Der Einfluss von Gebirgsparametern auf die TBM-Penetration: Neue Erkenntnisse auf Grund verbesserter Methoden zur Erfassung und Modellierung des Gebirges

Weh Markus
Marti Holding AG
Seedorffeldstr. 21
3302 Moosseedorf

Dr. Florian Amann
ETH-Z
Geologisches Institut
NO G4
Sonneggstr. 5, 8092 Zürich

Wannenmacher Helmut
Universität Innsbruck
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften
Arbeitsbereich für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement
Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck

1. Einleitung, Beispiel

Die Beeinflussung durch Gebirgsparameter führt im Hartgestein immer wieder zu Abweichungen der TBM-Penetrations-Prognose gegenüber den tatsächlich erreichten Penetrationen.

In diesem Beitrag wird dies anhand eines TBM-Vortriebes im kristallinen Hartgestein exemplarisch aufgezeigt. Die im Weiteren aufgeführten Beobachtungen und Erkenntnisse wurden im Zuge eines TBM-Vortriebes mit 9.45 m Durchmesser in stark anisotropen Gneisen und Schiefern erhoben.

Während dem Vortrieb wurden Gebirgsabschnitte angefahren, innerhalb derer die Vortriebsleistungen massiv unter den zu erwartenden Leistungen lagen. Die Hubzeiten erreichten gegen 3 Stunden für 2 m Hublänge. Da die Drehzahl unverändert bei 6 Umdrehungen pro Minute lag, konnte die tiefe Vortriebsleistung auf eine extrem tiefe Penetration zurück geführt werden. Um der Ursache dieser extrem tiefen Penetrationen und damit verbundene negative Auswirkungen auf die Bauzeit auf den Grund zu gehen, wurden sowohl die maschinentechnischen als auch die geologischen Gegebenheiten detailliert erfasst und analysiert.

1.1. Maschinentechnische Gegebenheiten

In regelmässigen Abständen wurden insgesamt ca. 150 Penetrationstest ausgeführt, um die Entwicklung der Penetration in Abhängigkeit der Krafteinwirkung zu evaluieren und gleichzeitig die Schildreibung abzuschätzen. Aus diesen Daten wurde ein Penetrationsmodell entwickelt. Je härter das Gestein war, desto flacher waren der Basis- und der Sekundäranstieg der Penetration bei zunehmender Anpresskraft (Abbildung 1). Aus statistischer Sicht besteht zwischen Gebirgsfestigkeit (UCS) und Basis- bzw. Sekundäranstieg ein signifikanter Zusammenhang, ebenso wie zwischen der Gebirgsfestigkeit und der Höhe der Kraft bei welcher der Sekundäranstieg einsetzt. Je härter das Gestein ist, desto später setzt der Sekundäranstieg ein. Die spezifische Penetration des Basis- oder Sekundäranstieges können dem zufolge als Index für die Gebirgsfestigkeit betrachtet werden. Die hineingeplotteten Mittelwerte der Hübe zeigen, dass teilweise Bedingungen mit extrem geringer Bohrbarkeit vorliegen. Ebenfalls zeigen die gezeigten Mittelwerte, dass die realisierbaren Vorschubkräfte zu gering sind. Ursächlich für die tiefen Vorschubkräfte waren starke Vibrationen, die bei zu hohen Vorschubkräften zu Schäden am Bohrkopf und an den Schneidringen führten.

