

RESEARCH DEPARTMENT

subsurface modeling & engineering

N°2 | 2022

RD SME | NEWSLETTER

LIEBE LESERINNEN UND LESER,



Prof. Jörg Renner
*neuer Sprecher
des RDs SME*

wir freuen uns, Ihnen mit der neuen Ausgabe des Newsletters des Research Departments Subsurface Modeling and Engineering (RD SME) wieder ausgewählte aktuelle Forschungsergebnisse sowie aktuelle Entwicklungen und Aktivitäten innerhalb des RDs präsentieren zu können.

Im Februar 2022 wurde im RD SME ein wichtiger struktureller Wechsel vollzogen. Prof. Günther Meschke, der das Research Department seit seiner Gründung im Jahr 2014 leitete, wurde zum 01.11.2021 zum Prorektor für Forschung und Transfer der Ruhr-Universität Bochum gewählt (s. Seite 2). Um potenzielle Interessenkonflikte zu vermeiden, stand somit die Position des RD SME Sprechers zur Wahl, was einstimmig in der Mitgliederversammlung am 17.02.2022 erfolgte. Sprecher und Stellvertreter sind nun Jörg Renner und Markus Thewes, beide zuvor Vorstandsmitglieder. Die neuen Sprecher möchten sich, und da sprechen sie wohl im Namen aller Mitglieder des RDs, ganz herzlich für den ungemeinen Einsatz von Günther Meschke und seines Stellvertreters, Wolfgang Friederich, bedanken. Die vielen von ihnen eingebrachten und getragenen Initiativen haben die Entwicklung des Research Departments in den letzten Jahren maßgeblich geprägt.

als ein Schlüsselfaktor zur Lösung einer Reihe drängender technischer und gesellschaftlicher Herausforderungen angesehen werde, z. B. in Zusammenhang mit unterirdischen Infrastrukturen für Verkehrs- und Leitungssysteme, bei der Erkundung und Gewinnung nachhaltiger geothermischer Energie und von Rohstoffen für die Elektromobilität oder der Entwicklung von Konzepten für unterirdische Energiespeicher.

Unserem Mitglied Tobias Backers und seinem Forschungsteam ist ein erfolgreicher Feldversuch zum Hot-Dry-Rock-Verfahren gelungen. Die in heißen Gesteinsschichten gespeicherte Wärme wurde durch hydraulische Stimulation zugänglich gemacht, wie er in dieser Ausgabe auf Seite 6 berichtet.

In Zusammenarbeit mit Kollegen der Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie (IEG) und des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) hat die Arbeitsgruppe für Sediment und Isotopengeologie der RUB petrographische Beweise gefunden und numerische Quantifizierungen angesetzt, die katastrophale, beckenweite Flüssigkeitsausbrüche in einem Becken mit Überdruck dokumentieren. Einen ausführlichen Bericht dazu geben wir Ihnen auf Seite 13.

Angesichts des Kriegs in der Ukraine möchten wir an dieser Stelle auch besonders auf das im RD SME eingerichtete Funding Program hinweisen, mit dem wir schnell und unbürokratisch ukrainische Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unterstützen möchten. Die Informationen zum Förderprogramm sind auf Seite 5 zusammengestellt. Bitte wenden Sie sich bei Interesse direkt an rdsme@ruhr-uni-bochum.de. Wir sagen Ihnen bereits jetzt eine schnelle Hilfe zu!



Prof. Günther Meschke
*ehemaliger Sprecher
des RDs SME*

Die interdisziplinäre Vernetzung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern an der RUB (und darüber hinaus) bei der Erforschung und Nutzung des unterirdischen Raums ist gerade in Zeiten des Klimawandels und der aktuell stark im Vordergrund stehenden Forderung nach einer stärkeren Unabhängigkeit Deutschlands und Europas von internationalen Krisenregionen wichtiger denn je. Der unterirdische Raum kann

Im kommenden Wintersemester startet der neue fakultätsübergreifende internationale Masterstudiengang „Subsurface Engineering“, dazu nähere Informationen auf Seite 4, der durch die Nutzung von Synergien zwischen den Fakultäten für Geosowie Bau- und Umweltingenieurwissenschaften die Rolle der RUB als international sichtbares Kompetenzzentrum im Bereich des Subsurface Engineering nachhaltig festigen wird. Wir möchten Sie an dieser Stelle bitten, Ihre Studierenden bzw. Ihre Kontakte zu internationalen Universitäten aktiv auf das neue Angebot aufmerksam zu machen.

Eine wichtige internationale Veranstaltung des RDs SME ist die EURO:TUN 2022 (International Conference on Computational Methods and Information Models in Tunneling). Die Konferenz findet vom 22. - 24. Juni 2022 im Veran-

staltungszentrum der Ruhr-Universität Bochum statt. Am vorherigen Tag, dem 21. Juni 2022, veranstaltet der SFB 837 seinen Abschlussworkshop mit eingeladenen Vortragenden aus dem In- und Ausland. Nähere Informationen hierzu finden Sie auf Seite 5.

Diese Ausgabe enthält weitere spannende Berichte zu aktuellen Forschungsthemen aus dem SFB 837. So ist es z. B. M. Sc. Sebastian Kube mit seiner Forschung zum Thema „Elektrische Widerstandsmessungen zur Beschreibung der Partikeleinlagerung während der Penetration von Bentonit in kohäsionsloses Lockergestein“ gelungen, den ersten Preis des Jungen Forums zu gewinnen (s. Seite 3 & Seite 17).

Wir wünschen Ihnen viel Spaß beim Lesen, und würden uns freuen, wenn Sie unseren Newsletter regelmäßig abonnieren.

Impressum:

HERAUSGEBER

Research Department
Subsurface Modeling &
Engineering
Ruhr-Universität Bochum
IA 4/155
Universitätsstraße 150
44801 Bochum

NEWSLETTER REGELMÄSSIG ERHALTEN ODER ABBESTELLEN?

Bitte senden Sie eine E-Mail an rdsme@ruhr-uni-bochum.de oder scannen Sie den QR-Code.



PREISE UND AUSZEICHNUNGEN

PROF. DR. GÜNTHER MESCHKE IST NEUER PROREKTOR FÜR FORSCHUNG UND TRANSFER

Am 1. November 2021 startete das neue Rektorat der RUB in seine Amtszeit. Prof. Dr. Günther Meschke ist von der Hochschulwahlversammlung der RUB für die nächsten sechs Jahre zum Prorektor gewählt worden.

Prof. Dr. techn. Günther Meschke wird als Prorektor für Forschung und Transfer insbesondere den Weg in die nächste Runde der Exzellenzstrategie begleiten. Schon jetzt hat die RUB ihr Profil mit den Exzellenzclustern, Research Departments und Forschungsbauten geschärft und zudem weitere Profildbereiche als potenzielle Kandidaten für eine Cluster-Antragstellung identifiziert. „Auf Basis der eigenen Stärken und eines klar erkennbaren eigenen Profils gilt es, die Chancen, die sich aus der Zusammenarbeit innerhalb der Universitätsallianz Ruhr ergeben, verstärkt zu nutzen“, sagt Prof. Dr. techn. Meschke. „Diesen Prozess möchte ich aktiv und dynamisch, gemeinsam mit den Partnern und in enger Abstimmung mit dem Prorektorat für Struktur, Strategie und Planung weiterentwickeln.“ Außerdem möchte Prof. Dr. techn. Meschke sich für maßgeschneiderte Förder-



Bild 1: Prof. Dr. Günther Meschke – neuer Prorektor für Forschung und Transfer (© RUB, Marquard)

programme einsetzen, welche zu einer guten Balance von individueller Exzellenz und exzellenter Verbundforschung beitragen sollen und daraus resultierend neue Forschungsfelder entstehen können. Speziell die Bereiche Nachhaltigkeit und Klimawandel schätzt er als potenzielle Themenfelder für interdisziplinäre Forschung und wichtige Beiträge der RUB ein.

Verfasst von: Jens Wylkop & Arne Dessaul (RUB)

ANDREAS VOGEL ZUM UNIVERSITÄTSPROFESSOR UND CIO ERNANNT

Vom ehemaligen Rektor der Ruhr-Universität Prof. Dr. Axel Schölmerich wurde Prof. Dr. Andreas Vogel am 21.09.2021 zum Universitätsprofessor ernannt. Mit Wirkung zum 01.10.2021 übernahm er die Professur für „High Performance Computing“, die er seit 2017 als Juniorprofessor leitet. Die Arbeitsgruppe entwickelt und implementiert Simulationsmethoden und Algorithmen zur effizienten Berechnung von detaillierten und komplexen Modellen unter Verwendung von größten Parallelrechnern und aktueller Rechnerarchitektur.

Zudem ist Andreas Vogel vom Rektorat mit Wirkung zum 01.01.2021 als Chief Information Officer (CIO) ernannt worden. Seine Aufgabengebiete umfassen die IT-Strategie, die IT-Strukturen und das IT-Governance an der RUB.



Bild 1: v.l.n.r. ehemaliger Rektor Prof. Dr. Axel Schölmerich, Prof. Dr. Andreas Vogel und Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Höffer bei der Ernennung zum Universitätsprofessor (© RUB, Marquard)

PROMOTION MIT AUSZEICHNUNG VON DR.-ING. PETER HOFFMANN



Zum Thema „Modelle zur Kostenprognose unter Berücksichtigung von Risiken und Unsicherheiten für die Planung von Straßentunneln“ entwickelte Herr Dr.-Ing. Peter Hoffmann in seiner Dissertation verschiedene Modelle, die in der Praxis Anwendung finden werden. Einen ausführlichen Bericht zum Promotionsthema finden Sie auf Seite 16.

Am 22.10.2021 schloss er seine Promotionsprüfung mit Auszeichnung ab.

Bild 1: Ergebnisverkündung der Promotionsprüfung (v.l.n.r. Prüfungsausschussvorsitzender Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg, 1. Gutachter Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes, Dr.-Ing. Peter Hoffmann, 2. Gutachter Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz)

„JUNGES FORUM“ – ERSTER PREIS GEHT AN SEBASTIAN KUBE



Bild 1: Foto der Preisverleihung – v.l.n.r. Sebastian Kube, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler, Sophie Escherich

Im Rahmen der STUVA Tagung 2021 (24.-26.11.2021) hat Sebastian Kube erste Ergebnisse seiner Forschung zum Thema „Elektrische Widerstandsmessungen zur Beschreibung der Partikeleinlagerung während der Penetration von Bentonit in kohäsionsloses Lockergestein“, präsentiert. Beim Vortragswettbewerb „Junges Forum“ konnte er überzeugen und gewann den ersten Preis: eine Reise zur Großbaustelle Scarborough U-Bahn nach Toronto (Kanada).

Auf Seite 17 können Sie sich einen Einblick in das Forschungsthema verschaffen.

