



10. Symposium Umweltgeotechnik





10. Symposium Umweltgeotechnik

Nachhaltige Materialien, Produkte und Prozesse	580
Reduktion von Primärbaustoffen durch Einsatz von Aushubmaterial aus dem maschinellen Tunnelbau	580
<i>Budach, Christoph¹; Müller, Pierre¹; Siebert, Björn¹; Thienert, Christian²; Leismann, Frank²; Heiermann, Thomas³; Uebachs, Stephan; Liepins, Simon⁵; Schmidt, Lukas⁵; Uhlmann, Dirk⁴; Kleen, Eugen⁴; Koppe, Karsten⁴; Volhard; Max-Fabian⁴</i>	
<i>¹Technische Hochschule Köln, ²STUVA e.V., Köln, ³Brameshuber + Uebachs INGENIEURE GmbH, Aachen, ⁴MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG, Bottrop, ⁵IMM Maidl & Maidl Beratende Ingenieure GmbH & Co. KG, Bochum</i>	
Der Einsatz von Ersatzbaustoffen beim Bau und bei der Begrünung von geokunststoffbewehrten Konstruktionen	586
<i>Schwerdt, Sven¹; Schneider, Petra¹; Achtel, Francis¹</i>	
<i>¹Hochschule Magdeburg-Stendal</i>	
Zeitabhängige Entwicklung der erdbautechnischen Eigenschaften von ZFSV aus rezyklierten Baustoffen	592
<i>Huber, Stefan¹; Zeni, Melissa²; Birl, Emanuel²</i>	
<i>¹Boley Geotechnik GmbH, München, ²Technische Universität München</i>	



Thermische Aktivierung von Abwasserkanälen und Einbettung in ein Wärme-Kälteverbundnetz – Konkrete Anwendung des Quartieransatzes	598
<i>Kugler, Till¹; Moormann, Christian¹</i> <i>¹Universität Stuttgart</i>	
Untersuchungen zur Empfindlichkeit von zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen gegenüber witterungsbedingten Beanspruchungen	604
<i>Zeni, Melissa¹; Huber, Stefan²; Birle, Emanuel¹</i> <i>¹Technische Universität München; ²Boley Geotechnik GmbH</i>	
Geothermische Charakterisierung und Testbetrieb eines mitteltiefen Erdwärmesondenspeichers im Forschungs- projekt SKEWS	610
<i>Seib, Lukas¹; Landau, Matthias¹; Bossennec, Claire²; Bunes, Hermann³; Lehr, Clemens⁴; Stumpf, Jürgen⁵; Sass, Ingo^{1,2}</i> <i>¹Technische Universität Darmstadt, ²GFZ Deutsches GeoForschungs-Zentrum, Potsdam, ³Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover, ⁴Geotechnisches Umweltbüro Lehr, Bad Nauheim, ⁵H. Angers Söhne Bohr- und Brunnenbaugesellschaft mbH, Hessisch Lichtenau</i>	
Bohrtechnische Erfahrungen bei der Errichtung eines mitteltiefen Forschungs-Erdwärmesondenspeichers (SKEWS)	616
<i>Landau, Matthias¹; Seib, Lukas¹; Bossennec, Claire²; Handke, Heiko³; Muhl, Jürgen⁴; Stumpf, Jürgen⁵; Schindler, Uwe⁵; Sass, Ingo^{1,2}</i> <i>¹Technische Universität Darmstadt, ²GFZ Deutsches GeoForschungs-Zentrum, Potsdam, ³Handke Brunnenbau GmbH, Dirmstein, ⁴STEP Oiltools GmbH, Bad Fallingb. ⁵H. Angers Söhne Bohr- und Brunnenbaugesellschaft mbH, Hessisch Lichtenau</i>	
Zur Bewertung der Nachhaltigkeit einer Deponie	622
<i>Heibroock, Gunnar¹; Vieffhaus, Hanna²; Lesny, Carsten³; Witzsche, Andreas⁴; Wudtke, Robert⁵</i> <i>¹Hochschule Kaiserslautern, ²REMONDIS Production GmbH, Lünen, ³Asmus + Prabucki Ingenieure GmbH, Essen, ⁴Ingenieurbüro Roth&Partner GmbH, ⁵wudtke geotechnik – INGENIEURBÜRO, Weimar</i>	



Reduktion von Primärbaustoffen durch Einsatz von Aushubmaterial aus dem maschinellen Tunnelbau

Prof. Dr.-Ing. C. Budach & Dr. P. Müller, Technische Hochschule Köln, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umwelttechnik, Institut für Baustoffe, Geotechnik, Verkehr und Wasser, Lehr- und Forschungsgebiet Geotechnik und Tunnelbau

Prof. Dr.-Ing. B. Siebert, Technische Hochschule Köln, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umwelttechnik, Institut für Baustoffe, Geotechnik, Verkehr und Wasser, Lehr- und Forschungsgebiet Baustoffe

Dr.-Ing. C. Thienert & Dipl.-Ing. F. Leismann, STUVA e. V., Köln

Dr. T. Heiermann & Dr.-Ing. S. Uebachs,

Brameshuber + Uebachs INGENIEURE GmbH, Aachen

Dipl.-Ing. S. Liepins & M.Sc. L. Schmidt,

IMM Maidl & Maidl Beratende Ingenieure GmbH & Co. KG, Bochum

D. Uhlmann, E. Kleen, Dr. K. Koppe & Dr. M.-F. Volhard,

MC Bauchemie Müller GmbH & Co. KG, Bottrop

Die Verwertung von Böden hat in den letzten Jahren u. a. aufgrund der Verknappung von verfügbaren Beseitigungskapazitäten an Bedeutung gewonnen. Die Realisierung von Tunnelbauprojekten stellt dabei eine Besonderheit dar, da über einen kurzen Zeitraum lokal große Mengen an Boden anfällt. Im Lockergestein werden Tunnel üblicherweise mit Tunnelbohrmaschinen mit flüssigkeits- oder erddruckgestützter Ortsbrust hergestellt. Häufig werden auch Vortriebe in heterogenen Baugrundverhältnissen, u. a. mit tonhaltigen Böden realisiert. Der anstehende Boden wird verfahrensbedingt verändert, so dass das Aushubmaterial möglicherweise aufbereitet werden muss, bevor dieses verwertet oder beseitigt werden kann. So kann Aushubmaterial in die Gruppen Material zur Rohstoffsubstitution, Material zur Verwendung für erd- und verkehrswegebauliche Zwecke oder Material für Landschaftsbauwerke unterteilt werden. Ziel der Verwertung sollte es immer sein, den Baustoff Boden möglichst ökologisch sinnvoll zu nutzen.

Aushubmaterial aus dem maschinellen Tunnelbau im Lockergestein kann für verschiedene Möglichkeiten der Rohstoffsubstitution genutzt werden. Aus diesem Grund werden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Aufbereitung und Aktivierung von Tonböden für ressourceneffiziente Geopolymer-Baustoffe“, kurz TOFFEE, seitens des BMBF gefördert. Das Ziel des Forschungsvorhabens, welches durch Brameshuber + Uebachs Ingenieure GmbH, IMM Maidl & Maidl Beratende Ingenieure GmbH & Co. KG, STUVA e. V., MC Bauchemie Müller GmbH & Co. KG und die Technische Hochschule Köln umgesetzt wird, ist es, innovative ressourceneffiziente Baustoffe auf der Basis von tonhaltigen Böden zu entwickeln. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den eingesetzten tonhaltigen Böden und deren Eigenschaften, der Aufbereitung dieser Böden sowie der Eignung des aufbereiteten Materials als Ausgangsstoff für Bindemittel in mineralischen Baustoffen.

1 Einleitung

Boden und Steine machen fast 60 % des mineralischen Bauabfalls in Deutschland aus, wovon jährlich fast 17 Mio. t auf Deponien beseitigt werden, (Bundesverband Baustoffe, 2023). Grund- und Tunnelbauprojekte nehmen hierbei eine besondere Stellung ein, da große Massen zeitlich und örtlich punktuell anfallen (Thienert et al., 2019). Gemäß Tunnelbaustatistik der STUVA für Deutschland sind etwa 60 Projekte mit einer Ausbruchmasse von ca. 7 Mio. t pro Jahr in Realisierung (Schäfer, 2019). Dieser Menge steht eine ebenfalls sehr große unmittelbare

Nachfrage an Baustoffen, für deren Herstellung mineralische (Boden-)Rohstoffe benötigt werden, gegenüber: z. B. Ton für Ziegel, Kalkstein für Zement, Gesteinskörnung für Beton und Asphalt sowie Bodenmaterial für erd- und verkehrswegebau technische Zwecke. Während im Zuge von großen Grund- und Tunnelbauprojekten bereits teilweise eine Verwertung von nicht-bindigem Bodenmaterial (Kies und Sand sowie gelöster Fels) zumeist innerhalb des Projekts erfolgt, wird dies vor allem bei bindigen Böden (Schluffe und Tone) häufig als schwierig und unwirtschaftlich erachtet. Wesentliche Gründe hierfür sind, dass zum einen fast immer eine Aufbereitung

erforderlich ist, und zum anderen im besten Fall letztlich nur ein qualitativ relativ geringwertiges Bodenmaterial vorliegt. Häufig werden bindige Böden daher im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes „beseitigt“.

Bei der Herstellung von großen Infrastrukturprojekten wird sehr viel Beton bzw. als Bestandteil dessen viel Zement benötigt. Vor dem Hintergrund der großen Mengen an CO₂, die bei der Herstellung von Portlandzementen freigesetzt werden (rd. 5–7 % der weltweiten anthropogenen Emissionen; Battelle Memorial Institute, 2022; International Energy Agency and World Business Council for Sustainable Development, 2009 & 2018), werden Bindemittel, in denen Portlandzementklinker teilweise oder vollständig substituiert sind, zunehmend an Bedeutung gewinnen. Bereits heute werden verbreitet industrielle Nebenprodukte, wie Steinkohlenflugasche aus Kraftwerken und Hüttensand aus der Roheisenerzeugung, erfolgreich als Klinkersubstitut eingesetzt (Verband Deutscher Zementwerke, 2013).

Aus diesem Grund bietet es sich an, innovative ressourceneffiziente Baustoffe auf der Basis von tonhaltigen Böden zu entwickeln, um so eine Beseitigung von großen Bodenmassen aus Grund- und Tunnelbauprojekten auf einer Deponie zu vermeiden. Es werden daher aktuell vermehrt sogenannte calcinierte Tone, d. h. thermisch aktivierte Schichtsilikate wie Kaolinit, Illit und Glimmer, als Zusatzstoff in Betonen bzw. als Zementbestandteil in der Baustofftechnik eingesetzt und werden zukünftig noch eine größere Rolle spielen (vgl. Haist et al., 2023). Diese Materialien weisen sogenannte puzzolanische Eigenschaften auf. Durch die Reaktion des calcinierten Tons mit Calciumhydroxid, das bei der Zementhydratation anfällt, werden durch diese Puzzolanität festigkeitsbildende Phasen gebildet. Das größte Potential aus wirtschaftlich-technischer Sicht bieten Tongemische mit Kaolinitgehalten $\leq 25\%$ (Trümer, 2020). Beim Calcinieren bei Temperaturen zwischen 550 und 850 °C verlieren die Oktaederschichten Hydroxygruppen und verändern so morphologische und physikalisch-chemische Eigenschaften.

Die größte baupraktische Bedeutung haben sogenannte Flash-Calcinatoren, in denen Material bis 2 mm Korngröße der zuvor genannten Temperatur nur über ein bis zwei Sekunden ausgesetzt wird, d. h. eine Temperaturquelle im Luftstrom lediglich passiert (Thienel und Beutner, 2018). Auch in Versuchen zur Nutzung von Tonböden als untergeordnete Baustoffe in Entwicklungsländern kamen Tonböden stets nur in Kombination mit Kalk und gewöhnlichem Portlandzement zur Anwendung (Salvador und Pons, 2000). Vor dem Hintergrund der dort getätigten Untersuchungen sind sowohl stationäre als auch mobile Flash-Calcinatoren als Stand der Technik anzusehen.

Um die Materialien aus Grundbau- und Tunnelbauprojekten bestmöglich zu nutzen, wird aktuell das Projekt „Aufbereitung und Aktivierung von Tonböden für ressourceneffiziente Geopolymer-Baustoffe“ (TOFFEE) realisiert. Das Ziel des Forschungsvorhabens, welches durch Brameshuber + Uebachs Ingenieure GmbH, IMM Maidl & Maidl Beratende Ingenieure GmbH & Co. KG, STUVA e. V, MC Bauchemie Müller GmbH & Co. KG und die Technische Hochschule Köln umgesetzt wird, ist die Entwicklung innovativer ressourceneffizienter Baustoffe auf der Basis von tonhaltigen Böden.

2 Anforderung an Geopolymere

Geopolymer-Baustoffe auf Basis von calcinierten Tonen sind im Baubereich für Einsatzgebiete mit geringeren Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften insbesondere der Druckfestigkeit vielfältig vorstellbar. Neben einer möglichen Verwendung als Bestandteil in Ringspaltverpressmaterial für Tunnel mit Tübbingauskleidungen kann dieser auch als Bestandteil von Verfüllbaustoffen, Bausteinen im Garten und Landschaftsbau oder im Straßenbau und Tunnelbau in Bereichen des Fahrbahnunterbaus eingesetzt werden. Als Anforderung an die Druckfestigkeit wurde ein Wert von 2 N/mm² identifiziert. Als weitere wichtige Randbedingung wurde die Pumpfähigkeit als essenzielles Kriterium erkannt. Daher wird der Größtkorndurchmesser auf 8 mm begrenzt.

Eine Anwendung der calcinierten Tone als höherwertiger Baustoff, beispielsweise als Bindemittel für Mauersteine oder Betonwerksteine, wird ebenfalls angestrebt, wobei jedoch wesentlich höhere Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften bestehen (> 2 N/mm²) und eine konstante Qualität mit den auf Baustellen anzutreffenden wechselnden Ausgangsstoffen eine besondere Herausforderung darstellen.

Auch beim Einsatz von Geopolymer-Baustoffen sind grundsätzlich die gängigen technischen Normen und Regelwerke des jeweiligen Einsatzgebietes zu beachten. Bisher sind Rezepturen für Ringspaltverpressmaterial auf die projektspezifischen Randbedingungen und auf empirischer Basis zusammengestellt. Technisch bindende Regel- oder Normenwerke sind zu Ringspaltverpressmaterial kaum vorhanden. Generell stehen die Forderungen nach guter Förderbarkeit und langen Verarbeitungszeiten, d. h. lange und gute Pumpbarkeit ohne Entmischungseffekte, der Forderung nach schneller Steifigkeitsentwicklung und Scherfestigkeit nach Erreichen des Ringspaltes entgegen (Thienert, 2011).

Für den Prozess der Calcinierung und damit auch für dieses Forschungsvorhaben geeignete Bodenarten sind bindige Böden mit einem möglichst hohen Anteil an Tonmineralen. Als wichtigstes Tonmineral zur Aktivierung durch Calcinierung gilt in der Regel das



Kaolinit. Weitere Tonminerale, die einen Beitrag zur Festigkeitsentwicklung liefern können, sind Illit, Montmorillonit, Glimmer und Smektit. Die Aktivierbarkeit bzw. die Ausbildung festigkeitserzeugender Phasen nach der Calcinierung hängt maßgeblich vom Gehalt der o.g. Mineralien ab. Die mineralogische Zusammensetzung der Böden kann im Vorfeld der Calcinierung z.B. mittels XRD-Analyse oder IR-Spektroskopie bestimmt werden.

Die Betrachtung der akzeptablen Kosten einer Calcinierung muss im Gesamtmaßstab einer Baumaßnahme erfolgen. Die Kosten für die Bodenaufbereitung mit den Aufbereitungsschritten Trocknung, Klassierung, Mahlung, Calcinierung, und Aktivierung müssen dem Einsparpotenzial gegenübergestellt werden. Dazu zählen der Wegfall von Deponierungskosten, sowie von Transport- und Materialkosten der durch Aushubmaterial ersetzten Ringspaltverpressmaterialbestandteile. Auch ist durch die Einsparung von Zement und den damit verbundenen Wegfall der CO₂ Besteuerung zusätzliches Einsparpotenzial zu erwarten.

Der maßgebende Faktor ist die generelle Eignung des vorliegenden Bodens zur Bindemittelaktivierung und damit als Grundlage eines Geopolymer-Baustoffs. Die Anforderungen an den Geopolymer-Baustoff sind vorab festzulegen und hängen vom Einsatzgebiet ab. Bei geeignetem Boden ist eine gesamtheitliche Betrachtung aller Aspekte, die in Zusammenhang mit der Bodenaufbereitung und der Nutzung des Geopolymer-Baustoffs stehen, durchzuführen. Dies sollte insbesondere in Bezug auf den Kosten-/Nutzen-Faktor sowie das mögliche CO₂-Einsparpotenzial erfolgen. Außerdem können baubetriebliche Aspekte wie der Platzbedarf der Anlage sowie logistische Vorgänge eine Rolle spielen. Eine gesamtheitliche Betrachtung ist somit immer nur individuell für das jeweilige Bauprojekt, bei dem der Boden entnommen wird, sowie dem angedachten Einsatzbereich des Geopolymer-Baustoffs möglich.

3 Bodenaufbereitung

3.1 Auswahl an Böden und geotechnische Eigenschaften der Böden

Im Rahmen der geplanten Untersuchungen wurden als qualitätsgesicherte Lagerstättenmaterialien drei nicht calcinierte Tone als Referenzmaterial und ein bereits calcinierter Ton betrachtet. Zudem wurden acht weitere, bindige Materialien aus aktuellen Bauprojekten identifiziert und die repräsentativen geotechnischen und mineralogischen Eigenschaften bestimmt.

Die geotechnischen Untersuchungen der Referenzmaterialien beinhalten unterschiedliche Versuche zur Bestimmung von Bodeneigenschaften wie der

Korngrößenverteilung, des natürlichen Wassergehalts, der Zustandsgrenzen (d.h. Wassergehalt des Bodens an der Fließgrenze, an der Ausrollgrenze sowie an der Schrumpfgrenze), dem Wasseraufnahmevermögen nach Enslin/Neff sowie des Glühverlustes. Zusätzlich erfolgte eine Einstufung der Referenzmaterialien in Bodengruppen nach DIN 18196. Die Untersuchungen wurden im Labor für Geotechnik und Tunnelbau der TH Köln durchgeführt.

Aus der Anforderung für Geopolymere geht hervor, dass zur Calcinierung vor allem Materialien geeignet sind, die einen Mindestanteil an tonigem Material bzw. Anteile maßgeblicher Tonminerale wie Kaolinit, Illit, Montmorillonit, Glimmer oder Smektit aufweisen. Da diese Tonminerale vor allem bei Böden mit hohem Tonanteil auftreten, liegt der Fokus für die weiteren Schritte auf Böden mit den Bodengruppen nach DIN 18196 TL, TM und TA. Zur genaueren Spezifizierung der Tonminerale und Tonanteile erfolgt bei für ausgewählte Böden eine Charakterisierung und Quantifizierung der Tonmineralogie mittels Röntgendiffraktometrie (XRD).

3.2 Grundlagen des Calcinierungsprozesses

Die notwendigen Aufbereitungsschritte bei der Calcinierung von tonhaltigen Böden hängen maßgeblich von den physikalischen Eigenschaften der Böden (Feuchtegehalt, maximale Korngrößen etc.) ab.

