



# 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
<b>Summe</b>		<b>2'613 m</b>	<b>2'613 m</b>	

## Kennwerte

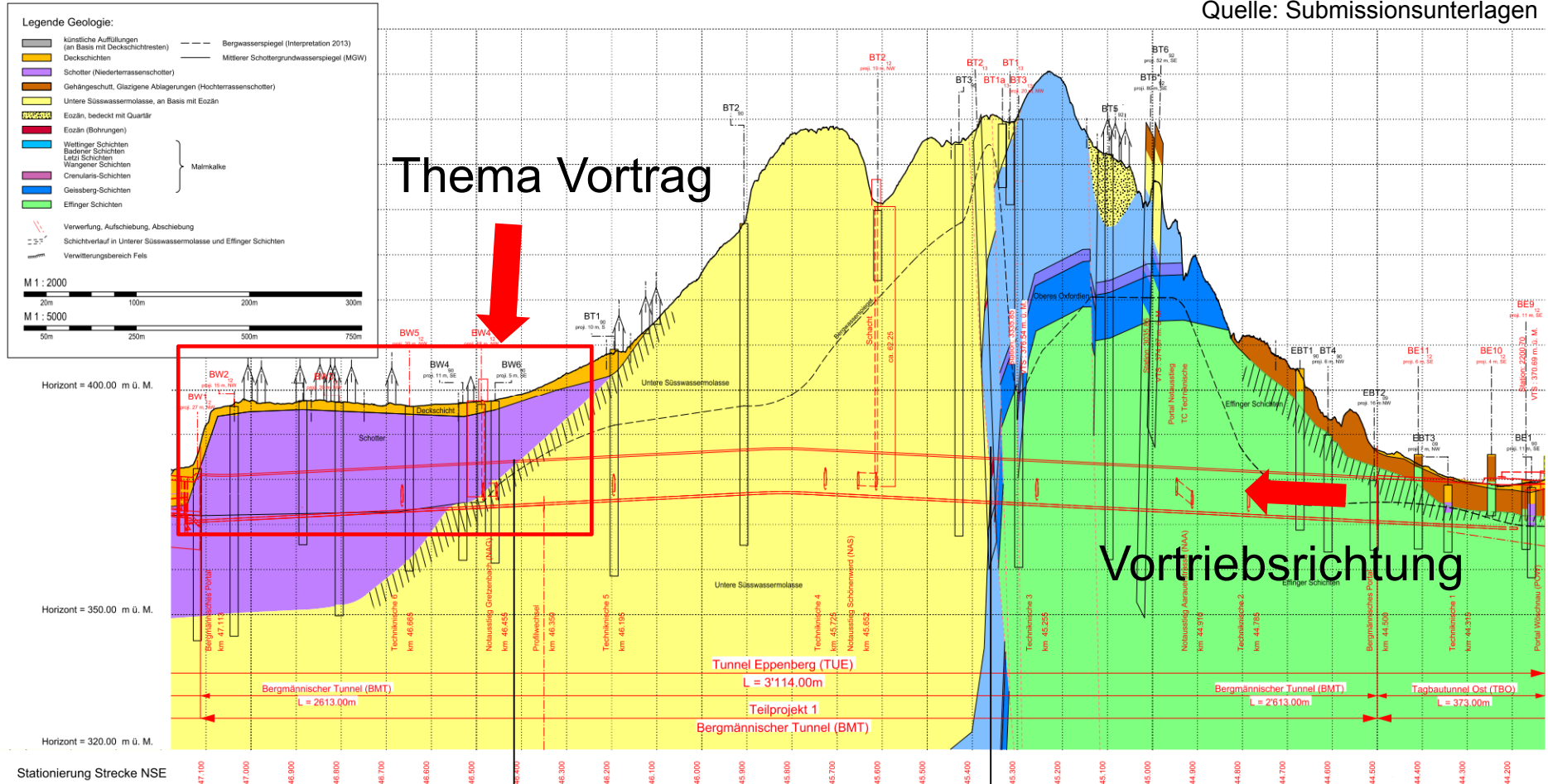
Mixed-Schild-TBM, Hersteller Herrenknecht, Ausbruchdurchmesser,  $r = 6.375\text{m}$

- 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)

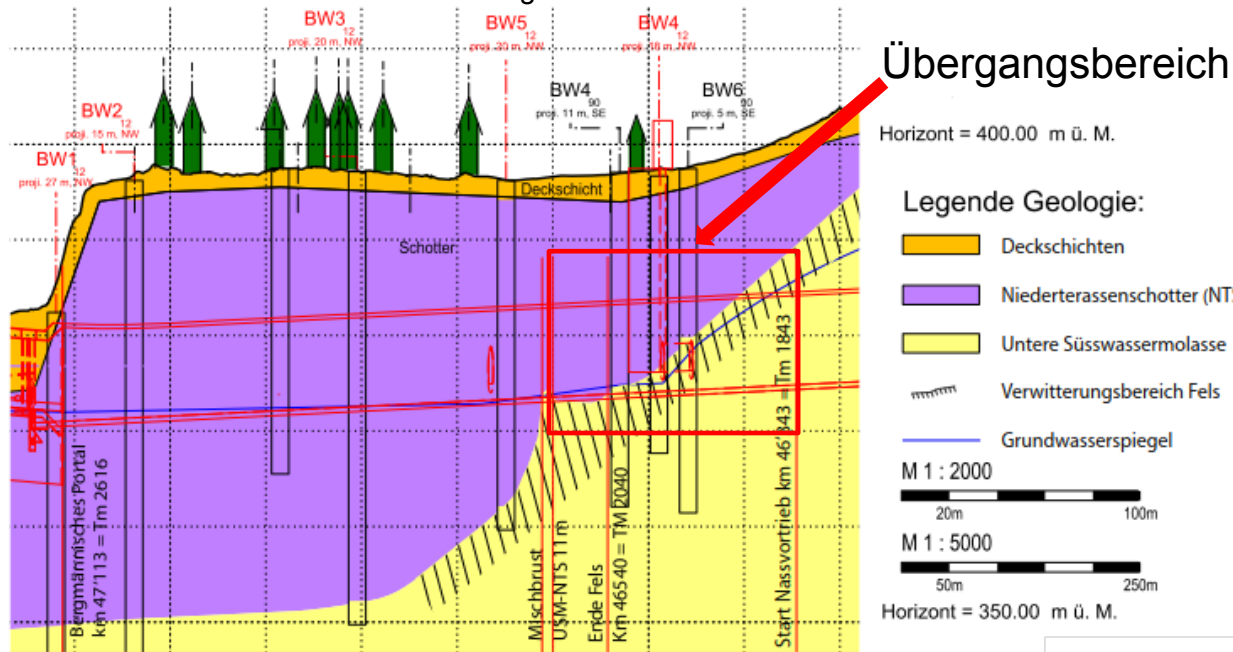
Molasse (USM)  
Sandsteine  
und Mergelsteine

Effinger-  
Mergelsteine und  
Kalksteine Flexur

# Übergangsbereich

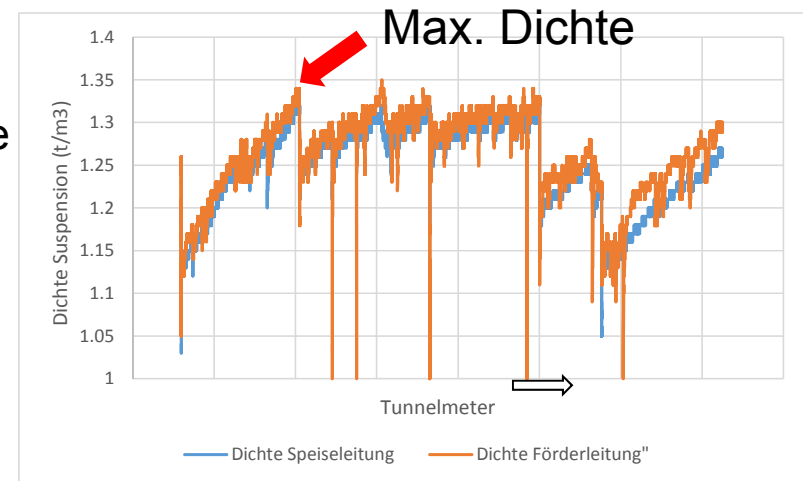
Hydroschildvortrieb über dem Grundwasserspiegel im Eppenbergtunnel:  
Unerwartete Probleme und ihre Lösung

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

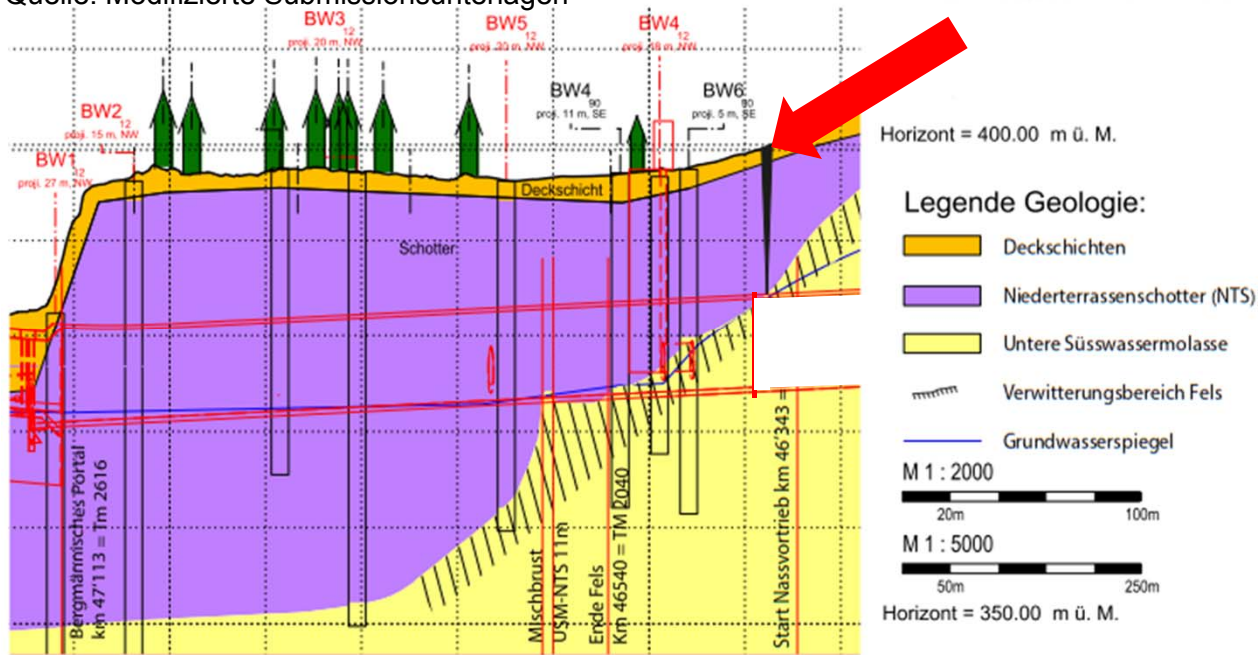
## Massnahmen:

- 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

Quelle: Modifizierte Submissionsunterlagen



## Ursache:

- Unerwartete frühes Auftreten der Niederterrassenschotter

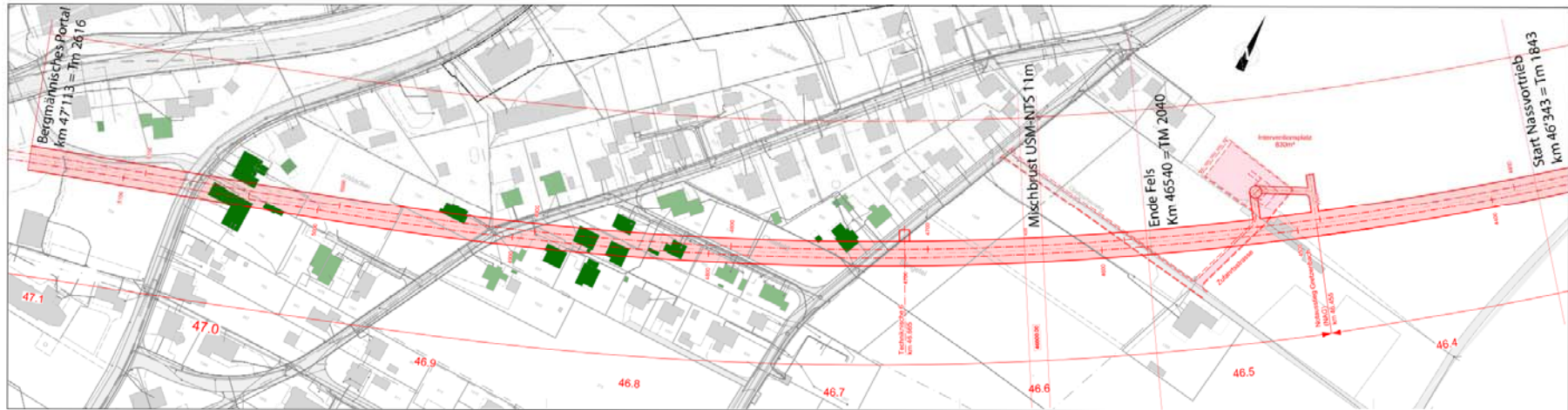
## Folge:

- Tagbruch am 02.09.2017

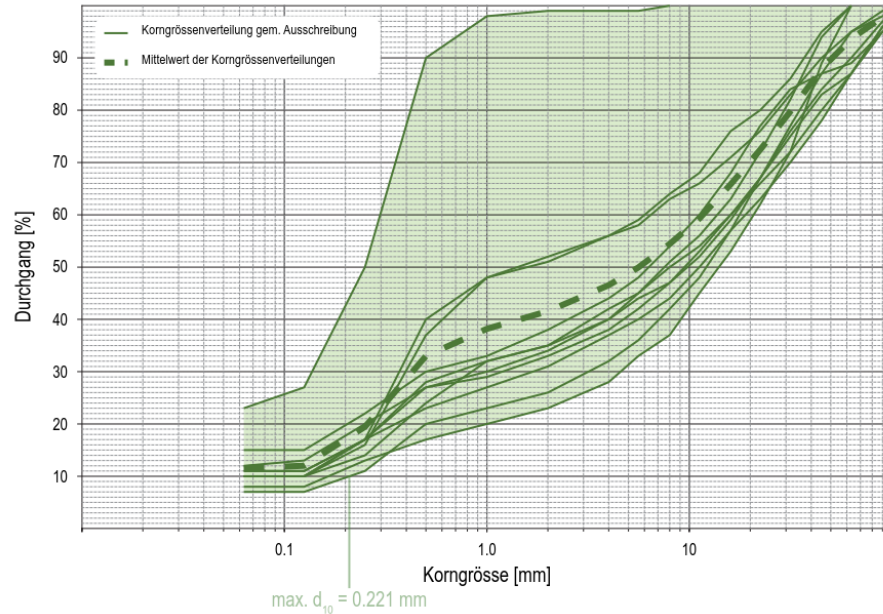


Quelle: Solothurner Zeitung, 07.09.2017

# Schottervortrieb



Korngrößenverteilungen aus Ausschreibung



## Geologie Niederterrassenschotter:

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

## Erwartete Probleme:

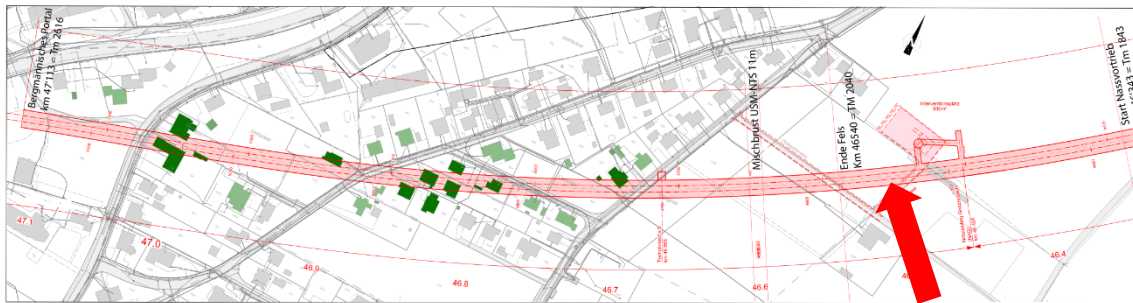
- Entweichen Druckluft bei Einstiegen

## Massnahmen:

- Vorhalten Bentonitgranulat

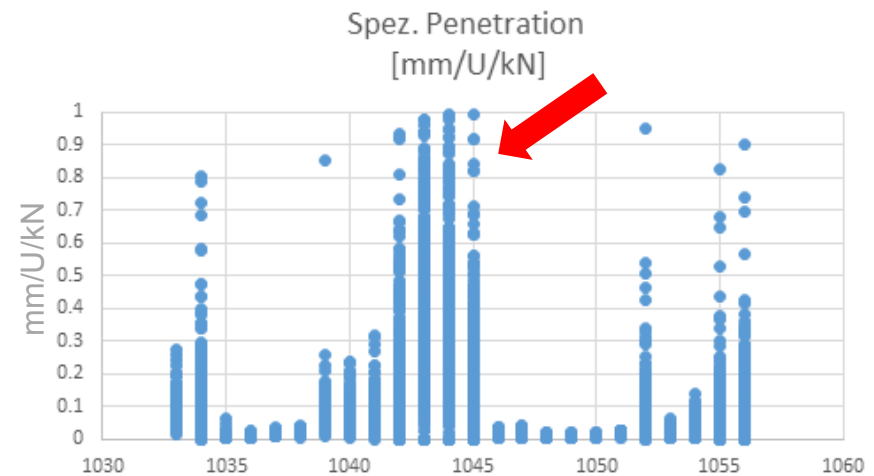
# Situation Vortrieb

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



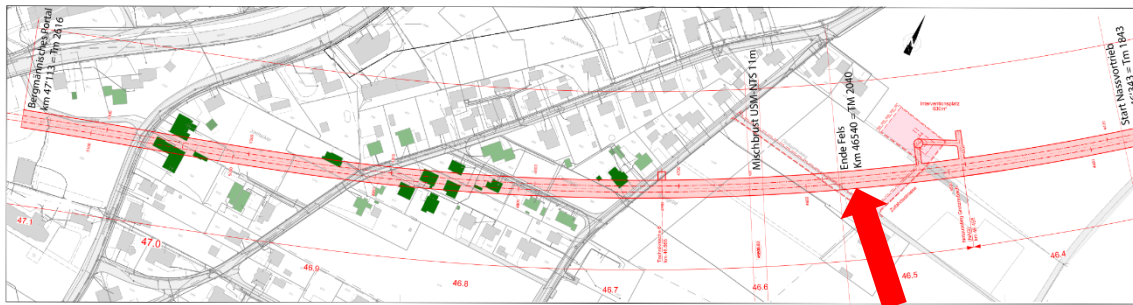
## Situation Anfang Oktober:

- 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



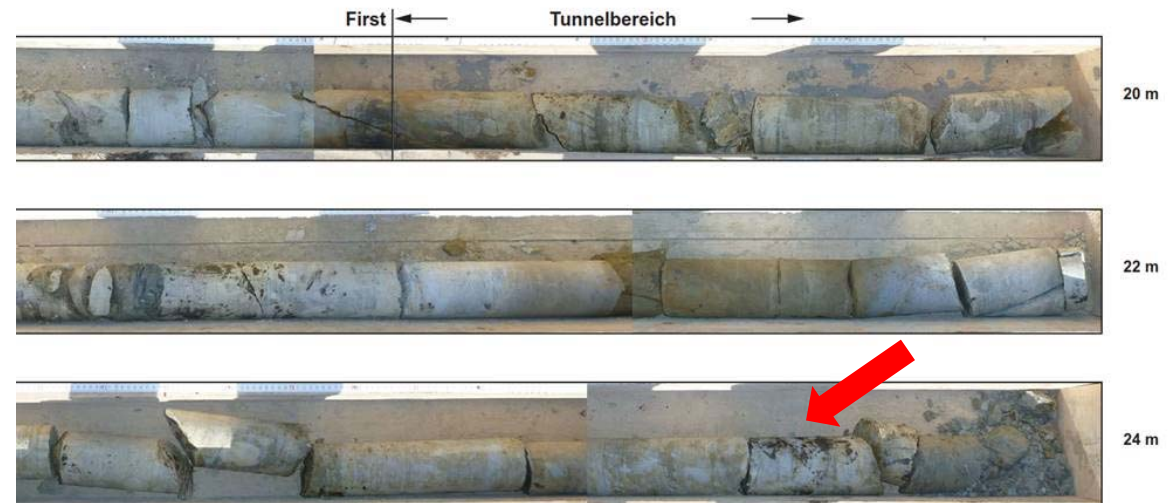
## Spekulation: Ursache der Suspensionsprobleme (Fokus auf schwarzen Schaum):

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

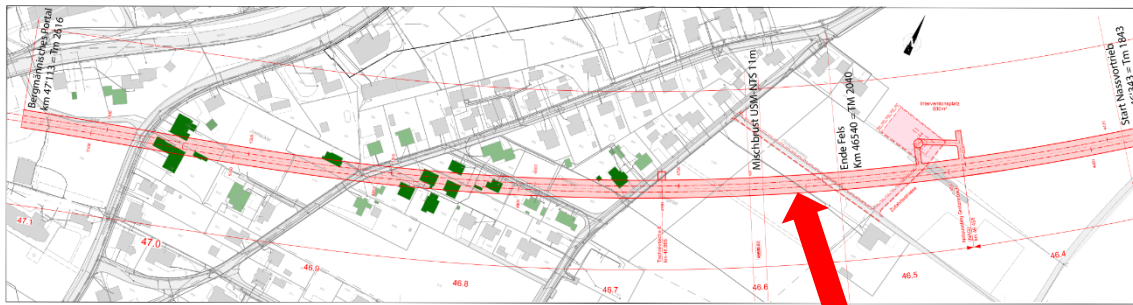
## Mögliche Herkunft des organischen Materials:

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

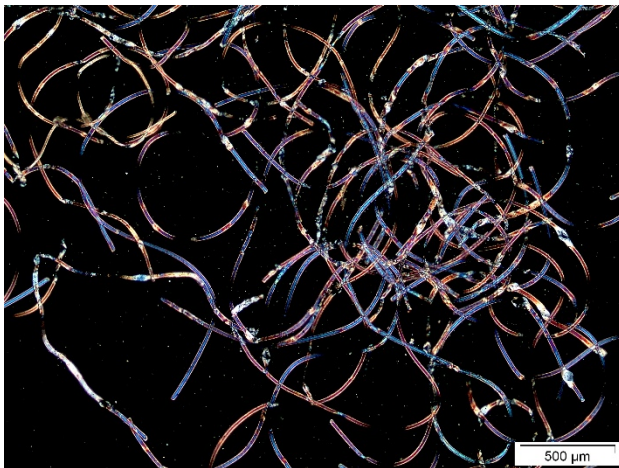
## Bohrkern aus der Molasse mit organischem Material



# Ursachenforschung



## Untersuchungsergebnisse organische Fasern aus schwarzem Schaum von Fahrbecken:



### Chemische Reaktionen:

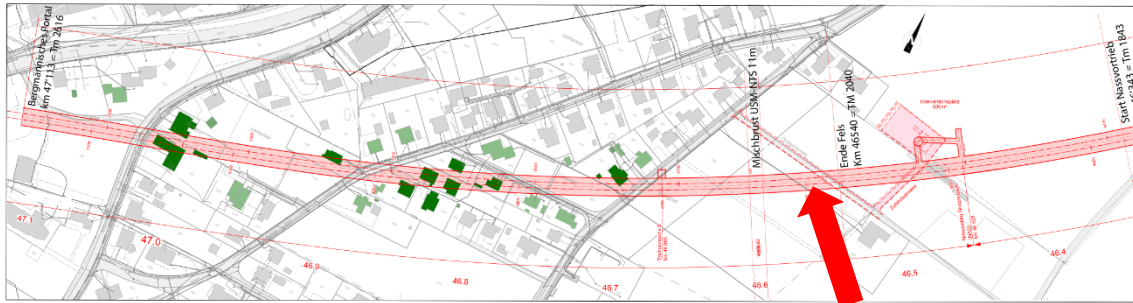
- Fasern verbrennen allerdings (= organisches Material) -> Zusammenschrumpfen
- Mikroskopieren (liefert Hinweise auf Habitus, siehe Bilder im Anhang, Rest der Bilder in separatem Mail):
- Fasern sind alle gleich dick, ca. 10 - 20 Mikrometer und haben eine glatte Oberfläche
- Fasern sind gebogen (Asbest: 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

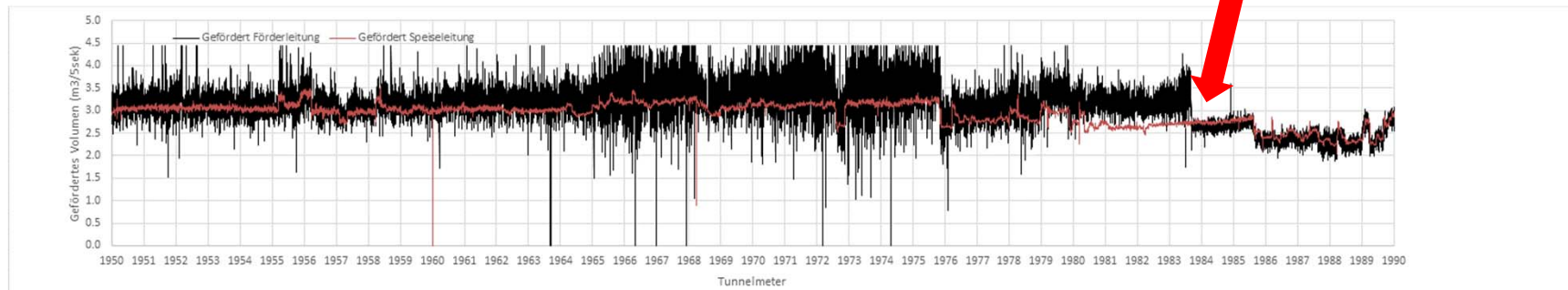


## Genauere Datenanalyse zeigt:

- Fehlerhafte Sensoren
- Fehlende Daten
- Berechnungsfehler

## Beispiel fehlerhafter Durchflussmesser:

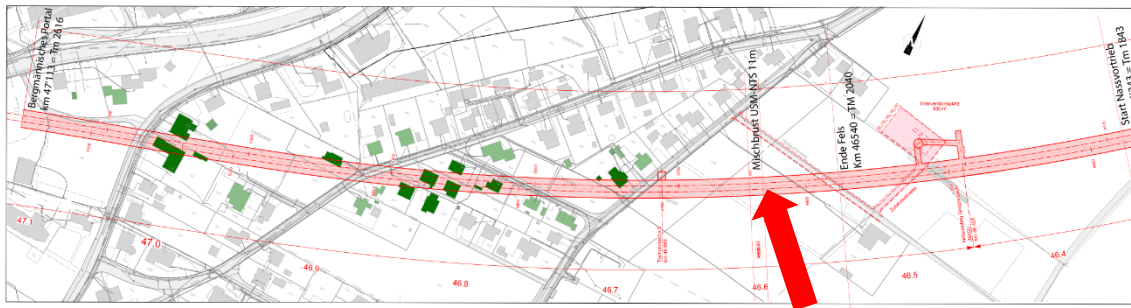
Geförderte Menge Speiseleitung > Geförderte Menge Förderleitung



**Achtung: Den Daten kann nicht immer vertraut werden!**

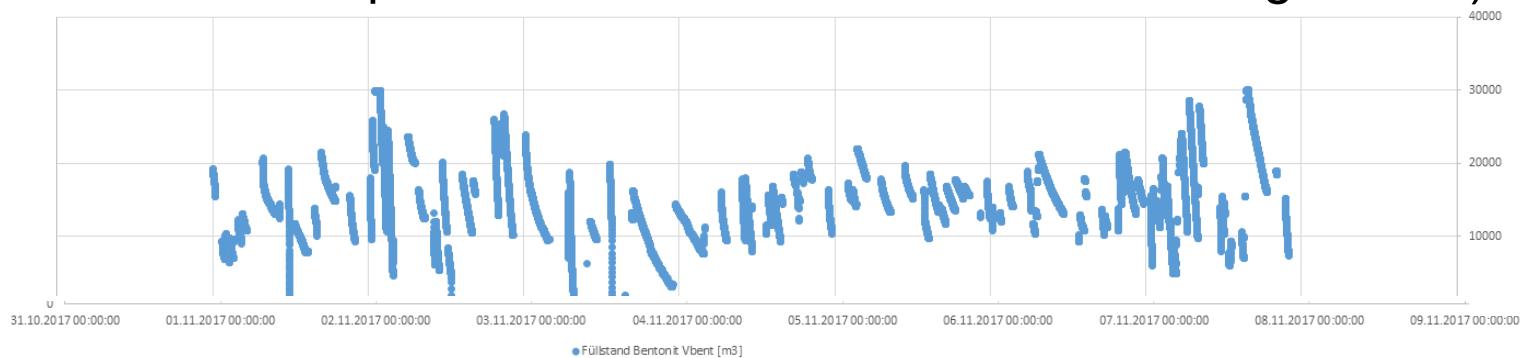
# Ursachenforschung

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

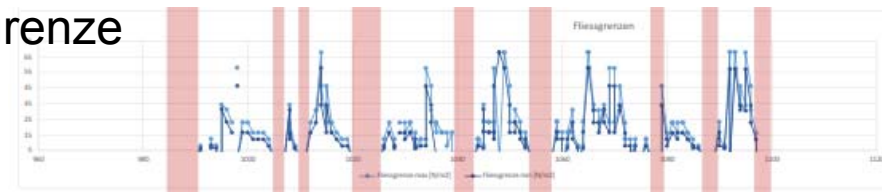
## Keine Korrelation:

- pH
- Dichte
- Temperatur

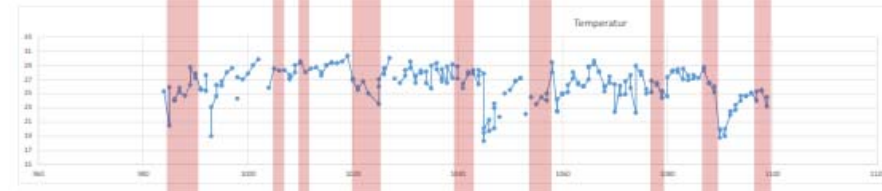
pH



Fließgrenze



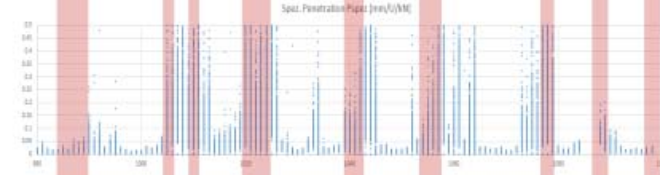
Temp



Dichte



Spez. P



Mörtel



# Theorie zu Bentonit

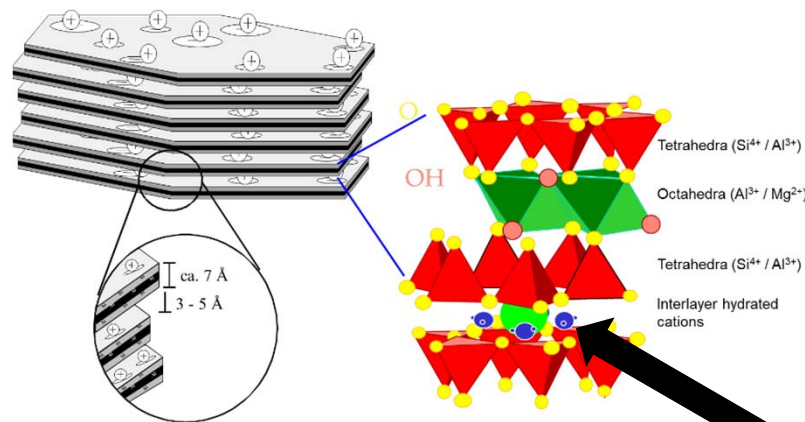
## Zusammensetzung Suspension

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 %

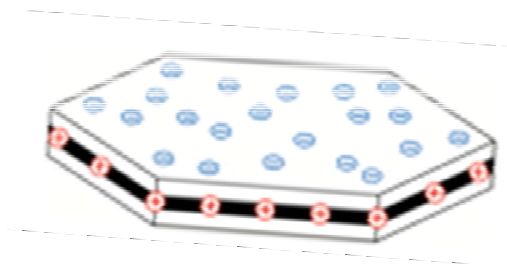
## Aufbau Tonmineral (Montmorillonit)



Quelle: Imerys

Na<sup>+</sup> oder Ca<sup>++</sup>

Kanten: Positive Ladung  
Flächen: Negative Ladung



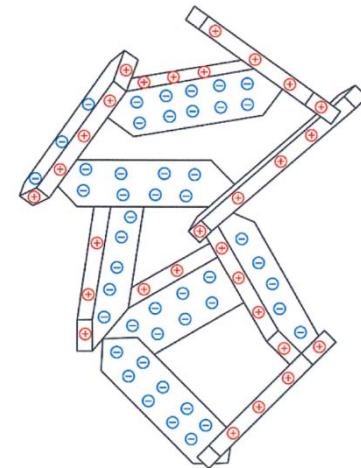
Quelle: Bentonithandbuch  
(Praetorius & Schösser, 2016)

