

Verklebung bei TVM-Vortrieben in veränderlich festen Gesteinen

Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke

Dr.-Ing. E. h. Martin Herrenknecht

Zusammenfassung

Mittelplastische und ausgeprägt plastische Tone neigen insbesondere bei steifer und halbfester Konsistenz zur Verklebung. Das führt beim Einsatz von EPB-Maschinen im geschlossenen und halboffenen Modus zu Verklebungen der Schälmesser, der Disken und der Förderschnecken. Daraus können sich Behinderungen und deutliche Verringerungen der Vortriebsleistungen ergeben. Zu dieser Fragestellung liegen Erfahrungen und die Ergebnisse verschiedener Forschungsarbeiten vor.

Beim Vortrieb des Fildertunnels für das Projekt Stuttgart 21 traten unerwartet Verklebungen beim Vortrieb in den Tonsteinen der Stubensandsteinformation des Keupers auf. Bei dieser Schicht handelt es sich um ein veränderlich festes Gestein, wie sie in Südwestdeutschen Mittelgebirgen in den Formationen des Keupers sowie des Schwarzen und Braunen Juras häufiger auftreten.

Deshalb haben sich die Autoren mit diesem Thema etwas intensiver auseinandergesetzt und berichten nachstehend über die Ergebnisse der Arbeiten.

1. Einführung

Mittelplastische und ausgeprägt plastische Tone neigen insbesondere bei steifer und halbfester Konsistenz zur Verklebung. Das führt beim Einsatz von EPB-Maschinen im geschlossenen und halboffenen Modus zu Verklebungen der Schälmesser, der Disken und der Förderschnecken. Daraus können sich Behinderungen und deutliche Verringerungen der Vortriebsleistungen ergeben. Zu dieser Fragestellung liegen Erfahrungen und die Ergebnisse verschiedener Forschungsarbeiten vor (Schlick 1989, Thewes 1999, Feinendegen & Ziegler & Weh & Spagnoli 2011, Ziegler & Feinendegen & Englert 2015).

Beim Vortrieb des Fildertunnels für das Projekt Stuttgart 21 traten unerwartet Verklebungen beim Vortrieb in den Tonsteinen der Stubensandsteinformation des Keupers auf. Bei dieser Schicht handelt es sich um ein veränderlich festes Gestein, wie sie in Südwestdeutschen Mittelgebirgen in den Formationen des Keupers sowie des Schwarzen und Braunen Juras häufiger auftreten.

Deshalb haben sich die Autoren mit diesem Thema etwas intensiver auseinandergesetzt und berichten nachstehend über die Ergebnisse der Arbeiten.

2. Fildertunnel

Die zwei eingleisigen Röhren des ca. 9,5 km langen Fildertunnels führen vom neuen Hauptbahnhof in Stuttgart auf die Filderebene in den Bereich des Stuttgarter Flughafens (Bild 1). Der Tunnel durchörtert am Filderportal beginnend Ton- und Kalksandsteine des Schwarzen Juras und dringt über die Schicht des Räts in die Tonsteine des ebenfalls zur Formation des Keupers gehörenden Knollenmergels ein.

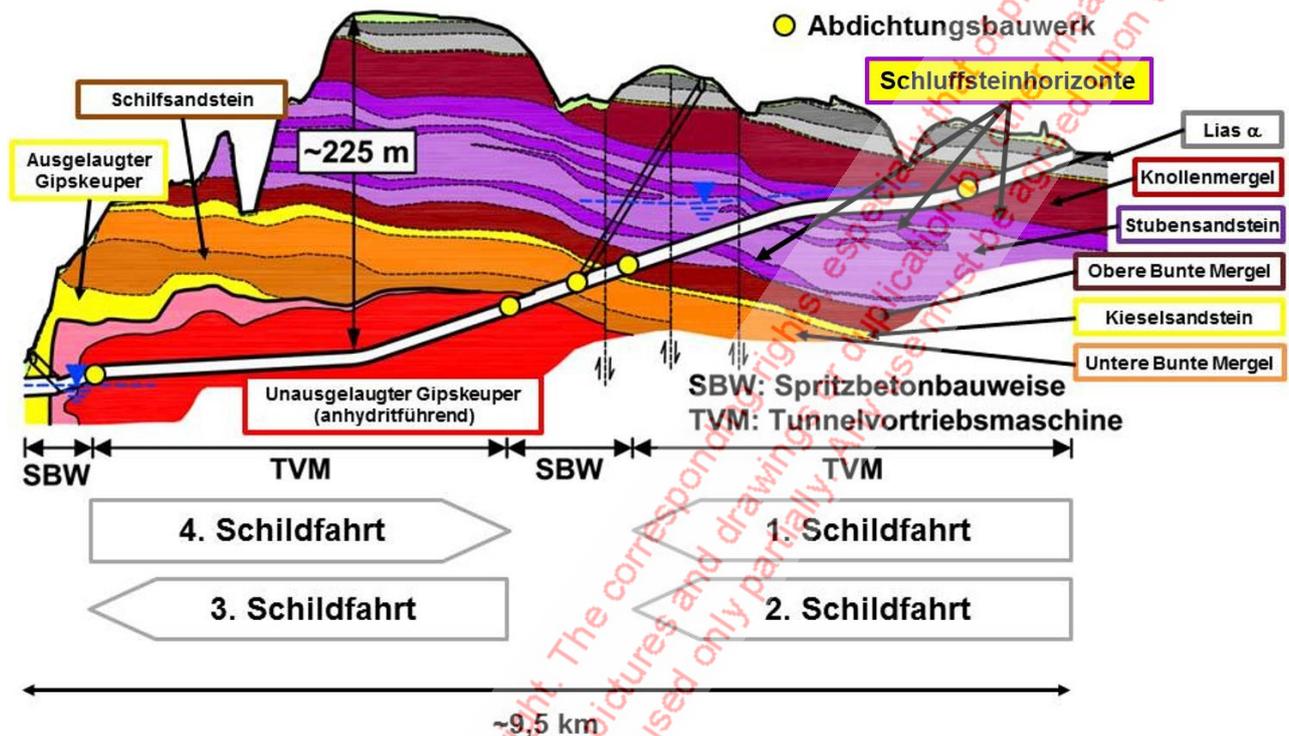


Bild 1: Fildertunnel, Längsschnitt

Darauf folgt der Stubensandstein, in den 4 Schluffsteinhorizonte eingelagert sind. Darunter stehen die Tonsteine der Oberen und Unteren Bunten Mergel an, die durch die Schicht des Kieselsandsteins voneinander getrennt sind. Den Übergang zum Gipskeuper, in dem die untere Hälfte des Fildertunnels liegt, bildet der Schilfsandstein.

Bei den Tonsteinen des Schwarzen Juras, des Knollenmergels, des Stubensandsteins sowie der Oberen und Unteren Bunten Mergel handelt es sich um veränderlich feste Gesteine, die im Wesentlichen nur durch die geologische Vorbelastung verfestigt worden sind. Nach Geyer und Gwinner (Geyer & Gwinner 1991) war der Stuttgarter Raum in geologischen Zeiten von den Schichten des Schwarzen, des Braunen und des Weißen Juras überlagert. Das entsprach auf der Filderebene einer geologischen Vorlast von ca. 650 m Höhe.

Dass Lasten dieser Größe zu einer Verfestigung von Tonen führen, kann eindrucksvoll gezeigt werden, wenn man Bentonitpulver in eine Stahlform füllt und über einen Stahlkolben mit einer Baustoffprüfpresse hoch belastet. Es entsteht dann innerhalb von Minuten ein Tonstein (Gattermann 1998) (Bild 2).

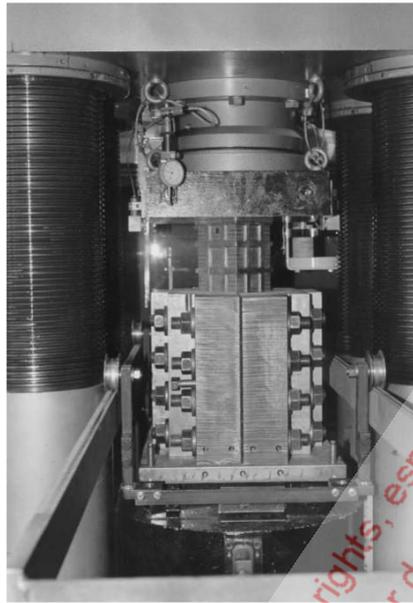
Bentonitpulver



Verdichtung durch Druck



Formstein



Datengrundlage: J. Gattermann, WBI-PRINT 2

Bild 2: Verfestigung von Ton infolge Auflast, Beispiel Bentonit

Die Tunnelröhren wurden mit Ausnahme des mittleren Bereichs am Übergang von den Bunten Mergeln zum Schilfsandstein mit einer TBM der Firma Herrenknecht aufgeföhren. Grundwasser und damit Wasserzutritte beim Vortrieb traten im Wesentlichen nur in den geklüfteten Kalksandsteinen des Schwarzen Juras und den Sandsteinen der Stubensandsteinformation auf. Alle anderen mit der TBM aufgeföhrenen Festgesteinschichten konnten i. W. trocken und ohne Ortsbruststützung aufgeföhren werden.

Dementsprechend sind die Tonsteine des Schwarzen Juras und der Stubensandsteinformation im Hinblick auf mögliche Verklebungen besonders zu betrachten.

3. Die Tonsteine des Schwarzen Juras und des Stubensandsteins

3.1 Schwarzer Jura

Vom Filderportal ausgehend liegen die ersten ca. 500 m des Tunnels in den Schichten des Lias α_1 , des Lias α_2 und des Lias α_3 , die auch als Hettangium 1, Hettangium 2 und Sinemurium 1 bezeichnet werden. Aus felsmechanischer und tunnelbautechnischer Sicht werden der Lias α_3 und die obere Hälfte des Lias α_2 zur sogenannten Wechsellagerung zusammengefasst (dunkelgrau in Bild 1). Diese besteht zu ca. 60 % aus Kalksandsteinen und zu ca. 40 % aus Tonsteinen. Die untere Hälfte des Lias α_2 und der Lias α_1 , die überwiegend aus Tonsteinen mit nur einzelnen Lagen aus Kalksandsteinen bestehen, fassen wir zur sogenannten Tonsteinschicht zusammen (hellgrau in Bild 1).