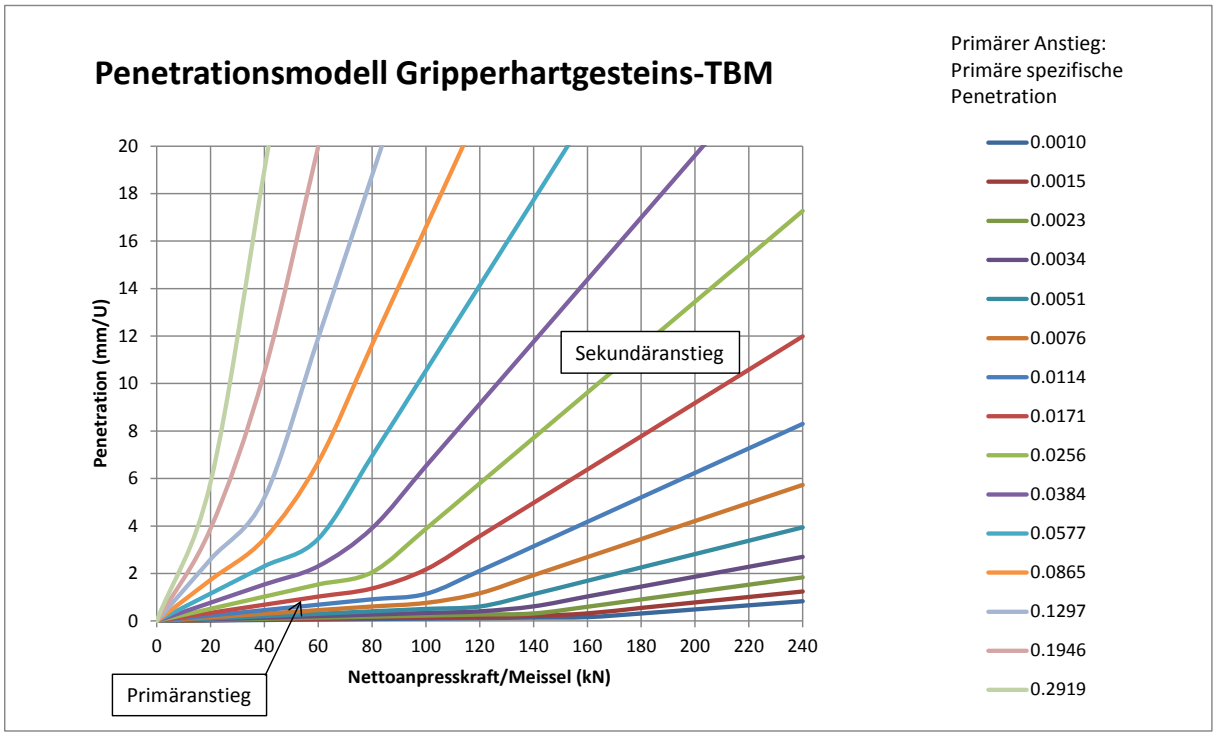

Abbildung 1: Penetrationsmodell abgleitet aus den Resultaten von 150 Penetrationstests

1.2. Geologische Gegebenheiten

Die geologischen Gegebenheiten im Vortrieb wurden wie folgt erfasst:

- Zusammenfassung der Lithologie nach Gesteinstypen und Homogenbereichen (lithologische Homogenbereiche?)
- Beprobung der verschiedenen Gesteinstypen/Homogenbereiche und deren Analyse im Labor (Einaxiale Druckversuche, Spaltzugfestigkeit, Bruchenergie, Cerchar Abrasiveness Index „CAI“)
- Erfassung der Gebirgseigenschaften (Schieferung, Klüfte, Trennflächen)
- Erfassung spannungsbedingter Instabilitäten an der Ortsbrust und Tunnellaibung
- Aufnahmen der Ortsbrust mittels Fotos und Laser-Scanner,
- Aufnahme der Tunneloberfläche mittels Barton - Kamm
- Schmidthammertests

Resultate der geologischen Analysen:

1. Das Gestein bestand aus Augengneisen und kristallinen Schiefern oder schiefrigen Gneisen, wobei die extrem tiefen Penetrationen nur im Augengneis auftraten.

2. Unterschiedliche Winkel der Schieferung zur Ortsbrust

3. Wahrscheinlich keine Probenvorschädigung der analysierten Laborproben.

4. Die Klüfte und Scherzonen im Augengneis wirken nicht als effektive Trennflächen. Vielmehr handelte es sich um verheilte, das heisst mit Quarz oder Chlorit verfüllte Klüfte mit hoher Festigkeit.