# 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

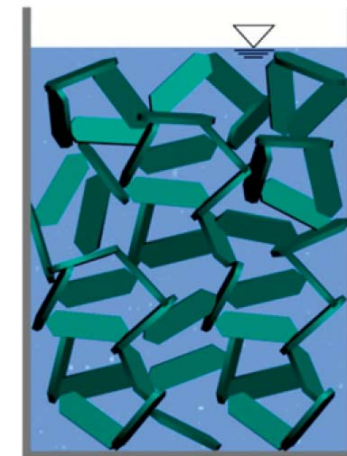
- Ursache: Kartenhausstruktur
- Sol/Gel-Umwandlung (beliebig reversibel)



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)

## 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

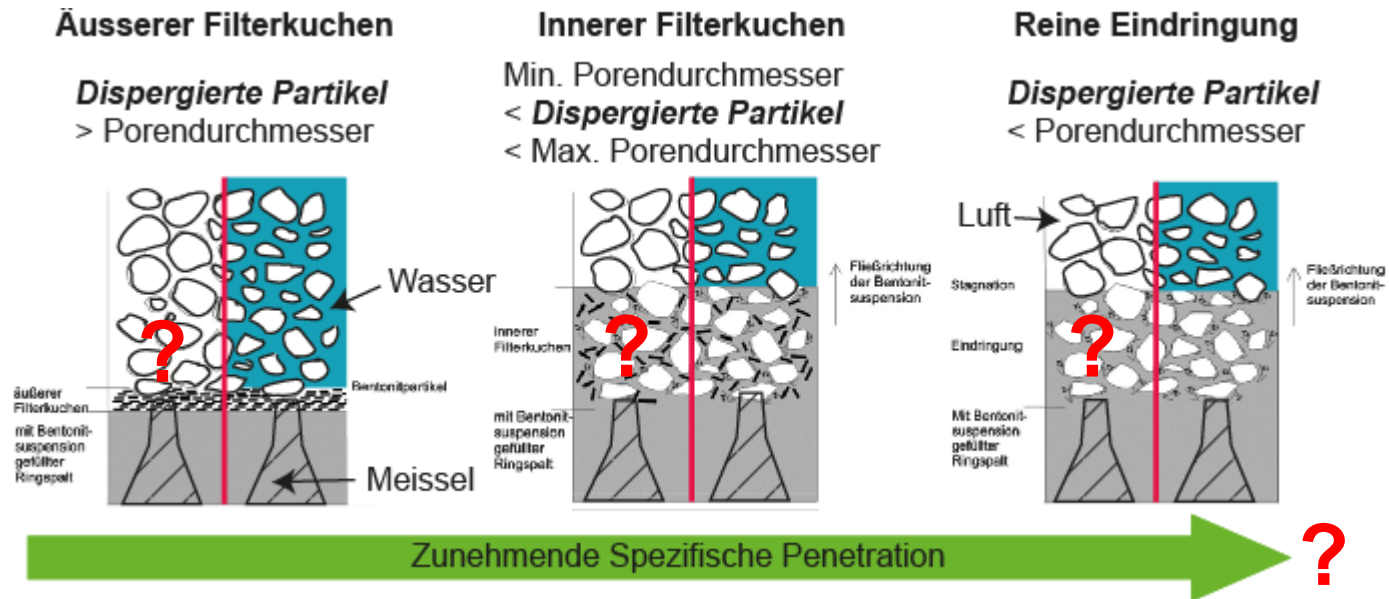
- Erhöhung Messintervall
- Zusätzliche Messungen an verschiedenen Entnahmestellen im Kreislauf
- Zusätzliche Untersuchungen (Viskosität, Methylenblau)



# 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



Modifizierte Darstellung aus Bentonithandbuch von Praetorius & Schösser (2016)

- 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 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  $\text{Na}^+$  eingelagert hat. Bei Einlagerung von  $\text{Ca}^{++}$  sind die tixotropen Eigenschaften schlechter.

## Massnahme:

Zugabe von SODA ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) puffert  $\text{Ca}^{++}$ , was möglicherweise aus dem Grundwasser oder dem Mörtel stammt.

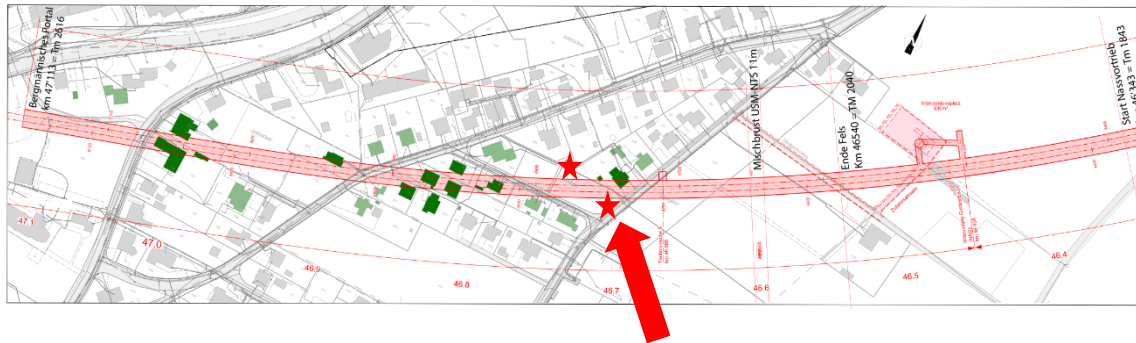
# Ursache Mörtel

## AHA-Erlebnis am 23.11.17

- Massiver Mörtel eintrag in den Bentonit,
- Bentonit wird dadurch kurzfristig dickflüssiger
- Das  $\text{Ca}^{++}$  kommt aus dem Mörtel!
- Pufferung  $\text{Ca}^{++}$  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

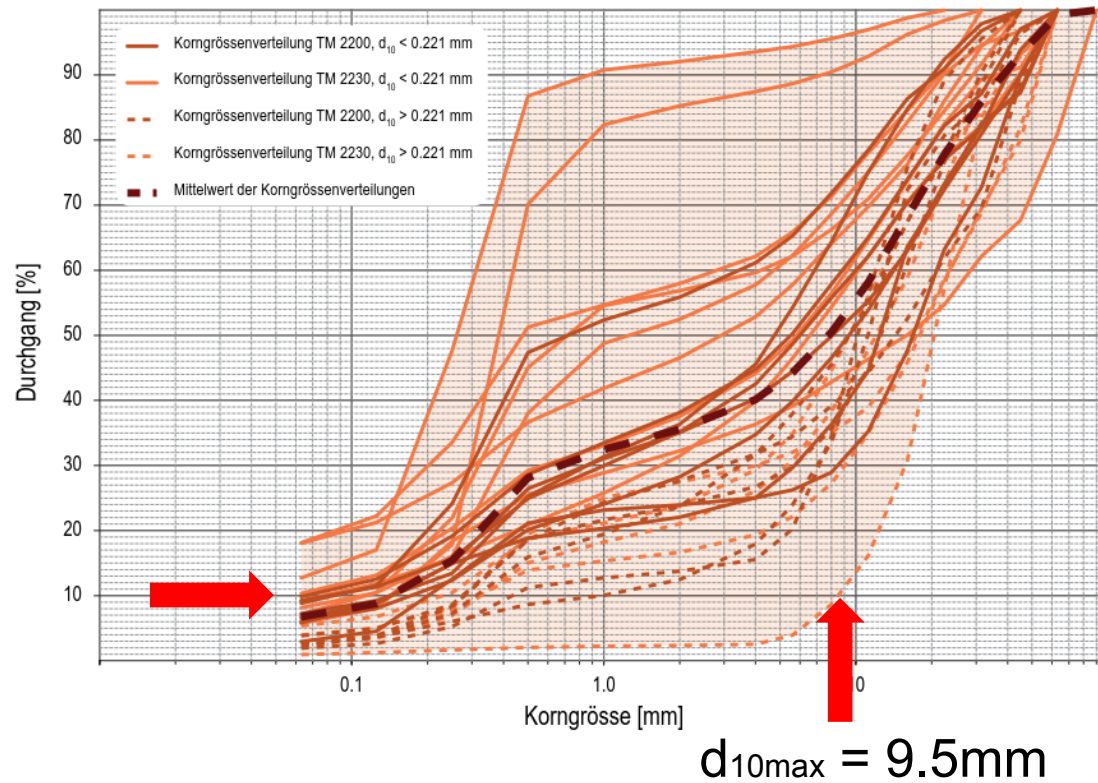
## Problematik: Probenahme aus Kernbohrung

- Ausschlagen Material aus Kernrohr:  
Probenahme vermischt unterschiedliche Lagen



# Ursache Boden

## IST-Kornverteilung Kernbohrproben



### Entscheidender Wert:

$d_{10}$  = Korngrösse bei 10% Massenanteil

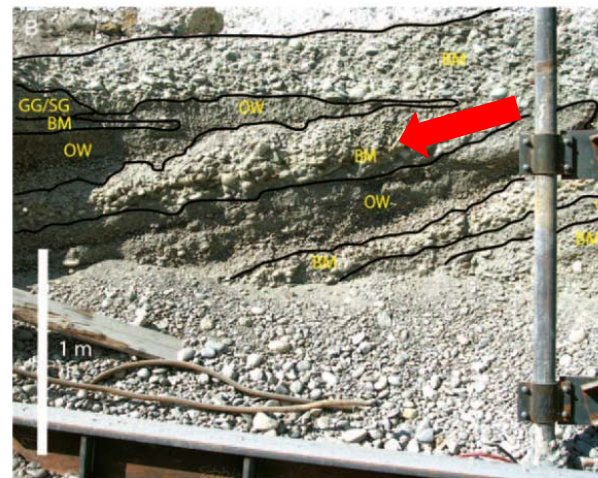
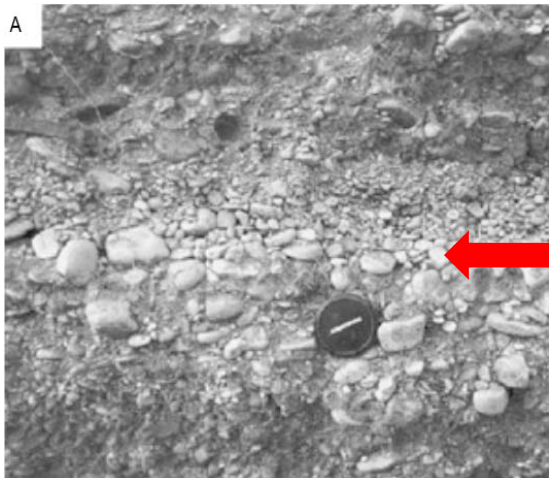
### Problematik:

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  $d_{10}$ -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,  $\Delta p$  die Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende der Eindringtiefe und  $\tau_F$  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



