

Die Fräsbarkeit von Fels und Ihre ingenieurgeologische Bewertung für den Spezialtiefbau

The cutting ability of rock and its effect on special geotechnical works

Karsten Beckhaus¹, Henrik Gödecke²

¹ Dr.-Ing. Karsten Beckhaus, BAUER Spezialtiefbau GmbH, karsten.beckhaus@bauer.de

² Dipl.-Ing. Henrik Gödecke, Geotechnisches Büro Schuler & Gödecke, henrik.goedecke@geotechnisches-buero.de

Zusammenfassung

Baumaßnahmen des Spezialtiefbaus erfordern regelmäßig das Lösen von Fels, z.B. wenn mit einer Schlitzdichtwand unzulässige Unterströmungen bei einem Staudamm verhindert werden müssen, etwa in klüftigem Fels oder auch zur Einbindung in dichtem Fels. Entscheidend für die Bauzeit und die Baukosten sind dann insbesondere die erzielbare Löseleistung im Fels sowie der Bohrwerkzeugverschleiß. Zwar liegen für den Zusammenhang zwischen Felseigenschaften und der Fräsleistung und dem Verschleiß Erfahrungswerte vor, in einem wissenschaftlich fundierten Ingenieurmodell sollen aber die komplexen ingenieurgeologischen Abhängigkeiten möglichst realistisch abgebildet werden, um eine höhere Zuverlässigkeit der Leistungs- und Verschleißprognosen von Bauaufgaben außerhalb des bisherigen Erfahrungsschatzes zu erzielen. Seit einiger Zeit wird deshalb an den wissenschaftlichen Grundlagen für die Optimierung des Ingenieurmodells für das Felsfräsen gearbeitet. Auf verschiedenen Fräsbaustellen mit unterschiedlichen Felsarten werden dazu die jeweils erzielten Netto-Fräsleistungen sowie der Bohrwerkzeugverbrauch erfasst, und im Felslabor werden an dazugehörigen Felsproben Festigkeiten, Abrasivitätsindizes und weitere charakteristische Kennwerte ermittelt. Anschließend werden die Daten aus dem Labor mit den aufbereiteten Baustellendaten auf deren Korrelation untersucht.

Schlüsselworte: Spezialtiefbau, Felsfräsen, Leistung, Verschleiß, Felseigenschaften, Festigkeit, Abrasivität

Abstract

Special geotechnical works often require the excavation of rock, for example if a cut-off wall has to be embedded into fresh rock under a dam for elimination of an inadmissible water flow of overburden or for sealing leaky rock. Consequently, for the construction time and the building costs, the excavation performance as well as the wear and tear of the rock cutter and all associated tools will be decisive. The estimation of both performance and wear and tear will be done on the safe side provided the rock properties are similar to those which experiences are related to. A scientifically based correlation, which is currently not available, in future shall allow more precise assumptions in particular when the complex behaviour of the rock encountered is beyond experience. Therefore, a new engineering model shall be developed and established, which comprises proven correlations between a complex description of relevant rock properties and the actual cutting performance, and wear and tear. On selected cutting construction sites, as precise as possible, the achieved net cutting performance as well as the consumption of cutting tools have been recorded. In the laboratory strength parameters as well as abrasivity characteristics are determined on corresponding rock samples. If available, the drill log records from soil investigation will be checked for the assessment of the overall rock quality. Correlation is expected only between a combination of several sole independent parameters describing the rock properties and the cutting performance and wear and tear, which has to be investigated by choosing relevant parameters and weighing them correctly in accordance with their actual influence.

Keywords: special geotechnical works, rock cutter, performance, wear and tear, rock properties, strength, abrasivity

1 Einleitung

Selbst in leicht löslichen Böden ist die Kalkulation von Schlitzwandprojekten keinesfalls einfach. Kommt aber die Schlitzwand zudem im Fels zu liegen und muss zur Herstellung der Schlitzwand mit der Felsfräse gearbeitet werden, so wird die Prognose zutreffender Leistungs- und Verschleißansätze in der Baupraxis zunehmend „unsicher“. Während die Auswahl der geeigneten Maschinenteknik und die daraus resultierenden Kosten zumeist noch vergleichsweise gut erfasst werden können, so liegt die Ursache für die Unsicherheit in der Kalkulation vor allem in der

Bewertung der Fräsbarkeit von Fels. Doch welche Felseigenschaften sind zur Bewertung der Fräsbarkeit entscheidend und welche Leistungsansätze können daraus gefolgert werden? Und kann – wie in der Praxis derzeit üblich – z.B. allein aus der Druckfestigkeit bereits zutreffend auf die spätere Fräsleistung geschlossen werden? Zumindest aus dem Bereich der Großbohrtechnik und aus dem Tunnelbau mit Vollschnittmaschinen ist bekannt, dass neben der Betrachtung der Felsfestigkeit für eine realistische Abschätzung von Leistung und Verschleiß auf jeden Fall auch weitere Einflüsse wie z.B. das Trennflächengefüge und die Abrasivität mit berücksichtigt werden müssen (THURO