THE NEW INTERNATIONAL MASTER OF SCIENCE PROGRAMME „SUBSURFACE ENGINEERING“ WILL START NEXT WINTER SEMESTER

The Master programme Subsurface Engineering, that will start in the winter semester 2022/2023, is a specialised post-graduate program, which offers a fascinating integrated taught and research curriculum in the field of civil engineering, geosciences and underground engineering. The Master course is embedded in a strong research environment with an excellent international reputation, which involve world-wide experts in a wide research area from tunnel engineering, geosciences, geothermal energy and computational engineering. All courses and lectures of the Master programme are held in English. Most of the lecturers spent an important part of their career in countries abroad, thus having profound teaching skills paired with a lot of international experience. The Master programme "Subsurface Engineering" takes four semesters (2 years) to complete. After the first semester with fundamental courses, depending on the own qualifications, students can choose to focus on two directions to deepen their knowledge:

GEOTECHNICS AND TUNNELING (GT)

SUBSURFACE CHARACTERIZATION AND UTILIZATION (SCU)

During the first three semesters, students attend several compulsories, compulsory-optional and optional courses (see figure 1). The compulsory courses in the first semester provide students key-skills in the field of geology, hydrology and numerical methods. Advanced courses in the second and third semesters offer advanced and state-of-the-art knowledge in the field of geotechnics and tunnelling as well as in characterization and exploiting underground space. The

Semester	CP / ECTS	Content
1 st	33 LP	Compulsory Courses: Mathematics, Soil and Rock Mechanics, Hydraulics, Computational Methods
2 nd - 3 rd	48 LP	Compulsory Optional Courses:
		Geotechnics and Tunneling Subsurface Characterization and Utilization
	9 LP	Optional Courses
4 th	30 LP	Master Thesis

Figure 1: Structure of the new Master of Science programme „Subsurface Engineering“

fourth semester is dedicated to the Master thesis, which accounts for 30 ECTS. In total, to complete the Master programme, students need to obtain 120 ECTS (including the Master thesis).

In general, all students have to pay a social fee of about EUR 300,- per semester. The social fee includes free use of public transport in whole North-Rhine Westphalia, and reduced prices for food and drinks bought in the canteen (Mensa) and the cafeterias.

Career Prospects:
With the knowledge obtaining from the Master programme, graduated students can work in a variety of engineering positions from planning to construction roles in tunnelling, mining and canal construction as well as measured and laboratory underground investigations for the planning and usage of underground energy systems.

Subsurface Engineering

Duration:
2 years

Degree:
Master of Science

Location:
RUB

Language of instruction:
English

Social fee:
323,62€ per semester

Course start:
October



More information on admission and application:
subsurface.sd.rub.de

DAS RD SME FUNDING PROGRAM – FÖRDERMÖGLICHKEITEN FÜR UKRAINISCHE WISSENSCHAFTLER*INNEN

Das RD SME verfügt über ein aus Overheadmitteln finanziertes Förderprogramm. Neben den Fördermöglichkeiten für RD SME Mitgliedern, möchten wir nun insbesondere Wissenschaftler*innen aus der Ukraine unterstützen und versuchen, größtmögliche Flexibilität hinsichtlich Dauer und Umfang der Förderung zu zeigen. Anträge können jederzeit gestellt werden und werden so schnell wie möglich bearbeitet.

Das Förderprogramm bietet im Generellen folgende Möglichkeiten:

ÜBERBRÜCKUNGSSTIPENDIEN

- Zwischenfinanzierung für herausragende Absolventinnen und Absolventen, für die noch keine Finanzierung des Promotionsprojekts vorliegt
- Auslauffinanzierung für den Abschluss von Promotionen
- Überbrückungsfinanzierung für PostDocs zur Vorbereitung von Forschungsanträgen zur Finanzierung der eigenen Stelle

AUSLANDSSTIPENDIUM

- Forschungsaufenthalte im Ausland für PostDocs

GASTSTIPENDIEN

- Gastaufenthalte von Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern
- Kurzaufenthalte von renommierten internationalen Forscherinnen und Forschern

GASTVORTRÄGE

- Finanzierung von Gastvorträgen und Workshops mit international anerkannten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern



Bild 1: Struktur des Förderprogramms

SHARED LABS

- Unterstützung bei der Finanzierung notwendiger Upgrades und ergänzender Komponenten für Labor- und Computerausstattungen

INNOVATION FUNDS

- Anschubfinanzierung für innovative Forschungsideen und -anträge im Themenbereich des RDs SME



Ausführliche Informationen und Antragsstellung:
rdsme.ruhr-uni-bochum.de/de/Funding_Program.html

EURO:TUN 2021 GOES SFB 837 & EURO:TUN 2022

Due to the pandemic situation, EURO:TUN will be shifted to 22.-24.6.2022 as an in-person event in Bochum. The EURO:TUN conference will be combined with a workshop on Interaction Modeling in Mechanized Tunneling, which will be organized 21.6.2022. The new conference name is International Conference on Computational Methods and Information Models in Tunneling incorporating Interaction Modeling in Mechanized Tunneling - SFB 837 & EURO:TUN.

Figure 1: Cover picture of the conference SFB 837 & EURO:TUN 2022 (© Institute for Structural Mechanics)

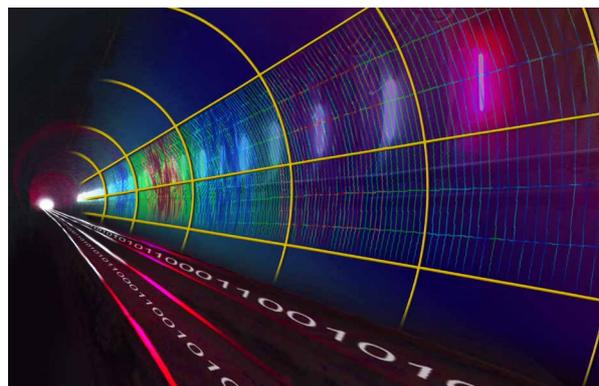




Figure 2: Interactive investigation of tunneling induced building damage risks (© RUB, Kramer)



The registration link and more information can be found at the conference website: eurotun2021.rub.de



Further information on the SFB 837 final workshop sfb837.sd.rub.de

TOPICS:

- integration of computational and information models for tunnel planning and design,
- modeling of machine-ground and soil-structure interaction,
- numerical models for tunnel excavation, ground-tool interaction and face stability,
- process and logistics simulation,
- data driven modeling, machine learning, data mining, and expert systems in subsurface engineering,
- model-based design of lining systems,
- multi-phase and multi-scale models for soils and rocks and the temporary and permanent support in tunneling,
- procedures for parameter identification, and methods of inverse analysis,
- sensitivity analysis, uncertainty modeling and risk analysis,
- other related topics.

REGISTRATION

The registration for the in-person event „SFB 837 & Euro:Tun 2022“ is possible until 21st May 2022.

SFB 837 FINAL WORKSHOP

On June 21, 2022, the SFB 837 will hold its final workshop with invited speakers from Germany and abroad.

ERFOLGREICHER FELDVERSUCH ZUM HOT-DRY-ROCK-VERFAHREN: FORSCHUNGSPROJEKT UNTER DER LEITUNG DER RUHR UNIVERSITÄT BOCHUM MACHT ENERGIE HEISSER GESTEINSSCHICHTEN DURCH HYDRAULISCHE STIMULATION ZUGÄNGLICH

Verfasst von:
Tobias Backers



Weblink

In der Region München wird seit vielen Jahren erfolgreich geothermisch Energie gewonnen. Hierbei wird üblicherweise auf sogenannte hydrothermale, d. h. natürliche Thermalwasser-Lagerstätten im tiefen Untergrund zurückgegriffen, aus denen das heiße Wasser leicht einer Bohrung zufließt. Vielfach ist jedoch im tiefen Untergrund das Gebirge wenig durchlässig und das heiße Thermalwasser kann der Bohrung nicht zuströmen.

In solchen petrothermalen Lagerstätten können durch eine gezielte Stimulation die existenten, aber wenig durchlässigen Klüfte für das Thermalwasser durchlässig gemacht werden. In den Demonstrationsprojekt ‚ZoKrateS‘ unter Leitung der Arbeitsgruppe ‚Ingenieurgeologie und Felsmechanik‘, wurde nun erstmals südlich Münchens in einer vorhandenen Bohrung gezeigt, dass das Gebirge durch das Verfahren für die Geothermie in dem typischen Lager-

stättengestein technisch durchführbar ist und das Potenzial hat, bisher nicht nutzbare Lagerstätten zu erschließen.

Das Forschungsvorhaben ‚ZoKrateS‘ hat das Ziel den Standort Geretsried in Bayern für die Geothermie zu erschließen. An dem Pilotprojekt ist eine Reihe von erfahrenen Institutionen und Firmen beteiligt. Neben den Forschungseinrichtungen Leibniz-Institut für



Kurzinformationen zum Projekt:

„Zonierte Reservoirbehandlung an natürlichen Klüftzonen in tiefliegenden Karbonaten zur Entwicklung eines petrothermalen Standortes in Deutschland“

Förderung: BMWi FKZ 03EE4010

Bewilligungszeitraum: 01.01.2020 - 30.09.2022

Projektvolumen: 10 Mio €

Partner: Enex Power Germany GmbH, LIAG Leibnitz, Institut für Angewandte Geophysik, Geothermie Neubrandenburg GmbH, G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH

Bild 1: Luftbild der eingesetzten 350t Bohranlage am Standort Geretsried vor dem Alpenpanorama

Angewandte Geowissenschaften (LIAG) und der Ruhr Universität Bochum (RUB) sind dies die Enex Geothermieprojekt Geretsried Nord als Eigentümer des Feldes und der Bohrung, die G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft sowie die Geothermie Neubrandenburg. Die operativen Arbeiten wurden im Auftrag der RUB durch Daldrup & Söhne, Schlumberger und Kemco durchgeführt.

Der Standort Geretsried verfügt über heißes Gebirge von etwa 160°C bei etwa 4,5 km Tiefe, allerdings sind die vorhandene Klüfte überwiegend geschlossen. Daher ist der Standort für die hydrothermale Geothermie nicht geeignet, zeigt allerdings aufgrund der geologischen Gegebenheiten ein deutliches Potential für eine petrothermale Nutzung.

Die Bohrung GEN-1ST-A1 wurde bereits 2017 erstellt. Ziel waren die heißen Wässer in den Kalksteinschichten des Malm, welche am Standort Geretsried in 4,4 bis 4,8 Kilometern Tiefe liegen. Von Juli bis Oktober 2021 wurde im Rahmen des durch das BMWi geförderte Projektes ‚ZoKrateS‘

erstmals in Deutschland eine hydraulische Stimulation an einer tiefen Geothermiebohrung in den Kalkgesteinen des Malm durchgeführt. Hierbei wurden in mehreren Zonen spezielle Keramik Kügelchen, sog. Stützmittel, tief in das bestehende Klüftnetzwerk in der Nähe einer Störungszone eingebracht. Die natürlichen Fließwege zur Bohrung wurden auf diese Weise geweitet und für eine Thermalwasserzirkulation durch die Stützmittel geöffnet.

Die technische Umsetzung des Projektes beinhaltete umfangreiche Vorarbeiten wie z. B. die Vermessung der Bohrung und den Einbau eines speziellen Ausbaus im Malmabschnitt der bestehenden Bohrung. Die Herausforderungen lagen unter anderem in der Adaption des in der Kohlenwasserstoffindustrie entwickelten Verfahrens an die großen Tiefen der Lagerstätte und hohen Temperaturen von bis zu 163 °C. Bei der Planung und Umsetzung des Projektes war daher interdisziplinäre Expertise aus Wissenschaft und Industrie gefordert. Die Auswertung der Injektionsversuche dauert derzeit an. Erste Er-

gebnisse deuten darauf hin, dass durch das Verfahren eine signifikante Erhöhung der Gebirgsdurchlässigkeit erreicht werden konnte. Die Injektion und das Einspülen der Stützmittel konnte bei sehr niedrigen Drücken realisiert werden, welche nur geringfügig über den in der Lagerstätte herrschenden Wasserdrücken lag; das Überschreiten der wirkenden Gebirgsauflast war nicht notwendig, um die Keramik Kügelchen in die Klüfte zu transportieren, damit diese offen bleiben können.

