

# TBM-Vortriebe

Wie wird der Aufwand für den Vortrieb ermittelt, wie wird er überwacht und wie wird er abgerechnet?

M. Weh, Marti Holding AG, Bern

## Vortragsgliederung

1. Allgemeine Bemerkungen
2. Einflussfaktoren Penetration
3. Kalkulation Bohrgeschwindigkeit
4. Verschleisskalkulation
5. Abrechnung Bohrbarkeit und Verschleiss

### 1 Allgemeine Bemerkungen

Der Erfolg eines TBM-Einsatzes basiert auf der möglichst optimalen Abstimmung zeitgleich laufender Prozesse (Bohren im Bohrkopf, Sicherungsmittleinbau im L1 und L2, Sohleneinbau, Materialversorgung). Nicht alle diese Arbeiten sind zeitkritisch. Jedoch ohne die optimale Abstimmung der wesentlichen Arbeiten ist kein wirtschaftlicher Vortrieb möglich. Wirtschaftlich ist ein Vortrieb dann, wenn die vorgegebenen Ziele mit möglichst geringem Aufwand erreicht werden können.

Weil sich die verschiedenen Arbeitsabläufe gegenseitig beeinflussen, wird ihre Koordination extrem komplex. Sie muss daher im Wesentlichen von den Leuten auf den einzelnen Baustellen wahrgenommen werden. Dies ist aber nur möglich, wenn eine hohe Kontinuität erreicht werden kann. Wie lange es braucht, bis die optimale Abstimmung erreicht ist, zeigt sich in der Regel an der Lernkurve.

Eine Risikobeurteilung eines TBM-Vortriebs muss sich daher in erster Linie mit den Fragen befassen: Können die Arbeitsprozesse unter den zu erwartenden Bedingungen eines Projektes abgestimmt werden und sind kontinuierliche Zustände möglich?

Die prognostizierten Bedingungen und das vorgesehene System definieren den notwendigen Aufwand. So sehr sich der Aufwand bei einer optimalen Abstimmung reduzieren lässt, so sehr nimmt er zu, wenn die Abstimmung nicht möglich ist.

Dieser Umstand macht den TBM-Vortrieb zu einer risikoreichen Angelegenheit bei der gilt:

Je vertrauter die Risiken sind, desto offensiver kann man damit umgehen und umgekehrt, je unbekannter sie sind, desto mehr ist man auf übernommenes Wissen angewiesen.

Ein TBM-Vortrieb und v.a. auch seine Kalkulation sind von x Variablen abhängig.

Weil wir ohne Erfahrung schlecht einschätzen können, welche Variablen wichtig sind, wie sie sich gegenseitig beeinflussen, wie ihr Funktion erhoben und abgeleitet worden ist, sind Schlüsse aus übernommem Wissen nur mit äusserster Vorsicht zu ziehen.

Wenn Erfahrungen vorliegen, sind die Variablen teilweise bekannt und ist die Qualität einer Prognose in erster Linie von den vorliegenden Erfahrungen (Vorsicht vor schwarzen Schwänen!) und von der Qualität der vorliegenden Unterlagen abhängig. Je umfassender die Angaben umso präzisere Prognosen sind möglich und umgekehrt.

Vier Gruppen von Variablen sind ersichtlich:

- Baugrund (Geologie/Hydrogeologie und daraus folgende Zustände)
- Technik (TBM-, NL- und Versorgungssystem)
- Mensch (Arbeitsbedingungen, Bedienung TBM, Datenerfassung)
- Umfeld (Ver- und Entsorgung)

