

# Verklebungen in der EPB-Praxis: Auftreten, Einflüsse und Quantifizierung

## Clogging in EPB Tunneling: Occurrence, Causes and Quantification

Tomás M. Fernández-Steeger<sup>1</sup>, Martin Feinendegen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dr. Tomás M. Fernández-Steeger, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, RWTH Aachen University, fernandez-steeger@lih.rwth-aachen.de

<sup>2</sup> AOR Dipl.-Ing. Martin Feinendegen, Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen und Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau, RWTH Aachen University, feinendegen@geotechnik.rwth-aachen.de

### Zusammenfassung

Beim maschinellen Tunnelbau kann es beim Durchdringen bindiger Böden oder veränderlich fester Gesteine -insbesondere auch beim Zutritt von Wasser- zu einer Adhäsion bzw. Verklebung des Ausbruchmaterials am Schneidrad oder in den Fördereinrichtungen kommen, die zu weit reichenden Behinderungen im Bauablauf führen kann. In dem Verbundprojekt „InProTunnel“ wurde das Problem der Verklebungen beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Erddruck(EPB-)schilden auf verschiedenen Skalen untersucht. Um den Einfluss verschiedener geologischer und geotechnischer Parameter auf die Verklebungsneigung untersuchen zu können, wurde der Konuszugversuch für die Quantifizierung des Verklebungspotentials entwickelt. Die Ergebnisse lassen sich dabei auch in Beziehung zu bestehenden Klassifikationsschemata setzen. In den Untersuchungen an natürlichen und künstlichen Böden hat sich gezeigt, dass neben der Plastizität und den Scherparametern auch die Mineralogie und die Korngrößenverteilung eine wichtige Rolle spielen.

**Schlüsselworte:** Verklebung, Ton, TBM, EPB, Konuszugversuch, Mineralogie, Kornverteilung, Plastizität

### Abstract

During mechanical tunnel driving in plastic soils or soft rock the excavated material may stick to the cutting tools or conveying system causing clogging, especially if water influx occurs. This causes delays in the progress and costly additional counter measures. In the course of the joint project “InProTunnel” (Interfacial Processes between Mineral and Tool Surfaces - Causes, Problems and Solutions in Mechanical Tunnel driving) the problem of clogging is faced on different scales for Earth Pressure Balanced (EPB) shields. To investigate the impact of geological and geotechnical parameters on the clogging potential a new quantitative test, the so called cone pull-out test has been developed and evaluated. The results are in accordance with existing classification schemes. Applying the cone pull-out test to different natural soils and artificial soil mixtures it can be shown, that apart from plasticity and shear parameters also mineralogy and grain size distribution of the soils are the most important influences on the clogging potential. The results show that the largest adherences could be observed for soils with a clay content between 28 and 58%, a sand content < 10% and a well sorted silt fraction. From high smectite contents (> 40 %) usually high clogging results, whereas at high contents of quartz (> 40 %) no clogging occurs. Apart from smectitic soils also soils with high kaolinite/illite content may produce intensive clogging, even though the adherence to tool surfaces seems not to be as strong. In the laboratory tests consistencies between  $I_c = 0,4 - 0,6$  turned out to be most problematic, while on site intensive clogging is observed at slightly higher consistencies. Finally soils with a high plasticity lead to higher adherences, provided there are no other criteria to the contrary.

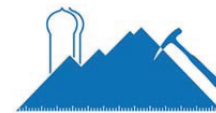
**Keywords:** Clogging, clay, TBM, EPB, cone-pull-out test, mineralogy, grain size distribution, plasticity

## 1 Einleitung

Aus dem modernen Tunnelbau ist der maschinelle Tunnelvortrieb nicht mehr weg zu denken, wobei sich die Anwendungsgrenzen stetig erweitern. Häufig werden beim Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen (TBM) bindige Böden oder Gebirgsformationen mit wechselnden Festigkeitseigenschaften durchfahren. Beim Ausbruch und Transport des Materials kommt es durch die mechanische Beanspruchung zu einer Entfestigung, die bis zur völligen Desintegration führen kann. Dies ist unter Umständen sogar erforderlich, wenn z.B. die Verbreitung des abgebauten Materials bei

einem Erddruckschild (EPB-Schild) den Vortrieb und die Förderung des Ausbruchmaterials überhaupt erst ermöglicht. In vielen Fällen kommt es aber -insbesondere auch beim Zutritt von (Gebirgs-)Wasser- zu einer Adhäsion bzw. Verklebung des Ausbruchmaterials am Schneidrad (Abb. 1) oder in den Fördereinrichtungen, die zu weit reichenden Behinderungen im Bauablauf führen kann.