Sollten sich die Ergebnisse bestätigen, würde dies die Möglichkeit einer petrothermalen Nutzung am Standort Geretsried eröffnen. Um die im heißen, dichten Gebirge gespeicherte Energie nutzbar zu machen, würde mittels des getesteten Verfahrens ein großer Wärmetauscher zwischen zwei Bohrlöchern geschaffen. Dazu wird Wasser durch eine Bohrung in das Gebirge eingepresst, fließt durch die miteinander verbundenen und durch die Stützmittel geöffneten Klüfte zur zweiten Bohrung und wird dabei erwärmt. Das heiße Wasser würde dann in einem Kraftwerk genutzt und nach Abkühlung wieder in die

erste Bohrung eingeleitet; somit würde eine geschlossener Kreislauf ermöglicht, über den geothermische Energie erzeugt wird.

Dem Projektteam ist es mit der hydraulischen Stimulation der

Bohrung Geretsried gelungen den Eintrag von Stützmitteln als technische Grundvoraussetzung für eine zukünftige petrothermale Nutzung erfolgreich zu demonstrieren. Darüber hinaus wurden wichtige Erfahrungen im Umgang mit dieser

Technologie gesammelt, um eine Übertragbarkeit auf andere Standorte in Deutschland realisieren zu können. Das erfolgreiche Projekt stellt einen wichtigen Meilenstein für die Geothermie in Deutschland dar.

VERFORMUNGSFÄHIGER TUNNELAUSBAU IM GESAMTSYSTEM „DRUCKHAFTES GEBIRGE – RINGSPALTMÖRTEL – TÜBBING“

Verfasst von:
Christina Krikelis,
Rolf Breitenbücher



[Weblink](#)

Der maschinelle Tunnelvortrieb mit Tübbingausbau hat in den letzten Jahren kontinuierlich an Bedeutung gewonnen. Entsprechend müssen auch die geologischen Randbedingungen beachtet werden, um einen geeigneten Tunnelausbauwiderstand zu gewährleisten. Bei druckhaftem Gebirge mit hohem Verformungsvermögen und geringer Festigkeit kann es zwischen dem umgebenden Boden und dem Tunnelausbau zu kritischen Spannungszuständen kommen, die es zu verhindern gilt.

Druckhaftes Gebirge erfährt bei einer Hohlraumbildung eine Lastumlagerung, die eine spannungsbedingte Entfestigung des Gebirges und größere Verformungen zur Folge haben kann. Dieser Thematik wird derzeit im Sonderforschungsbereich 837 „Interaktionsmodelle im maschinellen Tunnelbau“ nachgegangen (Teilprojekte B1 und B3). In diesem Rahmen ist das Ziel kompressible, zementgebundene Materialien zu entwickeln, die durch ein ausgeprägtes Stauchvermögen die radial einwirkenden Gebirgsverformungen kompensieren und langfristig die Stabilität für den Tunnelausbau gewährleisten. Derartige Anforderungen können sowohl durch eine im Tübbing integrierte Stauchschiicht, als auch durch den Einsatz von verformungsfähigen Ringspaltmörteln, ggfs. auch in Kombination, erreicht werden (s. Bild 1).

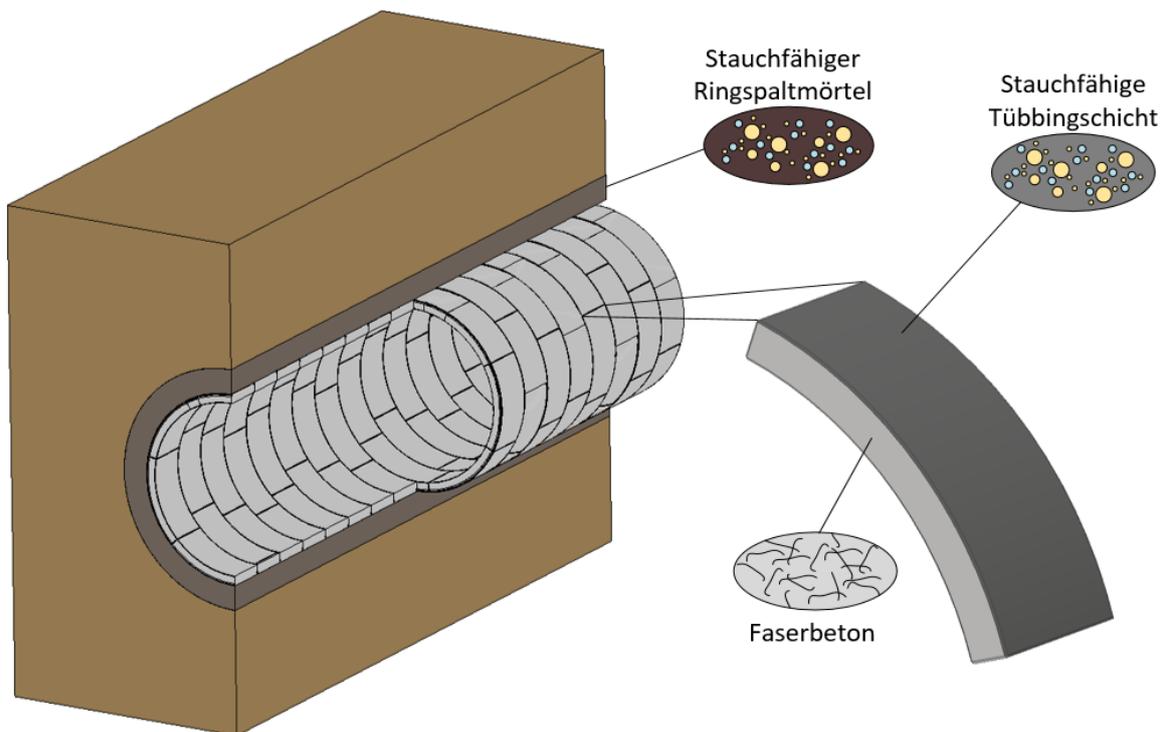


Bild 1: Darstellung eines nachgiebigen Tunnelausbaus

Zur Realisierung eines ausreichenden plastischen Verformungsvermögens wurden bis zu 80 % der regulären Materialkomponenten eines Ringspaltmörtels bzw. Tübbingbetons durch stauchbare Additive, bspw. expandierte Polystyrolkugeln, Blähglasgranulat und künstliche Luftporen, ersetzt. In einem Kompressionsversuch, d.h. statischem Druckversuch mit voller Umschnürung, konnte für eine

stauchfähige Tübbingsschicht und einen stauchfähigen Ringspaltmörtel ein Stauchpotential von bis zu 75 % nachgewiesen werden (s. Bild 2).

Das aus dem Kompressionsversuch zu entnehmende Stauchverhalten wird anhand der Spannungs-Verformungskurve charakterisiert und kann in drei Bereiche unterteilt werden. Zunächst liegt ein annähernd linear

elastisches Materialverhalten vor (Bereich I). Je höher die Festigkeit des Materials, desto zunehmender ist die Steigung in diesem Bereich. Beim Verlassen des linear elastischen Bereichs erfährt das Material eine größtenteils irreversible Volumenkompression und zeigt ein ausgeprägtes plastisches Stauchvermögen (Bereich II). Je nach Steifigkeit des Materials kann über einen großen Verformungsbereich eine nahezu konstante Spannung gehalten werden. Entsprechend erfährt die stauchfähige Tübbingsschicht, mit vergleichsweise höherer Steifigkeit, einen frühzeitigeren Spannungsanstieg als der weichere Ringspaltmörtel. Das Gesamtstauchvermögen wird letztlich durch die zunehmende innere Verdichtung begrenzt (Bereich III).

Da der Ringspaltmörtel in den verfahrensbedingt entstandenen Hohlraum zwischen Tübbingaußenseite und umgebenden Boden verpresst wird, muss dieser zusätzlichen Anforderungen entsprechen: ausreichende Fließfähigkeit, Pumpbarkeit, vollständige Verfüllung des Ringraums, keine vorzeitige Komprimierung der stauchbaren Additive infolge des Verpressdrucks. Zur Simulation des Vepressvorgangs und damit der Berücksichtigung all dieser Effekte wurde vom Lehrstuhl

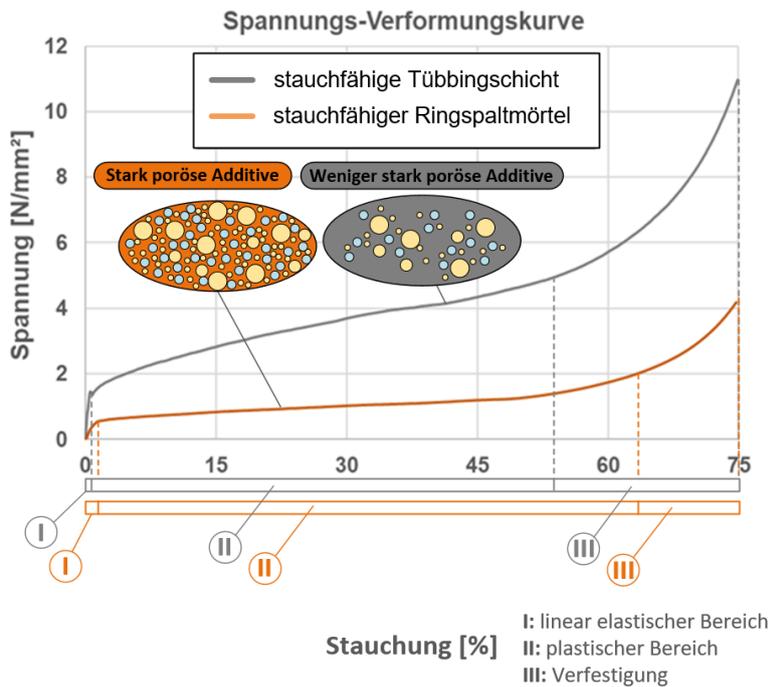


Bild 2: Spannungs-Verformungskurve einer stauchfähigen Tübbingsschicht (mit weniger stark porösen Additiven) und eines stauchfähigen Ringspaltmörtels (mit stark porösen Additiven)

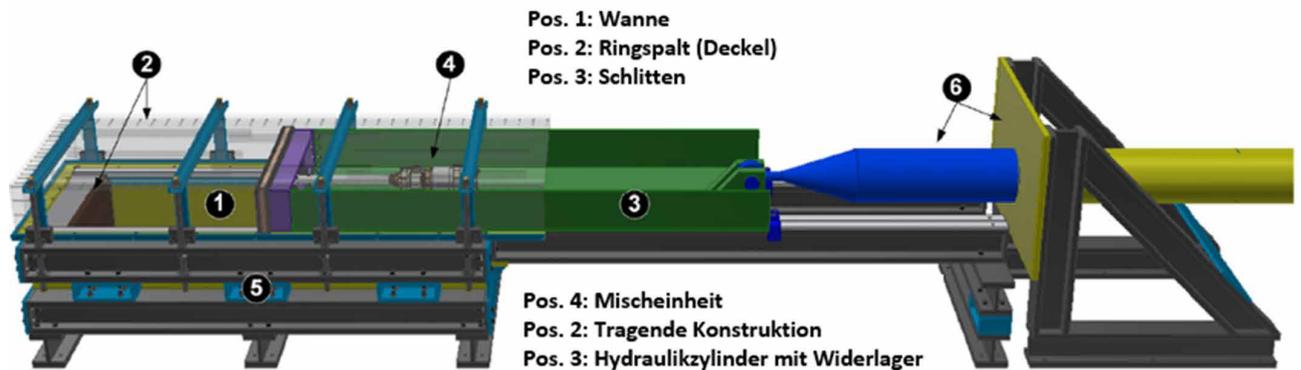


Bild 3: Schematische Darstellung des Versuchsstands zur Simulation einer Ringspaltverpressung

für Baustofftechnik ein großformatiger Versuchsstand entwickelt. Der Versuchsstand besteht aus sechs Baugruppen: Wanne (Aufnahme des Bodens), Schlitten (simulierte Tunnel-

nelvortriebsmaschine bzw. dessen Schildschwanz), der Ringspalt, die Mischeinheit (Vermischung der Materialkomponenten) die Rahmenkonstruktion und der Hydraulikan-

trieb inkl. Widerlager. Der Ringraum besitzt die Form eines Quaders (Länge: 1,5 m, Breite: 0,6 m, Höhe: 0,15 m) mit einem Volumen von 135 Litern (s. Bild 3).

