Interpretation der geotechnischen Verhältnisse an der Ortsbrust anhand von TBM-Daten

Dr. Markus Weh; Marti Dienstleitungen AG
Dr. Samuel Gilgen; Marti Dienstleitungen AG
Tobias Zumbach; Marti Dienstleitungen AG

ETHZ, 25.05.2023

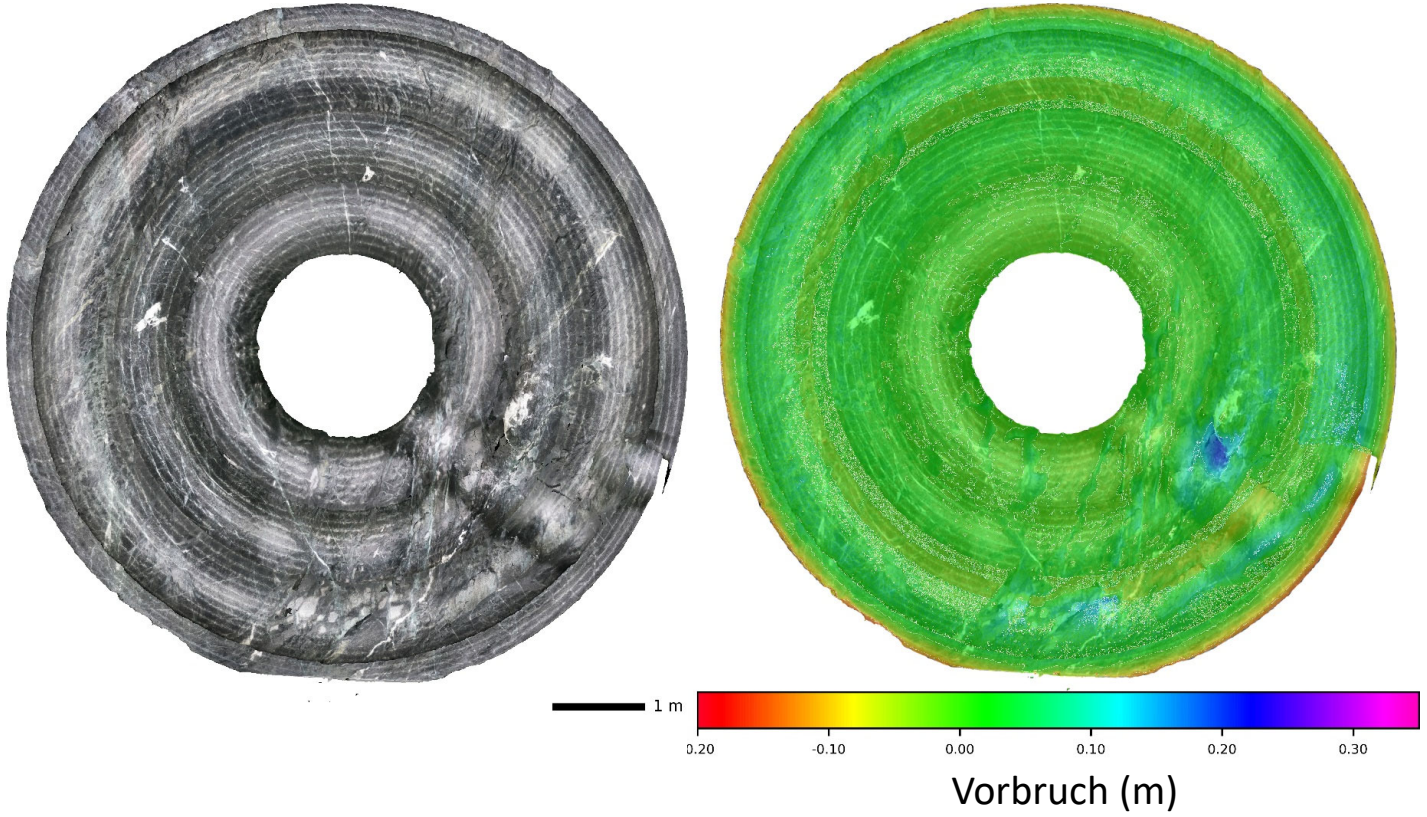
Einführung

An der Ortsbrust sind beim Hartgesteins-Vortrieb drei verschiedene Prozesse der Gesteinslösung zu unterscheiden:

1. Gesteinsabbau durch Chipping:

Gewünschter Abbauprozess

- Bildung von Gesteinsmehl unter den Schneidringen und Chips zwischen den Schneidringen durch Überschreitung der Zugfestigkeit im Gestein
- Frische Bruchflächen begrenzen die Chips
- Bruchflächen sind meist uneben und werden von den Mineralkorneigenschaften beeinflusst (Spaltbarkeit, Kornform, Korngrösse)



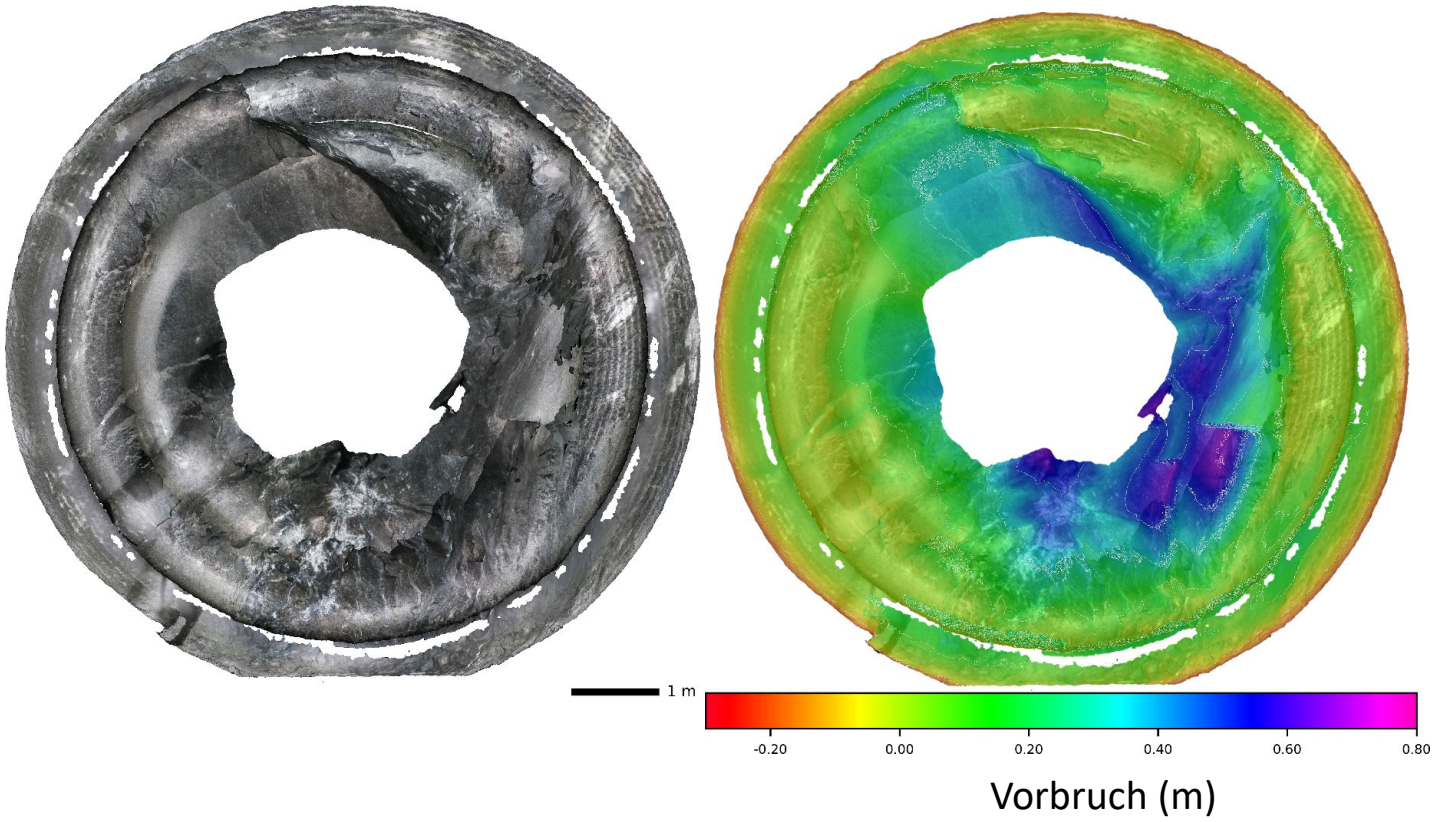
Einführung

An der Ortsbrust sind beim Hartgesteins-Vortrieb drei verschiedene Prozesse der Gesteinslösung zu unterscheiden:

2. Gesteinsabbau durch Bruch an vorgegebenen Trennflächen:

Unerwünschter Abbauprozess

- Trennflächen weisen gegenüber der Gesteinsfestigkeit eine reduzierte bis keine Festigkeit aus
- Bruchkörper werden entweder durch eine oder mehrere Trennflächen begrenzt
- Die Brüche entlang der vorgegebenen Trennflächen sind in der Regel glatt und eben
- Entstehung von blockigen Ausbruchkörpern
- Die Form der Bruchkörper (plattig, stengelig, kubisch) wird vom Abstand und Winkel zwischen den Trennflächen bestimmt



