

Untertagevortrieb

Vortriebslänge

Vortriebsart	Vortriebsrichtung	Mengen Vortriebsstrecke		Veränderung
		Submission	Ausführung	
Rohrschirmvortrieb (MUF)	steigend	80 m	60 m	-20m
TBM Trocken	steigend/fallend	1'820 m	1'780 m	-40m
TBM Nass	fallend	713 m	773 m	+60m
Summe		2'613 m	2'613 m	

Kennwerte

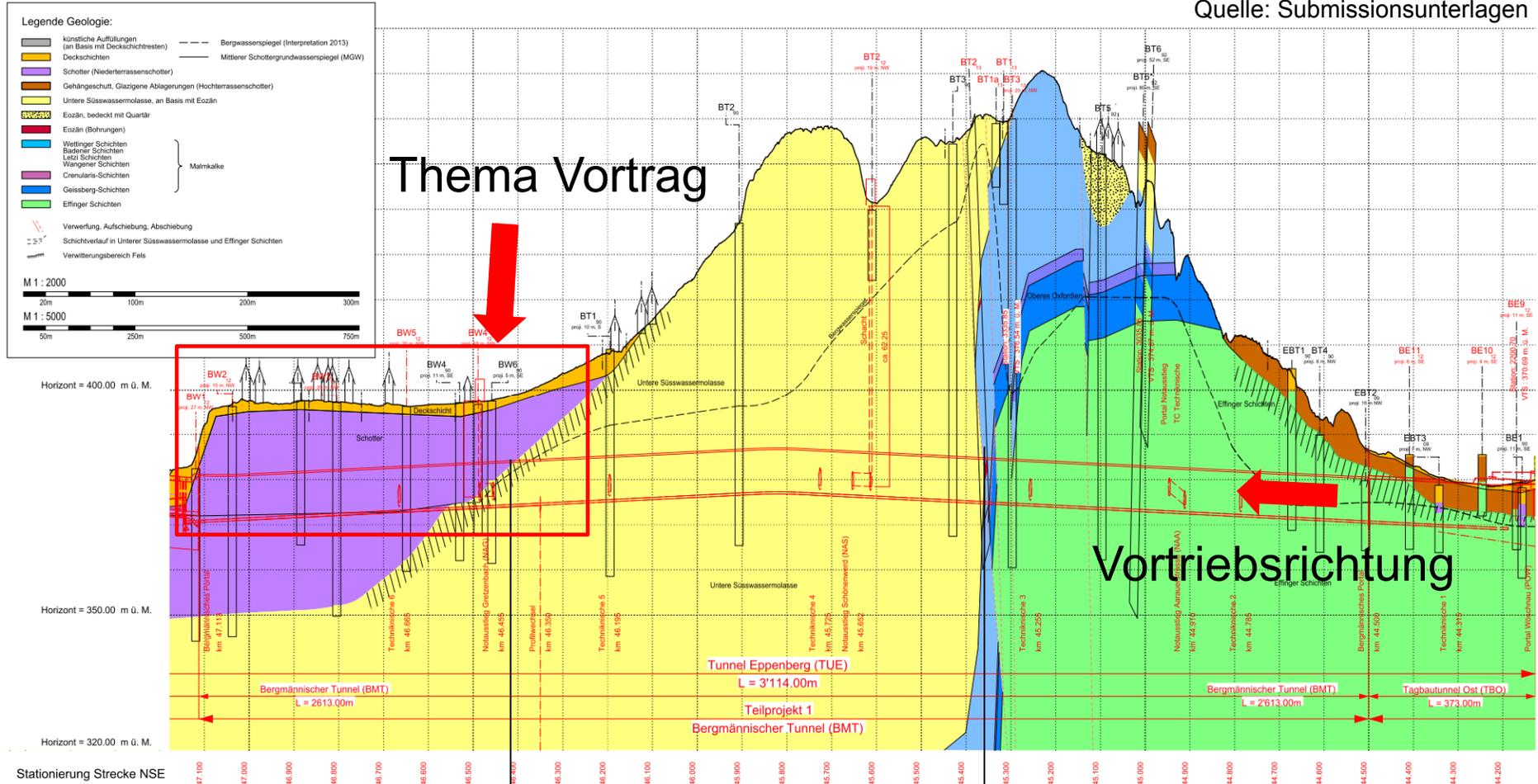
Mixed-Schild-TBM, Hersteller Herrenknecht, Ausbruchdurchmesser, $r = 6.375\text{m}$

- TBM-Trocken: Offener Hartgesteinsschild, Bandschutterung und Spreitzübbinge mit Perlkies/Mörtel-Hinterfüllung
- TBM-Nass: Hydroschild-TBM mit Suspensionskreislauf und Trapezzübbingen mit Mörtelhinterfüllung
- Umbau TBM von Trocken- auf Nassvortrieb untertage in speziellem Bahnhof
- Ausführung TBM-Vortrieb: 2016-2017
- Bauherr: SBB

Geologie

Hydroschildvortrieb über dem Grundwasserspiegel im Eppenbergtunnel: Unerwartete Probleme und ihre Lösung

Quelle: Submissionsunterlagen



Quartäre
Niederterrassenschotter
(NTS)

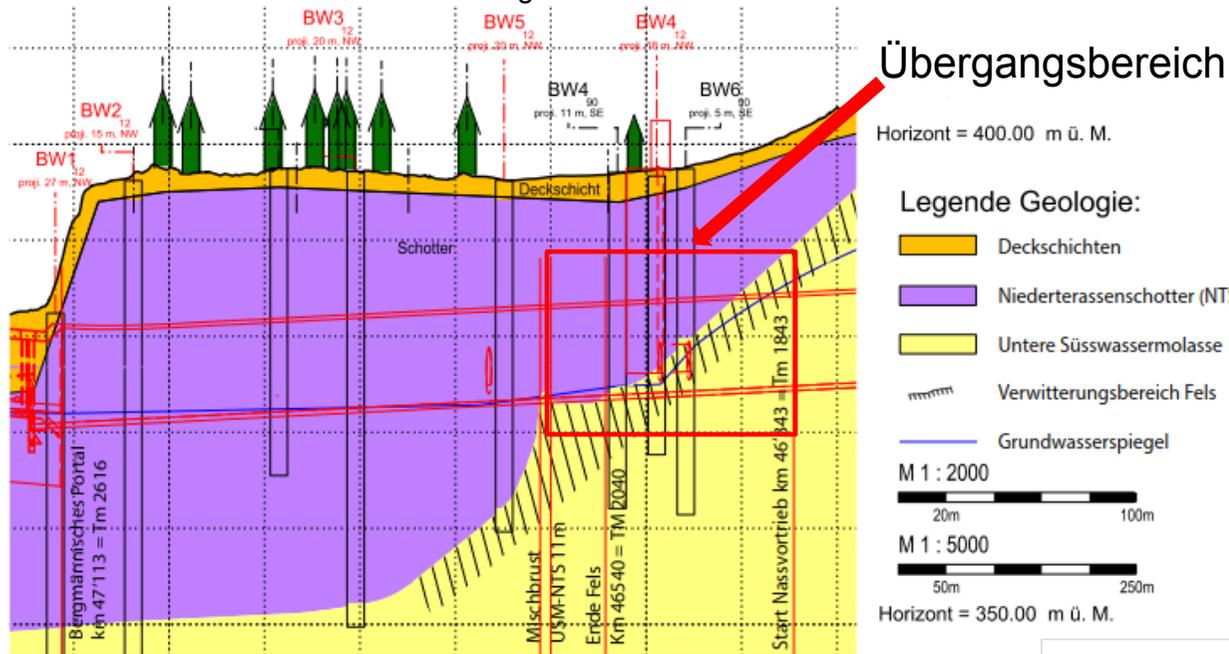
Molasse (USM)
Sandsteine
und Mergelsteine

Effinger-
Mergelsteine und
Kalksteine Flexur

Übergangsbereich

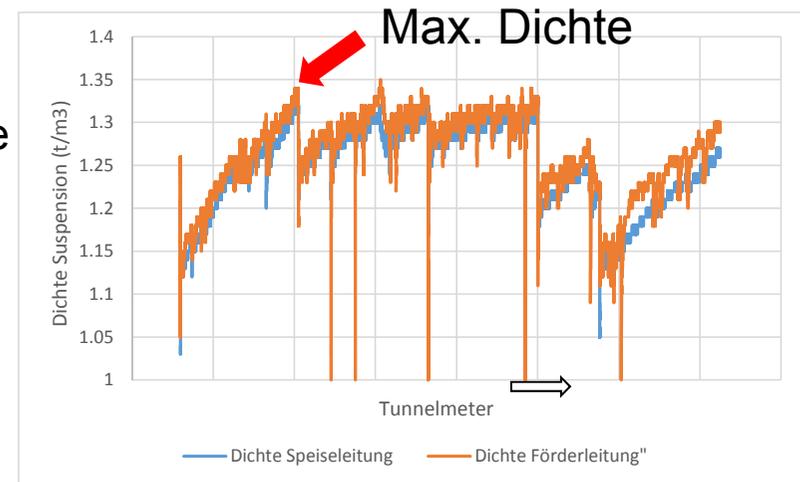
Hydroschildvortrieb über dem Grundwasserspiegel im Eppenbergtunnel:
Unerwartete Probleme und ihre Lösung

Quelle: Modifizierte Submissionsunterlagen



Erwartete geologische Probleme im Übergangsbereich Molasse-NTS :

- Verklebungen
- Aufladung Suspension



Töpferscheibe ⇒ Zerreiben Ausbruch ⇒ Zusätzliches Aufladen Suspension

Problematik:

- Das Dispergieren der Molassegesteine ist schwer abschätzbar
- Das Aufladen der Suspension führt zu hohem Anfall Altbentonit
- Kapazität der Separation ist beim Altbentonitabpressen schnell erreicht
- Die Töpferscheibe am Schneidrad führt zu zusätzlicher mechanischer Zerkleinerung der Molassechips

Massnahmen:

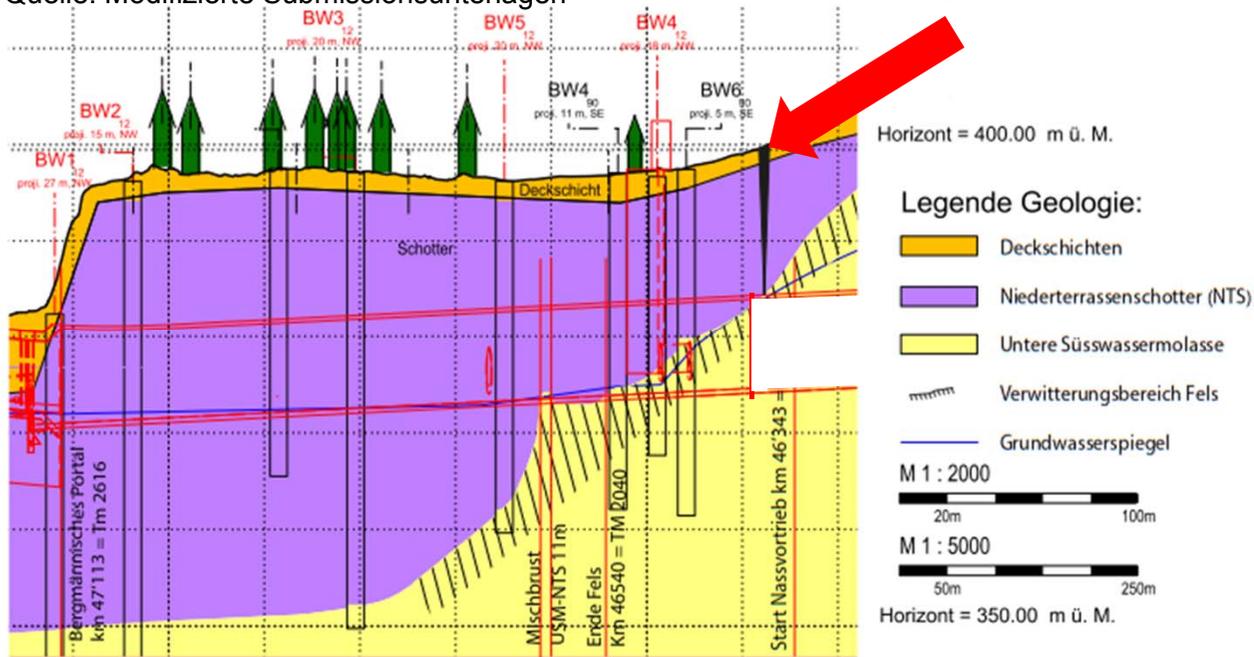
- Fahrt mit Teilfüllung im reinen Molassefels (Waschmaschineneffekt) führt zu mechanischer Reinigung des Schneidrades
- Händisches Entfernen der Töpferscheibe bei Einstiegen
- Ziel: Förderung Molasse als Chips



