Empfehlung(en) „Verschleiß und Verklebung im Lockergestein“ - ein erster Ausblick

Akad. Dir. Dipl.-Ing. Martin Feinendegen, Geotechnik im Bauwesen, RWTH Aachen University
Dipl.-Ing. Tim Babendererde, BabEng GmbH, Lübeck
Dipl.-Ing. Dr. techn. Petra Drucker, CDM Smith Consult GmbH, München
Dr.-Ing. Jörg Holzhäuser, HIC Holzhäuser Ingenieur Consult GmbH, Ettlingen
Dipl.-Ing. Lars Langmaack, MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG, Bottrop
Dipl.-Ing. Annette Richter, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Verschleiß und Verklebung sind potenziell stark leistungs- und kostenbestimmende Faktoren, die insbesondere im Spezialtief- und Tunnelbau eine immer größere Rolle spielen. Während die Bestimmung der Abrasivität im Fels mittlerweile als einigermaßen zuverlässig geregelt anzusehen ist und eine darauf aufbauende Abschätzung des zu erwartenden Verschleißes ermöglicht, gilt dies für Bauvorhaben im Lockergestein noch nicht. Insbesondere die in der VOB seit 2015 erhobene Forderung, die Abrasivität von Böden mit dem für gebrochene Gesteinskörnungen entwickelten LCPC-Versuch zu bestimmen, hat zu großen Unsicherheiten in der Praxis geführt, die dringend einer Klärung bedürfen. Als Grundlage für die Abschätzung der Verklebungsneigung bindiger Böden und veränderlich fester Gesteine existieren mittlerweile einige -mehr oder weniger anerkannte- Ansätze, die allerdings z.T. auf recht unterschiedlichen Eingangswerten basieren. Eindeutige normative Regelungen oder Empfehlungen hierzu fehlen -auch international- bislang völlig. In dem im August 2019 gegründeten Arbeitskreis 1.11 der DGGT beschäftigen sich etwa 20 Fachleute aus den verschiedensten Bereichen mit der Erarbeitung, Konkretisierung und anwendungsspezifischen Auswahl von praxisnahen Verfahren zur Bestimmung der Abrasivität von Lockergestein sowie zur Bewertung der Verklebungsneigung bindiger Böden und veränderlich fester Gesteine. Darüber hinaus werden relevante Zusammenhänge zwischen den Bodenparametern, den Bauverfahren und der Bauausführung aufgezeigt. Im Beitrag wird der aktuelle Stand der Arbeiten vorgestellt und ein erster Einblick in den Inhalt der geplanten Empfehlung(en) gegeben.

1 Einleitung

Verschleiß und Verklebung sind potenziell stark leistungs- und kostenbestimmende Faktoren, die insbesondere im Spezialtief- und Tunnelbau eine immer größere Rolle spielen. Eindeutige Regelungen zur Einschätzung des zu erwartenden Verschleißes (bzw. Verschleißpotenzials, s.u.) und zu erwartender Verklebungen bei Bauarbeiten im Lockergestein oder auch im Übergangsbereich zum Festgestein existieren bislang nicht. Aus diesem Grund hat die Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) im Jahr 2019 einen neuen Arbeitskreis (AK) der Fachsektion Bodenmechanik gegründet, der entsprechende Empfehlungen erarbeiten soll.

2 Arbeitskreis

Im AK arbeiten aktuell etwa 20 Fachleute aus den Bereichen Forschung und Entwicklung, Consulting, Bauherren, Bauausführung, Maschinen-/Additivhersteller sowie ein Jurist unter der Obmannschaft des Erstautors dieses Beitrags an der neuen Empfehlung. Der Großteil der Arbeit erfolgt dabei in zwei Unter-Arbeitskreisen (UAK), die von den Co-Autoren dieses Beitrags geleitet werden.

Abbildung 2.1: AK-Sitzung im Januar 2020 bei Fa. Herrenknecht in Schwanau

Die konstituierende Sitzung fand im August 2019 statt, Folgesitzungen wurden im Januar 2020, April

2021 (Corona-bedingt online), September 2022 und Mai 2023 abgehalten. Die bis dato vorliegenden fachlichen Inhalte wurden ganz überwiegend von einzelnen AK-Mitgliedern und in zahlreichen online-Sitzungen der beiden UAK „Verschleiß“ und „Verklebung“ erarbeitet.