Die Ergebnisse der Verpressversuche bestätigen, dass der verformungsfähige Ringspaltmörtel eine homogene Verteilung im Ringraum zulässt und grundsätzlich als geeignetes Ringspaltverfüllmaterial anzunehmen ist. Zudem weisen die händisch hergestellten Laborproben und die entnommenen Bohrkern des verpressten Materials aus dem Versuchsstand ein vergleichbares Stauchvermögen auf (s. Bild 4). Somit ist im vorliegenden Fall von keiner signifikanten Vorkomprimierung der stauchbaren Additive auszugehen.

Nachdem die nachgiebige Ringspaltmörtel- und Tübbingschicht separat für sich entwickelt wurden, lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass diese kombinierbar zum Einsatz kommen können. Folglich erschließt sich mit dem Gesamtsystem „Verformungsfähiger Tunnelausbau“ ein Ansatz zur Kompensation der Gebirgsverformungen.

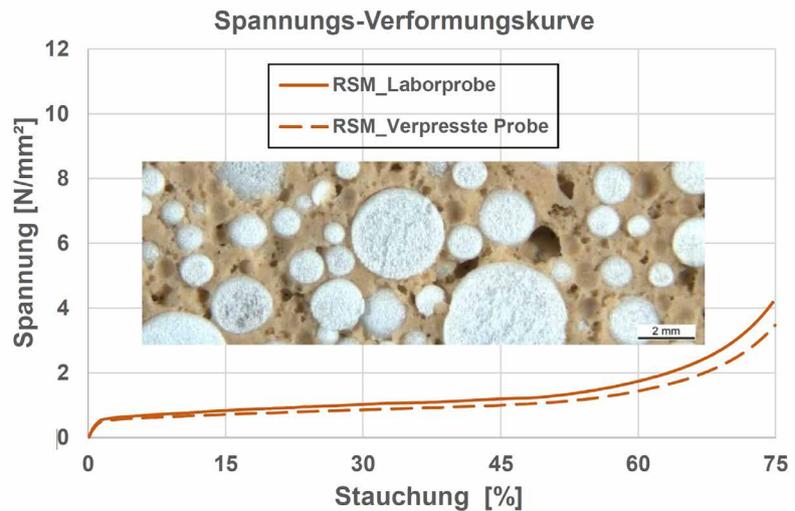


Bild 4: Vergleich der Spannungs-Verformungskurve einer händisch hergestellten Laborprobe und einer aus dem Verpressversuch (Verpressdruck 2,0 bar) entnommenen Probe eines verformungsfähigen Ringspaltmörtels; lichtmikroskopische Gefügeaufnahme des verpressten Materials (Vergrößerung: 80-fach)

A SIMULATION-BASED APPROACH FOR THE REAL-TIME INTERACTIVE DESIGN OF TUNNEL ALIGNMENT

Verfasst von:

Ba-Trung Cao ¹,
Hoang-Giang Bui ¹,
Abdullah Alsahly ¹,
Steffen Freitag ²,
Günther Meschke ¹



¹ Weblink: Lehrstuhl
Statik & Dynamik, RUB



² Weblink: Institut für
Baustatik, KIT

Recently, with the technological advances in mechanized tunnelling, the number of tunnels constructed using Tunnel Boring Machines (TBM) has significantly increased in urban areas. Continuous developments allow them to go deeper, to become longer, and with larger diameters.

A major challenge during the early design phase of tunnel projects is to find a feasible and reasonable alignment, which is, however, a challenging task due to economic interest, budget constraints as well as the variation of technical aspects such as soil conditions, tunnel diameters or existing surface infrastructures from project to project. Therefore, within the framework of C1 sub-project of the Collaborative Research Center SFB 837 "Interaction Modeling in Mechanized Tunneling", a research topic focuses on the development of a simulation-based assistant tool, which can provide the real-time prediction of surface settlement and associated risks on damages of existing buildings inducing by

the tunnelling process in urban area. Using this tool in the context of an interactive tunnel alignment design concept, the impacts on built environment for different possibilities of the alignment are visualized immediately corresponding to each interactive adjustment from users or engineers, which can support the decision-making alignment selection.

The basis of the approach is a tunnel simulation model, which is based on Cut Finite Element Method (CutFEM). The computational model is characterized by the following components: the ground, the tunnel lining, the grouting filling the tail void gap and the tunnel boring machine, interacting via contact conditions with

the surrounding soil. These components are identical to the model components of a process oriented model for mechanized tunneling based on the standard boundary-fitted FEM. The CutFEM model possesses a number of distinctive features which makes it more advantageous for tunnel simulation than the classical methods based on boundary-fitted discretization. Firstly, CutFEM approach allows for independent meshing of structural components, i.e. the ground, the lining and the TBM. On one hand, each component can be meshed structuredly, leading to simplification of mesh generation and improving discretization quality. On the other hand, the integration of

CAD to the simulation becomes more straightforward. Sophisticated components, such as the TBM and the buildings can be imported from the CAD modelling software and connected with the background mesh to improve the resolution of the results and pragmatism of the analysis. In this context, the mesh is not required to conform with the real geometry of the tunnel. This allows effectively simulating and analyzing different tunnels with changing alignment using the same background mesh. This approach is highly beneficial during the design stage of tunnel projects, where the designer has to select an optimal path for tunnel construction, which best fits the design constraints, e.g.

the risk of settlement induced damage. A fast and reliable computational solution strategy allows to quickly adapt to new design changes, and to promote quick and accurate design decisions. Potential damage of the buildings is evaluated based on the maximum principal tensile strain (ε_1 , $\varepsilon_1 \geq 0$) evaluated in each building separately. The damage level categories of a building are ranged from negligible, very slight, slight, moderate and severe damages, which correspond to the colors green, yellow, purple, red and black in visualization. Figure 1 shows an application of the CutFEM model to investigate the building damages under three different variants of the tunnel alignments.

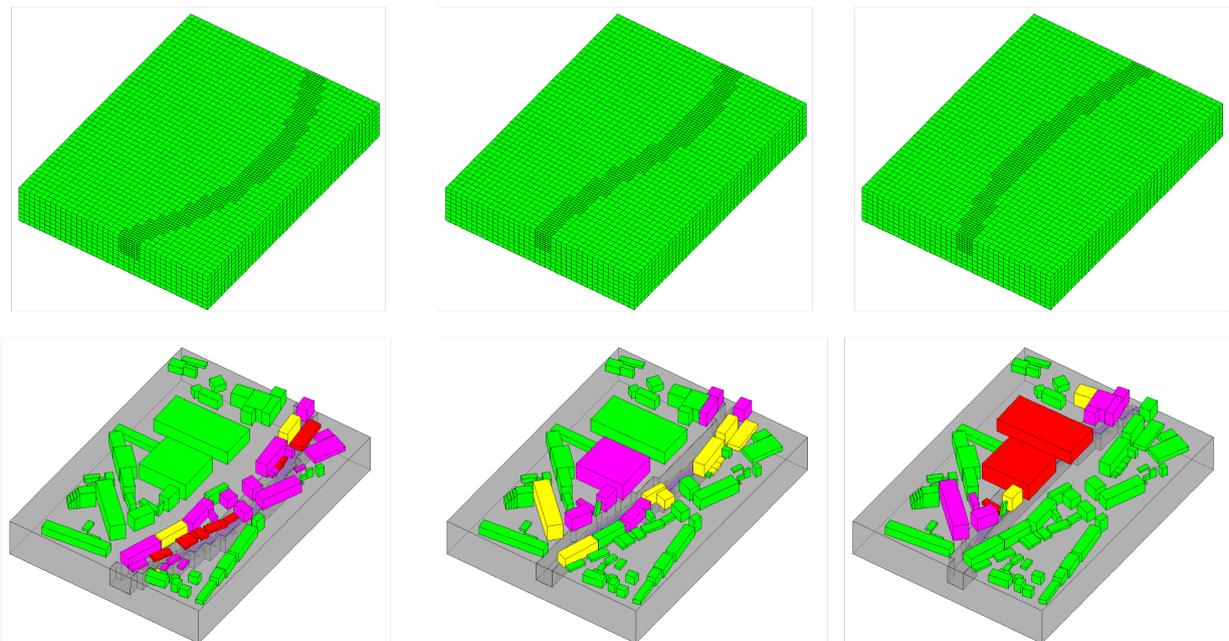


Figure 1: CutFEM models used to investigate design variants in urban tunneling: Analysis of alignment variant 1,2 and 3 (left, middle and right). Top: Background mesh for CutFEM analysis; Bottom: Visualization of building damage assessment.

To obtain the simulation results in a real-time manner of the interactive design concept, a surrogate model is employed to substitute the time-consuming CutFEM numerical model. The objective of the surrogate model is to predict the complete surface settlement field and damages in existing buildings for arbitrary tunnel alignments with similar accuracy as the original CutFEM model. To create the surrogate model, in the offline

stage, i.e. before the interactive real-time design procedure, the process-oriented CutFEM model is used to simulate the mechanized tunneling processes with various tunnel alignments. For each simulation, input parameters are coordinates of a set of points which can represent the tunnel alignment and outputs are settlement at surface points and maximum strains in existing buildings. From this input-output dataset, a surrogate

model based on the Proper Orthogonal Decomposition method and Radial Basis Functions (POD-RBF) is established, which can be used during the online stage, i.e. the interactive real-time design procedure. Figure 2 (left) shows a collection of 2000 possible tunnel alignments which are simulated during the offline phase to generate the POD-RBF surrogate model. To have an impression about the quality of the POD-RBF model, the surface sett-

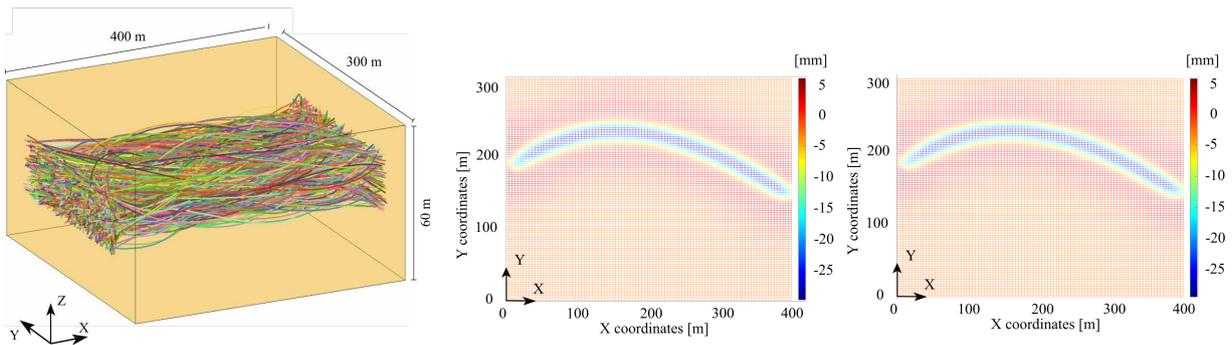


Figure 2: POD-RBF surrogate model. Left: 2000 tunnel alignments simulated to establish the POD-RBF surrogate model; Middle: settlement field with 10,000 surface points obtained from CutFEM model; Right: settlement field with 10,000 surface points obtained from POD-RBF model.

lement fields with 10,000 points obtained from CutFEM simulation model and POD-RBF model for a representative tunnel alignment are visualized respectively in Fig. 2 (middle and right). The mean average percentage error between two results is only around 1%, which implies a very good prediction capability of the surrogate model. The advantage of the approach is

the computation time is substantially shortened from 8 hours to less than 1 seconds.