Übergangsbereich

Hydroschildvortrieb über dem Grundwasserspiegel im Eppenbergtunnel:
Unerwartete Probleme und ihre Lösung

Quelle: Modifizierte Submissionsunterlagen



Ursache:

- Unerwartete frühes Auftreten der Niederterrassenschotter

Folge:

- Tagbruch am 02.09.2017

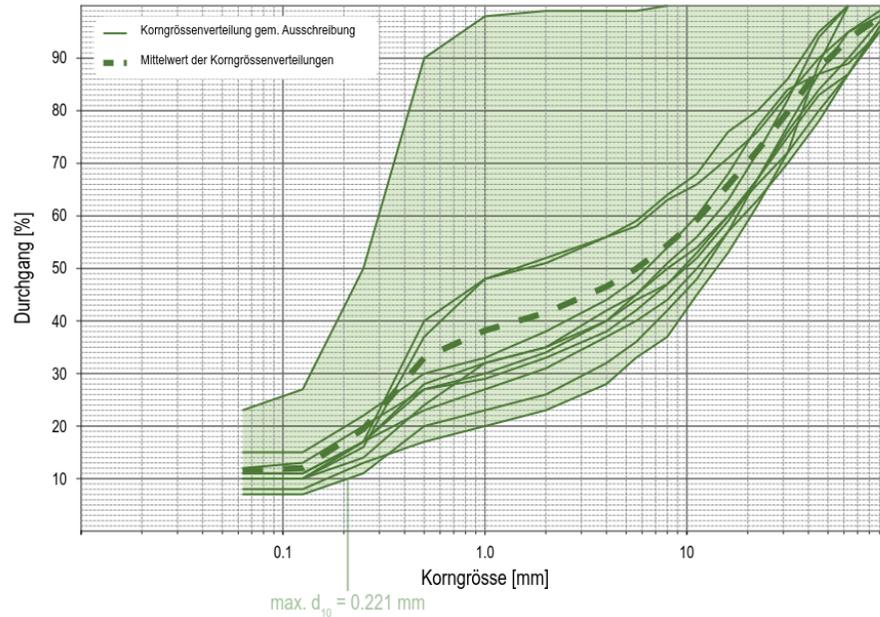


Quelle: Solothurner Zeitung, 07.09.2017

Schottervortrieb



Korngrößenverteilungen aus Ausschreibung



Geologie Niederterrassenschotter:

- Breite Korngrößenverteilung, wenig Feinanteil, einzelne Rollkieslagen
- Vortrieb über dem Grundwasserspiegel

Erwartete Probleme:

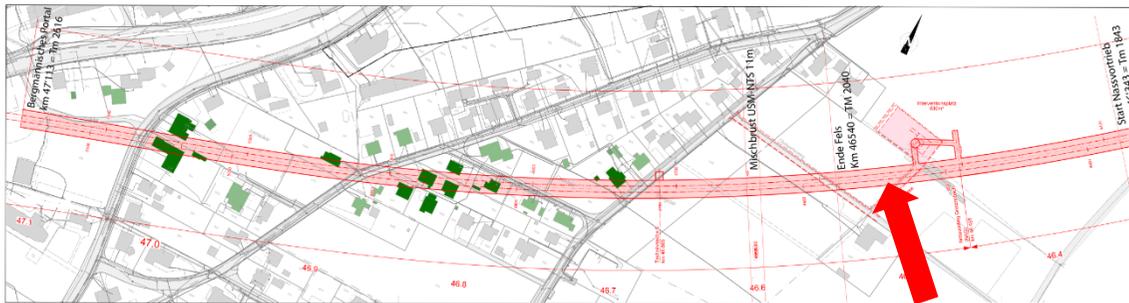
- Entweichen Druckluft bei Einstiegen

Massnahmen:

- Vorhalten Bentonitgranulat

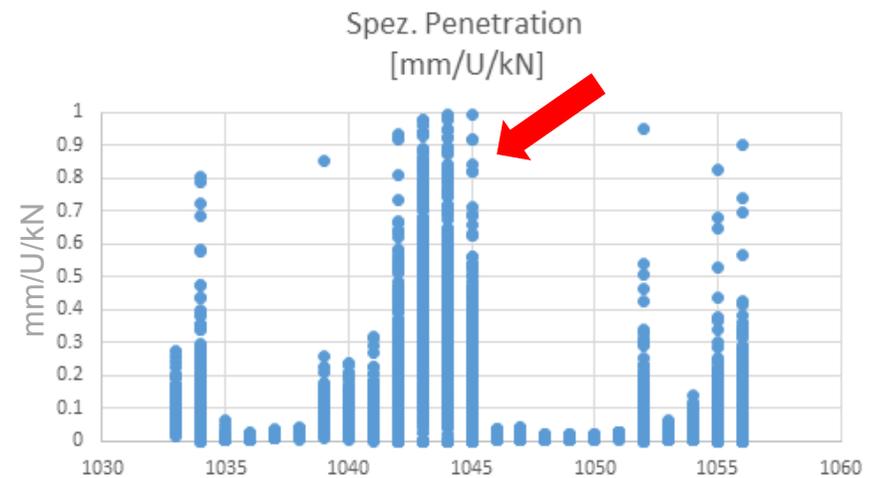
Situation Vortrieb

Hydroschildvortrieb über dem Grundwasserspiegel im Eppenbergtunnel:
Unerwartete Probleme und ihre Lösung

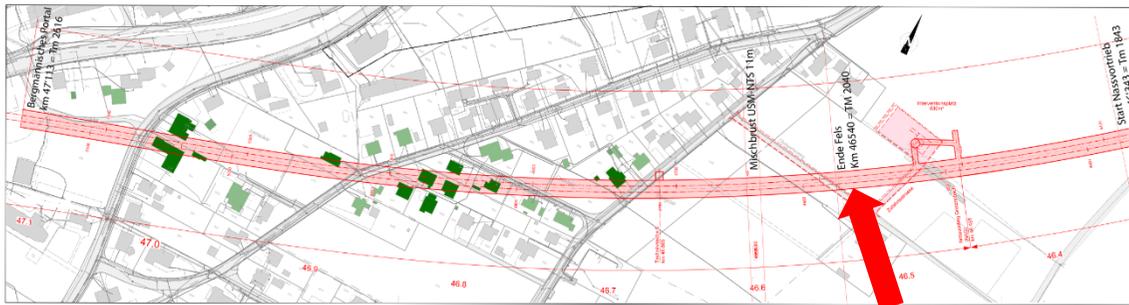


Situation Anfang Oktober:

- Problem mit Suspension: Fließgrenze ungenügend
- Hoher Mörtelverbrauch
- Hohe Bentonitverluste
- Schwarze Schlieren auf den Bentonitfahrbecken
- Extreme Spitzen der Spezifischen Penetration; ausschliessbare Ursachen:
 - Im grossen Stil instabile Ortsbrust (nicht sichtbar bei Einstiegen)
 - Druckunterschiede (Druck wird mit Druckluftpolster gleich hoch gehalten)



Ursachenforschung



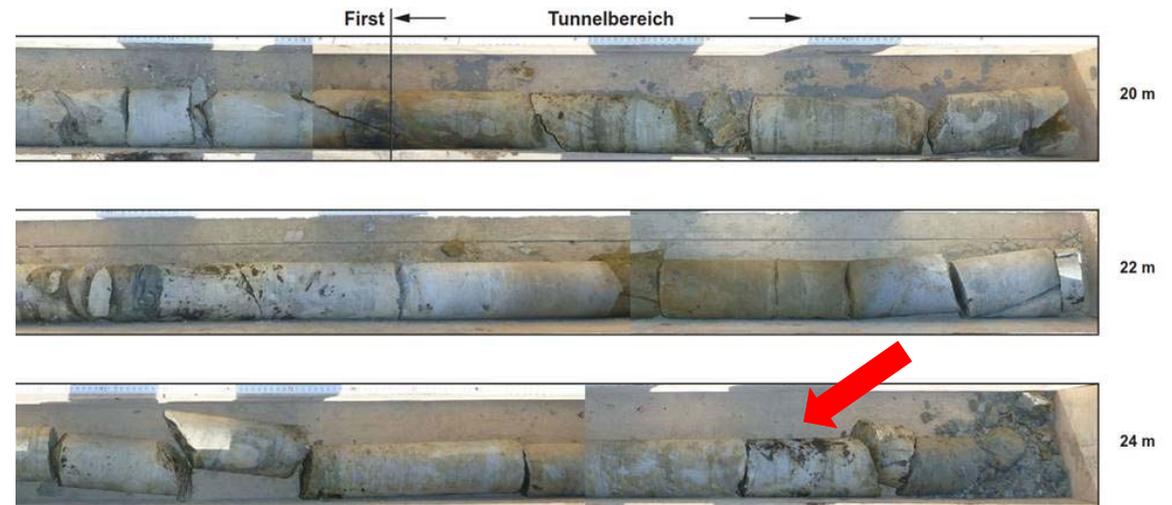
Spekulation: Ursache der Suspensionsprobleme (Fokus auf schwarzen Schaum):

- Organisches Material stört oder zerstört den Bentonit, Folge: Verlust der Fließgrenze, hoher Bentonitabfluss ins Gebirge

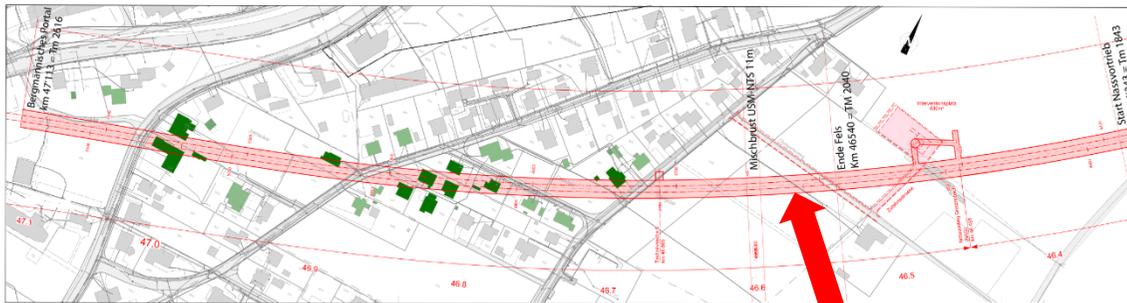
Mögliche Herkunft des organischen Materials:

- Sandsteine mit Kohlenwasserstoffen und Kohle aus der Molasse
- Torf aus dem Niederterrassenschotter
- Flugasche aus dem Ringspaltmörtel
- Ev. Holz aus dem Niederterrassenschotter

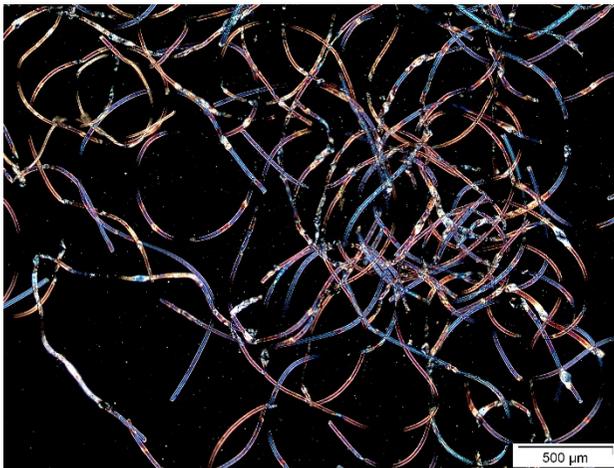
Bohrkern aus der Molasse mit organischem Material