## 2 Einflussfaktoren Penetration

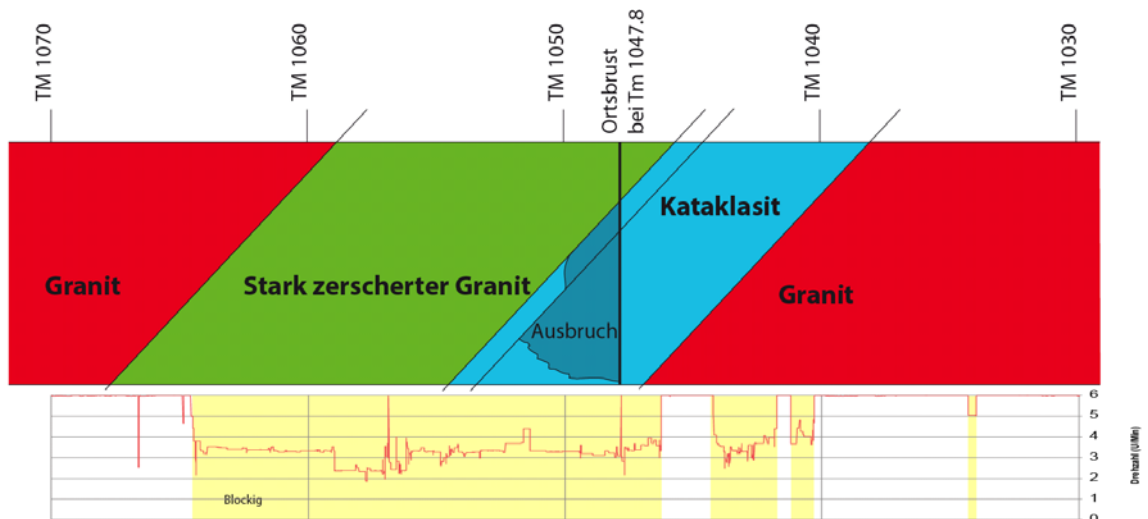
Vor allem wenn wir die Penetration als Funktion der Baugrundbedingungen selber herleiten wollen, stellt sich die Frage, ob die gemessenen Gesteinsfestigkeiten auch jenen Festigkeiten entsprechen, die die TBM an der Ortsbrust antrifft.

Dabei gilt es folgende Einflussfaktoren zu berücksichtigen:

- Versuchsbedingungen beim Test (z.B. Belastungsgeschwindigkeit beim UCS-Versuch)
- Zustand der Probe: Vorschädigung, Wassergehalt
- Anisotropie: Je stärker anisotrop ein Gestein ist, um so grösser sind die Festigkeitsunterschiede zwischen paralleler und senkrechter Krafteinleitung in Bezug zur Anisotropie

Zur Analyse des Trennflächeneinflusses wurde eine exemplarische Situation aus einem aktuellen Vortrieb analysiert. In diesem Beispiel durchschlug eine schräg zum Tunnel orientierte, ca. 20m mächtige Störzone einen massigen Granit. Da die Grenze zwischen Granit und Kataklasit messerscharf war, liessen sich die Konsequenzen für die TBM ausgezeichnet analysieren.

Situation:



Die deutliche Reduktion der TBM-Drehzahl ist auf grobblockiges Ausbruchmaterial zurück zu führen.

Bei Tm 1047.8 wurde eine Ortsbrustaufnahme gemacht, bei der sich auf der linken Seite ein Vorausbruch bis 4m Tiefe und auf der rechten Seite eine standfeste Ortsbrust zeigte. Die Scherzone enthielt vor allem zu Beginn einen ca. 10cm dicken, kohäsionslosen Kataklasiten.