3 Geplante Empfehlungen

Der Arbeitskreis soll praxistaugliche Hilfestellungen erarbeiten, die eine realitätsnahe Einschätzung von Verschleiß und Verklebung ermöglichen. Auch wenn die Auswirkungen im (maschinellen) Tunnelbau am häufigsten und ausgeprägtesten zu beobachten sind, werden dabei auch Aspekte des Spezialtiefbaus und Erdbaus sowie ggf. auch der Bohrtechnik und anderer Disziplinen, in denen Verschleiß und/oder Verklebungen eine Rolle spielen können, betrachtet.
Wesentliche Inhalte werden Empfehlungen für eine anwendungsspezifische Proben- und Versuchsauswahl, Hilfestellungen zur Interpretation der Versuchsergebnisse sowie Vorgaben für Mindestanforderungen an die Baugrundbeschreibung sein. Die Empfehlungen sollen sich an alle Projektbeteiligten richten, an Bauherren und Ausschreibende ebenso wie an Gutachter und Planer bis hin zu den Bauausführenden und Zulieferern.
Ob der gesamte -sehr umfangreiche- Problembereich letztlich in einer einzigen Empfehlung oder eventuell in mehreren Dokumenten behandelt wird, ist derzeit noch offen. Die aktuell vorliegenden Textentwürfe der beiden Themenbereiche „Verschleiß“ und „Verklebung“ sind inhaltlich ähnlich strukturiert und gliedern sich nach dem folgenden Muster:

- Ausprägungen von Verschleiß bzw. Verklebungen,
- Theoretische Grundlagen,
- Baugrundeigenschaften mit Einfluss auf das Verschleiß- bzw. Verklebungspotenzial,
- Abbau- und Umwandlungsprozesse bei der Entstehung von Verklebungen,
- Indexversuche zur Abschätzung der Abrasivität bzw. des Verklebungspotenzials,
- Modellversuche zur Untersuchung des Verschleiß- und/oder Verklebungsverhaltens,
- Empfehlungen zur Versuchsauswahl,
- Klassifizierung der Abrasivität bzw. des Verklebungspotenzials,
- Verschleiß- bzw. Verklebungsprognose,
- Modifizierung des Verklebungspotenzials,
- Dokumentation sowie
- Ausblick und Forschungsbedarf.

Die Art der späteren Veröffentlichung der Empfehlung(en) ist noch nicht festgelegt, die Mitglieder des AK präferieren aber definitiv eine digitale und frei zugängliche Variante.

4 Ausgewählte Aspekte

Im Folgenden werden einige ausgewählte Aspekte aus den beiden Themenkomplexen „Verschleiß“ und „Verklebung“ vorgestellt. Grundsätzlich ist dabei zu berücksichtigen, wie komplex das Zusammenwirken der verschiedenen Einflüsse im (tribologischen) System ist. Für eine möglichst realitätsnahe Betrachtung und daraus abzuleitende Handlungsempfehlungen müssen demzufolge *immer* mehrere Faktoren betrachtet werden - dies gilt gleichermaßen für Verschleiß wie auch Verklebungen, sowohl einzeln als auch im Zusammenwirken.