Ursachenforschung



Untersuchungsergebnisse organische Fasern aus schwarzem Schaum von Fahrbecken:



Chemische Reaktionen:

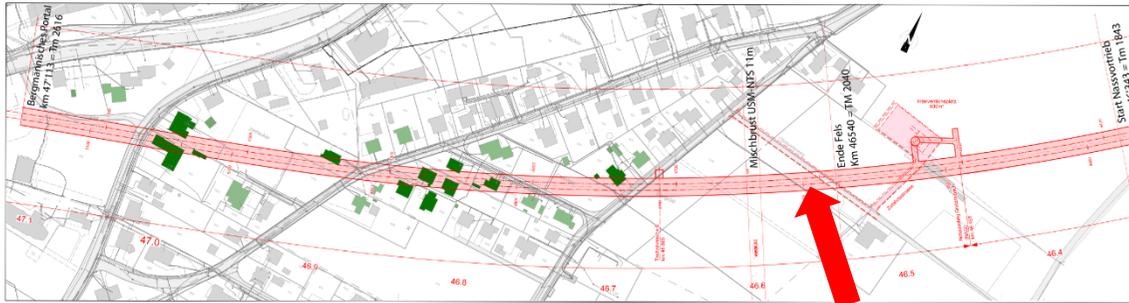
- Fasern verbrennen allerdings (= organisches Material) -> Zusammenschrumpfen
- Mikroskopieren (liefert Hinweise auf Habitus, siehe Bilder im Anhang, Rest der Bilder in separatem Mail):
- Fasern sind alle gleich dick, ca. 10 - 20 Mikrometer und haben eine glatte Oberfläche
- Fasern sind gebogen (Asbest: typischerweise gerade Fasern)
- Fasern sind an deren Enden gerade "abgeschnitten" (Asbest: typischerweise aufgesplisst)
- Fasern erscheinen in doppelt polarisiertem Licht farbig, weisen folglich eine Struktur auf und sind nicht amorph
- Verbrannte Fasern (Proben "MELT" auf den Bildern): krausen sich mehr zusammen, weisen keine glatte Oberfläche mehr auf und können an deren Enden leichte Verdickungen bilden. Diese verbrennen

Fazit:

- Grundsätzlich deuten die Untersuchungen darauf hin, dass die Fasern keines natürlichen Ursprungs, sondern eher schon im Bentonit drin sind.
- Fasern sind organisch, jedoch mit Struktur (nicht amorph). Ev. Polyamide

Ursachenforschung

Hydroschildvortrieb über dem Grundwasserspiegel im Eppenbergtunnel:
Unerwartete Probleme und ihre Lösung

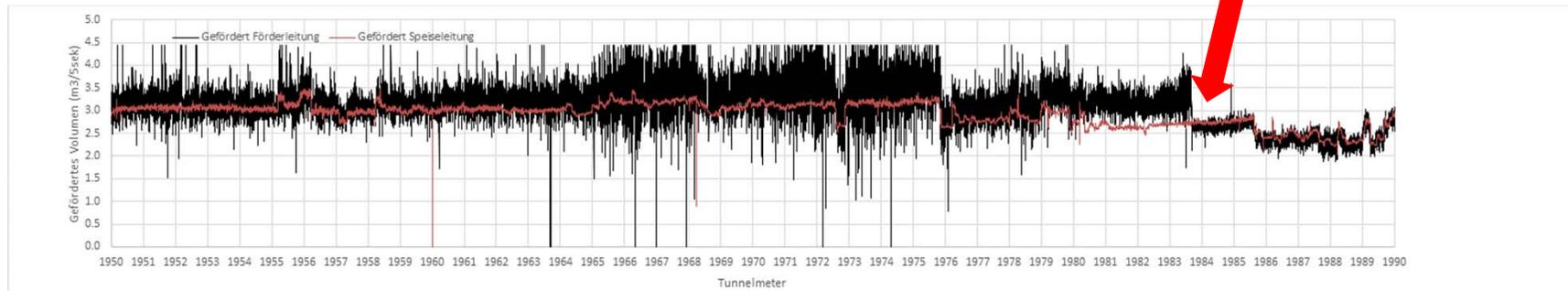


Genauere Datenanalyse zeigt:

- Fehlerhafte Sensoren
- Fehlende Daten
- Berechnungsfehler

Beispiel fehlerhafter Durchflussmesser:

Geförderte Menge Speiseleitung >
Geförderte Menge Förderleitung



Achtung: Den Daten kann nicht immer vertraut werden!

Ursachenforschung

Hydroschildvortrieb über dem Grundwasserspiegel im Eppenbergtunnel:
Unerwartete Probleme und ihre Lösung



Analyse Stillstände:

(Druck wird über Luftpolster in der Abbaukammer konstant gehalten)



Abnahme Bentonit-Füllstand Abbaukammer bei Stillständen:

- Hohe Bentonitverluste
- Teilweise geringe Abnahme Abfluss mit der Zeit (Abfall bleibt über die Zeit gleich steil)

Ursachenforschung

Analyse Vortrieb:

(Erkenntnis Anfang November)

Zusammentrag

verschiedenster Daten:

- TBM (elektronisch)
- Labor (Protokolle)
- Rapporte (Protokolle)

Korrelation:

- Verlust Fließgrenze
- Spezifische Penetration
- Mörtelmehrverbrauch

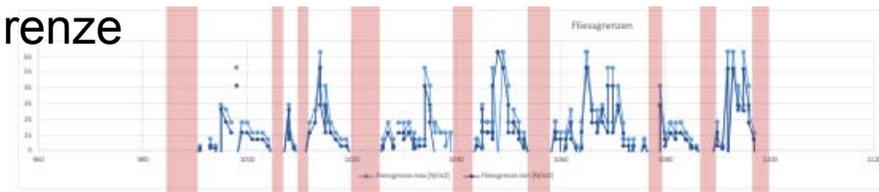
Keine Korrelation:

- pH
- Dichte
- Temperatur

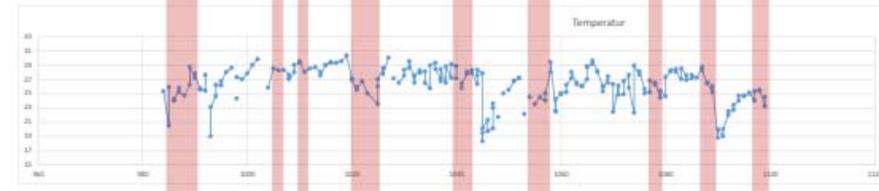
pH



Fließgrenze



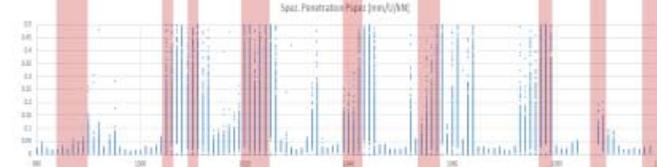
Temp



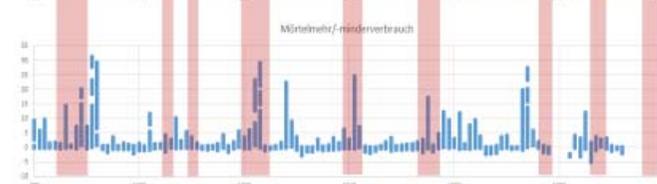
Dichte



Spez. P



Mörtel



Theorie zu Bentonit

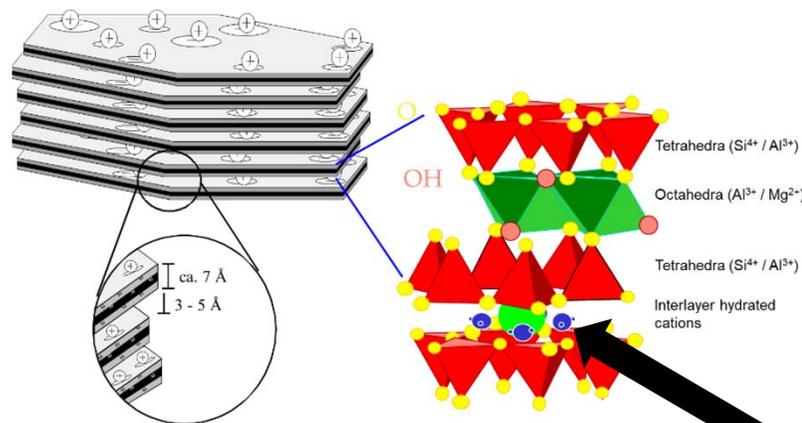
Zusammensetzung Suspension

Suspension enthält 3 - 10% Bentonit, Wasser +/- Polymer)

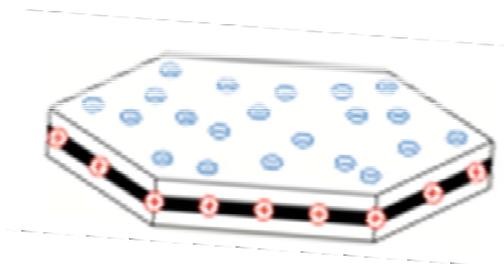
Zusammensetzung Bentonit

Smektit = mehrheitlich Montmorillonit (stark quellender Ton)	60 – 80 %
Weitere Tone	10 – 20 %
Karbonate	2 – 5 %
Silikate (Quarz, Feldspat, etc.)	5 – 10 %

Aufbau Tonmineral (Montmorillonit)



Kanten: Positive Ladung
Flächen: Negative Ladung



Quelle: Bentonithandbuch
(Praetorius & Schösser, 2016)

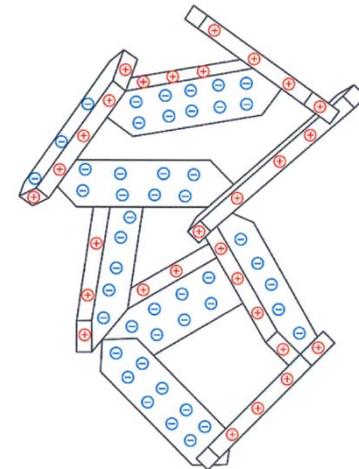
Na^+ oder Ca^{++}

Theorie zu Bentonit

Eigenschaften Bentonit

Quellverhalten

- Einlagerung von Wassermolekülen in die Zwischenschicht
- Vergrößerung der Zwischenschicht
- Unterschiede im Quellverhalten
 - Wasseraufnahme Ca-Smektit = 200 – 300 %
 - Wasseraufnahme Na-Smektit = 600 – 700 %



Thixotropie: Fähigkeit verschiedene Scherfestigkeiten durch Verformungsarbeit annehmen zu können

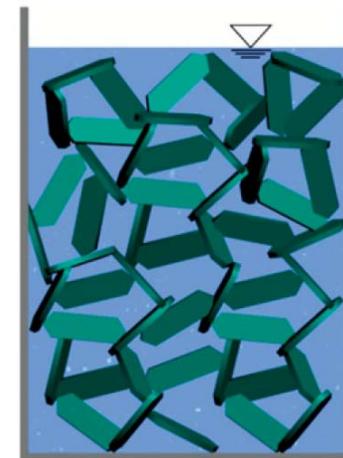
- Ursache: Kartenhausstruktur
- Sol/Gel-Umwandlung (beliebig reversibel)



Quelle: Internet

Fliessgrenze

- Kleinste nötige Schubspannung zur Gel → Sol-Umwandlung
- Nach Abschluss einer Bewegung: Zeitabhängige Zunahme der Scherfestigkeit (dynamische → statische Festigkeit)
- Angabe in N/m^2



Quelle: Bentonithandbuch
(Praetorius & Schösser, 2016)

Theorie zu Bentonit

Eigenschaften Bentonit

Rheologische Parameter:

- Partikelgrösse immer $\sim 20 \mu\text{m}$
- Fließgrenze $10 - 70 \text{ N/m}^2$
- Viskosität (Marsh-Zeit) $32 - 60 \text{ s}$
- Filtratwasserabgabe $< 50 \text{ ml}$

Physikalische und chemische Parameter:

- pH $8 - 12$ (ideal $8.5 - 9.5$)
- Leitfähigkeit $500 - 4000 \mu\text{S/cm}$
- Dichte $1.05 - 1.25 \text{ t/m}^3$
- Temperatur $10 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$

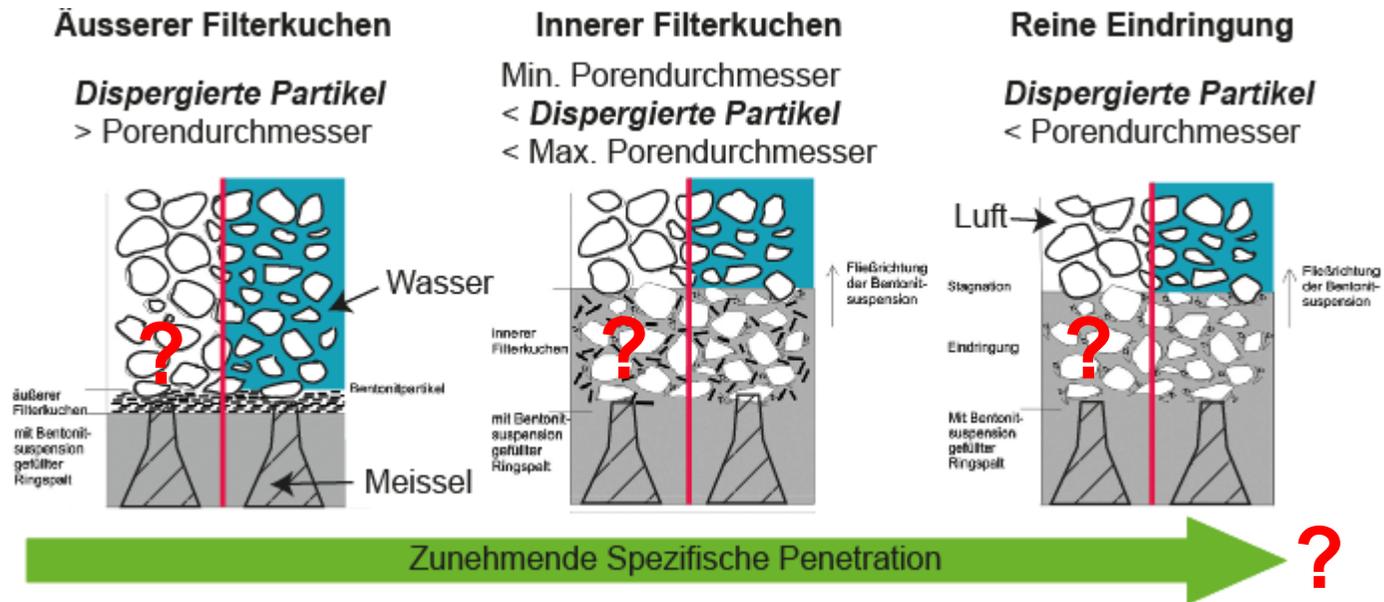
Massnahmen

- Erhöhung Messintervall
- Zusätzliche Messungen an verschiedenen Entnahmestellen im Kreislauf
- Zusätzliche Untersuchungen (Viskosität, Methylenblau)

Theorie zu Bentonit

Stützung der Ortsbrust

- Unterschiedliche Übertragung des Stützdrucks auf das Korngerüst des anstehenden Baugrunds (Lehrmeinung: Stützdruck muss 0.1-0.3bar höher sein als Grundwasserdruck)
- Bildung Filterkuchen: Tixotropie massgebend
- Reine Eindringung: Viskosität massgebend



- Einfluss Unterschied Wasser-, Luft-gefüllte Porenräume?
- Mögliche Begründung für variierende Spezifische Penetration: Unterschiedliches Abbauverhalten durch unterschiedliche Einspannung der Bodenteilchen an der Kontaktfläche zu den Abbauwerkzeugen

Erkenntnisse

Erkenntnisse Anfang November:

- **TBM steht kurz vor den ersten Häusern und die Suspension ist immer noch nicht stabil !**
- Schwarze Fasern kommen aus dem Sperrfett: Das Aufschwimmen ist eine Folge und nicht die Ursache für die instabile Suspension
- Zugabe von Polymeren hilft nur bedingt



Neue Vermutung:

Bentonit weist v.a. dann gute tixotrope Eigenschaften auf, wenn er Na^+ eingelagert hat. Bei Einlagerung von Ca^{++} sind die tixotropen Eigenschaften schlechter.

Massnahme:

Zugabe von SODA (Na_2CO_3) puffert Ca^{++} , was möglicherweise aus dem Grundwasser oder dem Mörtel stammt.

Ursache Mörtel

AHA-Erlebnis am 23.11.17

- Massiver Mörtel eintrag in den Bentonit,
- Bentonit wird dadurch kurzfristig dickflüssiger
- Das Ca^{++} kommt aus dem Mörtel!
- Pufferung Ca^{++} mit Soda funktioniert
- Erkenntnis aus Methylenblaumessungen (allerdings erst später): Suspension ist im schlechten Zustand nur noch eine Polymersuppe, d.h. der Bentonit wird im Kreislauf systematisch abgereichert.



Ursache Boden



Durchführung von nachträglichen, zusätzlichen Sondierbohrungen nach Durchgang TBM

- TM2200 und TM2230
- Geologische Aufnahme
- Probenahme vom Kern mit engem Proberaster
- Korngrößenanalyse
- Analyse Tonmineralogie im XRD Labor
- Pump- und Infiltrationsversuche

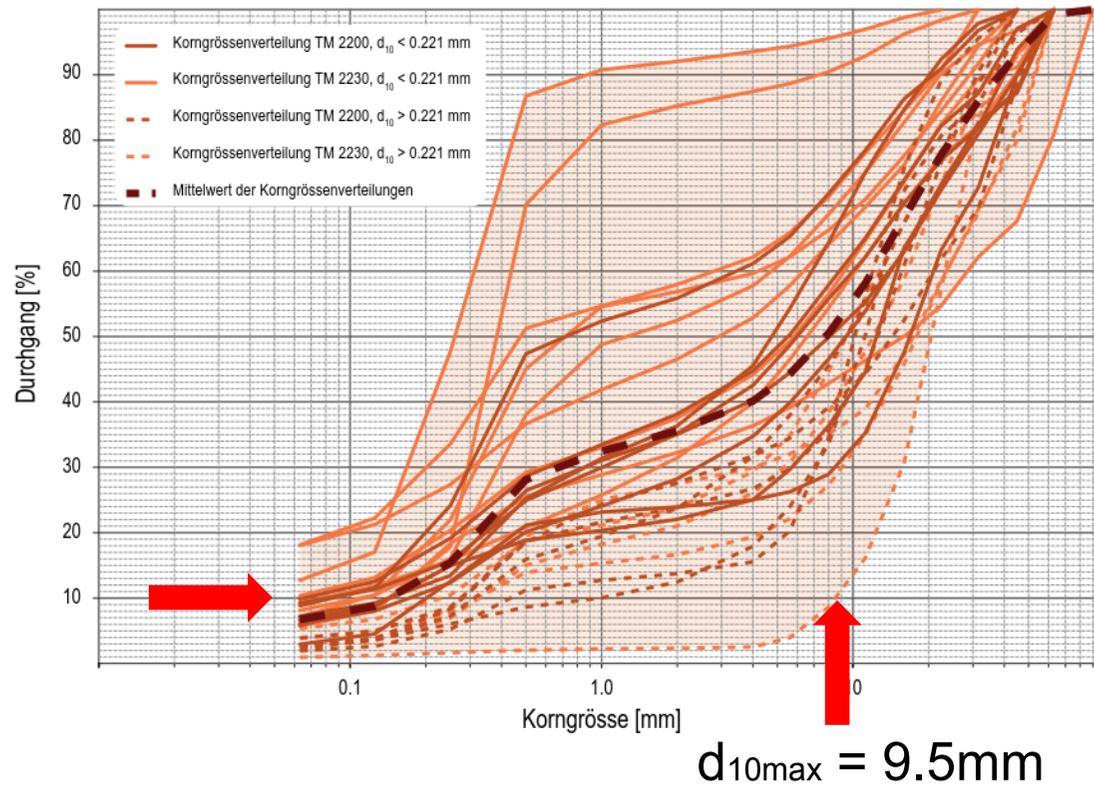
Problematik: Probenahme aus Kernbohrung

- Ausschlagen Material aus Kernrohr:
Probenahme vermischt unterschiedliche Lagen



Ursache Boden

IST-Kornverteilung Kernbohrproben



Entscheidender Wert:

d_{10} = Korngrösse bei 10% Massenanteil

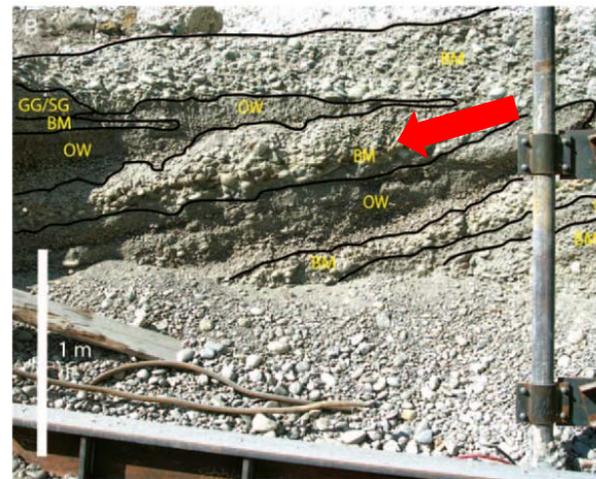
Problematik:

Korngrößenanalyse bedarf einer Minimalmenge Probenmaterial, geringmächtige Lagen sind daher nicht beprobbar und gehen in Mischkurve unter

Ursache Boden



Notausstieg
Gretzenbach
(Eppenberg)



Open
Framework
Gravel
(Literatur)

Horizonte im Kies mit extremer Durchlässigkeit = Open Framework Gravel

- Sehr hohe Durchlässigkeit
- Enge Abstufung Korngrösse
- Sehr hoher d₁₀-Wert

$$K_f = 2.3 \times 10^{-3} - 7.4 \times 10^{-1} \text{ m/s}$$

(Zappa et al. 2006; Ferreira, 2007)

Berechnung Eindringtiefe Bentonit in Lockergestein

« d_{10} ist der Korndurchmesser bei welchem 10 Massenprozent des Bodens durch ein Sieb mit entsprechender Maschenweite geht»

Die Eindringtiefe einer Bentonitsuspension gemäss Bentonithandbuch (Praetorius & Schösser, 2016) respektive DIN 4126 ist:

$$s = \frac{d_{10}}{2\tau_F} \Delta p$$

Anwendung für
Lockergestein über dem
Grundwasser?

Wobei s die Eindringtiefe in Meter bedeutet, Δp die Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende der Eindringtiefe und τ_F die Fließgrenze der Suspension.