Ein Foto aus dem Portalbereich des Fildertunnels - die ersten 100 m wurden konventionell aufgeföhren - zeigt das Bild 3. Hier ist auch das felsmechanische Modell mit den elastischen Kennwerten dargestellt (Witke, M. & Witke-Schmitt, B. & Witke-Gattermann, P. & Witke, W. 2021).

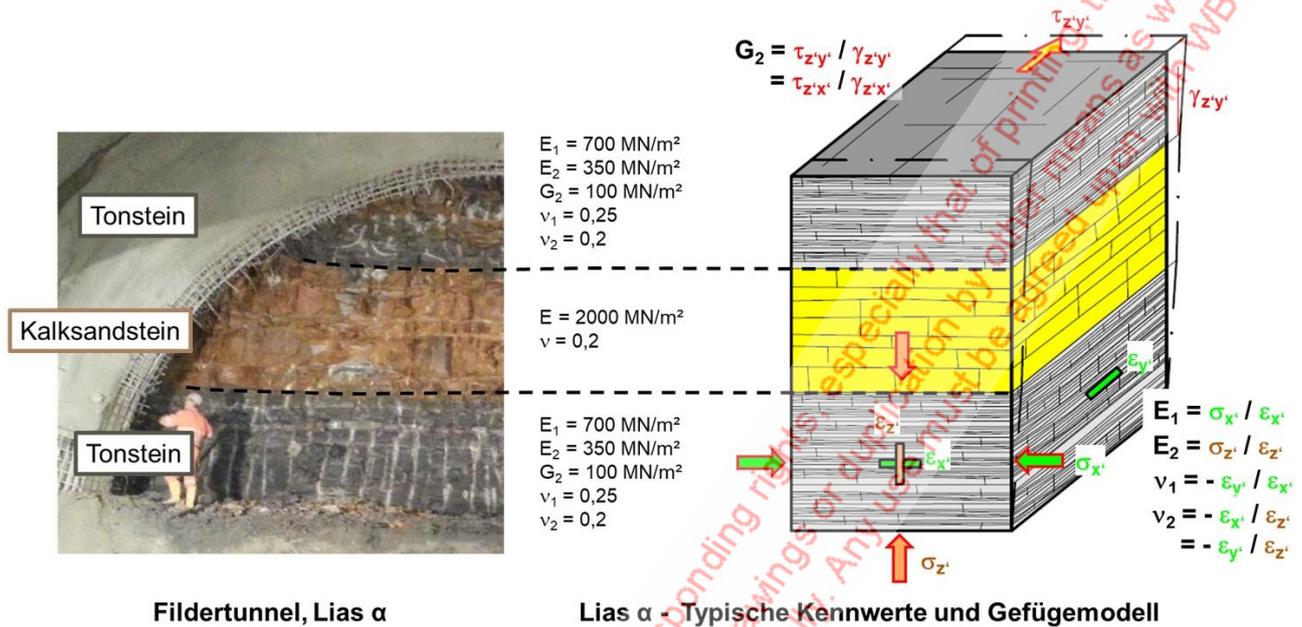


Bild 3: Lias α , Portalbereich Fildertunnel

Die Kalksandsteinschichten besitzen aufgrund ihrer Klüftung eine vergleichsweise große Wasserdurchlässigkeit. In Bohrlöchern wurden Werte $\leq 10^{-3} \text{ m/s}$ gemessen. Dagegen besitzen die Tonsteine eine nur geringe Wasserdurchlässigkeit.

Der Grundwasserspiegel steht im Bereich des Filderportals nur geringfügig unterhalb der Geländeoberfläche an.

Die Tonsteine besitzen eine mittlere einaxiale Druckfestigkeit von 1 MPa. Die an 444 Gesteinsproben gemessenen natürlichen Wassergehalte ergeben einen Mittelwert von 10,5 % (Bild 4, WBI 2010).

Mineralogische Untersuchungen an Tonsteinen des Lias α ergaben mittlere Gehalte an Tonmineralien von 40 % und an Quarz von 39 % (Bild 5).

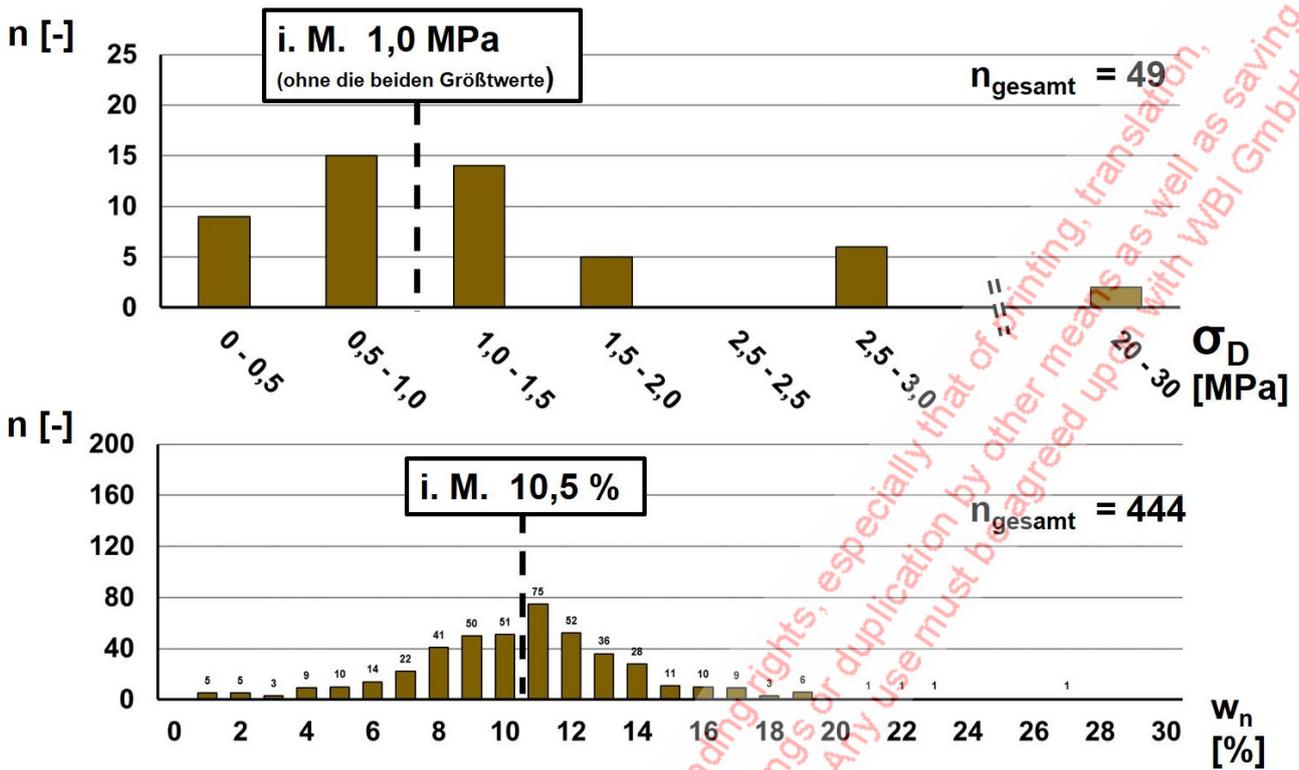


Bild 4: Vorerkundungen Fildertunnel, Tonschluffsteine des Lias α , einaxiale Druckfestigkeit und Wassergehalte

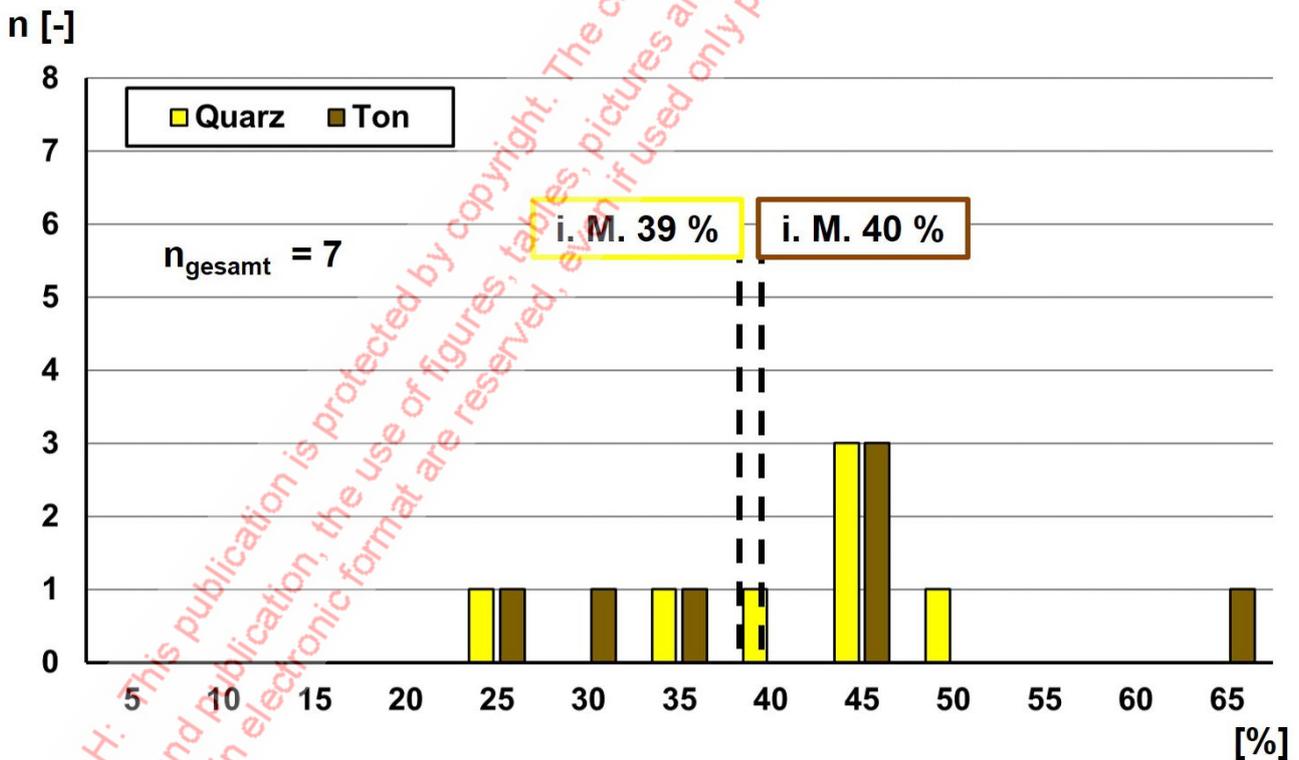
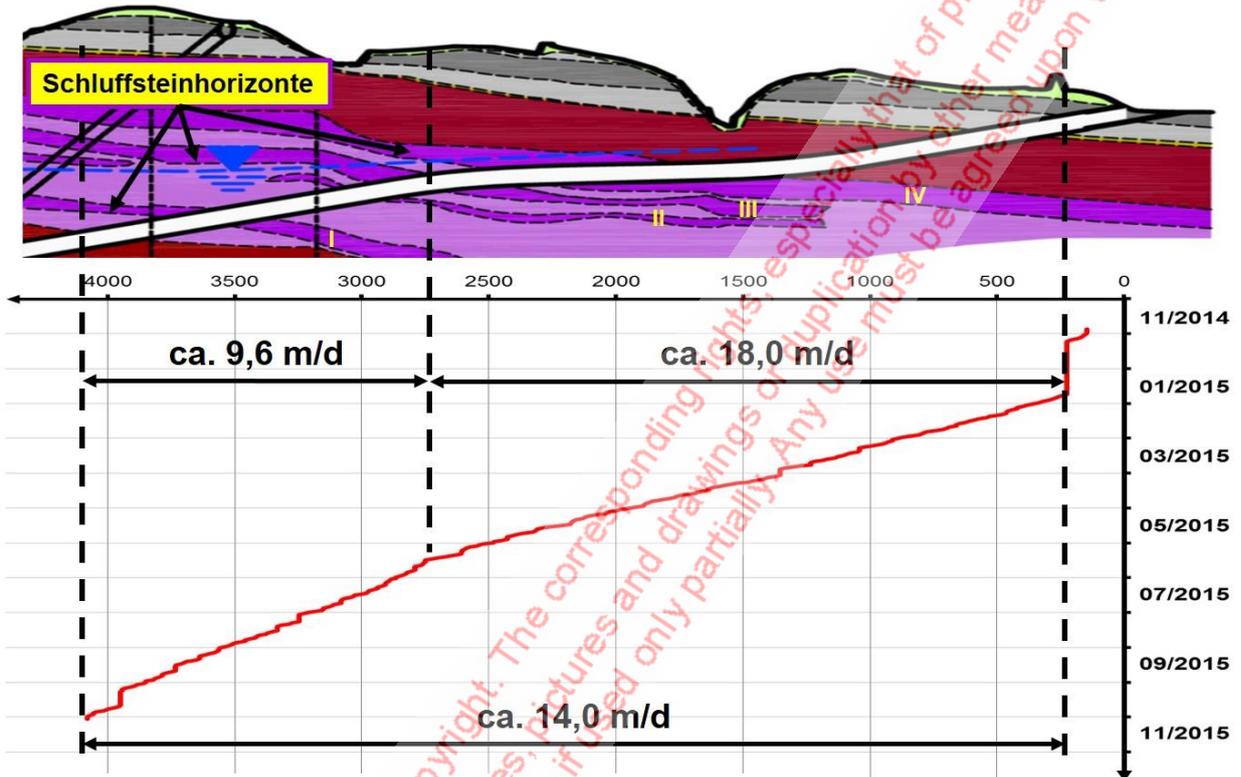