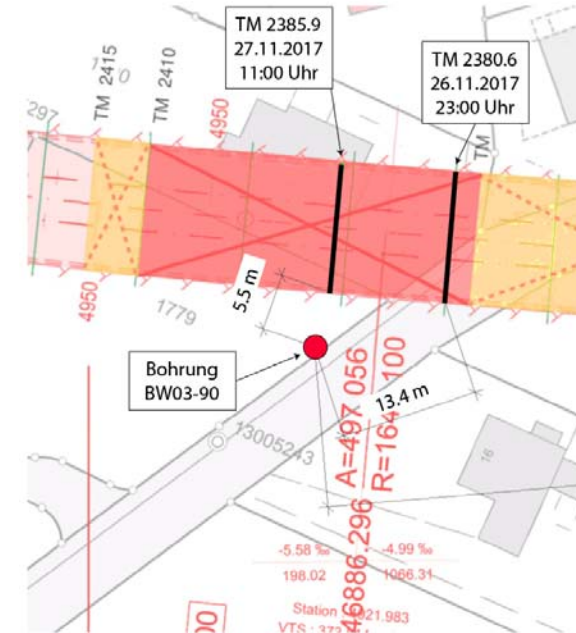
Mineralphase	Relativer Anteil		
	14.8 m	17.0 m	17.8 m
Tiefe	14.8 m	17.0 m	17.8 m
Illit/Muskovit/Biotit	65	41	42
<b>Smektit</b>	<b>11</b>	<b>39</b>	<b>43</b>
Kaolinit	1	2	3
Chlorit	24	19	13
Summe Schichtsilikate	100	100	100

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

$a = 13.4\text{m}$

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

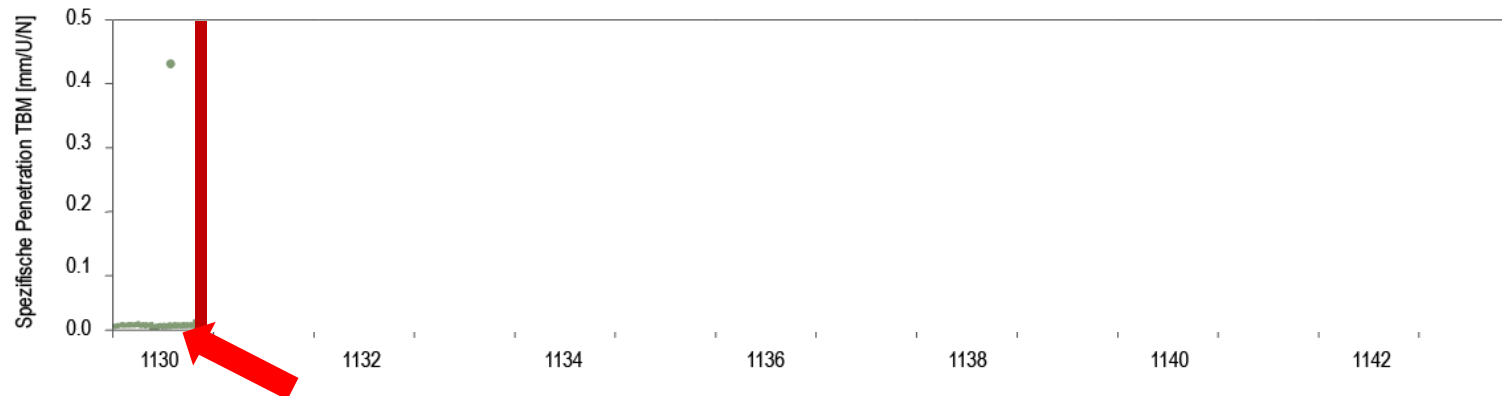
$a = 5.5\text{m}$

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

# Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1130

Schotter mit breiter Korngrößenverteilung im Tunnelquerschnitt

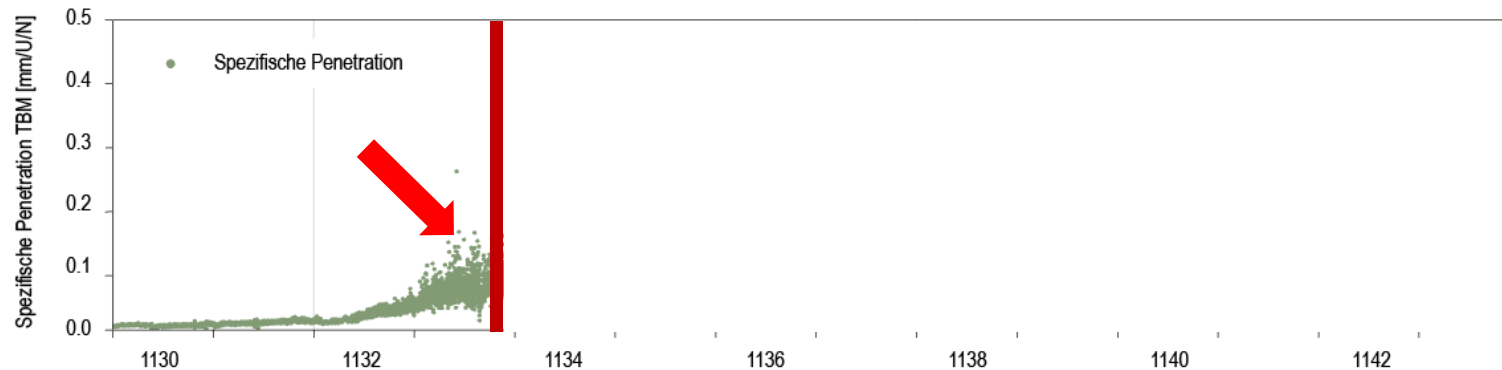
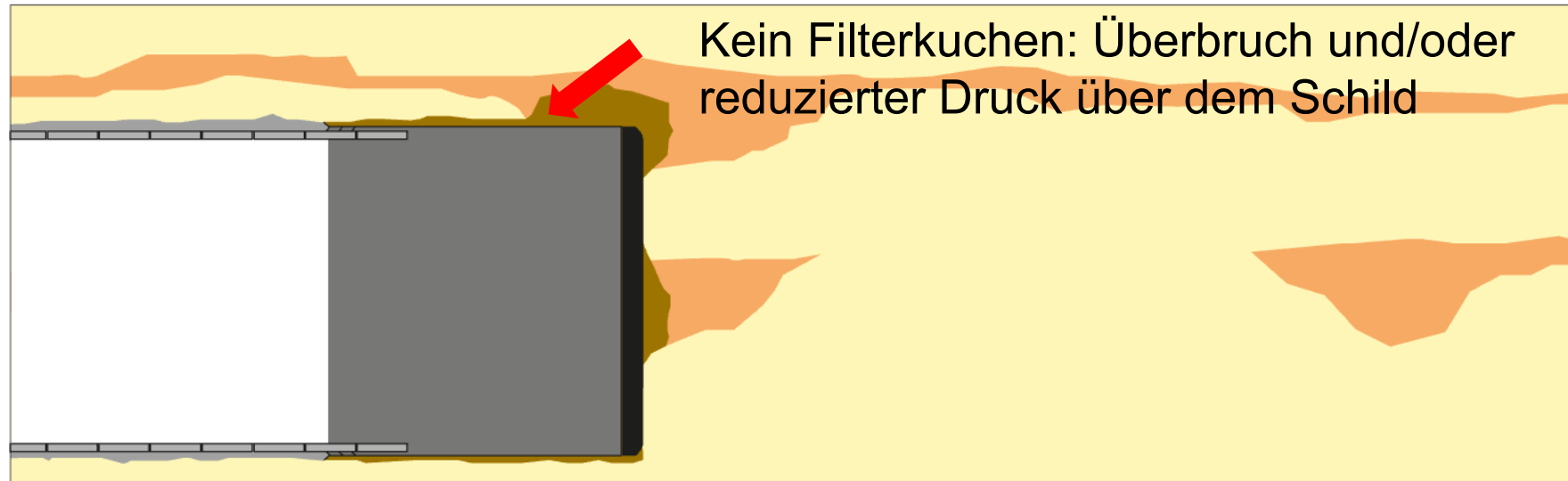


Vortrieb mit intakter Suspension, tiefe Spezifische Penetration

# Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1133

Open Gravel Framework-Schicht im Tunnelquerschnitt

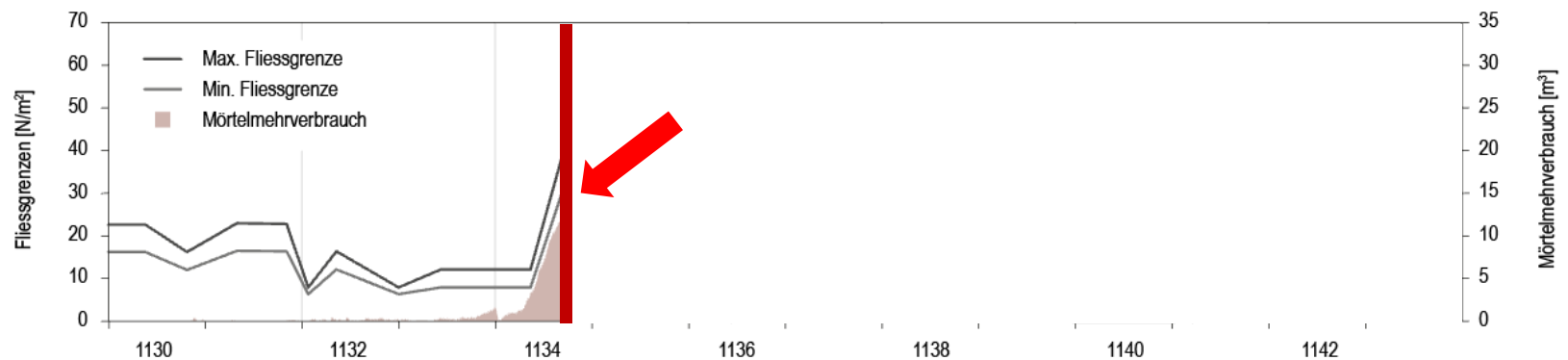
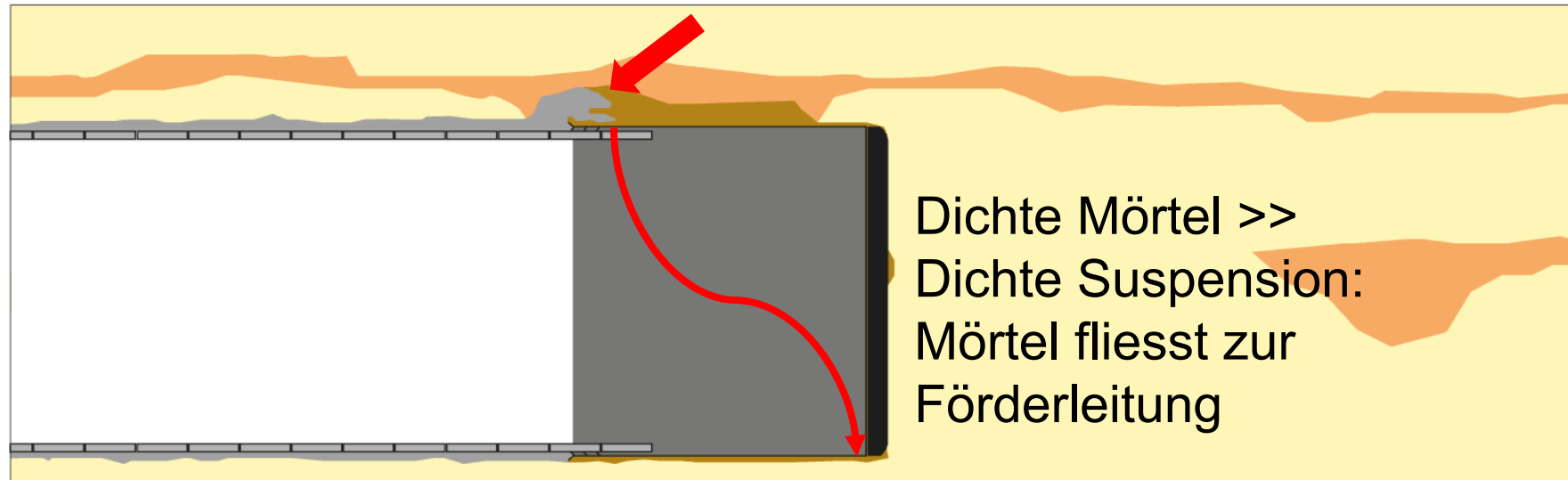


Spezifische Penetration steigt an. Fließgrenze ok.

# Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1134

Mörtel überströmt aussenliegende Schildschwanzdichtung

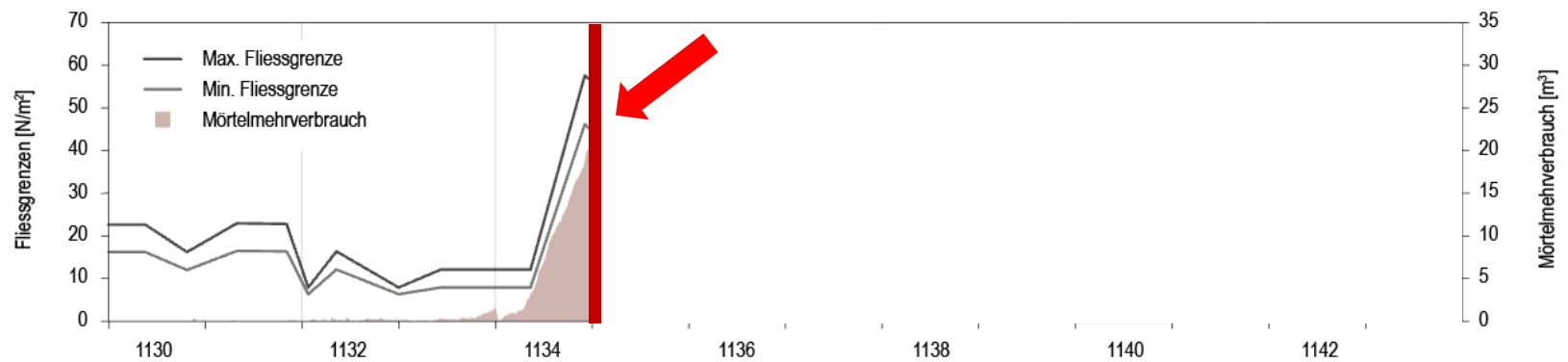
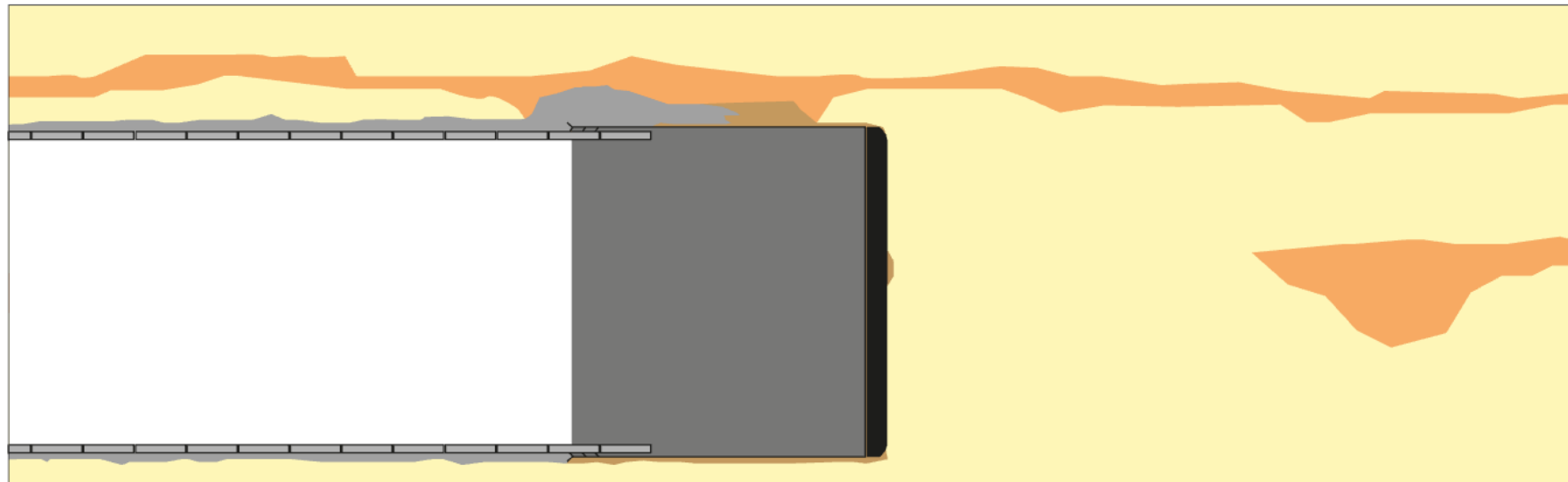


Mörtelverbrauch steigt an, Fließgrenze steigt an

# Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1135

Mörtel vermischt sich mit der Suspension

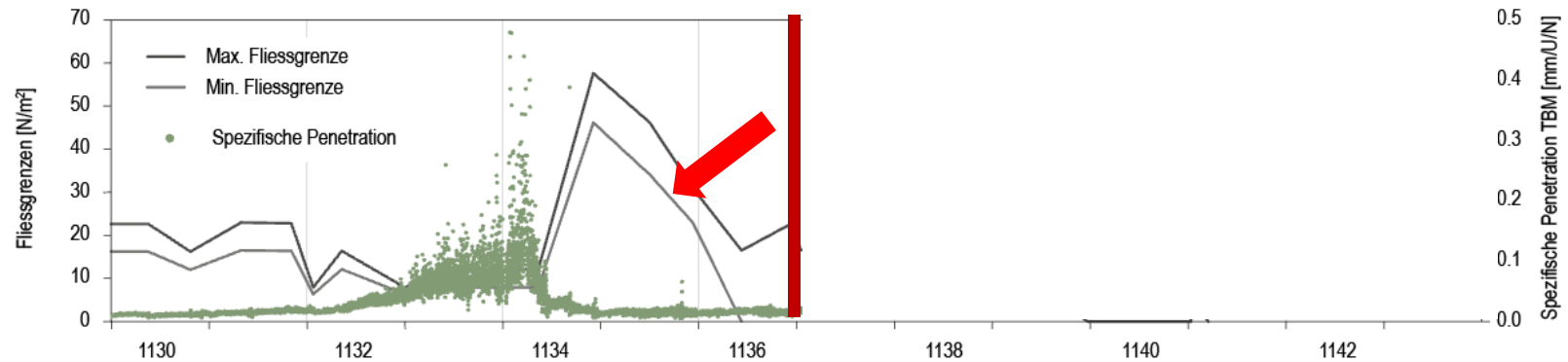
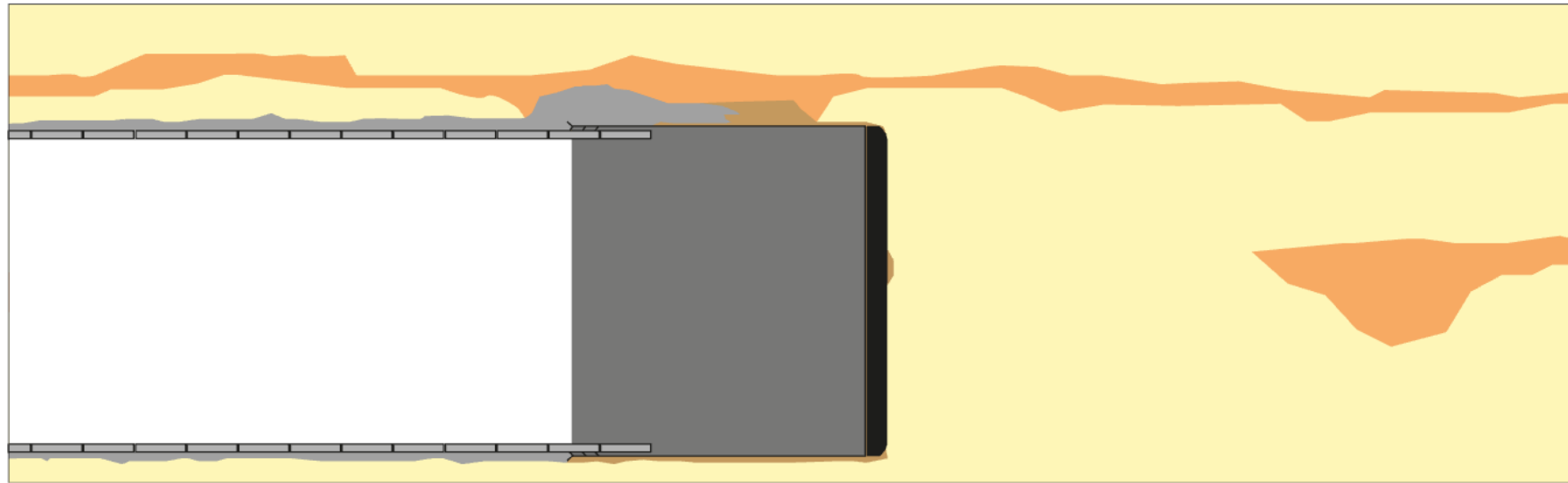