5. An der Tunneloberfläche stehen die Scherzonen teilweise deutlich vor, was auf erhöhte Festigkeit hinweist.

5. An den Scherflächen war die Festigkeit gegenüber dem Gestein erhöht. Diese Erhöhung der Gesteinsfestigkeit beschränkte sich nicht nur auf die unmittelbare Scherzone, sondern erstreckte sich beidseitig in Form aufgehellter Zonen von grünlicher Farbe (wahrscheinlich Umbildung von Biotit zu Chlorit?) ins umliegende Gestein hinein. Innerhalb von Abschnitten, in denen die Penetration besonders tief war, traten diese aufgehellten Orthogneise in grösserem Umfang und stets begleitet von massiven Chloritlagen auf. Da es dadurch in der Ortsbrust zu einem Wechsel von harten Scherflächen und weicherem Augengneis kommt, liegen „*mixed-face*“ Bedingungen vor.

6. Die Ortsbrustscans zeigen deutlich, dass dort, wo die Meissel parallel zur Schieferung gelaufen sind, ausgeprägte Furchen auftraten. Eine zentrale Frage ist demzufolge, welche Orientierung zwischen Anisotropie und Meissel die Penetration massgeblich limitiert?

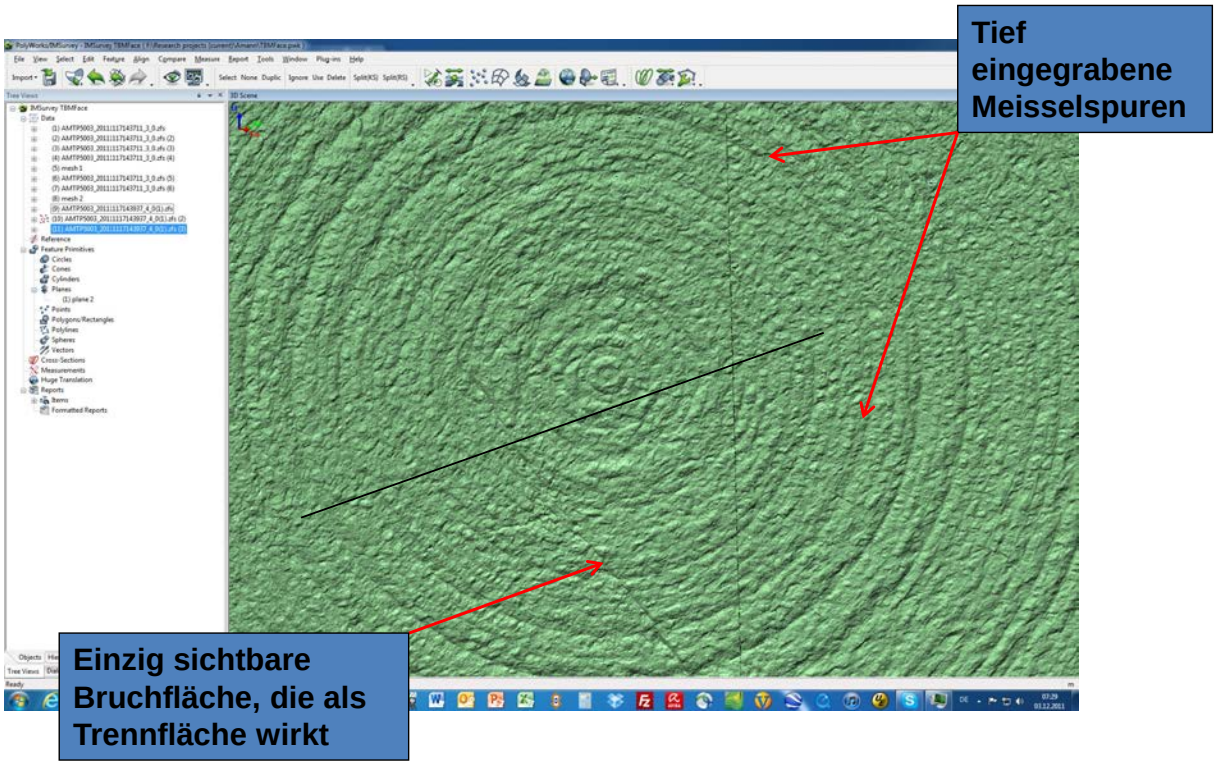

Abbildung 2: Ortsbrustscan mit deutlich unterschiedlicher Furchenbildung in Abhängigkeit der Schneidspurorientierung zur Schieferung