Die generellen Einzelprozessschritte zur Bodenaufbereitung des Ausbruchsmaterials sind:

- Trocknung zur Entfernung des Oberflächenwassers als vorbereitender Schritt zur Calcinierung
- Klassierung durch Siebung in Abhängigkeit vom Tonanteil
- Mahlung auf die zur Calcination benötigten Korngröße
- Calcinierung zum Austreiben des chemisch gebundenen Wassers

Es wurden zwei mögliche Konzipierungen für eine Aufbereitungsanlage für tonhaltige Böden mittels Calcinierung identifiziert, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

Bei der ersten Variante wird das tonhaltige Bodenmaterial nach Trocknung und Mahlung bei Temperaturen von bis zu 850 °C mit einem Hochbrandrohr als Flash-Calcinator thermisch behandelt. Eine Prinzipskizze dieser Variante ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Die Behandlungsschritte beinhalten:

- Trocknung des Teiles des tonhaltigen Bodens, das zum Geopolymer-Bindemittel weiterverarbeitet wird (Entfernung des Oberflächenwassers im Schleudertrockner (1))
- Mahlung auf eine geeignete Korngröße für die anschließende Calcinierung (mittels Walzenbrecher oder Kugelmühle (3))

- Calciniierung, thermische Behandlung zum Austreiben des chemisch gebundenen Wassers (mittels Flash-Calcinator/Hochbrandrohr (5))
- Zusammenführung des Geopolymer-Bindemittels mit unbehandelten Kornfraktionen und Transport zum Silo (10) zur späteren alkalischen Aktivierung und anschließendem Einsatz als Ringspaltverpressmaterial

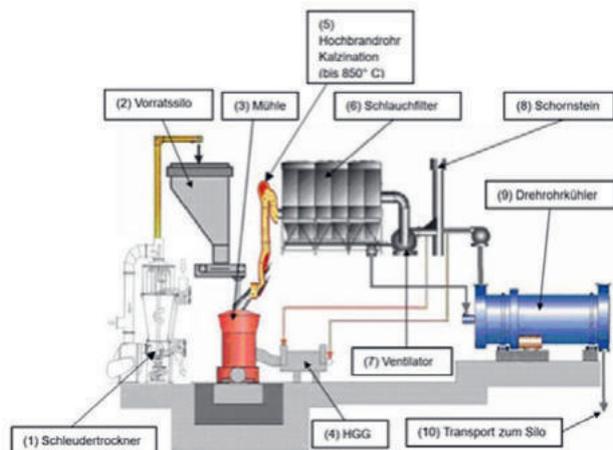


Abbildung 3-1: Prinzipskizze der ersten Variante einer Aufbereitungsanlage für tonhaltige Böden (Claudius Peters Technologies, 2023)

Bei der zweiten Variante wird das tonhaltige Bodenmaterial in einer Mahlung-/Calcination-Kombinationsmühle während des Mahlprozesses zeitgleich thermisch behandelt. Hier sind Temperaturen von bis zu 650 °C möglich. Ein vorgeschalteter Trocknungsprozess zur Entfernung des Oberflächenwassers ist bei dieser Variante nicht notwendig, der gesamte Prozess der Trocknung bis zur thermischen Behandlung erfolgt in der Mühle, weshalb der Platzbedarf dieser Variante geringer ist als bei der ersten Variante. Eine Prinzipskizze der zweiten Variante ist in Abbildung 3-2 dargestellt:

- Trocknung, Mahlung und Calciniierung in einer Spezialkugelmühle (2)
- Zusammenführung des Geopolymer-Bindemittels mit unbehandelten Kornfraktionen
- Zusammenführung des Geopolymer-Bindemittels mit unbehandelten Kornfraktionen und Transport zum Silo (8) zur späteren alkalischen Aktivierung und anschließendem Einsatz als Ringspaltverpressmaterial

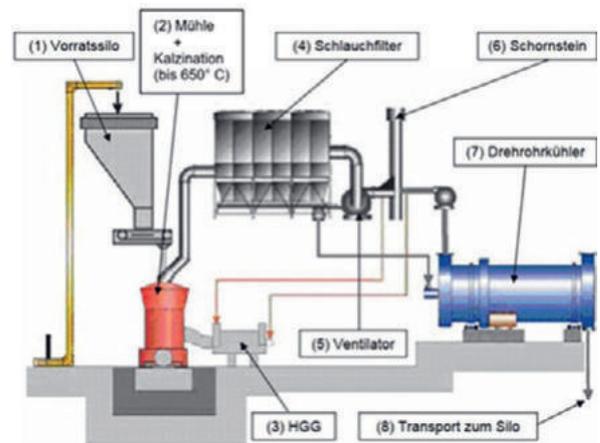


Abbildung 3-2 Prinzipskizze der zweiten Variante einer Aufbereitungsanlage für tonhaltige Böden (Claudius Peters Technologies, 2023)

3.3 Definition der durchgeführten Einzelschritte zur Aufbereitung der Referenzböden

Für die gezielte Variation von Böden bzw. der Randbedingungen zur Calciniierung sind verschiedene umfangreiche Variationen möglich. Dazu bieten sich Laborversuche in kleinem Maßstab an, um die Zusammenhänge zwischen Böden bzw. Tonmineralogie und deren Anteil und Prozesskenngrößen in Bezug auf eine spätere Festigkeitsentwicklung hergestellter Materialien zu analysieren. Daher erfolgte im Labor für Geotechnik und Tunnelbau der TH Köln sowie bei der STUVA die Aufbereitung der Böden mit unterschiedlichen Verfahren.

Zur Durchführung von Versuchsreihen zur Calciniierung im Labor wurde der sog. Muffelofen, mit dem geringe, aber für Laborversuche ausreichende Mengen an calciniertem Material hergestellt werden können, verwendet. Dabei wurden folgende Variationen beim Muffelofen vorgesehen:

- Temperatur (600°C bis 850°C)
- Temperierdauer (1 h bis 4 h).

Durch die STUVA wurde zudem ein Calcinator im Technikum-Maßstab realisiert. Mit diesem wurden tonhaltige Böden für weitere Parameterstudien zwecks Ermittlung des Einflusses von Betriebsparametern auf den Calciniierungserfolg durchgeführt.

4 Bestimmung der Reaktivität

4.1 Bestimmung der Reaktivität mittels XRD-Analyse

Zwecks Charakterisierung und Quantifizierung der Tonmineralogie wurden XRD-Analysen durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen liegt das Augenmerk auf der mineralogischen Charakterisierung der



untersuchten Materialien, d.h. auf der Art der Tonminerale und deren Anteil. Es wurden ausgewählten Proben sowohl vor als auch nach der Calcinierung untersucht. Bei den calcinierten Böden liegt zusätzlich die Quantifizierung des Anteils an amorphen Phasen und deren Auswirkungen auf die puzzolane Reaktivität im Schwerpunkt.

Ergebnisse der Analysen der Rohböden zeigen mittels Rietveld-Verfeinerung bestimmte variabel anteilige Zusammensetzungen hinsichtlich der Tonminerale Kaolinit, Smektit/Montmorillonit sowie Illit/Muskovit (vgl. Abbildung 4-1). Dabei sind sowohl die Ergebnisse der XRD-Analyse vor (jeweils oben) als auch die Ergebnisse nach Calcinierung (jeweils darunter) gleicher Böden aufgeführt. Der Erfolg der Calcinierung der Ausgangsstoffe wird auf Grundlage des Phasenüberganges der Tonminerale in amorphe Kieselsäure, die primär als Produkt der kollabierten Tonminerale angesehen wird, bewertet.

Es ist in Abbildung 4-1 zu erkennen, dass bei allen untersuchten Böden typischerweise Kaolinit bei den gefahrenen Temperaturen und Verweildauern in amorphe Kieselsäure-Phasen übergeht.

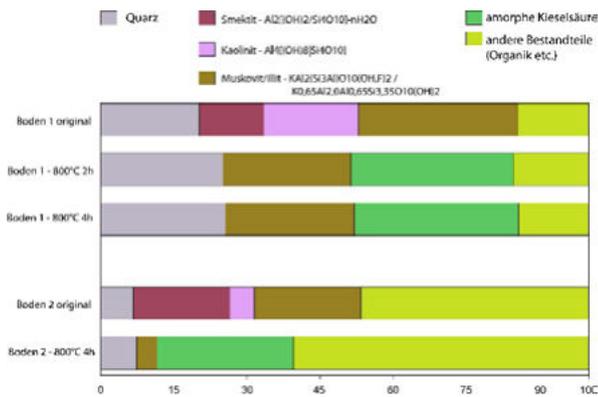


Abbildung 4-1: Mittels Röntgendiffraktometrie bestimmte tonmineralogische Zusammensetzungen ausgewählter Böden

4.2 Bestimmung der Reaktivität anhand von Mörtelversuchen

Die calcinierten Materialien dienen anschließend als Bestandteil bzw. teilweiser Zementersatz in Mörtelmischungen, mit denen im Labor für Bau- und Werkstoffprüfung der TH Köln die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit unter Berücksichtigung unterschiedlich hergestellter calcinierter Materialien bestimmt wurde. Zur Beurteilung der Reaktivität wurden die Festigkeiten bzw. die Festigkeitsentwicklung der unterschiedlichen calcinierten Tone (in Kombination mit Zement) anhand von Mörteldruckfestigkeiten im Alter von 7 Tagen ermittelt und mit der von reinen Zementmörteln (ohne calcinierte Tone) verglichen.

Die Versuchsmatrix sah vor, ausgehend von der Rezeptur eines reinen Zementmörtels in den untersuchten Mörtelmischungen den Zement sukzessive durch calcinierten Ton in Anteilen von 10 M.-%, 20 M.-%, 30 M.-% und 40 M.-% zu substituieren, wobei die weiteren Mischungsbestandteile gleich gehalten wurden. Als Zement wurde ein CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N eingesetzt.

Die ersten ermittelten Druckfestigkeiten in einem Probenalter von 7 Tagen sind in Abbildung 4-2 dargestellt. Neben den oben aufgeführten calcinierten Materialien wurden auch ein Kalksteinfüller (KSF) und Centrlit NC[®] als handelsübliches Metakaolin untersucht. Es lässt sich feststellen, dass sich mit zunehmender Substitution die Druckfestigkeiten nach sieben Tagen reduzieren. Dies ist auf den zusätzlichen Anteil der langsamer reagierenden calcinierten Tone zurückzuführen.

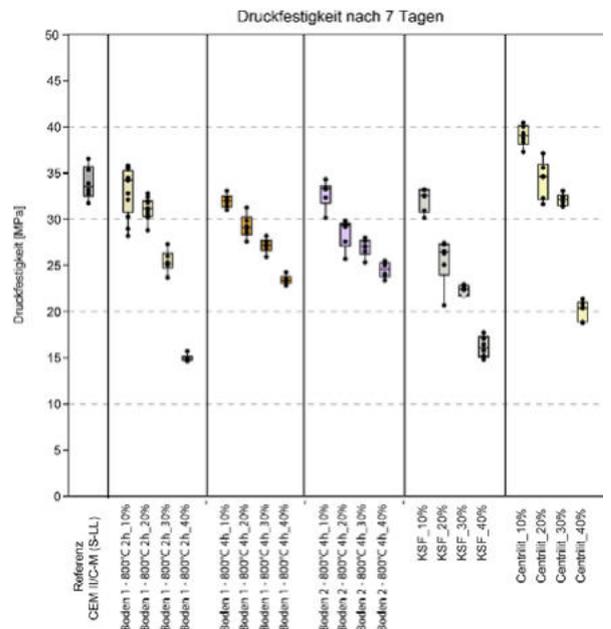


Abbildung 4-2: Druckfestigkeiten des Referenzmörtels und der Mörtel mit variablen Anteilen an calcinierten Tönen bzw. Centrlit NC[®] und Kalksteinfüller (KSF) für unterschiedliche Substitutionsraten im Alter von 7 Tagen

Da die calcinierten Tone üblicherweise erst später zu einer Erhöhung der Druckfestigkeiten von Betonen führen, wird im Alter von 28 Tagen und 91 Tagen erwartet, dass die Druckfestigkeiten von zementbasierten Betonen mit calcinierten Tönen deutlich geringere Unterschiede zu den Druckfestigkeiten von Betonen ohne calcinierte Tone als nach sieben Tagen aufweisen.



5 Ausblick

Im Rahmen des bis 2024 laufenden Forschungsvorhabens TOFFEE sollen noch weitere vergleichende Untersuchungen zur Bestimmung von betontechnologischen Eigenschaften durchgeführt werden, um so das Potential bei ausgewählten Böden für die Substituierung von Zement beschreiben zu können. Dabei werden auch Untersuchungen zur Bestimmung der Druckfestigkeit an Mörteln nach 28 Tagen und 91 Tagen durchgeführt.

Neben den hier beschriebenen Versuchen mit einer Teilsubstitution von Zement werden auch umfangreiche Versuchsreihen an zementfreiem Mörtel mit calciniertem Ton als Bindemittel in Verbindung mit einem Aktivator durchgeführt. Als Aktivator werden Natrium- oder Kaliummetasilikate genutzt. Die anschließend ermittelten Druckfestigkeiten lassen Rückschlüsse auf eine Bindemittelaktivierung zu. Dabei werden sowohl bereits industriell calcinierte Schichtsilikate und industriell vertriebene Tonböden, als auch Tonböden von Baustellen betrachtet. Basierend auf den Ergebnissen wird anschließend ein Konzept erarbeitet, wie die Materialien auf Baustellen bzw. in Abhängigkeiten von Baustellenrandbedingungen eingesetzt werden können.

Um bei großen Bauprojekten anfallende Massen an Tonen bzw. tonhaltigen Böden sinnvoll verwerten zu können, kann sich deren Calciniierung anbieten. Es wird erwartet, dass sich calcinierten Materialien anstatt Zement für viele Anwendungsfälle eignen, und die daraus hervorgehenden CO₂-Einsparungen sich positiv auf die Nachhaltigkeit von Projekten auswirken wird. Um eine Verwertung bindiger Böden zu ermöglichen, sind im Vorfeld von großen Infrastrukturmaßnahmen für bindige Böden XRD-Analysen durchzuführen, damit die Anteile unterschiedlicher Tonminerale bestimmt werden können.

Danksagung

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Förderung und die gute Zusammenarbeit.

Literaturverzeichnis

Battelle Memorial Institute (2002): *Toward a sustainable cement industry*, Substudy 8. Columbus
Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. [Hrsg.] (2017). *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020, Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2020*, Berlin
Haist, M.; Bergmeister, K.; Fouad, N.; Curbach, M.; Deiters, M.; Forman, P.; Gerlach, J.; Hatzfeld, T.; Hoppe, J.; Kromoser, B.; Mark, P.; Müller, C.; Müller, H.; Scope, C.; Schack, T.; Tietze, M.; Voit, K. (2023):

Nachhaltiger Betonbau, in: Bauphysikkalender 2023 – Nachhaltigkeit

International Energy Agency and World Business Council for Sustainable Development (2009): *Cement Technology Roadmap 2009*. Paris, Conches-Geneva

International Energy Agency and World Business Council for Sustainable Development (2018): *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Paris, Conches-Geneva

Claudius Peters Technologies (2023): „Gypsum Technik – We know how“, Issue 3, Brochure

Schäfer, M. (2019) Tunnelbau in Deutschland: Statistik (2018/2019), Analyse und Ausblick in: Tunnel 6/2019.

Thienel, K.-C.; Beuntner, N. (2018): Calcinierte Tone und ihr Potential für die moderne Betontechnologie, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung.

Thienert, C. (2011): Zementfreie Mörtel für die Ringspaltverpressung beim Schildvortrieb mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust, Dissertation Bergische Universität Wuppertal. Shaker Verlag, Aachen.

Thienert, C.; Breitsprecher, G.; Budach, C. (2019). *Entsorgungskonzepte für Tunnelausbruchmaterial: Innovative Ansätze für Ressourceneffizienz und Praxisbeispiele*. STUVA-Tagung, Forschung + Praxis 53, S. 209–215.

Trümer, A. (2020): Calcinierte Tone als Puzzolane der Zukunft – Von den Rohstoffen bis zur Wirkung im Beton, Dissertation Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar

Salvador, S.; Pons, O. (2000): A semi-mobile flash dryer/calciner unit to manufacture pozzolana from raw clay soils - application to soil stabilisation. *Construction and Building Materials*, Elsevier, 14 (2), pp.109-117., 10.1016/S0950-0618(00)00005-2, hal-01697286

Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) (2013): Monitoring-Abschlussbericht 1990-2012. *Verminderung der CO₂-Emissionen*. Düsseldorf



Der Einsatz von Ersatzbaustoffen beim Bau und bei der Begrünung von geokunststoffbewehrten Konstruktionen

Prof. Dr.-Ing. Sven Schwerdt¹
Prof. Dr. Petra Schneider¹
M.Eng. Francis Achtel¹

¹ – Hochschule Magdeburg-Stendal

Im Rahmen des Projekts wurde die Einsetzbarkeit von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB) in technischen Anwendungen untersucht. Eine geogitterbewehrte Bodenstruktur (KBE) wurde unter Verwendung von MEB als Füllmaterial sowie von begrünem Boden für die Außenhaut und die Oberseite der Konstruktion errichtet. Als Füllmaterial wurden vier verschiedene Ersatzbaustoffe verwendet, und zwar Hochofenschlacke (HOS), Elektroofenschlacke (EOS), Gleisschotter (GS) und Recyclingbeton (RB). Für den begrüneten Oberboden wurde anteilig ein Gemisch aus recyceltem Ziegelbruch (ZB) oder zerkleinertem Porenbeton (PB) mit Oberboden verwendet. Für alle Materialien wurden die bodenmechanischen und chemischen Parameter bestimmt und bewertet. Im nächsten Schritt wurde eine KBE als Pilotanwendung gebaut, bestehend aus drei Geogitterlagen mit einer Gesamthöhe von 1,5 m und einem Böschungswinkel von 60°. Die Ergebnisse der bodenmechanischen Tests zeigen, dass die bodenmechanischen Eigenschaften der verwendeten Füllmaterialien ähnlich oder sogar besser sind als die der Primärmaterialien wie Kies. Die Ergebnisse der chemischen Untersuchungen zeigen, dass einige Materialien ohne oder mit geringen Einschränkungen für den Einsatz in Ingenieurbauwerken geeignet sind. Andere Materialien benötigen eine spezielle Dichtungsschicht, um eine Beeinflussung von Boden und Grundwasser zu verhindern. Die Vegetation auf dem gemischten MEB-Materialien wuchs erfolgreich. Bereits im ersten Jahr der Bauarbeiten wurden Ruderal- und Pionierpflanzen festgestellt. Das poröse Material (ZB und PB) bietet den Pflanzen zusätzliche Wasserspeicherkapazität, insbesondere während der Sommer- und/oder Hitzeperioden. Abschließend ist festzuhalten, dass MEB in KBE-Konstruktionen insbesondere als Füllmaterial, aber auch als Mischung für die begrünbaren Bodenschicht einsetzbar sind

1 Einleitung

Mineralische Abfälle, insbesondere Bau- und Abbruchabfälle sowie Bodenmaterial, werden den mengenmäßig größten Abfallstrom darstellen, sobald ein bestimmter Grad der Verstädterung erreicht ist. Auf EU-Ebene ist dieser Zustand bereits eingetreten, während auf globaler Ebene die Entwicklungsländer noch im Prozess der Verstädterung begriffen sind und ein großer Materialfluss von Bauschutt und Bodenmaterial mit einer zeitlichen Verzögerung auftreten wird. Dennoch stellt dieser Stoffstrom sowohl eine globale Herausforderung als auch ein bedeutendes Ressourcenpotenzial zur Substitution mineralischer Primärrohstoffe dar. In Deutschland fällt der Stoffstrom unter die Klasse der Ersatzbaustoffe (EBS), d.h. "Baustoffe aus industriellen Fertigungsprozessen oder aus Aufbereitungsanlagen (Abfälle, Produkte), die anstelle von Primärrohstoffen eingesetzt werden, wie z.B. Recyclingbaustoffe (Bau-

schutt), Bodenmaterial, Schlacken, Aschen, Gleisschotter [1]. Um die natürlichen Rohstoffressourcen zu schonen, sollten bei Bauprojekten in Zukunft bevorzugt EBS eingesetzt werden.

In Deutschland fallen jedes Jahr rund 350 Millionen Tonnen Abfall an. Der Abfallstrom besteht unter anderem aus etwa 250 Millionen Tonnen mineralischer Abfälle, wie 100 Millionen Tonnen Boden und Steine, 73 Millionen Tonnen Bauschutt, 15 Millionen Tonnen Aschen und Schlacken aus Energieanlagen sowie 7 Millionen Tonnen Hochofenschlacke und 6 Millionen Tonnen Stahlschlacke.