Auch in DAUB (2010) wird das Problem beschrieben; dort heißt es: „Insbesondere Verklebungen in der Abbaukammer und hoher Verschleiß der Abbauwerkzeuge sind die häufigsten Ursachen für einen geringeren Baufortschritt und



höhere Kosten.“ Die daraus resultierenden Verzögerungen im Bauablauf verursachen kostenintensive Zusatzmaßnahmen (Reinigungsarbeiten, Konditionierung des Ausbruchmaterials etc.) und nicht selten jahrelange Auseinandersetzungen zwischen Auftraggebern und ausführenden Firmen. Sie stellen somit häufig für beide Seiten kaum zu kalkulierende Risiken dar und verursachen einen großen volkswirtschaftlichen Schaden.



Abb. 1: Verklebter Meißelkasten einer EPB-TBM.

Fig. 1: Clogging in the roller bit box of an EPB-TBM.

In dem Verbundprojekt InProTunnel wurde von drei Instituten der RWTH Aachen gemeinsam mit den Firmen Herrenknecht AG, Ed. Züblin AG, Marti Tunnelbau AG und Condat Lubrifiants das Problem der Verklebungen beim EPB-Vortrieb auf verschiedenen Skalen von der mikroskopischen Ebene bis hin zur Tunnelbohrmaschine im realen Maßstab untersucht (AZZAM et al. 2012). Im Folgenden werden die durchgeführten Untersuchungen an verschiedenen Böden kurz vorgestellt und wesentliche daraus abgeleitete geologische und mineralogische Einflüsse auf das Verklebungsverhalten vorgestellt.

## 2 Verklebungen

Grundsätzlich ist das Auftreten von Adhäsion und den eventuell daraus resultierenden Verklebungen von zahlreichen Faktoren abhängig (THEWES 1999, BURBAUM 2009, HOLLMANN & THEWES 2011a, HOLLMANN & THEWES 2011b). Die Adhäsion selbst wird durch van-der-Waals-Kräfte, elektrostatische Kräfte, Kapillarkräfte und Saugspannungen kontrolliert. Im Boden werden diese Kräfte in unterschiedlicher Weise beim Aufeinandertreffen von Tonmineralen und Porenfluid (Wasser) aktiviert. Darüber hinaus sind insbesondere auch die mechanischen Wirkmechanismen Belastungsart (Scher-, Druck-, Zug- oder kombinierte Beanspruchung) und Belastungsrichtung (normal, tangential) sowie das Verhältnis zwischen Adhäsionsspannung und Bodenwiderständen von Bedeutung (FEINENDEGEN et al. 2010). Insbesondere der letzte Faktor ist abhängig von der Plastizität und Konsistenz des Ausbruchmaterials.

In der komplexen Geometrie einer Tunnelvortriebsmaschine mit sehr unterschiedlichen Beanspruchungen des gelösten Materials wird die Intensität der Anhaftung und damit Ver-

klebung aber immer von einer Kombination dieser Faktoren bestimmt. Ob es zu Anhaftungen kommt oder nicht, hängt entscheidend davon ab, ob bei Relativverschiebungen zwischen Werkzeugoberfläche und Boden das Versagen in der Grenzfläche auftritt oder im Boden selbst. Der bestimmende Faktor hierfür ist das Verhältnis der Adhäsionsspannungen zu den Widerständen im Boden. Ist die Verbundspannung größer als -je nach Beanspruchung- die Kohäsion oder die Zugfestigkeit des Bodens, so tritt das Versagen im Boden selbst auf und Anhaftungen sind die Folge. Sind hingegen die Widerstände im Boden größer, tritt das Versagen in der Grenzfläche ein und es kommt zu keinen Anhaftungen.

Bei den Prozessen, die zu Verklebungen bei einem EPB-Vortrieb führen können, ist zwischen primären und sekundären Ursachen zu unterscheiden (WEH et al. 2009a, WEH et al. 2009b, FEINENDEGEN et al. 2011, FEINENDEGEN et al. 2012). Zu den primären Ursachen gehören die geotechnischen Verhältnisse, insbesondere die Zusammensetzung des Baugrunds (Art und Anteil an Tonmineralen, Plastizität, Kornverteilung etc.), die Zerfallsbeständigkeit des Ausbruchmaterials und der Wassergehalt des verklebungsfähigen Baugrunds bzw. die Verfügbarkeit von freiem Bergwasser (Abb. 2).

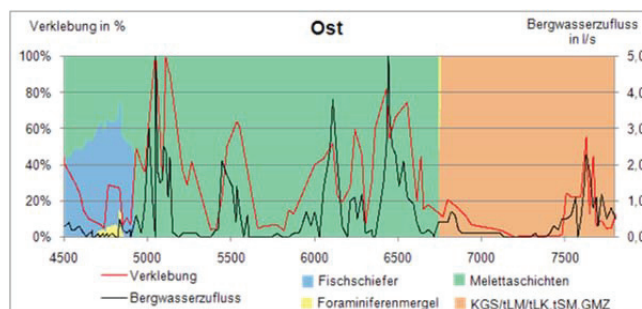


Abb. 2: Verklebungen und Bergwasserzutritt in unterschiedlichen Gebirgsformationen.