2. Nachvollziehbare Gebirgsbeschreibung für den Löseprozess Gebirge/ Diske

Der Einfluss des Gebirges auf die Vortriebsleistung einer Tunnelbohrmaschine ist von ausserordentlicher Bedeutung. Das Gebirge mit seinen Eigenschaften ist unbestritten der bestimmende Einflussfaktor einer zu erreichenden Penetration. Die Annahme einer Penetrationsleistung im Zuge einer Projektplanung wird sehr stark vom Grad der Vorerkundung geprägt. Die Gebirgsverhältnisse können je nach den geologischen Gegebenheiten stark von den gewählten Annahmen abweichen. Methodenspezifisch gestaltet sich eine kontinuierliche Dokumentation der tatsächlichen geologischen Verhältnisse an der Ortsbrust als sehr schwierig. Dennoch ist eine akkurate Dokumentation der geologischen Verhältnisse an der Ortsbrust fast unerlässlich für die Auswertung der Penetration (Penetrationstests), da bereits kleine Änderungen des Zerlegungsgrades zu Änderungen der erzielbaren Penetration führen können. Ein Rückschluss der geologischen Verhältnisse von der Tunnelwandung auf die Ortsbrustverhältnisse ist sehr oft mit groben Unzulänglichkeiten verbunden.

Die Gebirgsverhältnisse finden bei einer Vielzahl der gebräuchlichen Modelle zur Bestimmung der Penetration Eingang. Dennoch ist ein signifikanter Unterschied in der Auffassung und Berücksichtigung der massgeblichen Charakteristika der Gebirgsparameter augenscheinlich. (siehe Abbildung 3)

		PPM Gehring	PPM NTNU	PPM CSM	PPM Yagiz (based on CSM)	PPM Barton	PPM Alber	PPM Palmström	PPM Thuro	PPM Gong-Zhao (2008)
Intact Uniaxial Compressive strength	[MPa]	•	•	•	•		•	•		•
Destruction Work	[kJ/m³]	•							•	
Intact Tensile Strength	[MPa]			•	•					•
Quartz content (%)	[%]					•				
Porosity	[-]		•							
Uniaxial Compressive strength 1)	[MPa]						•			
RQD oriented along the tunnel axis	[-]					•	•			
Volumetric joint count (*jv*)	[-]									•
Number of joint sets	[-]					•	•			
Joint spacing of the main joint set	[-]	•	•		•					
Joint size (*jL*)	[-]							•		
Joint roughness number (*jR*)	[-]					•	•	•		
Joint alteration number (*jA*)	[-]					•	•	•		
Joint water reduction factor	[-]					•	•			
Joint orientation related to the tunnel axi	[-]	•	•		•			•		•
Stress reduction factor	[-]					•				
Drilling Rate Index "DRI"	[-]		•					•		
Cutter life index (basis NTNU)	[-]					•				

1) derived by RMR

Abbildung 3: Einflussfaktoren Gebirge Penetrationsmodelle

Das bereits vorgängig zitierte Penetrationsmodell von Gehring [1] gehört zu den gebräuchlichsten Modellen und berücksichtigt eine Vielzahl von geologisch-geotechnischen Einflussfaktoren zur Bestimmung der Penetration.

Grundsätzlich können drei Bereiche ausgewiesen werden, die sich jeweils durch eine unterschiedliche Kombination und Gewichtung der verschiedenen geologisch-geotechnischen Einflussfaktoren auszeichnen. Der vorliegende Fall kann aufgrund der im Tunnel erhobenen Daten der Domain A zugeordnet werden (Abbildung 4).