Während der größte Teil des Betonbruchs wiederverwendet wird [2], werden andere Materialien häufig für geringwertige Zwecke verwendet, z. B. als Abdeckmaterial für Deponien oder zur Verfüllung von Tagebauen [3]. Diese Art der Verwendung wird als Downcycling-Prozess bezeichnet. Zu den EBS, die in Deutschland schon im Bauprozess wiederverwendet werden, gehören Materialien wie Schlacken, Aschen

und Betonbruch. Die vorliegende Studie konzentriert sich auf Upcycling-Anwendungen, insbesondere auf die Verwendung von KBE-Konstruktionen in begrünbaren Anwendungen, um EBS höherwertigen Anwendungen zuzuführen. Diese Anwendungen wurden ausgewählt, weil begrünte Elemente einen signifikanten positiven Einfluss auf die Senkung der lokalen Temperatur und die Verbesserung des Lebensklimas in Städten haben.

2 Materialien und Methodik

Im Projekt „Recycle – KBE“ wurde die Verwendbarkeit von Ersatzbaustoffen (Hochofenschlacke, Elektroroofenschlacke, Gleisschotter, Betonrecycling, Porenbeton und Ziegelbruch) in ingenieurtechnischen Bauwerken untersucht.

Die Nutzung von EBS in Ingenieurbauwerken, Verkehrswegen oder anderen Bereichen des Bauwesens hat erhebliche Relevanz für die Schonung natürlicher Ressourcen durch Einsparung von Primärrohstoffen und kann damit die Umweltbilanz der Baumaßnahmen verbessern. Daneben war es ein weiteres Ziel, die Begrünbarkeit von EBS zu untersuchen. Zum Erreichen dieser Ziele wurde eine begrünte Kunststoff-Bewehrte-Erde-Konstruktion (KBE-Konstruktion) errichtet, deren mineralische Bestandteile nahezu vollständig aus Ersatzbaustoffen bestand. Dabei wurden sowohl für die Füllboden als auch die Außenhaut Ersatzbaustoffe verwendet. Als begrünungsfähige Schichten an der Außenseite wurden Gemische aus Oberboden und verschiedenen Ersatzbaustoffen eingebaut.

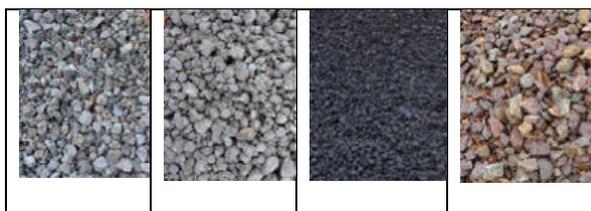


Abbildung 1: eingesetzte Füllmaterialien, von links nach rechts: Betonrecycling, Hochofenschlacke, Elektroroofenschlacke, und Gleisschotter (Bildautorin: Schneider).

Die Auswahl potentieller Materialien für die KBE-Konstruktion erfolgte im Hinblick auf die bodenmechanischen und chemischen Eigenschaften, die Beständigkeit, die erwarteten Eigenschaften im Verbund der mit den Geokunststoffen in der KBE und dem Potential zur Rezyklierbarkeit. Als Füllboden wurden Betonrecycling, Hochofenschlacke, Elektroroofenschlacke und Gleisschotter ausgewählt. Für das

Begrünungssubstrat der Außenhaut wurden Ziegelbruch und Porenbeton als Hauptmaterial im Verhältnis 2:1 mit Oberboden vermischt. Als Saatgutmischung wurde ein handelsübliches Saatgut (Schattenrasen, Acker-Ringelblume, Vergissmeinnicht, Glockenblume) verwendet, das u.a. für Dachbegrünungen geeignet ist.

Bei dem verwendeten Geokunststoff handelt es sich um ein gelegtes Geogitter (Secugrid 80/20 R6) mit einer angegebenen Kurzzeitzugfestigkeit von 80 kN/m.

Die bodenmechanischen Untersuchungen umfassten neben den Standardversuchen, wie Bestimmung von Korngrößenverteilung, Proctordichte und Dichte auch Untersuchungen zum pH-Wert sowie zur nutzbaren Feld- und Luftkapazität der eingesetzten Materialien.

Ferner wurden Versuche zur Bestimmung des EBS-Scherverhaltens sowie des Reibungs- und Herausziehverhaltens in Verbindung mit dem Geokunststoff in der KBE-Konstruktion durchgeführt. Die Versuche wurden mit einem Großrahmenschergerät durchgeführt. Die Scherkastenabmessungen betragen dabei $L*B*H = 60*50*20$ cm. Folgende Kennwerte besitzt das Gerät: maximale Normalspannung: 200 kN; maximale Zugkraft: 125 kN; maximaler Verfahrweg: 170 mm; maximale Herausziehgeschwindigkeit: 10 mm/min. In Vorbereitung eines jeden Versuchs wurde der zu untersuchende Baustoff unter den optimalen Wassergehalt gesetzt, lagenweise in den Scherkasten eingebracht und verdichtet. Für die Versuchsdurchführung wurde der Geokunststoff an einer Textilrolle fixiert und über einen Verfahrweg von 50 mm flächig gezogen. Die Lastaufbringung erfolgte, mit Berücksichtigung der Konsolidationszeit, unter drei Laststufen. Das Geogitter wurde unter Normalspannungen von 15, 25 und 50 kPa sowie Herausziehgeschwindigkeiten von 0,5 und 2,0 mm/min beansprucht [7].

Ferner wurden Untersuchungen zur Einbaubeschädigung der Geogitter in den EBS durchgeführt. Die chemischen Untersuchungen umfassten zunächst Untersuchungen an den eingesetzten EBS. Zusätzlich wurde über die gesamte Standzeit der KBE-Konstruktion das Sickerwasser gesammelt und fortlaufend auf chemische Inhaltsstoffe untersucht. Die untersuchten Materialparameter orientierten sich dabei an der LAGA M 20 [4].

Der Großversuch erfolgte auf dem Gelände der Hochschule Magdeburg-Stendal. Zur Korrelation mit den Witterungsbedingungen konnte auf die Messwerte der hochschuleigenen Wetterstation zurückgegriffen werden. Die KBE-Konstruktion bestand aus



vier Bereichen, in denen jeweils verschiedene EBS als Füllboden verwendet wurden (siehe Abbildung 2).

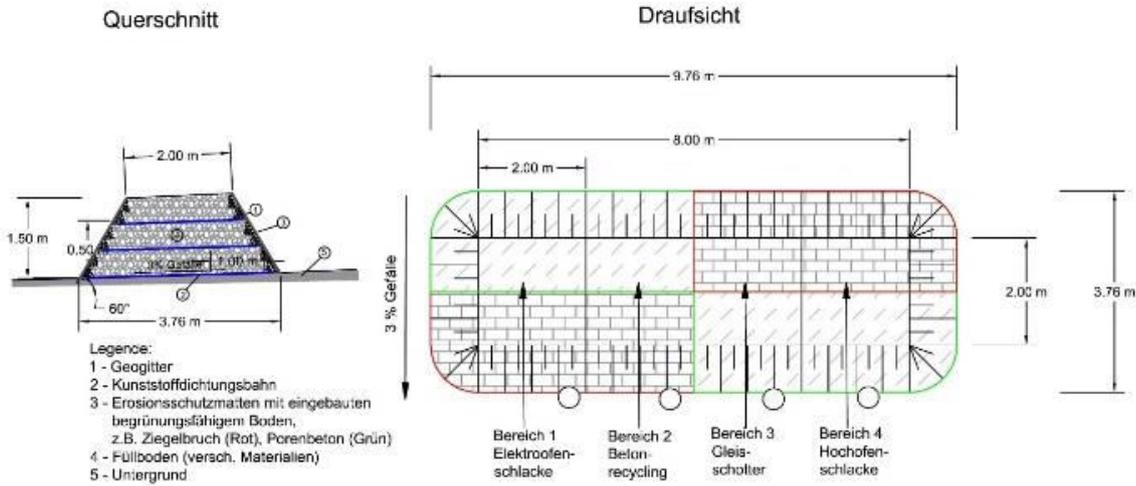


Abbildung 2: Draufsicht und Querschnitt der KBE-Konstruktion (Grafikautoren: Schwerdt, Mirschel)

An der Basis wurde jeweils eine Kunststoffdichtungsbahn verlegt. Diese erhielt ein Gefälle von 3 % zur nördlich gelegenen Frontseite. Das durch die Konstruktion sickern Wasser wird dort gesammelt und in Sickerwassersammelbehälter geleitet.



Abbildung 3: oben: Ansicht der Aufstandsfläche vor Beginn der Verlegearbeiten der KBE-Konstruktion; unten: Nordwestansicht der begrünten Konstruktion im Oktober 2020 (Bildautorin: Schneider)

Seit der Errichtung der KBE-Konstruktion wird die Sickerwassermenge für jeden Abschnitt separat in Schächten erfasst und der Bewuchs dokumentiert.

Das Sickerwasser wird regelmäßig chemisch untersucht und die Vegetationsentwicklung kartiert.

3 Ergebnisse

Die wichtigsten bodenmechanischen Kenndaten sind in der Tabelle 1 für das Füllmaterial und Tabelle 2 für das begrünbare Außenhautmaterial zusammengestellt. Weitere Untersuchungsergebnisse sind in [5] und [6] enthalten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die bodenmechanischen Parameter der getesteten EBS ausnahmslos im Bereich eines vergleichbaren Kieses liegen. Unterschiede sind bei den Proctor- und Korndichten erkennbar und sind abhängig von der Kornstruktur bzw. dem Mineralbestand der Ausgangsmaterialien.

Die ermittelten Scher- und Reibungsparameter ergaben hohe bis sehr hohe Scherfestigkeiten. Die Reibungswinkel lagen zwischen $\varphi = 53,2$ und $59,6^\circ$. Die Reibungskoeffizienten lagen zwischen 0,75 und 0,94. Dies deutet auf einen hohen Reibungsverbund zwischen Geokunststoff und umgebendem Ersatzbaustoff hin.

Die Ergebnisse der Herausziehversuche wurden mit Ergebnissen anderer Messkampagnen und Literaturquellen verglichen. Für eine Gegenüberstellung der eigenen Ergebnisse mit denen der Messkampagnen und Literaturquellen, wurde der f1-Faktor gebildet, der aus der Division des Herausziehwiderstandes und der dazugehörigen Normalspannung resultiert.



Eine Schlussfolgerung war, dass mit zunehmender Normalspannung die f_1 -Faktoren abnehmen und das Risiko einer Materialermüdung höher ausfällt. Die Verbundwirkung zwischen Ersatzbaustoff und Gitter wurde durch den Verbundbeiwert beschrieben. Der höchste Verbund stellte sich im Vergleich der Ersatz-

baustoffe bei der Hochofenschlacke und dem Betonrecycling ein. Der Interlocking-Effekt konnte nachvollzogen werden. Durch den Vergleich der f_1 -Faktoren und der Verbundbeiwerte wurde eine Eignung der untersuchten Ersatzbaustoffe in KBE-Konstruktionen festgestellt [7].

Tabelle 1: Ergebnisse der bodenmechanischen und chemischen Untersuchungen an den Füllmaterialien ([5, 6, 7])

Materialart Füllkörper	Hochofen-schlacke (HOS)	Elektroofen-schlacke (EOS)	Beton-Recycling (BR)	Gleis-Schotter (GS)
Bodenart (DIN EN ISO 14688-1)	mgrCGr	cgrMGr	Gr	mgrCGr
Bodenklassifikation (DIN EN ISO 14688-2)	gleichmäßig abgestufter Kies	gleichmäßig abgestufter Kies	mittel bis gut abgestufter Kies	gleichmäßig abgestufter Kies
Bodengruppe (DIN 18196)	GE	GE	GW	GE
Korndichte [g/cm^3]	2,41-2,83	3,84-3,96	2,55-2,57	2,66
Glühverlust [%]	0	0	0	0
Wassergehalt [%]	24,5	25,8	n.d.	n.d.
Proctordichte [g/cm^3]	1,51-1,58	2,10-2,16	1,96	1,61
pH Wert	10,2	10,7	9,3	9,3
Feldkapazität [%]	2,29	1,81	9,97	n.b.
Luftkapazität [%]	7,90	6,20	9,53	nbd.
Scherparameter (φ/c') [$^{\circ}/kN/m^2$]	54,3/0	53,6/0	53,2/0	59,6/0
Reibungskoeffizient [-]	0,91	0,94	0,81	0,75
Herauszieh Widerstand [kN/m]*	58,75/72,5/118,65	49,00/76,34/59,06	45,00/93,13/84,59	60,47/86,16/68,84
LAGA M20 Klassifikation	Z 2 (Sulfat)	Z 0	Z 1.2 (Sulfat)	Z 0

* Versuchsdurchführung unter einer Normalspannung von 15/25/50 kPa. Grau hinterlegte Werte stellen ein Materialversagen des Geogitters dar.

Tabelle 2: Ergebnisse der bodenmechanischen und chemischen Untersuchungen an den Außenhautmaterialien ([5, 6])

Materialart Außenhaut	Mischung Porenbeton/Oberboden	Mischung Ziegelbruch/Oberboden
Bodenart (DIN EN ISO 14688-1)	grcsiSa	csisaGr
Bodenklassifikation (DIN EN ISO 14688-2)	gut abgestufter Sand	gut abgestufter Kies
Bodengruppe (DIN 18196)	SU*	GU
Korndichte [g/cm^3]	1,89	2,47-2,64
Glühverlust [%]	7,04	2,5
Proctordichte [g/cm^3]	1,24	1,96
pH Wert	8,8	8,0
Feldkapazität [%]	14,96	13,96
Luftkapazität [%]	2,13	5,55
LAGA M20 Klassifikation	Z 2 (Sulfat)	Z 1.2 (Sulfat)

Hinsichtlich der Ergebnisse der chemischen Untersuchungen ist festzuhalten, dass die Sulfatgehalte in allen Materialien (mit Ausnahme von GS und EOS)

hoch waren und meist zu einer Einstufung in die Wertungskategorie Z2 nach LAGA M20 führten. Dies führte auch zu vergleichsweise hohen elektrischen Leitfähigkeiten im Eluat. Da Sulfatgehalte in der Re-



gel unkritisch sind, erfolgte die nachfolgende Auswertung unter Vernachlässigung der Sulfatwerte. Das Betonrecycling-Material hat eine Zuordnungs-klasse von Z1.2 nach LAGA M 20. Die Werte für Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), elektrische Leitfähigkeit und Sulfat verursachten die Z1.2-Klassifizierung. Ziegelbruch unterlag der Zuordnungs-klasse Z1.2 aufgrund der entsprechend erhöhten Konzentrationen an PAK, elektrischer Leitfähigkeit, Chlorid und Sulfat. Hochofenschlacke unterlag der Zuordnungs-klasse Z0 (unter Vernachlässigung des Sulfatwertes, bei Berücksichtigung von Sulfat Z2). Elektroofenschlacke hatte die Zuordnungs-klasse Z0. Auch Gleisschotter war der Zuordnungs-klasse Z0 zuzuordnen. Porenbeton war der Zuordnungs-klasse Z2 zuzuordnen. Hier wurden die Einstufungswerte für Blei und Sulfat überschritten. Aus bodenmechanischer Sicht wurde der Nachweis erbracht, dass die Ersatzbaustoffe in KBE-Konstruktionen verwendet werden können. Die bodenmechanischen Parameter Proctordichte, Kornverteilung, Korndichte und Scherfestigkeit (Reibungswinkel) entsprechen denen von Primärbaustoffen. Auch das Herausziehverhalten war zu jenem von Primärbaustoffen ebenbürtig. Teilweise gab es höhere Heraus-zieh-widerstände, sofern eine ausreichende Verzahnung zwischen Ersatzbaustoff und Geokunststoff gewährleistet werden konnte [7].

Die Kartierung der Vegetationsuntersuchung zeigt, dass die Art der verschiedenen EBS und die Ausrichtung der KBE bzgl. der Sonneneinstrahlung für den Begrünungserfolg ausschlaggebend sind. Je nach Sonneneinstrahlungsdauer war die Vegetation unterschiedlich gut ausgebildet. Wie in den zuvor durchgeführten Vorversuchen (siehe [5] und [6]) zeigte sich auch im Großversuch, dass der Ziegelbruch für einen schnellen Erfolg geeignet ist, während der Porenbeton eine langanhaltende wasserspeichernde Wirkung zeigt. Die Pflanzen, die auf der KBE gewachsen sind, waren alle Pionierpflanzen (Erstbesiedler) oder Ruderalpflanzen. Diese Gattungen haben keine großen Anforderungen an den jeweiligen Boden und können prinzipiell überall wachsen. Es wird erwartet, dass in den kommenden Vegetationsperioden ein dichter, gleichmäßiger Bewuchs auftritt und insbesondere die Wasserspeicherfähigkeit der Ersatzbaustoffe dann zu einer andauernden Begrünung der Konstruktion führt.

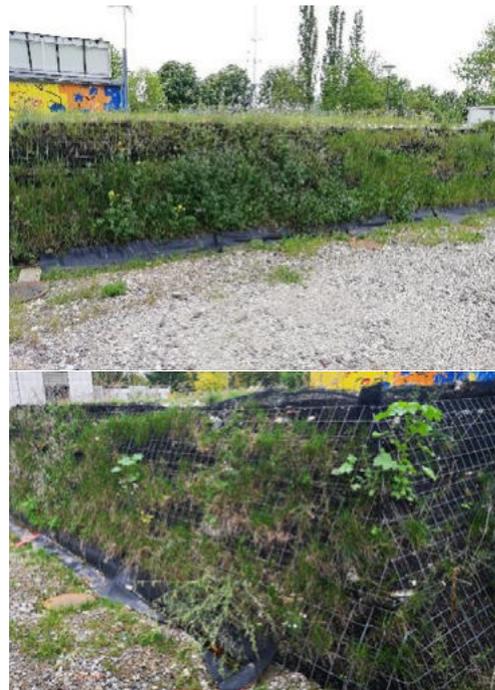


Abbildung 4: Ansichten der KBE-Wand: oben 3 Monate nach Installation im Mai 2020, unten: Detailansicht (Bildautorin: Schneider)

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Forschungsprojekt hat gezeigt, dass Ersatzbaustoffe geeignet sind, Primärmaterialien in Ingenieurbauwerken zu ersetzen. Die bodenmechanischen Eigenschaften waren vergleichbar. Die chemischen Eigenschaften machen bei einigen Materialien zusätzliche Maßnahmen nötig, die aber ebenfalls bereits Stand der Technik sind (MTSE) [8].

In Bezug auf die chemischen Eigenschaften ist eine Differenzierung erforderlich sowie eine Anpassung an die konkreten Gegebenheiten. Die untersuchten Materialien sind allesamt für die Verwertung geeignet, wobei sich die Verwertungsklassen der Materialien unterscheiden. Insbesondere der hohe Sulfatgehalt ist bei einigen Materialien zu betrachten. Die Sulfatgehalte bewirkten eine Einstufung zahlreicher Materialien in die Verwertungsklasse Z 2 nach LAGA M 20. Unter Vernachlässigung des Sulfatanteils waren die verwendeten Materialien überwiegend den Verwertungsklassen Z0 oder Z1.1 zuzuordnen. Die laufenden chemischen Wasseranalysen bestätigten im Wesentlichen die Ergebnisse. Auch aus den chemischen Analysen lässt sich ableiten, dass die EBS in begrünten Ingenieurbauwerken verwendet werden können. Gegebenenfalls müssen Zusatzmaßnahmen vorgesehen werden, um eine Elution schädlicher Inhaltsstoffe zu verhindern. Für zukünftige An-



wendungen bleibt zu berücksichtigen, dass die Materialien gemäß der am 1. August 2023 in Kraft tretenden Ersatzbaustoffverordnung zu bewerten sind.