Fig. 2: Clogging and mountain water influx in different geological units.

Die sekundären Ursachen resultieren aus der Interaktion zwischen dem Baugrund und der verwendeten Abbautechnik. In dem beim Vortrieb gelösten Ausbruchmaterial variieren je nach der Abbaumethode und den oben genannten geotechnischen Verhältnissen vor allem die Konsistenz und die Kornverteilung, die beide einen entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung von Verklebungen haben. Anhaftungen können vor allem dann problematisch werden, wenn es durch sie zu Verengungen im Förderstrom kommt.

## 3 Durchgeführte Untersuchungen

Um den Einfluss der Mineralogie und des Wassergehalts zu bestimmen, wurden verschiedene Naturtone, von denen z.T. aus der Baupraxis das Verklebungsverhalten bekannt war, in umfangreichen Laborversuchen untersucht. Zusätzlich wurden, um die unterschiedlichen Effekte bzw. Manipulationsansätze besser interpretieren zu können, auch „reine“ Tone bzw. Mischungen daraus untersucht: ein Kaolinit aus Bayern, ein Illit aus Österreich, ein Na-Smektit aus Indien, ein Ca-Smektit aus Westdeutschland und ein natürlicher Ton mit einem hohen Kaolinitgehalt aus dem Westerwald.

Die Auswahl der Tone erfolgte unter dem Gesichtspunkt, dadurch die drei wichtigsten Gruppen von Tonmineralen abzudecken und deren spezifische Eigenschaften sowie mögliche Wechselwirkungen reproduzierbar untersuchen zu können. In mehreren Versuchsreihen wurde zudem Quarzmehl als inertes Material zugesetzt.

Für alle Naturtone und Mischböden wurden die geotechnischen Eigenschaften bestimmt. Zudem wurden die Einflüsse unterschiedlicher Porenfluide und Ladungen, mineralogischer Zusammensetzung sowie elektroosmotischer Manipulationen auf die geotechnischen Eigenschaften und das Verklebungsverhalten untersucht (SPAGNOLI et al. 2011a, SPAGNOLI et al. 2011b).

Wesentliche Ergebnisse liefert dabei der neu entwickelte Konuszugversuch (FEINENDEGEN et al. 2010), der eine Quantifizierung der Verklebung und damit eine Vergleichbarkeit des Verhaltens verschiedener Böden ermöglicht. Beim diesem Versuch (Abb. 3) wird der Boden sowohl Druck-, als auch Scher- und Zugbeanspruchungen mit unterschiedlichen Normal- und Tangentialanteilen ausgesetzt und erfährt somit qualitativ ähnliche Belastungen wie das Material in der Abbaukammer oder auf den Transportwegen einer TBM.

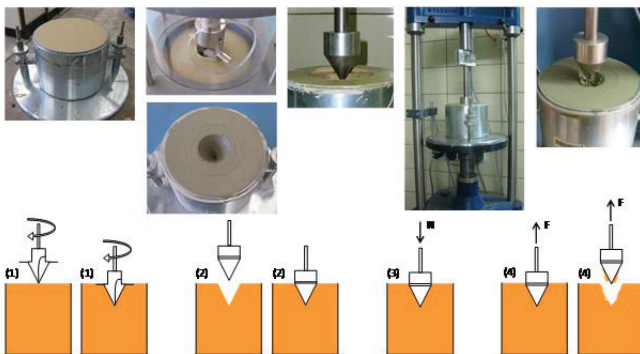


Abb. 3: Versuchsablauf beim Konuszugversuch.  
 Fig. 3: Test stages of the cone pull-out test.

Zunächst wird das Probenmaterial in der gewünschten Konsistenz aufbereitet, homogenisiert, 48 h zum Quellen gelagert und anschließend in drei Lagen in einen Standard-Proctortopf (Ø 150mm) eingebaut. Jede Lage wird entsprechend einem Versuch DIN 18127 - P 150 X mit dem großen Proctorhammer (4,5kg Fallgewicht bei 45cm Fallhöhe) mit jeweils 22 Schlägen verdichtet. Anschließend wird mit einem speziellen über einen Führungstopf gehaltenen und zentrierten Konusbohrer vorsichtig drehend eine kegelförmige Vertiefung hergestellt (Phase (1)). In diese Vertiefung wird dann der eigentliche Versuchskonus, ein polierter Edelstahlkonus mit einem Öffnungswinkel von 58°, eingestellt (Phase (2)). In der anschließenden Belastungsphase (Phase (3)) wird der Konus weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,23 mm/min kontrolliert über 10 Minuten in die Probe eingedrückt, bis er etwa 2 mm unter die Knickkante eingesunken ist. Nach der Belastungsphase wird der Konus kontrolliert wieder herausgezogen und dabei die Zugkraft und der Herausziehweg elektronisch aufgezeichnet (Phase (4)). Die Zugeschwindigkeit liegt mit 5,83 mm/min in ähnlicher Größenordnung wie bei den Trennversuchen

von Thewes (1999) und Burbaum (2009). Nach jedem Versuch wird die Menge des anhaftenden Bodens durch Wiegen ermittelt und auf die Konusmantelfläche bezogen. Dieser Wert wird im Folgenden als „Verklebung“ bezeichnet.