1996, HOLLFELDER et al. 2002, BECKHAUS & THURO 2008). Grundsätzlich weiß man daher, dass auch beim Schlitzwandfräsen für realistische Leistungs- und Verschleißprognosen die unterschiedlichen Felseigenschaften stets in Ihrer Gesamtheit erfasst werden müssen, und dass die Fräsbarkeit außer von der Festigkeit maßgebend auch vom Trennflächengefüge und z.B. von lokalen Schwächezonen wie auch von der Abrasivität des Festgesteins beeinflusst wird (s. Abb. 1).

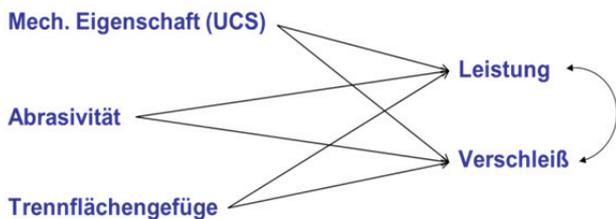


Abb. 1: Einflussparameter des Fels auf die Löseleistung und den Verschleiß bei der Schlitzwandherstellung

Fig. 1: Rock parameters affecting the cutter performance and the wear during the construction of diaphragm walls

Zur Klärung der maßgebenden Zusammenhänge wurde von der BAUER Forschungsgemeinschaft (BFG), in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TU München das Forschungsvorhaben „Ingenieurmodell Felsfräsen“ ins Leben gerufen. Hiermit sollen die relevanten Zusammenhänge zwischen den Einzelkenngrößen des Fels und der Fräsleistung sowie des Verschleißes von Werkzeug erfasst und anschließend gewichtet und derart überlagert werden, dass anhand der jeweils relevanten Felseigenschaften bei der Kalkulation von Fräsbaustellen zukünftig eine möglichst zutreffende Leistungs- und Verschleißabschätzung vorgenommen werden kann. Nachfolgend wird vom aktuellen Stand der Forschung berichtet.

2 Ingenieurmodell Felsfräsen

2.1 Datenerfassung

2.1.1 Baustellen-Produktionsdaten

Die Datengrundlage des Ingenieurmodells Felsfräsen besteht aus einer Aufzeichnung der Baustellen-Produktionsdaten verschiedener Fräsbaustellen sowie aus den jeweils dazugehörigen Laboruntersuchungen. Beginnend etwa ab dem Jahr 2005 und dem damaligen Staudammprojekt „Barrage de Péribonka“ in Québec (vgl. Abb. 2) wurden auf verschiedenen Fräsbaustellen der BAUER Spezialtiefbau GmbH neben den elektronisch erfassten Gerätedaten zusätzlich möglichst genau der tägliche Produktionsablauf aufgenommen und ausgewertet.

Dabei wurden verschiedene Produktionsdaten der Schlitzwandherstellung aufgezeichnet und – untergliedert in einzelne Prozessanteile bzw. Gruppen – ausgewertet. Neben dem eigentlichen Fräsvorgang wurden dazu weitere Arbeitsschritte wie z.B. das Einfahren und das Herausziehen der Fräse aus dem Schlitz, das Betonieren des Schlitzes, die Stillstandzeiten sowie für eine zukünftige Verschleißprognose natürlich auch der erforderliche Wartungsaufwand am

Gerät und der Aufwand für den Zahnwechsel jeweils separat erfasst (vgl. Abb. 3). Auf diese Weise wurden reale Baustellen Daten unter sehr unterschiedlichen geologischen Randbedingungen, wie z. B. bei der Sanierung des „Hinze-Damm“ in Australien oder bei dem Bauvorhaben „Express Rail Link“ in Hongkong, systematisch aufgenommen. Hieraus konnten für die verschiedenen Fräsbaustellen die in der Bauausführung jeweils erzielbar gewesenen Netto-Fräsleistungen in [m³/h] ermittelt werden.