The proposed approach has been implemented into a user-friendly application as shown in Fig. 3. In the context of real-time applications for the interactive tunnel alignment design this implies, that firstly, from an intuitive alignment change, new input

points, which are well approximated the new alignment, will be created. With the coordinates of the new input points, the POD-RBF network is called to approximate the spatial field of surface displacements and the building damages. The quickly predicted results are visualized and used to support the design engineer in selecting appropriate alignments for further investigations.

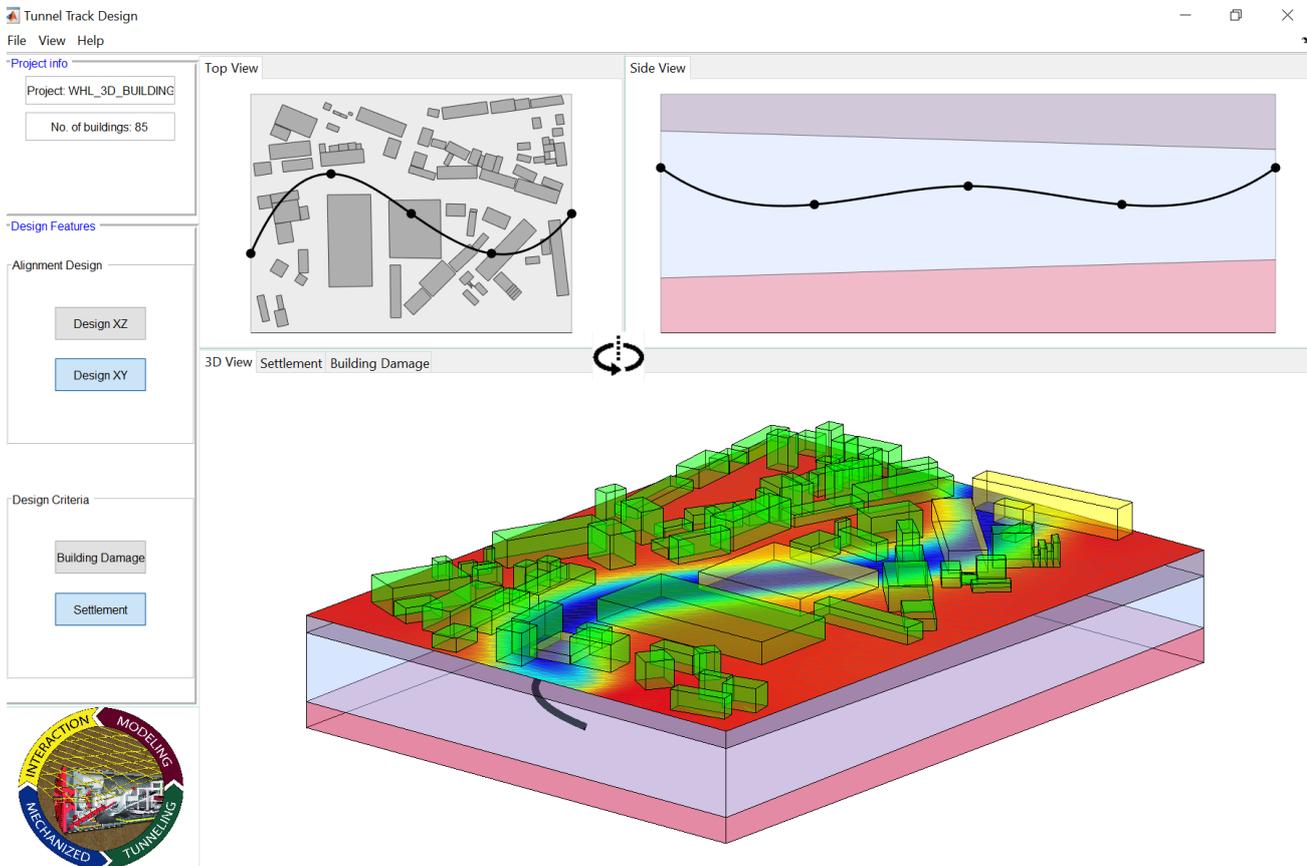


Figure3: Screenshot of the application "Tunnel Alignment Interactive Design – TunAID", developed as an assistant tool for the real-time interactive alignment design in mechanized tunnelling.

PETROGRAPHIC EVIDENCE AND NUMERICAL QUANTIFICATION DOCUMENT CATASTROPHIC, BASIN-WIDE FLUID ESCAPE BURSTS IN AN OVERPRESSURED BASIN

Petrographic evidence points to catastrophic, basin-wide release of overpressured fluids resulting in near-instantaneous precipitation of large volumes of calcite cement encasing dolostone hostrock clasts several dm in size. Numerical calculations provide evidence for the fluid volumes involved and the upward fluid flow velocity required to explain these observations.

In collaboration with colleagues at the Fraunhofer Research Institution for Energy Infrastructures and Geothermal Systems (IEG) and the Karlsruhe Institute of Technology (KIT), the Department for Sediment and Isotope Geology at RUB has a focus on geothermal carbonate reservoir characterization. One relevant aspect is the reconstruction of parameters controlling past and present fluid flow in the subsurface. We report on the geological evidence for fluid overpressure in Devonian limestones (Massenkalk). Overpressured basins have been reported worldwide, and fluid expulsion from these basins has general significance from an applied perspective. Pore fluids are overpressured when the hydrostatic gradient at a specific depth is exceeded. Hydrostatic pressure gradients are generated by a continuous and static fluid column above. A series of geological processes can produce overpressure in sedimentary basins. However, the simplest way to generate overpressure is found in the case of diagenetic lithification during sediment burial and disequilibrium compaction. This process is important during the rapid subsidence of low permeability sediments. The key to fluid migration is a hydraulic head gradient. Without a noteworthy

hydraulic heat gradient, fluid migration in low-porosity basinal rocks is a relatively slow process, taking mainly place along crystal or grain boundaries in a diffusional manner or along structural pathways. During the evolution of an active basin, horizontal changes in the stress regime can generate or increase overpressure, with a maximum often found in tectonically active zones. When reaching critical pressure values, episodic, basin-wide fluid expulsion events may occur. Generally, three steps are recorded: (i) the formation of overpressured compartments, (ii) density inversion between the overpressured basin units and the overlying and underlying seal establishes, (iii) hydraulic fracturing of host rocks with pressure release through fluid expansion into (and beyond) the newly formed fracture pathways. Phases of fluid expulsion are often followed by renewed pressure increase leading to an episodic expulsion cycle. When field and drill core samples display breccia generated by hydraulic fracturing, these are taken as a telltale sign for high fluid flow velocities resulting from high-pressure expulsion events. These processes can be described as escape bursts. The timing and the flow rates of escape burst leading to the brecciation of

Verfasst von:
Adrian Immenhauser^{1,3},
Mathias Müller¹,
Benjamin Walter²,
Tobias Kluge²,
Kevin Lippert³



¹ Weblink: Arbeitsgruppe Sediment & Isotopengeologie, RUB



² Weblink: Institut für Angewandte Geowissenschaften, KIT



³ Weblink: Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG



Figure 1: Steltenberg Quarry near Hagen, Germany (© A. Verdecchia (RUB))

fully lithified carbonates are not well-constrained and rarely described from the rock archive.

We report field evidence for catastrophic escape bursts from the Devonian Massenkalk of North-Rhine Westphalia (Steltenberg Quarry, near Hagen). The petrographic features observed are hydrofracture breccia clasts encased three-dimensionally in carbonate cement (Figs. 2, 3) that occlude the fracture. This observation has four main implications: (i) Hydrofractures formed during a catastrophic fluid expulsion event (the timing of which is presently unknown); (ii) fluid flow velocities through the opening hydrofractures were such that dm-sized rock clasts, breaking from the fracture walls, were transported and kept in a free-floating mode within the turbulent upward gush-

ing fluid; (iii) kinetically triggered rapid calcite cement precipitation from the fluid occluded the hydrofracture while the rock fragments remained in a floating mode as they are encased in cement; (iv) given that between 9000 and 11000 m³ of oversaturated fluid are required to precipitate one cubic metre of CaCO₃, the fluid volumes involved must have been significant.

We apply a combination of field, thin section and numerical approaches to quantify the processes involved. The foundation of our work is the observation of gravity-defying hostrock clasts encased in calcite cement in up to 50 cm-wide fractures. Thin section, particularly fluid inclusion evidence from the calcite cement, suggests that the fluids in the hydrothermal vein were incompletely homogenized in

terms of their geochemistry, and variable mixing ratios on small scales took place. Hence, the calcite precipitation rate from these fluids was higher than the diffusional or turbulent flow equilibration of the previously unmixed fluid components in the pore space of the underlying units. These observations are translated into an equation to model the minimum time required to homogenize the mixed fluid batches by diffusion as the main driving force. A minimum growth rate for the calcite cement that rapidly occluded the fractures and encased the carbonate rock clasts can be estimated.

Following hydraulic fracturing of the fully lithified host rock, fluids from variable burial depths were sucked into the fractures by a hydraulic head and formed streaks of

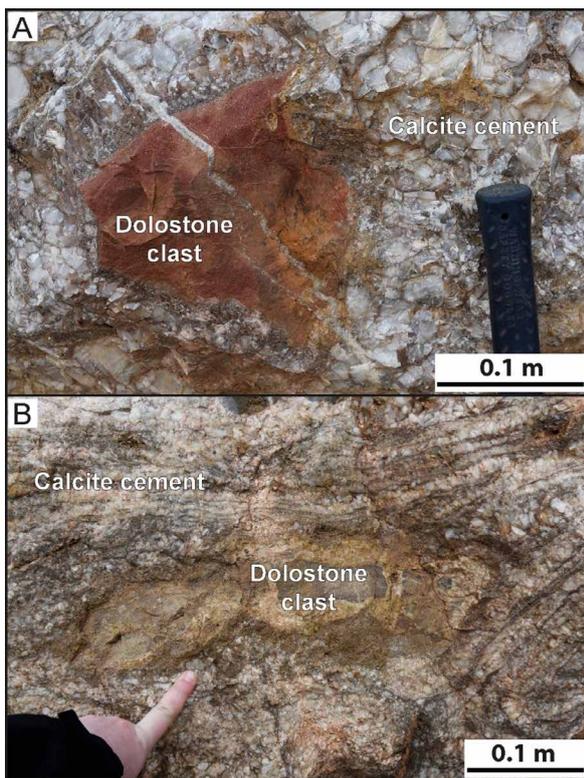


Figure 2 A/B: Dolostone clasts encased in hydrothermal calcite cement in Steltenberg quarry, Hagen, NRW. Following hydraulic fracturing of overpressured carbonate rocks resulting in escape bursts, clasts from fracture walls are kept in suspension by upward gushing fluids. Calcite cement near-instantaneously precipitates from these fluids and grows from the fracture wall and the clasts surface into the fluid-filled fracture. With ongoing cement precipitation, clasts are embedded within the matrix of carbonate cement that occludes the fractures, and fluid expulsion rates first slow down and then cease.



