

„Mixed Face“-Bedingungen (MFC) im maschinellen Tunnelvortrieb – Ursachen, Folgen, Lösungsansätze

Prof. Dr.-Ing Michael Alber
Ingenieurgeologie/Felsbau, Ruhr Universität Bochum

Dipl.-Geol. Dr.rer.nat. Ralf Plinninger
Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried

M.Sc. Dr.rer.nat. Jan Düllmann
Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried

Zusammenfassung

Kleinräumig wechselnde Verhältnisse von Gesteinen unterschiedlicher Zusammensetzung, unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften oder mit unterschiedlichem Zerlegungsgrad stellen in vielen sedimentären und metamorphen Folgen eher Regel denn Ausnahme dar. Solche Abfolgen können „Mixed Face Conditions“ (MFC) oder „Mischbrust“ – Situationen verursachen, bei denen an einer einzigen Vortriebsstation bzw. Ortsbrust Gesteine stark unterschiedlicher Lösbarkeit auftreten. Insbesondere bei maschinellen Vortriebsverfahren mit großem Durchmesser und vollflächigem Abbau können sich solche Verhältnisse negativ auf Vortriebsleistung und Werkzeugverschleiß auswirken. Der vorliegende Beitrag fasst den aktuellen Wissensstand zu geologischen Ursachen und bautechnischen Auswirkungen von Mixed-Face-Bedingungen zusammen und stellt Definitions- und Prognoseansätze für dieses aktuelle Problemfeld vor.

1. Einleitung

Deere (1981) beschreibt folgende Gebirgseigenschaften als ideal für einen maschinellen Hartgesteinsvortrieb: Mäßig festes Gestein, homogen, wenig abrasiv, unverwittert, wenige Trennflächen, kein Bergwasser, mäßige Gebirgsspannungen und keine Gaszutritte. Die Realität maschineller Festgesteinsvortriebe stellt sich jedoch vielfach anders dar. In mühsamer händischer Bergmannsarbeit vorgetriebene First- oder Bergestollen zum Freilegen von in druckhaften Gebirgsverhältnissen steckengebliebenen Vortriebsmaschinen, aufwändige Zusatz- und Sondermaßnahmen, wie Hohlraumverfüllungen, Injektionsmaßnahmen oder Rohrschirme zur Aufrechterhaltung maschineller Vortriebe unter erschwerten Bedingungen oder langwierige Vertragsstreitigkeiten zur Lösung von Problemen im Zusammenhang mit Leistungseinbußen und Werkzeugverschleiß bestimmen bei einer Vielzahl aktueller Projekte den Arbeitsalltag.

All diese Probleme stellen Phänomene bei der Interaktion von Gebirge und Tunnelvortriebsmaschine dar (Bild 1) und spielen sich daher im Grenzbereich der in Mitteleuropa üblichen Risikosphären von Auftraggeber (Baugrund / Gebirge) und Auftragnehmer (Vortriebs- / Maschinentechnik) ab. Neben vertraglich gut abdeckbaren Einflussfaktoren, wie Stützmitteleinsatz, Einaxiale Druckfestigkeit oder Gesteinsabrasivität stellen gebirgsmaßstäbliche Phänomene, wie „Mixed Face Bedingungen“ oder „Blockigkeit“ relevante, aber dennoch schwer definierbare und schwer quantifizierbare Probleme dar (siehe auch Plinninger & Düllmann, 2016).

2. Herkunft und Definition der „MFC“

„Mixed Face“-Bedingungen (engl. „Mixed Face Conditions“, abgekürzt „MFC“, im Deutschen auch als „Mischbrust“ bezeichnet) wurden zunächst vor allem bei maschinellen Vortrieben im Lockergesteine beschreiben. So wird z.B. das Vorhandensein von bindigen und nichtbindigen Bodenarten an der Ortsbrust oder das Auftreten von Locker- und Festgestein an der Ortsbrust als MFC beschrieben (Fowel und Johnson, 1981). Spätestens seit Büchi (1992) umfasst der Begriff auch eine Ortsbrust mit verschieden bohrbaren Lithologien.