Abb. 2: Schlitzwandfräse am Staudamm-Projekt „Barrage de Péribonka“, Québec

Fig. 2: Rock cutter at the dam construction site, „Barrage de Péribonka“, Québec

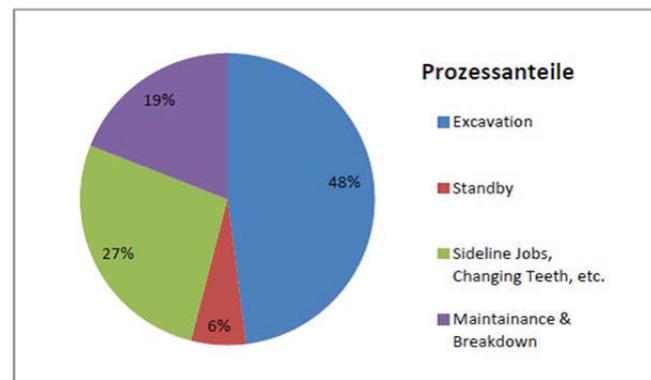


Abb. 3: Aufzeichnung der Baustellen Daten mit Aufgliederung der Schlitzwandherstellung in einzelne Prozessanteile (Gruppen)

Fig. 3: Recording of the production data of a cut-off-wall site divided into the individual construction steps (groups)

Zusammen mit dem ebenfalls vor Ort aufgezeichneten Bohrwerkzeugverbrauch steht zur weiteren Entwicklung des Ingenieurmodells Felsfräsen und für eine Korrelierung der Baustellen-Produktionsdaten mit den im Felslabor ermittelten „Felsdaten“ damit eine mittlerweile umfangreiche Datenbasis zur Verfügung.

2.1.2 Laboruntersuchungen

Den zweiten wesentlichen Bestandteil neben den Baustellen-Produktionsdaten stellen die im Laborversuch ermittelten Felskenngrößen dar. Eigene Laboruntersuchungen für das Forschungsvorhaben zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften und der Abrasivität wurden dazu ausschließlich im Felslabor des Lehrstuhls für Ingenieurgeologie an der TU München durchgeführt. So konnte die Streuung der Laborversuchsergebnisse durch unterschiedliche Prüfer bzw. den „Faktor Mensch“ wie auch durch unterschiedliche Geräteausstattungen – Streuungen, die sich insbesondere im „weiter entfernten Ausland“ als mitunter beträchtlich erwiesen haben – minimal gehalten werden. Im Einzelnen wurden zur Bestimmung der Festigkeitsparameter im Felslabor

- einaxiale Druckversuche als Zylinderdruckversuche bei unbehinderter Seitendehnung nach den Empfehlungen der DGGT (2004) durchgeführt und nach den Vorgaben der ISRM (2004) für die untersuchten Proben daraus die einaxialen Druckfestigkeiten σ_u (=UCS, Unconfined Compressive Strength) ermittelt,
- Punktlastversuche zur mittelbaren Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit nach der Empfehlung Nr. 5 der DGGT (2004) durchgeführt und aus dem so gewonnenen Punktlastindex I_{50} nach BROOKS (1993) daraus die einaxialen Druckfestigkeiten σ_m abgeleitet,
- Spaltzugversuche bzw. sogenannte Brazilian Tests nach den Empfehlungen der DGGT (2008) an Zylinderproben durchgeführt, bei welchen indirekt über die Spaltzugfestigkeit SPZ die Zugfestigkeit eines Prüfkörpers ermittelt werden kann.

Im direkten Vergleich der vorgenannten Laborversuche werden die an genormten Zylinderprüfkörpern durchgeführten einaxialen Druckversuche wie auch die Spaltzugversuche in der Regel als aussagekräftiger bewertet. Da solche genormten Prüfkörper in der Praxis allerdings nicht immer in zufriedenstellender Menge verfügbar sind und da insbesondere während der Bauausführung von Schlitzwand-Fräsbaustellen an der Entsandungsanlage in der Regel nur kleinere Bruchstücke entnommen werden können, wurde der auch an solchen kleineren Bruchstücken noch durchführbare Punktlastversuch ebenfalls mit in den Untersuchungsumfang aufgenommen. Soll die aus dem PLT abgeleitete einaxiale Druckfestigkeit σ_m anstatt der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit σ_u verwendet werden (und nicht nur zusätzlich zur detaillierteren Beschreibung) und dann für die Korrelation mit der Netto-Fräsleistung im zugehörigen Fels berücksichtigt werden, muss die beim Punktlastversuch vorhandene Unsicherheit der eigenen Korrelation zwischen σ_m und σ_u beachtet werden sowie die naturgemäß höhere Streuung bei PLT-Tests aus „kleinen“ Stücken. Andererseits muss natürlich die anhand der Bruchfigur beim Zylinder-

druckversuch üblicherweise erkennbare Versagensart, wie z.B. ein Scherversagen entlang einer ursprünglichen Kluft gesondert erfasst und bewertet werden (solche Informationen fehlen oft in der Angebotsphase). Die Bewertung dieser im Detail unterschiedlichen Aussagen über die Festigkeit des Gesteins bzw. des Gebirges für die Abschätzung einer Netto-Fräsleistung ist Schwerpunkt weiterer Untersuchungen und Auswertungen.