Figure 3: Thin-section image of carbonate cement growing near-instantaneously from clast (dark red, at base) into the open fracture. The image is about 2 cm wide.

kinetically prohibited self-diffusion for a specific short time interval. The temperature equilibration can be depicted by thermal equilibration with $DT \approx 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (for ca 150 °C), whereas the compositional variations need to be calculated by chemical equilibration $Dm \approx 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ (for ca 150 °C). To demonstrate the kinetic diffusion on the growth zone, the distance x must match the diffusion rate and the time, which results in the equation $\langle X \rangle = \text{SQRT}(2 * D \Delta T)$. This leads to a minimum duration for the precipitation of each of the tens of μm -wide growth zones within the cement filling the fractures. Results obtained suggest a duration of ca 0.01 to 0.02 s for chemical equilibration and ca 0.001 to 0.01 s for thermal equilibration of cogenetic fluid inclusions in calcite cement across a distance of about 20 and 60 μm . These data agree with experimental growth rates for calcite (sub- $\mu\text{m}/\text{h}$ to up to 100 $\mu\text{m}/\text{h}$). In the case observed here, much higher precipitation rates are likely. The microthermometry results

and the textures indicate mixing processes far-from-equilibrium conditions, resulting in significantly higher calcite cement precipitation rates. The fluid inclusions in this cement lack evidence for a time gap between trapping of the adjacent inclusions, nor do they show post-entrapment modifications. These features agree with rapid calcite cement precipitation rates required to encase free-floating breccia clasts within the hydrofractures.

The velocity of the upward flow of the expelled fluid is determined from the force balance between gravity and drag force. Judging from an *in-situ* cemented clast with a diameter of about 30 cm (Fig. 2), the fluid velocity required must be in the range of 2.1 to 9.4 m/s. The upper value of 9.4 m/s refers to a clast representing a perfect sphere with a minimum drag coefficient under fully turbulent conditions (i.e., $C_d = 0.1$ at $Re \geq 1\,000\,000$; Fig. 4). However, the clasts observed in the field are an-

gular (Fig. 2). Hence, the drag coefficient could be up to four times higher at the same conditions and Reynolds numbers. The highest expected drag coefficient at lower Reynolds numbers are between 10^5 and 10^6 ($C_d = 2$), leading to the lowest necessary velocity of about 2.1 m/s. Based on these considerations, a fracture with a width of several dm will be rapidly occluded by calcite cement encasing dm-clasts that are kept in suspension. The lower duration for the complete filling of the fracture by carbonate cement is 75 s (700 m^3 brine, 9.4 m/s) and 5200 s (11 000 m^3 brine and 2.1 m/s). This extremely rapid calcite precipitation rate is also supported by the dewatering calculation that suggests a time scale of about 30 min and petrographic evidence (Fig. 3, 4) lacking the layered characteristic of slow, long-term fluid flow from deep levels of a given basin. In the authors' view, these observations are relevant when drilling into km-deep geothermal Devonian limestone reservoirs in NRW.

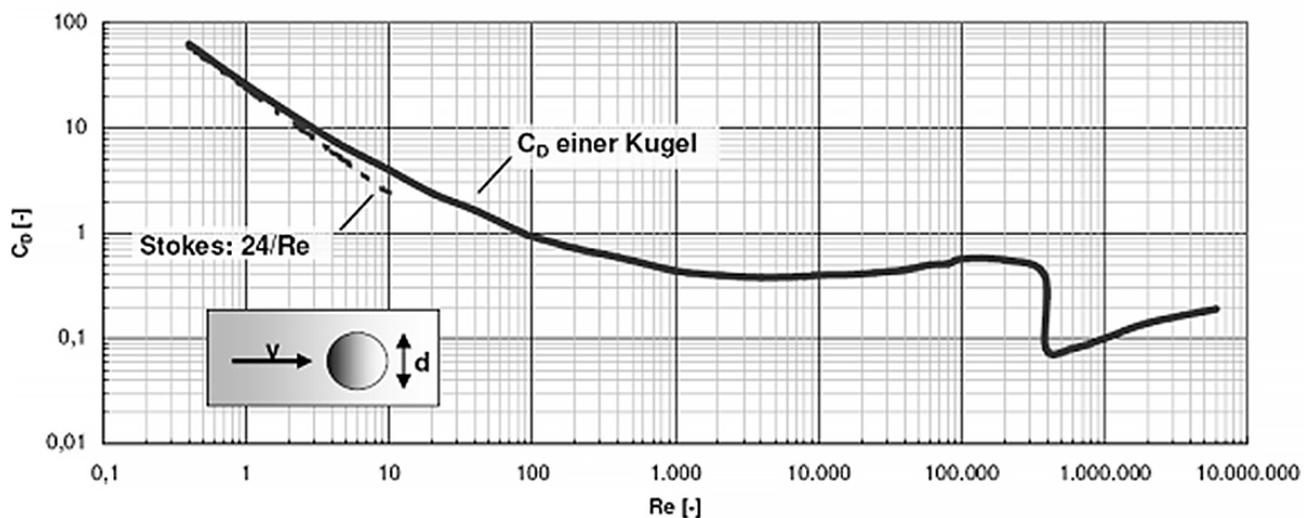


Figure 4: Plot shows the drag coefficient calculation versus Reynolds number, assuming hypothetical clasts in the form of perfect spheres. As shown in figure 2, the clasts do not qualify as perfect spheres but are irregular and angular objects; hence higher drag coefficients are likely.

MODELLE ZUR KOSTENPROGNOSE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON RISIKEN FÜR DIE PLANUNG VON STRASSENTUNNELN

Verfasst von:
Peter Hoffmann
Markus Thewes



Weblink zur
Dissertation

Kostenprognosen im Straßentunnelbau unterliegen aufgrund zahlreicher Risiken und ungenauer Eingangsdaten einer großen Unsicherheit. Zudem führen die Komplexität der Bauvorhaben und insbesondere die geotechnischen Herausforderungen häufig zur Überschreitung der geschätzten Gesamtkosten.

Zur Verbesserung von Kostenprognosen wurde seitens des BMVI und der BAST das Forschungsvorhaben FE15.577/2012/ERB „Verfahren für Kostenansätze bei Straßentunnel“ initiiert, in dem vom Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb neue Kostenstrukturen und Kostenmodelle entwickelt wurden. Im Rahmen der Dissertation wurden sie um ein Risikomodell ergänzt. Dafür wurden die Daten von insgesamt 17 Straßentunnelprojekten der jüngeren Vergangenheit in gro-

ßer Detailtiefe analysiert. Abschließend wurde eine Onlineanwendung für das BMVI und die Bundesländer durch die BAST entwickelt.

Bei den Analysen stellte sich heraus, dass die Leistungsverzeichnisse der 17 Tunnel große strukturelle Unterschiede aufweisen. Um eine einheitliche Auswertung der Daten zu ermöglichen, wurden Basisvarianten unterschiedlicher Straßentunneltypen und Kostenstrukturen erarbeitet (s. Bild 1).

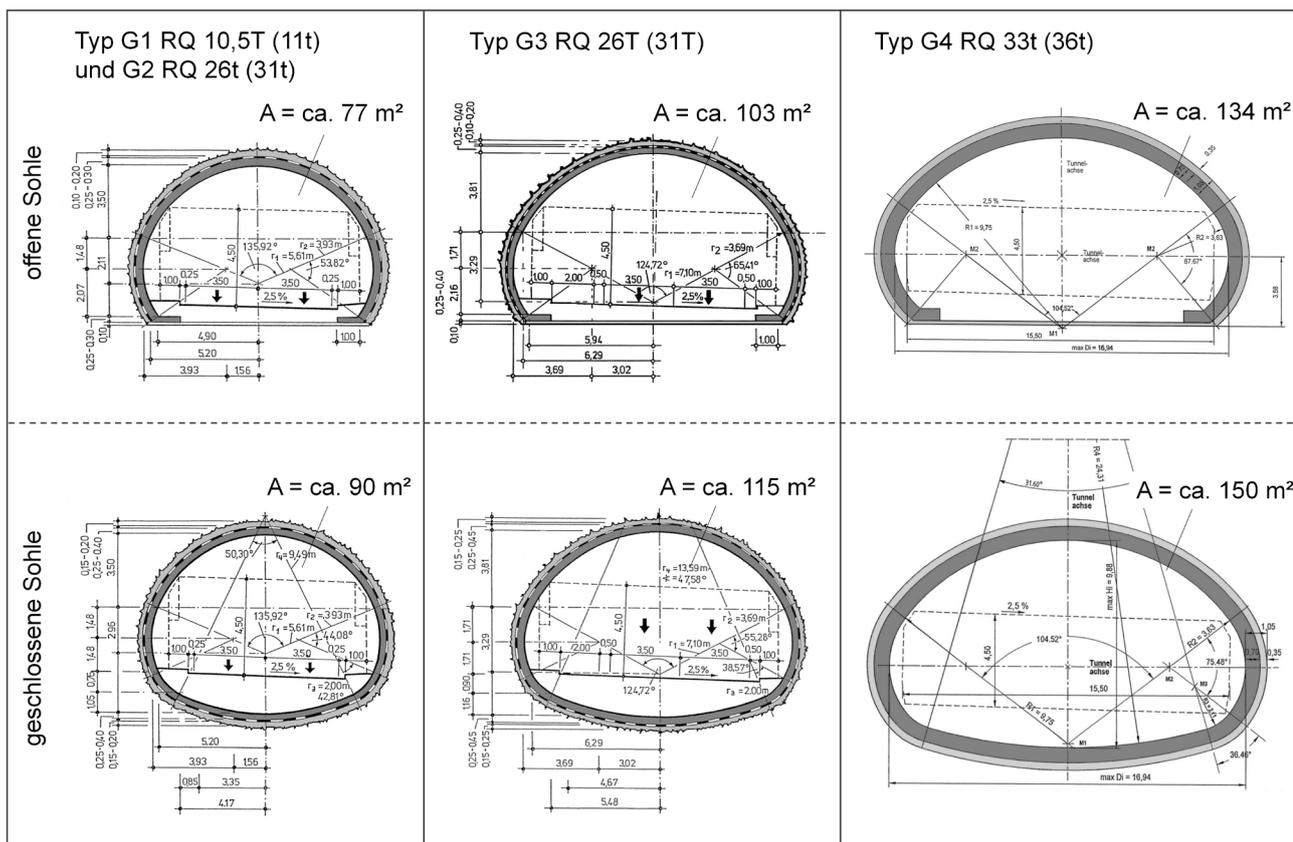


Bild 1: Querschnittsdarstellungen der Bauwerksvarianten der geschlossenen Tunnelbauweise

Zudem wurde deutlich, dass die Preisspiegel große Variationen zwischen den einzelnen Bietern zeigen, so dass sich eine große Bandbreite für den Angebotspreis eines Projekts ergibt. Daher wurde

ein ganzheitliches stochastisches Kostenprognosemodell entwickelt, für dessen Anwendung aus den approximierten Kostendaten definierte Verteilungsfunktionen abgeleitet wurden. Als Ergebnis

dieses Modells wird eine Häufigkeitsverteilung des prognostizierten Gesamtpreises berechnet. Zudem werden ein prognostizierter wirtschaftlichster und mittlerer Angebotspreis ermittelt (s. Bild 2).