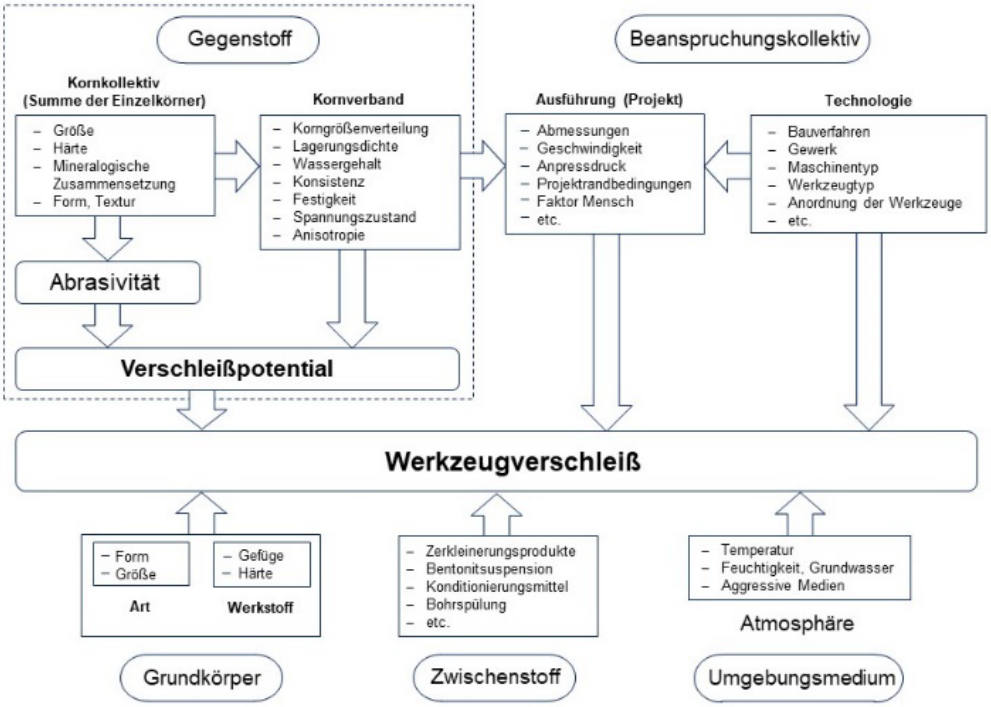

Abbildung 4.1: Unterscheidung von Abrasivität und Verschleißpotential sowie Einflussfaktoren auf den Werkzeugverschleiß im Spezialtief- und Tunnelbau (modifiziert nach Heinrich, 1995)

4.1 Verschleiß

Zur Einführung in den Themenkomplex Verschleiß werden zunächst typische Ausprägungen von Werkzeugverschleiß vorgestellt. Zwei Beispiele sind in Abbildung 4.2 zu sehen.

Abbildung 4.2: Verschleiß an einem Stufenmeißel in hoch abrasivem Moselschotter (links), Verschleiß an Schneidrollen (rechts, Bild: Wayss & Freytag)

Weiterhin werden die wesentlichen tribologischen Grundlagen erläutert, die zum Verständnis der Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen, den Verschleiß beeinflussenden Größen relevant sind (s. auch *Abbildung 4.1*). Unter „Abrasivität“ wird im Lockergestein die Summe der verschleißerzeugenden Faktoren des Einzelkorns bzw. des Kornkollektivs verstanden. Die Abrasivität wird anhand von Indexversuchen bestimmt. Zur Einschätzung des Verschleißpotentials müssen zusätzlich noch die Eigenschaften des Kornverbands berücksichtigt werden.

4.1.1 Baugrundeigenschaften

Maßgebende Eigenschaften des in situ-Lockergesteins mit Einfluss auf das Verschleißpotential sind insbesondere

- die mineralogische Zusammensetzung (Äquivalenter Quarzgehalt ÄQu),
- die Korngrößenverteilung,
- die Kornform und der Kornrundungsgrad,
- der Wassergehalt,
- die Konsistenz,
- die Lagerungsdichte,
- die Scherfestigkeit sowie
- die Kornbindungsverhältnisse.

Einzelne Baugrundeigenschaften können auch jetzt schon Regelwerk-konform bestimmt und ggf. im Hinblick auf die Abrasivität klassifiziert werden, wie z.B. die mineralogische Zusammensetzung (ÄQu) sowie die Kornform und -rundung und deren Einflüsse auf die Abrasivität nach Empfehlung Nr. 25 des AK 3.3 der DGGT (Plinninger et al., 2021). Eine umfassende Bewertung des Verschleißpotentials ist jedoch nur im Gesamtkontext aller genannten maßgebenden Lockergesteinseigenschaften möglich. Es kann vereinfachend davon ausgegangen werden, dass bei sonst gleichen Randbedingungen bei Indexversuchen im Labor die Abrasivität des Bodens mit größer werdendem Korndurchmesser, steigendem ÄQu und zunehmendem Anteil an Körnern mit eckiger Kornform zunimmt. Der Wassergehalt hat ebenfalls einen großen Einfluss und kann den Verschleiß sowohl positiv als auch negativ beeinflussen.
Eine genaue Quantifizierung der jeweiligen Auswirkung einzelner Faktoren auf das Verschleißpotential ist nur mit einem sehr hohen Versuchsaufwand und spezieller Fachkenntnis möglich. Auf diesem Gebiet ist weitere Grundlagenforschung notwendig.
Darüber hinaus kann die Struktur eines gewachsenen Bodens (der „Kornverband“) mit Laborversuchen grundsätzlich nicht hinreichend genau erfasst werden. Dies gilt auch für Struktureigenschaften mit Auswirkungen auf die Abrasivität, wie z.B. Schichtungen, Inhomogenitäten oder den in situ-Spannungszustand. Die geologisch-geotechnische Baugrundbeschreibung ist daher unbedingt in die Gesamtbetrachtung des Verschleißpotentials einzubeziehen.

