- wasserbeständig

Besetzen der Sprengbohrlöcher und Abtun der Ladungen auf der Grundlage der vom SfG vorgegebenen Sprengreihenfolge und -technologie.

- bis zu 6 SBL pro Tag als Gruppensprengung
- bis zu 4 Teilladungen/SBL, von oben nach unten:
2 kg, 3 kg, 4 kg, 6 kg
- elektronische Zünder
- Zündzeitfolge: von unten nach oben mit Zündzeitverzögerung von $t = 200$ ms bis $t = 1000$ ms

- **Erkenntniszuwachs** zur Gefahrensituation auf Innenkippen (bisher Priorität 1) wissenschaftlich-technische Untersuchungen, Weiterentwicklung von Sanierungstechnologien und der Nachweisführung etc.
- Gefahrenabwehr in Bereichen hohen **Nutzungsdrucks** (bisher Priorität 2) (insb. Uferbereiche von Seen, Sicherung von Infrastruktur)
- Maßnahmen, durch die unter Betrachtung der **Verhältnismäßigkeit** große Flächen freigegeben werden können (bisher Priorität 3)
- Flächen, für die aus der technologischen Kette in absehbarer **Zeit** (15-20 Jahre) eine Nutzungsfreigabe ermöglicht werden kann
- Berücksichtigung des **Flächenzusammenhalts** (keine Zersplitterung, keine „Inseln“)
- geringere Priorisierung von Flächen, die unter **Verhaltensanforderungen** genutzt werden können

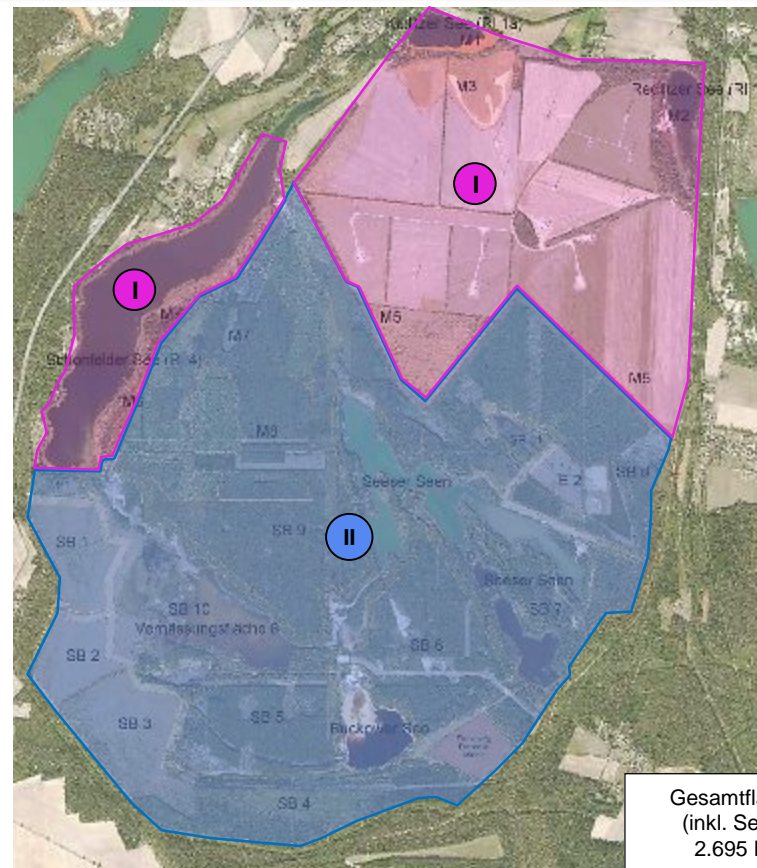
Nach Abschluss der Erörterung aller Innenkippen-Umringe kann nach Vorstellung der LMBV aus den in diesem Prozess herausgearbeiteten Kriterien mittels **Multikriterien-Analyse** in der StuBA-AG ein **Entscheidungsalgorithmus** entwickelt werden, um auf dessen Basis mit den Ländern die **Prioritäten** der Bearbeitung für alle Innenkippen der Lausitz abzustimmen.