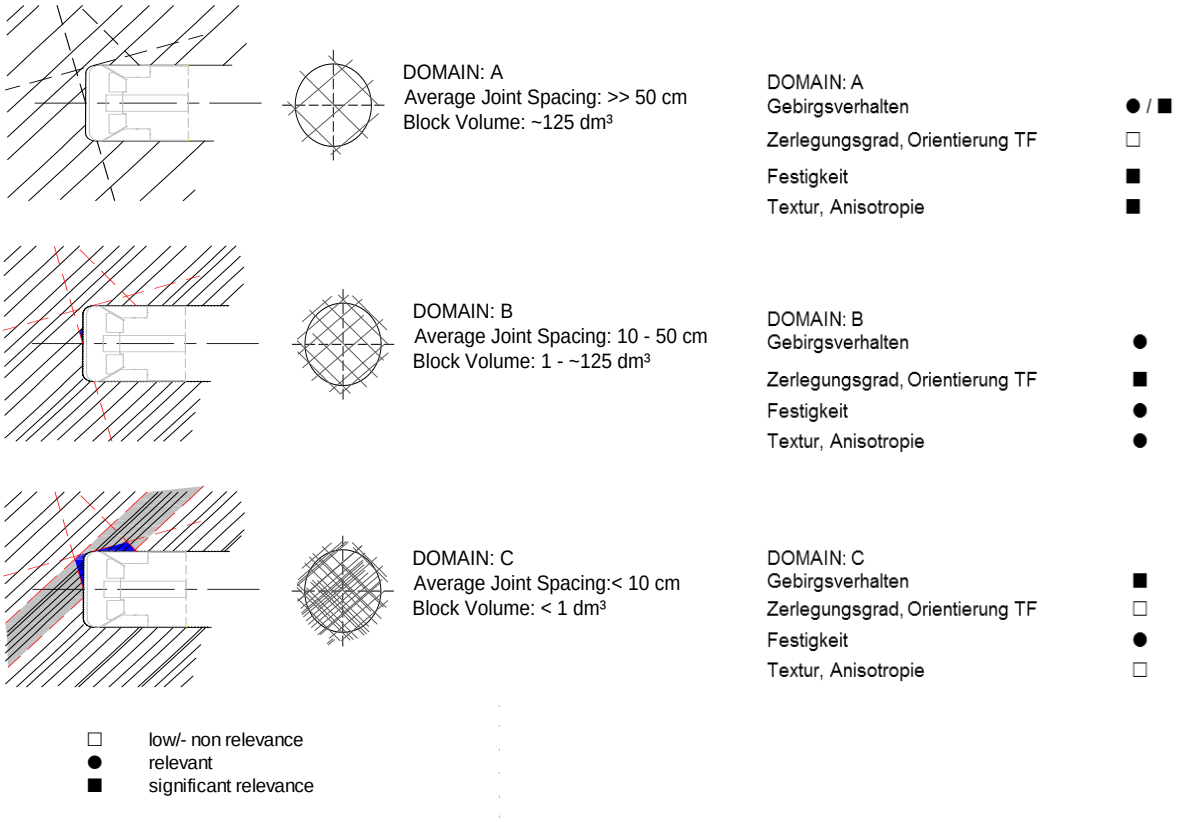

Abbildung 4: Zuordnung geologisch/ geotechnischer Einflussfaktoren zu Bereichen (Domains)

Auf Grundlage der empirischen Daten von Gehring [1] ist bei einem Trennflächenabstand grösser 50 cm kein Einfluss der Trennflächen auf die Penetration zu erwarten (Abbildung 5). Die Orientierung der massgeblichen Trennfläche ist folglich ebenfalls ohne Einfluss in der Domain A (Abbildung 4). Dies ist im Wesentlichen konsistent mit dem Prognosemodell der NTNU [3].