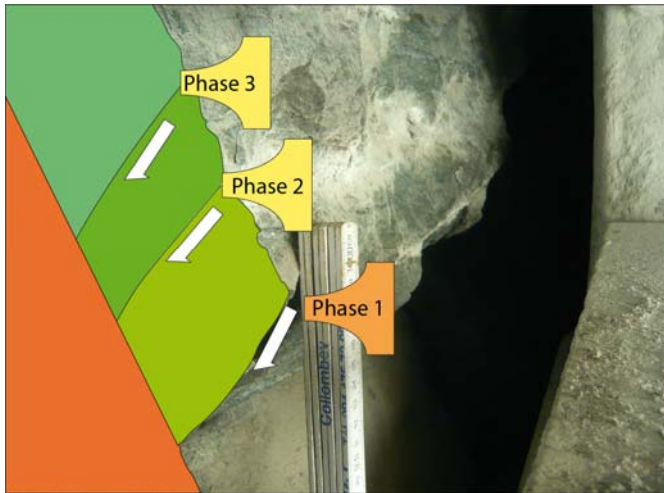
Für den TBM-Fahrer war die Scherzone als erstes dadurch zu erkennen, dass bei gleicher Anpresskraft die Penetration zunahm. Da er mit seinen Anpresskräften im Granit an der Grenze des Zulässigen gefahren war, musste er die Anpresskraft zurück nehmen. Bei einer klar zweigeteilten Geologie (Mixed-face) müsste er, um einzelne Meissel nicht zu überlasten, die Anpresskraft sogar so weit zurück nehmen, dass die Penetration gleichbleibend ist. In einem weicheren und weniger abrasiven Gestein kann ein TBM-Fahrer in dieser Situation die Zunahme der Penetration zulassen.

Im besagten Fall nahm er mit zunehmendem Anteil an Kataklasit die Anpresskraft weiter zurück und liess die Penetration in geringem Umfang weiter ansteigen. In einer ersten Phase geschah dies sehr kontinuierlich, was darauf schliessen lässt, dass die Ortsbrust im Bereich des Kataklasiten entweder komplett fehlte oder standfest gewesen war, allerdings mit einem sehr hohen Zerlegungsgrad.

Da bei der Ortsbrustaufnahme bei Tm 1047.8 ca. 60% der Ortsbrust fehlte, lässt sich eine mittlere Anpresskraft von 123kN je aufliegender Meissel im mehrheitlich stark zerscherter Granit berechnen. Im eigentlichen Kataklasit muss diese Anpresskraft noch geringer gewesen sein.

Die geringen Anpresskräfte in diesen Gesteinen lassen sich dadurch erklären, dass die Meissel das Gestein entlang einer Trennfläche abgeschert haben. Da dieses Abscheren häufig zu einer freien Fläche hin stattfindet, also mit einem zusätzlichen Freiheitsgrad möglich ist, braucht es dazu dementsprechend weniger Kraft. Das Ausbruchmaterial besteht aus kleinen Blöcken, Chips sind fast keine mehr zu erkennen.

Das Beispiel zeigt auf, dass es bei der Berücksichtigung von Trennflächen hinsichtlich der erreichbaren Penetration nicht nur um die Frage geht, wie stark das Gestein durchtrennt ist, sondern auch um die Frage wie homogen diese Durchtrennung über die Ortsbrust verteilt ist.



Mit dem Auftreten des ersten grobblockigen Materials auf dem Förderband musste die Anpresskraft stark zurückgenommen werden. Damit im Festgestein grobblockiges Material mit dem Förderband gefördert wird, braucht es zwei Bedingungen:

1. Das Gestein muss so fest sein, dass es den Transport durch den Bohrkopf übersteht.
2. Es müssen Trennflächen mit extrem geringer Festigkeit auftreten. Diese Trennflächen können vorgegeben sein, z.B. durch starke Verwitterung oder können sich durch Spannungsumlagerung in der Ortsbrust erst öffnen.

Im besagten Fall liegt die Ursache für das Auftreten des grobblockigen Ausbruchmaterials im Zusammenhang mit dem kohäsionslosen Kataklasten.

Vergleicht man die erreichten Anpresskräfte und Penetrationen aus dem beobachteten Bereich mit Maschinenkennwerten, die sich aus der Formel von Gehring (1995) ergeben  $P=4 \cdot FN/UCS$ , so zeigt sich folgende Gegebenheit: Für den ungeklüfteten Granit wurden Druckfestigkeiten von 150MPa gemessen. Nach der Berechnung von Gehring müsste bei der entsprechenden Anpresskraft eine doppelt so hohe Penetration erreicht werden. Die Hauptursache für die starke Abweichung ist wahrscheinlich darin begründet, dass die Berechnung von Gehring auf a.) Mittelwerte basiert und b.) schon eine gewisse Anzahl an Trennflächen berücksichtigt.