#### 4 Ergebnisse der Konuszugversuche

Die Ergebnisse der Konuszugversuche werden -zum Teil als Mittelwerte aus mindestens vier Einzelversuchen je Konsistenz- in Form der Verklebungen über der Konsistenz (Abb. 4 und Abb. 5), der Druck- und Zugspannungen über dem Weg, der maximalen Druck- und Zugspannung sowie der Druck- und Zugenergie über der Konsistenz ausgewertet.

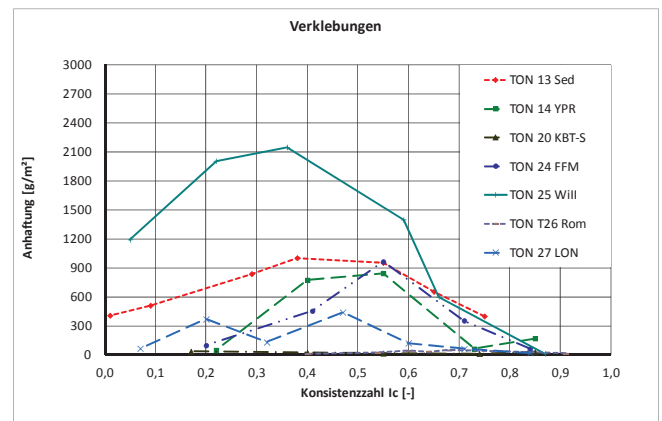


Abb. 4: Naturtone: Verklebungen über der Konsistenz.  
 Fig. 4: Natural clays: Adherences for different consistencies.

Die meisten Kurvenverläufe bei den Anhaftungen weisen (relativ) niedrige Werte bei hohen und niedrigen Konsistenzen und Maximalwerte im mittleren Konsistenzbereich auf. Die Maxima sind dabei gegenüber den Zugspannungen tendenziell leicht in Richtung niedrigerer Konsistenzen verschoben. Die Auswertung der Konuszugversuche belegt zudem den Zusammenhang zwischen den Anhaftungen und dem Verhältnis aus maximalen Zugspannungen und Zugenergie. Das bedeutet, dass bei einer Abnahme des Quotienten der maximalen Zugspannung zur Zugenergie im Allgemeinen die Verklebungen zunehmen (RANFT 2012).

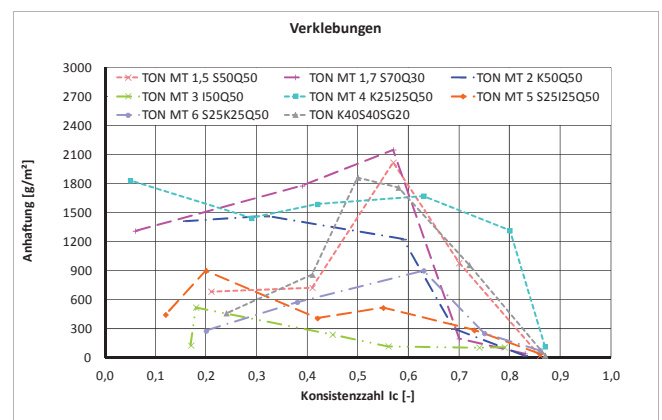
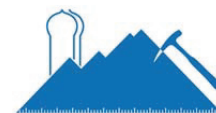


Abb. 5: Kunstböden: Verklebungen über der Konsistenz.  
 Fig. 5: Soil mixtures: Adherences for different consistencies.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Konuszugversuche einen Zusammenhang zwischen hohen Smektitgehalten und



großen Anhaftungen bzw. hohem Verklebungspotential. Es können aber auch bei kaolinitisch-illitischen Böden nennenswerte Verklebungen auftreten, die sich allerdings zu meist wesentlich leichter wieder vom Werkzeug lösen lassen. Dieses Verhalten lässt sich auch bei der Auswertung der Zugspannungen insbesondere bei steifer Konsistenz ablesen, die bei den smektitischen Böden deutlich höher ausfallen. Insgesamt liegen die Maxima der hohen Anhaftungen bei den meisten Versuchen im weichen Konsistenzbereich zwischen  $I_C = 0,4 - 0,6$  (s. Abb. 4 und Abb. 5). Dies erklärt auch, warum bei den meist hoch plastischen smektitischen Böden die Bekämpfung von Verklebungen aufwendiger ist. Bei diesen Böden führen nämlich größere Wassergehaltsänderungen nicht zu wesentlichen Änderungen der Konsistenz, so dass es schwer ist, den kritischen Konsistenzbereich zu verlassen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich weder aus der Plastizität, noch aus den verschiedenen betrachteten Scherparametern allein ein eindeutiger Zusammenhang mit den Anhaftungen ableiten lässt. Diese hängen immer auch von der Korngrößenverteilung und der Mineralogie ab.

