



Leseprobe

Unsere Fachinhalte bieten Ihnen praxisnahe Lösungen, wertvolle Tipps und direkt anwendbares Wissen für Ihre täglichen Herausforderungen.

-  **Praxisnah und sofort umsetzbar:** Entwickelt für Fach- und Führungskräfte, die schnelle und effektive Lösungen benötigen.
-  **Fachwissen aus erster Hand:** Inhalte von erfahrenen Expertinnen und Experten aus der Berufspraxis, die genau wissen, worauf es ankommt.
-  **Immer aktuell und verlässlich:** Basierend auf über 30 Jahren Erfahrung und ständigem Austausch mit der Praxis.

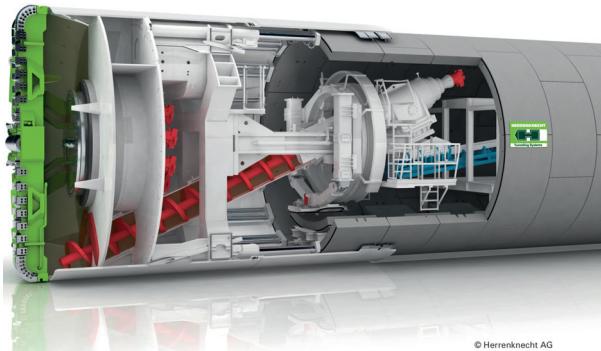
Blättern Sie jetzt durch die Leseprobe und überzeugen Sie sich selbst von der Qualität und dem Mehrwert unseres Angebots!

6.1.9 Charakterisierung von Tunnelausbruchmaterial

...im maschinellen Tunnelbau mit EPB-Maschinen mittels KI-basierter Messdatenanalysen

Tunnelprojekte spielen bei der Verwertung von Boden eine besondere Rolle, da große Mengen an Ausbruchmaterial zeitlich und örtlich punktuell anfallen. Viele Tunnel werden mit Tunnelbohrmaschinen (TBM) gebaut. Bei den sogenannten Erddruckschilden (engl. Earth Pressure Balance Shield, kurz EPB; siehe Abbildung 6.1.9-1) wird der abgebaute Boden selbst als Stützmedium genutzt. Hierfür werden üblicherweise am Schneidrad der TBM Konditionierungsmittel in Form von Suspensionen oder Schäumen zugegeben, sodass ein pastöser Erdbrei vorliegt. Der klassische Einsatzbereich einer EPB-TBM war ursprünglich in Lockergestein in Tonen und Schluffen und wurde durch die oben genannte Verfahrenstechnik aber auch in grobkörnige Böden wie Sande erweitert.

Recycling von Boden



© Herrenknecht AG

Abb. 6.1.9-1: Aufbau einer Erddruckschild-Tunnelbohrmaschine (EPB-TBM) mit Schild, Schneidrad, Abbaukammer, Schneckenförderer und Schildschwanz (Quelle: Herrenknecht AG.)

Charakterisierung von Tunelausbruchmaterial

Herausforderungen bei der Verwertung

Während Ausbruchmaterial aus Hartgestein vergleichsweise einfach beispielsweise als Gesteinskörnung in Beton eingesetzt werden kann, ist dies bei Lockergestein ungleich schwieriger, denn der konditionierte Erdbrei weist im Vergleich zur natürlichen Geologie veränderte geotechnische Eigenschaften auf. Für eine Verwertung im Sinne der Kreislaufwirtschaft für andere bautechnische Zwecke wie für einen Erdwall oder als Material für den Straßenunterbau ist daher eine aufwendige Bodenbehandlung durch Zugabe von Kalk o. Ä. erforderlich. Wenn dies nicht wirtschaftlich möglich ist, wird das Ausbruchmaterial meist auf einer Deponie beseitigt. Zur Erhöhung der Ressourceneffizienz sollte daher Ziel sein, eine möglichst vollständige und hochwertige Verwertung des Ausbruchmaterials zu erreichen.