4.1.2 Indexversuche zur Bestimmung der Abrasivität

Voraussichtlich werden die im Folgenden genannten bereits existierenden und in unterschiedlicher Verbreitung in der Baupraxis eingesetzten Indexversuche -z.T. mit ergänzenden Festlegungen- zur Bewertung der Abrasivität von Lockergesteinen empfohlen:

- der LCPC-Versuch (nach DGGT Empfehlung Nr. 24 (Käsling et al, 2022) mit Ergänzungen, s.u.),
- der CERCHAR-Versuch (nach DGGT Empfehlung Nr. 23 (Käsling et al, 2016) mit Ergänzungen, s.u.),
- das Wiener Abrasimeter (nach ÖBV-Merkblatt, 2013, aktuell in Überarbeitung) und
- der NTNU Soil Abrasion Test (SAT) (nach Nilsen et al., 2007).

Die genannten Indexversuche weisen z.T. sehr enge Anwendungsgrenzen hinsichtlich der für die Versuchsdurchführung geeigneten Korngrößenbereiche auf. Für eine umfassende Bewertung der Abrasivität von (weitgestuften) Böden sind daher i.d.R. verschiedene Versuche zu kombinieren.

4.1.3 LCPC-Versuch

Dass der LCPC-Versuch in seiner ursprünglichen Form nur sehr eingeschränkt zur Ermittlung der Abrasivität von natürlich anstehendem Lockergestein dienen kann, ist hinlänglich bekannt (Drucker, 2013; Feinendegen & Ziegler, 2018). Im Rahmen der geplanten Empfehlung sind deshalb einige ergänzende Festlegungen vorgesehen:

<u>Ausgangsmaterial</u>
Der LCPC-Versuch eignet sich bei Anwendung im Lockergestein für grobkörnige Böden mit dem Hauptanteil Kies gemäß DIN EN ISO 14688-1. Feinkörnige

Böden, grobkörnige Böden mit Hauptanteil Sand sowie sehr grobkörnige Böden eignen sich nicht für eine Untersuchung mit dem LCPC-Versuch.

Versuchsprobe
Der LCPC-Versuch kann trotz seiner Einschränkungen auch für Lockergesteine in einem bestimmten Korngrößenbereich (grobkörnige Böden mit dem Hauptanteil Kies gemäß DIN EN ISO 14688-1) sinnvoll angewendet werden. Im Rahmen der in Vorbereitung befindlichen Empfehlung wird die Versuchskorngröße dabei auf die Teilfraktion 2 bis 8mm der Ausgangsprobe festgelegt. Dies stellt im Vergleich zur bisherigen Anwendung (4 - 6,3mm) eine Erweiterung des untersuchten Korngrößenbereichs um je eine Siebstufe nach oben und unten dar. Die geometrischen Randbedingungen des Versuchs können dabei noch als vergleichbar angesehen werden. Die 500g Versuchsprobe werden unverändert (ohne Brechen!) und entsprechend ihrer Massenanteile an der Ausgangsprobe durch Nasssiebung und anschließende Trocknung gewonnen.

Ringversuch
Es ist geplant, einen Ringversuch zur generellen Validierung des LCPC-Versuchs gemäß DGGT-Empfehlung Nr. 24 durchzuführen. In diesem Zusammenhang soll dann auch die vorgeschlagene Erweiterung des Korngrößenbereichs für die Anwendung im Lockergestein getestet und bewertet werden. Alle Institutionen, die LCPC-Versuche durchführen, sind aufgefordert, sich an diesem Ringversuch zu beteiligen!