### 5 Einfluss der Korngrößenverteilung

Im Zuge der Auswertung wurde versucht, einen Zusammenhang zwischen den Verklebungen beim Konuszugversuch und den Kornverteilungen der jeweiligen Böden zu finden. Dabei wird ersichtlich, dass nahezu alle Böden mit höheren Anhaftungen im mittleren Bereich der Kornverteilungsbänder liegen, also weder extrem hohe noch extrem niedrige Feinstkornanteile ( $d < 0,002\text{mm}$ ) besitzen und darüber hinaus eine mehr oder weniger gute Abstufung im Schluffbereich ( $0,002\text{mm} < d < 0,06\text{mm}$ ) aufweisen. Werden die reinen Tonböden außer Acht gelassen, so ergibt sich das in Abb. 6 eingetragene relativ eng begrenzte Band als relevanter Kornverteilungsbereich für die Böden mit hohem Verklebungspotential.

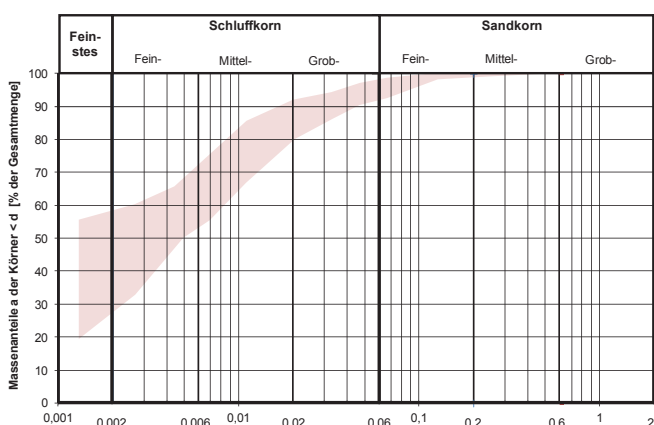


Abb. 6: Kornverteilungsbereich von Böden mit hohen Anhaftungen.

Fig. 6: Grain size distribution of soils with high clogging potential.

### 6 Einfluss der Mineralogie

In zahlreichen Versuchen konnte für unterschiedliche Mineralgemische (Mischböden) belegt werden, dass Wasserauf-

nahmevermögen, Fließgrenze, Plastizitätszahl (Abb. 7) und Aktivitätszahl mit der mineralogischen Zusammensetzung in einem Zusammenhang stehen und aus Dreiecksdiagrammen abgeschätzt werden können. Allerdings sind diese Zusammenhänge nicht immer linear, was auf elektrostatische Effekte zwischen den Tonpartikeln zurückzuführen ist.

Um die verschiedenen Einflüsse auf das Verklebungsverhalten mit den Versuchsergebnissen der Konuszugversuche zu vergleichen, empfiehlt sich eine getrennte Betrachtung von smektithaltigen und smektitarmen Böden. Bei den smektithaltigen Böden lassen sich die bekannten Zusammenhänge zwischen Anhaftungen und Plastizität, Wasseraufnahmevermögen, Fließgrenze oder Smektitgehalt wiederfinden. Bei den smektitarmen Proben, bei denen z.T. auch große Verklebungen auftreten, gelten diese Beziehungen nur zum Teil. So kann zwar die Fließgrenze in Zusammenhang mit der Verklebung gebracht werden, für das Wasseraufnahmevermögen und die Plastizität ist dies aber nicht möglich.

Auch für die ermittelten Flügelscherfestigkeiten können keine eindeutigen Zusammenhänge gefunden werden. Bei niedrigen Flügelscherfestigkeiten treten zwar i.d.R. höhere Verklebungen auf, dies gilt aber nicht immer.

Böden mit hohen inerten Bodenanteilen (Quarz)  $>40\%$  zeigen so gut wie keine Verklebungen.

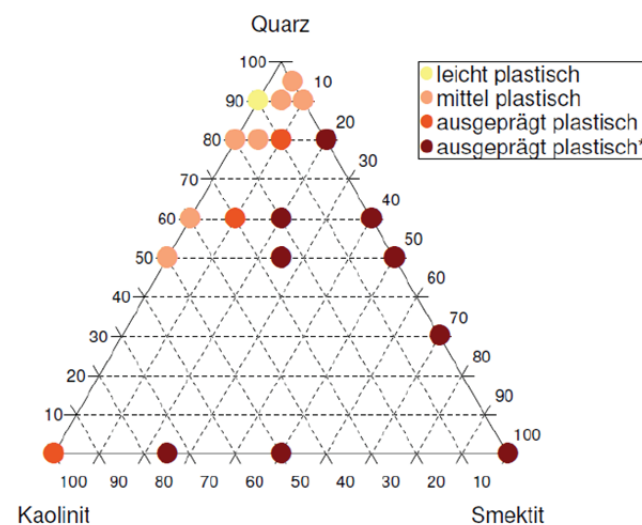


Abb. 7: Dreiecksdiagramm für Plastizitäten bei unterschiedlichen feinkörnigen Mineralgemischen (RANFT 2012).