Fließgrenze und Mörtelverbrauch erreichen Maximum

# Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1136

Ca<sup>++</sup> ersetzt Na<sup>+</sup> im Bentonit, Rückgang Fließgrenze

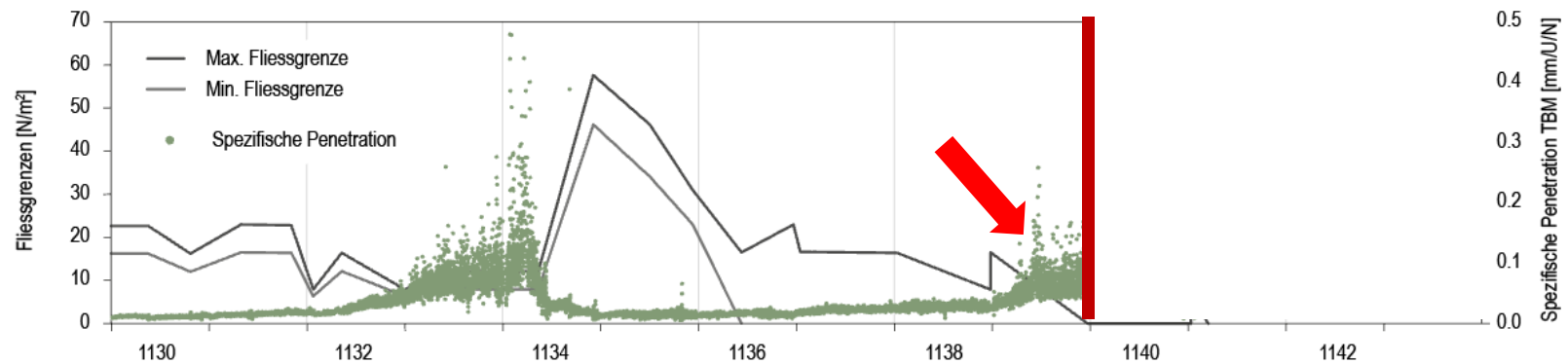
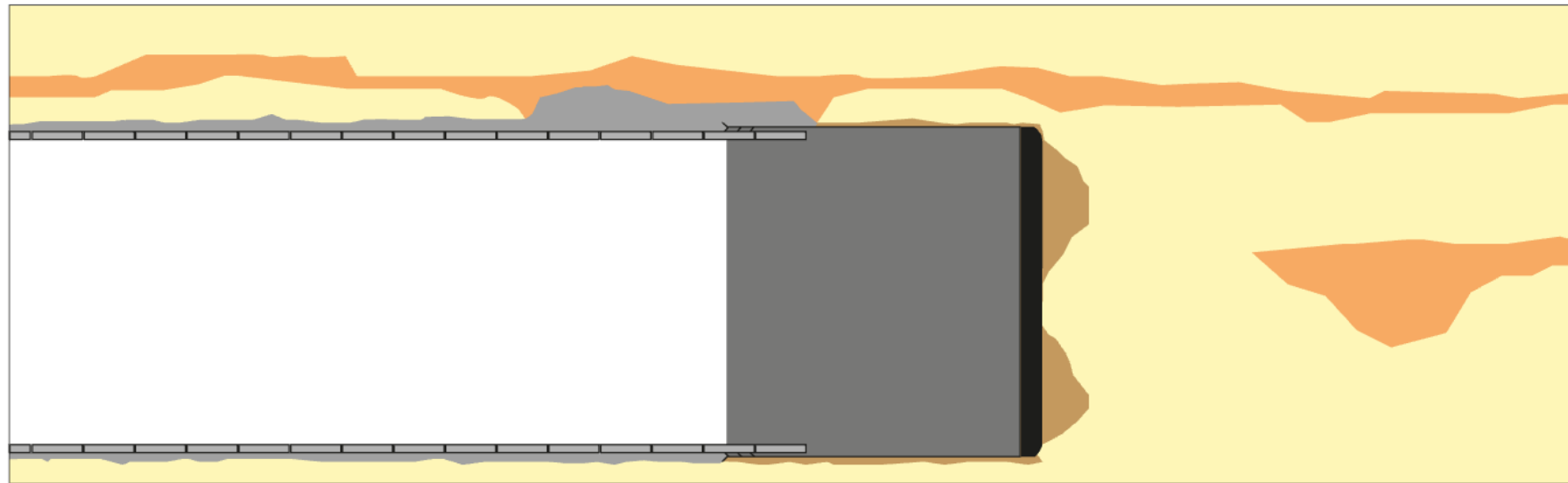


Fließgrenze fällt stark ab. Spezifische Penetration normal

# Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1139

Entnahme Bentonit aus Kreislauf, Fließgrenze nicht mehr messbar

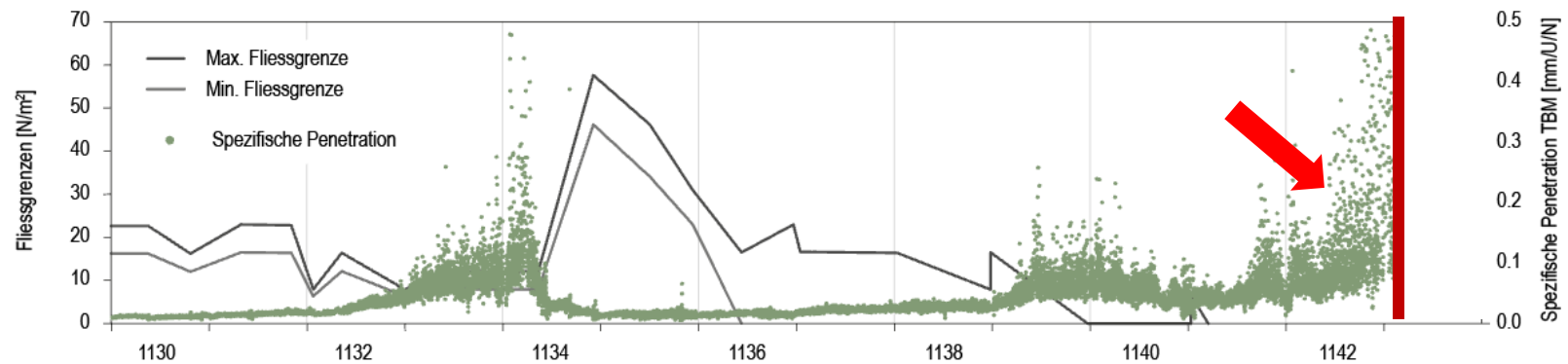
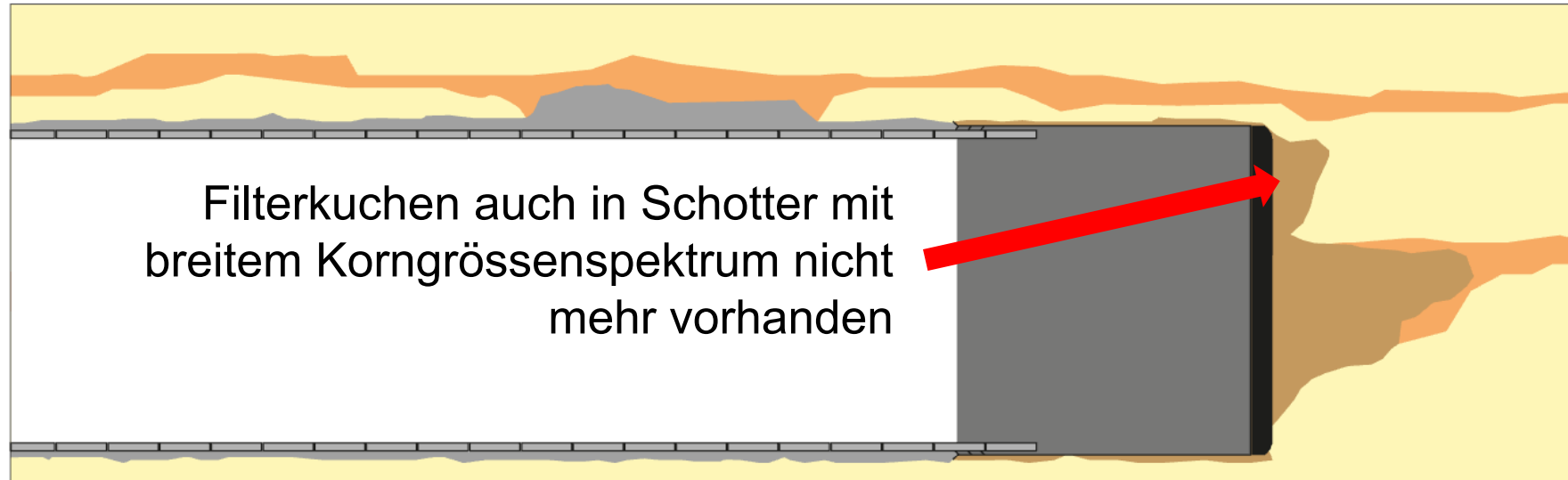


Spezifische Penetration steigt an.

# Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1143

Bentonit verliert tixotrope Eigenschaften, wird dem Kreislauf entnommen.



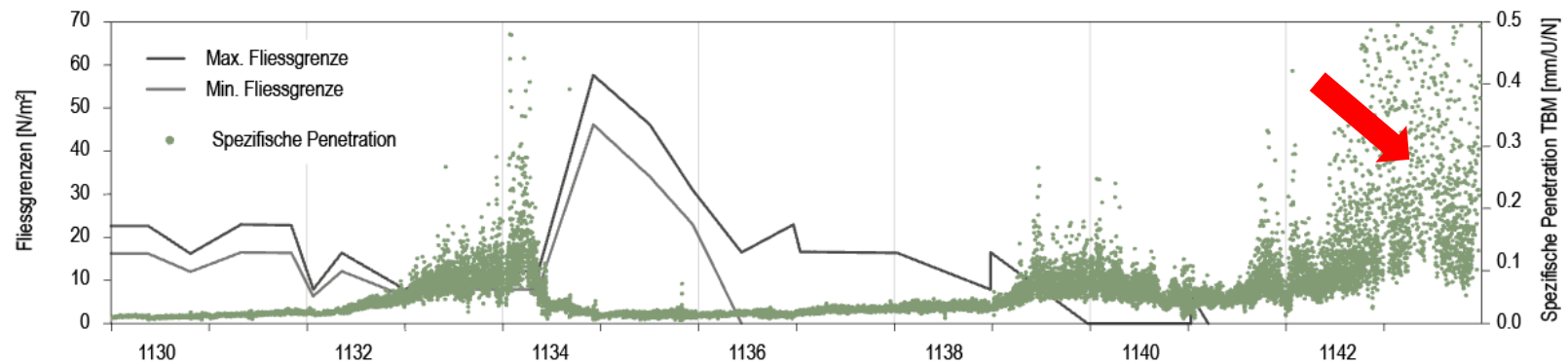
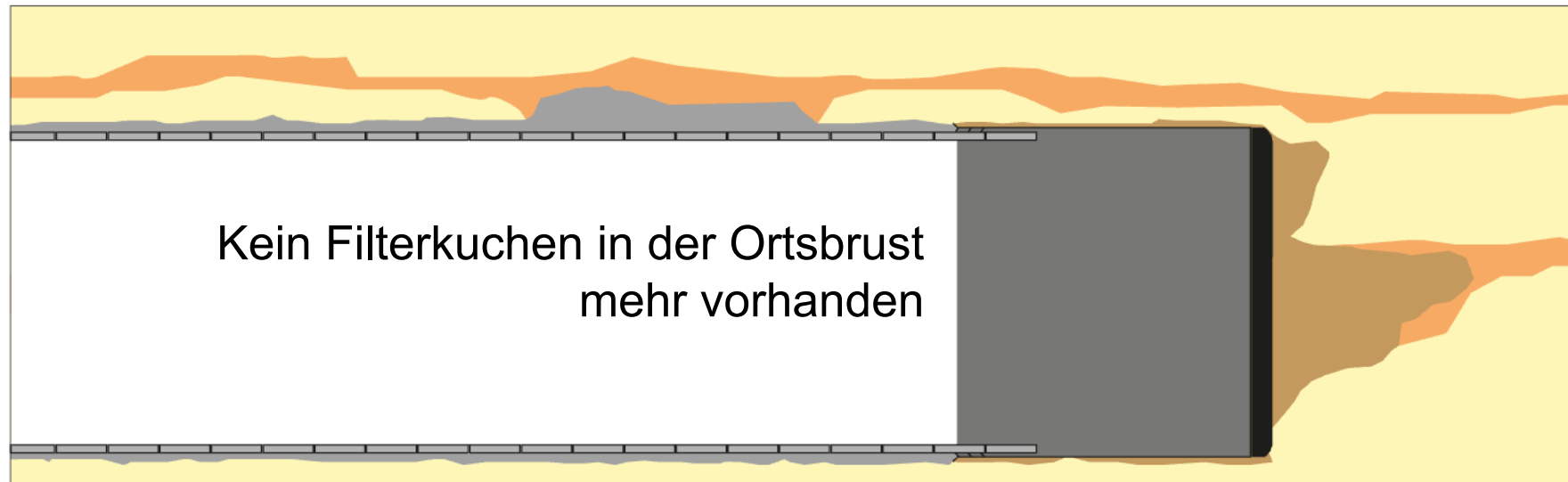
Spezifische Penetration steigt weiter an.