4.1.4 CERCHAR-Versuch

Der CERCHAR-Versuch wird weltweit zur Beurteilung der Abrasivität von Festgestein eingesetzt; die Ergebnisse fließen in fast alle Prognosemodelle für den Werkzeugverschleiß bei Hartgesteins-TBM ein (Stopp & Feinendegen, 2023). Für die Anwendung im Lockergestein sind im Rahmen der geplanten Empfehlungen einige ergänzende Festlegungen vorgesehen:

Ausgangsmaterial
Im Lockergestein wird der CERCHAR-Versuch eingesetzt, um größere Komponenten (Grobkies, Steine oder Blöcke) auf ihre Abrasivität zu untersuchen. Die Auswahl von repräsentativen Versuchsproben hat unter Beachtung der petrographischen Zusammensetzung des Ausgangsmaterials durch einen geotechnischen Sachverständigen zu erfolgen.

Versuchsprobe
Im Lockergestein ist der CERCHAR-Versuch an der natürlichen Kornoberfläche durchzuführen. Der Mindest-Korndurchmesser ist abhängig von der Kornform und muss fünf Prüfstrecken von jeweils 10mm Länge ermöglichen. Die Mindestabstände der Prüfstrecken nach DGGT-Empfehlung Nr. 23 von 5mm in alle Richtungen sind zu beachten.

4.2 Verklebung

Zur Einführung in den Themenkomplex Verklebung werden auch hier zunächst typische Ausprägungen vorgestellt. Zwei Beispiele sind in Abbildung 4.3 zu sehen.

Abbildung 4.3: „verbackener“ Meißelkasten (links) und verstopfte Bandübergabe (rechts, Bild: Weh) am Katzenbergtunnel

Weiterhin werden umfangreiche Erläuterungen zu den vor allem beim maschinellen Tunnelbau unvermeidbaren Abbau- und Umwandlungsprozessen gegeben. Die verschiedenen Bauverfahren und die unterschiedlichen Verfahrensparameter (Penetration, Zugabe von Additiven, etc.) können zu starken Veränderungen der Materialeigenschaften führen, die wiederum unterschiedliche Ausprägungen der Verklebung zur Folge haben. Das aus den Eigenschaften des in situ-Lockergesteins abgeleitete Verklebungspotential stellt somit nicht unbedingt einen direkten Zusammenhang mit dem Auftreten von Verklebungsphänomen her. Eine alleinige Bestimmung der Baugrundeigenschaften ist daher nicht ausreichend.

4.2.1 Baugrundeigenschaften

Maßgebende Eigenschaften des in situ-Lockergesteins mit Einfluss auf das Verklebungspotenzial sind insbesondere:

- die mineralogische Zusammensetzung,
- die Korngrößenverteilung,
- die Zustandsgrenzen bzw. die Plastizität,
- der Wassergehalt,
- die Konsistenz und
- die Kohäsion.

Die bisherigen Klassifikationen für das Verklebungspotenzial (Thewes, 1999; Hollmann & Thewes, 2011; Hollmann, 2015) basieren alleine auf Plastizität und Konsistenz des Bodens. Sie beschreiben das Verklebungspotential des unveränderten bzw. mit Wasser angereicherten Bodens, nicht jedoch weitere bauverfahrensbedingte Veränderungen, wie Eintrag von mechanischer Energie, Zugabe von Additiven und Veränderungen von Temperatur und Druck.

4.2.2 Indexversuche zur Bestimmung des Verklebungspotentials

Die im Folgenden genannten Indexversuche werden in unterschiedlicher Verbreitung in der Baupraxis zur Bewertung des -teilweise durch Additive veränderten- Verklebungspotentials von Lockergesteinen eingesetzt:

- der Stempel-Adhäsionsversuch (Budach et al, 2019),
- der Konuszugversuch (Feinendegen & Spagnoli, 2021; InProTunnel, 2012) und
- der ATUR-Test (de Oliveira, 2018).

In Abhängigkeit der auszuführenden Bauverfahren werden die jeweiligen Versuche und deren Einsatzmöglichkeit beschrieben.

4.3 Weitere Aspekte

Im Folgenden werden einige weitere Inhalte der geplanten Empfehlungen kurz angerissen.