Im Hinblick auf die allgemeine Verwendbarkeit folgt, dass die Materialien mit dem Klassifizierungswert Z2 nur mit einer wasserundurchlässigen Schicht oder mit zusätzlichen technischen Sicherungsmaßnahmen verbaut werden können. In einem solchen Fall ist das Merkblatt M T S E [7] maßgebend. Wird Sulfat als nicht kritisch angesehen, sind alle Stoffe den Zuordnungsklassen Z 0 bzw. Z 1.1 zuzuordnen. Damit ist der Einbau an folgenden Stellen möglich [4]:

- Straßen, Wege, Verkehrsflächen (Ober- und Unterbau)
- Industrie-, Gewerbe- und Lagerflächen (Ober- und Unterbau)
- Unterkonstruktion von Gebäuden
- Unterhalb der durchwurzelbaren Bodenschicht bei Erdarbeiten (Lärm- und Schutzwände)
- Unterbau von Sportanlagen.

Ersatzbaustoffe werden auch heute bereits in vielen Bereichen eingesetzt und verfügen über eine gute Recyclingquote. Allerdings beschränkt sich ihr Einsatz häufig auf untergeordnete Einsatzzwecke (downcycling), wie beispielsweise die Verfüllung von bergbaulichen Restlöchern. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es hierfür keine Notwendigkeit gibt. Die getesteten Ersatzbaustoffe stehen beispielhaft für die zunehmend mögliche Verwendung dieser Materialien auch in hochwertigen Anwendungen (upcycling).

Die Begrünung der Außenhaut der KBE zeigt, dass Ersatzbaustoffe, im Gemisch mit organischen Böden, als Begrünungsmaterialien geeignet sind. Hier ist insbesondere das Wasserspeichervermögen der porenhaltigen Materialien Ziegelbruch und Porenbeton zu erwähnen, das in zunehmend trockeneren Klimaten Vorteile für den dauerhaften Begrünungserfolg aufweist.

Die Konstruktion wird auch nach Ende des Projektes dauerhaft beobachtet. Dabei sollen Erkenntnisse zum langfristigen Begrünungsverhalten der Materialien gewonnen werden. Ferner werden die chemischen Untersuchungen am Sickerwasser fortgeführt. Weiterhin ist eine Ökobilanzierung und Wasserhaushaltsbilanzierung vorgesehen.

5 Literatur

- [1] Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung, V. v. 09.07.2021 BGBl. I S. 2598.
- [2] DWD. [Online] [Zitat vom: 16. 12 2020.] https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimawirk/stadtpl/projekt_warmeinseln/projekt_warmeinseln_node.html.
- [3] Europäische Kommission (2013). Building a Green Infrastructure for Europe European Union: Brussels, Belgium, 2013; ISBN 978-92-79-33428-3, Abruf 20.05.2021
- [4] LAGA, Länderarbeitsgemeinschaft Abfall. Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft (LAGA) 20. Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln. 2003.
- [5] S. Schwerdt, P. Schneider und D. Mirschel, „Abschlussbericht Forschungsprojekt Verbesserung und Stärkung der urbanen grünen Infrastruktur durch Einsatz von Ersatzbaustoffen in Kunststoff-Bewehrte-Erde-Konstruktionen (Recycle-KBE),“ Magdeburg, 2020.
- [6] T. Hildebrandt und M. Wilke, Verwendbarkeit von Recyclingbaustoffen als Ersatz zu Primärbaustoffen in Kunststoff-Bewehrte-Erde-Konstruktionen, Magdeburg: Masterarbeit HS Magdeburg-Stendal, unveröffentlicht, 2020.
- [7] F. Achtel, Das Herausziehverhalten von Geogittern in mineralischen Ersatzbaustoffen, Magdeburg: Masterarbeit HS Magdeburg-Stendal, unveröffentlicht, 2021
- [8] FGSV. M T S E 17. Merkblatt über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau. Köln: FGSV-Verlag, 2017.



Zeitabhängige Entwicklung der erdbautechnischen Eigenschaften von ZFSV aus rezyklierten Baustoffen

Dr.-Ing. S. Huber, Boley Geotechnik GmbH, München
M. Zeni M.Sc., Zentrum Geotechnik der TU München
Dr.-Ing. E. Birle, Zentrum Geotechnik der TU München

Zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) sind Baustoffe aus einem mineralischen Ausgangsmaterial, Bindemittel, Wasser und gegebenenfalls weiteren Zusätzen. Ihre rheologischen und mechanischen Eigenschaften sind zeitabhängig und können durch die geeignete Wahl des Mischungsverhältnisses der Ausgangsstoffe gezielt auf die Erfordernisse der jeweiligen Anwendungen abgestimmt werden. Die Möglichkeit zur Steuerung der erdbautechnischen Eigenschaften von ZFSV über das Mischungsverhältnis der verwendeten Ausgangsstoffe erlaubt es, auch solche Mineralstoffe, die ob ihrer ungünstigen erdbautechnischen Eigenschaften für Anwendungen im Erdbau häufig nicht in Betracht gezogen werden, als ZFSV wiederzuverwenden. Obwohl der Einsatz von ZFSV im Erdbau bereits seit vielen Jahren bekannt ist, bestehen im Hinblick auf die zeitabhängige Entwicklung ihrer mechanischen und hydraulischen Eigenschaften im verfestigten Zustand nach wie vor Unklarheiten. Dieser Beitrag stellt Ergebnisse aus einaxialen und dreiaxialen Druckversuchen sowie aus Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit, die während eines Zeitraumes von etwa 2 Jahren an einem ZFSV aus einem aufbereiteten Bauschuttgemisch durchgeführt wurden, vor. Außerdem wird ein Prognosemodell vorgestellt, mit dessen Hilfe auf der Grundlage eines überschaubaren Laborprogrammes die zeitabhängige Festigkeitsentwicklung eines ZFSV in Abhängigkeit des Wasser- zum Bindemittelwertes prognostiziert werden kann. Die vorgestellten Ergebnisse helfen, den Kenntnisstand zur zeitabhängigen Entwicklung der mechanischen und hydraulischen Eigenschaften von ZFSV weiterzuentwickeln und ZFSV in der Praxis anforderungsgerecht und zielgerichtet zur Anwendung zu bringen.

1 Einleitung

Zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) sind Baustoffe, die im Wesentlichen aus einem mineralischen Ausgangsmaterial, Bindemittel, Wasser und weiteren Zusätzen, darunter meist Tonminerale wie Montmorillonit, bestehen. Zur gezielten Steuerung bestimmter Eigenschaften von ZFSV können bei Bedarf Zusatzmittel, z. B. Verflüssiger, Stabilisierer, Luftporenbildner oder Abbindebeschleuniger, zugegeben werden. Die Funktionsweise von ZFSV beruht darauf, dass dem Feststoffgemisch zunächst Wasser bis über die Sättigung des Porenraumes hinaus zugegeben wird, wodurch der Scherwiderstand an den Kontaktpunkten der Feststoffpartikel herabgesetzt wird und das Gemisch als feststoffreiche, fließfähige Masse vorliegt. Die hydraulische Reaktion des Bindemittels mit dem verfügbaren Wasser sowie die Umbildung der Mineralstruktur der Tonminerale führt schließlich zur Verfestigung des zunächst fließfähigen Gemisches. Die im Gegensatz zu reinen Zementleimen deutlich geringere einaxiale Druckfestigkeit resultiert hauptsächlich aus dem geringeren Anteil an hydraulischem Bindemittel und dem größeren Abstand der reaktiven Bestandteile durch den hohen Wassergehalt der Mischungen. Die physikalischen Eigenschaften von ZFSV sind zeitlich

veränderlich und hängen von der Art und den Eigenschaften der Ausgangsmaterialien sowie deren Mischungsverhältnissen ab.

Die Möglichkeit zur Steuerung der erdbautechnischen Eigenschaften von ZFSV über das Mischungsverhältnis der verwendeten Ausgangsstoffe erlaubt es, auch solche Mineralstoffe, die ob ihrer ungünstigen erdbautechnischen Eigenschaften (z. B. feinkörnige, erdbautechnisch zu weiche Böden; ziegelreiche RC Baustoffe) für Anwendungen im Erdbau häufig nicht in Betracht gezogen werden, als ZFSV wiederzuverwenden. Hierdurch können ZFSV zur nachhaltigen und ressourceneffizienten Materialverwendung im Erdbau beitragen. Obwohl der Einsatz von ZFSV – auch solchen aus Sekundärbaustoffen – im Erdbau bereits seit vielen Jahren bekannt ist (z. B. FOLLIARD ET AL. 2008, TREJO, FOLLIARD & DU, 2004), bestehen im Hinblick auf die zeitabhängige Entwicklung der mechanischen und hydraulischen Eigenschaften von ZFSV im verfestigten Zustand nach wie vor Unklarheiten. Dies führt dazu, dass ZFSV häufig noch immer nur zögerlich als Alternative zu konventionellen Bauverfahren in Betracht gezogen werden.

Dieser Beitrag soll dazu beitragen, den Kenntnisstand zur zeitabhängigen Entwicklung der mechanischen und hydraulischen Eigenschaften von ZFSV – insbesondere solchen aus rezyklierten Baustoffen –



weiterzuentwickeln und dadurch zu ihrem zukünftig vermehrten Einsatz beitragen. Hierzu werden Ergebnisse von Untersuchungen zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit sowie aus einaxialen und dreiaxialen Druckversuchen vorgestellt und diskutiert, die während eines Zeitraumes von über 2 Jahren an einem ZFSV aus einem aufbereiteten Bauschuttgemisch durchgeführt wurden. Schließlich wird am Beispiel der Ergebnisse von einaxialen Druckversuchen ein Prognosemodell vorgestellt, mit dessen Hilfe auf der Grundlage eines überschaubaren Laborprogrammes die zeitabhängige Festigkeitsentwicklung eines ZFSV in Abhängigkeit vom Wasser zum Bindemittelwert prognostiziert werden kann.

2 Durchgeführte Untersuchungen

2.1 Versuchsmaterialien

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Prüfkörper eines ZFSV untersucht, der aus einem aufbereiteten Bauschuttgemisch RCM 0/16, LithoFlow MT 10, eine speziell für die Herstellung von ZFSV entwickelte Bindemittel-Fertigmischung der Rohrdorfer-Gruppe, und Wasser hergestellt wurde. Das aufbereitete Bauschuttgemisch RCM 0/16 stammt von einem Baustoffaufbereiter aus dem Münchner Umland. Gemäß DIN 18196 handelt es sich um einen Erdbaustoff der Bodengruppe GU. Das Produkt LithoFlow MT 10 besteht aus Zementen nach DIN EN 197-1, Natriumbentonit sowie speziellen Gesteinsmehlen nach DIN EN 12620. Ausgewählte geotechnische Eigenschaften des RCM 0/16 sowie des Bindemittels LithoFlowMT 10 sind in Tabelle 2-1 aufgeführt.

Tabelle 2-1: Bodenmechanische Kenngrößen von RCM 0/16 und LithoFlow MT 10

Boden	RCM 0/16	Litho Flow MT 10
Bodengruppe nach DIN 18196	GU	-
d_{max} [mm]	29	-
Anteil $\leq 16 \text{ mm}^1$ [M.-%]	97,6	-
Anteil $\leq 2 \text{ mm}^1$ [M.-%]	32,9	-
Anteil $\leq 0,06 \text{ mm}^1$ [M.-%]	8,3	-
C_u^2 [-]	50,6	-
C_c^2 [-]	4,0	-
Korndichte ϕ_s^3 [g/cm ³]	2,653	2,904
Proctordichte ϕ_{Pr}^4 [g/cm ³]	1,913	-
Proctorwassergehalt w_{Pr}^4 [%]	14,8	-
k_{10}^5 bei $D_{Pr} = 100 \%$ [m/s]	3,8E-7	-

¹⁾ nach DIN EN ISO 17892-4

⁴⁾ nach DIN 18127

²⁾ nach DIN EN ISO 14688-2

⁵⁾ nach DIN EN ISO 17892-11

³⁾ nach DIN EN ISO 17892-3

2.2 Laborversuche

Die Prüfkörper des ZFSV wurden am 18.11.2020 im Rahmen der Herstellung eines Versuchsfeldes aus ZFSV entnommen. Zur Herstellung des verwendeten

ZFSV wurden die Versuchsmaterialien aus Abschnitt 2.1 in einer stationären Mischanlage gemischt und der ZFSV mittels Fahrmischer bei rotierender Trommel zum Versuchsfeld transportiert (Fahrzeit ca. 5 Minuten). Das Mischungsverhältnis der Ausgangsmaterialien zur Herstellung des ZFSV ist in nachfolgender Tabelle 2-2 bezogen auf eine Trockenmasse von 1000 kg des mineralischen Ausgangsmaterials (RCM 0/16) aufgeführt. Die Prüfkörper wurden aus einer bestimmten Charge und unmittelbar nach dem Entladen des ZFSV hergestellt. Hierzu wurde der ZFSV in PVC-Rohre ($d = 100 \text{ mm}$, $h = 200 \text{ mm}$) gefüllt und diese mittels Folie verschlossen und gegenüber Austrocknung geschützt. Anschließend wurden die Prüfkörper ins Labor des Zentrum Geotechnik der TU München verbracht und bis zur Prüfung in einem temperierten Raum ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) und gegenüber Sonneneinstrahlung geschützt gelagert. An den Prüfkörpern wurden nach unterschiedlichen Lagerungszeiten Versuche zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit sowie einaxiale und dreiaxiale Druckversuche durchgeführt. Die einzelnen Prüfzeitpunkte sowie die dabei jeweils bestimmten bodenmechanischen Kenngrößen sind in Tabelle 2-3 aufgeführt.

Tabelle 2-2: Mischungsverhältnis der Ausgangsmaterialien zur Herstellung des untersuchten ZFSV

RCM 0/16 ¹⁾	LithoFlow MT 10 ¹⁾	Wasser ²⁾	w/B ³⁾
1000	72,4	237,0	3,27

¹⁾ Trockenmasse in [kg]

³⁾ Verhältnis Wasser-

²⁾ Masse Wasser (gesamt) in [kg] / Bindemittelmenge

Tabelle 2-3: Prüfzeitpunkte und jeweils bestimmte Kenngrößen ($x =$ Versuchsdurchführung)

Datum	Probenalter	k	q_u	ϕ_{peak} , c_{peak}
18.11.2020	Herstellung Prüfkörper			
25.11.2020	8	-	x	-
15.12.2020	28	x	x	x
30.03.2021	133	x	x	x
28.10.2021	345	x	x	x
22.07.2022	612	x	x	x

Für die einzelnen Versuche wurden die Prüfkörper unmittelbar vor der Versuchsdurchführung aus den PVC-Rohren ausgeschalt und ihre Abmessungen ermittelt. Die Versuche zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit wurden nach DIN EN ISO 17892-11 mit veränderlichem hydraulischem Gefälle durchgeführt und der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert wurde bei einem hydraulischen Gradienten von $i = 30$ ermittelt. Die einaxialen Druckversuche wurden nach DIN EN ISO 17892-7 und gemäß den Vorgaben der H ZFSV mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt. Bei den dreiaxialen Druckversuchen, die als Einzelstufenversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 17892-9 durchgeführt wurden, wurden die Prüfkörper unmittelbar nach dem Einbau

Stauchung wurde an den Wendepunkt der Spannungs-Stauchungskurve eine Tangente angelegt und diese bis zum Schnittpunkt mit der Abszisse, auf der die Stauchung aufgetragen wird, verlängert. Der Korrekturwert für die Stauchung wurde am Schnittpunkt der angelegten Tangente mit der Abszisse ablesen.

Abbildung 3-1 zeigt, dass die einaxiale Druckfestigkeit über die Zeit deutlich zunimmt, was durch die zunehmende Hydratisierung des Bindemittels mit der Zeit begründet ist. Die Daten zeigen, dass auch nach etwa einem Jahr Lagerungsdauer der Prüfkörper noch eine deutliche Zunahme der Festigkeit stattfindet. Neben der Zunahme der einaxialen Druckfestigkeiten zeigen die Daten in Abbildung 3-1 auch ansteigende Verformungsmoduln E_{50} der Prüfkörper mit zunehmender Lagerungsdauer. Der Anstieg der Steifigkeit ist dabei insbesondere bis zur Prüfung nach 133 Tagen deutlich ausgeprägt. Bei den nachfolgenden Prüfzeitpunkten kann hingegen im Mittel nur mehr eine geringe Zunahme von E_{50} festgestellt werden. Allerdings zeigen die Daten in Abbildung 3-1 bezüglich der Verformungsmoduln E_{50} insbesondere bei den Prüfzeitpunkten nach 133 und 612 Tagen auch eine vergleichsweise große Streuung.

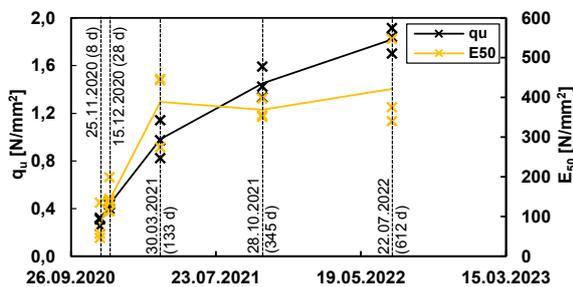


Abbildung 3-1: Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit q_u sowie des Verformungsmoduls E_{50} über die Zeit

3.3 Dreiaxiale Druckversuche

Die Ergebnisse der dreiaxialen Druckversuche, die als unkonsolidierte, dränierete Einzelstufenversuche durchgeführt wurden, sind in Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 dargestellt. Abbildung 3-2 zeigt die zu den einzelnen Prüfzeitpunkten ermittelten Bruchgeraden sowie die aus den Bruchgeraden unter Annahme einer Mohr-Coulombschen Bruchbedingung abgeleiteten Scherparameter φ_{peak}' und c_{peak}' . Bei den angegebenen Scherparametern handelt es sich um die Kenngrößen im Bruchzustand. Abbildung 3-3 gibt die Verläufe der deviatorischen Spannungen bei den einzelnen Radialspannungen über die axiale Dehnung wieder.

Die Darstellung der Bruchgeraden in Abbildung 3-2 zeigt deutlich den Anstieg der Festigkeit des ZFSV

infolge der fortschreitenden hydraulischen Reaktion des Bindemittels mit der Zeit. So können die untersuchten Prüfkörper mit zunehmender Lagerungsdauer bei jeweils vergleichbaren Radialspannungen σ_3 sowohl höhere mittlere Spannungen s' als auch höhere deviatorische Spannungen t abtragen. Die Bruchgeraden verschieben sich damit mit zunehmender Lagerungsdauer zunehmend nach rechts oben. Damit gewinnt der untersuchte ZFSV mit zunehmender Lagerungsdauer zunehmend an Festigkeit, was sich auf Grundlage der Versuchsergebnisse in Abbildung 3-2 vor allem in einer deutlich ansteigenden Kohäsion und einem in geringerem Umfang ansteigendem Reibungswinkel ausdrückt (vgl. Scherparameter in Abbildung 3-2). Im Hinblick auf die Entwicklung der Kohäsion und den Reibungswinkel fällt lediglich die Prüferie vom 28.10.2022 etwas aus der Reihe. So weist die Bruchgerade vom 28.10.2022 gegenüber derer vom 30.03.2021 und vom 22.07.2022 eine deutlich geringere Kohäsion, im Gegenzug dafür allerdings einen deutlich höheren Reibungswinkel auf.