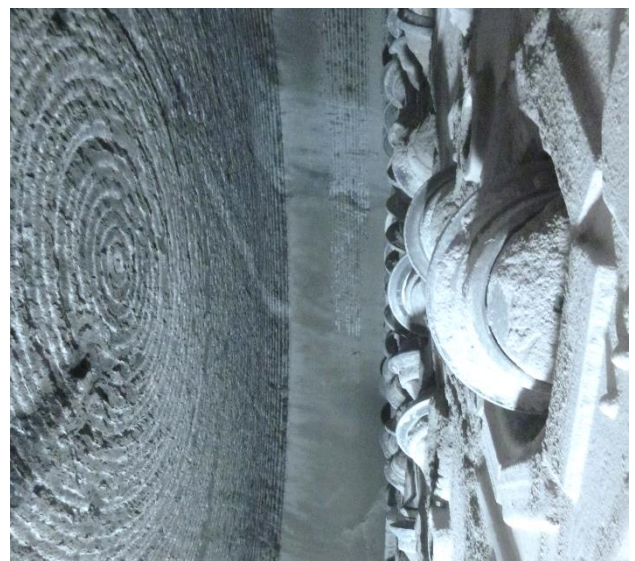


Bild 1: Die Interaktion von Gebirge und Maschinentechnik an der Ortsbrust bestimmt die Effektivität eines TBM-Vortriebs (Foto: Plinninger/AGTK.2).

Während es im Bereich der deutschen Regelwerke derzeit keine allgemein anerkannte Definition des Begriffs gibt, beschreibt die in Österreich geltende Werkvertragsnorm ÖNORM B 2203-2 (Kontinuierlicher Vortrieb) eine „mixed face“ als „Vortrieb bei gleichzeitigem Auftreten zusammenhängender Pakete von Gesteinsarten mit sehr unterschiedlichem Löseverhalten“.

Die in nachstehendem Absatz 3 dargestellten Fallstudien zeigen bekannte Zusammenhänge zwischen Gebirgseigenschaften und baubetrieblichen Folgen auf. Auf dieser Basis soll in Kapitel 4 eine angepasste Definition des Begriffes „Mixed Face Condition“ dargestellt und in Kapitel 5 Hinweise für deren Prognose gegeben werden.

3. Geologische Ursachen für MFC

3.1 Lithologischer Wechsel

Das Auftreten unterschiedlicher Gesteine mit unterschiedlicher Gesteinsfestigkeit stellt unter Bezug auf die Literatur den „Standardfall“ einer „Mixed Face Condition“ dar. Ein entsprechendes Beispiel wird in Alber (1998) dargestellt. Der hier beschriebene TBM-Vortrieb fand in Fallrichtung eines schwach geneigten Sedimentgebirges statt, wobei ein rd. 35 MPa fester Dolomit an der Ortsbrust graduell durch einen geringfesten Tonschiefer mit nur rd. 15 MPa Einaxialer Druckfestigkeit ersetzt wurde (Bild 2).

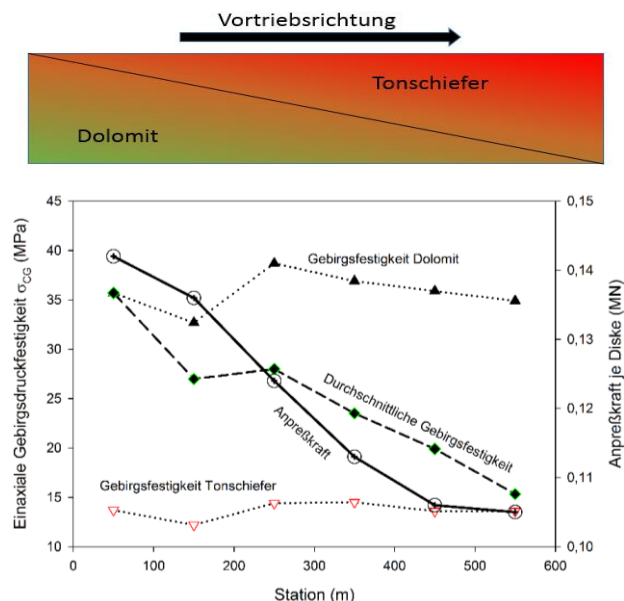


Bild 2: Verringerung der Anpresskraft durch Wechsellaagerung an der Ortsbrust (Alber, 1998).

Die starke Vibration am Bohrkopf, hervorgerufen durch eine unterschiedliche Eindringtiefe der Disken in den unterschiedlich festen Lithologien, führten zu einer graduellen Reduktion der Anpresskraft. Die unterschiedliche Penetration der Disken wurde durch den reduzierten Anpressdruck von 145 auf 110 kN/Diske auf 1,1 mm minimiert und somit die Vibrationen auf ein verträgliches Niveau gesenkt. Damit einhergehend war eine Reduktion der Penetrationsleistung um bis zu 25%.

Da ein Bohrkopf nie ideal steif ausgeführt werden kann, führt die unterschiedliche Eindringtiefe der Disken

zwangsläufig zu einer Deformation des Bohrkopfes. Gehring (2009) bestätigt vorstehende Analyse mit der Feststellung, dass eine Verbiegung von 1,5 mm bei diesen Bedingungen zu einer Reduktion der Nettoschneidleistung um 30% führt.