Bild 5: Vorerkundungen Fildertunnel, Tonschluffsteine des Lias α , Quarz- und Tonmineralgehalt

3.2 Tonsteinhorizonte des Stubensandsteins

Das Detail des geologischen Längsschnitts in Bild 6 zeigt die Stubensandsteinformation in größerem Maßstab. Die 4 Schluffsteinhorizonte I - IV sind nicht alle durchgehend. Der Grundwasserspiegel steht deutlich oberhalb der Tunnelfirste an. Die Wasserdurchlässigkeit der Sandsteine des Stubensandsteins ist im Vergleich zu der der Tonsteine sehr groß. In den Erkundungsbohrungen wurden Werte bis 10^{-4} m/s gemessen.



Mittlere Vortriebsgeschwindigkeiten Schildfahrt 2 entsprechend

Bild 6: Oberer Fildertunnel, Vortriebsdiagramm, Schildfahrt

Die Tonsteine besitzen eine mittlere einaxiale Druckfestigkeit von 10,9 MPa und einen mittleren natürlichen Wassergehalt von 7,3 % (Bild 7, WBI 2010). Mineralogische Untersuchungen haben zu mittleren Gehalten von Tonmineralen von 45,5 % und von Quarz von 30 % geführt (Bild 8).

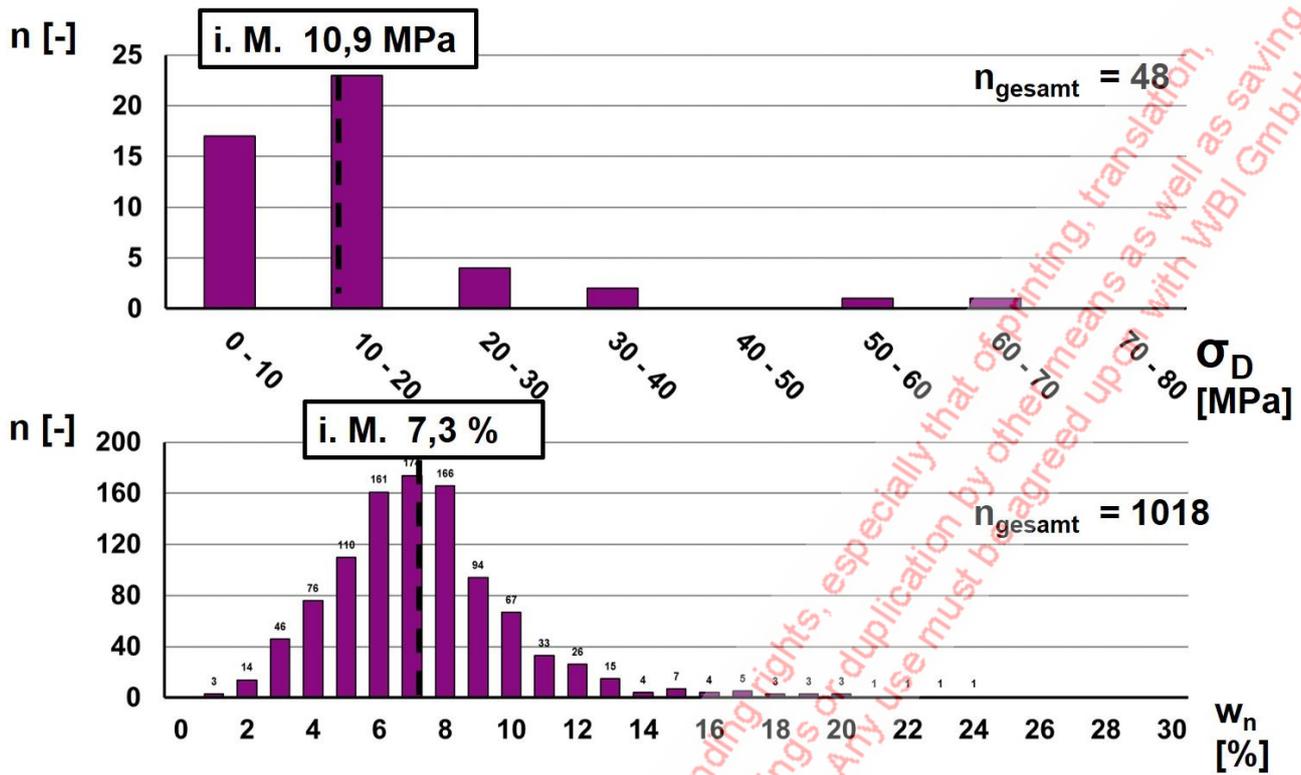


Bild 7: Vorerkundungen Fildertunnel, Schluffsteine des Stubensandsteins, einaxiale Druckfestigkeit und Wassergehalte

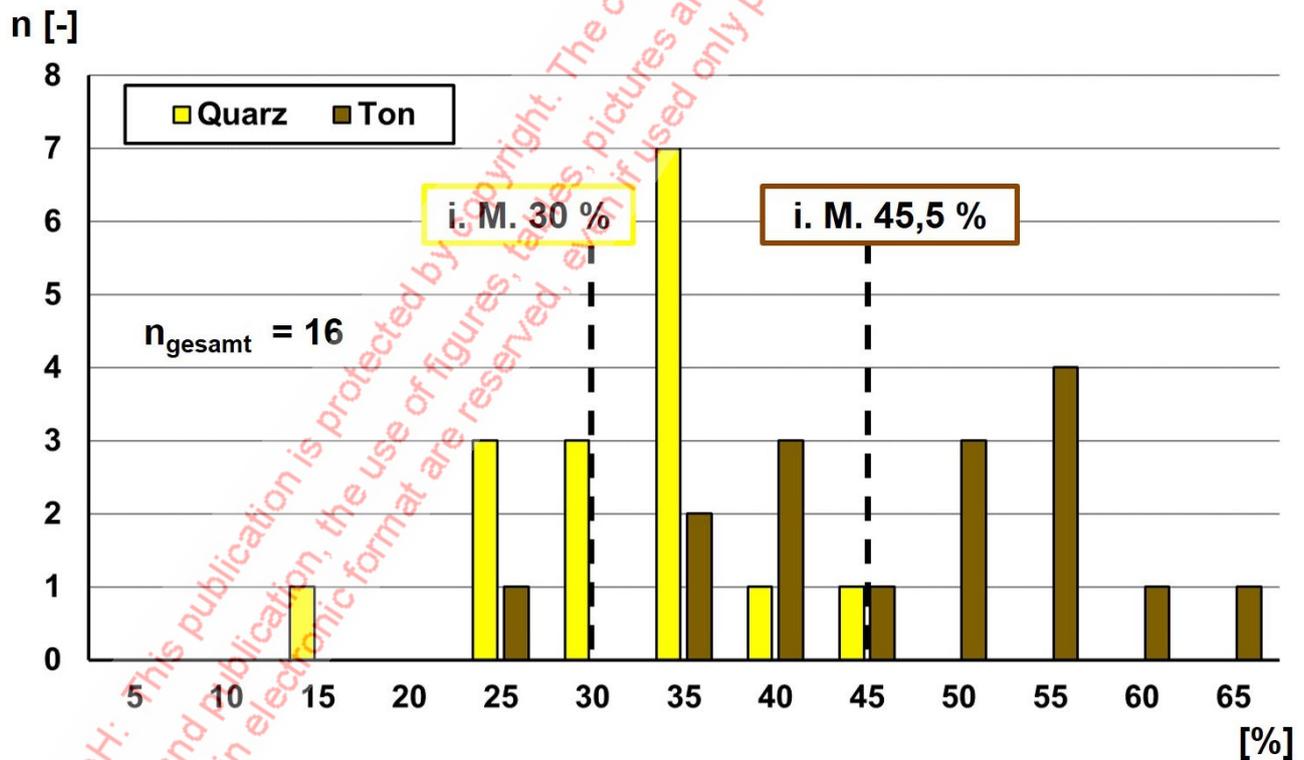


Bild 8: Vorerkundungen Fildertunnel, Schluffsteine des Stubensandsteins, Quarz- und Tonmineralgehalt