REMATCH

Zwar sind Erddruckschilder heutzutage mit diversen Sensoren ausgestattet, jedoch erfolgt keine Bestimmung der geotechnischen Eigenschaften des Ausbruchmaterials auf der Maschine, welche für eine zeitnahe Entscheidung bezüglich der Verwertung zielführend bzw. erforderlich ist. Hier setzte das Forschungsprojekt „REMATCH – Ressourceneffizienter Tunnelbau auf Basis einer Echtzeit-Charakterisierung des Ausbruchmaterials“ an, das vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der französischen Agence Nationale de la Recherche (ANR) im Rahmen einer bilateralen Kooperation „Förderung von deutsch-französischen Projekten zum Thema Künstliche Intelligenz“ von 2021 bis 2024 gefördert wurde und an dem die Projektpartner Technische Hochschule Köln, STUVA e.V., Herrenknecht AG, ARCADIS ESG, LIRIS (Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information) der Universität Lyon, sowie die assoziierten Partner DB InfraGo, CETU (Centre d'Etudes des Tunnels) und

TELT (Tunnel Euroalpin Lyon Turin) beteiligt waren. Ziel von REMATCH war es, eine Echtzeit-Charakterisierung von Ausbruchmaterial auf einer Erddruckschildmaschine mittels Methoden Künstlicher Intelligenz (KI) vorzunehmen. Dazu wurde ein entsprechendes Messsystem zur effektiven Echtzeit-Bestimmung geotechnischer (Index-)Eigenschaften von feinkörnigen und gemischtkörnigen Böden entwickelt und an einer Erddruckschild-Tunnelbohrmaschine (EPB-TBM) erprobt. Dieses System umfasste zum einen ein Fadenpendel mit einer Stahlkugel, das sich über die Oberfläche des Ausbruchmaterials auf dem Förderband bewegt. Zum anderen wurde ein Pflug eingesetzt, der in den Massenstrom des Ausbruchmaterials auf dem Förderband eintaucht. Abhängig von der Konsistenz bzw. Verarbeitbarkeit des Bodens, der Korngröße sowie weiterer Aspekte erfassen die Messsysteme mit Stahlkugel und Pflug Stöße und Auslenkungen, die mittels Kraftsensoren registriert werden. Durch den Einsatz von Methoden der Künstlichen Intelligenz können Korrelationen zwischen den Messwerten und entscheidenden geotechnischen (Index-)Parametern wie Setzmaß und Scherfestigkeit erkannt werden.

Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) finden in zahlreichen Gebieten Anwendung und gewinnen auch in der Geotechnik zunehmend an Bedeutung^{1,2}. Ziel der vorliegenden Forschung war es, die Anwendung von

*Echtzeit-
Charakterisierung*

*in-situ-
Charakterisierung
des Ausbruchmaterials*

¹ Baghbani, A., Choudhury, T., Costa, S., Reiner, J. (2022). Application of artificial intelligence in geotechnical engineering: A state-of-the-art review. *Earth-Science Reviews*, 228, 103991.

² Duffner, S., Kassel, A., Heim, A., Thienert, C., & Müller, P. (2025). Derivation of physical properties of EPB tunneling excavation material based on digital image processing methods. In *Tunnelling into a Sustainable Future-Methods and Technologies* (pp. 2690-2697). CRC Press

Charakterisierung von Tunelausbruchmaterial

KI-basierten Methoden auf den maschinellen Tunnelbau auszuweiten, wobei der Fokus auf der *Echtzeit*-Charakterisierung des Ausbruchmaterials direkt auf dem Förderband einer TBM lag. Die geotechnischen Eigenschaften des Ausbruchmaterials können variieren, da der Untergrund während des Tunnelvortriebs nicht homogen ist. Ziel des Forschungsprojekts war daher die Echtzeit-Bestimmung relevanter Eigenschaften des TBM-Ausbruchs sowie die Bewertung seines Recyclingpotenzials, da die Verwertbarkeit von Ausbruchmaterial eine fundamentale Rolle im Kontext der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft¹ und insbesondere im Hinblick auf ein nachhaltiges Management von Ausbruchmassen² spielen kann. Eines der bekanntesten Forschungsprojekte in diesem Bereich ist das EU-Projekt „DRAGON“³, welches sich auf die Analyse von Ausbruchmaterial aus Festgestein konzentrierte. Hierbei wurden fotooptische Methodiken sowie Röntgen- und Mikrowellentechnologien eingesetzt, um physikalische Eigenschaften wie Korngröße und -form, Wassergehalt sowie chemische und mineralogische Eigenschaften zu bestimmen und diese im Hinblick auf verschiedene Endverwendungsoptionen zu bewerten. Für Vortriebe mit Erddruckschildmaschinen sind jedoch keine vergleich-

¹ Haas, M., Galler, R., Scibile, L. & Benedikt, M. (2020). Waste or valuable resource—a critical European review on re-using and managing tunnel excavation material. *Resources, Conservation and Recycling*, 162, 105048.