Das Risikomodell baut ebenfalls auf einem stochastischen Ansatz auf. Aus den Daten der Nachtragsanalysen werden Regressionsfunktionen mit Indikatoren als Laufvariable abgebildet. Die Unsicherheiten werden durch Verteilungsfunktionen berücksichtigt, die

auf den spezifischen Daten basieren. Die kombinierte Anwendung von Kostenprognose- und Risikomodell ermöglicht die Abschätzung einer Kostenbandbreite und eines Schlusspreises sowie die Identifikation von Risiken (Risikoregister) in frühen Planungsphasen.

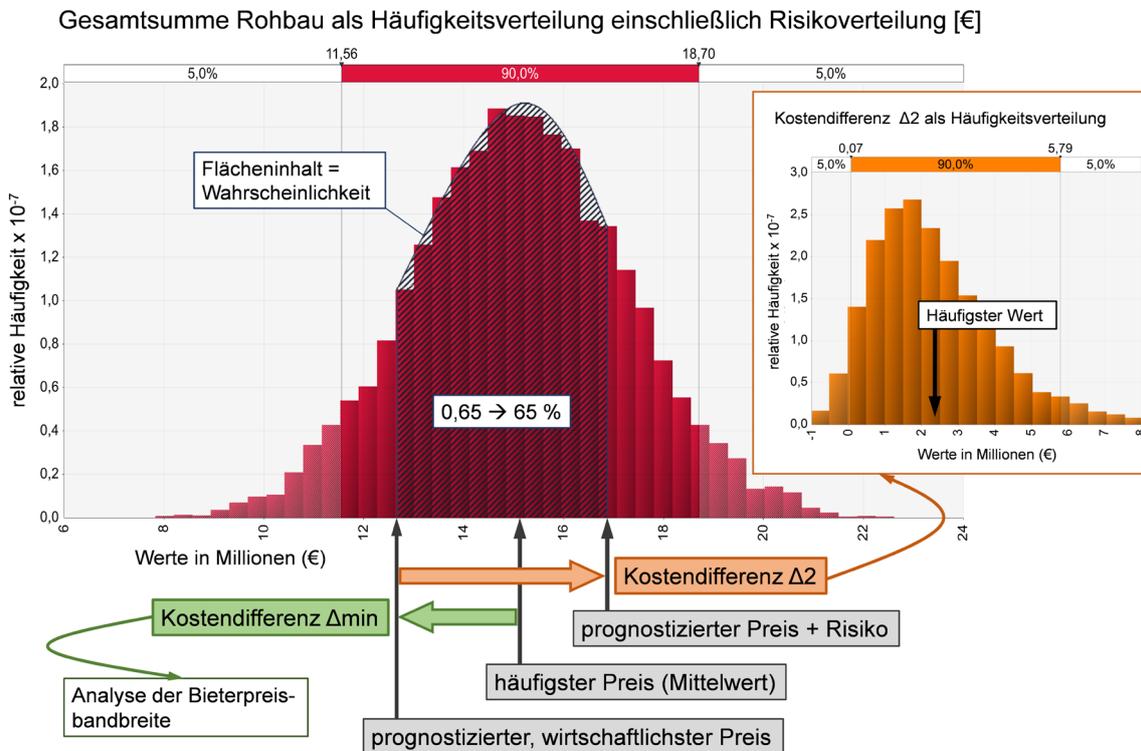


Bild 2: Ergebnis des Kostenprognosemodells als Häufigkeitsverteilung einschließlich Risikoverteilung

ELEKTRISCHE WIDERSTANDSMESSUNGEN ZUR BESCHREIBUNG DER PARTIKELEINLAGERUNG WÄHREND DER PENETRATION VON BENTONIT IN KOHÄSIONSLOSES LOCKERGESTEIN

Beim maschinellen Tunnelbau mit Flüssigkeitsstützung wird die Ortsbrust mit einer unter Druck stehenden Bentonitsuspension gestützt. Der aufgebrachte Druck wird über eine sich ausbildende Membran, über Schubspannungen an den Kornoberflächen des Baugrunds bzw. eine Kombination dieser Mechanismen übertragen. In Abhängigkeit vom Größenverhältnis zwischen Porenraum und Bentonitpartikeln bildet sich einer dieser Mechanismen aus.

Am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum wurde im Teilprojekt A6 des Sonderforschungsbereichs 837 auf Basis geoelektrischer Widerstandsmessungen ein Versuchsstand entwickelt, um das Eindringverhalten von Bentonitsuspensionen in Lockergestein zu untersuchen. Die genaue Kenntnis des an der Ortsbrust wirkenden Stützmechanismus während eines flüssigkeitsgestützten Schild-

vortriebs ist für die Stabilität der Ortsbrust von besonderer Bedeutung. In Abhängigkeit vom Größenverhältnis zwischen Porenraum und Bentonitpartikeln treten unterschiedliche Abfilterungsmechanismen auf. Je nach auftretendem Mechanismus wird der Stützdruck entweder über eine sich ausbildende Membran, auftretende Schubspannungen während der Penetration in den Baugrund an den Kornoberflächen oder einer Kombination

Verfasst von:
Sebastian Kube
Markus Thewes



[Weblink](#)

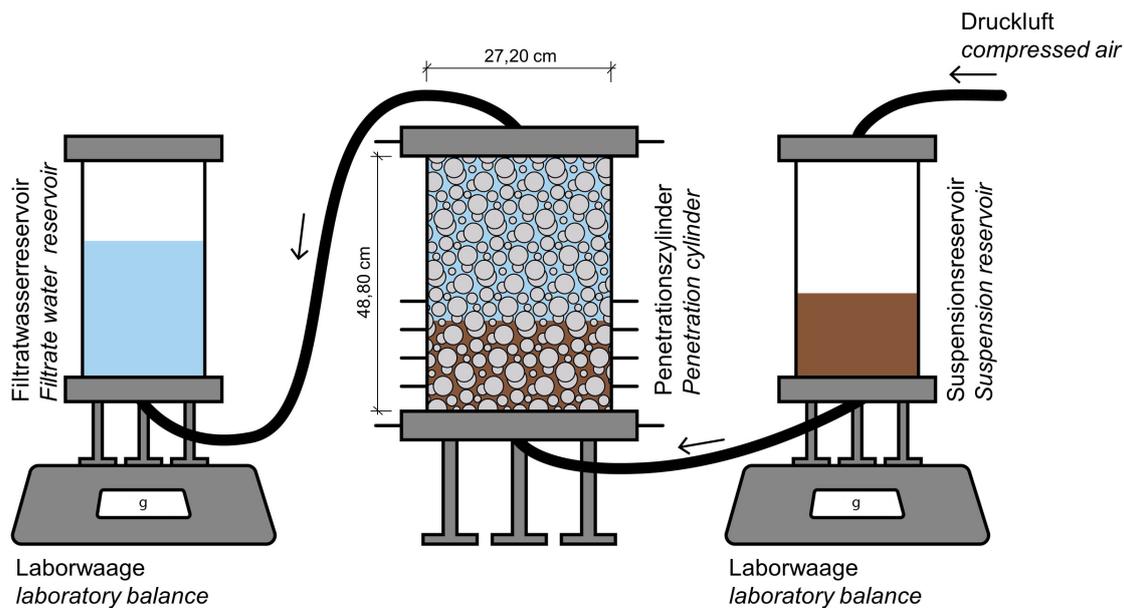


Bild 1: Schematischer Versuchsaufbau zur Untersuchung des Eindringverhaltens von Bentonitsuspensionen in Lockergestein

dieser Mechanismen übertragen. Mit zunehmender Penetration verändern sich aufgrund der Abfiltrierung die Fließeigenschaften der Bentonitsuspension. Bislang ist die Veränderung der Fließeigenschaften nicht direkt nachweisbar.

Bild 1 zeigt schematisch den entwickelten Versuchsaufbau zur Untersuchung des Eindringverhaltens. Die Bentonitsuspension wird im Suspensionsreservoir mit Druckluft beaufschlagt und kann so in den wassergesättigten Boden im Penetrationszylinder eindringen. Das dort verdrängte Wasser wird im Filtratwasserreservoir gesammelt.

Die am Penetrationszylinder angebrachten Elektroden ermöglichen die Messung des elektrischen Widerstands an mehreren Stellen innerhalb des Bodenkörpers. Die Penetration der Bentonitsuspension in Lockergestein kann so zeit- und ortsabhängig aufgezeichnet werden. Bei den Versuchen können der aufgebrachte Druck, der Bodentyp sowie die Qualität Bentonitsuspension variiert werden.

Qualitative Unterschiede in der Einlagerung von Bentonitpartikeln werden messbar und es können Schlussfolgerungen über den Einlagerungsprozess gezogen

werden. Im Detail ist hier die weitergehende Analyse der Versuchsdaten von besonderer Wichtigkeit. Die gemessenen elektrischen Widerstände in Verbindung mit den Eigenschaften der Bentonitsuspension sowie des Lockergesteins sollen zukünftig Erkenntnisse über die Veränderung der Suspensions-eigenschaften über die Eindringtiefe liefern. Erste Modellansätze befinden sich derzeit in der Entwicklung. Das übergeordnete Ziel ist es ausführlichere Informationen zum Eindringprozess sowie den dazugehörigen Stützdruckberechnungen zu erhalten.

NEUES INTERDISZIPLINÄRES FORSCHUNGSPROJEKT ZUR HETEROGENEN BENTONITHYDRATATION

Verfasst von:
Antonia Nitsch,
Wiebke Baille



[Weblink](#)

Im Rahmen des neuen interdisziplinären Forschungsprojekts „Sandwich Support-Projekt 1: Heterogene Bentonithydratation“ wird am Lehrstuhl für Bodenmechanik, Grundbau und Umweltgeotechnik der Ruhr-Universität Bochum in Zukunft am skalenerübergreifenden Quelldruckverhalten von Bentonit geforscht.

Das vom BMWi geförderte Kooperationsprojekt (Laufzeit 12/2021 – 11/2024) mit dem Kompetenzzentrum für Materialfeuchte (CMM) am Karlsruher Institut für Technologie steht in engem Zusammenhang zum

Hauptprojekt „Vertikales hydraulisches Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip“, in welchem die Funktionalität des vor nunmehr 20 Jahren vom CMM patentierten Dichtsystems erstmals als in-Situ-Expe-

riment demonstriert wird. Durchgeführt wird die großmaßstäbliche in-Situ-Installation aktuell im internationalen Felslabor Mont Terri (CH) (<https://www.mont-terri.ch/en/home.html>) unter Beteiligung zahlreicher Projektpartner. Für die Materialentwicklung des Sandwich-Dichtsystems wird das Sandwich Support-Projekt 1 in Zukunft wichtige Kenntnisse über den Skalenübergang bei der Quelldruckprognose des abdichtenden Bentonits von der molekularen auf die makroskopische Ebene liefern.