4. Verklebungen beim TBM-Vortrieb

Bild 9 zeigt die eingesetzte Herrenknecht-TBM, die einen Bohrdurchmesser von 10,87 m hat. Der Bohrkopf ist mit Disken und Schälmessern bestückt. Die Förderung des Ausbruchs aus der Abbaukammer auf das Förderband erfolgte bei den hier betrachteten Schildfahrten 1 und 2 mit einer Förderschnecke. Beim Vortrieb im Stubensandstein ergaben sich starke Verklebungen, die zu Behinderungen beim Vortrieb führten. Das ist an einer Abnahme der Vortriebsleistung zu erkennen, die sich in den Bereichen ergibt, in denen eine Wechsellaagerung aus Ton- und wasserdurchlässigen Sandsteinen ansteht, und wo der Tunnel deutlich in das Grundwasser eintaucht (Bild 6).

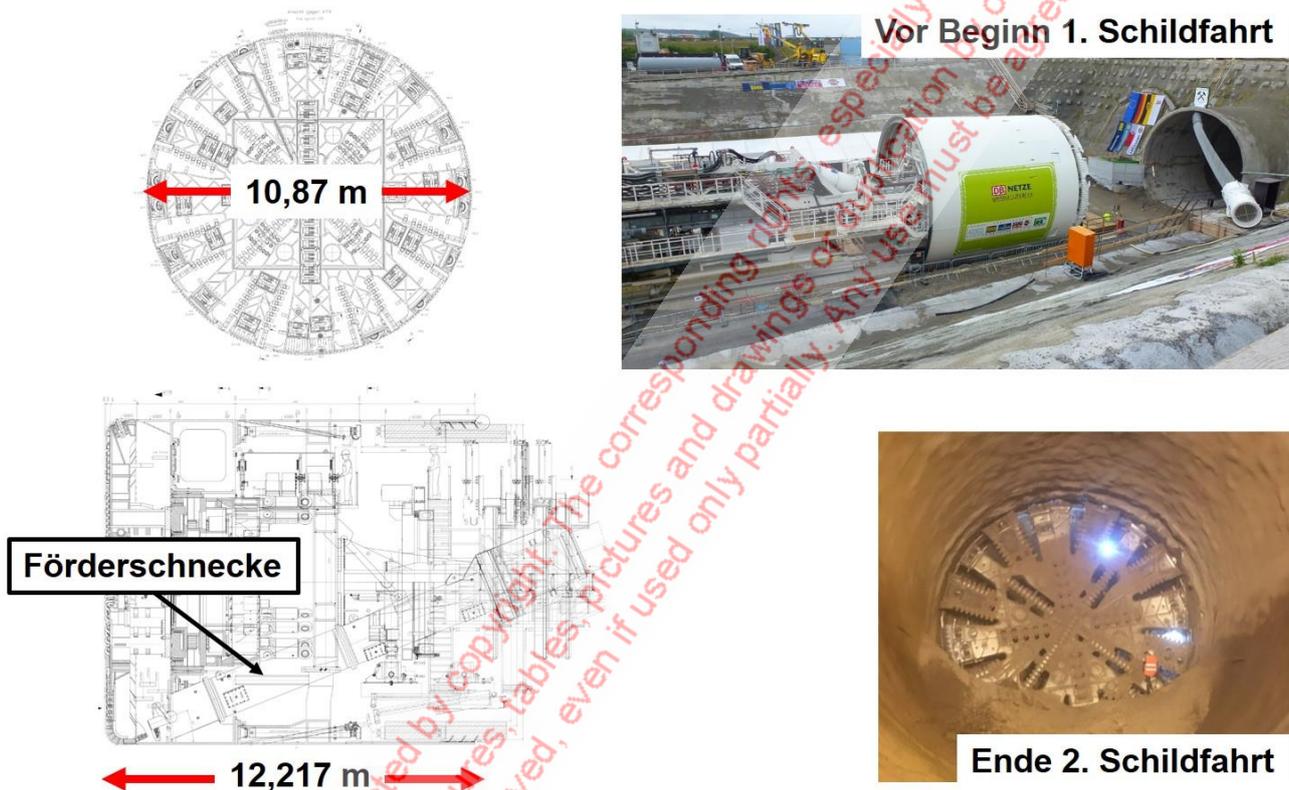


Bild 9: Herrenknecht TVM SUSE (S-738)

Als Folge der Verklebungen wurden in größerem Umfang Meißelwechsel erforderlich (Bilder 10 und 11, links). Beim Meißelverschleiß spielt natürlich auch der hier nicht näher betrachtete Schmirgeleffekt der stark absandenden Stubensandsteine im Grundwasser eine Rolle (Bild 11, rechts).

Die höhere Gesteinsfestigkeit, die sich aus dem in diesem Bereich vorhandenen größeren Sandsteinanteil ergibt, führt auch zu höheren Bohrkopfandruckkräften und geringeren Umdrehungszahlen. Auch die in der Abbaukammer gemessenen Temperaturen nehmen auf ca. 50 °C zu (Bild 12).

Das für eine Verklebung erforderliche Wasser kommt zum einen aus den anstehenden Sandsteinen (Bild 13). Außerdem wurden Wasser und Tenside zur Konditionierung zugegeben (Bild 14), und es wurde zur Reinigung Wasser zugeführt, das durch das Drehen des

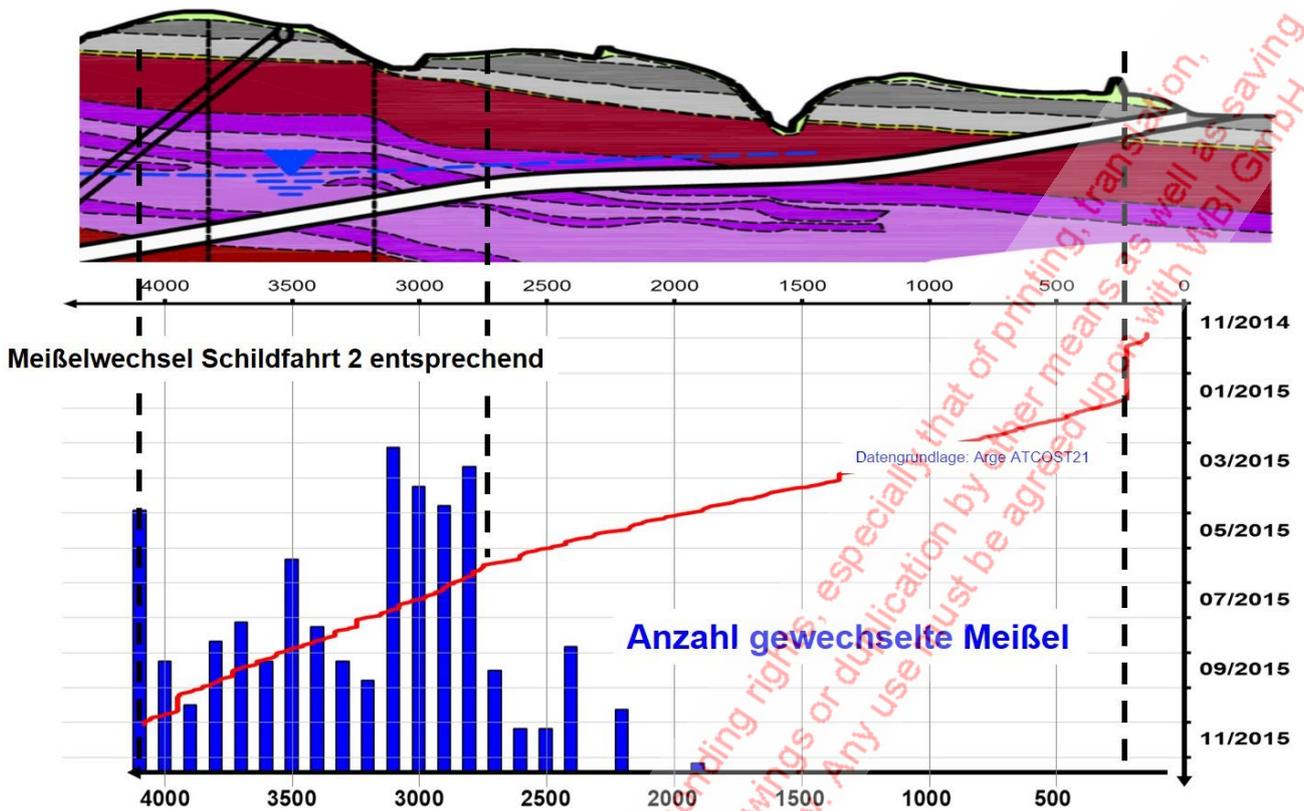


Bild 10: Oberer Fildertunnel, Werkzeugwechsel, Schildfahrt 1



Bild 11: Werkzeugwechsel - Fotos abgenutzter Meißel, Beispiele

Schneidrad beim Wiederanfahren über die Ortsbrust verteilt wurde. Dadurch und als Folge der hohen Temperaturen in der Abbaukammer entstanden häufiger nach kurzer Zeit wieder neue Verklebungen (Bild 15). Auf der Bergseite des Bohrkopfs dürften die Temperaturen deutlich größer sein, als die in Bild 12 gezeigten Werte.