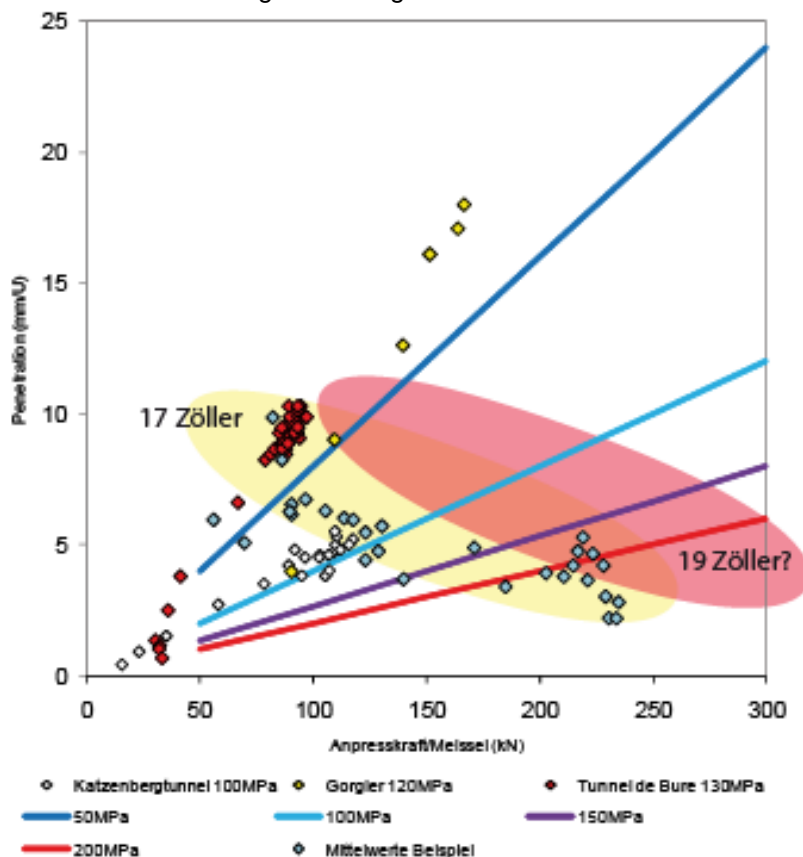
Die Verwendung von Mittelwerten für Penetrationsanalysen ist problematisch, weil sie mit Hilfe von Routinen aus den 10sek-Daten berechnet werden. Diese Herleitung kann fehleranfällig sein, wie z.B. die Definition wann ein Hub beginnt und wann er abgeschlossen ist, oder die Zuordnung der Vermessungsdaten zu den TBM-Daten.

Ebenfalls ist bei Grippermaschinen der Umstand, dass die Vorschubkraft um die Reibungskraft des Schildes und häufig auch noch um die Schleppkraft des Nachläufers reduziert werden muss, problematisch.

### 3 Kalkulation Bohrgeschwindigkeit

Vorgehen:

1. Herleitung der Penetration aus der Druckfestigkeit (Funktion abgeleitet aus Anfahrdaten TBM in ungeklüfteten Bereichen wobei es sich bei den weichen Gesteinen in der Regel um Sedimente und bei den harten Gesteinen um Sedimente, Metamorphite, Vulkanite oder Plutonite handelt.
2. Wahl der Anpresskraft unter Berücksichtigung von:
  - Meisseltyp
  - Trennflächen/theoretische Blockgrößen
  - Homogenität Ortsbrust
  - Drehzahl TBM
  - Instabilitäten in der Ortsbrust, die wiederum von den Klufteigenschaften und den Spannungsverhältnissen abhängen
3. Berechnung Drehzahl in Abhängigkeit des Tunneldurchmessers und Abminderung bei instabilen Ortsbrustverhältnissen
4. Vortriebsgeschwindigkeit = Drehzahl \* Penetration