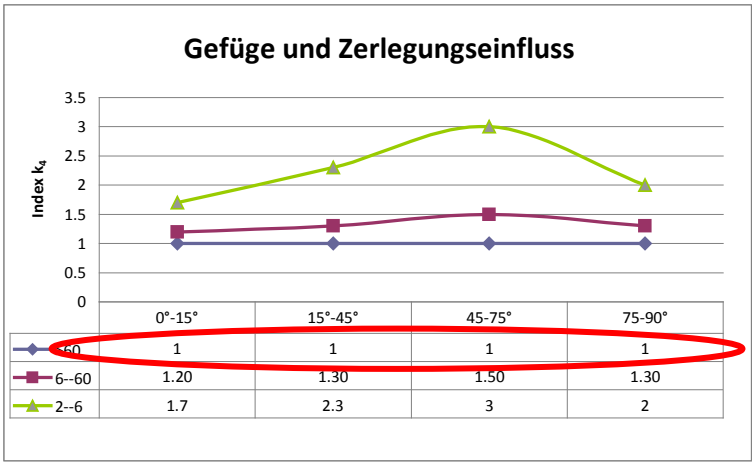

Abbildung 5: Einflussfaktor Gebirge; Prognosemodell von Gehring

Die Berücksichtigung des Einflussfaktors Gebirge (Trennflächenabstände und Orientierung) erklärt demnach die Diskrepanz zwischen der prognostizierten Basispenetration von 6 mm/rev. und der tatsächlich gemessenen Penetration von 2 mm/rev. nicht.

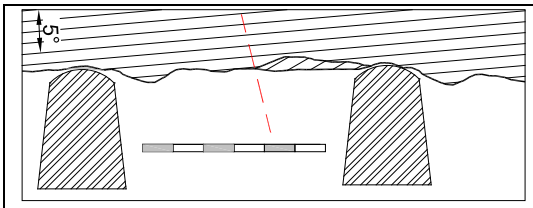

Abbildung 6 (a): Winkel Foliation/ Diske: ~ 90°

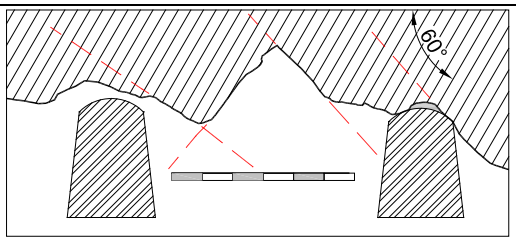

Abbildung 6 (b): Winkel Foliation/ Diske: ~ 30°

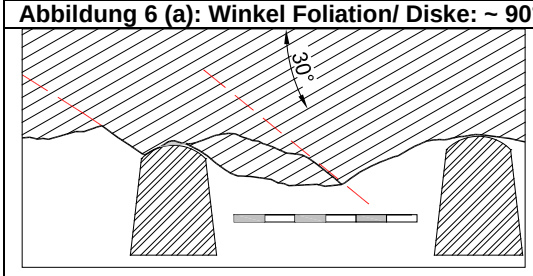

Abbildung 6 (c): Winkel Foliation/ Diske: ~ 60°

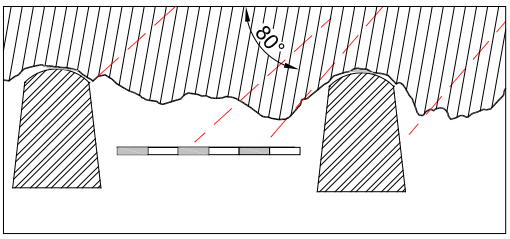

Abbildung 6(d): Winkel Foliation/ Diske: ~ 10°

Abbildung 6 (a) – (d) zeigt den Einfluss der Gefügestellung auf das Löseverhalten zweier Disken für einen Gneis. Deutlich sichtbar ist die generelle Abnahme des lösbaren Gesteinsvolumens mit abnehmendem Winkel zwischen Anisotropie und Diske. Nicht berücksichtigt ist bei dieser Betrachtung das Auftreten spannungsinduzierter Instabilitäten an der Ortsbrust. Ab einem Winkel von ca. 60° nimmt die sekundäre Chip-Bildung ab, und es kommt zur Furchenbildung im Gestein mit einer deutlichen Ausbildung einer Zermalmungszone.

3. Gefügestellung/ Textur in Abhängigkeit zur primären Gesteinslösung

Sanio [2] untersuchte den Zusammenhang zwischen der Gefügestellung und Penetration und folgerte eine Zunahme der Penetration mit Zunahme des Winkels zwischen der Diske und dem Streichen des Gefüges gegenüber der Ortbrust.

Aus den Beobachtungen von Sanio [2], Bruland [3] und Thuro [4] können folgende Schlüsse gezogen werden. Der massgebliche und penetrationslimitierende Fall liegt vor, wenn die Diske parallel zur Anisotropieebene (z. B. Foliation) orientiert ist (Abbildung 6d). Die maximale Penetration wird dann erreicht, wenn die Diske normal zur Anisotropieebene orientiert ist (Abbildung 6a).