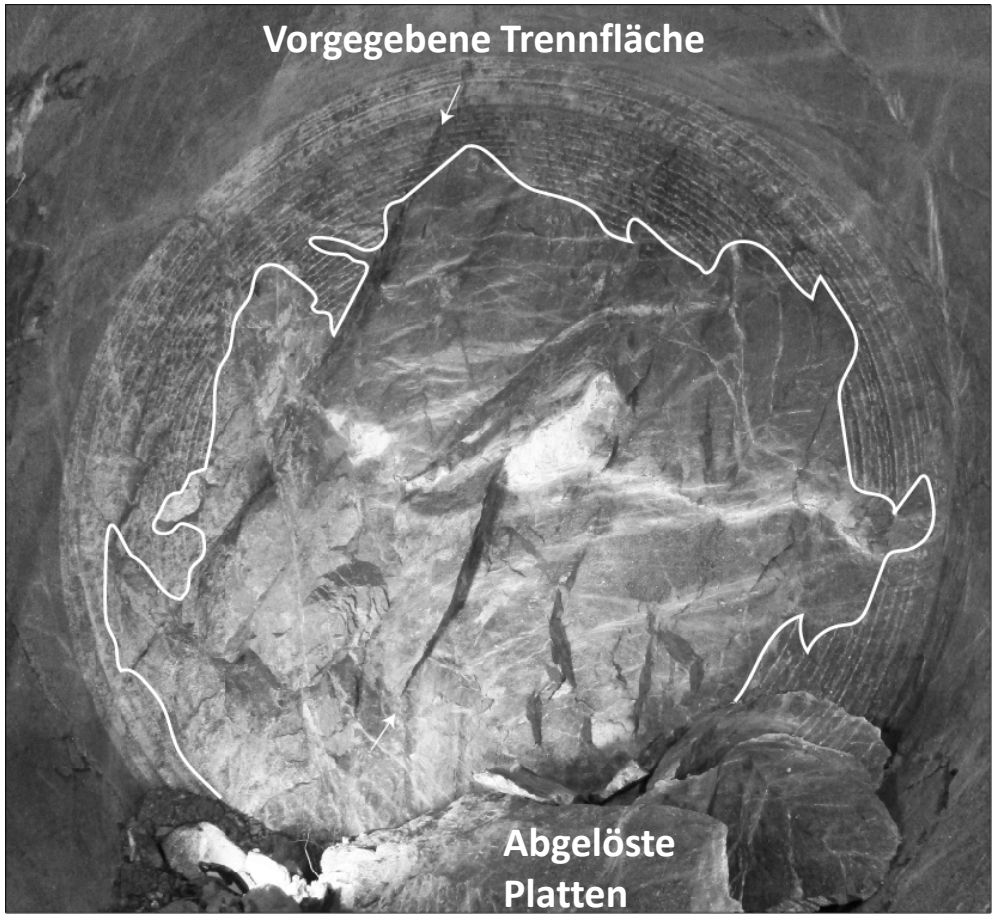
Einführung

An der Ortsbrust sind beim Hartgesteins-Vortrieb drei verschiedene Prozesse der Gesteinslösung zu unterscheiden:

3. Gesteinsabbau durch spannungsbedingte Brüche:

Unerwünschter Abbauprozess

- Auftreten wenn Spannungen am Hohlraumrand > Gesteinsfestigkeit
- Spannungsspitzen entwickeln sich vorwiegend in wenig geklüftetem, homogenem Gestein
- Die Bruchflächen sind in der Regel gewölbt
- Die Bruchflächen sind immer frisch
- Entstehung von blockigen Ausbruchkörpern
- Die Ausbruchkörper sind in der Regel plattig

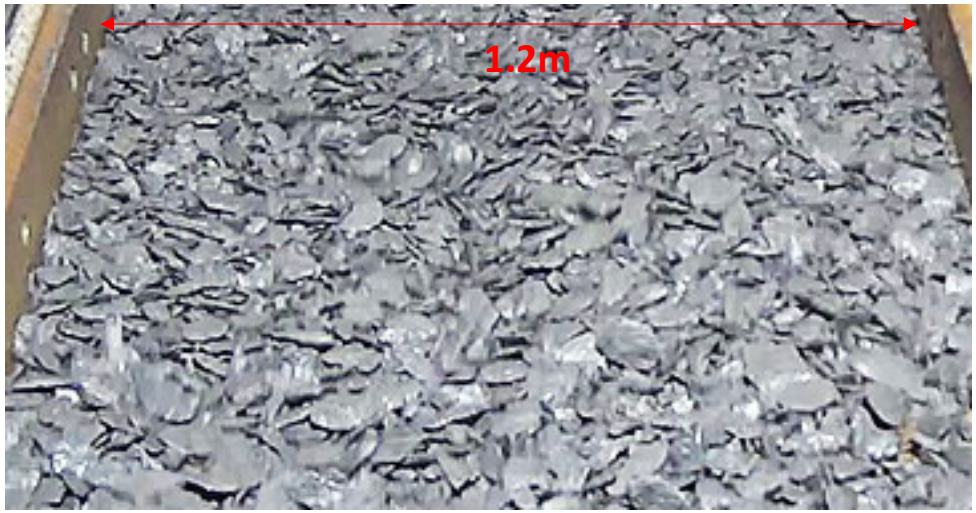


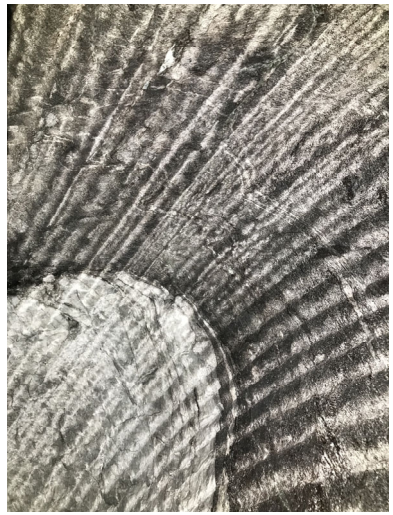
Ausbruchrand weiss umrundet

Folge der unterschiedlichen Abbauprozesse an der Ortsbrust:

1. Chipping

- Kontinuierliche Schneidspur sichtbar; d.h. der Schneidring liegt der Ortsbrust +/- permanent auf
- Die Drehkraft des Schneidrads bemisst sich in erster Linie am Verhältnis der Eindringung der Meissel (Penetration) und der aufgebrachten Kraft je Schneidring.
- Das abgebaute Gestein fällt durch den Spalt zwischen Fels und Bohrkopf nach unten. In der Sohle wird es entweder von den Kalibermeisseln überrollt und kleingemahlen oder von den Räumern aufgenommen und nach hinten geschoben. Das Aufnehmen des Ausbruchmaterials durch die Räumer und das Zerkleinern durch die Kalibermeissel benötigt zusätzliche Drehkraft; diese ist im gleichen Gestein tendenziell konstant

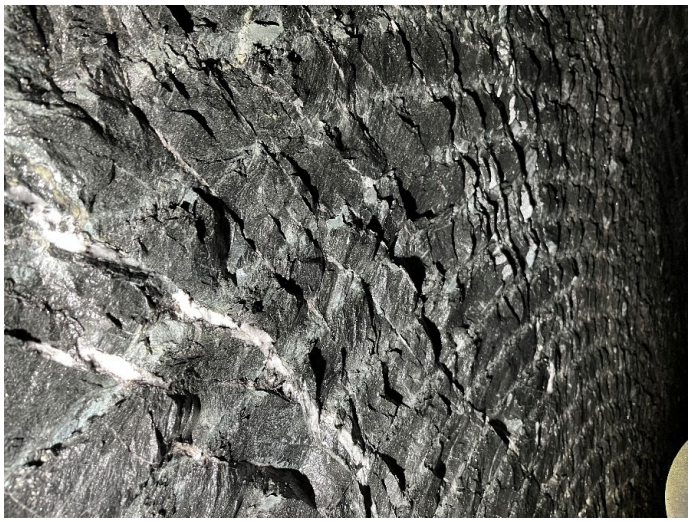




Folge der unterschiedlichen Abbauprozesse an der Ortsbrust:

1. Chipping Ausnahmefall: Stark anisotropes Gestein

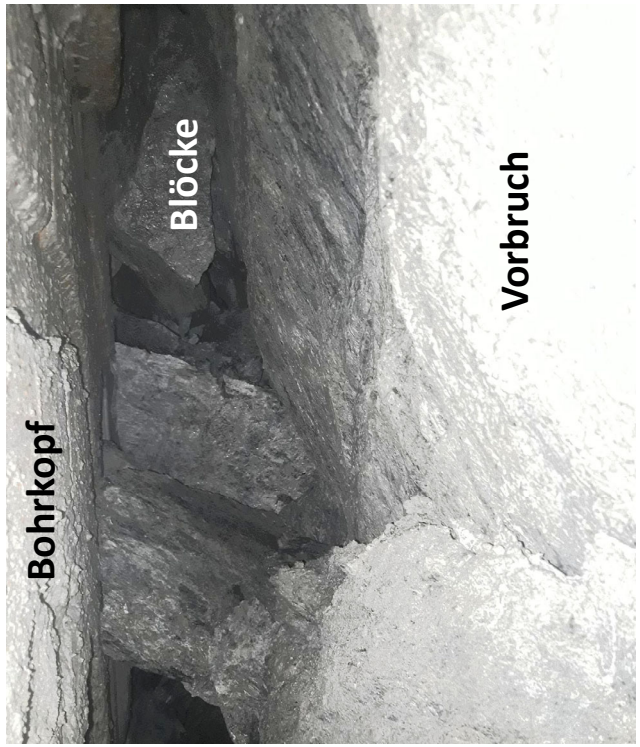
- Gestein bricht entlang Anisotropieflächen (potentielle oder effektive Trennflächen wie Schieferung, Schichtung)
- Entscheidende Kriterien für Ausbildung: Reduktion der Festigkeit, Orientierung der Anisotropie zur Ortsbrust (ausgeprägt bei subparalleler Orientierung)
- Je nach geometrischen Verhältnissen zwischen Schneidspur und Schieferung, Ausbruch von kleinen Platten (Ziegel-förmig) oder länglichen Stengeln
- Schneidspur trifft, je nach Orientierung Anisotropie zu Schneidspur, nur punktuell auf den Fels



Folge der unterschiedlichen Abbauprozesse an der Ortsbrust

2. Gesteinsabbau durch Bruch an vorgegebenen Trennflächen oder 3. spannungsbedingtes Versagen:

- Der Bruchkörper unterbricht die Schneidspur; der Schneidring liegt nur partiell der Ortsbrust auf
- Die Schneidringdrehkraft ist nur im intakten Bereich der Ortsbrust wirksam
- Je nach der Form des Bruchkörpers ist dieser zu breit um in den Räumerbereich gelangen zu können; er muss daher vom Bohrkopf gebrochen werden. Ist der Vorbruch massiv, gelangen auch dicke Blöcke in den Räumerbereich. In diesem Fall werden die Räumeröffnungen mit Korngrössenbegrenzern zusätzlich geschlossen um spätestens dort die Blockgrösse zu verringern. Das Brechen von Blöcken vor dem Bohrkopf führt zu einer starken Zunahme der Drehkraft (insbesondere im Verhältnis zur Anpresskraft des Bohrkopfs).