Fig. 7: Ternary diagram of plasticity classes for different fine grained mineral mixtures (RAFT 2012).

Dieses Verhalten lässt sich am besten mit der Mikrostrukturausbildung im Kolloidsystem erklären. Durch die unterschiedlichen Ladungen der Tonpartikel kommt es zu Wechselwirkungen, die das Gefüge verändern und so zu einer Veränderung von Porenraum und Porengröße führen bzw. zu Aggregationen, die ebenfalls wieder auf die Porenraumverteilung Einfluss nehmen. Dies wirkt sich einerseits auf das Kapillarsystem der Porenfluide und andererseits direkt auf die Haftkräfte zwischen den Bodenaggregaten aus. Hier wird auch wieder der Zusammenhang mit der Kornverteilung der Versuchsböden mit großen Anhaftungen (Abb. 6) deutlich. Hohe Verklebungen treten meist bei feinkörnigen

Böden aus dem Schluffbereich auf, bei denen entsprechend große Oberflächen vorhanden sind und hohe Kapillarspannungen wirken. Dies steht auch im Einklang mit den Ergebnissen von BURBAUM (2009).

## 7 Klassifikationssysteme für Verklebungen

Bislang existieren drei Klassifikationssysteme zur Bewertung der Verklebungseigenschaften: Das von SCHLICK (1989) für die Beurteilung der Leistungsminderung beim maschinellen Erdbau, das von THEWES (1999) zur Bewertung des Verklebungspotenzials beim Hydroschildvortrieb und das modifizierte von HOLLMANN & THEWES (2011a) für den Vortrieb im offenen Modus bzw. deren Bewertungsschema für kritische Umwandlungen bei Wassergehaltsänderungen bei Erddruckschilden.

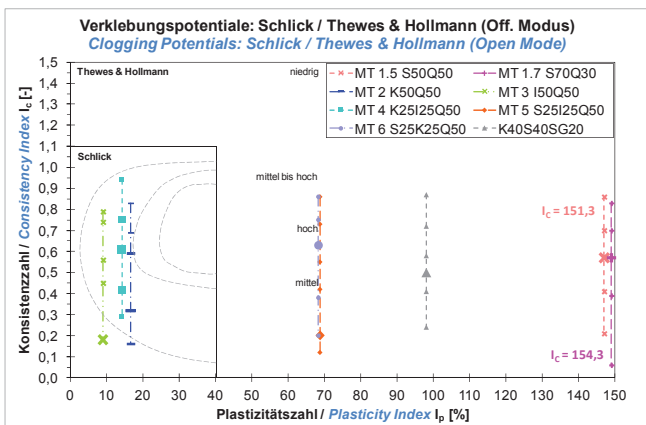


Abb. 8: Kunstböden: Konsistenzen bei den Konuszugversuchen im Diagramm nach Schlick (1989) und Hollmann & Thewes (2011a).

Fig. 8: Soil mixtures: Consistencies in the cone pull-out tests plotted in the diagram after Schlick (1989) and Hollmann & Thewes (2011a).

In Abb. 8 sind die Konsistenzen in den Konuszugversuchen an Kunstboden-Mischungen in die Klassifikationsdiagramme nach Schlick (1989) und Hollmann & Thewes (2011a) für den Vortrieb im offenen Modus eingetragen. Die Verklebungsmaxima sind dabei jeweils durch ein besonders großes Symbol dargestellt. Es fällt auf, dass diese beim Konuszugversuch gegenüber den anderen Klassifikations-schemata zum Teil in Richtung niedrigerer Konsistenzen verschoben sind. Dies deckt sich mit den Erfahrungen von SCHLICK (1989), der die Adhäsionsmaxima in seinen Laborversuchen ebenfalls bei niedrigeren Konsistenzen beobachtete, als in der Praxis.

In Abb. 9 sind die Ergebnisse der Konuszugversuche in dem neuen Bewertungsdiagramm von HOLLMANN & THEWES (2011a) dargestellt. Die hohen Anhaftungen vor allem im mittleren Konsistenzbereich sind auch hier wieder gut zu erkennen. Entsprechend ist mit starken bzw. schwachen Verklebungen zu rechnen. In diesem Zusammenhang fällt auf, dass nach dem Bewertungsdiagramm in Abb. 9 bei einer breiigen Konsistenz mit „schwachen“ Verklebungen zu rechnen ist, während im gleichen Fall das Verklebungspotenzial nach Abb. 8 für den Vortrieb im offenen Modus ohne Zutritt von Bergwasser als „mittel“ klassifiziert wird.