Den zweiten Block der Laboruntersuchungen stellen die Versuche zur Ermittlung der Abrasivität eines Gesteins dar. Ermittelt wurden im Labor dazu jeweils

- der Cerchar-Abrasivitätsindex CAI im sog. Cerchar-Versuch, bei welchem der Abrieb eines Stahlstiftes auf einer Gesteinsoberfläche gemessen wird nach einem 5-maligen Schleifvorgang entlang einer Streckenlänge von 10 mm (CENTRE D'ETUDES DE CHARBONNAGES DE FRANCES 1986, WEST 1989, KÄSLING et al. 2007), sowie
- die Abrasivität des Gesteins im LCPC-Versuch, bei welchem der Abrieb eines rotierenden Stahlflügels (bei 4500 Umdrehungen pro Minute für 5 Minuten) in 500 g gebrochenem Gestein bestimmt wird und daraus der sog. LCPC-Abrasivitätskoeffizient LAK und der LCPC-Brechbarkeitskoeffizient LBK (AFNOR 1990, BÜCHI et al. 1995, THURO et al. 2006), sowie z.T. auch
- die mineralogische Zusammensetzung der Probe in Form des sog. Äquivalenten Quarzgehaltes (ÄQu). Multipliziert mit der einaxialen Druckfestigkeit ergibt sich daraus als weitere Kenngröße der Rock Abrasivity Index RAI (THURO 2002, THURO & PLINNINGER 2002).

3 Bisherige Auswertungsergebnisse

3.1 Einfluss der Festigkeit auf Netto-Fräsleistung

Eine vergleichsweise signifikante und in der Regel als maßgebend anerkannte Kenngröße für die erreichbare Netto-Fräsleistung ist die Druckfestigkeit. Abb. 4 zeigt die recht gute Korrelation der einaxialen Druckfestigkeit aus dem Punktlastversuch. Mit einem logarithmischen Kurvenverlauf einer angenäherten Trendlinie für diese Abhängigkeit wird ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 61% erzielt. In der Praxis wird anstelle eines solchen logarithmischen Kurvenverlaufes auch eine näherungsweise „Bilineare Abhängigkeit“ mit zwei linearen Ausgleichsgeraden angenommen, mit einem mehr oder weniger leicht fräsabaren Bereich für Festigkeiten bis ca. 100 MPa, und mit einer nur noch schweren Fräsbarkeit für höhere Festigkeiten über 100 MPa. Als Begründung wird genannt, dass sich der Lösevorgang bei „kleinen Festigkeiten“ prinzipiell von dem bei „hohen Festigkeiten“ unterscheidet und somit keine gemeinsame Beziehung bestehen muss. Der Schnittpunkt dieser beiden Linien ist noch sehr unscharf und kann aufgrund der naturgemäß großen Streuungen derzeit nur grob im Festigkeitsbereich zwischen 50 bis 150 MPa eingegrenzt werden – aufgrund eben weiterer Abhängigkeiten, die bei einer solchen singulären Korrelation nicht berücksichtigt sein



können. Mit höheren Druckfestigkeiten ist grundsätzlich eine Abnahme der Netto-Fräsleistung auf minimale Fräsfortschritte festzustellen, wobei hier Erfahrungswerte in Fels mit Druckfestigkeiten von annähernd 250 MPa vorliegen. Erfahrungswerte bei Festigkeiten unter 50 MPa sind hier nicht dargestellt.

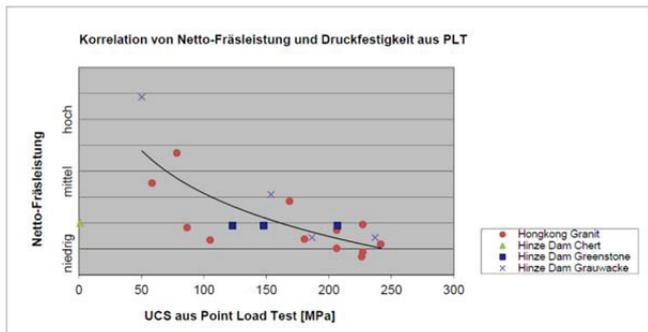


Abb. 4: Korrelation von Netto-Fräsleistung und Druckfestigkeit aus dem Punktlastversuch

Fig. 4: Correlation net-cutter performance and point load strength

Die zusätzliche Bewertung der einaxialen Druckfestigkeit UCS aus dem Zylinderdruckversuch und der Spaltzugfestigkeit erfolgt in weiteren Untersuchungen, da hier für eine Absicherung aktuell zu wenig Versuche für noch zu wenige Gesteinsarten vorliegen, und zwar als „Punktwolke“ alleamt im hohen Festigkeitsbereich bei etwa 150 MPa Druckfestigkeit und etwa 12 MPa Spaltzugfestigkeit bei erwartungsgemäß nur sehr geringen Netto-Fräsleistungen.