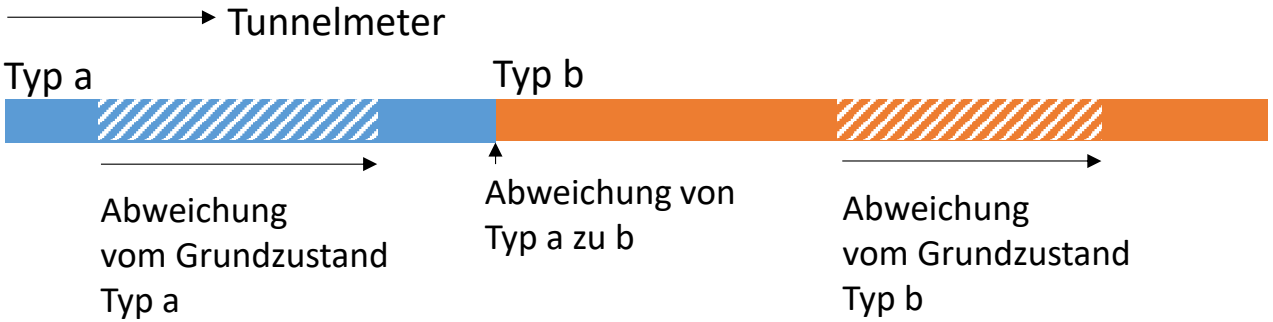


Methodische Ansätze:

Um die Verhältnisse an einer Ortsbrust beurteilen zu können, sind zwei Wege denkbar:

1. Relativer Ansatz:

Vergleich von unterschiedlichen Zuständen im Vortriebsverlauf, wenn sich einzelne Zustände genau definieren lassen.



2. Absoluter Ansatz:

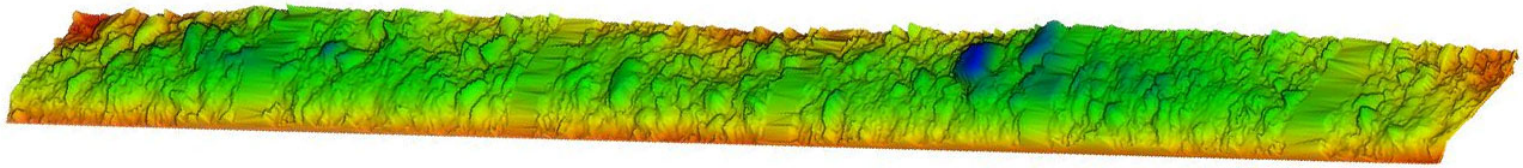
Vergleich der effektiven Daten mit theoretischen Daten, wenn Letztere einen definierten Zustand wiedergeben. Besonders geeignet für die Herleitung der theoretischen Daten: Modelle, wie CSM (Colorado school of mines), die von Meisselschneidversuchen in intaktem Gestein ausgehen. Die Modelle bilden daher den Zustand der intakten Ortsbrust ab.

Meisselschneidversuche
Abb. aus Galler (2014) in Abrock

Mittlere Anpresskraft/Schneidring = Anpresskraft Bohrkopf / Anzahl Schneidringe

Grundlagen:

- Die Penetration (Eindringung der Schneidringe in mm/Umdrehung) ist für alle Schneidringe auf dem Bohrkopf immer gleich hoch.
- Die Anpresskraft/Schneidring lässt sich im Produktionsvortrieb nicht messen.
- Bei einer Einfachschildmaschine lässt sich die Anpresskraft des Bohrkopfs über die Schneidradverschiebung messen; Gripper-TBM's beinhalten immer die Schildreibung. Besonders kritisch: Es gibt Indizien, dass die Schildreibung bei der Fahrt mit unterschiedlichen Vortriebspressenkräften variieren kann.
- Annahme: Die mittlere Anpresskraft/Schneidring entspricht bei einer stabilen und homogenen Ortsbrust der effektiv auftretenden Anpresskraft/Schneidring
- Ob die Ortsbrust stabil ist, lässt sich mit dem Ausbruchmaterial auf dem Förderband unabhängig überprüfen. Sind nur Chips oder flache Platten auf dem Band: Stabile Ortsbrust

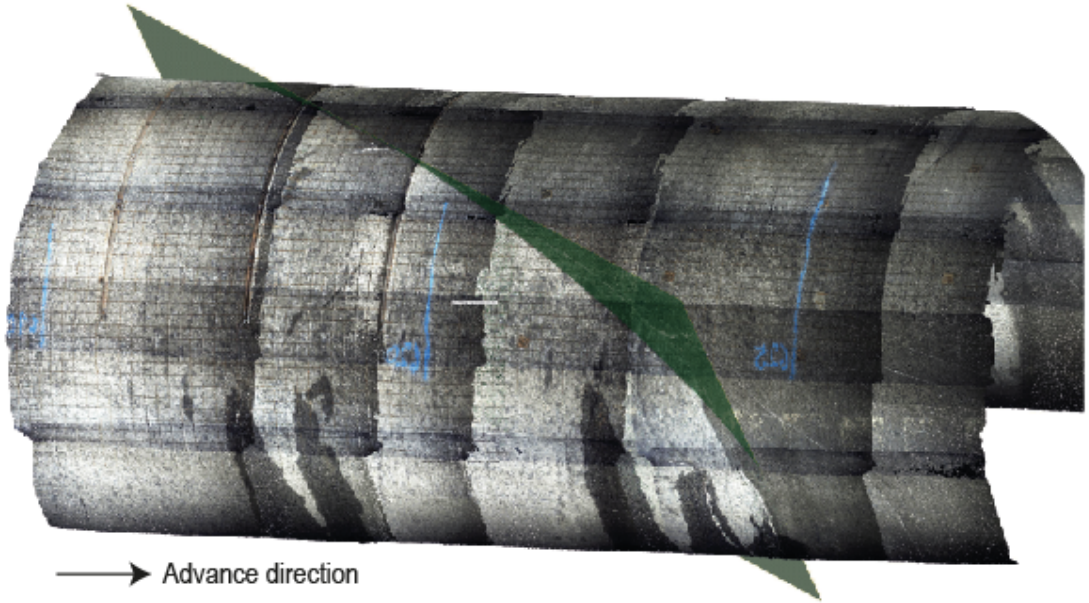


Erfassung von Blöcken mit einem Förderband-Lidar:
Höhe Ausbruch in Falschfarben

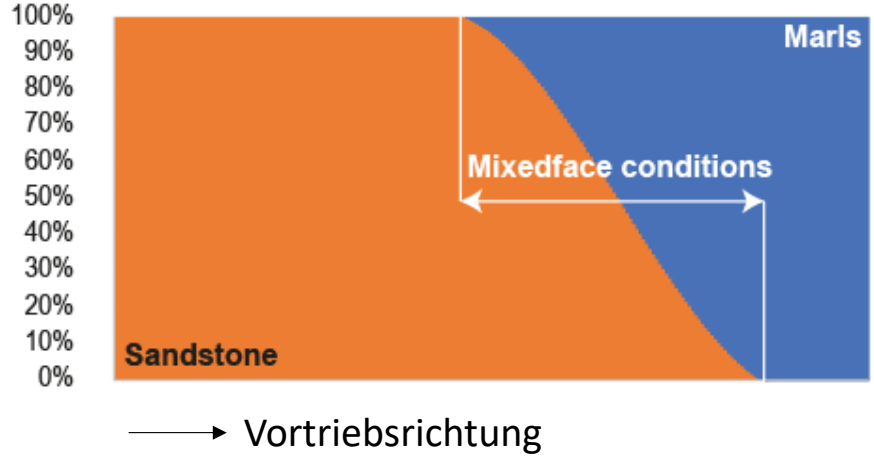
Relativer Ansatz (Kraftfaktor): Beispiel Gripper-TBM

Herleitung der Kraftverteilung über den Bohrkopf anhand von Mixedface-Bedingungen

3D-Modell

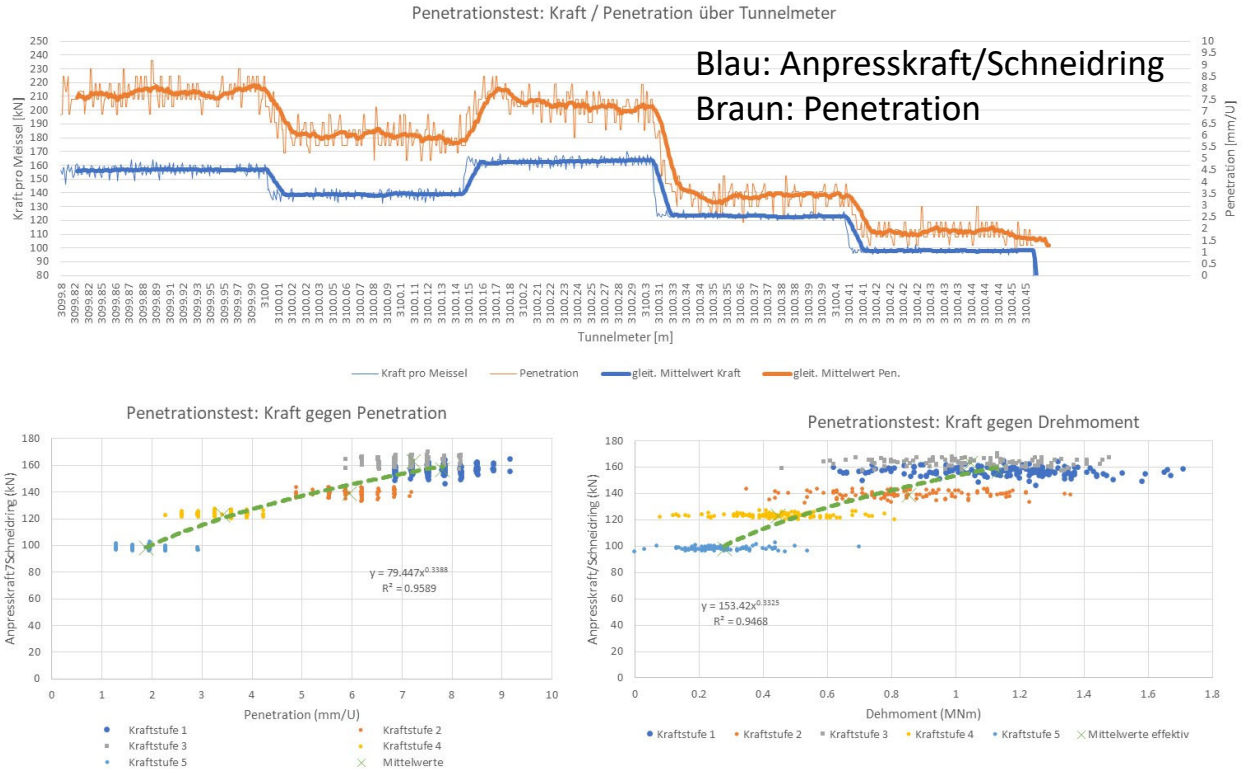


Volumenanteil der geologischen Homogenbereiche



Basis: Georeferenziertes 3D-Modell generiert mit automatischem, photographischem Aufnahmesystem