Bezüglich Werkzeugverschleiß äußert sich eine Wechselagerung an der Ortsbrust meist in Gewaltschäden an Disken. Durch die unterschiedlichen Eindringtiefen der Disken erfahren die Disken beim Übergang von „weich“ nach „hart“ eine punktuelle Überbeanspruchung mit nachfolgendem Versagen des Schneidrings.

3.2 Variierender Zerlegungsgrad

Auch in lithologisch ähnlichen Gesteinen sind MFC als Folge stark variierender Abstände mechanisch wirksamer Trennflächen möglich. Ein anschauliches Beispiel für diesen Fall stellt z.B. eine durch die Ortsbrust verlaufende Störungszone mit zerbrochenem, zerschertem und/oder zermahlenem Gestein dar. Da der Zerlegungsgrad des Gebirges nach Stand der Wissenschaft (u.a. Gehring, 1995, 2009) einen wesentlichen Einflussfaktor für die Bohrbarkeit des Gebirges darstellt, können derartige, nebeneinanderliegende Bereiche unterschiedlicher Gebirgsfestigkeit und unterschiedlicher Eindringtiefe der Disken Phänomene hervorrufen, die sinnvollerweise als Mixed Face Conditions bezeichnet werden.

3.3 Gefügebedingte Ortsbrustinstabilität

Bei ungünstiger Orientierung mechanisch wirksamer Trennflächen können sich unter dem Eigengewicht oder durch Rotation des Bohrkopfes Kluftkörper aus der Ortsbrust lösen. Die mit dem Zerkleinern der losen Kluftkörper ggf. verbundenen Probleme an Bohrkopf und Meißelbesatz, insbesondere zunehmende Gewaltschäden an den Disken (siehe Plinninger & Düllmann, 2016), werden üblicherweise unter dem Begriff der „Blockigkeit“ abgehandelt und stellen per se keine Mixed Face Condition dar.



Bild 3: Keilförmiger, an Schieferung und Klüftung gebundener Ausbruch vor dem Bohrkopf einer Hartgesteins-TBM – eine „Mixed Face Condition“ als Folge von „Blockigkeit“ (Foto: Plinninger / AGTK.2).

Nichtsdestotrotz ergeben sich unter diesen Verhältnisse an der Ortsbrust meist erhebliche Festigkeitskontraste zwischen den noch anstehenden Gebirgspartien und den „Löchern“ in der Ortsbrust, welche die ausgebrochenen Kluftkörper hinterlassen haben (Bild 3). Für die damit zusammenhängenden Probleme (die meist nicht eindeutig von den Folgen des Zerkleinerns der Blöcke getrennt werden können) ist ebenfalls der Begriff der „Mixed Face Condition“ sinnvoll.

Die unter diesen Verhältnissen auftretenden Phänomene - starke Vibrationen durch das Springen der Disken über die Kanten an der Ortsbrust, Beanspruchung der Bohrkopfstruktur und das Erfordernis einer Reduzierung der Anpresskraft – entsprechen denen einer „klassischen“ MFC mit unterschiedlichen Gesteinsarten (Bild 4).

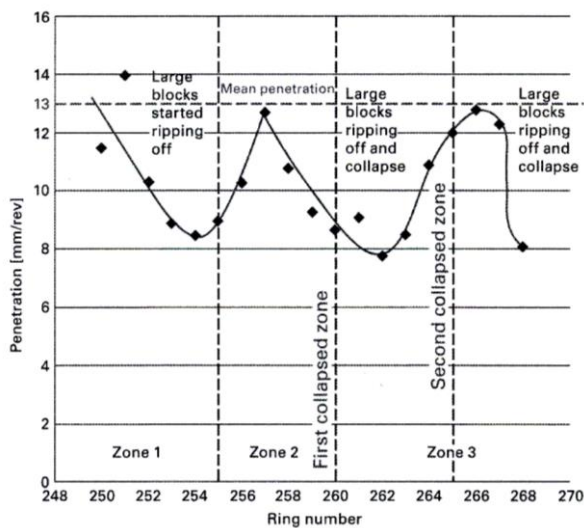


Bild 4: Einfluss von Ortsbrustinstabilitäten auf die TBM-Penetrationsrate (Bilgin et al., 2009).

3.4 Spannungsbedingte Ortsbrustinstabilität

Beim maschinellen Vortrieb im Festgestein kann es insbesondere unter hoher Überlagerungen zu Spannungskonzentrationen an der Ortsbrust mit nachfolgenden Versagen der Ortsbrust kommen. Vor allem in sehr sprödem Gesteinen treten Abplatzungen (engl. „Spalling“) auf (Diederichs, 2007). Diese Situation ist in Bild 5 schematisch anhand der FE-Modellierung eines homogen-isotropen Gebirges dargestellt.