3.2 Einfluss der Abrasivität auf Netto-Fräsleistung

Zwischen den Abrasivitätskennwerten CAI und LAK aus dem LCPC-Versuch und der Netto-Fräsleistung kann erwartungsgemäß lediglich ein Trend ermittelt werden, aber keine eigene Korrelation, vgl. Abb. 5.

Zwar lässt sich mathematisch eine Korrelation zwischen den Abrasivitätskennwerten CAI und LAK mit der Netto-Fräsleistung ermitteln, wiederum für exponentiell angenommene Trendlinien. Bei einem Bestimmtheitsmaß von nur ca. 25% ist allerdings klar, dass hier ein überlagernder „steuernder“ Einfluss nicht erfasst ist. Das ist auch ingenieurgeologisch erklärbar, weil die Abrasivität primär den Werkzeugverschleiß beeinflusst und aufgrund der daraus resultierenden schwächeren Schneidleistung nur sekundär die Fräsleistung. Im Weiteren muss bei erhöhtem Verschleiß dann auch die industrielle Produktionsleistung negativ beeinflusst werden, weil für den obligatorisch erforderlichen vermehrten Werkzeugwechsel auch mehr Arbeitszeit verwendet werden muss. Im Zuge der Auswertung von zukünftigen Baustellen- und Labordaten steht nun im Vordergrund, den Einfluss der Abrasivität auf die mechanischen und weiteren Einflussgrößen näher zu untersuchen.

Unabhängig davon dürfte bei etwa gleichen Bestimmtheitsmaßen sowie einer bereits nachgewiesenen guten Korrelation zwischen CAI und LAK zur Auswertung der Auswirkung der Gesteins-Abrasivität künftig gleichermaßen sowohl der Parameter LAK als auch der Parameter CAI in

Frage kommen, wobei letzterer aufgrund seiner einfacheren Durchführung (geringerer Präparationsaufwand) häufiger angewendet werden dürfte, gegebenenfalls auch baubegleitend in einem Baustellenlabor.