² European Commission: Directorate-General for Environment, WSP, Flexman, K., Vu, E., Doyle, H. et al., Excavated soil generation, treatment and reuse in the EU – Final report for Task 1.1 of the support study for implementing the EU Soil Strategy for 2030 (09.0201/2022/877182/SER/D.1), Publications Office of the European Union, 2024, <https://data.europa.eu/doi/10.2779/837004>

³ DRAGON Project (2014). D4.1/D4.2 Automation Strategies for solid rock and soft ground processing. European Commission: Directorate-General for Environment, Flexman, K., Vu, E., Doyle, H.,

baren Erkenntnisse verfügbar. Daher wurde beim Projekt REMATCH ein KI-Modell trainiert, das geotechnische (Index-)Parameter von fein- und gemischtkörnigen Böden entwickelt und in Python implementiert. Für die Akquisition eines ausreichend großen Datensatzes, der für das Training des Prognosemodells erforderlich ist, wurde zunächst eine kreisförmige Idealisierung eines Förderbandes in Form eines Karussells mit einem Durchmesser von 2,1 Metern bei der STUVA e.V. eingesetzt. Anschließend bestand die Möglichkeit, Tests im Realmaßstab mit einem Förderband bei der Herrenknecht AG durchzuführen.

Beschreibung des Messsystems

Pendelsystem

Um eine ausreichend große Datenmenge für das Training des Prognosemodells zu generieren, wurde ein kreisförmiges Modell eines Förderbandes bei der STUVA e.V. gebaut. Dies zeichnet sich durch eine geringere Füllmenge aus, was die Produktion und Untersuchung einer breiten Vielfalt von Böden mit unterschiedlichen geotechnischen Parametern wie Scherfestigkeit, Setzmaß (Slump-Maß) und Wassergehalt erleichtert. Abbildung 6.1.9-2 zeigt den Aufbau des Pendelsystems auf dem Karussell (links) und auf dem später beschriebenen Testförderband bei der Herrenknecht AG (rechts).

Vielfalt von Böden

Charakterisierung von
Tunnelausbruchmaterial



Abb. 6.1.9-2: Messsystem Fadenpendel mit Stahlkugel installiert auf dem Karussell (links) und auf dem Testförderband (rechts) (Quelle: Thienert et al., 2025¹)

Das Pendelsystem besteht aus einem Kraftaufnehmer auf einer Traverse und einer Stahlkugel mit einem Fadenpendel, die am Kraftaufnehmer befestigt ist. Bei Betrieb des Karussells bzw. Testförderbands bewegt sich die Stahlkugel über die Oberfläche des Ausbruchmaterials und Auslenkungen, die vom Kraftsensor registriert werden. Abbildung 6.1.9-3 veranschaulicht die abgeleiteten Daten (d. h. Kraftmessungen) von drei verschiedenenartigen Böden, die mit dem Pendelsystem am Karussell aufgezeichnet wurden.

¹ Thienert, C., Gutberlet, L., Klaproth, C., Budach, C., Müller, P., Heim, A., & Kassel, A. (2025). Real-time determination of EPB-TBM excavation material parameters using AI-based measurement data analyses. In Tunnelling into a Sustainable Future—Methods and Technologies (pp. 3279-3286). CRC Press.

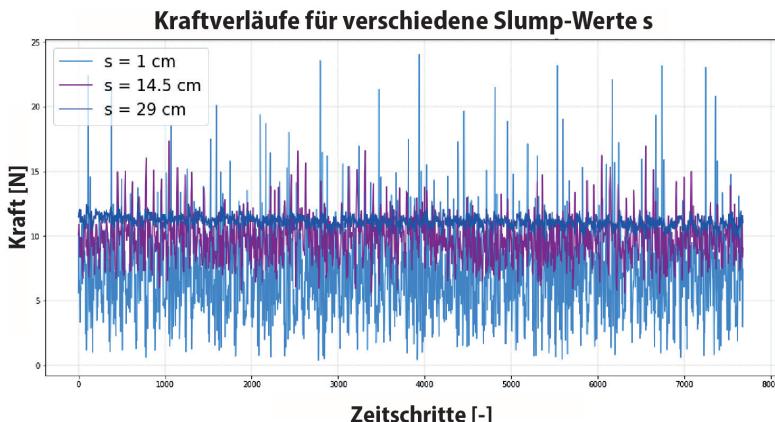


Abb. 6.1.9-3: Kraftmessungen für verschiedene Modellböden (Sand/Ton-Verhältnis 5:1), gekennzeichnet durch variable Setzmaße (s), aufgezeichnet mit dem Pendelsystem (Quelle: STUVA e.V.)