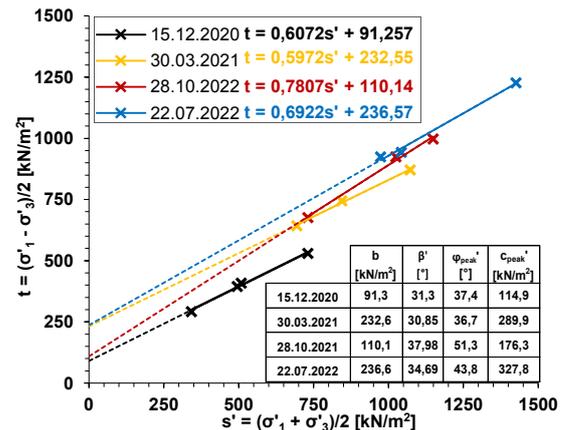
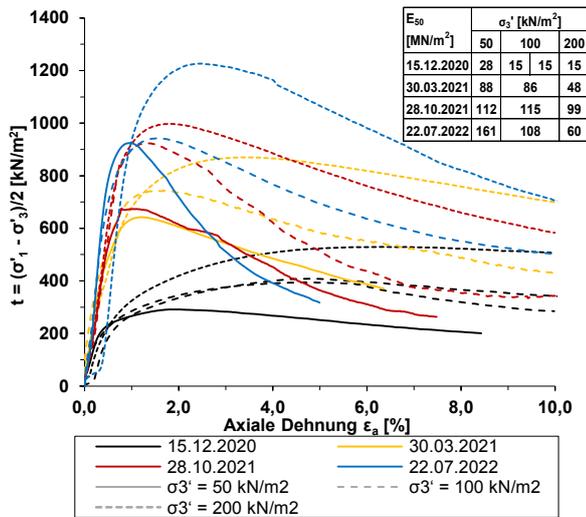


Abbildung 3-2: Bruchgeraden des untersuchten ZFSV zu unterschiedlichen Prüfzeitpunkten und daraus abgeleitete Scherparameter

Die Festigkeitszunahme mit der Zeit zeigt sich auch in den Verläufen der deviatorischen Spannungen über die axiale Dehnung in Abbildung 3-3. So steigt die Größe der maximal aufnehmbaren Deviatorspannungen t mit zunehmender Lagerungsdauer deutlich an. Dabei geht der Festigkeitsanstieg mit einer Zunahme der Steifigkeit einher. Dies wird anhand der mit längerer Lagerungszeit zunehmend steiler verlaufenden Kurven qualitativ ersichtlich und durch die Steifemoduln E_{50} , die in Abbildung 3-3 angegeben sind, quantifiziert. Dabei wurden die Verformungsmoduln E_{50} aus $\Delta\sigma' = t_{max}/2$ und der axialen Stauchung $\Delta\varepsilon_a$ ermittelt. Dabei ist $\Delta\varepsilon_a$ die bis zum Erreichen von $t_{max}/2$ auftretende und um den bis zum Erreichen des Kraftschlusses korrigierte axiale Stauchung. Wie bei den einaxialen Druckversuchen wurde zur Korrektur der axialen Stauchung an den



Wendepunkt der Spannungs-Stauchungskurve eine Tangente angelegt und diese bis zum Schnittpunkt mit der Abszisse, auf der die axiale Stauchung aufgetragen wird, verlängert. Der Korrekturwert für die axiale Stauchung wurde am Schnittpunkt der angelegten Tangente mit der Abszisse ablesen. Hingewiesen wird darauf, dass sich mit dieser Auswertung bei den Prüfungen nach 133 Tagen und 612 Tagen jeweils bei der höchsten Radialspannung $\sigma_3' = 200$ kPa Verformungsmodul E_{50} ergeben, die im Vergleich zu den jeweiligen Verformungsmodul E_{50} bei den jeweils geringeren Radialspannungen $\sigma_3' = 50$ kPa bzw. $\sigma_3' = 100$ kPa deutlich abfallen.



Anmerkung: am 28.10.2021 $\sigma_3' = 150$ kN/m² statt 200 kN/m²

Abbildung 3-3: Verläufe der deviatorischen Spannungen über die axiale Dehnung zu unterschiedlichen Prüfzeitpunkten

4 Prognose der Festigkeit

Zum Nachweis der Eignung von ZFSV sind unter anderem Anforderungen an ihre Druckfestigkeit festzulegen und die Übereinstimmung der Eigenschaften einer Rezeptur mit den festgelegten Anforderungen nachzuweisen (FGSV 2017, FGSV 2012). Hinsichtlich der Festigkeit sind die einaxialen Druckfestigkeiten nach 7, 28 und 56 Tagen zu ermitteln, wobei für die Prüfung die TP BF-StB Teil B 11.3 zugrunde zu legen sind. Zu beachten ist, dass die Eignungsprüfung jeweils nur für ein definiert zusammengesetztes Gemisch Gültigkeit besitzt und nicht auf andere Mischungsverhältnisse übertragen werden darf. Bei einer Änderung des Bindemittel- bzw. Wassergehaltes ist eine erneute Eignungsprüfung durchzuführen.

Von HUBER ET AL. (2022) wurde indes gezeigt, dass die Festigkeitsentwicklung von ZFSV maßgeblich vom Verhältnis des Wasser- zum Bindemittelgehaltes (w/B_{im} -Wert) abhängt, wobei als Bezugswassergehalt der Wassergehalt der frischen (fließfähigen)

Suspension verwendet wurde. Basierend auf diesem Zusammenhang wurde von HUBER ET AL. (2022) ein Vorschlag für eine Eignungsprüfung von ZFSV bezüglich der Festigkeitsentwicklung erarbeitet, wobei der Zusammenhang zwischen dem Bindemittelgehalt, dem Wassergehalt und der Festigkeit eines ZFSV für definierte Ausgangsmaterialien von vornherein ermittelt wird. Um die Festigkeitsentwicklung allgemein anhand des w/B_{im} -Wertes zu bestimmen, ist gegenüber den Vorgaben des H ZFSV (FGSV, 2012) (Bestimmung von q_u einer Mischung mit drei unterschiedlichen Bindemittelgehalten) lediglich die Anzahl der herzustellenden Proben anzupassen. Dabei erscheint es aus derzeitiger Sicht sinnvoll, die einaxiale Druckfestigkeit an mindestens fünf Einbaubedingungen zu ermitteln, wobei bei einer Einbaubedingung zusätzlich das Prüfalter zu variieren ist.

Das Ergebnis des vorgeschlagenen Vorgehens ermöglicht es, basierend auf einem überschaubaren Prüfumfang, der gegenüber der konventionellen Eignungsprüfung von ZFSV unter dem Kriterium der Druckfestigkeit gemäß H ZFSV (FGSV, 2012) etwas umfangreicher ist, die Festigkeitsentwicklung eines ZFSV aus definierten Ausgangsmaterialien für unterschiedliche Wasser- und Bindemittelgehalte zu prognostizieren, wodurch eine Optimierung des Bindemittelgehaltes (ökonomische Vorteile, Einsparung von CO₂-intensivem Bindemittel) ermöglicht wird. Da das vorgeschlagene Vorgehen jeweils nur für definierte Ausgangsmaterialien Gültigkeit besitzt, bietet es sich insbesondere in solchen Fällen an, in denen große Mengen eines ZFSV kontinuierlich aus annähernd gleichbleibenden Ausgangsmaterialien hergestellt werden und variierende Anforderungen an die Fließfähigkeit und Festigkeitsentwicklung beachtet werden müssen.

Die Anwendbarkeit des Verfahrens von HUBER ET AL. (2022) wird in Abbildung 4-1 am Beispiel des ZFSV aus RCM 0/16 und LithoFlow MT 10 verdeutlicht. Abbildung 4-1 zeigt die Ergebnisse einaxialer Druckversuche, die an den Mischungen aus Tabelle 2-4 nach 7, 28, 56 und 112 Tagen durchgeführt wurden, über den w/B_{im} -Wert (Messwerte). Während die dargestellten Punkte tatsächliche Messwerte darstellen, wurden die Kurven in Abbildung 4-1 jeweils mittels der in Abbildung 4-1 aufgeführten Gleichung $q_u = f(w/B_{im})$ ermittelt. Zur Parametrisierung der Gleichung in Abbildung 4-1 wurden die Messwerte bei den fünf unterschiedlichen w/B_{im} -Werten bei einem Prüfalter von 7 Tagen verwendet. Die jeweiligen ebenfalls in Abbildung 4-1 aufgeführten Parameter A zu den Prüfzeitpunkten von 28, 56 und 112 Tagen wurden jeweils anhand der Messwerte eines w/B_{im} - Wertes (Prognosegrundlage) bestimmt. Ein Vergleich der prognostizierten Kurven mit den darge-

stellten Messwerten sowie die resultierenden Regressionsparameter zwischen 0,96 und 0,97 verdeutlichen, dass die Prognose der Festigkeitsentwicklung auf Basis eines überschaubaren Laborprogrammes möglich ist. Das genaue Vorgehen zur Parametrisierung der Gleichung in Abbildung 4-1 sowie der Ermittlung der Parameter A zu den jeweiligen Prüfzeitpunkten ist in HUBER ET AL. (2022) erläutert.

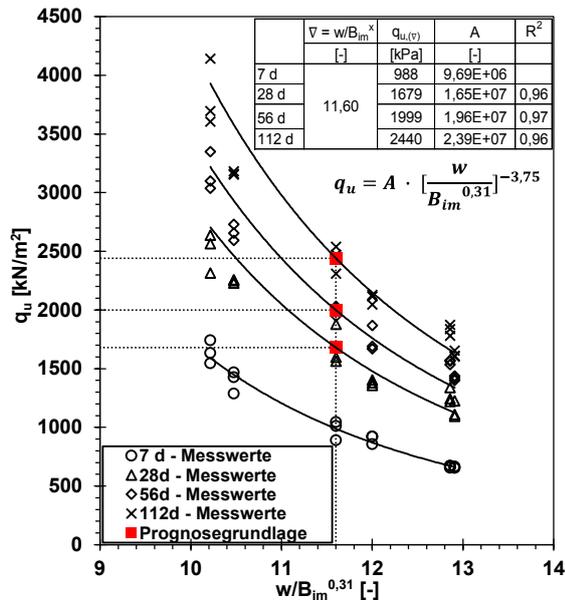


Abbildung 4-1: Prognose der einaxialen Druckfestigkeit des ZFSV aus RCM 0/16 zu unterschiedlichen Prüfzeitpunkten auf Grundlage der Ergebnisse

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden Ergebnisse von einaxialen und dreiaxialen Druckversuchen sowie von Versuchen zur Wasserdurchlässigkeit vorgestellt, die an einem ZFSV aus einem aufbereiteten Bauschuttgemisch während eines Versuchszeitraumes von etwa zwei Jahren durchgeführt wurden. Die Versuche zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit ergaben innerhalb der ersten 133 Tage eine relativ geringe Abnahme des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes etwa um den Faktor 2. Bis zur Messung nach einem Jahr konnte keine weitere signifikante Änderung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes festgestellt werden, wohingegen bei der Messung nach 612 Tagen – vermutlich infolge der zunehmenden Austrocknung der Prüfkörper – ein deutlicher Anstieg des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes um etwa den Faktor 4 bezogen auf den Messwert nach 345 Tagen ermittelt wurde. Die einaxialen und dreiaxialen Druckversuche haben gezeigt, dass die mechanischen Eigenschaften von ZFSV infolge der zunehmenden Hydratisierung des verwendeten Bindemittels zeitabhängig sind. Die einaxiale Druckfestigkeit, die Scherfestigkeit sowie die Steifigkeit nehmen mit der Zeit zu. Die

Festigkeitsentwicklung hängt neben der Zeit darüber hinaus wesentlich vom Verhältnis des Wasser- zum Bindemittelgehaltes (w/B_{im} -Wert) eines ZFSV ab. Dies wurde abschließend anhand von weiteren Laboruntersuchungen, in denen einaxiale Druckversuche unter Variation des Wasser- zum Bindemittelgehaltes durchgeführt wurden, gezeigt. In diesem Zusammenhang wurde des Weiteren ein Prognosemodell vorgestellt, welches basierend auf einem überschaubaren Prüfumfang ermöglicht, die Festigkeitsentwicklung eines ZFSV aus definierten Ausgangsmaterialien für unterschiedliche Wasser- und Bindemittelgehalte zu prognostizieren.

In der Zusammenschau zeigen die Untersuchungen, dass die Herstellung anforderungsgerechter ZFSV aus aufbereiteten Bauschuttgemischen für den Erdbau möglich ist. Dabei können die rheologischen und mechanischen Eigenschaften der ZFSV über das Mischungsverhältnis der Ausgangsmaterialien an die jeweiligen anwendungsbezogenen Anforderungen angepasst werden. Dies ermöglicht es, neben ziegelreichen Baustoffen auch weitere Baustoffe, die aufgrund ungenügender bautechnischer Eigenschaften i. d. R. (z. B. feinkörnige, zu weiche Böden) nicht im Erdbau verwendet werden, nutzbar zu machen. Hierdurch können ZFSV einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung im Sinne einer nachhaltigen Materialverwendung leisten.

Literaturverzeichnis

- FGSV (2017). Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. Ausgabe 2017.
- FGSV (2012). Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau (H ZFSV). Ausgabe 2012.
- Folliard, K.J., Du, L.; Trejo, D. et al. (2008). Development of a recommended practice for use of controlled low-strength material in highway construction. National Cooperative Highway Research Program Report 597. Transportation Research Board. Washington D.C., Report 2008.
- Huber, S., Henzinger, C., Hock, A. & Maurer, H. (2022). Prognose der Festigkeitsentwicklung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV) anhand des Wasser-Bindemittelwertes. Bauingenieur, Band 97 (2022), Nr. 4.
- Trejo, D.; Folliard, K.F. & Du, L. (2004). Sustainable Development using controlled low-strength material. In: Wang, K. (ed.): Proceedings of the international workshop on sustainable development and concrete technology, Beijing, 2004, pp. 231-250.



Thermische Aktivierung von Abwasserkanälen und Einbettung in ein Wärme-Kälteverbundnetz – Konkrete Anwendung des Quartiersansatzes

T. Kugler M.Sc., Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ch. Moormann, Universität Stuttgart,
Institut für Geotechnik

Der energetische Quartiersansatz stellt einen wichtigen Baustein der Wärmewende dar, bei dem das Energieerzeugungssystem die im Quartier vorhandenen energetischen Ressourcen verwertet und verteilt. Das Forschungsprojekt IWAES setzt hier an und nutzt zur thermischen Versorgung eines Stadtquartiers thermisch aktivierte Abwasserkanäle, die im Verbund sowohl als Wärmesenke und -quelle als auch als Wärme- und Kältenetz agieren. Abwasserkanäle erfahren durch den kontinuierlichen Nachstrom von Abwasser einen permanent einwirkenden Wärmestrom, weshalb verglichen mit gängigen geothermischen Wärmequellen höhere thermische Entzugsraten sowohl fürs Heizen als auch Kühlen erreicht werden können.

1 Einleitung

Knapp 30 % der deutschen Primärenergie – hauptsächlich fossilen Ursprungs – wird für die thermische Versorgung von Gebäuden verwendet. Fossile Energien waren bisher kostengünstig und jederzeit zu erwerben. Bedingt durch geopolitische Verwerfungen und die rasant voranschreitende Klimaerwärmung, ist die weitere Verwendung fossiler Energieträger kritisch zu bewerten. Erneuerbare Energiequellen sind hingegen lokal verfügbar, besitzen aber teilweise eine geringe Grundlastfähigkeit. Daher ist es sinnvoll, viele in ihrem Tagesgang unterschiedliche regenerative Energiequellen in einem Wärmenetz zu kombinieren.

Der im Forschungsprojekt IWAES entwickelte thermisch aktivierte Abwasserkanal „Hybridkanal“ besitzt den Vorteil, aufgrund des permanenten Abwasserstroms bei Bedarf jederzeit dem Abwasser und dem umgebenden Erdreich thermische Energie entziehen und zuzuführen zu können. Ferner ermöglicht der Hybridkanal durch zusätzliche Transportfunktionen den bidirektionalen Ausgleich zwischen verschiedenen Abnehmern, sodass diese nicht singular Heizen und Kühlen, sondern die Abwärme und „Abkälte“ weiterer Abnehmer verwenden, i.e. die Nutzer werden selbst Produzenten und Konsumenten thermischer Energie. Auch wird auch die effiziente Einbindung von Energiequellen und Speichern in das Wärmeverbundnetz berücksichtigt.

Das beschriebene Konzept wird für das Untersuchungsgebiet „Rosensteinquartier“ in Stuttgart erprobt. Dieses entsteht auf ehemaligen Gleisflächen, die durch den Bau des neuen Stuttgarter Tiefbahnhofs verfügbar werden. Die direkte Lage des Quartiers in der Kernzone des Heilquellenschutzgebiets

verbietet die Verwendung von Glykol als Wärmeträgerfluid. Um Frostschäden an den Absorbern zu vermeiden, ist eine Mindesttemperatur des Vorlaufs von 2°C einzuhalten.

2 Thermischer Energiebedarf

Zuerst wurde auf Basis des städtebaulichen Siegerentwurfs alle relevanten Kennzahlen ermittelt, u.a. die zu erwartende Einwohnerzahl, die Gebäudegrundfläche und die aus statistischen Werten generierten möglichen Nutzungen samt der typischen Größe. Aus diesen Daten wurde durch Summation des thermischen Bedarfs ein Gebäudelastgang entwickelt. Der Gebäudelastgang berücksichtigt bereits einen gebäudeinternen thermischen Lastausgleich, d.h. sofern im Gebäude gleichzeitig Heiz- als auch Kühlbedarf besteht, wird die Abwärme des Kühlens zum Heizen verwendet. Der thermische Bedarf wurde auf Basis der Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes für das Jahr 2045 ermittelt.

3 Thermische Aktivierung

Der Begriff ‘Thermische Aktivierung’ beschreibt das Ausrüsten eines bautechnisch notwendigen Elements mit Absorberleitungen, d.h. Rohrleitungen aus Kupfer oder Kunststoff werden in oder an dem Bauteil angebracht und von einem Wärmeträgerfluid durchströmt. Das infolge Durchströmung erwärmte Wärmeträgerfluid gibt die aufgenommene Wärme mittels eines Wärmetauschers an eine Wärmepumpe weiter, welche unter Zuhilfenahme elektrischer Energie die Temperatur auf das gewünschte Niveau hebt und an ein Hausnetz weitergibt. Die thermische

Aktivierung unterirdisch liegender bautechnisch notwendiger Infrastruktur bietet den Vorteil, dass keine zusätzlichen Ressourcen für den Bau alternativer geothermischer Anlagen (z.B. Erdwärmesonden, Kollektoren) verwendet werden müssen und der bereits durch anthropogene Nutzung (Kanalisation, etc.) aufgeheizte Boden wieder abgekühlt wird. Die Technologie wird bereits vielfach umgesetzt [Nagpal et al], verlässliche und validierte Bemessungskonzepte sind bisher jedoch nicht vorhanden. Es gibt zwar mathematische Modelle um die Auswirkungen des Wärmezugs auf die Abwassertemperatur zu ermitteln [Dürrenmatt, Wanner], aber nicht um von der Abwassertemperatur und Volumenstrom auf die Wärmeentzugsleistung zu schließen.

4 Hybridkanal

Der 'Hybridkanal' ist ein Abwasserkanalsegment, das zu einem die originäre Aufgabe des Abwassertransportes erfüllt, infolge der thermischen Aktivierung durch äußerlich helikal angeordnete Absorber aber auch dem umgebenden Erdreich, der Kanalluft und dem Abwasser thermische Energie entziehen als auch zuführen kann (siehe Abbildung 4-1).



Abbildung 4-1: Thermisch aktivierter Hybridkanal

Bedingt durch arbeitsrechtliche Vorgaben kann der Hybridkanal erst ab einem Mindestdurchmesser DN800 optional zusätzlich mit innenliegenden Absorbern, die vor allem dem Abwasser thermische Energie entziehen ausgestattet werden. Die Absorber werden für den Wärmeentzug mit einem kalten Wärmeträgerfluid beaufschlagt, um durch die Kanalluft, das Abwasser und das umgebende Erdreich erwärmt zu werden; bei der Gebäudekühlung wird dem Kanal Wärme zugeführt („Kälte entzogen“). Die so gewonnene Energie wird mittels einer Wärmepumpe auf ein verwertbares Niveau gehoben. Durch zusätzliche, oberhalb des Hybridkanals angeordnete Leitungen kann thermische Energie auf unterschiedlichen Energiestufen durch das Quartier transportiert werden (Abbildung 4-2). Transportierte thermische Energie benötigt im besten Fall keine Anhebung der Temperatur mittels Wärmepumpe, folglich ist dann keine zusätzliche elektrische Energie notwendig. Die dreidimensionale Ausgestaltung des Hybridkanals sieht

ein aktiviertes Kanalstück mit einer Länge von 6 m aus Kunststoff vor. Andere Fertigteillängen der Kanalstücke sind jedoch denkbar.