Seese-West – Ergebnis der differenzierten Betrachtung

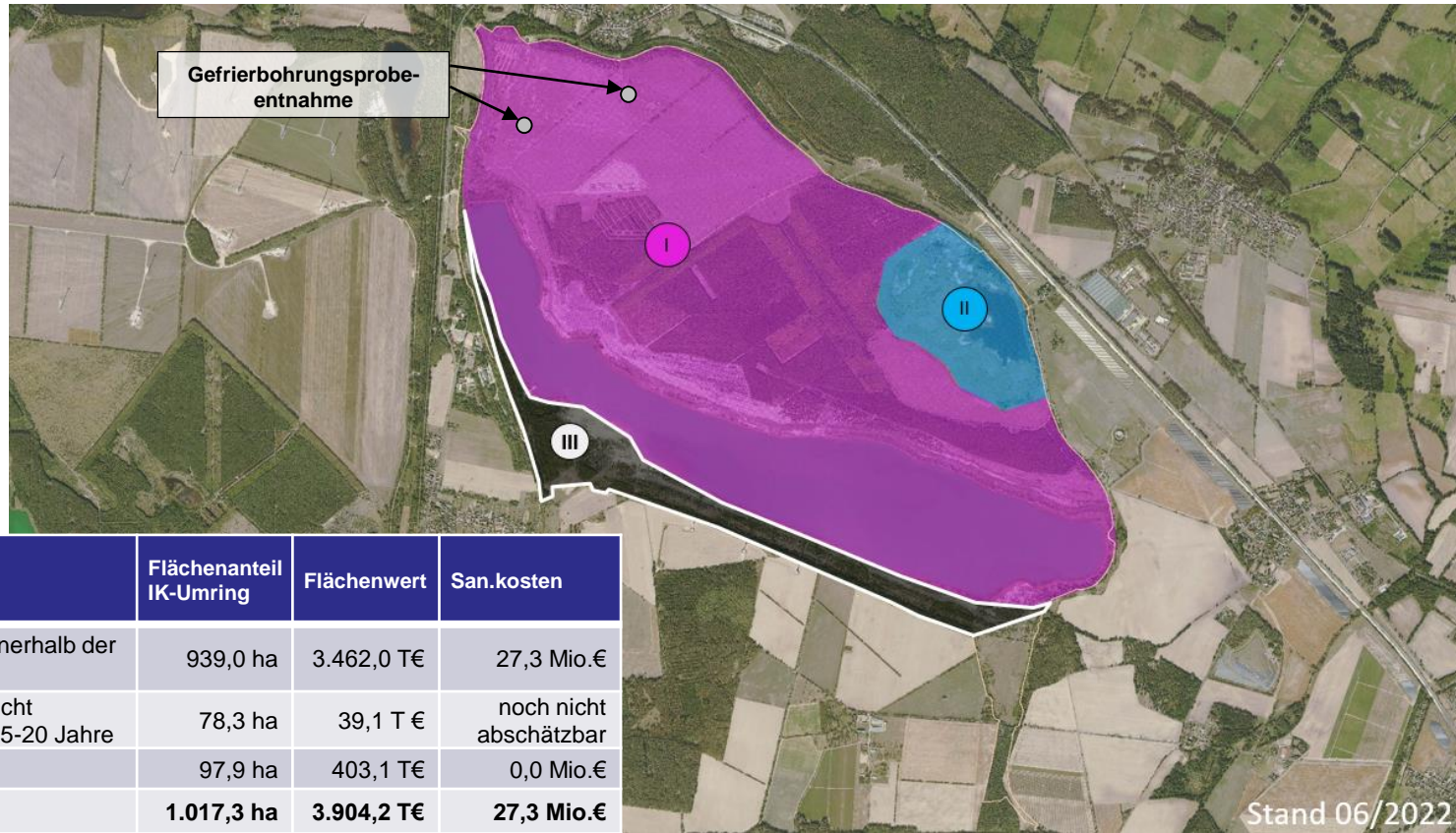
	Kriterium	zu sichernde Fläche ges.	Flächenwert	Sanierungs-kosten
I	Innenkippen-sicherung Kriterien 1-3	983 ha	6,9 Mio. €	47 Mio. € ¹⁾
II	Sonstige IK-Sicherung	1.712,1 ha ²⁾	10,8 Mio. €	478 Mio. €
	Summe	2.695,1 ha	17,7 Mio. €	525 Mio. €