Förderband im Real-Maßstab

Die Installations- und Testumgebung für die Messsysteme wurde durch ein 50 m langes Testförderband bei der Herrenknecht AG, welches einem Förderband auf einer TBM im Realmaßstab entspricht, nachgestellt (Abbildung 6.1.9-4 links). Dieses besteht aus Originalteilen einer TBM mit einem Durchmesser von 9 Metern¹. Das Band ist ein ST1000 5 + 4 mit folgenden Spezifikationen: einer Breite von 1.000 mm, einer geregelten Bandgeschwindigkeit von ca. 2,5 m/s, einem Massendurchsatz von max. 1.600 t/h und einem Füllgrad von ca. 76%. Dieses Testförderband arbeitet im Reversierbetrieb. Der jeweils zu untersuchende Boden, der einen Abschnitt von ca. 8 bis 10 Metern des Förderbandes bedeckt

¹ Budach, C., Chalak, C., Heim, A., Porthier, C., Thienert, C., & Chauveau, J. (2023). Improvement of the recycling process of excavated soil using tunnel boring machines- First results of the European research project REMATCH. AFTES 2023: Underground Space at the Heart of Transitions.

Charakterisierung von Tunnelausbruchmaterial

(Abbildung 6.1.9-4 rechts), wird ohne Materialabwurf an den Enden vor- und zurückbewegt. Das Messsystem ist vertikal über dem Förderband in einem Rahmengestell installiert, welches zur Montage der Messgeräte dient.



Abb. 6.1.9-4: Testförderband im Maßstab 1:1 bei der Herrenknecht AG ohne (links) und mit Boden auf dem Förderband (rechts)¹ (Quelle: Herrenknecht AG)

Pflugsystem

Zur Echtzeit-Erfassung zusätzlicher Informationen über die Konsistenz bzw. Verarbeitbarkeit des Materials wurde ein Pflug entwickelt (Abbildung 6.1.9-5). Dieser ermöglichte das Eindringen in das Material durch die Bewegung selbst. Ein in der horizontalen Zugstange integrierter Kraftsensor maß die auf den Pflug wirkenden Zugkräfte mit hohen Abtastraten. Auswertungen der am Förderband erhaltenen Ergebnisse zeigten, dass die aufgezeichneten Zugkräfte direkt auf die mittels geotechnischer Messungen der vom Band entnomme-

¹ Thienert, C., Gutberlet, L., Klaproth, C., Budach, C., Müller, P., Heim, A., & Kassel, A. (2025). Real-time determination of EPB-TBM excavation material parameters using AI-based measurement data analyses. In Tunnelling into a Sustainable Future—Methods and Technologies (pp. 3279-3286). CRC Press.

nen Bodenproben ermittelten Setzmaße kalibriert werden konnten.



Abb. 6.1.9-5: Pflugsystem mit Kraftsensor vor der Datenerfassung (links) und im Betrieb (rechts)¹
(Quelle: Herrenknecht AG)

Materialien und Datengenerierung

Untersuchte Böden

Eine adäquate Datenerfassung zum Training der Messsysteme bedingte die kontrollierte Herstellung von Böden, die dem Einsatzbereich von EPB-Maschinen entsprechen. Sand-Ton-Mischungen mit Sand (0,2-2 mm) und Secursol 3060 D, einem hochplastischen kaolinitreichen Ton, wurden in Verhältnissen von 3:1, 5:1 und 8:1 mit einem breiten Spektrum an Wassergehalten hergestellt. Dies führte zu einer großen Bandbreite an Verarbeitbarkeiten und den damit verbundenen Setzmaßen (Slump-Maßen) und Scherfestigkeiten der Böden. Die zugehörigen geotechnischen (Index-)Parameter

*Training der
Messsysteme*

¹ Thienert, C., Gutberlet, L., Klaproth, C., Budach, C., Müller, P., Heim, A., & Kassel, A. (2025). Real-time determination of EPB-TBM excavation material parameters using AI-based measurement data analyses. In Tunnelling into a Sustainable Future—Methods and Technologies (pp. 3279-3286). CRC Press.

Charakterisierung von Tunelausbruchmaterial

wie Setzmaß, Scherfestigkeit, Wassergehalt und Ausbreitmaße aus Hägermann-Ausbreitversuchen wurden im Labor für Geotechnik und Tunnelbau der TH Köln bestimmt und zur Kalibrierung verwendet. Das Setzmaß aus dem Setzversuch gemäß ASTM¹ und DIN EN 12350-2 (2019)², der primär zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit im Betonbau durchgeführt wird, wurde als maßgeblicher Parameter für die Bewertung der Plastizität oder Verarbeitbarkeit konditionierter Böden angesehen³. Zudem wurde ein Datensatz zahlreicher Setzmaße aus vorangegangenen Tunnelbauprojekten, bei denen Böden einer Konditionierung unterzogen wurden, ausgewertet. Dieser Datensatz zeigte, dass Setzmaße zwischen ca. 10 cm und 20 cm erforderlich sind, um im EPB-Tunnelbau eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu erreichen⁴. Nichtsdestotrotz wurde zum Zwecke der Kalibrierung und der Generierung eines großen Trainingsdatensatzes der Bereich der Setzmaße auf eine Bandbreite von 1 cm bis 29 cm erweitert.