Im Gegensatz zu Dichtsystemen aus reinem Bentonit besteht das Sandwich-Dichtsystem aus sich abwechselnden Sand- und Bentonitschichten, wie in Bild 1 zu sehen ist. Auf diese Weise wird die eindringende Feuchtigkeit in der hydraulisch durchlässigeren Sandschicht, dem Equipotentialsegment (ES), neu verteilt und gleichmäßig an die Bentonitschicht, dem Dichtsegment (DS), weitergegeben. Fingering innerhalb der Dichtung oder Bypass entlang der Kontaktzone des Verschlusses zum umgebenen Wirtsgestein werden somit vermindert und die Abdichtungswirkung verbessert.

stein werden somit vermindert und die Abdichtungswirkung verbessert.

Anwendung findet das Sandwich-Dichtsystem im Rahmen der nuklearen Endlagerung. Es besteht internationaler Konsens, hochradioaktiven Abfall in geologischen Tiefenlagern zum Schutz von Mensch und Umwelt von der Biosphäre zu isolieren. Dabei basieren die meisten nationalen Konzepte auf dem Multibarrierenprinzip aus Wirtsgestein (geologische Barriere), geotechnischer Barriere und

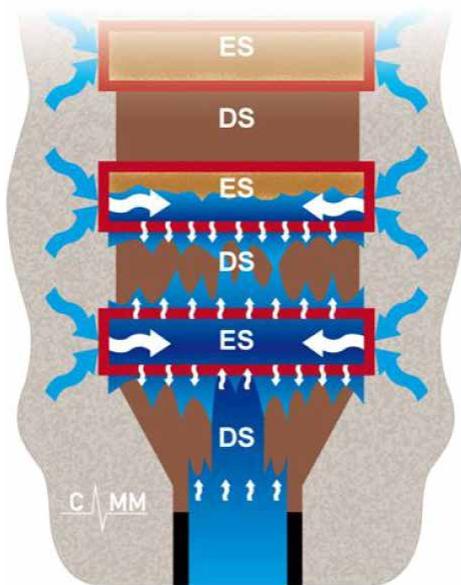


Bild 1: Vertikales Dichtsystem nach dem Sandwich-Prinzip mit abwechselnden Equipotential- und Dichtsegmenten (Schuhmann et al. 2009)

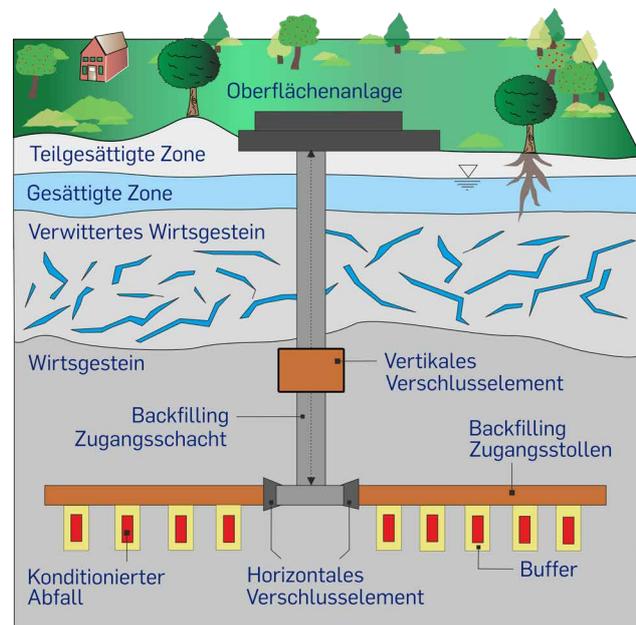


Bild 2: Schematische Darstellung eines Tiefenlagers für die nukleare Endlagerung nach dem Multibarrierensystem (modifiziert nach Rawat 2019)

konditioniertem Abfall, das schematisch in Bild 2 dargestellt ist.

Der geotechnischen Barriere bestehend aus der Abdichtung im Nahfeld des Kanisters (Buffer) und den Verschlusselementen (Backfill) in Stollen und Schächten kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, da diese infolge der Einlagerung geschaffene Wegsamkeiten in der geologischen Barriere sicher und zuverlässig wieder verschließt. Aufgrund ihrer Quellfähigkeit und damit einhergehenden geringen Durchlässigkeit eignen sich Bentonite oder Bentonit-Sand-Gemische allge-

mein als Abdichtungsmaterial der geotechnischen Barriere. Für die Langzeitsicherheit der Barriere ist insbesondere die Hydratation des Bentonits entscheidend, welche durch lokale Heterogenitäten als Folge des technischen Einbauprozesses oder aufgrund intrinsischer Strukturinhomogenitäten maßgebend beeinflusst wird und die Sicherheit der Barriere unter Umständen vermindert. Die technologisch bedingten Heterogenitäten in Verschlussbauwerken können durch das Sandwich-Dichtsystem gelöst werden, wie Experimente im Halbtechnikums-Maßstab gezeigt haben (Emmerich et al. 2019).

Demgegenüber können die intrinsischen Strukturinhomogenitäten der quellfähigen Tonminerale im Bentonit ein heterogenes Hydrationsverhalten verursachen. Während der Aufsättigung ablaufende chemische Austauschprozesse mit den anstehenden Fluiden führen zu räumlich und zeitlich variierenden Hydrationsverläufen, wie beispielhaft durch die heterogene Verteilung der Kationenaustauschkapazität und Feuchte innerhalb eines Dichtsegments in vorherigen Versuchen im Halbtechnikums-Maßstab in Bild 3 verdeutlicht wird. Neben den Zustandsparametern des Bentonits ändern sich

auch die von außen einwirkenden Randbedingungen über die Zeit.

Das Ziel des hier vorgestellten Projektes ist die Vorhersage des makroskopischen Quelldrucks und die hydro-mechanisch-chemische

modellierung von Bentonitdichtelementen basierend auf den initialen und sich ändernden Randbedingungen (teilweise behindertes Quellen am Anfang, vollkommen behindertes Quellen am Ende), Hydratationsbedingungen

und physiko-chemischen Bentoniteigenschaften. Damit erfolgt der Skalenübergang von der molekularen auf die makroskopische Ebene, s. Bild 4. Das Vorhaben trägt dazu bei, die Frage zu beantworten, ob die Bentonitbarriere einen

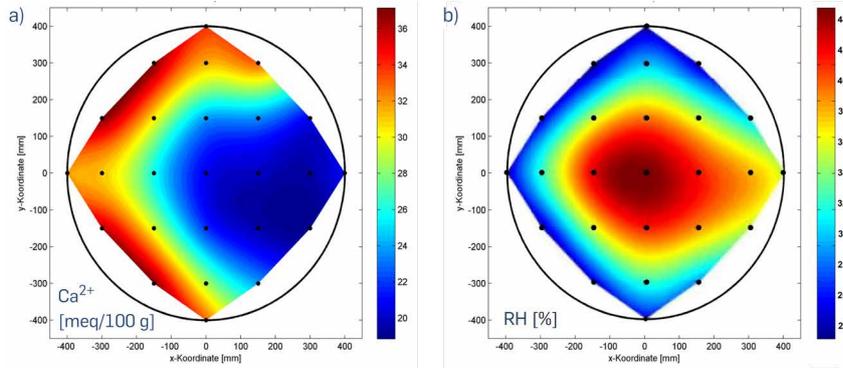


Bild 3: Materialheterogenitäten innerhalb eines Dichtsegments im Halbtechnikums-Versuch (modifiziert nach Schuhmann et al. 2009): a) Kationenaustauschkapazität von Ca^{2+} [mq/100g], b) Relative Feuchte [%]

Gleichgewichtszustand bei $t \rightarrow \infty$ erreicht, wodurch die Gesamtperformance des Sandwich-Systems verbessert wird.

Im Forschungsprojekt werden hierzu die mineralogischen Austauschprozesse und die Porositätsentwicklung von zwei verschiedenen Calcium-Bentoniten aus Deutschland während der Aufsättigung im μCT untersucht (Mikroskala). Hierfür ist die Entwicklung einer Mini-Quelldruckzelle erforderlich. Auf der Elementskala sind Versuche zum hydro-mechanischen Verhalten (Quelldruck- und Quellhebungsversuche, Saugspan-

nungs-Wassergehalts-Beziehung) geplant. Auf der Makroskala werden Säulenversuche an den Bentoniten durchgeführt, in denen das Verhalten der Barriere infolge von initialer und transients Heterogenität hinsichtlich der Porosität, der Materialeigenschaften und verschiedenen Randbedingungen als Randwertproblem untersucht werden kann. Im Gegensatz zu den Elementversuchen ändern sich die lokalen Randbedingungen in der Probe zeitabhängig, die Probe ist heterogen, solange der Aufsättigungsprozess noch nicht abgeschlossen ist. Insbesondere ändert sich die Porengrößenver-

teilung, was sich unmittelbar auf die Gas- und Fluidpermeabilität auswirkt. Der Skalenübergang zur quantitativen Quelldruckbeschreibung wird anschließend in einem zwischen dem CMM und dem Lehrstuhl geteilten Arbeitspaket zur Entwicklung eines Modells zur Quelldruckvorhersage realisiert. Die Erkenntnisse des Support-Projektes ermöglichen in Zukunft so auch den Übergang auf die in-Situ-Skala, wodurch die Erfolgsaussichten des Sandwich-Dichtsystem für die zukünftige Anwendung insgesamt maximiert werden.

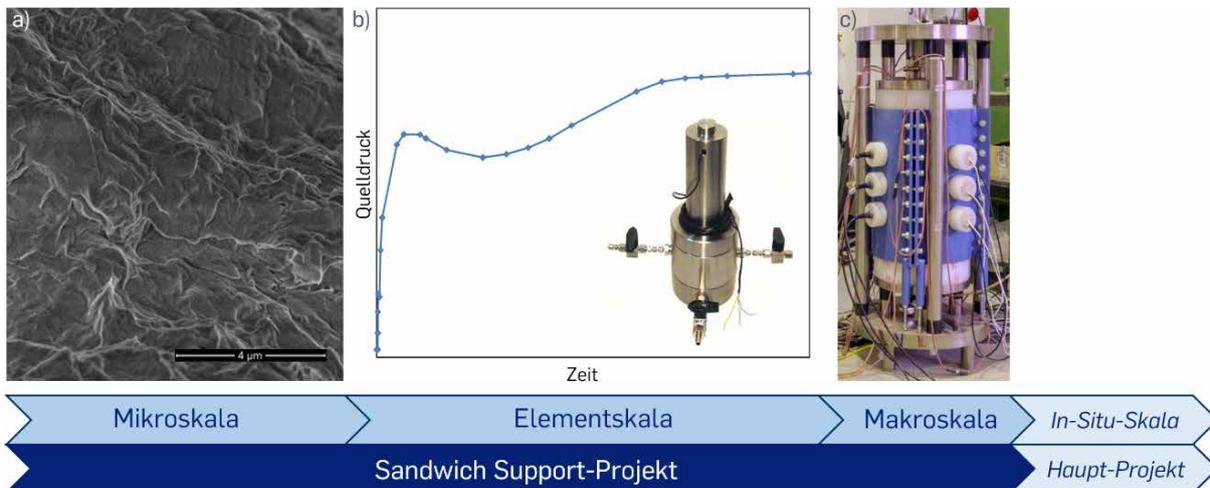


Bild 4: Skalenübergang von der Mikroskala zur In-Situ-Skala: a) Mikroskop-Aufnahme eines kompaktierten Bentonits, b) Quelldruckverlauf in Elementversuchen, c) Instrumentierter Säulenversuchsstand (Rawat et al. 2021)