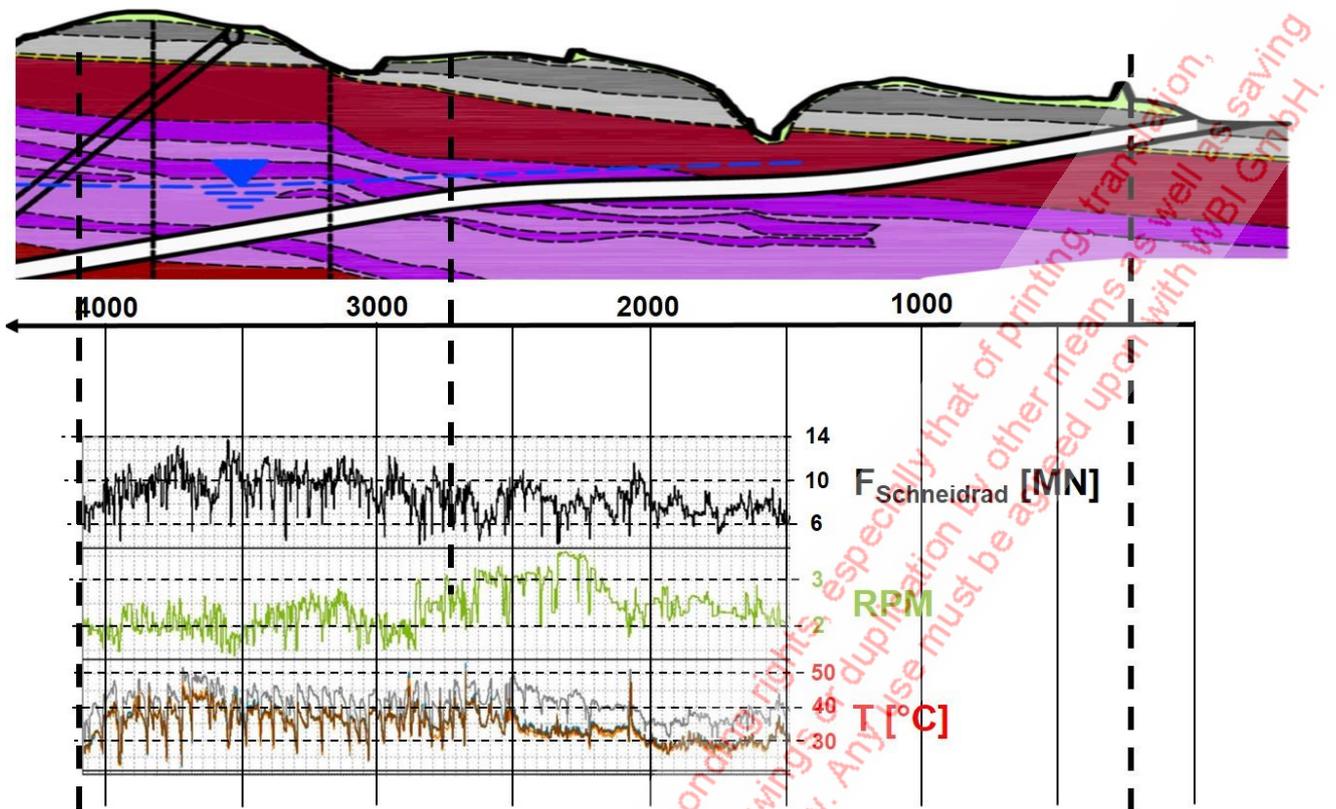


Bild 12: Andruckkraft, Umdrehungen, Temperaturen, Schildfahrt 1

- **Wasserzufuhr** über durchlässigere **Sandsteine**
- **Einflussgrößen:**
 - Durchlässigkeit
 - Grundwasserspiegel
 - Stützdruck
- **Abschätzung für den Stubensandstein im Fildertunnel:**
 - **Keine Stützung** bzw. **kein Gegendruck** -> **ca. 0,5 l/s**
 - Dauer Vortrieb + Ringbau: **ca. 2 h**
 - **Wasserandrang je Hub:** **ca. 3.600 l**
 - **Aushub** volumen je Hub: $\pi \times 10,87^2 / 4 \times 2 \text{ m}^3 =$ **185,6 m³**
 - mit $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ ergibt sich Aushubmasse von **464 t**
 - Annahme: **10 % Schluffstein** + **Wasser** wird **vollständig** vom Schluffstein aufgenommen:
 -> **Erhöhung Wassergehalt um ca. 10 %**

© Bild 13: Möglichkeiten der Wasserzufuhr - Gebirge

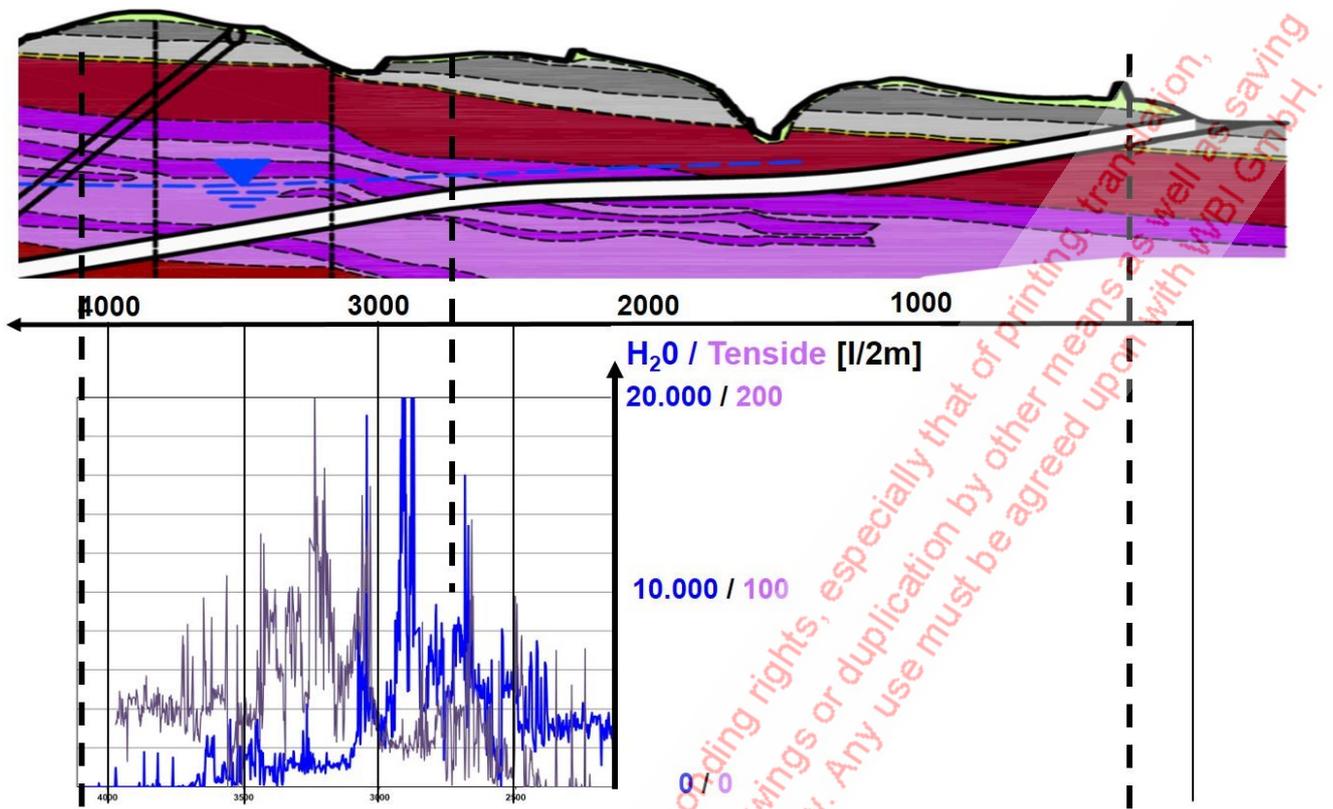
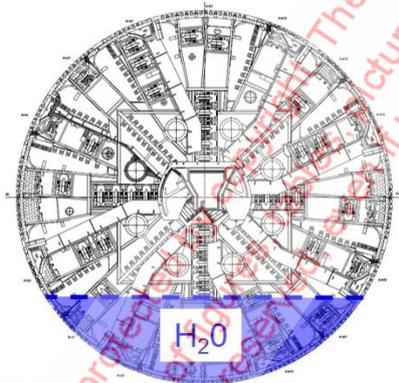


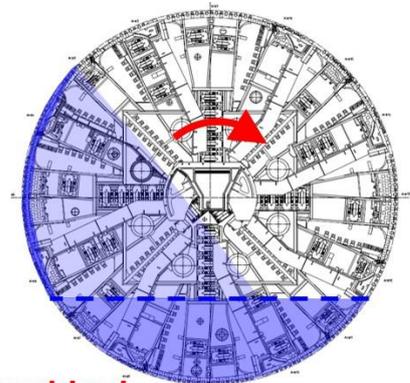
Bild 14: Möglichkeiten der Wasserzufuhr - Konditionierung Schildfahrt 2



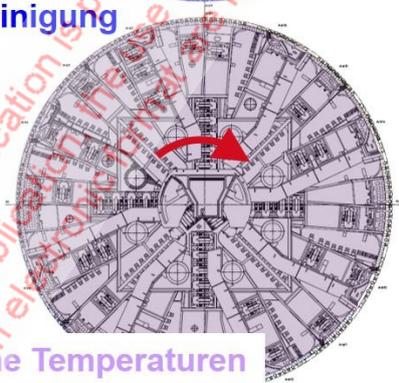
a. Ende der Reinigung



b. Rotation Schneidrad



c. H₂O und hohe Temperaturen



d. Verklebung

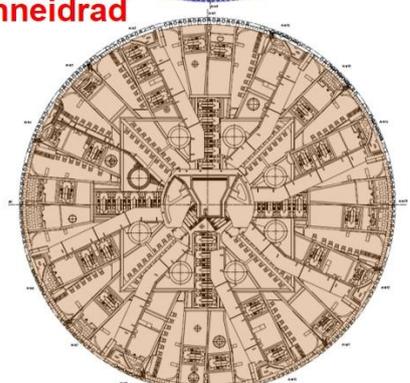


Bild 15: Möglichkeiten der Wasserzufuhr - Reinigung

5. Untersuchungen zum Verklebungspotential

5.1 Lias α

Diese Erfahrungen waren der Anlass für einige Untersuchungen zum Verklebungspotential veränderlich fester Gesteine. Dazu wurden Tonsteinproben aus der Formation des Lias α an 2 Lokationen der Streckenröhren des Flughafentunnels Stuttgart entnommen. Diese liegen in der Nähe des Fildertunnels und befinden sich zur Zeit im Bau. Die Wassergehalte der Tonsteine, in diesem Bereich, die vortriebsbegleitend gemessen werden, ergeben bei geringen Streuungen einen Mittelwert von $w = 8,5\%$ (Bild 16).