Relativer Ansatz (Kraftfaktor): Basis Penetrationstest



Gegenüberstellung Penetration zu Anpresskraft/Schneidring bzw. Drehmoment zu Anpresskraft/Schneidring

Voraussetzung:

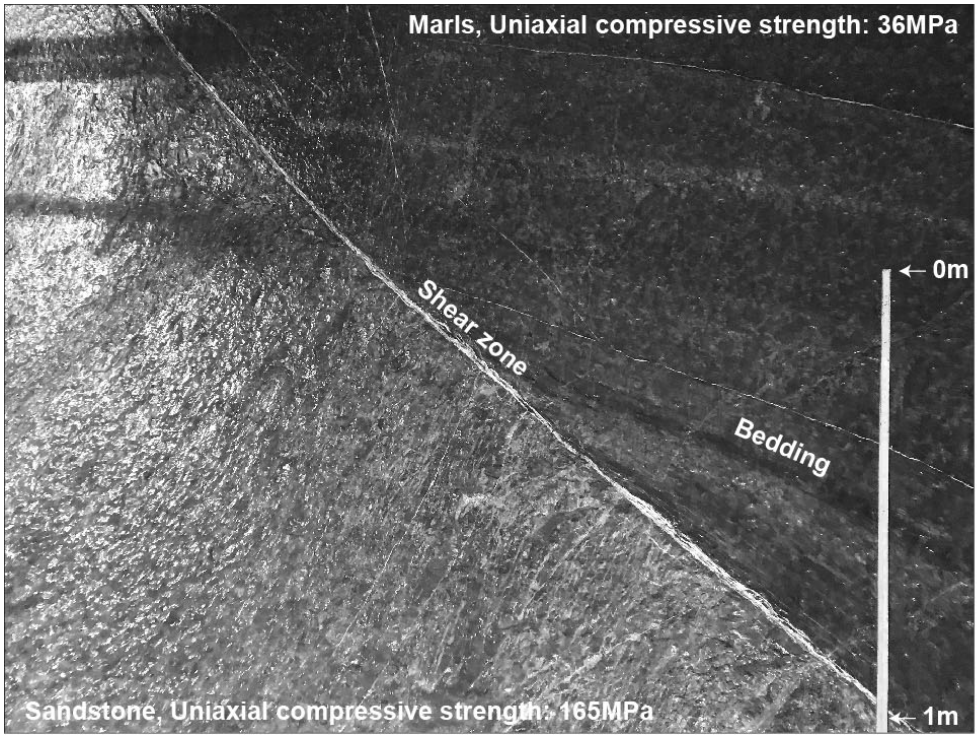
- Nur wenn keine Blöcke auf dem Förderband sichtbar sind, kann angenommen werden, dass die Ortsbrust zu 100% stabil ist
- Im Testverlauf müssen die geologischen Bedingungen konstant bleiben

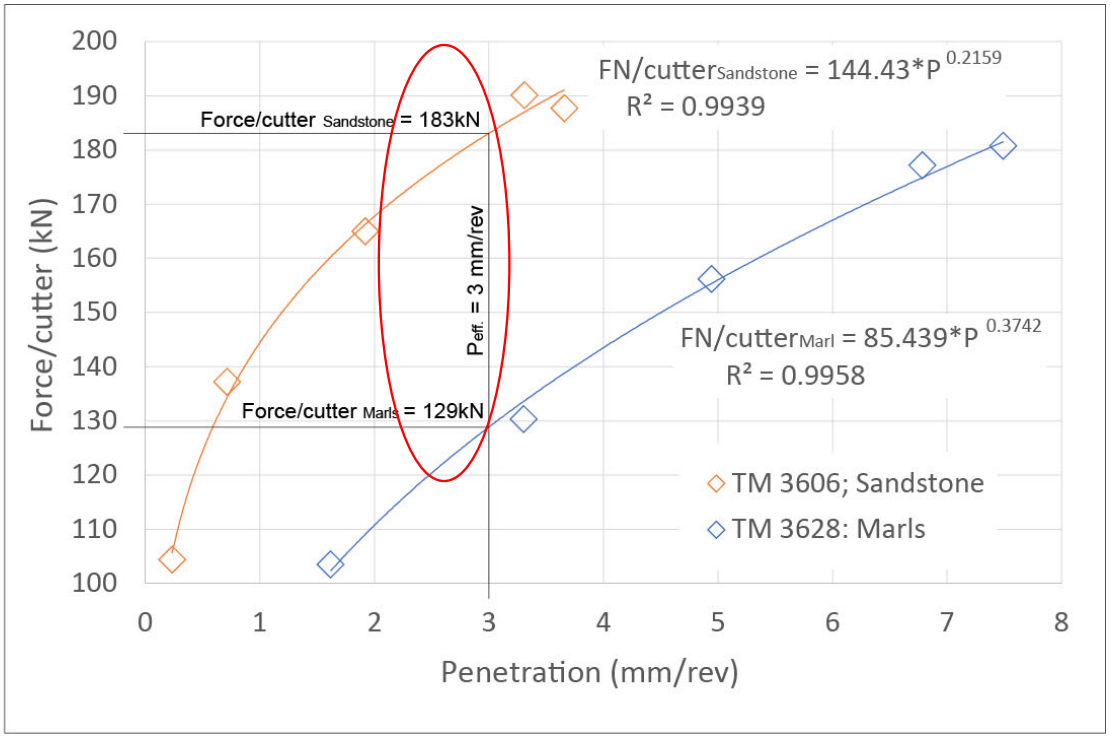
Vorgehen Penetrationstest:

- TBM-Fahrt mit definierter Anpresskraft auf verschiedenen Kraftstufen während einer definierten Zeit
- Bestimmung Mittelwerte je Stufe (Kraft, Penetration, Drehmoment)
- Bestimmung Anstieg aus den Mittelwerten

Relativer Ansatz (Kraftfaktor): Beispiel Gripper-TBM

Auswertung Penetrationstests

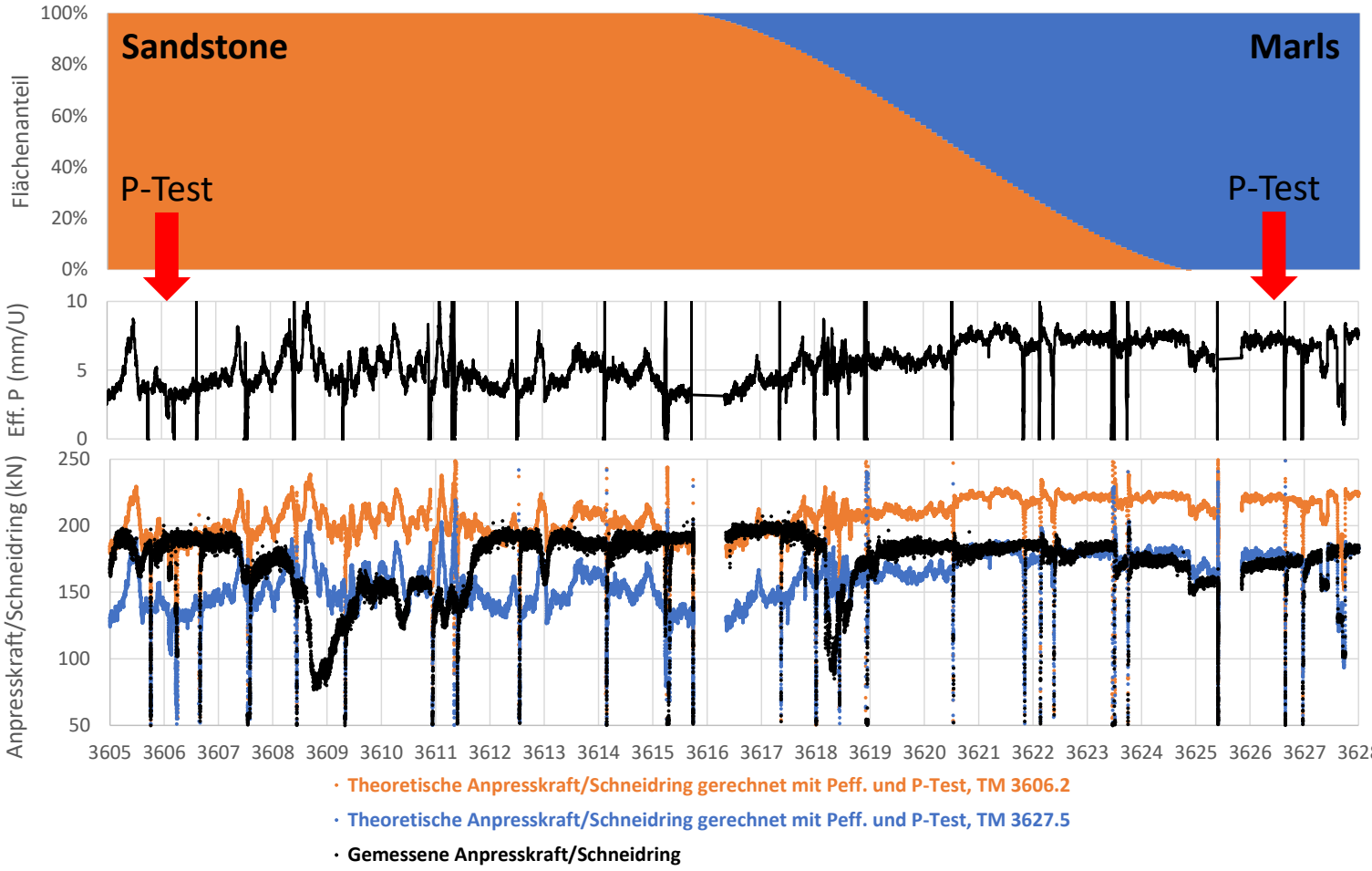




Penetrationstest bei stabiler Ortsbrust und 100% je Formation im gesamten Querschnitt:

- Test im Sandstein, Ableitung der braunen Funktion
- Test im Mergel, Ableitung der blauen Funktion

Relativer Ansatz (Kraftfaktor): Beispiel Gripper-TBM



Berechnung der theoretischen Anpresskraft/Schneidring, auf Basis der effektiven Penetration und der P-Tests in den einzelnen Formationen

Vergleich zwischen:

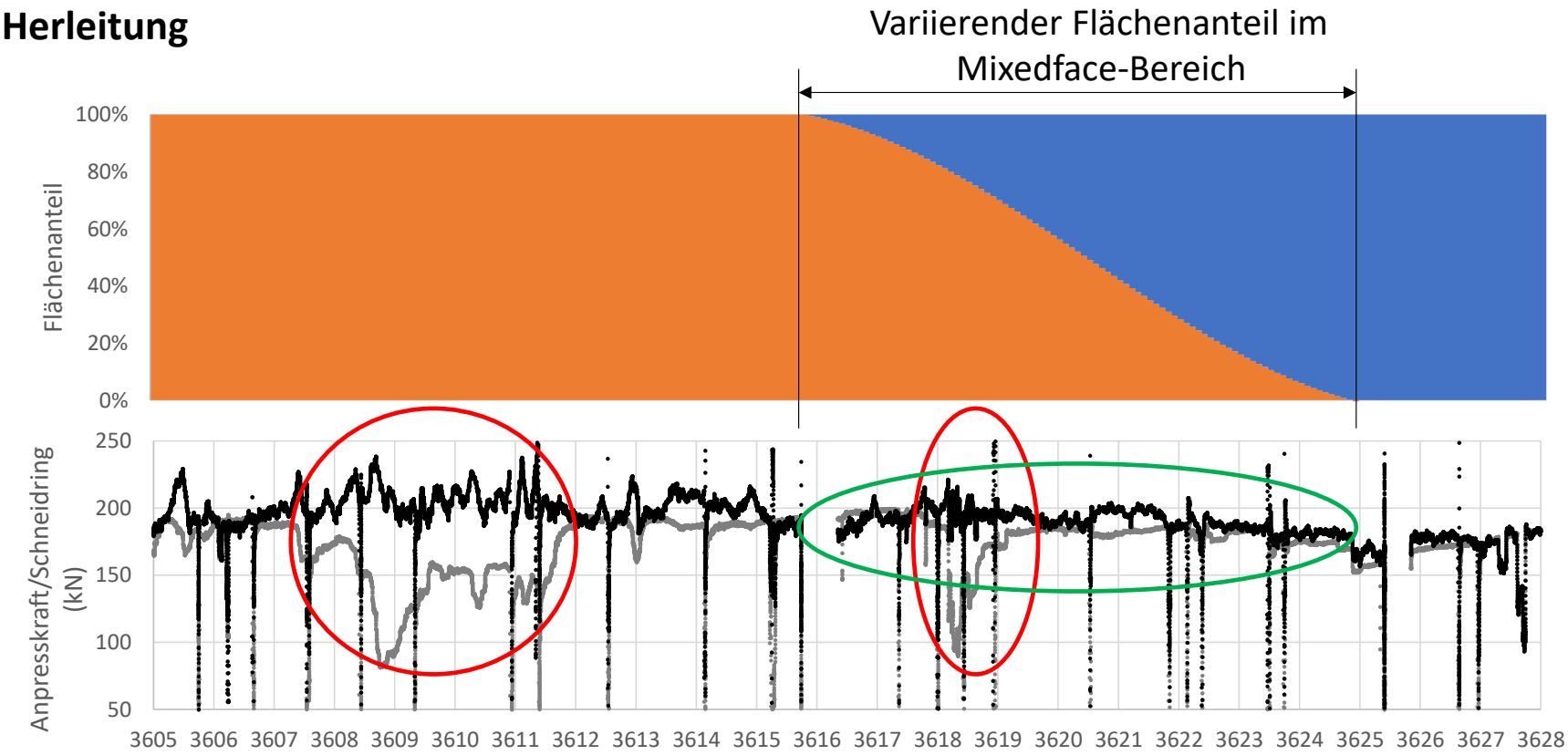
Theoretischer Anpresskraft/Schneidring:
Braun: 100% Sandstein
Blau: 100% Mergel

und

Effektiv gemessener Anpresskraft/Schneidring (schwarz): Anteile Sandstein und Mergel gemäss Verteilung

Relativer Ansatz (Kraftfaktor): Beispiel Gripper-TBM

Herleitung



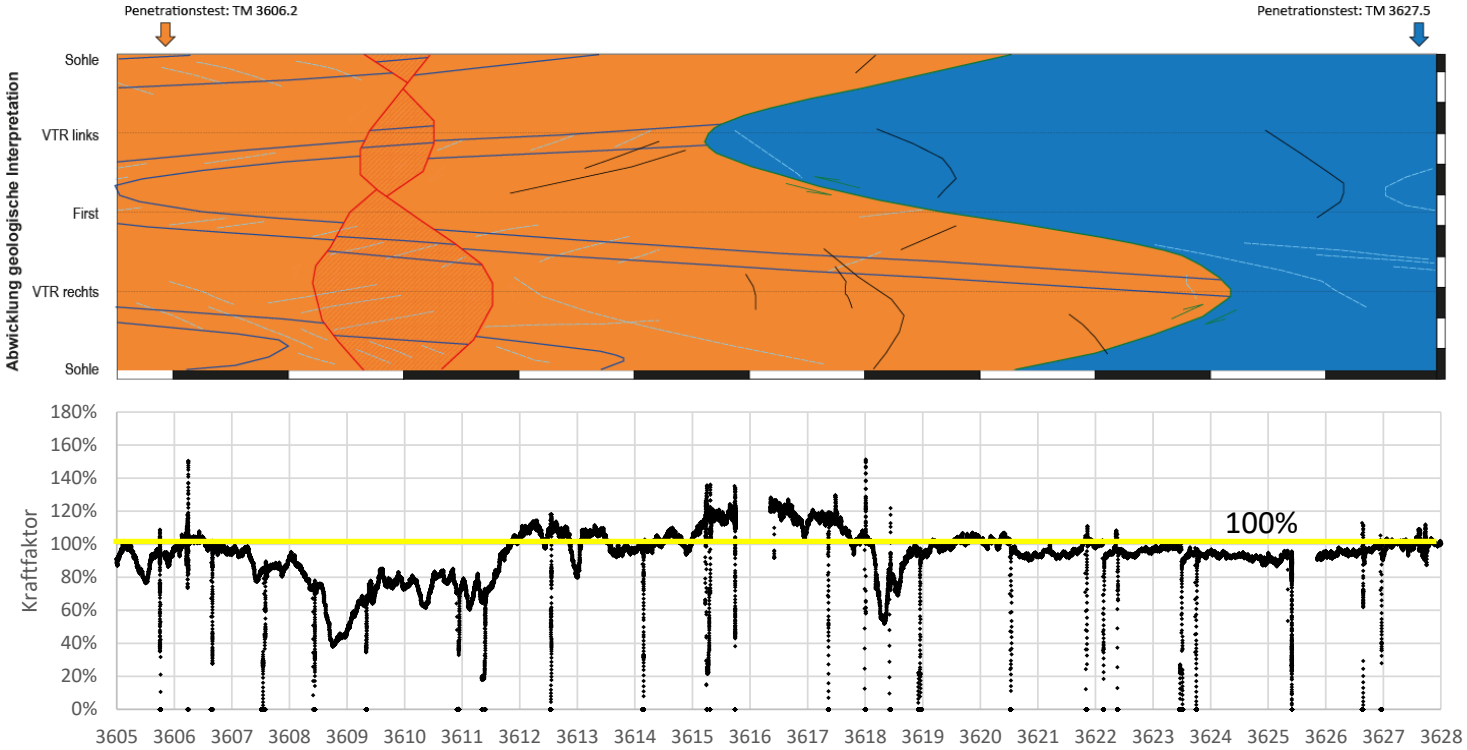
Effektive Kraft = Theoretische Kraft, auch über den Mixedface-Bereich hinweg

Zwei negative Abweichungen

- Grau: Über die Flächenanteile der beiden Formationen gewichtete mittlere Kraft/Schneidring
- Schwarz: Effektiv gemessene mittlere Anpresskraft/Schneidring

Relativer Ansatz (Kraftfaktor): Beispiel Gripper-TBM

Herleitung



- Kraftfaktor ist +/- bei 100% über den Formationswechsel hinweg

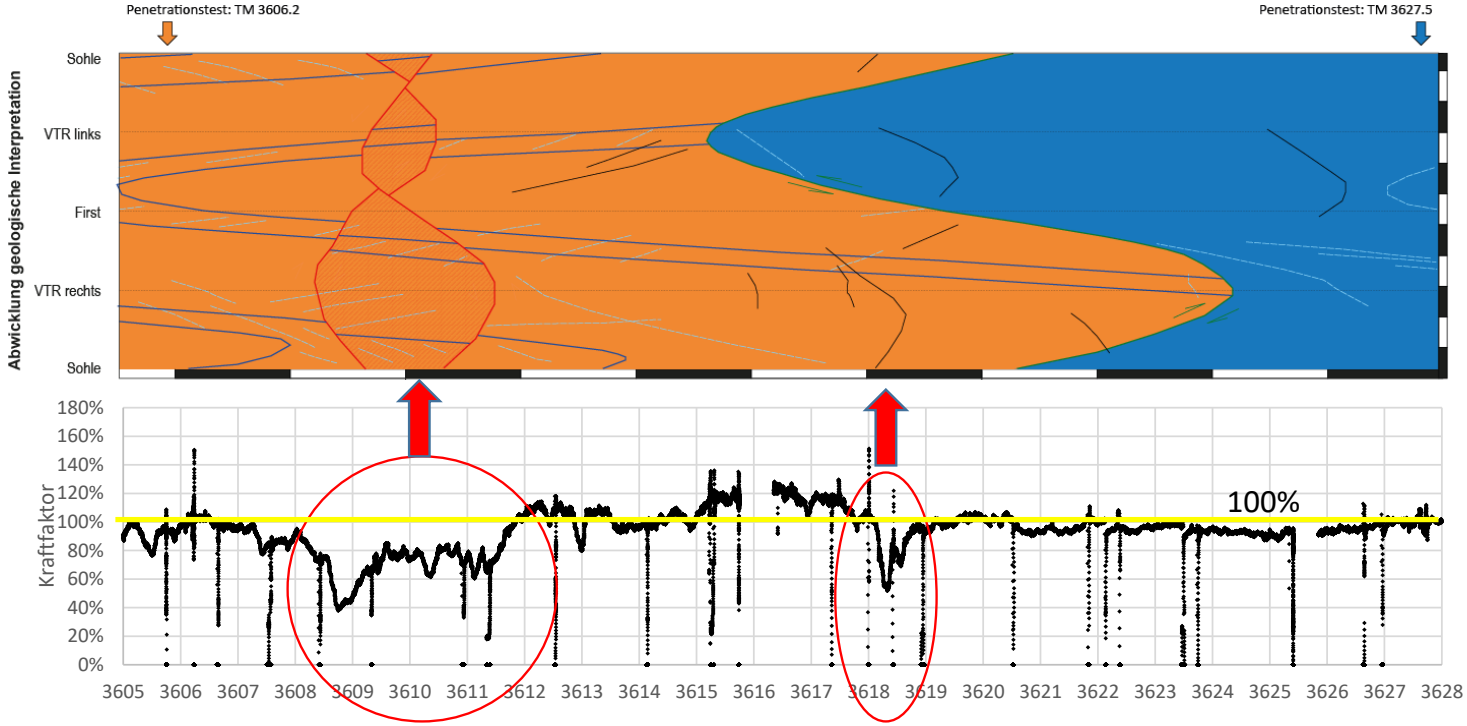
Daraus folgt:

- Schneidringe in der harten Schicht nehmen hohe Kräfte auf (entsprechend P/FN-Kurve in harter Schicht)
- Schneidringe in der weichen Schicht nehmen geringe Kräfte auf (entsprechend P/FN-Kurve in weicher Schicht)

Kraftfaktor = Gemessene Kraft / Theoretische Kraft

Relativer Ansatz (Kraftfaktor): Beispiel Gripper-TBM

Analyse Abweichungen Kraftfaktor

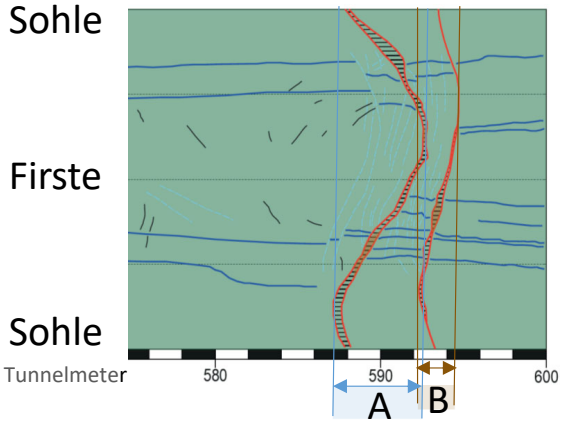


Abweichungen Kraftfaktor:

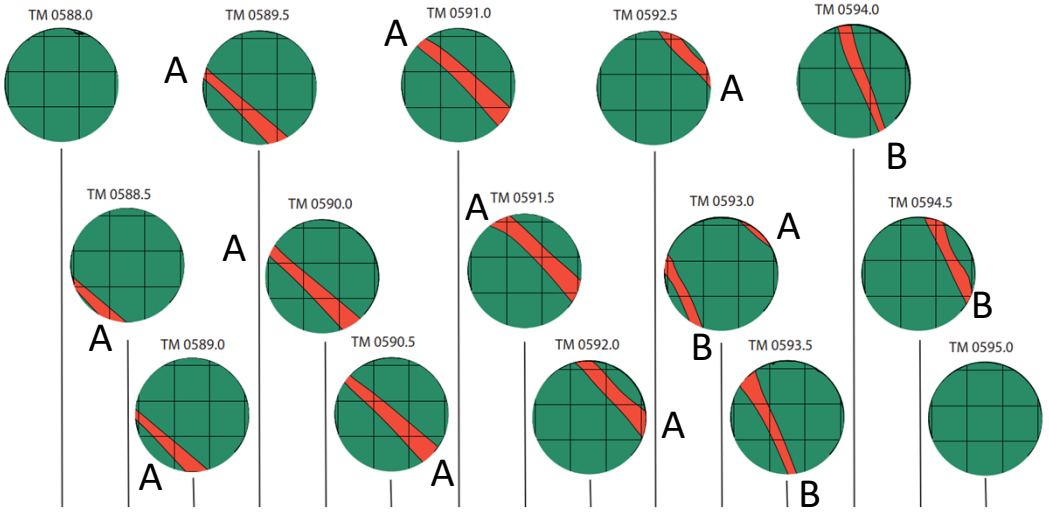
- Negative Abweichung durch fehlende Auflage Schneidringe
- Geologische Ursache: 5cm offene Klüfte
- Vermutung: Instabile Ortsbrust durch offene Klüfte

Vergleich Kraftfaktor mit Störzonenanteil: Beispiel Gripper-TBM

Abwicklung Geologie, konstruiert aus 3D-Aufnahme Parament



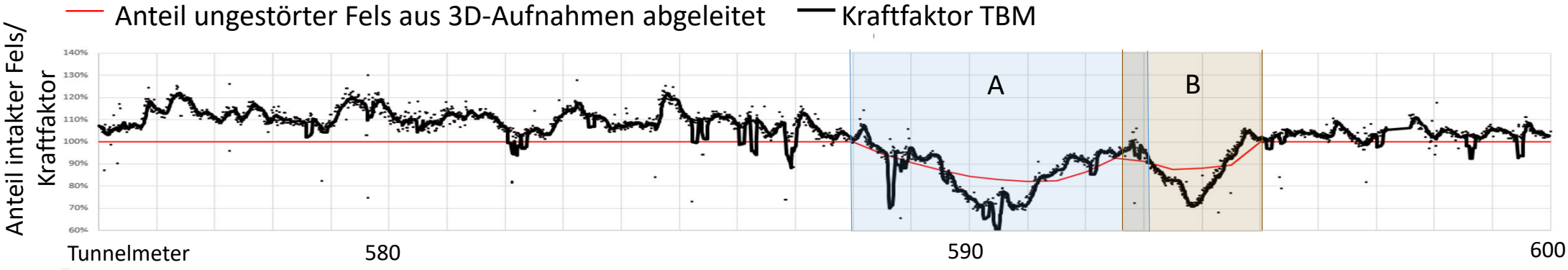
Ortsbrustquerschnitte konstruiert aus 3D-Modell



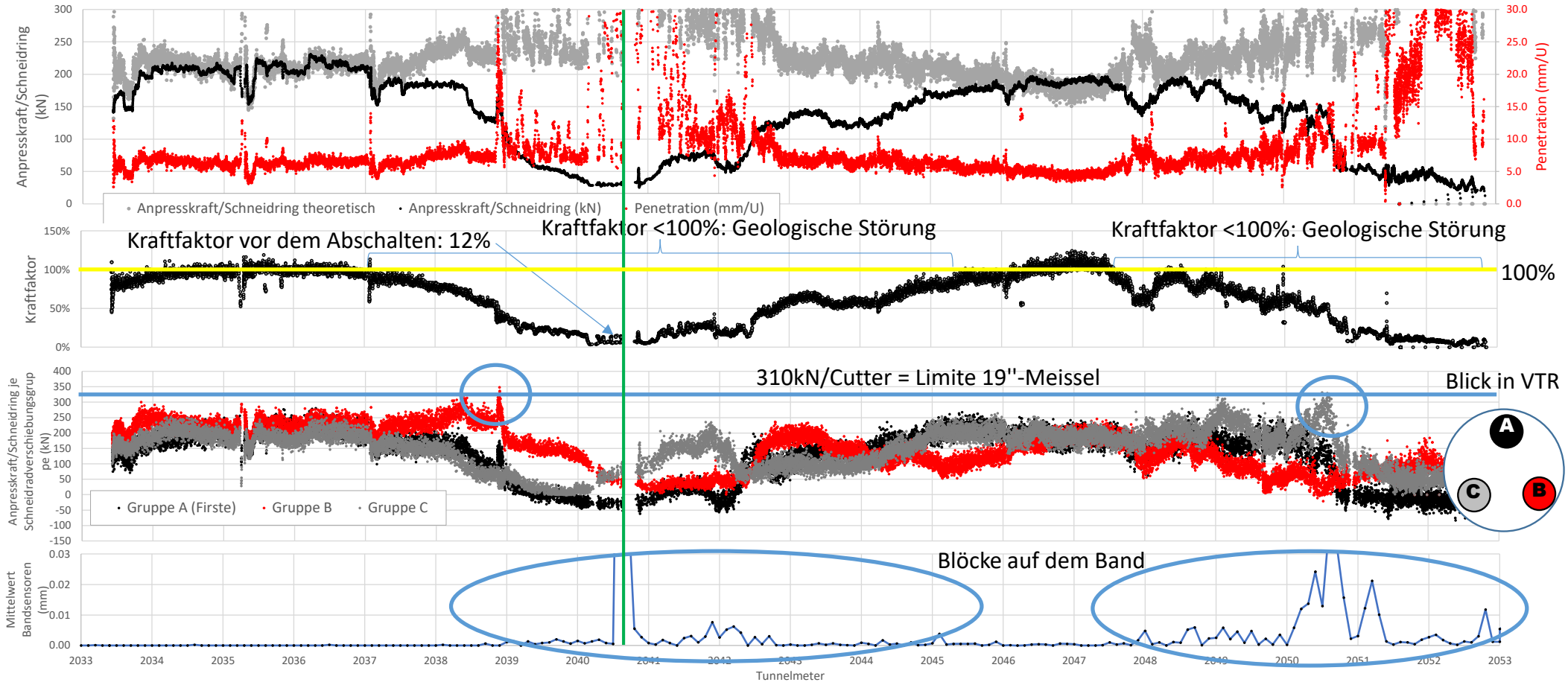
Erkenntnis:
Kraftfaktor ist in Störzone < Anteil ungestörter Fels,

daher gilt:

- Kraftaufnahme in Störzone = 0kN und
- zusätzlich weiterer Fels mit reduzierter Kraftaufnahme



Vergleich Kraftfaktor-3D-Aufnahme Ortsbrust: Beispiel Schild-TBM mit Bohrkopfverschiebung



3-Aufnahme Ortsbrust

<u>Vergleich Kraftfaktor - 3D-Aufnahme Ortsbrust:</u> Beispiel Schild-TBM mit Bohrkopfverschiebung

Bestimmung der Ortsbrustflächenanteile in der Störzone automatisiert anhand 3D-Modell:

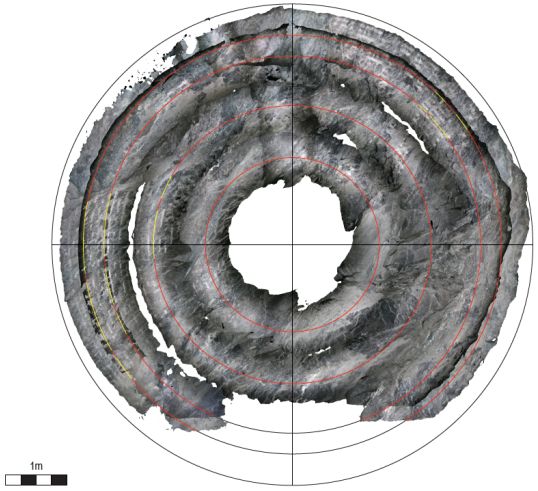
- Anteil Instabil: 82%
- Anteil Stabil: 18%

Kraftfaktor unmittelbar vor der Ortsbrustaufnahme:

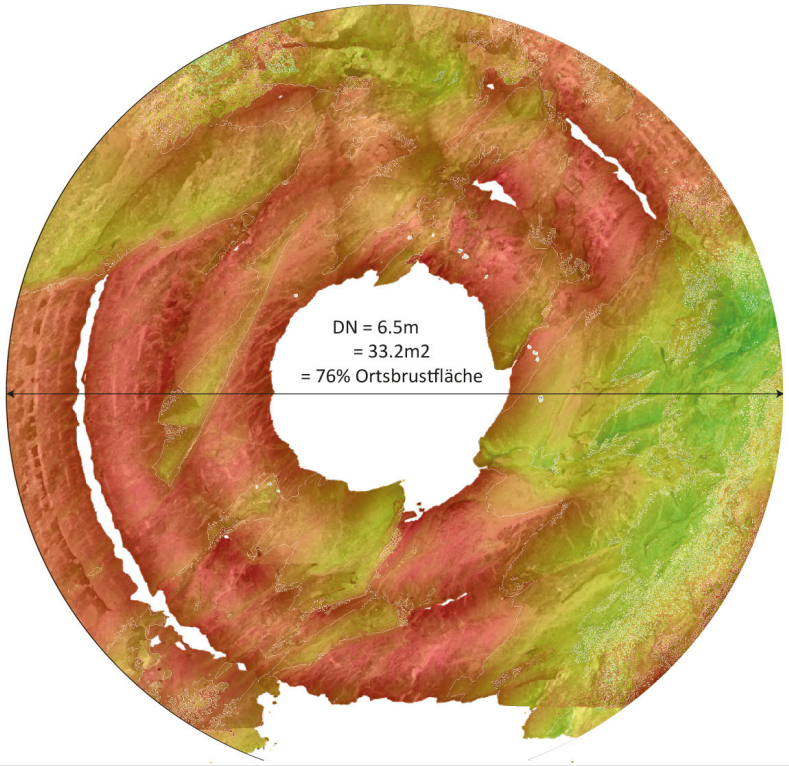
- Kraftfaktor ermittelt aus TBM-Daten: 12%

Konsequenz:

Kraftfaktor = Anteil stabile Ortsbrust



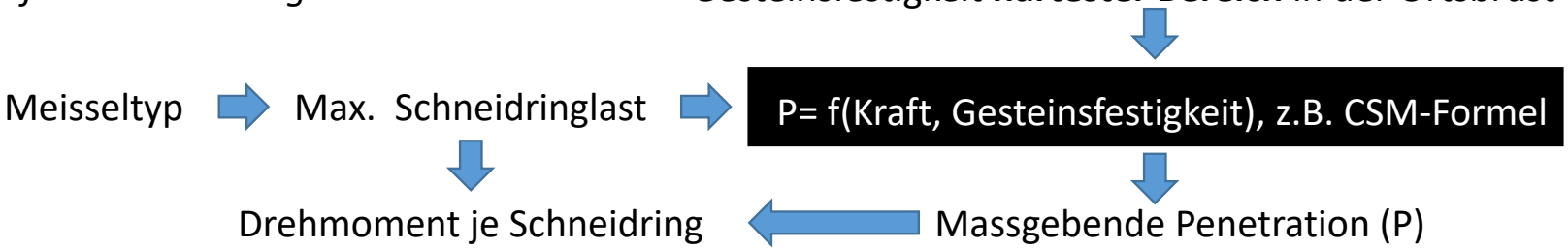
Auswertung Ortsbrustaufnahme:



									Summe stabil	instabil
Ausbruchtiefe (m)	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40		
Flächenanteil	14%	31%	20%	8%	3%				14%	62%
Ausbruchvolumen (m³)	0.5	1.9	2.1	2.0	1.0	0.4	0.1		0.5m3	7.5m³
	stabil	instabil								

Zusammenfassung Erkenntnisse Kraft/Kraftfaktor:

Massgebend für TBM-Leistung:



Folge für Vortrieb mit stabiler Ortsbrust:

Die mittlere Anpresskraft/Schneidring über die gesamte Ortsbrust nimmt gegenüber der maximal zulässigen Schneidringlast ab in Abhängigkeit von:

- Flächenanteilen der unterschiedlich harten Gesteine im jeweiligen Querschnitt
- Festigkeit der entsprechenden Gesteine

Folge für Vortrieb mit instabiler Ortsbrust:

Weitere Abnahme der mittleren Anpresskraft/Schneidring, weil:

- **Kraftaufnahme der Schneidringe im vorgebrochenen Teil Null ist**
- **Als Folge daraus entspricht der Kraftfaktor dem Anteil an stehengebliebener Ortsbrust**

Voraussetzung für die Ermittlung des Kraftfaktors:

- Während Penetrationstest: Konstante geologische Bedingungen und intakte Ortsbrust

Absoluter Ansatz (Drehmomentfaktor):

- Beim Chippingprozess stehen Penetration, Anpresskraft und Drehmoment in einem +/- definierbaren Verhältnis
- Ausgehend davon lässt sich anhand der Anpresskaft der Schneidringe, der Schneidspurradien und der Penetration ein theoretisches Drehmoment berechnen, das den Gesteinsabbau beim reinen Chippingprozess (also einer 100% intakten Ortsbrust) nachbilden sollte. Der Vergleich zwischen dem effektiv notwendigen und dem theoretischen Drehmoment erlaubt eine Einschätzung der Ortbruststabilität.
- N. Radoncic (https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/igt/tunneling-dam/kolloquien/2022/Doku_Vortrag_ETH.pdf) hat am Kolloquium 2022 das Konzept des Drehmomentfaktors vorgestellt (entspricht Drehmomentberechnung CSM)
- Die Firma Marti hat das Konzept an mehreren Projekten getestet und mit eigenen Erfahrungen verglichen.
- Berechnung theoretisches Drehmoment nach CSM

$$M_{theor} = FN * SIN\left(\frac{ARCCOS\left(\frac{(R*1000-P)}{R*1000}\right)}{2}\right) * 0.3 * n_c * D_c$$

- Berechnung Drehmomentfaktor nach Radoncic:

$$\text{Drehmomentfaktor} = M_{eff} / M_{theor}$$

Berechnung CSM

FN = Anpresskraft/Schneidring (kN)
P = Penetration (mm/U)
Mtheor = Drehmoment Bohrkopf (kNm)
R = Radius Schneidring (m)
Nc = Anzahl Schneidringe auf Bohrkopf
Dc = Durchmesser Bohrkopf (m)

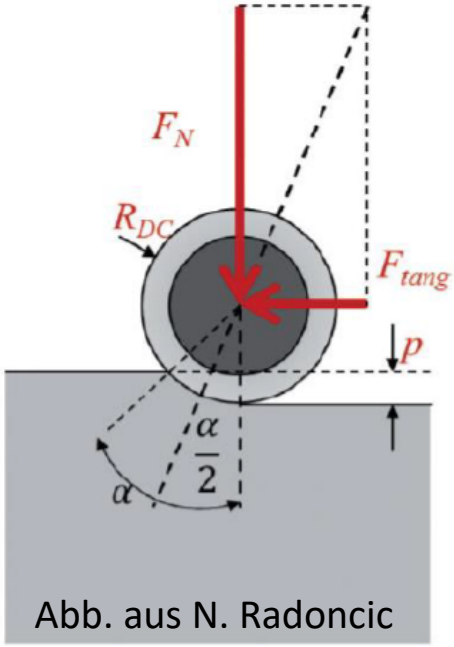
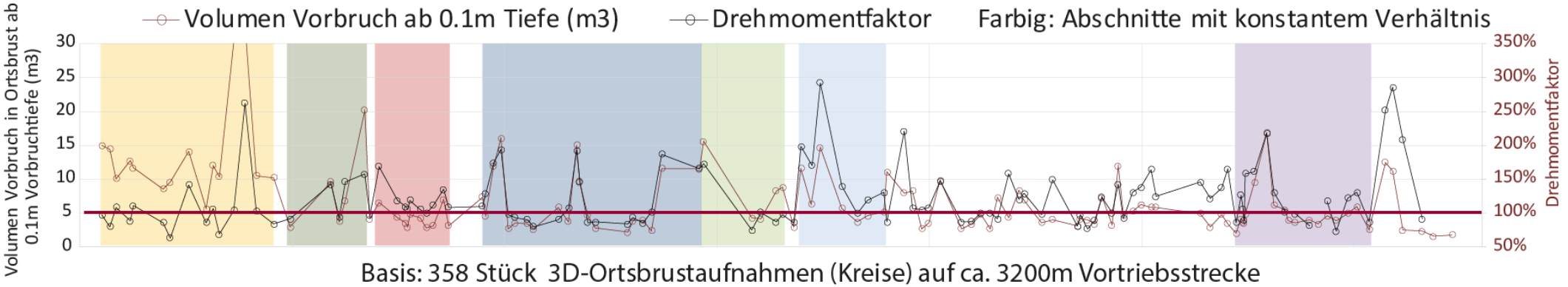


Abb. aus N. Radoncic

Absoluter Ansatz (Drehmomentfaktor): Beispiel für Kombination mit anderen Massnahmen: Schild-TBM

- Vorbruchvolumen bei Vorbruch tiefer als 0.1m, berechnet aus 3D-Modellen von Ortsbrustaufnahmen
- Drehmomentfaktor abgeleitet aus Anpresskraft/Schneidring, Drehmoment und Penetration unmittelbar vor den Ortsbrustaufnahmen



Basis: 358 Stück 3D-Ortsbrustaufnahmen (Kreise) auf ca. 3200m Vortriebsstrecke

Beobachtung:

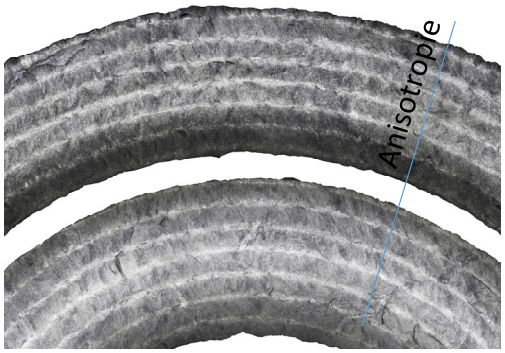
- Der Drehmomentfaktor und das Vorbruchvolumen korrelieren
- Abschnittsweise wechselndes Verhältnis zwischen Vorbruchvolumen und Drehmomentfaktor
- Ursache Blockform und/oder Ausbildung der Meisselspur
- Mögliche geologische Ursache: Anisotropie

Konsequenz:

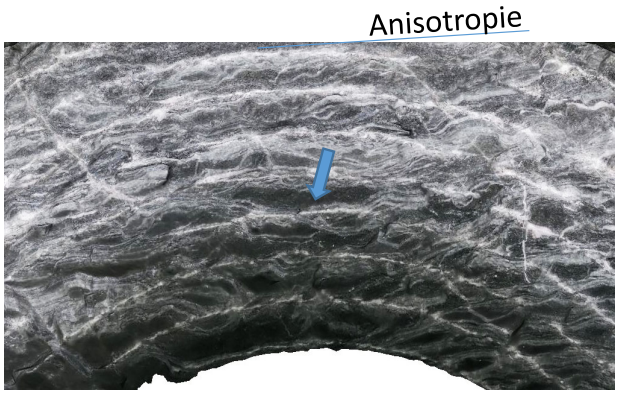
- Der Drehmomentfaktor ist ein Indikator für die Stabilität der Ortsbrust
- In Kombination mit anderen Faktoren ist eine quantitative Bestimmung der Ortsbruststabilität möglich

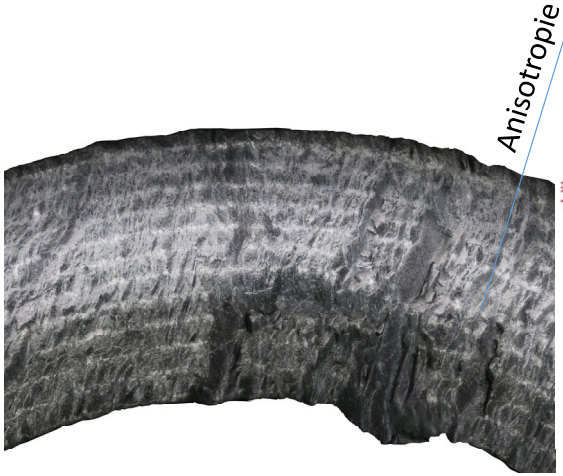
Absoluter Ansatz (Drehmomentfaktor): Einfluss Anisotropie

- Bei subparalleler Orientierung von Ortsbrust und Anisotropie: Flache Ablösungen entlang Anisotropie, unterbrochene Meisselspuren
- Die Schneidringe nehmen je nach Orientierung der Meissel zum Streichen der Schieferung unterschiedliche Lasten auf (s. Abb. Galler in Abrock 2014: Senkrecht hoch, parallel tief), daher gilt: Systematische Mixedfacebedingungen
- Unterbrochene Meisselspuren führen zu fehlender Auflage der Schneidringe und damit zu geringerem Drehmoment
- Vorbrüche geringer als 10cm daher keine Blöcke, Folge: Keiner oder geringer Anstieg Drehmoment durch Reibung
- Folge: Verändertes Verhältnis zwischen Vorbruchvolumen und Drehmomentfaktor

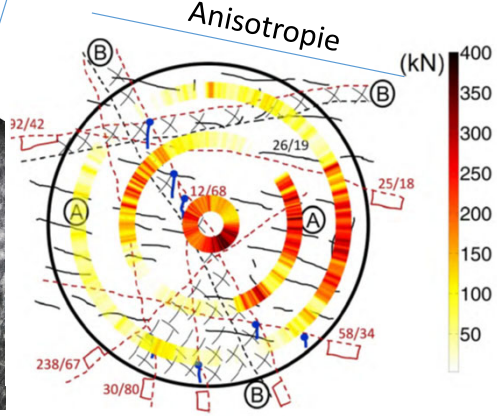


Abschnitt Gelb: Massige Gneise
Gleichbleibende Meisselspuren



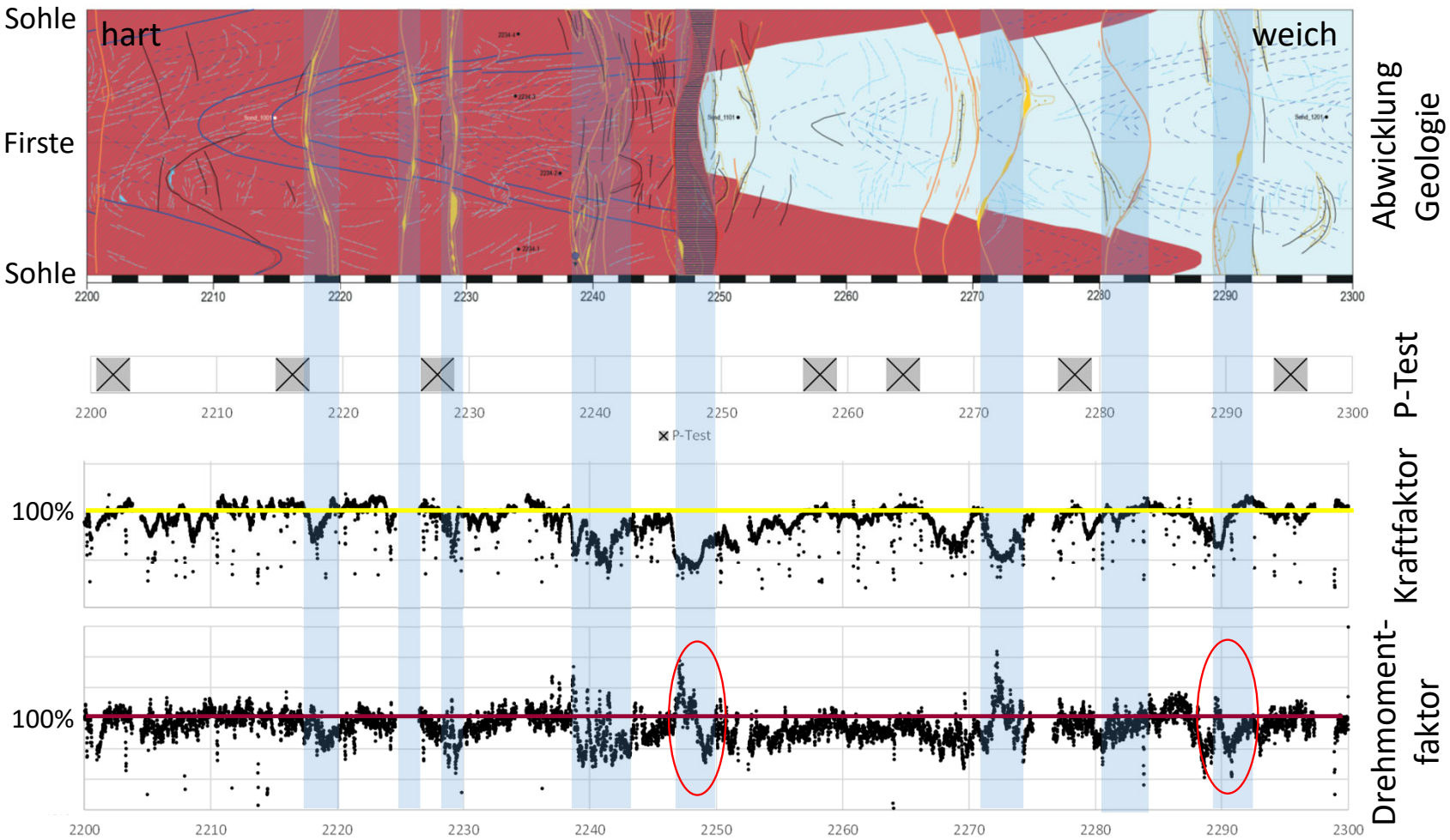


Abschnitt Rot: Schiefrige Gneise
Bild links: Meisselspur parallel Schieferung, rechts senkrecht



Effektiv gemessene Meissel-anpresskraft in anisotropem Gestein, aus Galler (2014), Abrock

Vergleich Drehmomentfaktor mit Kraftfaktor (Gripper-TBM)



Drehmomentfaktor beim Anschneiden der Störung >100%, danach <100%

Vorgehen TBM-Fahrer:

1. Einstellung Vortrieb bis Verbruch leer geschuttert ist
2. Gleichzeitiger Vortrieb und Abbau Blöcke

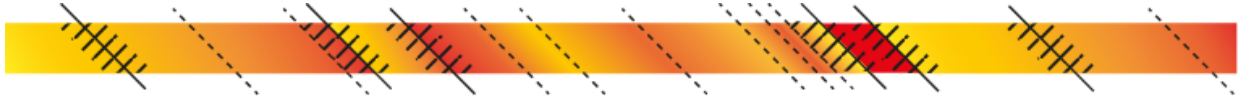
Es funktionieren beide Faktoren in harten, sowie in weichen Gesteinen und in Übergangsbereichen

Zusammenfassung:

- Je nach TBM-Typ und/oder geologischen Bedingungen, macht die Anwendung des einen oder andern Faktors oder einer Kombination Sinn.

Konstante Bedingungen mit einzelnen Unterbrechungen: Kraftfaktor

Selten konstante, häufig variable Bedingungen: Drehmomentfaktor



- Die Kombination der Faktoren mit anderen unabhängig erfassten Daten, wie dem Material auf dem Band, der Geologie und Stabilität der Ortsbrust, erlaubt quantitative Aussagen
- Mixedfacebedingungen und instabile Ortsbrust führen zwangsläufig zu reduzierten Anpresskräften
- Anisotropie im Gestein führt zu Mixefacebedingungen und kann das Verhältnis zwischen Anpresskraft, Penetration und Drehmoment verändern. Ihren Einfluss gilt es zu berücksichtigen

- **Hat man keine oder nur eine beschränkte Einsicht in die geologischen Bedingungen, lassen sich mit dem aufgezeigten Vorgehen die Verhältnisse an der Ortsbrust aus den TBM-Daten rekonstruieren**
- **Bei der Anwendung von TBM-Berechnungsmodellen sind allfällige Mixedface-, oder instabile Ortsbrustbedingungen mit einer reduzierten Anpresskraft/Schneidring zu berücksichtigen**