¹⁾ Sanierungskosten für den Zeitraum der nächsten 15-20 Jahre

²⁾ nach der Innenkippen-sicherung Kriterien 1-3 können im Bereich Sonstige IK-Sicherung rd. 211 ha unter Verhaltensanforderungen genutzt werden.



Seese-Ost – Ergebnis der differenzierten Betrachtung



Kat.	Zuordnung der Sanierungsmaßnahmen	Flächenanteil IK-Umring	Flächenwert	San.kosten
I	Innenkippsicherung innerhalb der nächsten 15-20 Jahre	939,0 ha	3.462,0 T€	27,3 Mio.€
II	Sonstige IK-Sicherung nicht innerhalb der nächsten 15-20 Jahre	78,3 ha	39,1 T €	noch nicht abschätzbar
III		97,9 ha	403,1 T€	0,0 Mio.€
	Summe	1.017,3 ha	3.904,2 T€	27,3 Mio.€

Notwendigkeit:

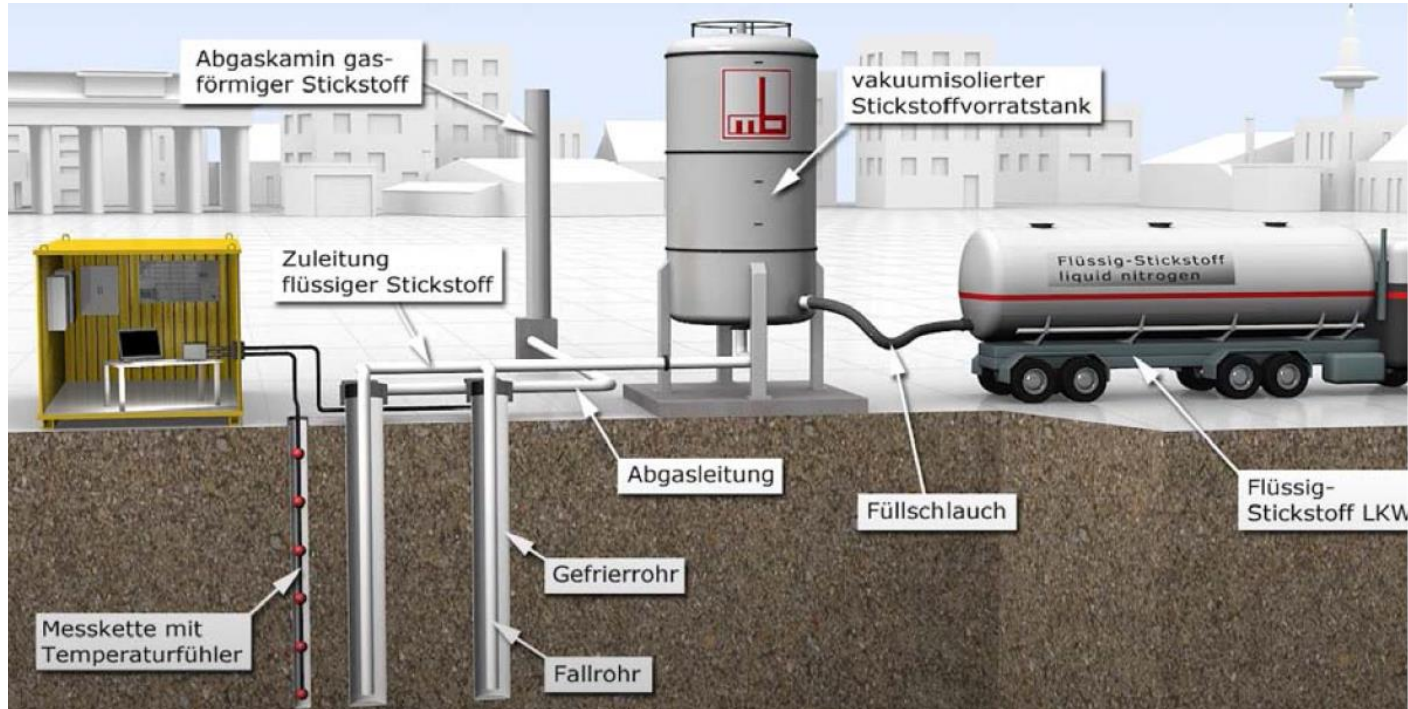
- für Beendigung Bergaufsicht auf Innenkippen ist u. a. Bescheinigung der geotechnischen Sicherheit mit Hilfe eines **quantitativen Verdichtungsnachweises** erforderlich
- quantitativer Nachweis zur Beseitigung der Geländeeinbruch- und Setzungsfließgefahr auf Basis von erdstatischen Berechnungen erfordert **material- und zustandsbeschreibende Parameter**, die möglichst exakt die verdichteten Kippensande charakterisieren
- Parameter werden mit Laboruntersuchungen an **quasi ungestörten Bodenproben** ermittelt
- Dichtezuwachs bei SSPV im Vergleich zur RDV oder RSV jedoch verhältnismäßig gering und damit **Gewinnung quasi ungestörter Proben** unterhalb des GWSP mit Linerbohrungen **problematisch**
- alternatives Verfahren ist **Bodenvereisung** bis in größere Teufen mit anschließender Gefrierprobenentnahme aus Kernbohrungen
- bereichsbezogene **Korrelation** der Parameter mit Ergebnissen der mark-scheiderischen, geophysikalischen und hydraulischen Messungen sowie Sondierungen