4.3.1 Klassifikation und Prognose

Im Hinblick auf die Festlegung von Homogenbereichen wird angestrebt, möglichst konsistente Klassifikationen für das Verschleiß- bzw. Verklebungspotenzial -ggf. auch aus der Kombination verschiedener Faktoren bzw. Versuchsergebnisse- festzulegen. Im Hinblick auf die Prognose ist vorgesehen, Hinweise auf existierende Methoden aufzunehmen. Dezidierte Prognosemodelle z.B. für einzelne Werkzeuge in bestimmten Bodenarten würden den aktuellen Bearbeitungsrahmen allerdings sprengen. Dies kann evtl. in späteren Empfehlungen behandelt werden.

4.3.2 Versuchsauswahl und Mindestanforderungen an die Baugrundbeschreibung

Die erläuterten Versuche sollen im Hinblick auf ihre jeweilige Eignung (Haupteinsatzgebiet, eingeschränkt geeignet, nicht geeignet bzw. nicht empfohlen) für verschiedene typische Baugrundverhältnisse bewertet werden. Ausgehend von der Gesamtheit der verfügbaren Verfahren sollen Mindestanforderungen an die Baugrunderkundung für verschiedene Bautätigkeiten formuliert werden.

4.3.3 Dokumentation

Im Hinblick auf Bauvertrag und Abrechnung kommt der sorgfältigen Dokumentation von auftretenden Verschleiß- und/oder Verklebungsproblemen eine wichtige Rolle zu. Hierzu sollen -basierend auf erfolgreichen Praxiserfahrungen- Empfehlungen formuliert werden.

4.3.4 Modellversuche

In den vergangenen Jahren sind -überwiegend im Rahmen von Forschungsvorhaben- verschiedene Modellversuche zur wissenschaftlichen Untersuchung von Verschleiß- und/oder Verklebungsphänomenen entwickelt worden. Trotz der z.T. sehr limitierten Verbreitung werden in den zukünftigen Empfehlungen einige bekannte Versuchsgeräte und -verfahren aufgeführt, die bei speziellen baupraktischen Fragestellungen oder auch in Streitfällen ggf. weiterführende Erkenntnisse liefern können:

- der Clogg TS (InProTunnel, 2012),
- das RUB Tunnelling Device (Küpferle et al., 2016),
- der SGAT Soft Ground Abrasion Tester (Jakobsen et al., 2013)sowie
- das TUHH Modellschneidrad (Milatz et al., 2019).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem vorliegenden Beitrag wird ein Einblick in die bisherige Arbeit des AK 1.11 „Verschleiß und Verklebung im Lockergestein“ der DGGT gegeben und es werden erste inhaltliche Aspekte der geplanten Empfehlung(en) vorgestellt. Eine umfassende Beschreibung des sehr komplexen Zusammenwirkens zahlreicher Einflussfaktoren, sowohl aus dem Baugrund als auch aus der Bau- und Maschinentechnik, stellt dabei eine große Herausforderung dar. Da mit einigen der bislang verfügbaren Versuchs- und Bewertungsmethoden noch keine (langjährigen) Erfahrungen vorliegen, können im Hinblick auf die jeweiligen Anwendungsgrenzen zunächst auch nur Hinweise gegeben werden. Die Arbeit an den Empfehlungen geht in zweimonatigen UAK- und halbjährlichen AK-Sitzungen weiter. Wann und in welcher Form ein erster Entwurf veröffentlicht wird, ist derzeit noch offen.
Tatkräftige und aktive Mitarbeit von Fachleuten aus den unterschiedlichen Fachgebieten ist im AK jederzeit herzlich willkommen - wie auch die Beteiligung an dem geplanten LCPC-Ringversuch!

Literaturverzeichnis

Budach, C.; Placzek, D.; Kleen, E. (2019): *Quantitative Bestimmung des Verklebungspotenzials feinkörniger Böden auf Basis von Adhäsionsspannung: Aktuelle Untersuchungen und neue Erkenntnisse.* geotechnik (42), S. 2-10.

Drucker, P. (2013): *Über die Abrasivität von Lockergestein und den Werkzeugverschleiß im Spezialtiefbau.* Dissertation, TU Wien.

Heinrich, R. (1995): *Untersuchungen zur Abrasivität von Böden als verschleißbestimmender Kennwert.* Dissertation, TU Freiberg.