Die Überlegungen [2]/[3]/[4] berücksichtigen als Basisfall die ungünstigste Orientierung der Anisotropieebene gegenüber der Vortriebsachse. Demzufolge ergibt sich eine Erhöhung der Basispenetration bei zunehmendem Winkel.

Im Laufe einer vollständigen Rotation der Diske durchfährt diese bei anisotropen Gebirgsverhältnissen jedoch den gesamten Winkelbereich zwischen Diske und Anisotropieebene, sodass die Konstellationen in Abbildung 6 nur eine lokale Gültigkeit aufweisen.

Speziell bei stark anisotropen Verhältnissen, wie im vorliegenden Fall, konnte in zwei Regionen eine unterschiedliche Ausprägung der Chip- und Furchenbildung beobachten werden. Die Beobachtungen deuten darauf hin dass die ungünstigste Orientierung penetrationsbestimmend ist und die gemessene Penetration deutlich unter dem Wert, der zu erwartenden Basispenetration des Modells von Gehring und der CSM liegen.
Abbildung 7 zeigt den Einfluss der primären Gesteinslösung in Abhängigkeit der Orientierung einer Diske zur Gefügestellung.

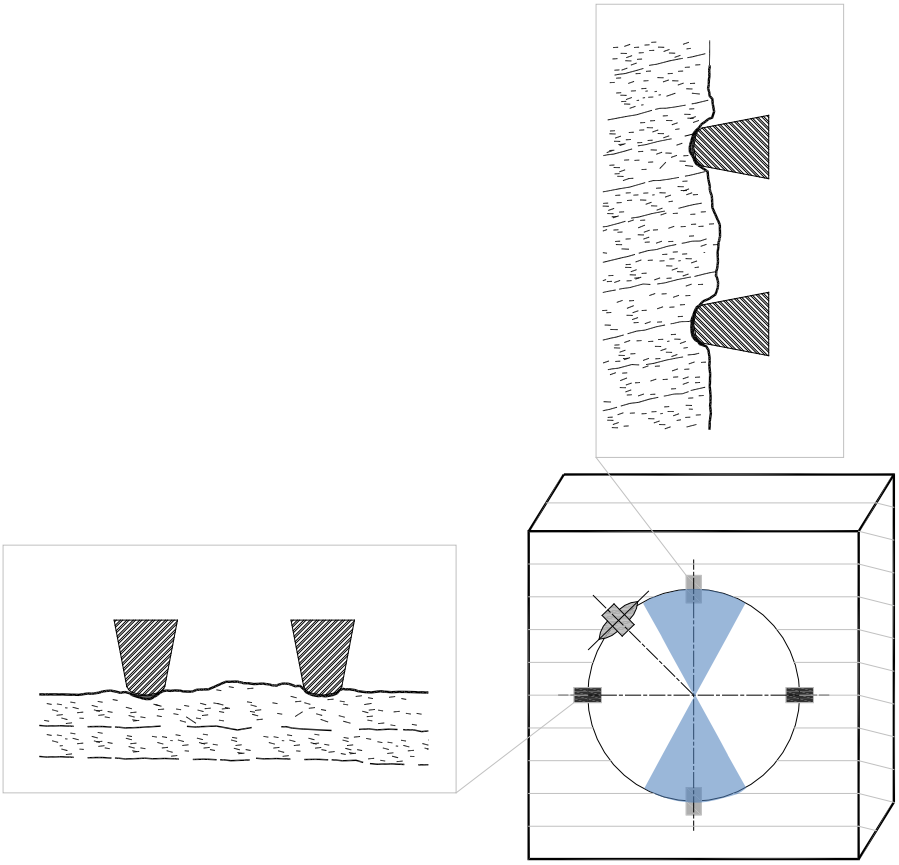

Abbildung 7: Orientierung Gefügestellung zur Schneidrichtung der Diske

Grundsätzlich stellt die Foliation eine Ebene bevorzugter Spaltbarkeit dar, welche durch Mineraleinregelung hervorgerufen wird (insbesondere Glimmer). Im vorliegenden Fallbeispiel konnte jedoch eine Überprägung der Anisotropie durch hochfeste Trennflächen beobachtet werden.