Quelle: Züblin

Gefrierbohrungsprobenahme

Wirkprinzip Stickstoffvereisung:



Quelle: Max Bögl

Geplante Projekte:

	<u>Seese-Ost</u>	<u>Seese-West</u>	<u>Spreetal</u>
Charakteristik:	flächenhafte IK-Sicherung	Hauptwirtschaftsweg, Sicherung Linienelement auf IK (veränderte SSPV-Technologie)	flächenhafte IK-Sicherung
Kippenboden:	Seeser Sande und Schmelzwassersande	vorrangig Seeser Sande	Talsande mit höherem bindigen Anteil
Beprobungsstandorte:	2 Standorte mit je 3 Entnahmebohrungen		
Beprobungsteufe:	30 m	35 m	40 m
Ausführungszeitraum:	Vergabe erfolgt, Realisierung III. Quartal 2023	aktuell in Vergabe, Realisierung vorauss. 2024	aktuell in Planung, Realisierung vorauss. 2024

Priorisierung der Innenkippen

	Anzahl Umringe	IK-Fläche in ha	Sanierungskosten in Mio. € (bis Ende der Sanierung)	davon freizuz. Flächen des IK-Umrings in ha (nächste 15-20 Jahre)	unter Verhaltensanforderung nutzbar in ha	Summe freizuz. IK-Flächen + Flächen unter Verhaltensanforderung nutzbar in ha	entspr. anteilig	dafür erford. Sanierungskosten in Mio. € (nächste 15-20 Jahre)	entspr. anteilig
Gesamtsumme	19	44.436	3.038	29.000	5.015	34.015	77% ¹⁾	527	17%

Gesamtbilanz Stand 08/2022

FAZIT: Mit 17% der erforderlichen Sanierungskosten sind 77 % der Fläche in den nächsten 15-20 Jahren nutzbar!