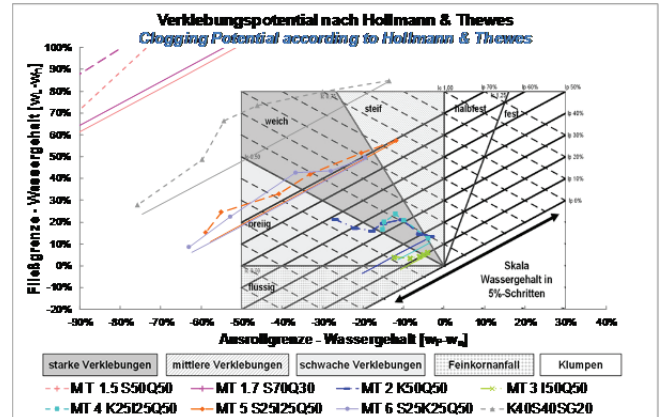


Abb. 9: Kunstböden: Verklebungen beim Konuszugversuch im Bewertungsdiagramm nach Hollmann & Thewes (2011a).

Fig. 9: Soil mixtures: Clogging from cone pull-out tests plotted in the classification scheme after Hollmann & Thewes (2011a).

Die Ergebnisse der Konuszugversuche lassen sich insgesamt in einen sinnvollen Zusammenhang mit den existierenden Klassifikationen bringen, liefern darüber hinaus aber noch weiter reichende Informationen.

Basierend auf den Ergebnissen der Konuszugversuche und Erfahrungen aus der Praxis des EPB-Vortriebs wird für eine praktische Anwendung das in Abb. 10 dargestellte neue Klassifikationschema für das Verklebungspotenzial bindiger Böden vorgeschlagen (AZZAM et al, 2012). Die in dem Diagramm eingetragenen Grenzen der Bereiche mit hohem, mittlerem und niedrigem Verklebungspotenzial bedürfen allerdings noch einer sorgfältigen Überprüfung durch die Tunnelbaupraxis.

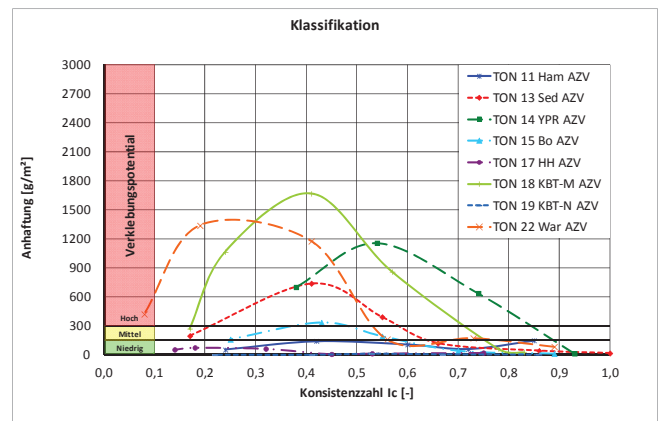
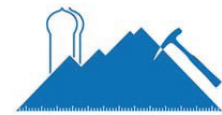


Abb. 10: Vorschlag für ein neues Bewertungsschema für das Verklebungspotenzial.

Fig. 10: Proposal of a new classification scheme for the clogging potential.

## 8 Zusammenfassung

Zusammenfassend lassen sich aus den zahlreichen im Rahmen des Projekts „InProTunnel“ durchgeführten Versuchs-serien einige wesentliche Einflussfaktoren für das Auftreten von Verklebungen bei natürlich anstehenden Böden ableiten:



- Die größten Anhaftungen wurden bei Böden mit Feinstkorngehalten ( $d < 0,002\text{mm}$ ) zwischen ca. 28% und 58%, einem Sandanteil ( $d < 0,06\text{mm}$ ) kleiner als 10% und einer guten Abstufung der Kornverteilung im Schluffbereich beobachtet.
- Böden mit hohem Quarzgehalt ( $> 40\%$ ) zeigen in der Regel kaum Anhaftungen.
- Hohe Smektitgehalte ( $> 40\%$ ) begünstigen in der Regel große Anhaftungen.
- Auch bei anderen (z.B. kaolinitisch/illitischen) Böden können große Anhaftungen auftreten, allerdings sind diese meist nicht so dauerhaft, wie bei den smektitischen Böden.
- Die größten Anhaftungen wurden bei den Konuszugversuchen im Konsistenzbereich  $I_C = 0,4 - 0,6$  beobachtet; in der Praxis treten sie meist bei etwas höheren Konsistenzen auf.
- Es empfiehlt sich, smektitische und smektitarme Böden getrennt zu betrachten.
- Böden mit hoher Plastizität zeigen häufig hohe Anhaftungen, sofern nicht eines der anderen genannten Kriterien dagegen spricht.