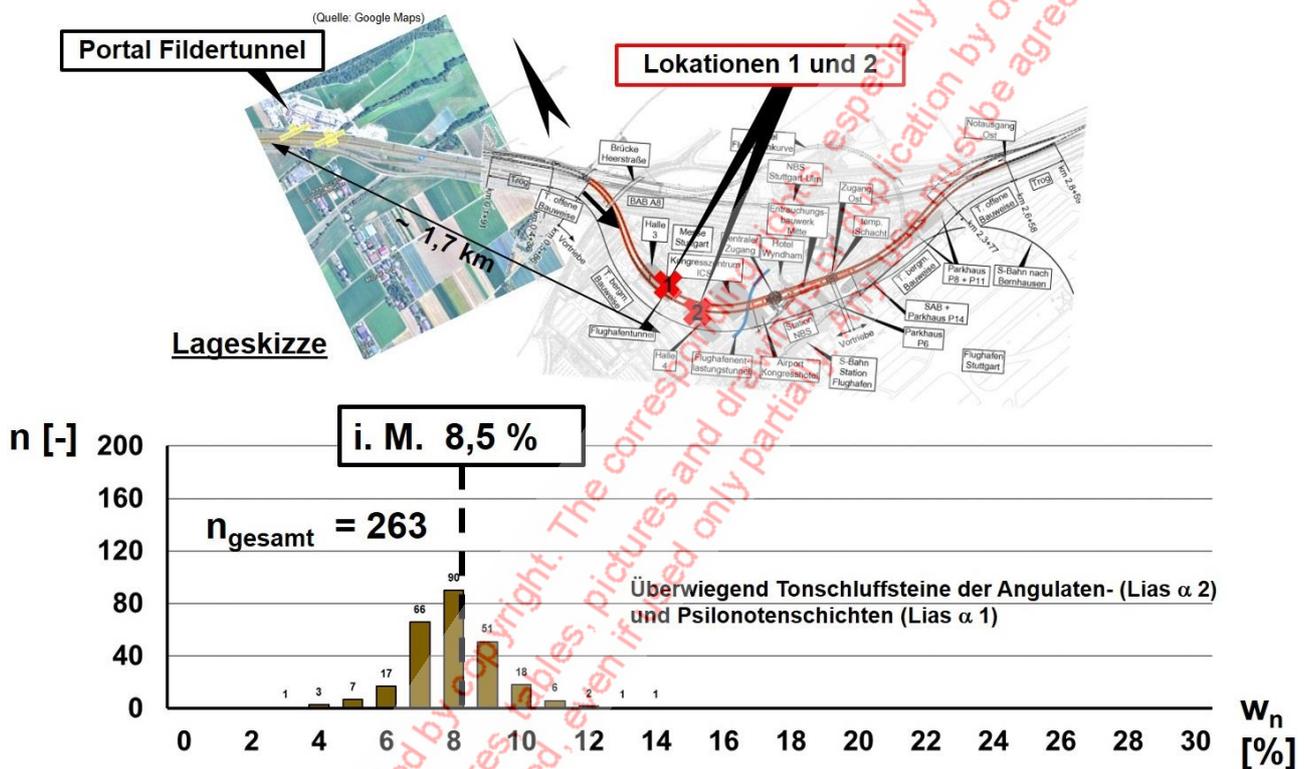


Bild 16: Proben aus den Streckenröhren Nord und Süd des Zulaufs West (Lokationen 1 und 2), gesteinsfester Lias α , Wassergehalte

Die Proben wurden zerkleinert und danach bei 40 °C und 60 °C, d. h. bei Temperaturen, wie sie in der Abbaukammer im Fildertunnel gemessen wurden, getrocknet (Bilder 17 und 18). Bei der Trocknung wurden die Proben zu verschiedenen Zeitpunkten aus dem Trockenschrank genommen, gewogen und danach weiter getrocknet. Man erkennt, dass die zerkleinerten Tonsteine bereits nach kurzer Zeit einen großen Teil des Wassergehalts verlieren.

Nach der Trocknung wurden die Proben in Wasser gelegt. Dabei wurde beobachtet, dass diese ohne weitere mechanische Beanspruchung, nach vergleichsweise kurzer Zeit vollständig zerfallen (Bild 19). Zum Vergleich zeigen Gesteinsproben mit natürlichem Wassergehalt nach einer Wasserlagerung keine bzw. nur sehr geringe Zerfallerscheinungen. An einigen Proben wurden nach dem Zerfall die Konsistenzgrenzen ermittelt. Es zeigte sich, dass die Tonsteine zu einem mittelplastischen Ton zerfallen (Bild 20).