## 4 Verschleisskalkulation

Der Meisselverschleiss unterteilt sich in den normalen Verschleiss und die Wechsel auf Grund von Gewaltschäden

Vorgehen:

Berechnung Normaler Verschleiss je Schneidspur:

- Herleitung Abrieb in mm Meisselabrieb/Rollmeter in Abhängigkeit CAI und Schneidspurradius (rx)
  - Berücksichtigung Zentrumsverschleiss
  - Berücksichtigung Kaliberverschleiss
  - Berücksichtigung Meisseltyp, Schneidringbreite
- Berechnung Rollmeter/Tm mit  $1000/P^2 \cdot P \cdot rx$
- Berechnung Abrieb in mm/Tm mit Meisselabrieb/Rollmeter \* Rollmeter/Tm
- Festlegung max. effektiver Verschleiss (mm)
- Berechnung Wechsel normaler Verschleiss/Tm mit Abrieb in mm/Tm / max. eff. Verschleiss (mm)

Gesamter normaler Verschleiss/Tm = Summe der Wechsel/Spur/Tm und Berücksichtigung der Einwechslungen von den äusseren auf die inneren Spuren.

Berechnung Gewaltschäden:

- Berechnung der Rollmeter/Tm mit  $1000/P^2 \cdot P \cdot rx$
- Festlegung Gewaltschäden/Rm
  - Berücksichtigung Meisselwechselfrequenz
  - Berücksichtigung Instabilitäten Ortsbrust
  - Berücksichtigung Verklebungen
  - Berücksichtigung Meisselqualität und Typ
- Berechnung Gewaltschäden/Tm = Rollmeter/Tm \* Gewaltschäden/Rm
- Summe Gewaltschäden/Tm = Summe Gewaltschäden/Spur/Tm

Zusätzlich gilt es noch den normalen Verschleiss der bis zum Gewaltschaden auf der aktuellen Meisselrolle stattgefunden hat, abzuziehen.

## 5 Abrechnung Bohrbarkeit und Verschleiss

Bei wechselndem Aufwand für das Bohren und den Verschleiss muss es das Ziel sein den Aufwand über Klassen abrechnen zu können.

Beispiel Matrix zwischen CAI und UCS

		UCS			
		100 MPa	120 MPa	140 MPa	160 MPa
von/bis		120 MPa	140 MPa	160 MPa	180 MPa
CAI	3.0   3.5	$w_1 \text{ Fr/m}^3$	$x_1 \text{ Fr/m}^3$	$y_1 \text{ Fr/m}^3$	$z_1 \text{ Fr/m}^3$
	3.5   4.0	$w_2 \text{ Fr/m}^3$	$x_2 \text{ Fr/m}^3$	$y_2 \text{ Fr/m}^3$	$z_2 \text{ Fr/m}^3$
	4.0   4.5	$w_3 \text{ Fr/m}^3$	$x_3 \text{ Fr/m}^3$	$y_3 \text{ Fr/m}^3$	$z_3 \text{ Fr/m}^3$
	4.5   5.0	$w_4 \text{ Fr/m}^3$	$x_4 \text{ Fr/m}^3$	$y_4 \text{ Fr/m}^3$	$z_4 \text{ Fr/m}^3$

Nachteil: Keine Berücksichtigung von Trennflächen, Instabilitäten und Inhomogenitäten

Als weitere Variante kommt eine Matrix zwischen der effektiv erreichten Penetration und dem CAI-Wert in Frage. Allerdings beinhaltet diese Lösung in der Regel das Problem, dass die Penetration anhand von Test festgelegt werden muss. Weil die Testbedingungen häufig weit weg von den Bedingungen des Vortriebs liegen, wird dieses Verfahren selten erfolgreich angewandt.

Es lassen sich allerdings auch die effektiv erreichten Penetrationen als Abrechnungsbasis verwenden.

## 6 Verwendete Literatur

Leistungs- und Verschleissprognosen im maschinellen Tunnelbau, Karlheinz Gehring in Felsbau 13 (1995) Nr. 6