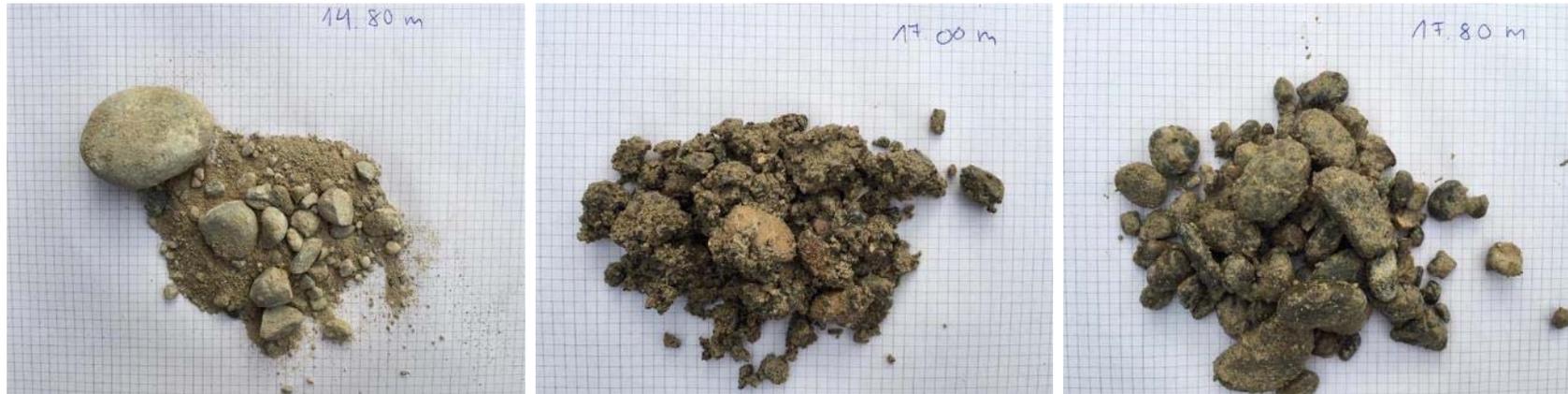
→ Die Eindringtiefe hängt massgeblich vom d_{10} eines Baugrundes ab

IST $d_{10(\max)}$ entspricht 9.5 mm (= 0.0095 m)

$$s = \frac{d_{10}}{2\tau_F} \Delta p = \frac{0.0095\text{m}}{2 \times 20 \text{ N/m}^2} \times 200000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 47.5 \text{ m}$$

Ursache Boden

Vergleich Smektitgehalte in verschiedenen Bohrabschnitten

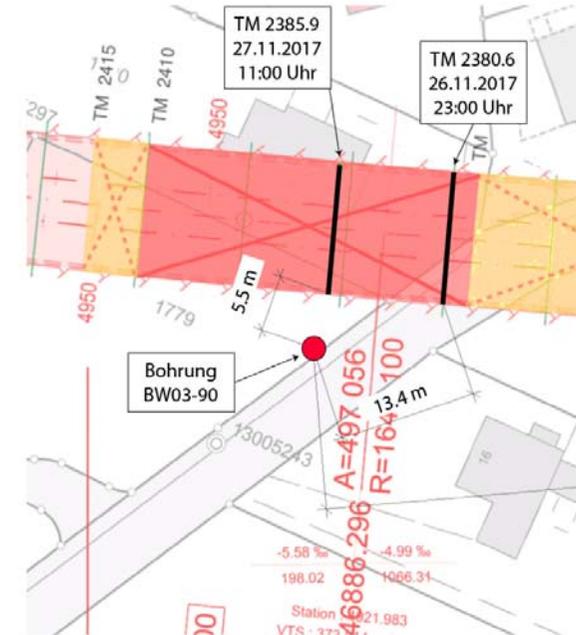


Mineralphase	Relativer Anteil		
	14.8 m	17.0 m	17.8 m
Tiefe	14.8 m	17.0 m	17.8 m
Illit/Muskovit/Biotit	65	41	42
Smektit	11	39	43
Kaolinit	1	2	3
Chlorit	24	19	13
Summe Schichtsilikate	100	100	100

Nachweis von Bentonit in nassem Kernmaterial der Bohrungen

Ursache Boden

Erhöhung Wasserspiegel und Leitfähigkeit infolge TBM-Durchfahrt



Eindringtiefe Suspension und Rückrechnung d_{10} zu zwei Zeitpunkten:

- Rückrechnung aus Abstand (a): Bohrung-TBM

$$a = 13.4 \text{ m}$$

$$d_{10} = \frac{s}{\Delta p} 2\tau_F = \frac{13.4 \text{ m}}{200000 \text{ N/m}^2} \times 2 \times 31.48 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 4.21 \text{ mm}$$

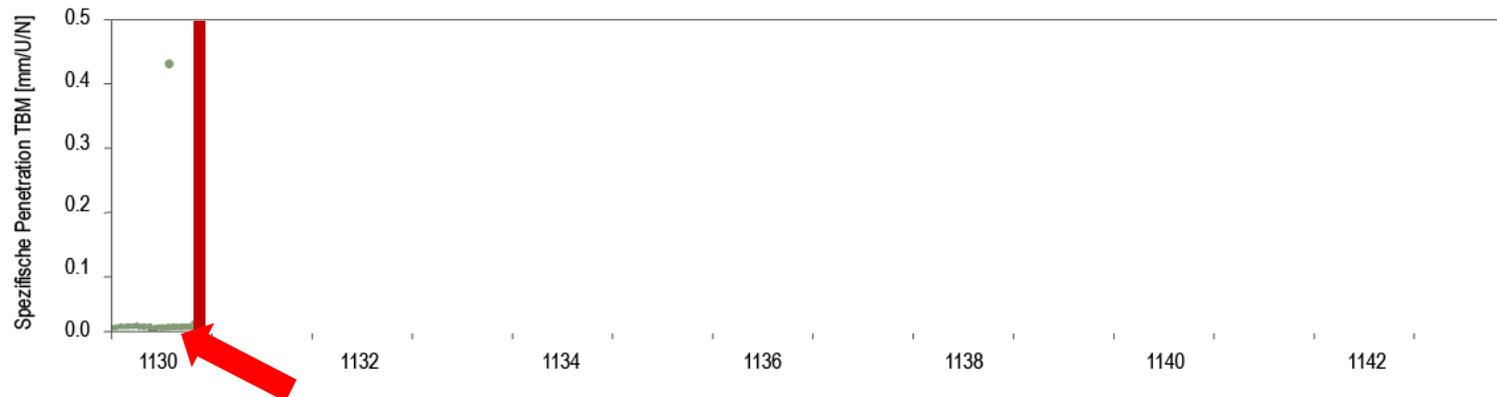
$$a = 5.5 \text{ m}$$

$$d_{10} = \frac{s}{\Delta p} 2\tau_F = \frac{5.5 \text{ m}}{200000 \text{ N/m}^2} \times 2 \times 12.28 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 0.675 \text{ mm}$$

Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1130

Schotter mit breiter Korngrößenverteilung im Tunnelquerschnitt

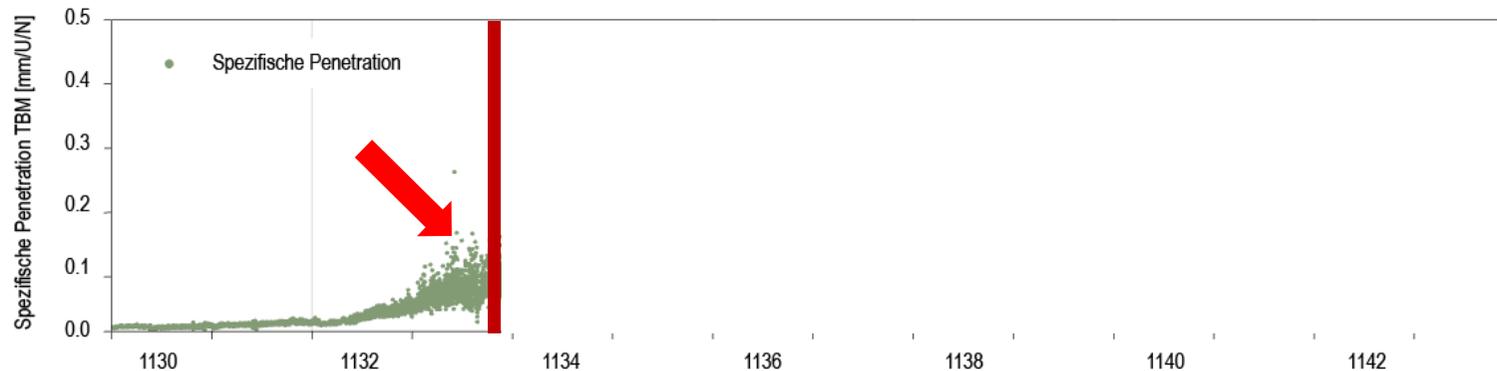
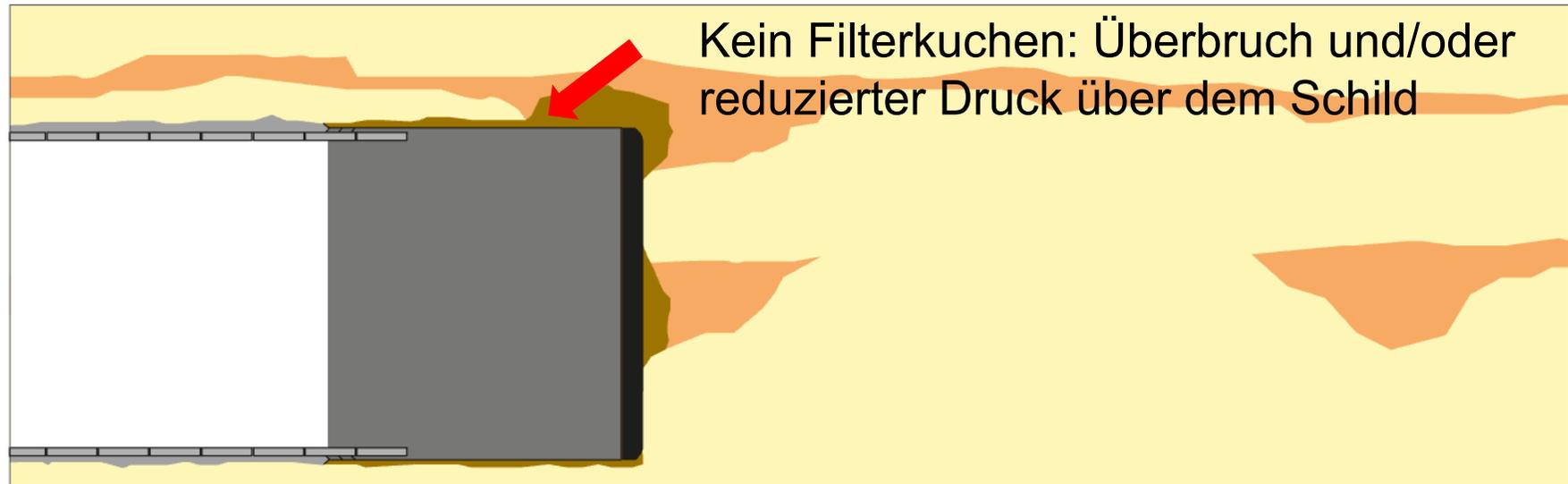