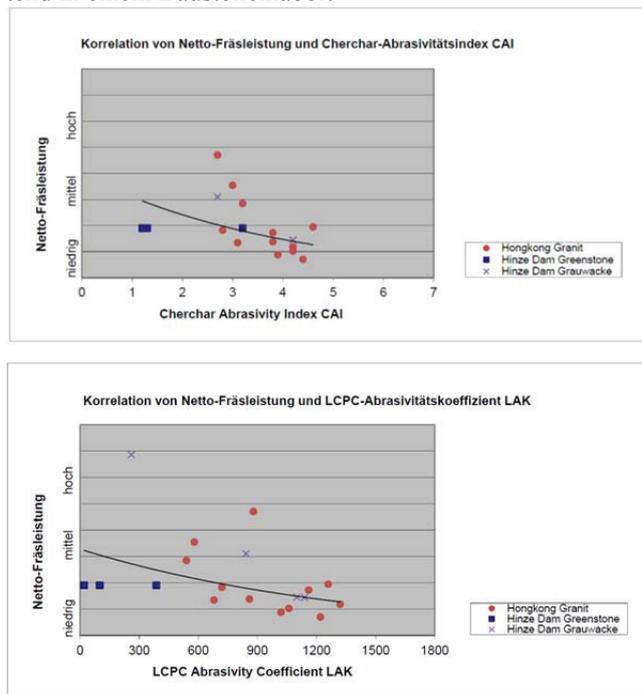


Abb. 5: Abrasivitätskennwerte CAI und LAK gegen Netto-Fräsleistung

Fig. 5: Abrasivity parameters CAI and LAK against the net-cutter performance

3.3 Einfluss des Trennflächengefüges auf Netto-Fräsleistung

Sowohl im Tunnelbau (THURO & PLINNINGER 2002) als auch in der Großbohrtechnik (METKA 2010) wurde als weitere maßgebliche Einflussgröße für die Gebirgslösung das Trennflächengefüge identifiziert. Zumeist steht zur Berücksichtigung dieses Einflusses aus den Baugrundgutachten nur der nicht besonders differenzierende RQD-Wert zur Verfügung, bei welchem die Längen der Bohrkernstücke > 10 cm einfach aufsummiert werden. Im „worst case“ kann man mit dem RQD-Wert bereits bei einer minimalen Änderung des Kluftabstandes zu einem völlig unterschiedlichen Ergebnis kommen, wenn z.B. ein 1 m langer Bohrkern mit elf jeweils 9 cm langen Felsbruchstücken einen RQD-Wert von 0%, ein Bohrkern mit 10 jeweils 10 cm langen Bruchstücken aber einen RQD-Wert von 100% ergeben würde. Da aussagekräftigere Angaben zur Klüftigkeit wie z.B. der RMR-Index andererseits in der geotechnischen Erkundung nur selten bestimmt werden, gibt es zu einer Auswertung des RQD-Wertes in der Praxis als einzige verbleibende Alternative meist eine optische Beurteilung von Bohrkernen – wenn z.B. im Rahmen einer Fotodokumentation überhaupt auswertbare Bilder zur Verfügung stehen. Der Versuch einer Bewertung des Trennflächengefüges anhand des RQD-Wertes mit Gegenüberstellung von Bohrfortschritt für eine näher untersuchte Fels-Bohrpfahlbaustelle in Montréal zeigt z.B. die nachfolgende Abbildung Abb. 6.

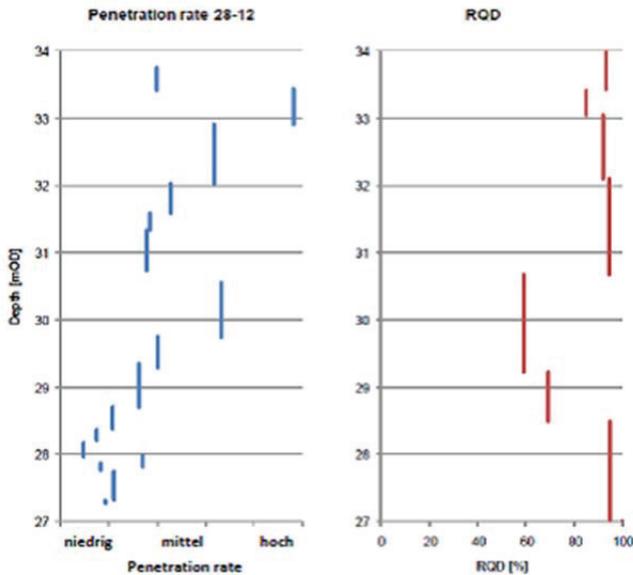


Abb. 6: Vergleich zwischen dem Bohrfortschritt und dem RQD-Wert bei einer Fels-Bohrpfahlbaustelle in Montréal, Kanada

Fig. 6: Relation between penetration rate and RQD-value for a rock socket piling site in Montréal, Canada

Erwartungsgemäß sind bei der vorstehenden Gegenüberstellung für die Bereiche mit hohen RQD-Werten um 100% tendenziell zwar etwas geringere Bohrfortschritte festzustellen als für die Bereiche mit einem geringen RQD-Wert. Allerdings sind die RQD-Werte und zugehörigen Fortschrittsraten im Fels unterschiedlich langen Abschnitten zugeordnet, und auch liegen hier im Mittel hohe bis sehr hohe RQD-Werte vor, welche eine differenzierte Aussage schwer machen.

3.4 Kombinierte Einflüsse auf Netto-Fräsleistung

Einen ersten Versuch, einen möglichen kombinierten Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und RQD-Wert mit der Fräsleistung – beim Schlitzwandfräsen – zu erkennen, zeigt nachfolgendes Diagramm in Abb. 7. Die insgesamt verfügbaren Datenpunkte aus der Korrelierung der Netto-Fräsleistung mit der Druckfestigkeit aus dem Punktlastversuch (gem. Abb. 4) wurden hierzu dem jeweiligen RQD-Wert entsprechend aufgeteilt, und zwar zur einen Hälfte in Punkte mit einem RQD-Wert von 100% und zur anderen Hälfte in Punkte mit einem RQD-Wert kleiner 100%. Anschließend wurde in Abb. 7 für jeden dieser beiden RQD-Bereiche eine eigene Trendlinie generiert.

Diese differenzierte Betrachtung lässt eine Auswirkung des Trennflächengefüges (hier des RQD-Wertes) auf die mit höherer Festigkeit geringere Fräsleistung nur im Bereich einer geringen Druckfestigkeit vermuten. Insbesondere auf der „weichen Seite“ des Diagrammes bei einer Druckfestigkeit von ca. 50-100 MPa liegen bei geringen RQD-Werten signifikant höhere Fräsleistungen vor, während bei hohen RQD-Werten von 100% die Fräsleistung signifikant geringer ist. Mit zunehmender Felsfestigkeit dürfte also der Einfluss des Trennflächengefüges (genauer: der im RQD-Wert enthaltenen Einflussgröße) abnehmen. Auf der „harten