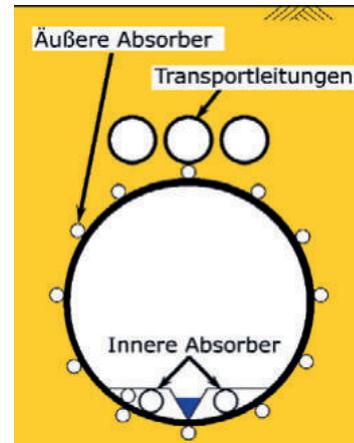


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung des Hybridkanals

An der äußeren Oberfläche des Kanals ist die Absorberleitung in Form einer Helix angebracht, mit der Konsequenz, dass es pro Hybridkanalsegment einen Vor- und einen Rücklauf gibt. Um hohe Reibungsverluste bei der Koppelung mehrerer Kanalsegmente zu vermeiden, sind die Hybridkanäle im 'Tichelmann-System' hydraulisch mit dem Hausanschluss verbunden. Im Hausanschluss wird die thermische Energie über einen Wärmetauscher an eine Wärmepumpe zur weiteren Verwendung aufbereitet.

4.1 Thermische Leistungsfähigkeit

Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit ist der Wärmestrom, der direkt auf den Absorber wirkt, maßgebend. Dieser ist jedoch wiederum abhängig von allen Wärmeströmen (Solarer, geothermischer Wärmestrom, etc.) welche innerhalb und im Umfeld der Hybridkanäle wirken. Es bestehen Interdependenzen zwischen den unterschiedlichen Wärmeströmen. Auch sind die Wärmeströme nach ihrer Wärmeübertragungsart zu differenzieren (konduktiv, konvektiv). Eine geschlossene analytische Lösung ist daher nicht umsetzbar, sodass numerische Untersuchungen durchgeführt werden. Zur numerischen Untersuchung müssen jedoch möglichst alle thermohydraulischen Kennwerte bekannt sein. Hinsichtlich des Klimas innerhalb von Abwasserkanälen gab es jedoch kaum gesicherte Daten, weshalb Feldmessungen in ausgewählten Kanälen ausgeführt wurden.

4.2 Kanalluftuntersuchung

Untersuchungen an thermisch aktivierten Tunnelbauwerken belegen einen signifikanten Einfluss der Tunnelluft auf die mögliche Wärmeextraktion [Schneider, Buhmann]. Um die thermische Leistungsfähigkeit von Hybridkanälen zu ermitteln, ist es



daher wichtig, Temperatur und Strömung der Kanalluft zu kennen. Der Kenntnisstand zu den klimatischen Bedingungen in Abwasserkanälen ist begrenzt: Messungen der Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Abwassertemperatur stehen nicht zur Verfügung, weshalb an der Universität Stuttgart im Jahr 2021 Untersuchungen zu diesem Sachverhalt durchgeführt wurden. Hierfür wurden unterschiedliche Kanaldurchmesser und Gefälle messtechnisch ausgerüstet und untersucht (siehe Abbildung 4-3).

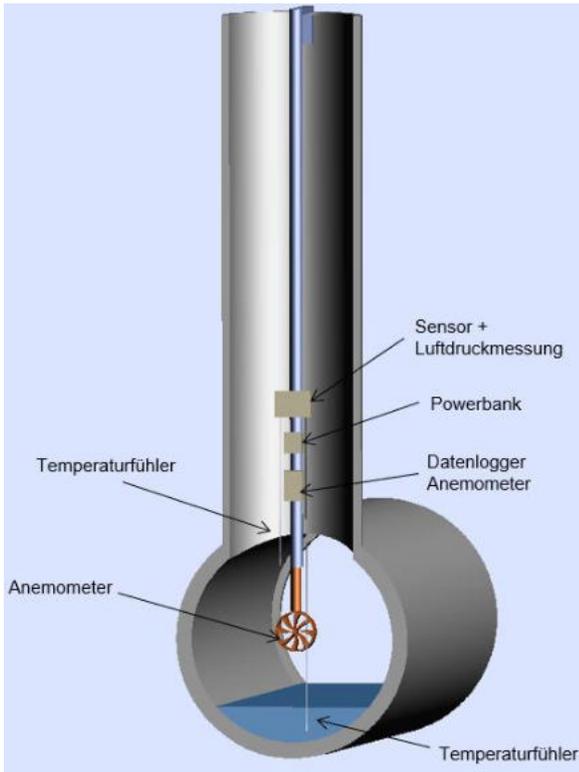


Abbildung 4-3: Messkonzept des Kanalklimas

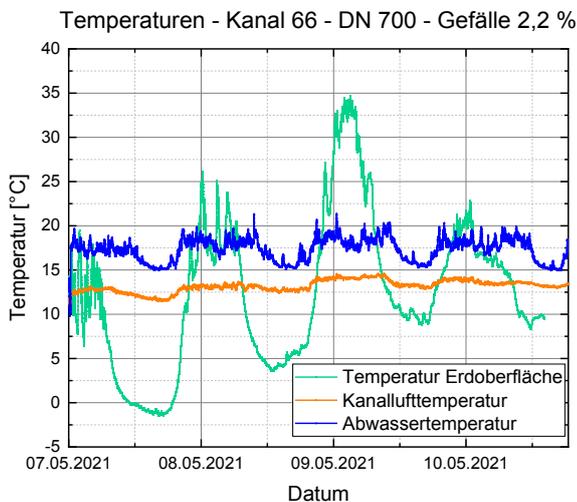


Abbildung 4-4: Messung der Kanalttemperaturen

In Abbildung 4-4 sind exemplarisch die gemessenen Temperaturen für einen Kanal mit einem Durchmesser von 700 mm aufgezeigt. Hier als auch in anderen untersuchten Kanalmessungen zeigt sich, dass die Temperatur der Kanalluft kurzfristig unabhängig von der Oberflächen- als auch von der Abwassertemperatur ist. Dieser Zusammenhang ist nur durch die thermische Beeinflussung des Erdreichs zu erklären. In Abbildung 4-5 ist zu erkennen, dass es im Kanal eine Kanalluftströmung gibt und diese unabhängig von der Abwasserströmungsrichtung sein kann. Folglich kann hieraus geschlossen werden, dass der Wärmeübergang zwischen Kanalluft und innerer Kanaloberfläche auf Konvektion beruht.

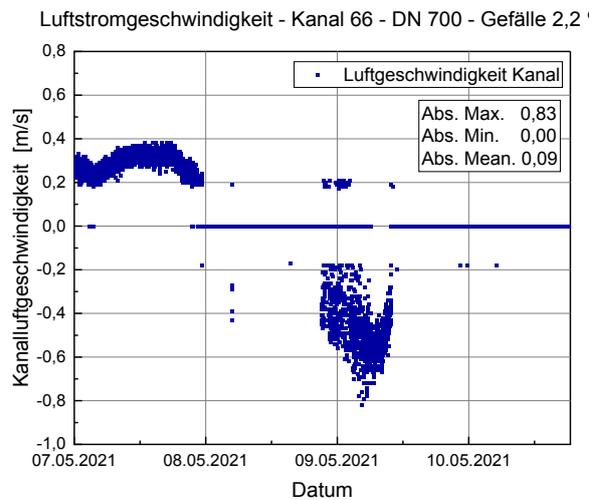


Abbildung 4-5: Messung der Kanalluftgeschwindigkeit

4.3 Numerische Untersuchung

Zur Ermittlung der thermischen Leistungsfähigkeit der Hybridkanäle wurden numerische zwei- und dreidimensionale thermisch-hydraulische gekoppelte Berechnungen mittels der Simulationssoftware COMSOL durchgeführt. Das hier verwendete Modell ist in Abbildung 4-6 dargestellt. Um Randeffekte infolge ungeeigneter Geometrie und Netzeffekte vorzubeugen, wurden vorausgehend umfangreiche Sensitivitätsuntersuchung durchgeführt. Hierbei wurde die Einflussgröße der einzelnen wirkenden Wärmeströme quantifiziert um festzustellen, welche besonderer Untersuchung bedürfen. Hierbei wurde festgestellt, dass insbesondere die Geschwindigkeit und Temperatur des Abwassers als auch der Kanalluft entscheidend für die Leistungsfähigkeit des Absorbers sind. Ferner besitzt der atmosphärische Wärmeintrag einen zu berücksichtigenden Einfluss, hier insbesondere der konvektive Wärmestrom (infolge Windes). Der dimensionslose, konvektive Wärmeübergangskoeffizient welcher infolge von Luftströmungen an Geländeoberflächen wirkt, wurde gemäß [Beisel] mittels der durchschnittlich Windgeschwindigkeit ermittelt, siehe Formel (1). Die

durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten und Oberflächentemperaturen wurden den Testreferenzjahren des Deutschen Wetterdienstes für das Jahr 2045 entnommen, i.e. der Einfluss des Klimawandels wurde in der Simulation berücksichtigt.

$$\alpha = \begin{cases} 1,8 + 4,1 \cdot v & v \leq 5 \frac{m}{s} \\ 7,3 \cdot v^{0,73} & v > 5 \frac{m}{s} \end{cases} \quad (1)$$

Die thermischen Einflüsse aus Abwassertemperatur wurden aus stündlichen Temperaturmessungen am Hauptklärwerk Stuttgart-Mühlhausen gebildet. Aus dem städtebaulichen Entwurf wurde von einem Projektpartner die siedlungswassertechnische Planung des Rosensteinquartier entworfen.

Der Entwurf gibt für jeden Kanalabschnitt den Durchmesser, die Länge und die durchschnittlich zu erwartende Abwasserströmungsgeschwindigkeit an, die dann in der numerischen Simulation als Strömungsgeschwindigkeit angenommen wurde. Geothermische Anlagen werden üblicherweise leicht turbulent durchströmt, da dies das energetische Optimum zwischen eingesetztem Pumpenstrom und extrahierter Wärmeenergie darstellt (VDI 4640). Für die Daten der Kanalluft wurden die Ergebnisse der bereits erwähnten Untersuchungen verwendet. Als Bodenkontinuum wurde in einem ersten Schritt ein nichtbindiger, homogener Boden ohne Grundwasserströmung angenommen. Der aufgetragene Lastgang wurde im Rahmen des Projektes für einen typischen Gebäudeblock entwickelt. Als minimale Vorlauftemperatur des Absorberfluids wurde ein Wert von 2°C und als maximale Vorlauftemperatur von 35°C angenommen. Da die Absorber unmittelbar an den Abwasserkanal angebracht sind, wird die maximal zulässige Einleittemperatur des Abwassers als Grenzwert festgesetzt. Dieser ergibt sich aus der Abwasserbeseitigungssatzung der Landeshauptstadt Stuttgart (2019). Die minimale Temperatur von 2°C ergibt sich aus der Vorgabe des Heilquellenschutzes, kein Glykol als Frostschutz verwenden zu dürfen.

Bei der numerischen Berechnung wurde der Lastgang durch die Anzahl an Hybridkanälen geteilt, die für die Bewältigung des Lastgangs notwendig sind. Die Kanallänge wurde zu 6 m angenommen, da dies gängige Transportmaße sind, als auch numerisch ein guter Kompromiss zwischen Modellgröße und Randeffekten darstellt. Als maßgebender Parameter wurde die Vorlauftemperatur des Hybridkanals gewählt, die die 35°C-Schranke nicht über- und die 2°C Schranke nicht unterschreitet.

Die thermische Leistungsfähigkeit des Hybridkanals wurde anhand eigens für das Rosensteinquartier entwickelter Lastgänge ermittelt. Der Lastgang gibt an zu welcher Stunde welche thermische Leistung in dem jeweilig untersuchten Block benötigt wird. Im ersten Schritt wird dem numerischen Modell eine Vorlauftemperatur von 2°C vorgegeben. Mittels der

Simulation wird dann ermittelt mit welcher Rücklauf-temperatur dann zu rechnen ist. Gemäß Formel (2) kann dann aus der benötigten Leistung, dem Volumenstrom und der Rücklauf-temperatur auf die Vorlauf-temperatur der nächsten Stunde geschlossen werden. Ist die Leistung aber jedoch dergestalt, dass die neue Vorlauf-temperatur kleiner 2°C oder größer 35°C ist, muss entweder ein weiterer Hybridkanal angeschlossen werden oder der Lastgang reduziert werden. Da die thermischen Bedarfe deutlich höher sind als das thermische Angebot müssten einige Absorber hintereinandergeschaltet werden, wodurch das Modell größer und folglich die Rechenzeit deutlich länger werden würde. Weshalb der thermische Lastgang durch die theoretische Anzahl an Hybridkanälen dividiert wird. Befindet sich die Vorlauf-temperatur zwischen 2°C und 35°C, ist die Anzahl der Kanalsegmente in der Lage den thermischen Bedarf zu liefern, wenn nicht muss durch der Lastgang erneut durch eine höhere Anzahl dividiert werden. Bis die Vorlauf-temperatur exakt eine der Schranken berührt.

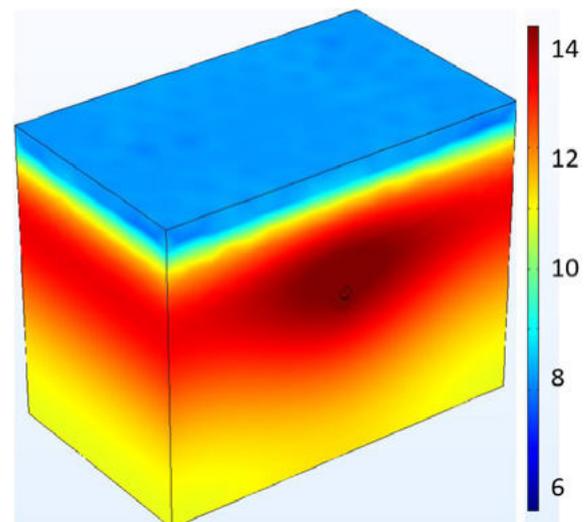


Abbildung 4-6 Dreidimensionales Thermohydraulisch gekoppeltes Modell des Hybridkanals [°C]

Die Leistung des Hybridkanals wurde mittels der folgenden Gleichung ermittelt und durch die Anzahl an Jahresvolllaststunden dividiert (Heizlaststunden: 1240 h, Kühllaststunden: 360 h).

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot c_p \cdot \rho \cdot (\vartheta_{\text{Rücklauf}} - \vartheta_{\text{Vorlauf}}) \quad (2)$$

Tab. 1: Thermische Leistungsfähigkeit

Durchmesser [mm]	Heizen [W/m ²]	Kühlen [W/m ²]
300	140	830
400	130	700
800	115	640

Die in Tab. 1 dargestellten Werte beziehen sich auf die innere Oberfläche des Abwasserkanals.



Angewendet auf das Rosensteinquartier kann der Hybridkanal ca. 15% des gesamten thermischen Bedarfs (Heizen und Kühlen) des Quartiers decken. Die Entzugswerte berücksichtigen keine innenliegenden Absorber.

5 Validierung

Um das Simulationsmodell für numerische Parameterstudien heranziehen zu können, muss das Simulationsmodell noch anhand real verbauter Hybridkanäle validiert werden. Innerhalb des IWAES-Projektes wurden deshalb ein Technikum und ein Versuchsstand konzipiert. Die durch das am Versuchsstand und Technikum validierte Simulationsmodell durchgeführten Parameterstudien werden die Grundlage eines thermischen Widerstands-Kapazitätsmodell bilden, welches wiederum die Basis des Bemessungskonzeptes darstellen wird.

5.1 Versuchsstand

Der Versuchsstand (Breite: 2,8 m, Länge: 4,8 m, Höhe: 1,5 m) bildet die im Hybridkanal und die in der unmittelbaren Umgebung wirkenden Wärmeströme nach. Der Hybridkanal mit einer Länge von 4 m und einem Innendurchmesser von 20 cm wird permanent mit Wasser durchströmt. Das „Abwasser“ wird kontinuierlich mittels eines Durchlauferhitzers erwärmt und das Absorberfluid wird durch einen Durchlaufkühler, welcher den Verdampfer einer Wärmepumpe simuliert, abgekühlt. Die Temperaturen als auch der Volumenstrom können variiert werden. Darüber hinaus kann durch Aufbringen einer Lutte ein Kanalluftstrom nachgebildet werden.

5.2 Technikum

Im bayrischen Essing wird ein Hybridkanal als Druckstollen eines kleinen Wasserkraftwerks verwendet. Der Druckstollen verbindet einen Quellteich mit einer Wasserturbine, der Kanalquerschnitt ist hierbei vollgefüllt. Alle relevanten Messgrößen werden gemessen und geloggt und für eine Back-Analysis genutzt.

Da keine Kanalluft vorhanden ist, kann der Wärmestrom infolge strömenden Wassers fokussierter untersucht werden.

6 Verbundnetz

Da mit dem Konzept des Hybridkanals nicht der ganze thermische Bedarf des Rosensteinquartiers gedeckt werden kann, sind für eine autarke Wärmebewirtschaftung weitere regenerative Energiequellen zur Deckung des Bedarfs notwendig. Diese weiteren Energiequellen als auch der Austausch der

überschüssigen Energie erfolgt mittels eines Verbundnetzes.

Dessen Grundgedanke ist es, thermische Bedarfe und Überschüsse auf Quartiersebene zum Ausgleich zu bringen, sodass eine zusätzliche Energieerzeugung überflüssig wird. Hierfür muss das Transportnetz bidirektional agieren können, d.h. es muss sowohl Wärme aufnehmen als auch abgeben können. Wärmeverbundnetze die diese Eigenschaften besitzen werden als Wärmenetze der 5. Generation bezeichnet [Wirtz]. Im entwickelten Transportnetz ist hierfür ein Dreileiter-System vorgesehen, jeweils eine Vorlaufleitung für „Wärme“ als auch für „Kälte“ und eine gemeinsame Rücklaufleitung. Die Einspeisung in die Rücklaufleitung erfolgt nur, wenn die Abwärme und „Abkälte“ immer noch zu warm für den Kaltleiter oder zu kalt für den Warmleiter ist. Das Konzept des Wärmeverbundnetzes [Kugler et al] ist Abbildung 8-1 zu entnehmen.

Die Entnahme der transportierten thermischen Energie als auch die Anbindung weiterer thermischer Energiequellen (Erdwärmesonden, Solarthermie, etc.) erfolgt im Hausanschluss, in welchem mittels Wärmepumpen die Temperatur gehoben und mit thermischen Speichern eingespeichert wird. Ein Hubanschluss versorgt gleichzeitig mehrere Gebäudeblöcke. Die Effizienz thermischer Anlagen nimmt mit der installierten Leistung zu, weshalb die Bündelung thermischer Bedarfe angestrebt werden sollte. Zur Bündelung der thermischen Energiebedarfe der Nutzer wurde ein mehrstufiges thermisches Konzept entwickelt, bei dem nicht jeder Nutzer singular thermisch versorgt wird, sondern im Verbund.

Das Konzept umfasst in IWAES drei Ebenen der thermischen Bilanzierung:

- erste Ebene: Gebäudeblock,
- zweite Ebene: Hubareal,
- dritte Ebene: gesamtes Quartier.

Jede Ebene besitzt ein eigenes Verbundnetz, in dem die jeweils niedrigere Ebene als Nutzer auftritt. In der ersten Ebene wird innerhalb des Gebäudeblocks ein Ausgleich zwischen den einzelnen Nutzern angestrebt, wird dieser jedoch verfehlt, wird die notwendige thermische Restenergie dem Hubnetz entnommen. Der Gebäudeblock ist über einen Hausanschluss mit dem Hubnetz verbunden. Ist im Hubnetz ebenfalls kein thermisches Gleichgewicht zwischen den Blöcken möglich, wird die thermische Energie aus dem Quartiersnetz gezogen (dritte Ebene). Ist in der dritten Ebene ebenfalls kein Ausgleich möglich, wird die thermische Energie den verfügbaren Energiequellen (Hybridkanal, EWS, usw.) am jeweiligen Hubanschluss entnommen.