Feinendegen, M.; Ziegler, M. (2018): *Zur Aussagekraft des LCPC-Versuchs für die Festlegung von Homogenbereichen.* Geomechanics and Tunnelling (11), S. 113-122.
Feinendegen, M.; Spagnoli, G. (2021): *Erkenntnisse aus zehn Jahren Verklebungsbewertung mit dem Konuszugversuch: Versuchsdurchführung, Aufbereitung der Proben, maßgebende Bewertungsfaktoren.* In: STUVA-Tagung 2021, Karlsruhe. S. 194-202.
Hollmann, F.; Thewes, M. (2011): *Bewertung der Neigung zur Ausbildung von Verklebungen und zum Anfall von gelöstem Feinkorn bei Schildvortrieben im Lockergestein.* In: 18. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum für junge Ingenieurgeologen 2011, Berlin. S. 237-244.
Hollmann, F. (2015): *Bewertung von Boden und Fels auf Verklebungen und Feinkornfreisetzung beim maschinellen Tunnelvortrieb.* Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Shaker Verlag.
InProTunnel (2012): *Schlussberichte zu BMBF Förderkennzeichen 03G0713 InProTunnel - Grenzflächenprozesse zwischen Mineral- und Werkzeugoberflächen - Ursachen, Probleme und Lösungsansätze am Beispiel des maschinellen Tunnelbaus im Rahmen des BMBF-Sonderprogramms GEOTECHNOLOGIEN Förderrichtlinie „Mineraloberflächen - Von atomaren Prozessen zur Geotechnik“.*
Jakobsen, P. D.; Langmaack, L.; Dahl, F.; Breivik, T. (2013): *Development of the Soft Ground Abrasion Tester (SGAT) to predict TBM tool wear, torque and thrust.* Tunnelling and Underground Space Technology (38), S. 398-408.
Käsling, H.; Plinninger, R. (2016): *Bestimmung der Abrasivität von Gesteinen mit dem CERCHAR-Versuch - Empfehlung Nr. 23 des Arbeitskreises 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.*. Bautechnik (93), S. 409-415.
Käsling, H.; Düllmann, J.; Plinninger, R.J. (2022): *Bestimmung der Abrasivität von Festgesteinen mit dem LCPC-Versuch - Empfehlung Nr. 24 des Arbeitskreises 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.*. geotechnik (45), S. 117-121.
Küpferle, J.; Röttger, A.; Theisen, W.; Alber, M. (2016): *The RUB Tunneling Device - A newly developed test method to analyze and determine the wear of excavation tools in soils.* Tunnelling and Underground Space Technology (59), S. 1-6.
Milatz, M.; Grabe, J.; Delle, M. (2019): *Bewertung von Verklebungen und Werkzeugverschleiß im Lockergestein anhand von Modellversuchen.* geotechnik (45), S. 59-75.
Nilsen, B.; Dahl, F.; Holzhäuser, J.; Raleigh, P. (2007): *New Test Methodology for Estimating the Abrasiveness of Soils for TBM Tunneling.* In: RETC, S. 104-116.
de Oliveira, D. (2018): *EPB Excavation and conditioning of cohesive mixed soils: clogging and flow evaluation.* Dissertation, Queens's University.
Österreichische Bautechnik Vereinigung (2013): *Merkblatt Abrasivitätsbestimmung von grobkörnigem Lockergestein.* Hg. v. ÖBV. Wien.
Plinninger, R.J.; Käsling, H.; Popp, T. (2021): *Bestimmung der Abrasivität von Gesteinen mit mineralogisch-petrographischen Verfahren - Empfehlung Nr. 25 des Arbeitskreises 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V.*. geotechnik (44), S. 123-135.
Stopp, A,; Feinendegen, M. (2023): *State of the Art der Verschleißprognose im maschinellen Tunnelbau.* Geomechanics and Tunnelling (accepted).
Thewes, M. (1999): *Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden.* Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Shaker Verlag.

Feinendegen, M., Babendererde, T., Drucker, P., Holzhäuser, J., Langmaack, L., Richter, A. (2023):
Empfehlung(en) „Verschleiß und Verklebung im Lockergestein“ - ein erster Ausblick. In: Fachsektionstage Geotechnik 2023 in Würzburg, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, S. 268-273