¹ American Society for Testing and Materials (ASTM). (2003). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete: ASTM C143/C 143M-00.

² DIN EN 12350-2:2019. Prüfung von Frischbeton – Teil 2: Setzmaß (Transl.: Testing fresh concrete – Part 2: Slump-test German version EN 12350-2:2019).

³ Budach, C. & Thewes, M. (2015). Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research. Tunnelling and Underground Space Technology, 50: 296–304.

⁴ Budach, C. & Thewes, M. (2015). Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research. Tunnelling and Underground Space Technology, 50: 296–304.

Datensatz

Ein Datensatz besteht aus der aufgezeichneten Kraftmessung f_i mit dem Pendel- / Pflugsystem (siehe oben im Text) für einen Boden und den dem jeweiligen Boden zugeordneten geotechnischen (Index-)Parametern:

setzmaß_i, ausbreitungsmaß_i, scherfestigkeit_i, wasser-gehalt_i für $i = 1, \dots, N$

wobei N die Anzahl der Messungen (Samples) ist.

Systemtest

Analyse der Pendeldaten mittels KI

Der Schwerpunkt des Systemtests lag auf der Entwicklung eines Prognosemodells. Dessen Ergebnis waren die den untersuchten Böden und den aufgezeichneten Kraftmessungen zugeordneten Bodenparameter. Für das Training dieses KI-Modells des sog. überwachten Lernens bzw. zur Bewertung der Güte der Regression müssen korrekte Eingabe- und Ausgabepaare definiert werden. Die Kraftmessungen dienten hier als Eingabewerte und die vorab bestimmten geotechnischen (Index-)Parameter des Bodens als Ausgabewerte. Der Workflow des maschinellen Lernprozesses zur Analyse der erfassten Pendeldaten ist in Abbildung 6.1.9-6 dargestellt. Nach der oben beschriebenen Datenerfassung wurde als Teil der Datenaufbereitung jede Kraftmessung in mehrere, sich nicht überlappende Sequenzen gleicher Länge von 256 Datenpunkten unterteilt. Dies führte zu einem Datensatz von 6.540 Eingabe- und Ausgabepaaren. Im Rahmen der Merkmalsauswahl wurden die folgenden Merkmale pro Messsequenz als Eingaben für das Netzwerk verwendet: erstens die Messequenz

Charakterisierung von
Tunnelausbruchmaterial

selbst und zweitens die Zeitreihenmerkmale der Messsequenz, die mit dem Python-Paket *tsfresh* berechnet wurden¹. In den folgenden Unterabschnitten werden die Netzwerkstruktur sowie das Trainingsverfahren erläutert.

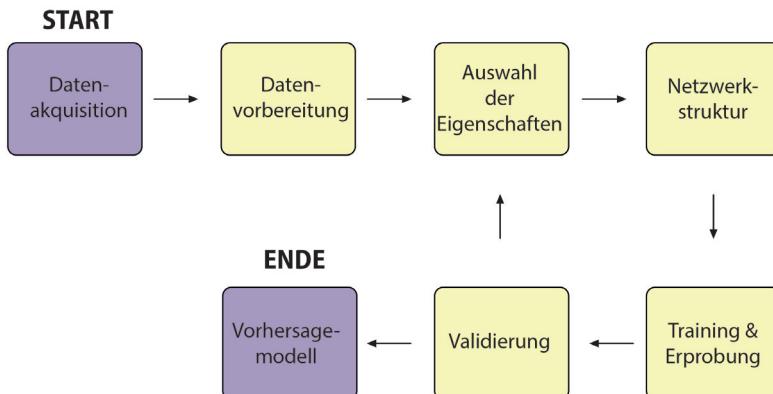


Abb. 6.1.9-6: Vorgehensweise des maschinellen Lernverfahrens (Quelle: Budach in Anlehnung an Thienert et al., 2025)

¹ Christ, M., Braun, N., Neuffer, J. & Kempa-Liehr, A.W. (2018). Time Series FeatuRe Extraction on basis of Scalable Hypothesis tests (tsfresh – A Python package). Neurocomputing 307: 72–77.