7 Fazit

Der im Forschungsprojekt IWAES entwickelte Ansatz eines mehrstufigen thermischen Verbundsystems

auf Basis thermisch aktivierter Hybridkanäle stellt ein zukunftsfähiges Instrument der Wärmewende im innerstädtischen Kontext dar. Auch hinsichtlich der immer wichtiger werdenden Kühlung von Gebäuden kann das Konzept einen wesentlichen Beitrag leisten. Die angestrebte Entwicklung von Bemessungshilfen soll eine rasche und zuverlässige energetische Bemessung von Hybridkanälen ermöglichen und so einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Akzeptanz des entwickelten Konzepts leisten.

8 Danksagung

Das Forschungsprojekt IWAES wird vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Forschungsoffensive „Ressourceneffiziente Standquartiere für die Zukunft“ (RESZ) gefördert. Förderkennzeichen 033W106A.

Literaturverzeichnis

Beisel, S. (1999). *Vermessung, Modellierung und Bewertung des Erdreichwärmeübertragers beim Passiv-Solarhaus Cölbe*. Marburg: Diplomarbeit, Philipps-Universität Marburg

Buhmann, P. (2019). *Energetisches Potential geschlossener Tunnelgeothermiesysteme*. Stuttgart:

Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart, Heft 73

Dürrenmatt, D.; Wanner, O. (2014). *A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers*. *Water Research* 2014, 48, 548- 558

Kugler, T.; Schittenhelm, C.; Volkmer, S.; Ryba, M.; Moormann, C.; Koenigsdorff, R.; Kurth, D. (2022). *Sustainable heating and cooling management of urban quarters*. *Sustainability* 2022, 14, 4353

Landeshauptstadt Stuttgart (2019). *Satzung über die öffentliche Abwasserbeseitigung (Abwasserbeseitigungssatzung – Abws)*, Amtsblatt der Landeshauptstadt Stuttgart Nr. 51/52, 2019

Nagpal, H.; Spriet, J.; Murali, M.; McNabola, A. (2021). *Heat recovery from Wastewater – A review of available resource*. *Water* 2021, 13, 1274

Schneider, M. (2013). *Zur energetischen Nutzung von Tunnelbauwerken – Messungen und numerische Berechnungen am Beispiel Fasanenhof*. Stuttgart: Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart, Heft 68

VDI 4620 Blatt 2, Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, 2019

Wirtz, M. (2022). *Survey of 53 5th Generation District Heating and Cooling (5GDHC) Networks in Germany*, *Energy Technology*, 10(11)

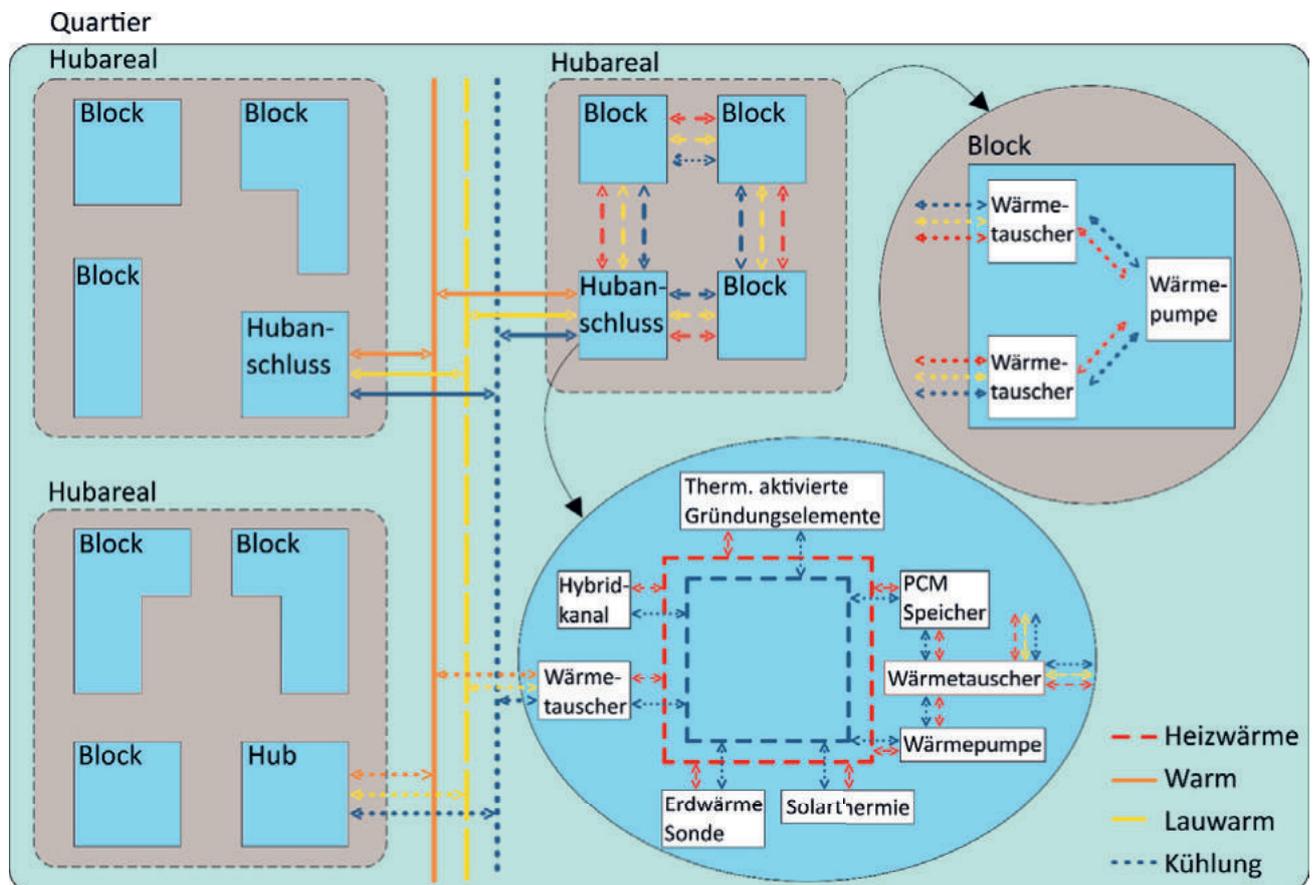


Abbildung 8-1 Thermisches Versorgungskonzept



Untersuchungen zur Empfindlichkeit von zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen gegenüber witterungsbedingten Beanspruchungen

M. Zeni M.Sc., Zentrum Geotechnik der TU München
Dr.-Ing. S. Huber, Boley Geotechnik GmbH
Dr.-Ing. E. Birle, Zentrum Geotechnik der TU München

Zeitweise fließfähige und selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) bestehen aus einem mineralischen Basismaterial, einem Bindemittel (meist Zement), eventuellen Additiven (i. d. R. Tonmehl) und Wasser. Als mineralisches Basismaterial können sowohl natürliche als auch rezyklierte Baustoffe oder industrielle Nebenprodukte eingesetzt werden. ZFSV fließen zunächst allein unter Einwirkung der Schwerkraft und füllen Hohl- und Zwischenräume ohne das Erfordernis zusätzlicher Verdichtungsarbeit vollständig aus. Durch die Hydratation des Bindemittels mit dem Wasser gewinnen ZFSV mit der Zeit wieder an Festigkeit. Im Hinblick auf die Reduzierung des Verbrauchs von Primärbaustoffen stellen ZFSV eine attraktive Bauweise dar, da damit auch erdbautechnisch ungünstige mineralische Reststoffe wieder als Baustoff eingesetzt werden können. Da solche ZFSV vergleichsweise neue Baustoffe sind, sind einige Fragestellungen noch nicht abschließend geklärt. Eine dieser Fragestellungen betrifft das langfristige Verhalten von ZFSV im eingebauten Zustand bzw. ihre Dauerhaftigkeit, das heißt ihre Fähigkeit, die geforderten mechanischen Eigenschaften trotz der auftretenden Beanspruchungen langfristig aufrechtzuhalten. Bei den Einwirkungen kann es sich entweder um gegebenenfalls zyklisch auftretende mechanische Beanspruchungen oder um thermische und hydraulische Beanspruchungen handeln. Im Rahmen des Beitrags werden zunächst die Ergebnisse von Laborversuchen zur Dauerhaftigkeit von ZFSV aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen gegenüber typischen witterungsbezogenen Einwirkungen wie beispielsweise Trocken-Feucht-Wechsel vorgestellt. Die Laborversuche wurden nach von den Autoren im Rahmen eines Forschungsvorhabens der FGSV entwickelten Prüfverfahren an insgesamt neun Rezepturen durchgeführt. Anschließend werden beispielhaft Ergebnisse aus einem Feldversuch an einem weiteren ZFSV präsentiert. Dazu wurde ein ZFSV in situ zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach Einbau untersucht. Anhand der Ergebnisse der Labor- und Feldversuche werden Folgerungen hinsichtlich der Empfindlichkeit von ZFSV gegenüber witterungsbedingten Beanspruchungen beschrieben.

1 Einleitung

Zeitweise fließfähige und selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) bestehen aus einem mineralischen Basismaterial, einem Bindemittel (meist Zement) und Wasser. Nach Bedarf können zusätzlich Additive eingesetzt werden, mit denen bestimmte Frisch- und Endprodukteigenschaften angepasst werden können. Beispiele dafür sind Tonminerale, die in Form von Bentonit zugegeben werden, um die rheologischen Eigenschaften der frischen Suspension zu optimieren oder Beschleuniger, um die Verfestigung zu beschleunigen und damit die Bauzeit zu reduzieren. Dem Gemisch aus dem mineralischen Basismaterial, dem Bindemittel und den eventuellen Additiven wird Wasser zugegeben, bis eine ausreichende Fließfähigkeit bzw. eine fließfähige Konsistenz erreicht wird. Die wassergesättigte Mischung kann dann allein unter Einfluss der Schwerkraft fließen und Hohl- und Zwischenräume ohne das Erfordernis zusätzlicher Verdichtungsarbeit vollständig auffüllen. Aus diesem Grund ist der Einsatz von ZFSV zur (Rück-)Verfüll-

lung von schwer zugänglichen oder schwer verdichtbaren Bereichen besonders geeignet (Folliard et al., 2008). Mit der Zeit hydratisiert das hydraulische Bindemittel und wird Wasser in die Schichtstruktur der vorhandenen Tonminerale eingelagert, wodurch der ZFSV wieder an Festigkeit gewinnt. Im verfestigten Zustand kann das mechanische Verhalten von ZFSV durch übliche Ansätze der Bodenmechanik beschrieben werden (Sandig, 2015). Die rheologischen sowie die mechanischen Eigenschaften von ZFSV sind stark von dem Mischungsverhältnis der Ausgangsmaterialien abhängig und können durch die Variation der Rezeptur gezielt gesteuert und auf die Erfordernisse der jeweiligen Anwendung angepasst werden. Die Flexibilität im Hinblick auf die Zusammensetzung von ZFSV ermöglicht den Einsatz eines breiten Spektrums an Materialien. Insbesondere die Verwendung von mineralischen Basismaterialien, die aufgrund erdbautechnisch ungünstiger Eigenschaften mit konventionellen Verfahren häufig keine Verwendung als Erdbaustoffe finden, in Bezug auf die Masse allerdings den Hauptbestandteil eines ZFSV darstellen, kann zu einer nachhaltigen Materialverwendung und erheblichen Schonung von natürlichen



Mineralbaustoffen beitragen. Beispiele für Ausgangsstoffe, die aufgrund ihrer ungünstigen erdbautechnischen Eigenschaften für Anwendungen in Erdbau häufig nicht eingesetzt werden, sind dabei feinkörnige, erdbautechnisch zu weiche Böden oder ziegelreiche RC-Baustoffe.

Mittlerweile werden ZFSV immer öfter im Erdbau eingesetzt, wobei das langfristige Verhalten von ZFSV noch nicht umfangreich untersucht wurde. Dies betrifft dabei nicht nur die Entwicklung der mechanischen Eigenschaften von ZFSV, sondern auch ihre Dauerhaftigkeit. Unter dem Begriff der Dauerhaftigkeit versteht man die Fähigkeit eines Baustoffes seine mechanischen Eigenschaften trotz den auftretenden Beanspruchungen langfristig aufrechtzuerhalten. Bei den Einwirkungen kann es sich entweder um mechanische Beanspruchungen wie bspw. eine zyklische Belastung oder um thermische und hydraulische Beanspruchungen handeln.

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse von Laborversuchen zur Dauerhaftigkeit von ZFSV aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen gegenüber typischen witterungsbezogenen Einwirkungen wie beispielsweise Trocken-Feucht-Wechsel vorgestellt. Die Versuche wurden nach Prüfverfahren durchgeführt, die von den Autoren im Rahmen eines durch das BMDV geförderten Forschungsvorhabens (BASt FE-Nr. 05.0205/2018/IGB) anhand von Reihenuntersuchungen an neun ZFSV entwickelt wurden. Anschließend werden beispielhaft Ergebnisse aus einem Feldversuch mit einem weiteren ZFSV präsentiert. Dabei wurde ein ZFSV aus einem aufbereiteten Bauschuttgemisch in situ zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach Einbau untersucht. Schließlich werden die Ergebnisse der Labor- und Feldversuche beurteilt und Folgerungen hinsichtlich der Empfindlichkeit von ZFSV gegenüber witterungsbedingten Beanspruchungen beschrieben.

2 Versuchsmaterialien

Im Rahmen der Laborversuche wurden insgesamt neun ZFSV aus drei unterschiedlichen mineralischen Basismaterialien untersucht. Dabei kamen ein grob- (Bodengruppe SE nach DIN 18196), ein gemischt- (Bodengruppe SU nach DIN 18196) und ein feinkörniges Basismaterial (Bodengruppe TL nach DIN 18196) zur Anwendung. Als Bindemittel wurde ein reiner Portlandzement CEM I 42,5 N verwendet und als Additiv wurde Natriumbentonit (zur Verbesserung der Frischprodukteigenschaften) zugegeben. Die mineralischen Bestandteile der Rezepturen (Basismaterial, Bindemittel und Na-Bentonit) wurden trocken gemischt bevor Wasser bis zum Erreichen einer

fließfähigen Konsistenz zugegeben wurde. Die Rezepturen der neun im Labor untersuchten ZFSV sind in Tabelle 2-1 aufgeführt.

Zur Charakterisierung der ZFSV wurden an den neun Rezepturen unmittelbar nach der Wasserzugabe die Frischprodukteigenschaften (Fließfähigkeit und Volumenstabilität) bestimmt. Die einaxiale Druckfestigkeit wurde nach unterschiedlichen Lagerungszeiten der Proben ermittelt. Die Versuche zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit wurden bei allen neun ZFSV an separaten Proben 28 Tage nach deren Herstellung durchgeführt. Hierbei wurde der CBR-Wert an einer unbeanspruchten Probe als 3-fach-Bestimmung bei einem Prüfalter von 28 Tagen sowie an Proben nach den jeweiligen Beanspruchungen durchgeführt.

ZFSV	Basismaterial ¹⁾	Zement ¹⁾	Na-Bentonit ¹⁾	Wasser ²⁾	w/z ³⁾
SE1	1500	90	90	560	6,22
SE2		90		640	7,11
SE3		90		720	8,00
SU1	1350	120		680	5,67
SU2		90		680	7,56
SU3		80		680	8,50
TL1	1500	225		1800	8,00
TL2		270		1800	6,67
TL3		357		1900	5,32
RCM 0/16	1000	72,4 (LithoFlow MT10)		237	3,27

¹⁾ Trockenmasse in [kg]

²⁾ Masse Wasser (gesamt) in [kg]

³⁾ Verhältnis Wasser-/Zementmenge

Tabelle 2-1: Rezepturen der untersuchten ZFSV

Im Rahmen des Feldversuches wurde ein weiterer ZFSV untersucht. Dabei handelte es sich um einen ZFSV aus einem aufbereiteten Bauschuttgemisch RCM 0/16, (Bodengruppe GU nach DIN 18196), einer Bindemittel-Fertigmischung (LithoFlow MT 10, bestehend aus Portlandzement, Natriumbentonit und speziellen Gesteinsmehlen) und Wasser. Die Rezeptur des ZFSV aus dem RC-Mix ist ebenfalls in Tabelle 2-1 angegeben.

3 Durchgeführte Versuche

3.1 Versuche zur Charakterisierung der ZFSV

An den entwickelten ZFSV wurden zunächst die Prüfungen der Frischprodukteigenschaften durchgeführt. Um die Fließfähigkeit von ZFSV zu ermitteln wurde jeweils das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350- 5 bestimmt. Gemäß den Anforderungen der H ZFSV (Hinweise für die Herstellung und Verwendung von ZFSV in Erdbau) ist dabei ein Ausbreitmaß zwischen 50 und 70 cm, das dem Konsistenzbereich F4 bis F6 nach DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045- 2 (weich bis sehr fließfähig) entspricht, anzustreben. Zusätzlich wurde die Volumenstabilität der frischen ZFSV mit Hilfe des Absetzmaßtests



nach DIN EN 445 ermittelt. Dabei wird der frische ZFSV in einen genormten Messzylinder gefüllt und die auftretende Entmischung beobachtet. Hierbei ist nach den H ZFSV jedoch keine Anforderung an die zulässige Wasserabsonderung bzw. die Volumenänderung zu beachten.

An den ZFSV aus Tabelle 2-1 wurden zusätzlich einaxiale Druckversuche an zylindrischen Probekörpern ($h/d = 2/1$ mit $d = 100$ mm und $h = 200$ mm) nach DIN EN ISO 17892-7 durchgeführt. Die einaxialen Druckversuche wurden bei unterschiedlichen Probenaltern (7, 28 und 56 Tage nach Herstellung der Mischung) durchgeführt, um die zeitliche Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit beobachten zu können. Anhand der einaxialen Druckfestigkeit kann gemäß den H ZFSV die Wiederaushubfähigkeit eines ZFSV abgeschätzt werden.

3.2 Dauerhaftigkeitsversuche

Im Rahmen der Dauerhaftigkeitsversuche wurden drei unterschiedliche Beanspruchungen betrachtet. Dabei handelte es sich um Frost-Tau- und Trocken-Feucht-Wechsel sowie um eine Wasserlagerung. Anhand der Ergebnisse der Literaturrecherche wurden zunächst bestehende Prüfverfahren, die aus dem Boden-Bindemittelbereich entlehnt wurden und zur Prüfung der Dauerhaftigkeit von ZFSV gegenüber den drei aufgeführten Beanspruchungen geeignet schienen, im Hinblick auf ihre Eignung für ZFSV geprüft. Die ausgewählten Prüfverfahren wurden zunächst an einer Rezeptur aus dem grobkörnigen Basismaterial durchgeführt und anschließend modifiziert.

Die Versuche zur Quantifizierung des Einflusses der jeweiligen Beanspruchung wurden in Anlehnung an die TP BF StB Teil B 7.1 (Technische Prüfverfahren für Boden und Fels im Straßenbau. Teil B 7.1: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes) durchgeführt. Dabei werden die Proben unmittelbar nach Herstellung der jeweiligen Mischung in CBR-Zylinder ($d = 150$ mm, $h = 175$ mm) eingebaut und für 28 Tagen bei einer Temperatur von 20 C° luftdicht gelagert. Bei einem Probenalter von 28 Tagen werden die tatsächlichen Dauerhaftigkeitsversuche an jeweils drei Probekörpern für jede Beanspruchung begonnen. Die Proben werden in ein Wasserbad eingetaucht (siehe Abbildung 3-1) und danach einer Frost-Tau- bzw. Trocken-Feucht-Beanspruchung unterzogen. Das Temperaturregime für die Frost-Tau-Versuche wurde dabei in Anlehnung an die TP BF-StB Teil B 11.1 (Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau. Teil B 11.1: Eignungsprüfungen für Bodenverfestigungen mit hydraulischen Bindemitteln) gewählt. Anschließend wird eine zweite Wasserlagerung durchgeführt und der CBR-Wert nach der jeweiligen Beanspruchung

(CBR_x) ermittelt. Dieser wird dann mit dem CBR-Wert, der an ungestörten Proben 28 Tage nach Herstellung (CBR_{28}) ermittelt wurde, verglichen bzw. es wird die Restfestigkeit R_x als Verhältnis zwischen dem CBR-Wert nach der jeweiligen Beanspruchung (CBR_x) und dem CBR-Wert bei einem Prüfalter von 28 Tagen (CBR_{28}) berechnet. Für eine genaue Beschreibung der Versuchsdurchführungen bzw. der aufgetragenen Beanspruchungen wird auf den Schlussbericht des Forschungsvorhabens (Zeni et al., 2022) verwiesen.