Letztlich zeigen die umfangreichen durchgeführten Untersuchungen aber auch, dass in einem so komplexen System wie der Interaktion bindiger Böden mit den Beanspruchungen einer Tunnelbohrmaschine keine Regel ohne Ausnahme ist. Das Phänomen der Verklebungen ist in seinen Ursachen und Auswirkungen derart vielschichtig, dass es schwer ist, eindeutige Kriterien für alle Anwendungsfälle zu formulieren, ohne am Ende entweder bei einem überkomplexen Regelschema oder bei sehr allgemeinen Aussagen ohne praktischen Bezug zu enden.

## Danksagung

Dieser Beitrag ist Publikation Nr. GEOTECH-2054 des BMBF/DFG-Sonderprogramms "GEOTECHNOLOGIEN", dessen finanzielle Unterstützung die Forschungen ermöglicht hat. Die Autoren bedanken sich bei den Projektpartnern für die wertvollen Beiträge.

## Literatur

- AZZAM, R., FEINENDEGEN, M., FERNÁNDEZ-STEGER, T., SPAGNOLI, G., STANJEK & H., ZIEGLER, M. (2012): InProTunnel: Grenzflächenprozesse zwischen Mineral- und Werkzeugoberflächen - Ursachen, Probleme und Lösungsansätze am Beispiel des maschinellen Tunnelbaus. – BMBF Schlussbericht Forschungsprojekt 03G0713A, S. 130, Aachen.
- BURBAUM, U. (2009): Adhäsion bindiger Böden an Werkstoffoberflächen von Tunnelvortriebsmaschinen. – Dissertation, Technische Universität Darmstadt, S. 207, Darmstadt.
- DAUB (2010): Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB), German Tunneling Committee (ITA-AITES).
- FEINENDEGEN, M., ZIEGLER, M., SPAGNOLI, G., AZZAM, R., FERNÁNDEZ-STEGER, T. (2010): Ein neues Verfahren zur Bewertung des Verklebungspotenzials beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Erddruckschilden. - 31. Baugrundtagung, München, 3. bis 6. November 2010, 103-110.
- FEINENDEGEN, M., ZIEGLER, M., WEH, M. & SPAGNOLI, G. (2011): Verklebungen beim EPB-Vortrieb: Einflüsse, Klassifikation und neue Manipulationsverfahren. – 8. STUVA-Tagung, Berlin 6. bis 8. Dezember 2011, 234 – 240.
- FEINENDEGEN, M., ZIEGLER, M., SPAGNOLI, G. & WEH, M. (2012): Maschinelles Tunnelvortrieb in veränderlich festen Gesteinen: Entfestigung und Verklebung. - Mining+geo, 5: 784 – 794.
- HOLLMANN, F.S. & THEWES, M. (2011a): Bewertung der Neigung zur Ausbildung von Verklebungen und zum Anfall von gelöstem Feinkorn bei Schildvortrieben im Lockergestein. – 18. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum für junge Ingenieurgeologen, Berlin 16.-19. März 2011, 237 – 244.
- HOLLMANN, F.S., THEWES, M. (2011b): Bewertung der Neigung zur Ausbildung von Verklebungen und zum Anfall von gelöstem Feinkorn bei Schildvortrieben im Festgestein. – 18. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum für junge Ingenieurgeologen, Berlin 16.-19. März 2011, 245-250.
- RANFT, U. (2012): Einfluß der mineralogischen Zusammensetzung verschiedener künstlicher Böden auf ausgesuchte geotechnische Kennwerte und auf Ihr Verklebungsverhalten. – unveröff. Diplomarbeit, RWTH Aachen, S. 106., Aachen.
- SCHLICK, G. (1989): Adhäsion im Boden-Werkzeug-System. – Veröffentlichungen des Instituts für Maschinenwesen im Baubetrieb, Reihe F / Heft 39, Karlsruhe.
- SPAGNOLI, G., FEINENDEGEN, M. & FERNANDEZ-STEGER, T. (2011a): Influence of Salt Solutions on the Undrained Shear Strength and the Clogging of Smectite-Quartz Mixtures. – Environmental and Engineering Geoscience, 17: 293 - 305.
- SPAGNOLI, G., KLITZSCH, N., FERNANDEZ-STEGER, T., FEINENDEGEN, M., REY, A., STANJEK, H. & AZZAM, R. (2011b): Application of Electro-Osmosis to Reduce the Adhesion of Clay during Mechanical Tunnel Driving. – Environmental & Engineering Geoscience, 17: 417 – 426.
- THEWES, M. (1999): Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden. – Dissertation, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Bericht Nr. 21, S. 194 Gesamthochschule Wuppertal, Wuppertal.
- WEH, M., ZWICK, O., ZIEGLER, M. (2009a): Maschinenvortrieb in verklebungsanfälligem Baugrund, Teil 1. – Tunnel, 28: 25 – 36.
- WEH, M., ZWICK, O., ZIEGLER, M. (2009b): Maschinenvortrieb in verklebungsanfälligem Baugrund, Teil 2. – Tunnel, 28: 18 – 28.