Netzwerkstruktur

Es wurde eine Netzwerkstruktur verwendet, die aus einer Kombination von einem „Convolutional Neural Network“ (CNN) und zwei „Fully Connected Neural Networks“ (FCNNs) besteht, siehe Abbildung 6.1.9-7. Die Kraftsequenz wird mit einem eindimensionalen CNN verarbeitet, das aus zwei Convolutional Layers mit einem Kernel der Größe 9 besteht, denen jeweils ReLU (Rectified Linear Unit) als Aktivierungsfunktion folgt. ReLU stellt dabei eine der am häufigsten zur Anwendung kommenden Aktivierungsfunktionen dar und gibt bei positiven Eingangswerten, den Wert selbst weiter. Bei negativen bzw. Null-Werten wird der Wert „Null“ ausgegeben.

Anschließende Fully Connected Layer verwenden ebenfalls ReLU, die die Merkmale auf 1 Ausgabeneuron abbilden. Das erste FCNN empfängt die Merkmale der Kraftsequenz als Eingabe und ordnet diese Merkmale 16 Ausgangsneuronen zu. Die insgesamt 17 verketteten Ausgabeneuronen beider Netzwerke werden mit einem zweiten FCNN weiterverarbeitet, dessen Fully Connected Layer die Merkmale in das Ausgabeneuron transformiert. Beide FCNNs arbeiten mit ReLU als Aktivierungsfunktion.

Charakterisierung von
Tunelausbruchmaterial

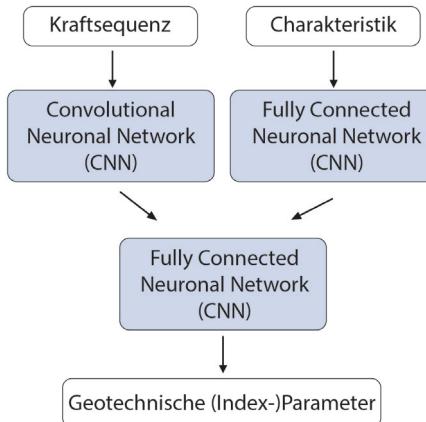


Abb. 6.1.9-7: Netzwerkstruktur der KI-basierten Datenanalyse
(Quelle: Budach in Anlehnung an Thienert et al., 2025¹)

Trainingskonfiguration und Ergebnisse

Die aus Messungen des Pendelsystems am Testförderband und dem Testaufbau Karussell generierten Datenproben wurden zufällig in Trainings-, Validierungs- bzw. Testdatensatz aufgeteilt. Der Trainingsdatensatz machte 64 Prozent des gesamten Datenvolumens aus. Innerhalb des Trainings wurden die Gewichte des neuronalen Netzes in jeder Iteration durch Minimierung des mittleren quadratischen Fehlers angepasst. Dies wurde für maximal 1.000 Epochen durchgeführt. Der Validierungsdatensatz wurde zur Bewertung des Trainingserfolgs während des Trainings verwendet. Der Testdatensatz war nicht im Training enthalten und daher dem Modell

¹ Thienert, C., Gutberlet, L., Klaproth, C., Budach, C., Müller, P., Heim, A., & Kassel, A. (2025). Real-time determination of EPB-TBM excavation material parameters using AI-based measurement data analyses. In Tunnelling into a Sustainable Future–Methods and Technologies (pp. 3279-3286). CRC Press.

unbekannt; er diente zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit des vollständig trainierten Vorhersagemodells.

Überprüfung der Leistungsfähigkeit

Im Systemtest wurde eine Bewertung der Vorhersage der geotechnischen (Index-)Parameter des trainierten Modells bei Verwendung unbekannter Testdaten als Eingabe erreicht. Zur Bewertung der Ergebnisse wurde der Root Mean Squared Error (RMSE) berechnet:

$$\varepsilon_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^S (x_{i,true} - x_{i,pred})^2}{S}}$$

wobei S die Anzahl der unbekannten Testproben ist und $x_{i,true}$ und $x_{i,pred}$ der wahre und der vorhergesagte geotechnische (Index-)Parameter sind. Dies bedeutet, dass das Quadrat der Differenz jeder Vorhersage zu ihrem wahren Wert über alle Proben gemittelt wird, woraus schließlich die Quadratwurzel berechnet wird.