Vortrieb mit intakter Suspension, tiefe Spezifische Penetration

Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1133

Open Gravel Framework-Schicht im Tunnelquerschnitt

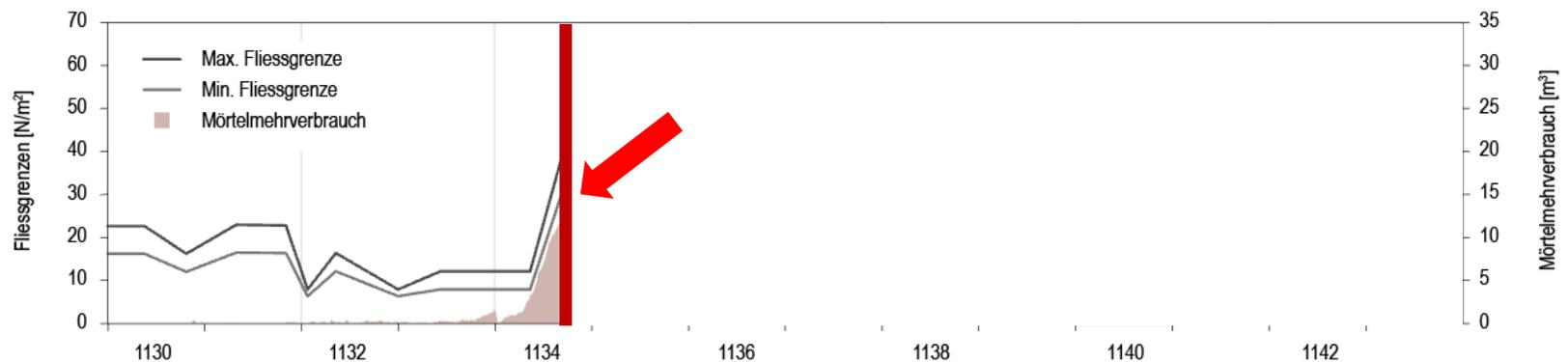
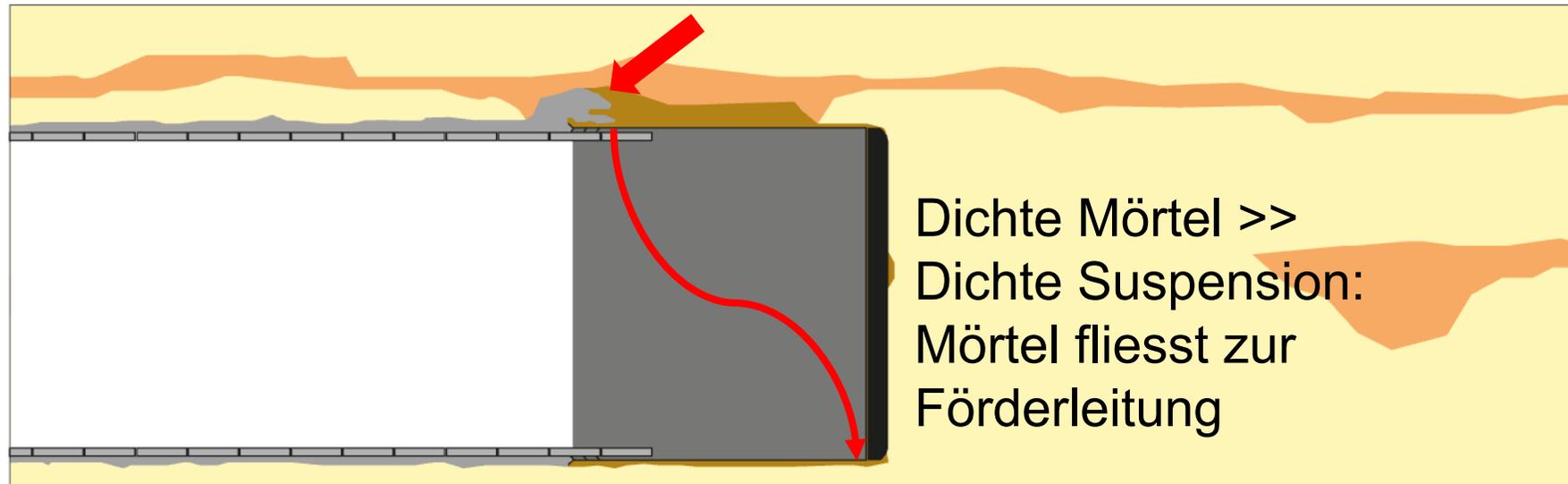


Spezifische Penetration steigt an. Fließgrenze ok.

Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1134

Mörtel überströmt aussenliegende Schildschwanzdichtung

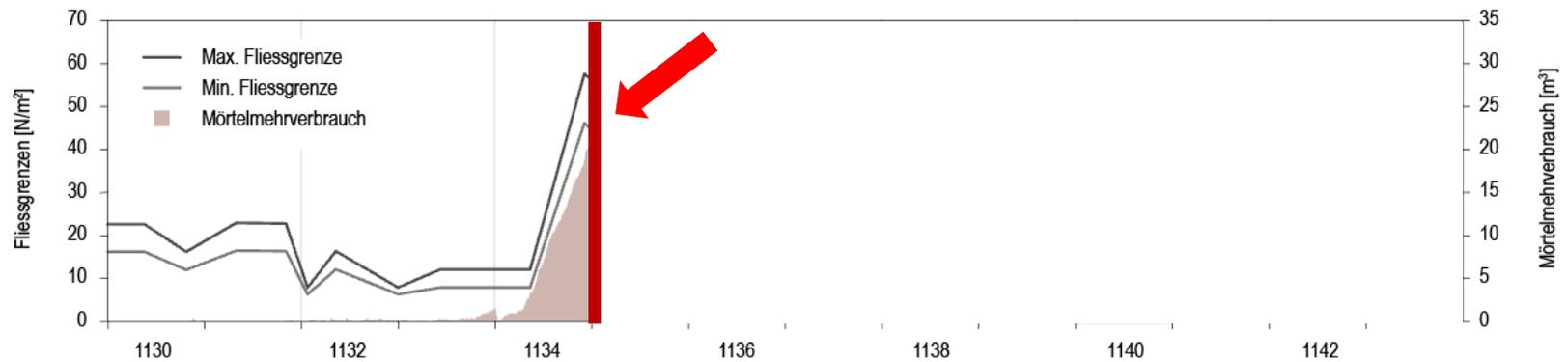
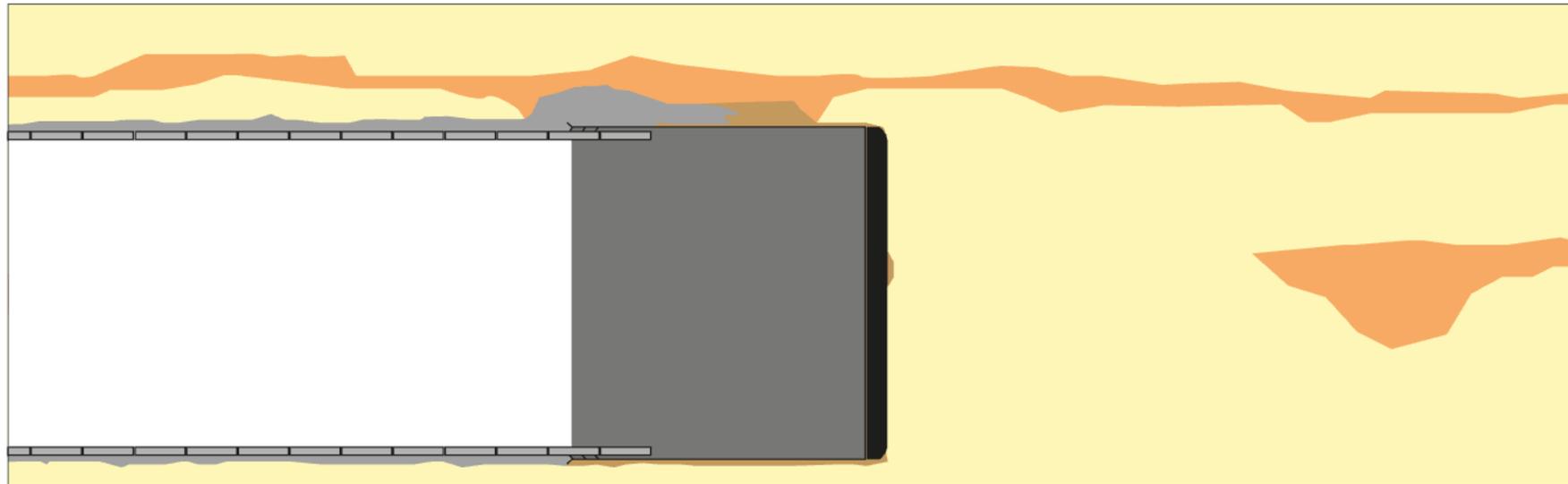


Mörtelverbrauch steigt an, Fließgrenze steigt an

Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1135

Mörtel vermischt sich mit der Suspension

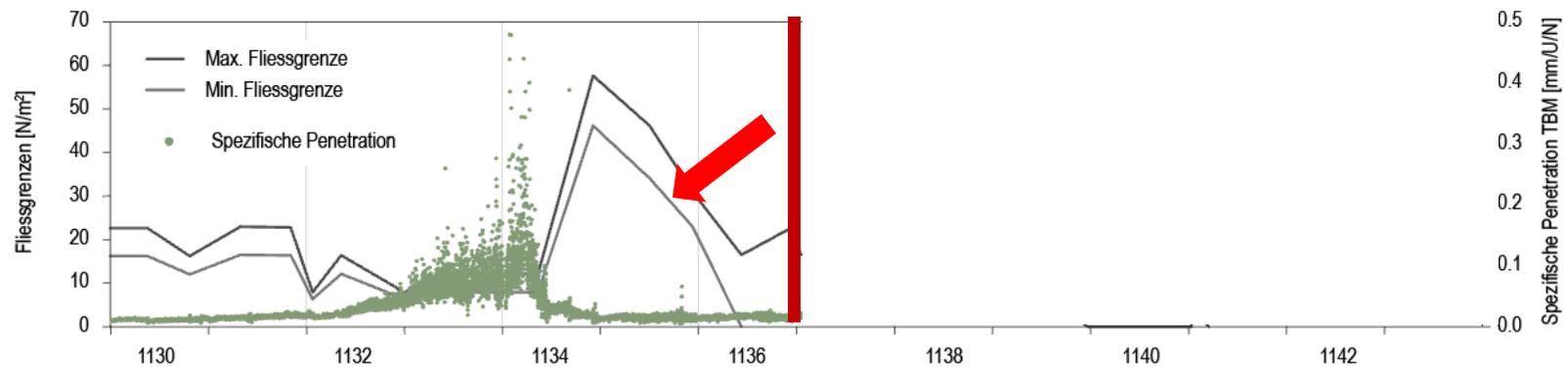
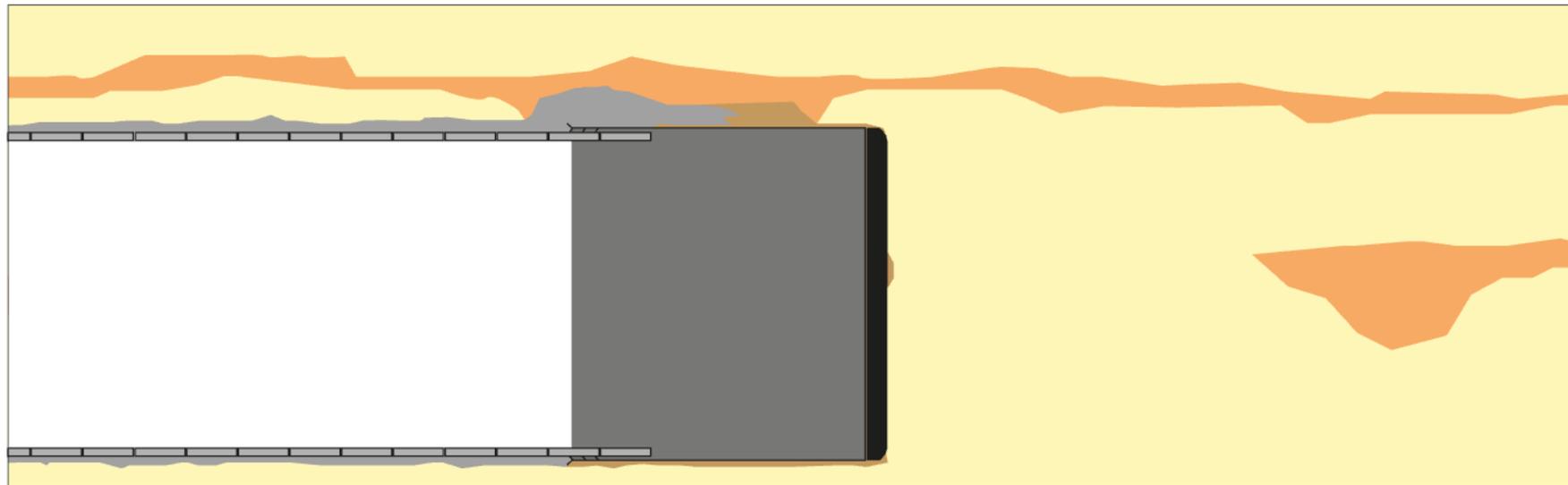