Typische Bruchbilder im Vortrieb sind konkav bzw. listrisch (schaufelförmige) geformte scheibenartige Gesteinsplatten, die im Gegensatz zu entsprechend gefügebedingten Körpern keinen oder nur teilweisen Bezug auf existierende Trennflächen aufweisen (Bild 6). Derartige Phänomene sind vor allem in ausgeprägt massigen Gebirgsbereichen mit geringem Zerlegungsgrad zu beobachten.

Spannungsbedingte Ortsbrustinstabilitäten und gefügebedingte Ausbrüche wirken sich auf den TVM-Vortrieb in vergleichbarer Weise aus. Derartige Verhältnisse können daher ebenso Probleme im Zusammenhang mit dem Zerkleinern der losen Gesteinskörper („Blockigkeit“), als auch Mixed Face Conditions im Grenzbereich zwischen

noch anstehenden Ortsbrustpartien und „Löchern“ hervorrufen.

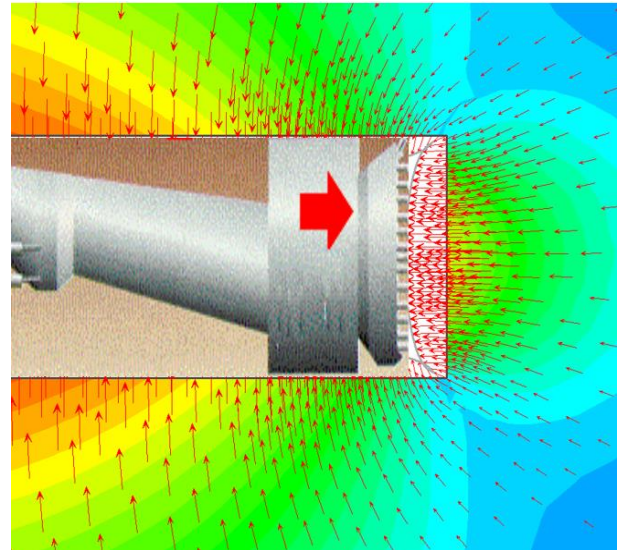


Bild 5: FE-Modell der Spannungsverteilung um eine TBM in einem homogen-isotropen Gebirge.



Bild 6: Typische Ausbildung spannungsinduzierter Abplatzungen im TBM-Vortrieb: Listrisch gebogene, vom Trennflächengefüge weitgehend unabhängige Gesteins-scheiben an der Ortsbrust eines TBM-Vortriebs: (Foto: Plinninger/AGTK.2).

4. Definitionsvorschlag

Wesentlich für eine aus Sicht der Verfasser baupraktisch zielführende Definition des Begriffs ist neben dem Bezug auf die geologisch-geotechnischen Ursachen des Phänomens auch der Bezug zu den maschinentechnischen bzw. baubetrieblichen Folgen. Wie im voranstehenden Kapitel dargestellt, können folgende Gesteins- oder Gebirgseigenschaften grundsätzlich Mixed Face Conditions verursachen:

- A Lithologischer Wechsel, bzw. signifikanter Festigkeitskontrast,
- B Signifikant variierender Zerlegungsgrad,
- C Ortsbrust mit gefügebedingtem Versagen,
- D Ortsbrust mit spannungsbedingtem Versagen,

oder Kombinationen dieser Verhältnisse.

Direkte Folgen derartiger Verhältnisse können sein:

- Erhöhte Schlagbeanspruchungen an den Einringdisken beim Einfahren in eine geringer penetrierbare Gesteinslage aus einer besser penetrierbaren Gesteinslage heraus;
- erhöhte dynamische Beanspruchungen und Vibrationen am Bohrkopf, der Maschinenstruktur und im weiteren Antriebsstrang,
- Erhöhung des Werkzeugverschleißes als Folge zusätzlicher Sprödbbruchschäden mit typischer Verschiebung der Verschleißform,

Als Reaktion auf derartige Verhältnisse werden in der Regel Anpassungen bei der Maschinenfahrt erforderlich, die damit indirekte Folgen einer MFC darstellen, z.B.:

- Reduzierung der Bohrkopfdrehzahl,
- Reduzierung von Vorschub / Anpresskraft,
- Vermehrte Inspektionen von Bohrkopf und Werkzeugen,
- Erhöhter Anteil an Werkzeugwechseln, die nicht während regulärer Wartungen durchgeführt werden können, sondern ggf. während des Hubs ausgeführt werden müssen und damit direkt leistungskritisch werden.