# Wirkmechanismus

Beispiel Vortriebsnummer 1030 – 1043: Stand Ring 1143

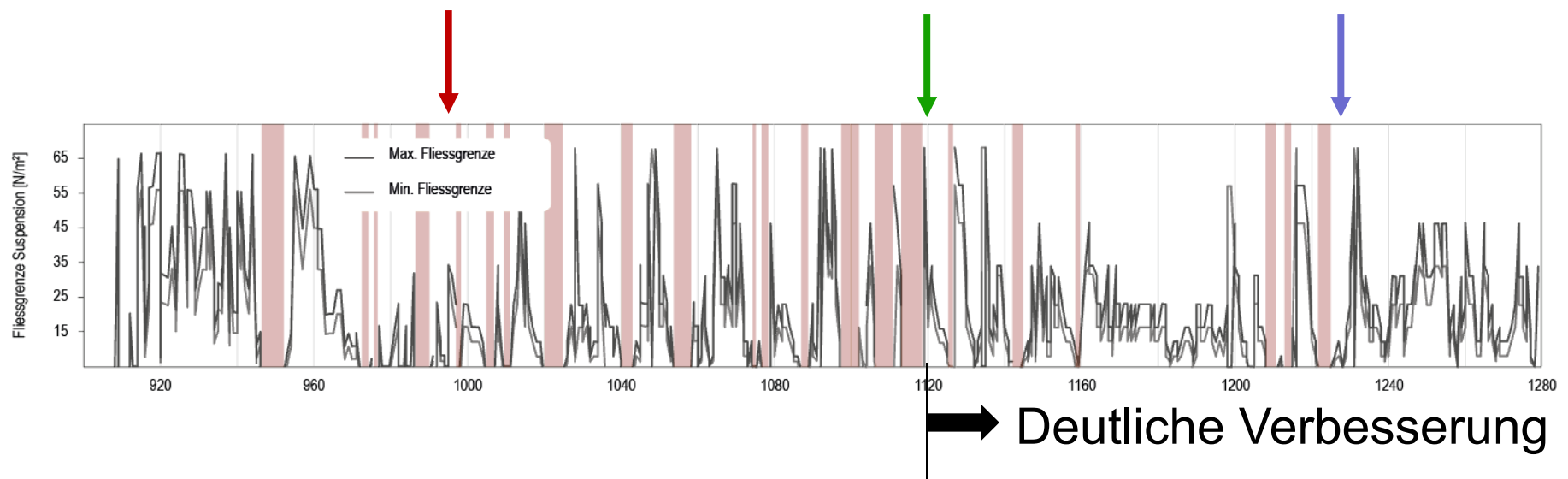
Suspension = Polymersuppe ohne Bentonit



Spezifische Penetration erreicht Max.

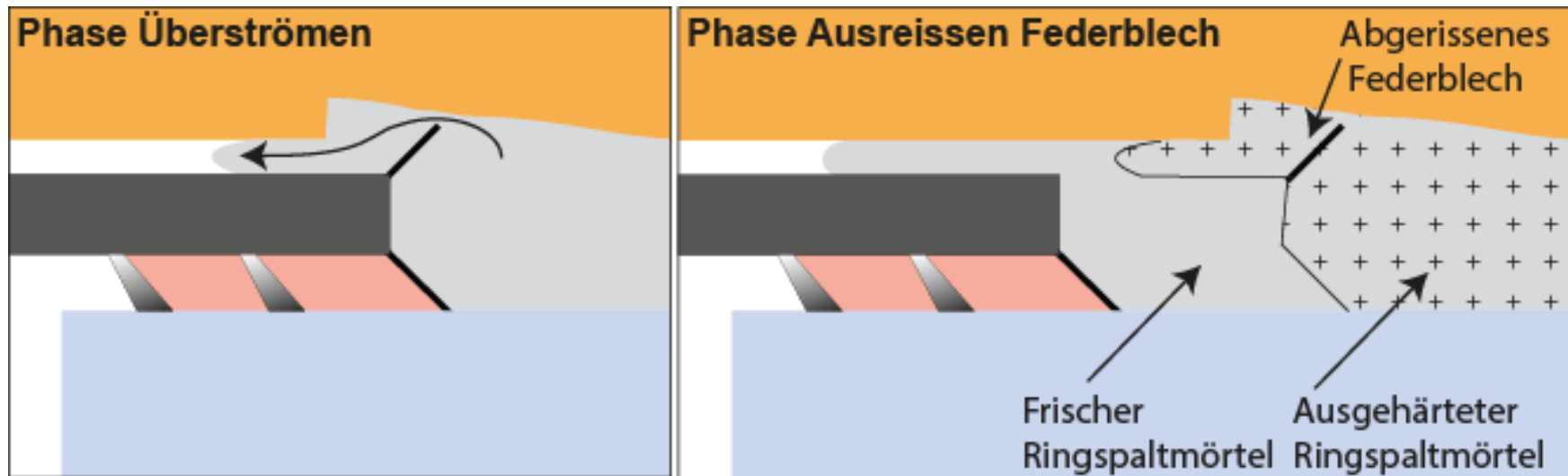
# Wirkung Massnahmen

- Zugabe von **Polymer** zur Stabilisierung der Bentonitsuspension, ab 19.10.2017
- Zugabe von **Sodaasche ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )** zur Pufferung von freien Calcium-Ionen, ab dem 15.11.2017
- Systematischer **Suspensionswechsel** 100 m<sup>3</sup> pro Vortrieb + 300 m<sup>3</sup> 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

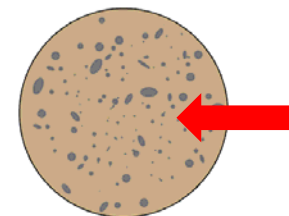
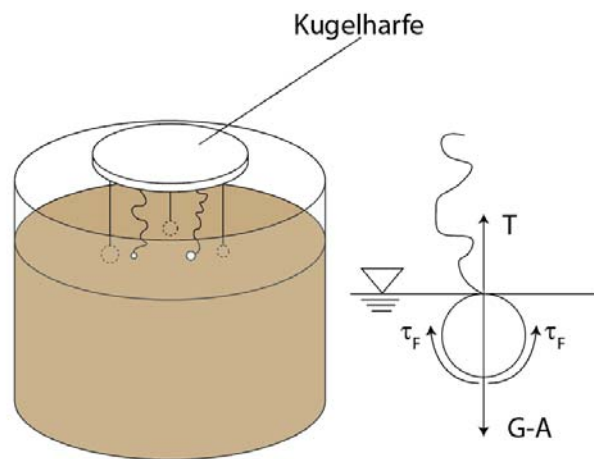
## Weitere Folgen durch den Abfall der Fließgrenze

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

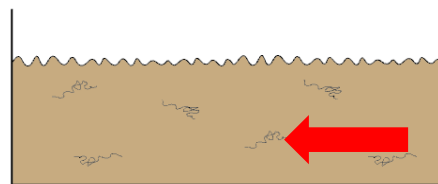
Fließgrenze  
≈  
Tragfähigkeit

Hohe Fließgrenze  
=  
Gute Tragfähigkeit

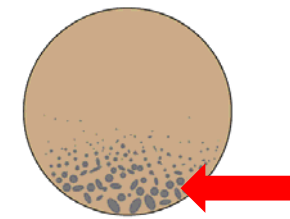
Niedrige Fließgrenze  
=  
Keine Tragfähigkeit



Kies in Schwebelag



Fettfasern in Schwebelag

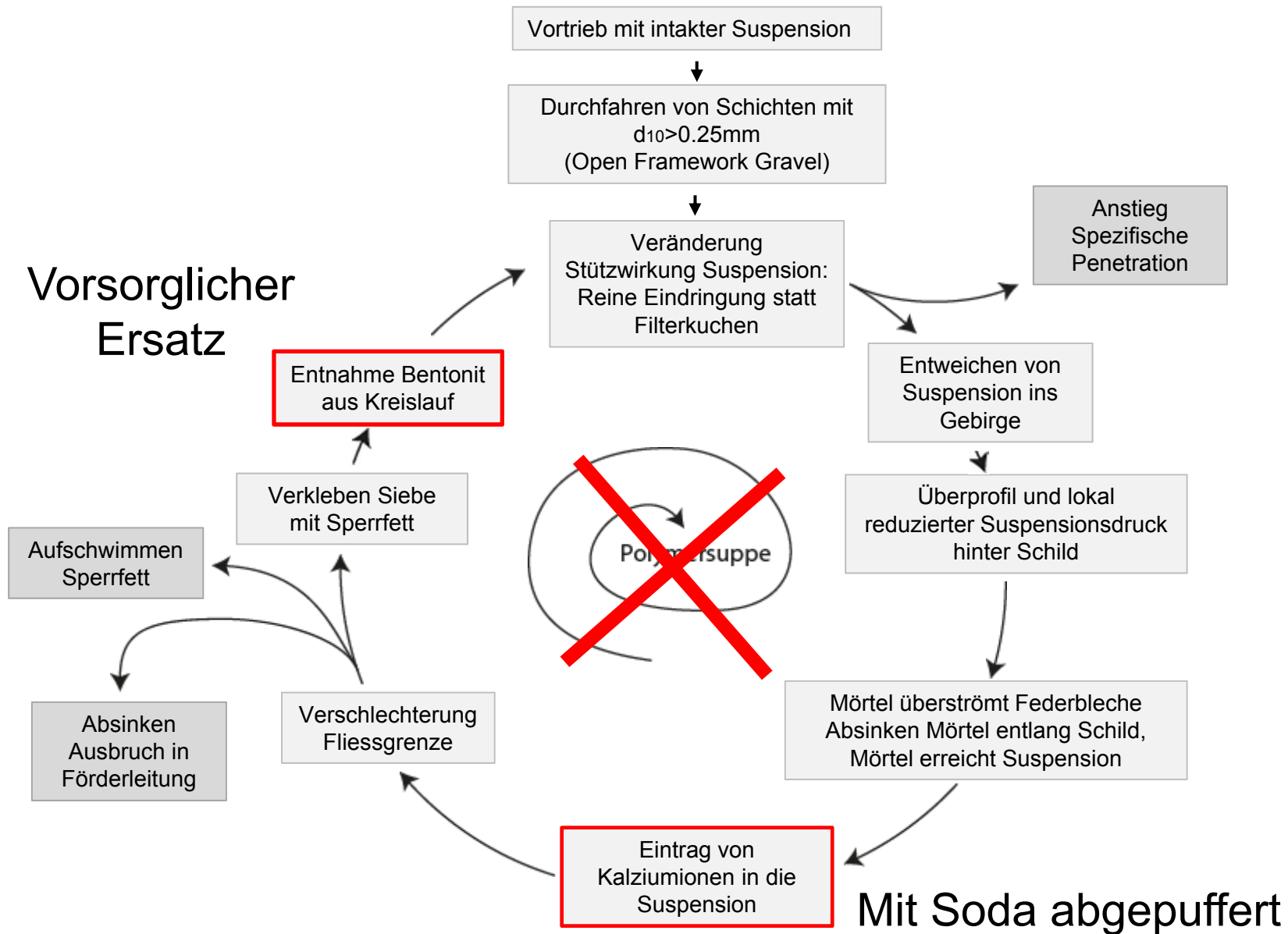


Kies absinkend



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**