Fließgrenze und Mörtelverbrauch erreichen Maximum

Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1136

Ca⁺⁺ ersetzt Na⁺ im Bentonit, Rückgang Fließgrenze

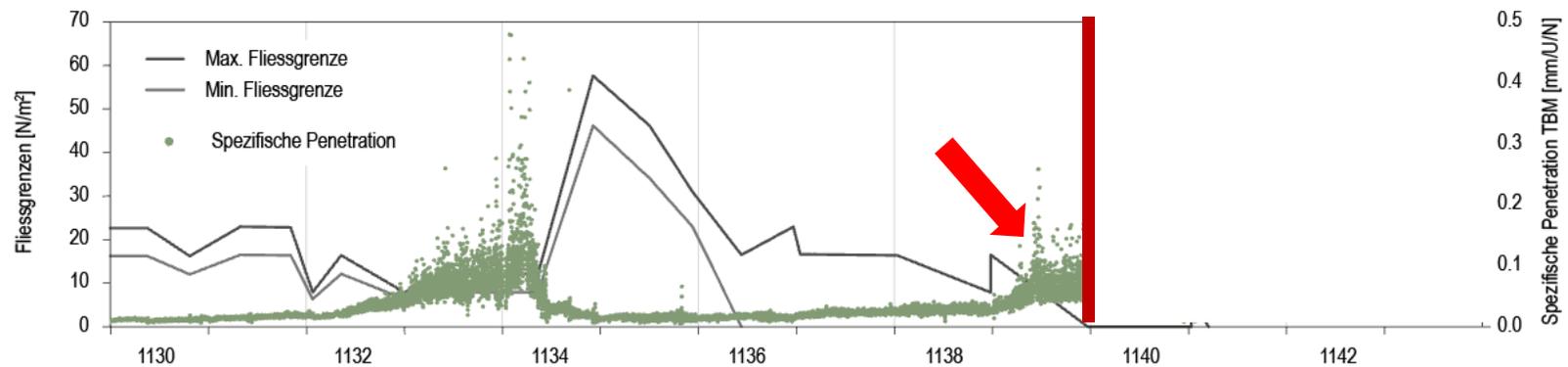
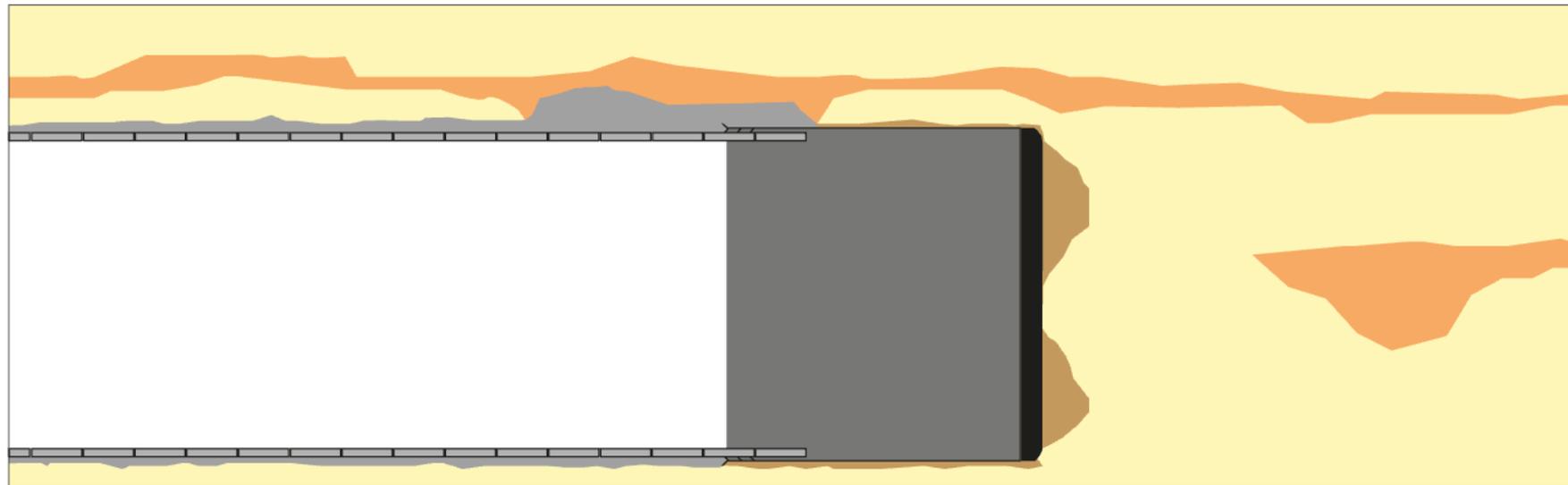


Fließgrenze fällt stark ab. Spezifische Penetration normal

Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1139

Entnahme Bentonit aus Kreislauf, Fließgrenze nicht mehr messbar

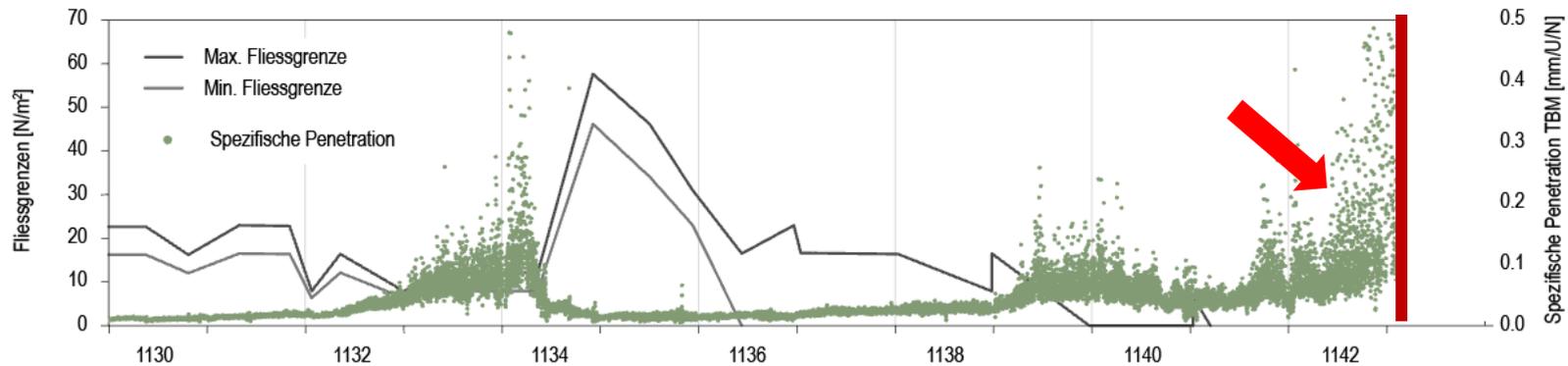


Spezifische Penetration steigt an.

Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1143

Bentonit verliert tixotrope Eigenschaften, wird dem Kreislauf entnommen.

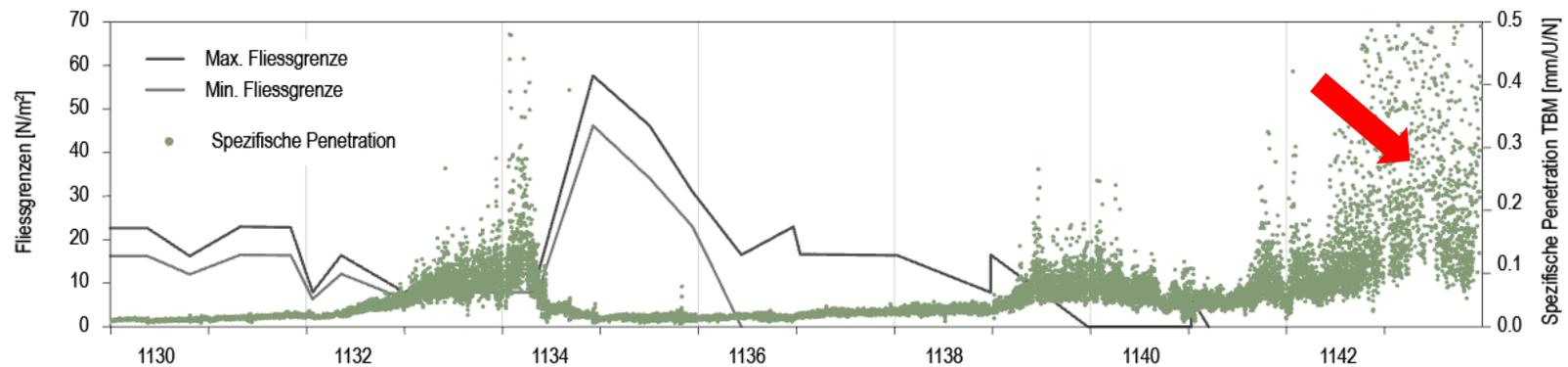
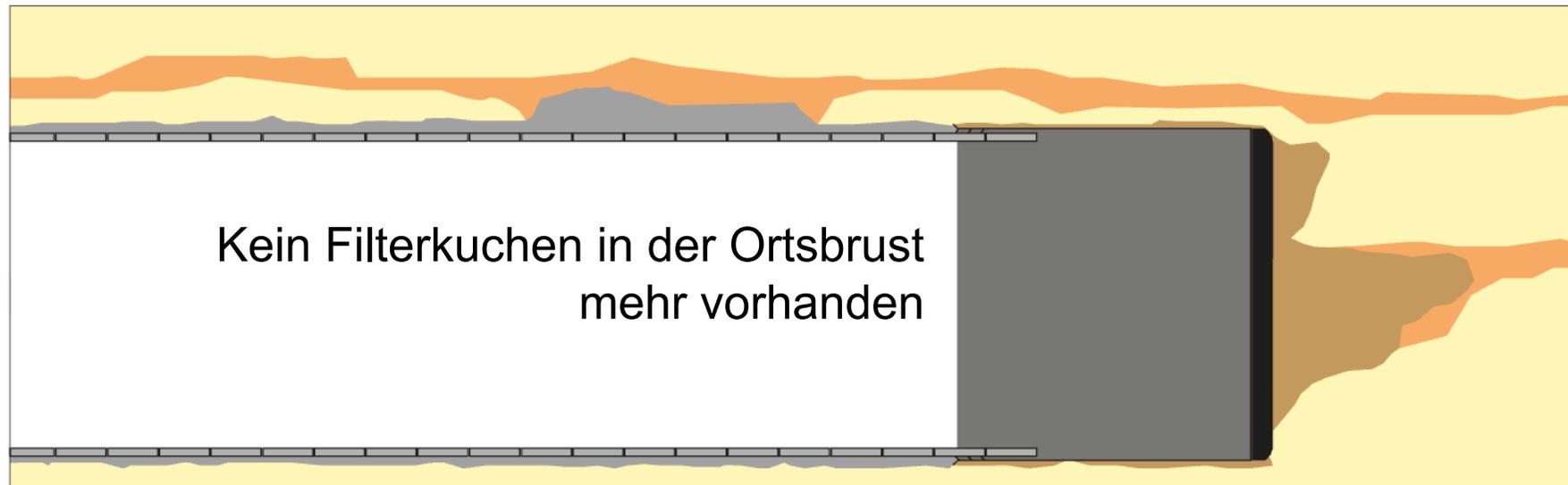


Spezifische Penetration steigt weiter an.

Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1143

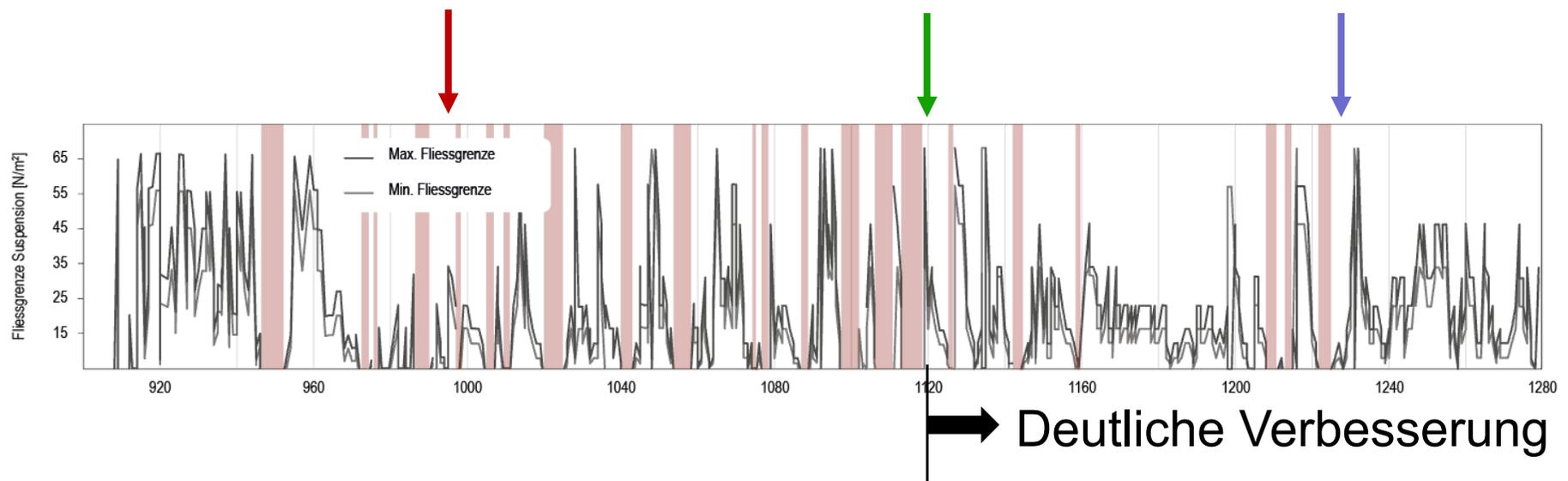
Suspension = Polymersuppe ohne Bentonit



Spezifische Penetration erreicht Max.

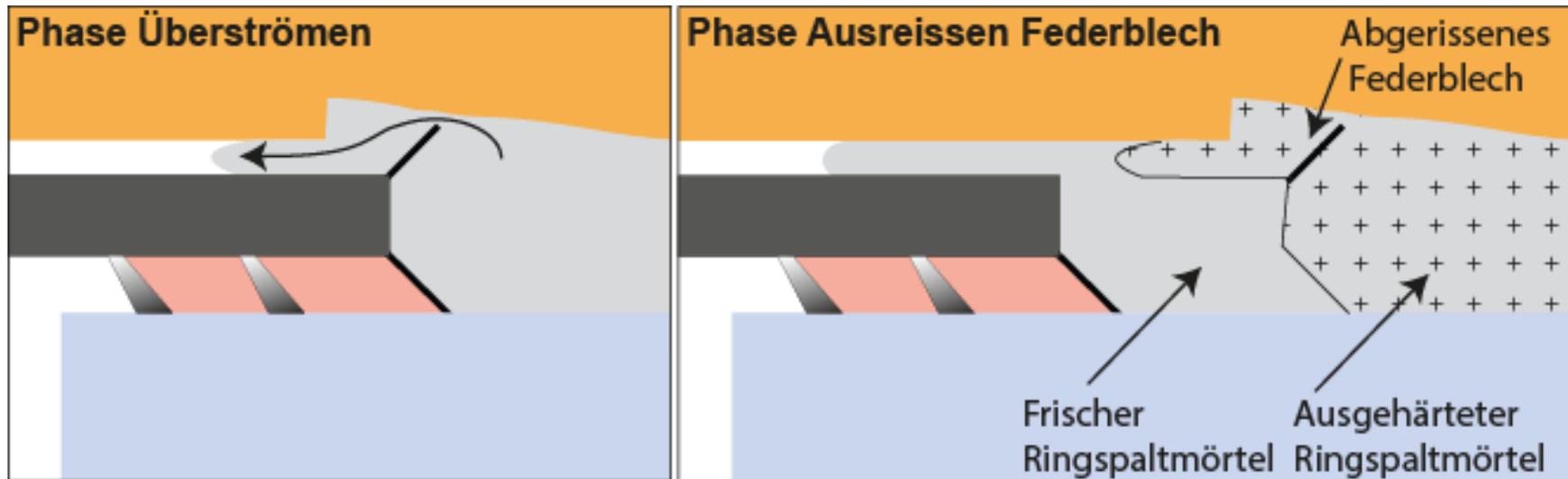
Wirkung Massnahmen

- Zugabe von **Polymer** zur Stabilisierung der Bentonitsuspension, ab 19.10.2017
- Zugabe von **Sodaasche (Na_2CO_3)** zur Pufferung von freien Calcium-Ionen, ab dem 15.11.2017
- Systematischer **Suspensionswechsel** 100 m³ pro Vortrieb + 300 m³ bei Rohrverlängerung, ab dem 10.12.2017



Ursache Ausreißen der Federbleche

- Im ausgehärteten Ringspaltmörtel sind die Federbleche nicht mehr beweglich und haften am Mörtel. Durch den weiteren Vortrieb wird der Mörtel-Blech-Klumpen abgerissen.



- Vereinfachter Zugang des Mörtels in die Abbaukammer, v.a. dann, wenn partiell der Druck in der Suspension im Schildbereich reduziert ist.

Folgen

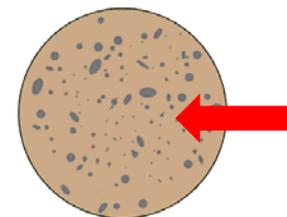
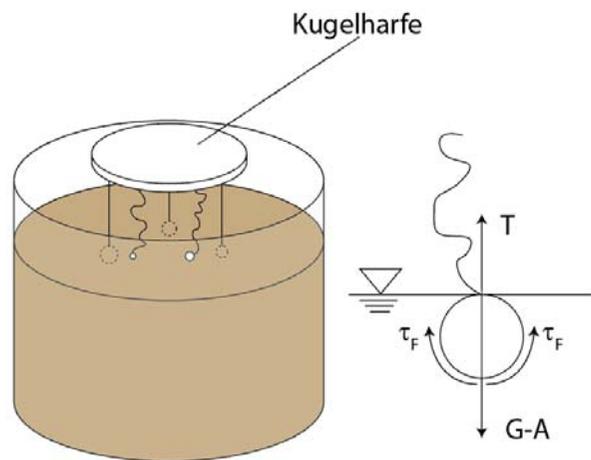
Weitere Folgen durch den Abfall der Fließgrenze

- Verschleiss auf Pumpen und Rohrleitungen
- Absetzen und Verkleben Siebe durch Sperrfett

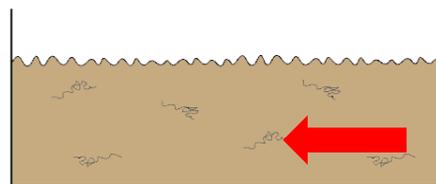
Fließgrenze
≈
Tragfähigkeit

Hohe Fließgrenze
=
Gute Tragfähigkeit

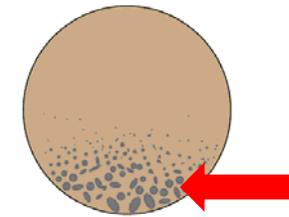
Niedrige Fließgrenze
=
Keine Tragfähigkeit



Kies in Schwebelag



Fettfasern in Schwebelag

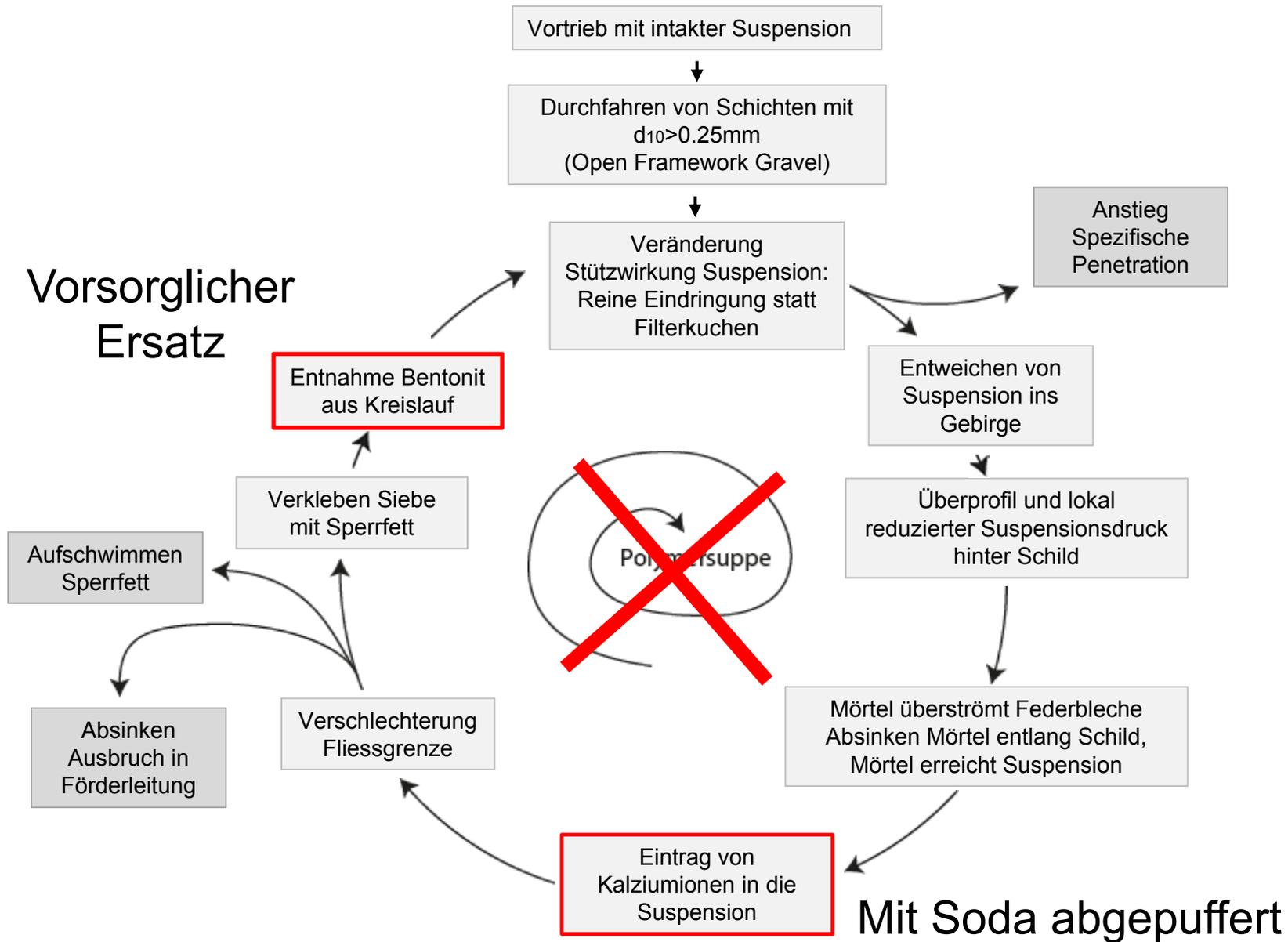


Kies absinkend



Fettfasern aufschwimmend

Fazit



Fazit

- Vortriebe, die nur einen indirekten Einblick ins Systemverhalten erlauben (Hydroschild- oder EPB-Vortriebe), sind dann als besonders kritisch zu beurteilen, wenn es zu Abweichungen vom Regelfall kommt.
- Vom Regelfall abweichende Bedingungen erfordern daher:
 - Fehlertoleranz und Zeit
- Vom Regelfall abweichende Bedingungen erfordern zusätzliche Massnahmen:
 - Zusätzliche Untersuchungen
 - Zusätzliches Personal (Analyse kann nicht vom Vortriebspersonal durchgeführt werden)
 - Interdisziplinäre Zusammenarbeit (Verfahrenstechniker-Bauingenieure-Geologen-Chemiker)
- Ohne beidseitige (Bauherr und Unternehmer) Kompetenz und Bereitschaft zur Risikoübernahme und dem Treffen von aussergewöhnlichen Massnahmen: → **Keine Chance**