Zur Feststellung einer MFC muss die Kopplung von Ursache und Wirkung aus Sicht der Verfasser kritisch bewertet werden. Geologische Verhältnisse, die nachweislich nicht zu den o.a. direkten und indirekten Folgen im Vortriebsablauf geführt haben sollten dabei ebenso wenig als „MFC“ klassifiziert werden, wie Verschleißprobleme oder Leistungseinbußen, die auf andere, als die unter A - D beschriebenen Phänomene zurückzuführen sind.

Ein Vorschlag für eine dahingehend umfassende Definition des Begriffs kann daher wie folgt formuliert werden:

„Mixed Face Bedingungen“ können bei der Interaktion von Bohrkopf und Gebirge während des Lösevorgangs auftreten. Eine MFC ist dabei eine Vortriebserschwerung bei maschinellen Vortriebsverfahren, die sich auf Vortriebsleistung und/oder Verschleiß an Werkzeugen und Vortriebsmaschine auswirkt.

Ursache für eine Mixed Face Bedingung ist das Vorhandensein von Teilbereichen mit signifikant unterschiedlicher Bohrbarkeit in ein und demselben, gleichzeitig zu bearbeitenden Querschnitt. Beispiele stellen ein lithologischer Wechsel, bzw. ein signifikanter Festigkeitskontrast, signifikant variierender Zerlegungsgrad, eine Ortsbrust mit gefügebedingtem Versagen, eine Ortsbrust mit spannungsbedingtem Versagen, oder Kombinationen dieser Verhältnisse dar.

Direkte Folgen einer Mixed Face Bedingung können Meißelschäden, Vibrationen und/oder eine erhöhte dynamische Beanspruchung der Bohrkopf- und Hauptlagerstruktur darstellen. Indirekte Folgen zur Minimierung dieser

Schäden können die Reduzierung von Bohrkopfdruckkraft und/oder der Bohrkopfdrehzahl oder vermehrte Meißel- und Bohrkopfinspektionen darstellen.“

5. Erkundung und Prognose von MFC

Während das Erkennen einer eingetretenen Mixed Face Condition im Zuge der Bauausführung auf Basis der üblichen geologisch-geotechnischen Dokumentationen in der Regel relativ problemlos möglich ist, stellt die Prognose derartiger Verhältnisse und erst recht der bauvertragliche Umgang mit derartigen Erschwernissen aktuelle Herausforderungen dar.

Für die Benennung und Beschreibung von Festgesteinen im Rahmen der Erkundung kommt in der EU die DIN EN ISO 14689-1 zur Anwendung. Bei einer vollständigen Erfassung der darin aufgeführten geologisch-geotechnischen Merkmale eines zu durchörternden Gebirges sind dabei alle grundlegenden Informationen vorhanden, um die vorstehend genannten Ursachen für Mixed Face Bedingungen in qualitativer Hinsicht erkennen zu können.

Da es andererseits aber in keiner der gängigen Regelwerke Vorschläge zur deterministischen Ableitung der MFC-Risiken oder deren Einfluss auf den maschinellen Vortrieb gibt, sollen in den nachfolgenden Absätzen 5.1 bis 5.5 einige theoretische Erfahrungen und Ansätze zusammengefasst werden.

5.1 Maßstabeffekte bei MFC

Eine geometrische Betrachtung des Phänomens zeigt, dass Mixed Face Bedingungen keine absolute Größe darstellen, sondern stets auf den vorgesehenen Bohrkopfdurchmesser zu beziehen sind. Ein und dieselbe Gesteinsabfolge kann dabei für Tunnelvortriebsmaschinen mit unterschiedlichem Bohrdurchmesser ganz unterschiedliche Folgen haben.

Nach Plinninger (2002) ergibt sich bei Annahme eines aus zwei konkordant abwechselnden Gesteinen zusammengesetzten, modellhaften Gebirgsverbands mit der Mächtigkeit m der einzelnen Gesteinslagen der prozentuale Anteil homogener Gesteinsverhältnisse (keine „mixed-face“) gemäß Gleichung 1:

$$H = \left(1 - \frac{d}{m}\right) \cdot 100$$

mit: H Anteil homogener Gesteinsverhältnisse [%]
 d Bearbeitungsdurchmesser [m]
 m Mächtigkeit der Gesteinslagen [m]
Anmerkung: Für alle Fälle $d \geq m$ ist $H = 0$ %

5.2 MFC-Faktoren nach Steingrimsson et al. (2001)

Steingrimsson et al. (2001) fassen den Einfluss von MFC auf die Leistung in einem Korrekturfaktor zusammen. Dabei werden die unterschiedlichen Penetrationsraten entsprechend dem Anteil von festen und geringfesten Gesteinen an der Ortsbrust gemittelt und der Faktor K-MFC berechnet. Dieser Faktor wird dann mit einer Reduktion der Anpresskraft korreliert (Bild 7).