Seite“ des Diagrammes bei Druckfestigkeiten um ca. 250 MPa ist schließlich kein Einfluss des RQD-Wertes auf die Fräsleistung mehr zu erkennen, was aber unter der Bedingung gelten dürfte, dass die Trennflächen mindestens im Abstand mehrerer Zentimeter liegen dürften. Bei Trennflächenabständen klar unterhalb des Werkzeugabstands muss auch bei sehr hohen Festigkeiten eine höhere Fräsleistung erwartet werden als in einem kompakten, „gesunden“ Fels. In einem integren Fels mit Trennflächenabständen größer als der Werkzeugabstand ist bei derartigen hohen Festigkeiten ein Lösen des Gebirges aus maschinentechnischer Sicht nur noch mit „Gewalt“ und unter Inkaufnahme eines dementsprechend großen Verschleißes möglich. Eine größere Klüftigkeit könnte sich bei solchen Festigkeiten ggf. sogar noch ungünstig auswirken, wenn bedingt durch Schwächezonen im insgesamt hochfesten Felsverband einzelne größere Felsbrocken gelöst werden und sich diese in den Fräsrädern verklebten. Bei solchen Verhältnissen wurden bereits minimale Netto-Fräsleistungen festgestellt.

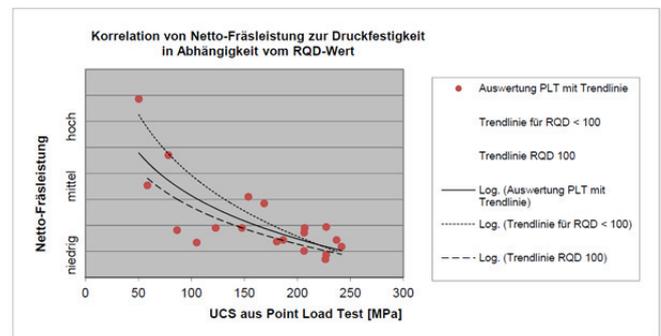


Abb. 7: Korrelation von Netto-Fräsleistung und Druckfestigkeit aus dem Punktlastversuch in Abhängigkeit vom RQD-Wert

Fig. 7: Correlation of net-cutter performance and point load strength depending on the RQD-value

Ergänzend zur vorherbeschriebenen Korrelation der Netto-Fräsleistung zur Druckfestigkeit in Abhängigkeit des RQD-Wertes wurde in analoger Vorgehensweise auch nach einer besseren Korrelation in Abhängigkeit von der Abrasivität gesucht. Wie zuvor der RQD-Wert wurde auch hierfür wieder eine Unterteilung der Datenpunkte durchgeführt, mit diesmal einer Gruppierung aller hohen Abrasivitäten $CAI \geq 4$ sowie aller geringen Abrasivitäten $CAI < 4$. Bei dieser groben Unterteilung war, anders als bei der kombinierten Betrachtung von Druckfestigkeit und Trennflächengefüge, keine signifikant bessere Korrelation festzustellen, so dass bei den bisher untersuchten Baustellen und Felsarten offenbar der Einfluss der Abrasivität auf die Netto-Fräsleistung von untergeordneter Bedeutung ist. Die gesonderte baubetriebliche Bewertung der Abrasivität in Hinblick auf den zu erwartenden Bohrerwerkzeugverbrauch und mehr noch auf die mit dem Verschleiß stets verbundenen Reparatur- und Stillstandzeiten sowie damit assoziierten Kosten ist hier nicht beschrieben. Diese haben neben der rein ingenieurgeologischen sowie maschinen- und verfahrenstechnischen Bewertung aber einen mindestens so großen Effekt auf die Angebotskalkulation und damit auch auf eine angestrebte Auftragserteilung sowie wirtschaftliche Projektentwicklung.



4 Zusammenfassung

Die Kalkulation von Schlitzwandprojekten ist schwierig und insbesondere für das Fräsen von Fels ist die Festlegung von geeigneten Leistungs- und Verschleißansätzen bislang mit einer erheblichen Unsicherheit behaftet. Gesicherte Zusammenhänge zwischen der Fräsleistung und den Felseigenschaften existieren für das Schlitzwandfräsen bis dato nicht. Erfahrungswerte und aus Projekten im vergleichbaren Festgestein abgeleitete Kennwerte gehen in Angebotskalkulationen ein, mit den sich daraus ergebenden Unsicherheiten bzw. großen Vorhaltemaßen.