In Abbildung 6.1.9-8 (links) ist die Prognose des Setzmaßes dargestellt, wobei die prognostizierten Setzwerte in Bezug zu den wahren Setzwerten aller unbekannten Testdaten illustriert sind. Der RMSE beträgt $RMSE_{Setzmaß} = 1,3$ cm. Wenn die Ergebnisse in Relation zu den möglichen Bandbreiten eines Setzwertes gesetzt werden, in diesem Fall von 0,5 bis 28 cm, erreicht das Modell eine Genauigkeit von $Accuracy_{Setzmaß} = 95,3\%$. Im Hinblick auf die Vorhersage der Scherfestigkeit liefern die Ergebnisse ähnlich positive Vorhersagen (Abbildung 6.1.9-8 rechts). Der berechnete Fehler beträgt $RMSE_{Scherfestigkeit} = 11,2$ kPa und die Genauigkeit entsprechend $Accuracy_{Scherfestigkeit} = 90,4\%$.

Charakterisierung von Tunelausbruchmaterial

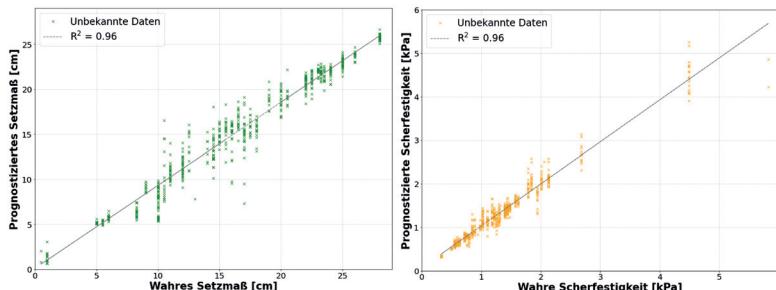


Abb. 6.1.9-8: Vergleich von wahrem und vorhergesagtem Setzmaß in cm (links) und Scherfestigkeit in kPa (rechts) (Quelle: STUVA e.V.)

Erstinstallation des Messsystems auf einer EPB-TBM-Baustelle

Die Messsysteme, die zuvor in einer kontrollierten Testumgebung eingesetzt wurden, wurden auf ihre Eignung für den Baustelleneinsatz untersucht. Zu diesem Zweck konstruierte die Herrenknecht AG eine Vorrichtung, an der Pflug und Pendel montiert werden konnten, die zunächst am Testförderband installiert und getestet wurde (Abbildung 6.1.9-9).



Abb. 6.1.9-9: Konstruierte Vorrichtung, bestehend aus Pflug- und Pendelsystem mit jeweils Zugkraftsensor, zunächst am Testförderband installiert und getestet. Die Förderbandbewegung ist von links nach rechts (Quelle: Budach in Anlehnung an Thienert et al., 2025¹)

Die Installation auf dem Förderband einer realen TBM konnte im Einsatz auf einer Tunnelbaustelle während der Ringbauphasen im August 2024 in Europa abgeschlossen werden. Die Messungen wurden während des Vortriebs bei laufendem Förderband aufgezeichnet. Das Messsystem im Betrieb ist in Abbildung 6.1.9-10 dargestellt. Ein großer Datensatz von Messungen sowohl der Pendel- als auch der Pflugdaten und zugehöriger geotechnischer Merkmale von Proben, die vom laufenden Förderband entnommen wurden, wurde generiert und analysiert bzw. ausgewertet (Thienert et al., 2025).

¹ Thienert, C., Gutberlet, L., Klaproth, C., Budach, C., Müller, P., Heim, A., & Kassel, A. (2025). Real-time determination of EPB-TBM excavation material parameters using AI-based measurement data analyses. In Tunnelling into a Sustainable Future—Methods and Technologies (pp. 3279-3286). CRC Press.

Charakterisierung von Tunnelausbruchmaterial

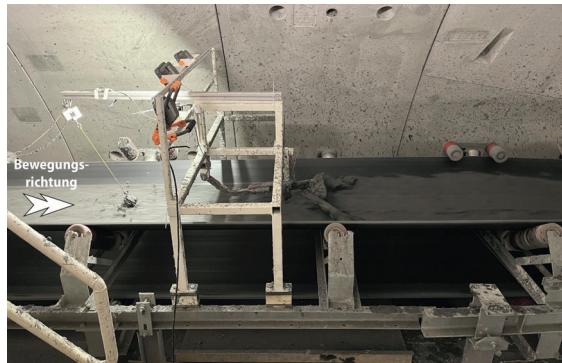


Abb. 6.1.9-10: Auf einer Tunnelbaustelle im August 2024 betriebenes Messsystem, das EPB-TBM-Ausbruchmaterial auf dem bewegten Förderband (von links nach rechts) analysiert (Quelle: Budach in Anlehnung an Thienert et al., 2025¹)