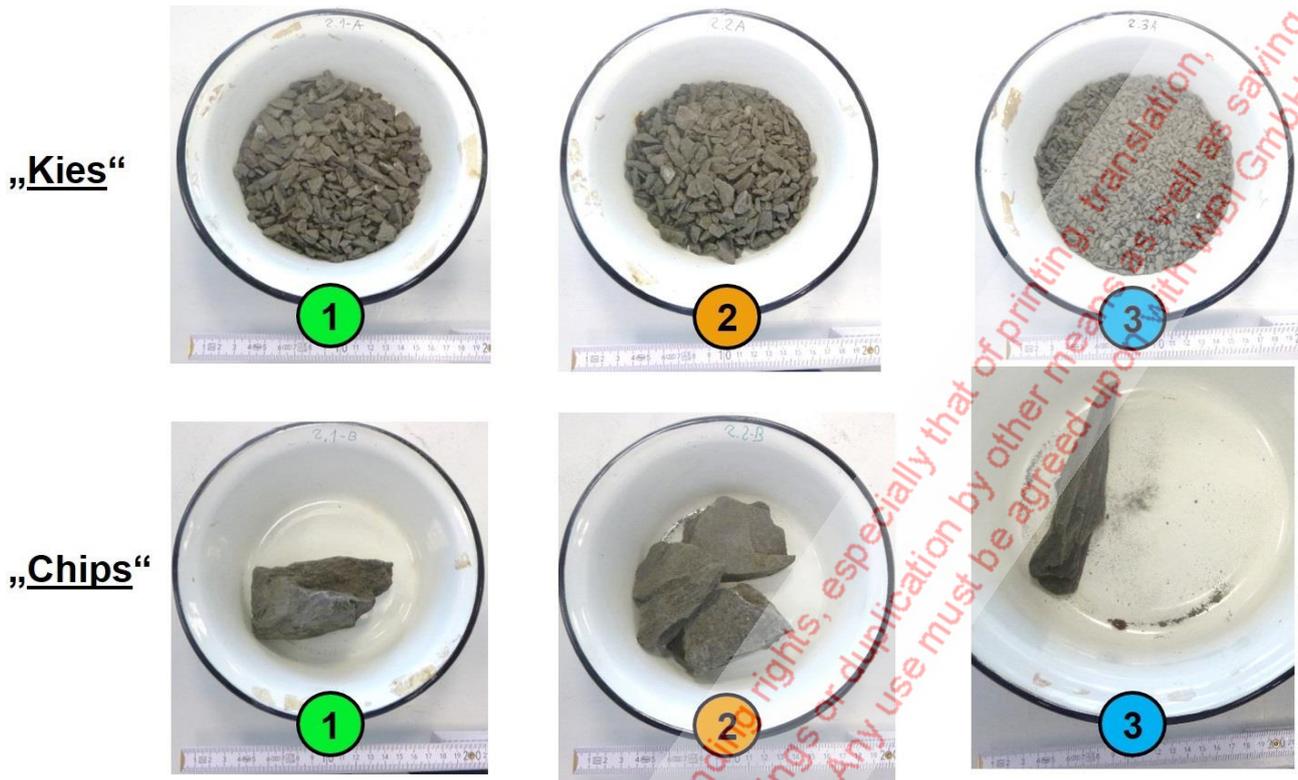


Bild 17: Proben des Tonschluffsteins des Lias α vor der Trocknung bei 40 °C

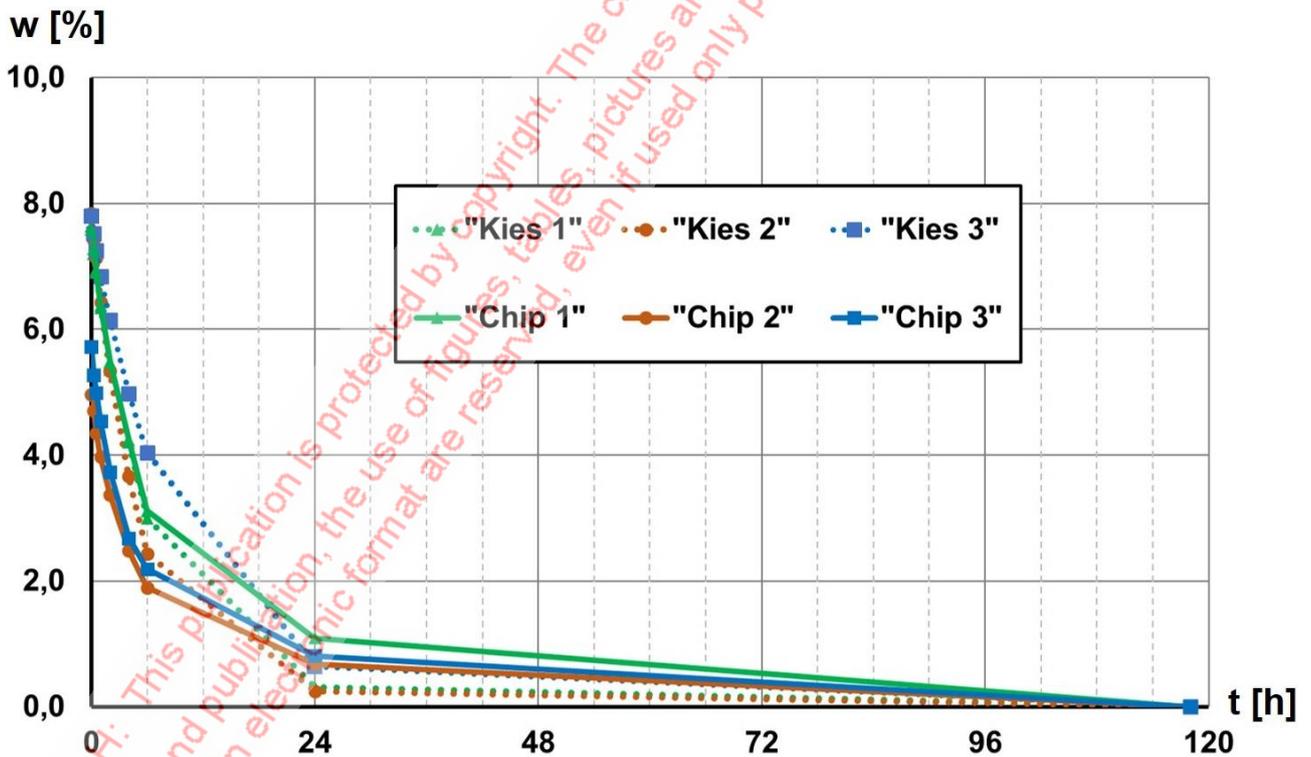


Bild 18: Rückgang Wassergehalt - Lokation 2, Trocknung bei 40 °C

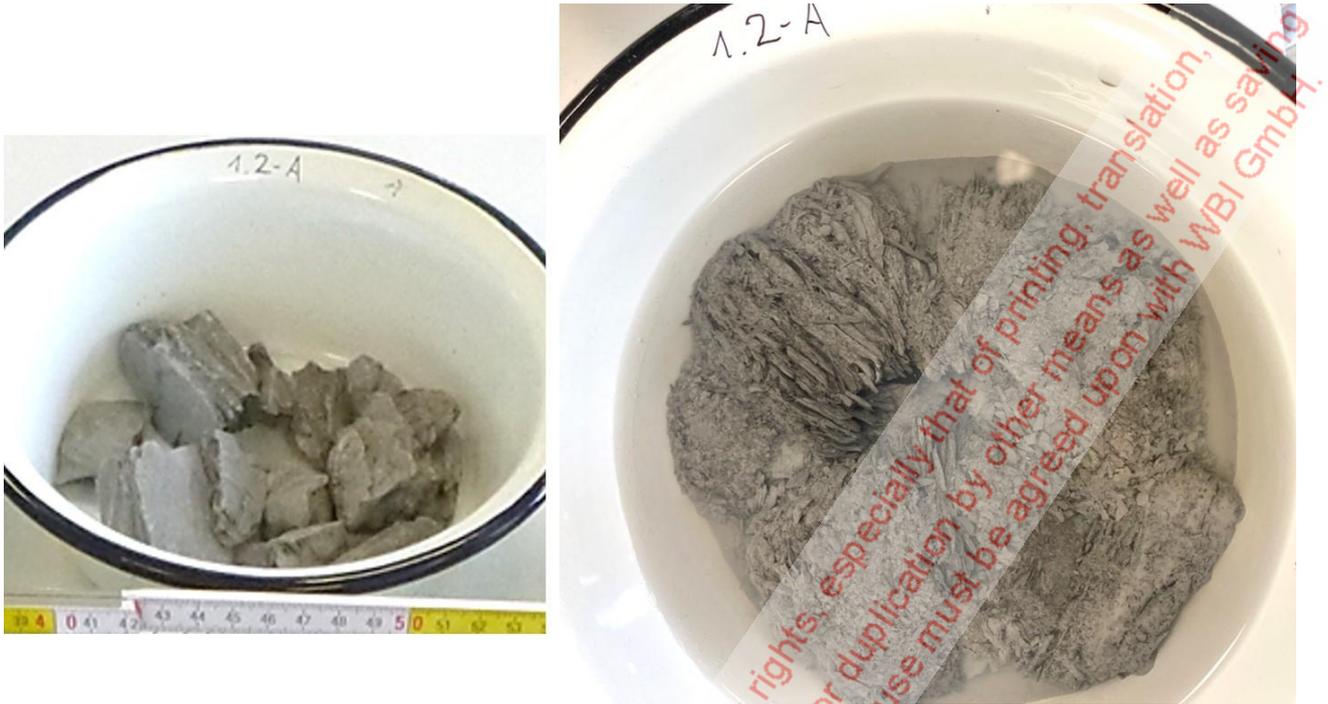


Bild 19: Bei 60 °C getrocknete Probenstücke vor und nach 16 h Wasserlagerung

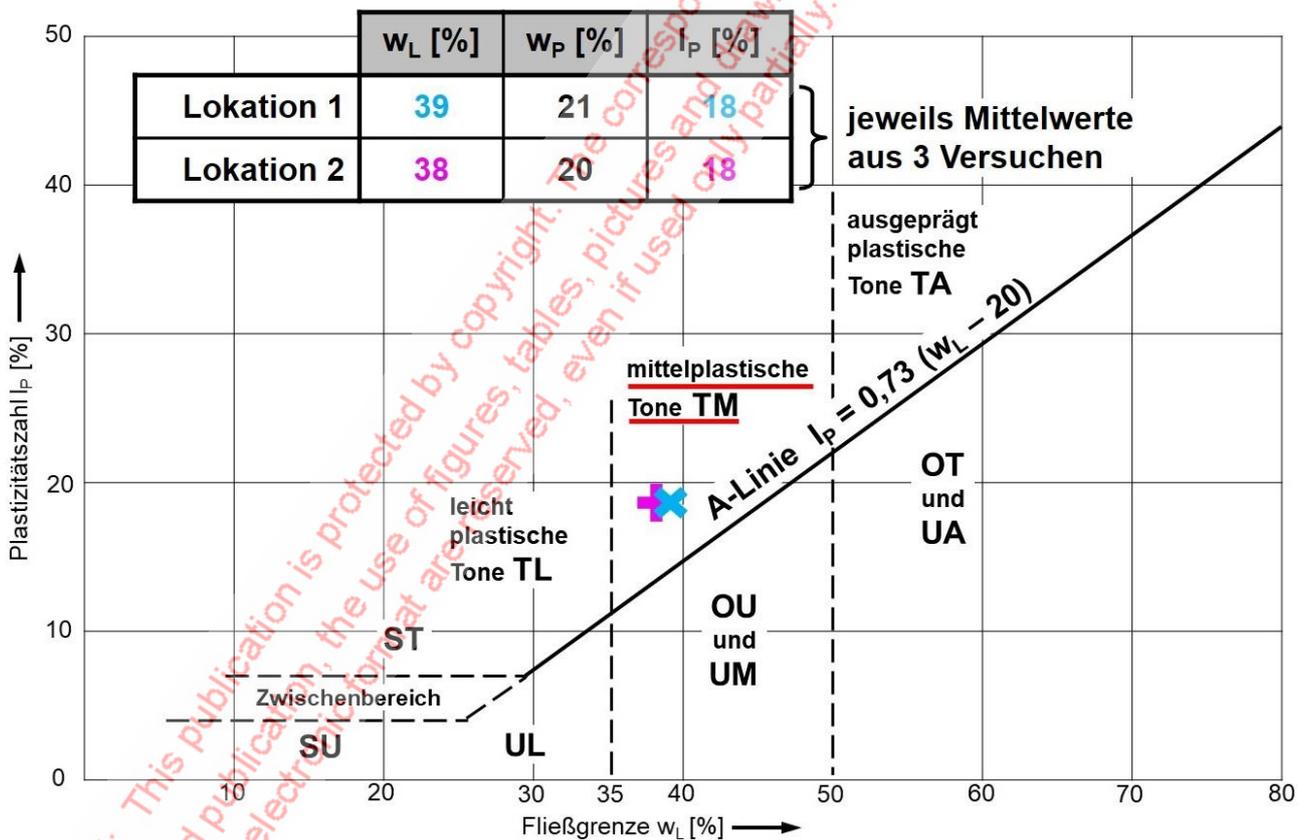


Bild 20: Plastizitäten der durch Bewässerung umgewandelten Gesteinsproben

Zur Veranschaulichung wurde eine getrocknete Probe in einen Proctortopf gefüllt und anschließend näherungsweise die für den Wassergehalt an der Fließgrenze erforderliche Wassermenge zugegeben. Nach einem zehnmütigen Rühren entstand ein Ton, der an den Geräten haftete (Bilder 21 und 22).



$$m_{\text{trocken}} = 676 \text{ g}$$

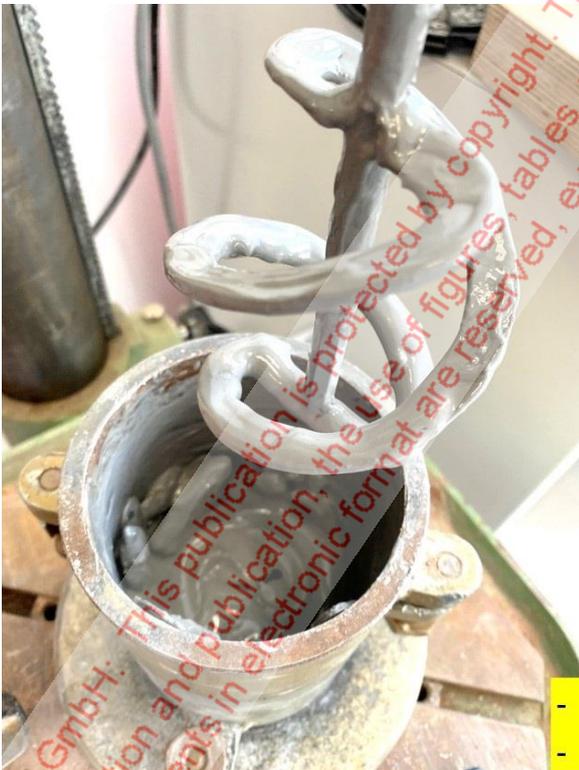
$$w_{\text{soll}} = w_f = 40 \%$$

d. h.

Wasserzugabe

$$0,4 \times 676 \text{ g} = 270 \text{ g}$$

Bild 21: Lias α , Tastversuch zur Verbreitung/Verklebung an 24 h bei 60 °C getrockneten Gesteinsstücken



- Gemisch lässt sich nur zum Teil ausschütten
- starke Anhaftungen

Bild 22: Lias α , Tastversuch zur Verbreitung/Verklebung an 24 h bei 60 °C getrockneten Gesteinsstücken - 10 min Rühren

Nach Thewes (Thewes 1999) neigen Mittel und ausgeprägt plastische Tone beim Vortrieb im offenen Modus zur Verklebung, wenn ihre Konsistenz im Bereich von $I_c = 0,3 - 1,5$ liegt (Bild 24). Für die untersuchten zu Ton zerfallenen Tonsteine des Lias α sind das Wassergehalte von $w = 12 - 33\%$ (Bild 23).