Die Beobachtungen definieren somit einen Fall, der sich durch die gebräulichsten Penetrations-Prognose-Modelle (z.B. Gehring 1995) nicht abbilden lässt. Die Beobachtungen lassen auf einen Spezialfall schliessen, der eine Reduktion der Basispenetration mit sich zieht.

4. Weiteres Vorgehen

Der Einfluss von hochfesten Trennflächen und der Anisotropie auf die primäre Gesteinslösung ist Gegenstand weiterer Forschungstätigkeiten. Als wesentliche Prämisse des Untersuchungsprogrammes werden nachvollziehbare Methoden für die Dokumentation eruiert . Die charakteristischen Eigenschaften der Gesteinsanisotropie der angetroffenen Gneise werden auf Basis des Glimmergefügeindex nach Büchi [5] klassifiziert. Für die Bestimmung der Orientierung der Gefügestellung gegenüber der Vortriebsachse wird die Methode der stereographischen Projektion an der Ortsbrust [6] berücksichtigt. Dabei werden Gefügedaten in eine Lagekugel überführt, welche die Ortsbrust darstellt.

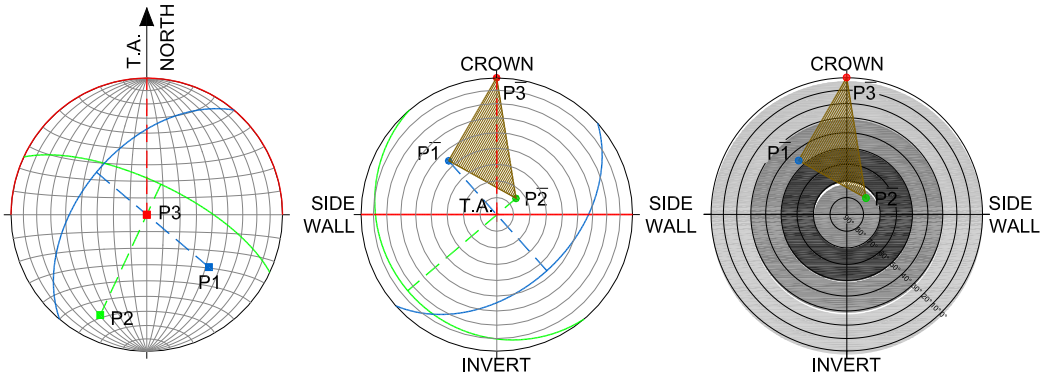

Abbildung 8: Methode der stereographischen Projektion an der Ortsbrust

Mit Hilfe der dargestellten Methoden soll eine nachvollziehbare Methodik geschaffen werden, welche die Dokumentation der geologischen Verhältnisse erleichtert und somit Zusammenhänge mit gemessenen Penetrationen leichter erkennen lässt. Ziel ist es Methoden zu entwickeln, welche einen Beitrag zur Weiterentwicklung neuer, umfassenderer Penetrationsmodelle [6] leisten können.

Literaturverzeichnis

[1] Gehring, K.: Leistungs- und Verschleißprognosen im maschinellen Tunnelbau. Felsbau 1995, No. 3, pp. 439–448

[2] Sanio, H.P. (1985). Prediction of the Performance of Disc Cutters in Anisotropic Rock. Int J Rock Mech Mi Sci & Geomech Abstr Vol 22, No 3, p153-161

[3] Bruland, A. (1998). Hard rock tunnel boring – Advance Rate and Cutter Wear. NTNU Trondheim, Norway.

[4] Thuro, K., Schormair, N. (2008). Fracture Propagation in Anisotropic Rock During Drilling and Cutting. Geomechanics and Tunnelling 1, p8-17

[5] Buechi, E. (1984). Einfluss geologischer Parameter auf die Vortriebsleistung einer Tunnelbohrmaschine. Dissertation Universität Bern, Switzerland

[6] ALPINE MODEL – ABROCK http://www.uibk.ac.at/abrock