Zusammenfassung und Ausblick

Korrelationen zwischen gemessenen Kraftverläufen und geotechnischen Eigenschaften

Um eine adäquate Konsistenz bzw. Verarbeitbarkeit des Stützmediums im EPB-Tunnelbau zu gewährleisten, sind präzise Echtzeit-Informationen über die geotechnischen (Index-)Parameter des Ausbruchmaterials direkt vor Ort erforderlich. Die im Rahmen des Forschungsprojekts REMATCH entwickelten Systeme erfassen unterscheidbare Kraftverläufe, die auf Pendel und Pflug wirken, abhängig vom mechanischen Verhalten des untersuchten Bodens, und können somit Korrelationen zwischen gemessenen Kraftverläufen und geotechnischen Eigenschaften liefern. Die Herausforderung, einen großen Datensatz zu generieren, um das

¹ Thienert, C., Gutberlet, L., Klaproth, C., Budach, C., Müller, P., Heim, A., & Kassel, A. (2025). Real-time determination of EPB-TBM excavation material parameters using AI-based measurement data analyses. In Tunnelling into a Sustainable Future—Methods and Technologies (pp. 3279-3286). CRC Press.

Pflugsystem zu kalibrieren und ausreichend Eingabe- und Ausgabepaare für das Training bei der Bewertung des Pendelsystems mit KI-Methoden zu haben, wurde durch den Bau eines Förderbandes im Realmaßstab und eines Förderbandmodells in Form eines Karussells realisiert. Nach der Herstellung verschiedener Böden wurden Messungen in den Testumgebungen durchgeführt, um beide Systeme zu optimieren. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen die präzise Vorhersage wichtiger geotechnischer (Index-)Parameter wie Setzmaß und Scherfestigkeit von fein- und gemischtkörnigem Material mit hoher Genauigkeit unter Testbedingungen. Ein Demonstrator des Messsystems wurde erfolgreich auf einer Erddruckschildmaschine installiert und eingesetzt, und Daten wurden generiert. In zukünftigen Arbeiten wird der Datensatz zur Kalibrierung und zum Training der Systeme kontinuierlich erweitert werden. Auf diese Weise kann das Tunnelbauausbruchmaterial bestmöglich charakterisiert werden, sodass es anschließend möglichst hochwertig verwertet werden kann. Basierend auf der Entwicklung des oben beschriebenen Prototyps wurden die TH Köln, STUVA e.V. und die Herrenknecht AG für den bauma Innovationspreis 2025 in der Kategorie Forschung für die Entwicklung des KI-gestützten Systems MEGA (Akronym für "Muck measuring system for EPB tunnel borinG machines based on AI") nominiert.

Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der französischen Agence Nationale de la Recherche (ANR) im Rahmen des Forschungsprojekts REMATCH unterstützt.

Tunnelbauausbruchmaterial kann bestmöglich charakterisiert werden

Weitere Links

Herrenknecht AG (2025). <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/epb-schild/>, Zugriff: 23.09.2025



Autoren

Prof. Dr.-Ing. C. Budach, Technische Hochschule Köln, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umwelttechnik, Institut für Baustoffe, Geotechnik, Verkehr und Wasser, Lehr- und Forschungsgebiet Geotechnik und Tunnelbau, Köln
Dr. P. Müller, Technische Hochschule Köln, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umwelttechnik, Institut für Baustoffe, Geotechnik, Verkehr und Wasser, Lehr- und Forschungsgebiet Geotechnik und Tunnelbau, Köln
Dr.-Ing. C. Thienert, STUVA e. V., Tunnelbau & Bautechnik, Köln
L. Gutberlet, M. Sc., STUVA e. V., Tunnelbau & Bautechnik, Köln
Dipl.-Ing. C. Klaproth, STUVA e. V., Tunnelbau & Bautechnik, Köln
Dipl. Geol. A. Heim, Herrenknecht AG, Technology & Innovation | Products, Schwanau-Allmannsweier
A. Kassel, Herrenknecht AG, Technology & Innovation | Products, Schwanau-Allmannsweier

Bestelloptionen



Recyclingbaustoffe

Sie haben Fragen zum Produkt oder benötigen Unterstützung bei der Bestellung? Unser Kundenservice ist für Sie da:

📞 08233 / 381-123 (Mo - Do 7:30 - 17:00 Uhr, Fr 7:30 - 15:00 Uhr)
✉️ service@forum-verlag.com

Oder bestellen Sie bequem über unseren Online-Shop:

Jetzt bestellen