Die maßgeblichen ingenieurgeologischen Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Felseigenschaften und der Fräsleistung und dem Verschleiß sollen im Forschungsvorhaben „Ingenieurmodell Felsfräsen“ der Bauer Forschungsgemeinschaft wissenschaftlich fundiert geklärt werden. Auf Grundlage der Baustellen-Produktionsdaten von verschiedenen Fräsbaustellen sowie anhand von einhergehenden Laboruntersuchungen im Felslabor werden für unterschiedliche Felsarten mit diesem Ingenieurmodell die kombinierten Zusammenhänge dieser ingenieurgeologischen Kennwerte mit der Fräsleistung und dem Bohrwerkzeugverbrauch ermittelt. Als Leitparameter gilt nach wie vor die charakteristische Druckfestigkeit des Gesteins, über die in der Regel gute Informationen vorliegen. Zudem werden auch die Einflüsse mindestens des Trennflächengefüges und der Abrasivität als verstärkende oder abschwächende Einflussparameter mit berücksichtigt, um anhand der jeweils relevanten Felseigenschaften bei der Kalkulation von Schlitzwand-Fräsbaustellen zukünftig eine realistischere und besser zutreffende Leistungs- und Verschleißabschätzung vornehmen zu können.

Literatur

THURO, K. (1996): Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb: Geologisch-felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte. Münchener Geologische Hefte, Reihe B: Angewandte Geologie, B1: S 1-145

HOLLFELDER, M.; VOGT, N.; HARTFUß, W. (2002): Bohrpfähle im Festgestein – Stand der Technik. DGGT, Beiträge zur 27. Baugrundtagung in Mainz, S. 209-216.

BECKHAUS, K. & THURO, K. (2008): Abrasivität von Lockergesteinen in der Großbohrtechnik – Versuchstechnik und praktische Erfahrungen. – 30. Baugrundtagung, 24.-27. September 2008, Dortmund, S. 171-180

DGGT – Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2004): Neufassung der Empfehlung Nr. 1 „Einaxiale Druckversuche

an zylindrischen Gesteinsprüflörpern“ des Arbeitskreises 3.3 „Versuchstechnik Fels“ – Bautechnik 81, S. 825-834

ISRM – International Society for Rock Mechanics (2004): Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock material. – Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, Int. J. Rock. Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16, S. 135-140

DGGT – Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2004): Empfehlung Nr. 5 „Punktlastversuche an Gesteinsproben“ des Arbeitskreises 3.3 „Versuchstechnik Fels“ – Bautechnik 87, S. 322-330

BROOK, N. (1993): The measurement and estimation of basic rock strength. - in: HUDSON, J.: Comprehensive rock engineering. Principles, practice and projects. Vol. 3: Rock testing and site characterization, 982 S., Oxford, New York (Pergamon)

DGGT – Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2008): Empfehlung Nr. 10 „Indirekter Druckversuch an Gesteinsproben - Spaltzugversuch“ des Arbeitskreises 3.3 „Versuchstechnik Fels“ – Bautechnik 85, S. 623-627

CENTRE D'ETUDES DE CHARBONNAGES DE FRANCES (1986): The Cherchar Abrasiveness Index. - 8 S., 4 Taf., Verneuil

WEST, G. (1989): Technical Note: Rock abrasiveness Testing for Tunneling. - Int. J. Rock. Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr., 26, S. 151-160

KÄSLING, H.; THIELE, I.; THURO, K. (2007): Abrasivitätsuntersuchungen mit dem Cherchar-Test – eine Evaluierung der Versuchsbedingungen. – Veröffentlichung der 16. Tagung für Ingenieurgeologie in Bochum, S. 229-235

AFNOR (1990): Normalisation Francaise P18-579 (12/1990): Granulats: Essai d'abrasivité et de broyabilité

BÜCHI, E.; MATHIER, J.-F.; WYSS, C. (1995): Gesteinsabrasivität - ein bedeutender Kostenfaktor beim mechanischen Abbau von Fest- und Lockergestein. – Tunnel, 95., Heft 5, S. 38-44

THURO, K.; SINGER, J.; KÄSLING, H.; BAUER, M. (2006): Abrasivitätsuntersuchungen an Lockergesteinen in Hinblick auf die Gebirgslösung. – In: DGGT, Beiträge zur 29. Baugrundtagung in Bremen, S. 283-290

THURO, K. (2002): Geologisch-felsmechanische Grundlagen der Gebirgslösung im Tunnelbau. - Münchener Geologische Hefte, B18: S 1-160

THURO, K & PLINNINGER, R.J. (2002): Klassifizierung und Prognose von Leistungs- und Verschleißparametern im Tunnelbau. – Taschenbuch für den Tunnelbau 2003, DGGT, Glückauf, Essen, S. 62-126

METKA, A. (2010): Construction of bored piles – options and limits of prediction, Master theses at Stuttgart University of Applied Sciences, Faculty of Civil Engineering, betreut durch die Fa. BAUER Spezialtiefbau GmbH