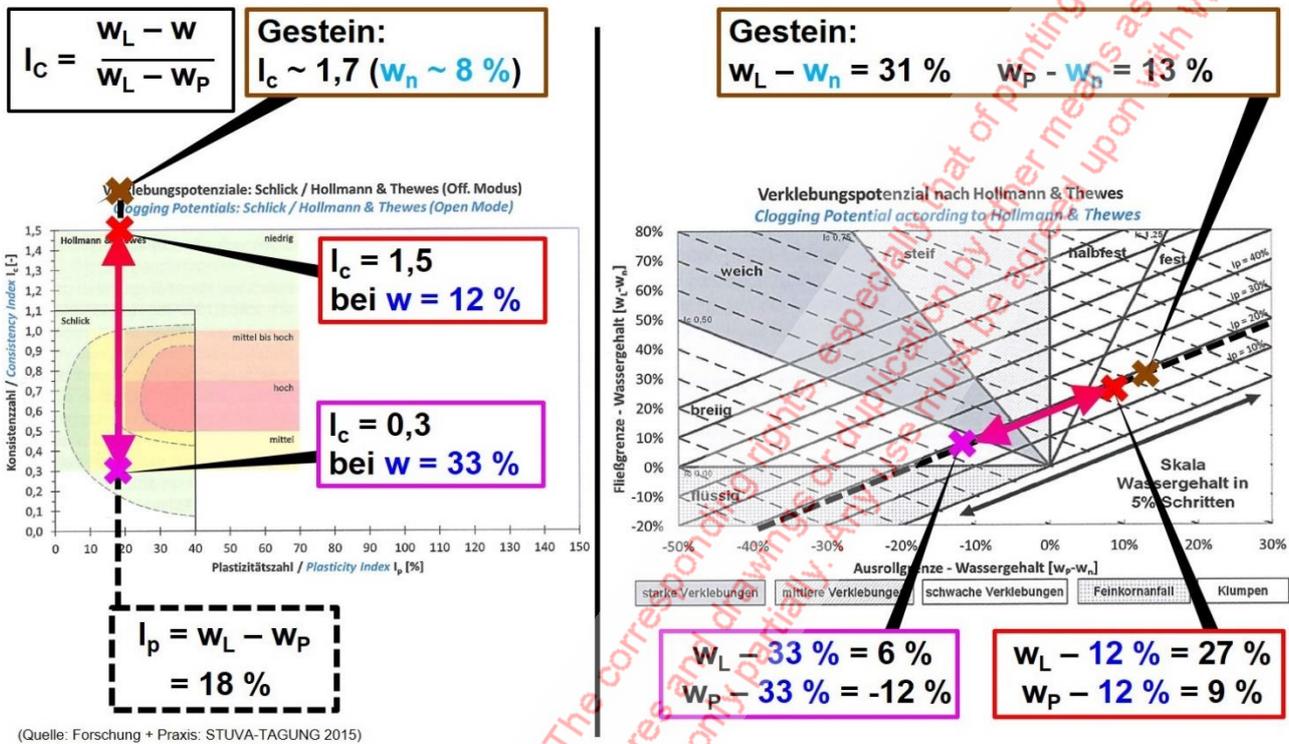


Bild 23: Verklebungspotential der Tonsteine des Lias α

5.2 Stubensandsteininformation

Für die Tonsteine der Stubensandsteininformation konnten die Konsistenzgrenzen des Zerfallsprodukts nicht zuverlässig bestimmt werden, weil keine ausreichende Zahl von Proben mehr zur Verfügung stand. Hier wurde für eine aus der Ortsbrust bei TM 2937 entnommene Gesteinsprobe ein Wassergehalt von 5 % gemessen, der auf der trockenen Seite des an Proben aus der Vorerkundung bestimmten Mittelwerts liegt (Bild 24). Eine bei TM 3644 vom Förderband entnommene Probe ist dagegen knetbar und zeigt mit 11,4 % einen höheren Wassergehalt. Diese Konsistenzänderung ist wahrscheinlich durch Austrocknung, anschließende Wasserzufuhr und mechanische Bearbeitung zustande gekommen.



Ortsbrust
(SF1, TM 2937)



Förderband
(SF1, TM 3644)

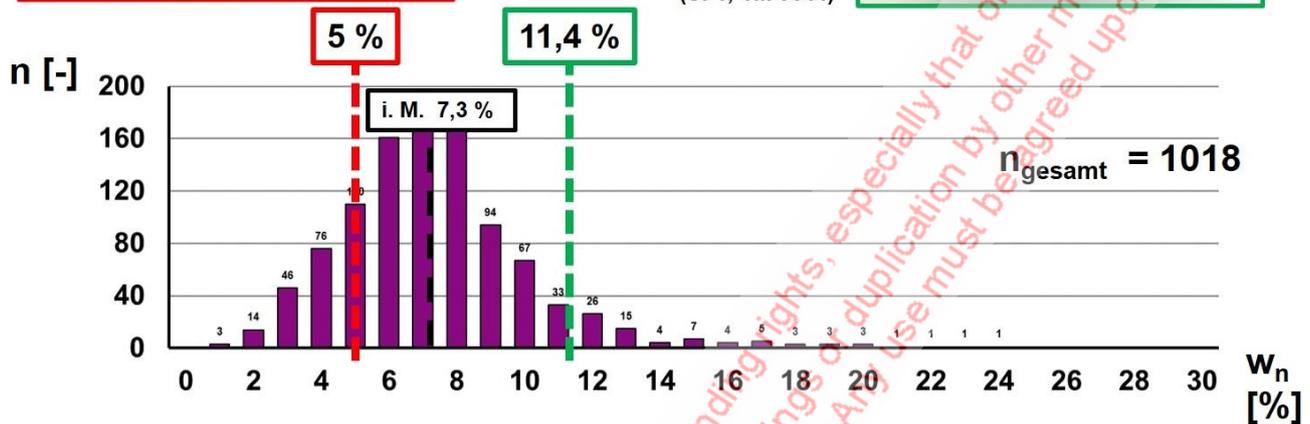


Bild 24: Wassergehalte - Probe Ortsbrust und Probe Förderband, Beispiele

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Beim TBM-Vortrieb des Fildertunnels in den Tonsteinen der Stubensandsteinformation zeigten sich starke Verklebungserscheinungen, die zu erhöhtem Meißelverschleiß und zu einer geringeren Vortriebsleistung führten. Diese Verklebungen sind auf eine Austrocknung und anschließende Wasserzufuhr aus dem Gebirge, der Konditionierung und der Reinigungsarbeiten zurückzuführen.

An Proben aus ebenfalls veränderlich festen Tonsteinen des Lias α wurden Laborversuche zum Zerfall des Gesteins durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Proben nach Trocknung im Trockenofen und anschließender Wasserlagerung zu einem mittelplastischen Ton zerfallen, der nach Untersuchungen anderer Autoren bei Konsistenzzahlen von $I_c = 0,3 - 1,5$ zu Verklebungen neigt. Gesteinsproben mit natürlichem Wassergehalt zeigen dagegen bei Wasserlagerung keine bzw. nur sehr geringe Zerfallerscheinungen. Untersuchungen an Tonsteinen der Stubensandsteinformation dürften zu entsprechenden Ergebnissen führen.

Da sich eine Wärmeentwicklung am Bohrkopf und in der Abbaukammer einer TBM und damit ein Austrocknen bestimmter Gesteine nicht verhindern lässt, kommt es darauf an, Wasserzutritte im Bereich der Ortsbrust zu vermeiden. Diese treten aber bei Vortrieben in veränderlich festen Tonsteinen dann auf, wenn diese unterhalb des Grundwasserspiegels liegen und gleichzeitig im Querschnitt klüftige, wasserdurchlässige Sandsteine oder Kalksandsteine anstehen.

In solchen Fällen dürfte sich der Einsatz von Druckluft günstig auswirken. So sind beim Vortrieb des Fildertunnels im Lias α keine nennenswerten Verklebungen aufgetreten, obwohl der Tunnel unterhalb des Grundwasserspiegels lag und auch wasserführende Kalksandsteine anstanden. Hier wurde Druckluft eingesetzt. Das war aufgrund der Zerkleinerung der Tonsteine beim Lösen auch ohne Verbreitung machbar (Bild 25).



Druckluftstützung ca. 2 bar



Bild 25: Förderband und Abwurfplatz, Vortrieb im Lias α bei Druckluftstützung

Auch sollte auf eine Reinigung mit Wasser möglichst verzichtet werden. Falls das unumgänglich sein sollte, muss das Wasser nach der Reinigung wieder abgeführt werden. Weitere Untersuchungen sollten folgen, um die Probleme der Verklebung bei zukünftigen Vortrieben in veränderlich festen Gesteinen besser in den Griff zu bekommen

Literatur

Feinendegen, M.; Ziegler, M.; Weh, M.; Spagnoli, M.: Verklebungen beim EPB-Vortrieb: Einflüsse, Klassifikation und neue Manipulationsverfahren. Forschung und Praxis, Heft 44: STUVA-Tagung 2011, S. 234 - 240.

Gattermann, J. H.: Theorie und Modellversuch für ein Abdichtungsbauwerk aus hochverdichteten Bentonitformsteinen. WBI-PRINT 2, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1998. ISBN: 3-7739-1302-8.

Geyer, O. F.; Gwinner, P.: Geologie von Baden-Württemberg, 4. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermüller), Stuttgart, 1991.

Schlick, G.: Adhäsion im Boden-Werkzeug-System. Institut für Maschinenwesen im Bauwesen, Nr. 39. Universität Fridericiana in Karlsruhe, 1989.

Thewes, M.: Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden. Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Bericht Nr. 21, Gesamthochschule Wuppertal, 1999.

WBI: Stuttgart 21, Planfeststellungsabschnitt 1.2, Fildertunnel, Baugrundgutachten, Januar 2010 (unveröffentlicht).

Wittke, M.; Wittke-Schmitt, B.; Wittke-Gattermann, P.; Wittke, W.: Planung und Ausführung von Tunnelbauwerken im klüftigen Fels nach der AJRM-Methode - Teil 1. Titelstory in Zeitschrift Tunnel 3/2021. Bauverlag BV GmbH, Gütersloh, 2021.

Ziegler, M.; Feinendegen, M.; Englert, K.: Verklebungen beim maschinellen Tunnelvortrieb: Bewertungsverfahren und deren bautechnische Aussagekraft sowie juristische Aspekte zu vertraglichen Regelungen. Forschung +Praxis, Heft 46: STUVA-Tagung 2015, S. 163 - 171.