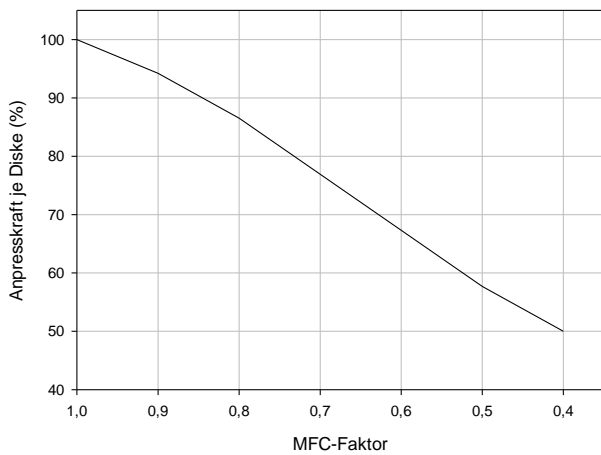


Bild 7: Reduktion der Anpresskraft durch Wechsellagerung an der Ortsbrust. Verändert nach Steingrimsson et al. (2001).

Das dargestellte Modell ist als Annäherung für den Fall einer Hart/Weich-Abfolge grundsätzlich geeignet. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass neben dem Penetrationskontrast weitere relevante Faktoren, wie die Mächtigkeit und Anordnung der geringfesten Bänke an der Ortsbrust eine Rolle für die Auswirkungen der Situation auf die TBM spielen. Diese Aspekte gehen in das hier vorgestellte Modell nicht ein.

5.3. Einfluss der Diskenauslastung

Eine relativ neue Erkenntnis aus TBM-Vortrieben in hochfesten Hartgesteinsverhältnissen ist die Beobachtung, dass sich Mixed-Face-Bedingungen insbesondere dann überproportional negativ auswirken, wenn das Gebirge bereits im homogenen Zustand „schwer bohrbar“ ist.

Wie in Bild 8 veranschaulicht besitzen Disken, die in „gut bohrbarem“ Gebirge mit vergleichsweise niedrigen Anpresskräften belastet werden eine erhebliche „Lastreserve“ bis zum Erreichen der kritischen Belastungsgrenze, die dazu führen, dass auch gewisse Mixed-Face-Bedingungen ggf. noch ohne negative Auswirkungen beherrscht werden können (grüner Balken, links).

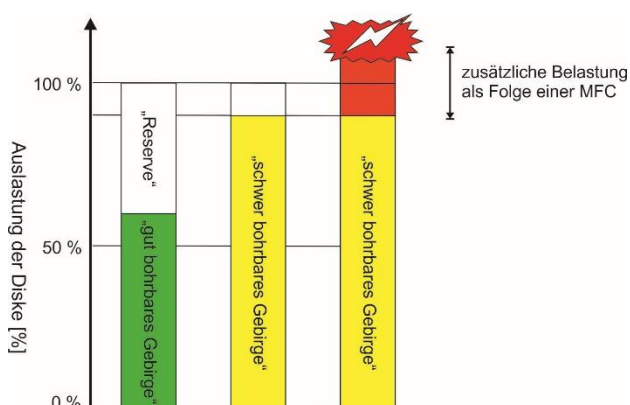


Bild 8: Konzeptuelles Modell zum Einfluss des Auslastungsgrads der Disken im „Regelzustand“ auf die Auswirkung von MFC.

Werden die Disken dagegen in einem „schwer bohrbaren“ Gebirge bereits im „Regellösevorgang“ an der Obergrenze

ihrer Belastbarkeit gefahren (gelber Balken, Mitte), so genügen ggf. geringe Schlagimpulse als Folge von Mixed Face Conditions, um zum Überschreiten der kritischen Grenzbelastung und zum Meißelbruch zu führen (Balken rechts).

5.4 Vorschlag für einen Planungsansatz

MFC vom Typ A (Wechsellagerung an der Ortsbrust) führen nur dann zur Verringerung der Penetrationsleistung, wenn die Mächtigkeit der einzelnen Bänke ein unterschiedliches Eindringen der Disken ermöglicht und die Festigkeitsunterschiede groß genug sind. Dabei gilt es zu beachten, dass eine Wechsellagerung fest-geringfest-fest den Vortrieb weniger behindert als eine Situation gering-fest-geringfest (Bild 9). Für diesen Fall könnte eine Risikomatrix wie in Tabelle 1 dargestellt zur Anwendung kommen.

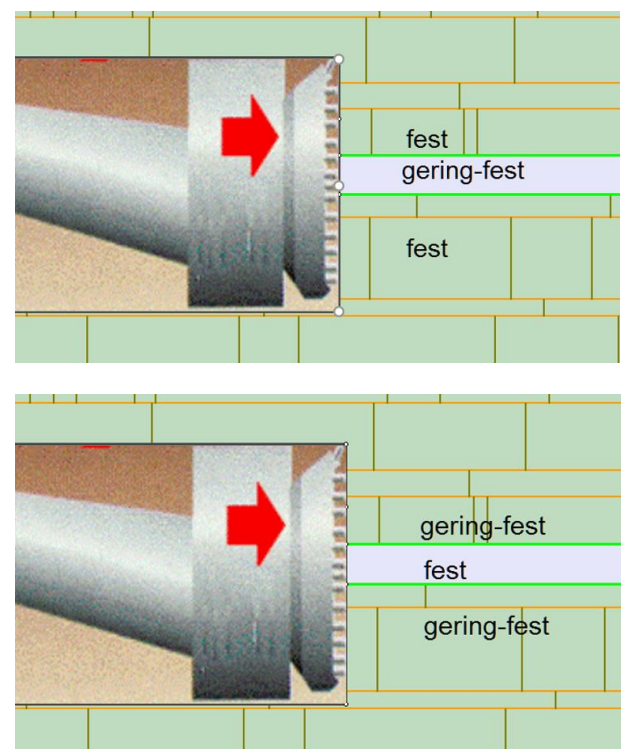


Bild. 9: Günstigere (oben) und ungünstigere (unten) Verhältnisse einer Wechsellagerung an der Ortsbrust.

Tabelle 1: Risikomatrix (Penetration / Verschleiß) zur Wechsellagerung an der Ortsbrust.

Festigkeitsunterschied \ Ausbildung	Festigkeitsunterschied		
	< 10 MPa	10 MPa – 30 MPa	>30 MPa
hart – weich – hart	grün	gelb	rot
weich-hart-weich	grün	rot	rot

MFC vom Typ B (Strukturbedingtes Versagen an der Ortsbrust) führen dann zur Verringerung der Penetrationsleistung und zu erhöhtem Werkzeugverschleiß, wenn eine Bewegung von Kluftkörpern aus der Ortsbrust möglich ist. Dazu muss der Durchtrennungsgrad der Trennflächen genügend hoch sein und deren Orientierungen ungünstig zur Tunnelachse liegen (Einfallen in Richtung Tunnel). Dazu muss zwischen ebenem Gleiten und Keilversagen unterschieden werden. Hier könnte eine Risikomatrix wie in Tabelle 2 dargestellt zur Anwendung kommen.

Tabelle 2: Risikomatrix (Penetration / Verschleiß) zum strukturbedingtem Versagen an der Ortsbrust.

Einfallen Azimut \	<25°	25° – 40°	>40°
// Ortsbrust			
⊥ Ortsbrust			

MFC vom Typ C (Ortsbrust mit spannungsbedingtem Versagen) treten bei festen, wenig durchtrennten Sprödgesteinen auf. Diederichs (2007) sieht die Untergrenze für solches Verhalten bei einer einaxialen Druckfestigkeit (UCS) von 140 MPa. Die Spannungskonzentration an der Ortsbrust müssen dabei ähnlich hoch sein, wie die Einaxiale Druckfestigkeit, um zu Abplatzungen zu führen. Castro et al. (1997) schlagen folgendes Kriterium in Abhängigkeit der Hauptnormalspannungen vor:

$$SC = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{UCS}$$

Dabei besteht:

für $SC < 0,4$ keine Gefahr einer Abplatzung

für $0,4 < SC < 0,7$ eine erhöhte Gefahr von Abplatzungen

für $SC > 0,7$ akute Gefahr von Abplatzungen.

6. Schlussfolgerungen

Aus den voranstehenden Erwägungen und Erfahrungen lassen sich aus Sicht der Autoren folgende Schlüsse ziehen:

1. Mixed Face Bedingungen stellen für einen maschinellen Vortrieb Erschwernisse dar, die nach Stand der Technik einen signifikant negativen Einfluss auf die Vortriebsleistung und den Werkzeugverschleiß ausüben können.
2. Das Auftreten derartiger Erschwernisse ist grundsätzlich in der Risikosphäre des Bauherrn anzusiedeln.
3. Angaben zu Art, Ursachen, Auftretenswahrscheinlichkeit und Auftretenshäufigkeit derartiger gebirgsmaßstäblicher Phänomene sollten im Sinne einer fairen Risikoverteilung Eingang in das projektspezifische Baugrundgutachten und die Leistungsbeschreibung finden bzw. sich in Form eindeutiger LV-Positionen im Bauvertrag niederschlagen.

Ein Blick über die Landesgrenzen zeigt, dass einige der angesprochenen Aspekte andernorts bereits Eingang in die Normung gefunden haben. So definiert die österreichische Werkvertragsnorm ÖNORM B2003-2 gebirgsmaßstäbliche Phänomene, wie „mixed-face-Verhältnisse“ oder „Blockigkeit“ konsequenterweise als „Erschwernisse“, welche einen höheren Aufwand verursachen oder die erzielbare Vortriebsgeschwindigkeit des eingesetzten Vortriebssystems reduzieren. Für solche Erschwernisse sind gemäß ÖNORM Prognosen zu Verteilung, Bandbreiten und örtlicher Zuordnung zu erarbeiten. Die vorgestellten Modelle und Planungsansätze können für derartige Bewertungen hilfreiche Ansätze darstellen.

Literaturverzeichnis

- [1] ALBER, M. (1996): Prediction of penetration and utilisation for hard rock TBMs. Proc. ISRM Int. Symp. Eurock'96, S. 721–725. Rotterdam: Balkema, 1996.
- [2] ALBER, M. (1998): Design of High Speed TBM Drives. Proc. Symp. Int. Assoc. Eng. Geol., Vancouver, Canada, Balkema, Rotterdam, S. 721-725.
- [3] ALBER, M. (2008): An Integrated Approach to Penetration, Advance Rates and Disc Cutter Wear for Hard Rock TBM Drives. Geomechanik und Tunnelbau 1, S. 29-37
- [4] BILGIN, N., OZBAYIR, T., SOZAK, T. & EYIGUN, Y. (2009). Factors affecting the economy and efficiency of metro drives with two TBMs in very fractured rock. World Tunnel Congress, Budapest, Ungarn.
- [5] BÜCHI, E.T. (1992): New TBM Generation with 20" Cutters. Tunnelling Experience at Klippen Hydro-power-Sweden.- in: TBM Symposium – Lucia 1992, Atlas Copco Stockholm, BeFo Stiftelsen Bergteknisk Forskning, BK Bergsprengningskommiten, Stockholm.
- [6] CASTRO, L.A.M., GRABINSKY, M.W. & MCCREATH, D.R. (1997). Damage Initiation through Extension Fracturing in a Moderately Jointed Brittle Rock Mass. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 34, 3/4, S. 557
- [7] DEERE, D. U. (1981). Adverse Geology and TBM Tunneling Problems. Proc. Rapid Excavation and Tunneling Conference 1981, ASCE, S. 574-585.
- [8] DELISIO A., ZHAO A. & EINSTEIN, H.H. (2013). Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Löttschberg Base Tunnel Tunnelling and Underground Space Technology 33: S. 131–142.
- [9] DIEDERICH, M.S. (2007): CGS Geocolloquium Award Lecture: Damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling. Can. Geotechnical Journal, 44, 9, S. 1082-1116

- [10] Deutsches Institut für Normung e.V. (2003): DIN EN ISO 14689-, Geotechnische Erkundung und Untersuchung . Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels. Teil 1: Benennung und Beschreibung. Beuth Verlag, Berlin.
- [11] FOWELL, R.J. & JOHNSON, S.T. (1982). Rock Classification and Assessment for Rapid Excavation, in: Farmer, I. (Hrsg, 1982): Proc. Symp. Strata Mechanics 1982, Elsevier, Rotterdam. pp. 241 – 244.
- [12] GEHRING, K. (1995): Leistungs- und Verschleißprognosen im maschinellen Tunnelbau.- Felsbau, 13, 6: S. 439-448.
- [13] GEHRING, K. (2009). Der Einfluss von TBM-Konstruktion und Maschineneigenschaften auf Leistung und Werkzeugverbrauch in Gestein. Geomechanics and Tunnelling, 2, S. 140 – 155.
- [14] ÖGG (2013): Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, Salzburg, 49 S.
- [15] ÖNORM B 2203-2: Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm, Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb. Ausgabe vom 01.01.2005.
- [16] PLINNINGER, R.J. (2002): Klassifizierung und Prognose von Werkzeugverschleiß bei konventionellen Gebirgslösungsverfahren im Festgestein.- Münchner Geologische Hefte, Reihe B, 17 - Angewandte Geologie, XI + 146 S., München.
- [17] PLINNINGER, R.J. & DÜLLMANN, J. (2016): Gebirgsmaßstäbliche Einflussfaktoren auf den Werkzeugverschleiß im Felstunnelbau – baupraktisch relevant und wissenschaftlich vernachlässigt? in: VOGT, C. & MOORMANN, C. (Hrsg., 2016): Tagungshandbuch zum 10. Kolloquium "Bauen in Boden und Fels" der TA Esslingen, 19. und 20. Januar 2016, S. 279-286 (Technische Akademie Esslingen).
- [18] STEINGRIMSSON, J. H., GRØV, E. & NILSEN, B. (2001). The significance of Mixed-face Conditions for TBM performance. World Tunnelling, S. 435-441.