Abbildung 3-1: Proben aus ZFSV während der Wasserlagerung

3.3 Feldversuch

Im Rahmen der Feldversuche wurde die langfristige Festigkeitsentwicklung des ZFSV aus dem RC-Mix unter Einfluss der Witterung untersucht. Der ZFSV wurde im November 2020 in einer stationären Mischanlage in München hergestellt und anschließend mit einem Betonmischer zu der ortsnah gelegenen Versuchsgrube (Geometrie $L \times B \times T$ etwa $20\text{ m} \times 10\text{ m} \times 1\text{ m}$) transportiert und eingefüllt. Dabei waren mehrere Chargen erforderlich, wobei an dem ZFSV aus allen Chargen das Ausbreitmaß in situ ermittelt wurde. Die jeweiligen Ergebnisse sind in Tabelle 4-1 aufgeführt. Anschließend wurden Feldversuche (statische und dynamische Plattendruckversuche nach DIN 18134 bzw. TP BF-StB Teil B 8.3, sowie Dichte- und Wassergehaltsbestimmungen mit unterschiedlichen Verfahren) nach unterschiedlichen Prüfaltern durchgeführt. Die erste Messkampagne fand 8 Tage nach Einbau des ZFSV statt und die letzte im Juli 2022 und damit 20 Monate nach dem Einbau des ZFSV, dessen Oberfläche während der Versuchsdauer offen lag und damit ungeschützt der Witterung ausgesetzt war. Dieser lange Versuchszeitraum ermöglicht es, die Dauerhaftigkeit eines ZFSV gegenüber den abwechselnden klimatischen Beanspruchungen (Temperatur und Niederschlag) infolge der Jahreszeitwechsel zu beurteilen.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Charakterisierende Versuche

Die charakterisierenden Versuche umfassten die Ermittlung der Frisch- sowie der Endprodukteigenschaften. Die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der Fließfähigkeit und der Volumenstabilität der untersuchten ZFSV sind in Tabelle 4-1 wiedergegeben.

ZFSV	Ausbreitmaß (cm) nach DIN EN 12350- 5	Konsistenzbereich nach DIN EN 206- 1 bzw. DIN 1045- 2	Volumenstabilität nach DIN EN 445
SE1	59,5	F5	Nein
SE2	62,0	F5	Nein
SE3	64,5	F6	Nein
SU1	61,0	F5	Nein
SU2	64,0	F6	Nein
SU3	66,0	F6	Nein
TL1	57,5	F5	Nein
TL2	55,0	F4	Nein
TL3	56,0	F5	Nein
RCM	56 bis 67 ¹⁾	F5 bis F6	Nein

¹⁾ Das Ausbreitmaß wurde an verschiedenen Chargen ermittelt

Tabelle 4-1: Frischprodukteigenschaften der neun ZFSV

Um die zeitliche Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit beobachten zu können, wurde die einaxiale Druckfestigkeit an allen ZFSV 7, 28 und 56 Tage nach Herstellung der Proben bestimmt. Die entsprechenden Ergebnisse sowie die Wiederaushubfähigkeitsbereiche nach den H ZFSV sind in Abbildung 4-1 graphisch dargestellt. Die einaxiale Druckfestigkeit der untersuchten ZFSV lag meistens im leichten Wiederaushubfähigkeitsbereich, wobei eine Rezeptur aus dem grob- und eine aus dem gemischtkörnigen Basismaterial bereits nach 28 Tagen eine mittlere Wiederaushubfähigkeit aufwies. Der ZFSV aus dem RCM 0/16 wurde hingegen bereits nach 8 Tagen der mittleren Wiederaushubfähigkeit zugeordnet.

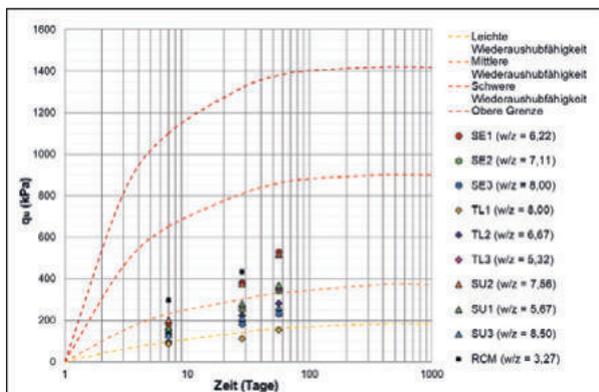


Abbildung 4-1: Zeitliche Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit der untersuchten ZFSV

4.2 Ergebnisse der Versuche zur Prüfung der Dauerhaftigkeit

Die Ergebnisse der Frost-Tau-Prüfung an den neun ZFSV sind in Abbildung 4-2 graphisch dargestellt. Bereits nach den drei Frost-Tau-Zyklen konnte man beobachten, dass die Proben infolge einer Frost-Tau-Beanspruchung und anschließender Wasserlagerung stark beschädigt waren. Der CBR_{FT}-Wert nach der Frost-Tau-Beanspruchung bestätigte die visuelle Beurteilung. So wurden nach der zweiten Wasserlagerung sehr geringe CBR-Werte ermittelt. Unabhängig von der Rezeptur und vom Basismaterial wurden nach der Frost-Tau-Beanspruchung CBR_{FT} Werte von ca. 25 % ermittelt. Die hohe Frostempfindlichkeit von ZFSV war aufgrund des hohen Ausgangswassergehaltes zu erwarten. Das Wasser, das in den Poren vorhanden ist, dehnt sich während des Gefrierprozess aus, wodurch das Korngerüst infolge von Frosthebungen zerstört wird. Während des Auftauens nahm das Volumen der Probe zwar wieder ab, aber die aufgesprengten Bindungen konnten nicht wiederhergestellt werden und die Schäden infolge der Frostbeanspruchung waren dadurch irreversibel.

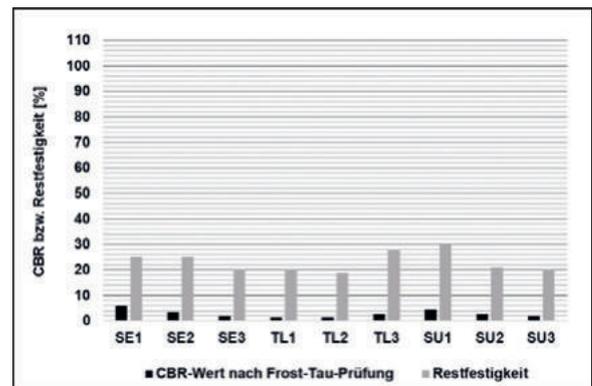


Abbildung 4-2: Ergebnisse der Frost-Tau-Prüfung an den neun ZFSV

Die Ergebnisse der Trocken-Feucht-Versuche an den neun ZFSV sind in Abbildung 4-3 graphisch dargestellt. Nach der Trocken-Feucht-Prüfung wurden bei allen ZFSV unabhängig von der Rezeptur bzw. vom Basismaterial Restfestigkeiten zwischen 67 % und 94 % ermittelt, die damit deutlich höher lagen als die Restfestigkeiten nach der Frost-Tau-Prüfung. Nach der ersten Wasserlagerung waren die Proben wassergesättigt. Anschließend wurden diese ausgetrocknet, wobei es einige Tage dauerte, bis die Massenkonstanz erreicht wurde. Während der Austrocknung entstanden aufgrund der Schrumpfung des vorhandenen Feinanteiles infolge der Wasserabgabe polygonale Risse, die jedoch relativ eng waren, wodurch die Struktur/das Korngerüst nicht komplett



zerstört wurde. Während der zweiten Wasserlagerung dehnte sich der ausgetrocknete Feinkornanteil des ZFSV infolge der erneuten Wasseraufnahme teilweise wieder aus, wodurch es zu einem teilweisen Verschließen der Risse kam und die Proben vor dem anschließenden CBR-Versuch relativ intakt ausseh-

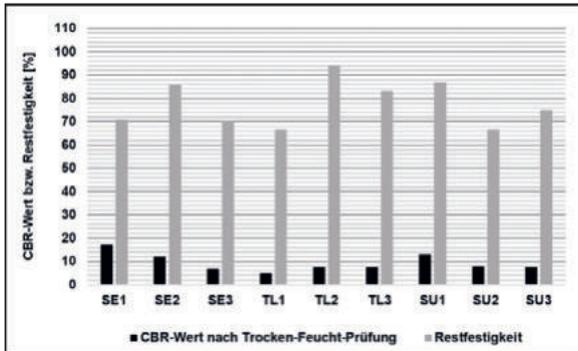


Abbildung 4-3: Ergebnisse der Trocken-Feucht-Prüfung an den neun ZFSV

Die Ergebnisse der Versuche nach Wasserlagerung sind in Abbildung 4-4 graphisch dargestellt und zeigen, dass eine Wasserlagerung unabhängig von der Rezeptur bzw. vom Basismaterial keinen Einfluss auf die Festigkeit von ZFSV hat. So wurde bei jeder der untersuchten Rezepturen eine Restfestigkeit nach Wasserlagerung zwischen 83 % und 108 % bestimmt. Grund dafür ist, dass die Proben bereits vor Beginn der Wasserlagerung wassergesättigt waren, und eine Wasserlagerung damit zu keinem Zerfall bzw. Aufweichen des ZFSV führte. Bei einigen Rezepturen wurden sogar Restfestigkeiten von über 100 % berechnet, was bedeutet, dass während der Wasserlagerung sogar eine Zunahme der Festigkeit der ZFSV stattfand. Das weist darauf hin, dass die Hydratation des im ZFSV enthaltenen Zementes bei einem Probenalter von 28 Tagen noch nicht abgeschlossen war.

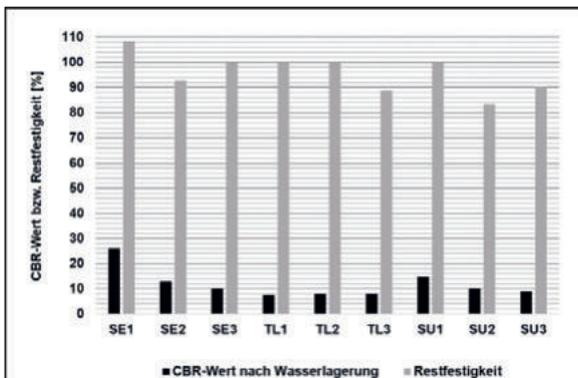


Abbildung 4-4: Ergebnisse der Wasserlagerungs-Prüfung an den neun ZFSV

4.3 Feldversuche

Während des Versuchszeitraumes wurde eine deutliche Zunahme des statischen Verformungsmoduls E_{v2} beobachtet, wobei zwischen der ersten Messung nach 8 Tagen und der letzten Messung nach 612 Tagen ein Anstieg des statischen Verformungsmoduls von 211 auf 912 MPa beobachtet wurde. Damit wurde der Anforderungswert auf dem Planum ($E_{v2} > 45$ MPa) bereits 8 Tage nach Einbau erfüllt. Die dynamischen Plattendruckversuche wurden zu jedem Prüfzeitpunkt sowohl auf der infolge der Witterung aufgelockerten Geländeoberfläche als auch auf der nach Abtragung der aufgelockerten Schicht ungestörten Oberfläche durchgeführt (siehe Abbildung 4-5). Dabei wurden auf der ungestörten Oberfläche deutlich höhere dynamische Verformungsmoduln E_{vd} ermittelt als auf der aufgelockerten Oberfläche. Die dynamischen Verformungsmoduln auf der ungestörten Oberfläche stiegen dabei ebenfalls während des Versuchszeitraumes von 117 MPa auf 181 MPa an. Die zu jedem Prüfzeitpunkt erfolgte Untersuchung der Oberfläche zeigte dabei, dass die klimatische Beanspruchung vornehmlich auf die oberen 5 cm des ZFSV einen Einfluss hatte, während der darunterliegende ZFSV nahezu unbeeinflusst durch die Beanspruchung blieb.



Abbildung 4-5: Gestörte Oberfläche des eingebauten ZFSV 612 Tage nach Einbau

Auch die Messungen der Trockendichte mit Hilfe radiometrischer Messverfahren (Troxler-sonde) über die Tiefe zeigten, dass Dichteänderungen nur in den obersten 10 cm stattfinden. Mit Hilfe der Troxler-sonde wurden außerdem Wassergehaltsänderungen beobachtet. Dabei zeigte sich, dass der Wassergehalt unterhalb der von der Witterung beeinflussten Zone (ab 5 cm Tiefe) nur von der Jahreszeit und nicht von der Tiefe abhängt. Beispielsweise betrug der gravimetrische Wassergehalt Am Ende des ersten Winters (Ende März 2021) durchschnittlich 29 %, während im folgenden Sommer (Juli 2022) ein durchschnittlicher gravimetrischer Wassergehalt von 16 % bestimmt wurde. Diese Ergebnisse zeigen, dass obwohl saisonale Wassergehaltsänderungen über dem



gesamten Profil stattfinden, eine tatsächliche Verwitterung bzw. Auflockerung des eingebauten ZFSV während des Versuchszeitraums nur in den oberen 10 cm auftritt.

5 Folgerungen

Im vorliegenden Beitrag wurden Laboruntersuchungen zur Dauerhaftigkeit von ZFSV gegenüber witterungsbedingten Beanspruchungen vorgestellt. Die Ergebnisse der durchgeführten Laborversuche zeigen, dass ZFSV unabhängig von der Rezeptur infolge einer Frost-Tau-Beanspruchung stark beschädigt werden bzw. einen starken Festigkeitsabfall erfahren. Die Versuche zu den Trocken-Feucht-Wechseln im Labor zeigen, dass eine Trocken-Feucht-Beanspruchung ebenfalls zu einem Festigkeitsverlust führt, der im Vergleich zu einer Frost-Tau-Beanspruchung allerdings deutlich geringer ausgeprägt ist. Eine Wasserlagerung hat aufgrund des hohen Ausgangswassergehaltes hingegen keinen Einfluss auf die Festigkeit von ZFSV. Die Ergebnisse des zweijährigen Feldversuches relativieren die Ergebnisse der Laborversuche allerdings insofern, als dass die Witterungseinflüsse im Feld lediglich eine Auflockerung und Entfestigung der Struktur im Bereich der obersten 10 cm verursachten. Der darunterliegende ZFSV blieb durch die Witterung nahezu unbeeinflusst und es konnte mit der Zeit eine deutliche Festigkeitszunahme beobachtet werden. Eine Erklärung dafür ist, dass die Temperatur- und Wassergehaltsschwankungen, die für die Frost-Tau- bzw. Trocken-Feucht-Prüfungen im Labor auf Basis bestehender Prüfverfahren gewählt wurden deutlich strenger sind als die, die im Feld auftreten. Aus den Wetterdaten von Feldversuchen (Temperatur und Niederschlag) und anhand der Messung des zeitlichen Verlaufes des Wassergehalts und der Temperatur im Boden während der unterschiedlichen Jahreszeiten könnten realitätsnahe Beanspruchungen für Dauerhaftigkeitsversuche im Labor abgeleitet werden. Dabei sollte der Fokus vorrangig auf Trocken-Feucht-Wechseln gelegt werden, da diese Beanspruchung infolge des Klimawandels zunehmend an Relevanz gewinnt und übliche ZFSV materialbedingt stark frostempfindlich sind, und deshalb in Frost-beanspruchten Bereichen nicht eingesetzt werden sollten.

DANKSAGUNG

Teile des Beitrags beruhen auf Ergebnissen, die im Rahmen der vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE-Nr. 05.205

durchgeführten Forschungsarbeiten gewonnen wurden. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein bei den Autoren.

Literaturverzeichnis

- ASTM. (2016). ASTM D559: Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures. ASTM International.
- ASTM. (2003). ASTM D560: Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures. ASTM International.
- DIN. (2007). DIN EN 445 - Einpressmörtel für Spannglieder - Prüfverfahren.
- DIN. (2008). DIN 1045-2 - Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton:– Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.
- DIN. (2011). DIN 18196 - Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.
- DIN. (2012). DIN 18134 - Baugrund - Versuche und Versuchsgeräte - Plattendruckversuch.
- DIN. (2017). DIN EN ISO 17892-7 - Geotechnische Erkundung und Untersuchung Laborversuche an Bodenproben – Teil 7: Einaxialer Druckversuch.
- DIN. (2019). DIN EN 12350-5 - Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß.
- FGSV (2012). Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau (H ZFSV). Ausgabe 2012.
- FGSV. (2012b). TP BF-StB Teil B 11.1 - Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau. Teil B 11.1: Eignungsprüfungen für Bodenverfestigungen mit hydraulischen Bindemitteln.
- FGSV. (2012c). TP BF-StB Teil B 7.1 - Technische Prüfverfahren für Boden und Fels im Straßenbau. Teil B 7.1: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes.
- FGSV. (2012d). TP BF-StB Teil B 8.3 - Technische Prüfverfahren für Boden und Fels im Straßenbau. Teil B 8.3: Dynamischer Plattendruckversuch mit Leichtem Fallgewichtsgesetz.
- Folliard, K.J. et al. (2008). Development of a recommended practice for use of controlled low-strength material in highway construction. NCHRP Report 597.
- Sandig, Friedemann (2015). Strukturbedingte geotechnische Eigenschaften von Controlled Low Strength Material für Dichtungen in Deichen. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing. Bauhaus-Universität Weimar: Schriftenreihe Geotechnik Heft 26.
- Zeni, M.; Huber, S.; Birle, E. (2022): Prüfung und Bewertung der Dauerhaftigkeit „zeitweise fließfähiger und selbstverdichtender Verfüllbaustoffe (ZFSV)“ im Unterbau von Verkehrsflächen, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 05.205/2018/IGB



Geothermische Charakterisierung und Testbetrieb eines mitteltiefen Erdwärmesondenspeichers im Forschungsprojekt SKEWS

Lukas Seib ^{1,2}, Matthias Landau ^{1,2}, Claire Bossennec ³, Hermann Bunes ⁴, Clemens Lehr ⁵, Jürgen Stumpf ⁶, Ingo Sass ^{1,2,3}

Affiliationen:

1 Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachgebiet Angewandte Geothermie, Technische Universität Darmstadt, Schnittspahnstraße 9, 64287 Darmstadt, Germany

2 Darmstadt Graduate School of Excellence Energy Science and Engineering, Technische Universität Darmstadt, Otto-Berndt-Straße 3, 64287 Darmstadt, Deutschland

3 GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum, Sektion 4.8: Geoenergie, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Germany

4 Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, 30655 Hannover, Deutschland

5 Geotechnisches Umweltbüro Lehr, 61231 Bad Nauheim, Deutschland

6 H. Angers Söhne Bohr- und Brunnenbaugesellschaft mbH, 37235 Hessisch Lichtenau, Deutschland

Ein wesentlicher Bestandteil für die zuverlässige Nutzung fluktuierender, regenerativer Wärmequellen wie Solarthermie sind Möglichkeiten zur saisonalen Wärmespeicherung. Kristalline Gesteine weisen aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit und geringen Permeabilitäten ein großes Potenzial für solche Wärmespeicher auf. Im Rahmen des Forschungsprojekts SKEWS (**S**aisonal**e**r **K**ristalliner **E**rd**W**är**m**e**S**ondenspeicher, BMWK *Förderkennzeichen 03EE4030A*) wurde am Campus Lichtwiese in Darmstadt ein mitteltiefer Erdwärmesondenspeicher errichtet. Der Speicher besteht aus drei 750 m tiefen coaxialen Erdwärmesonden mit einem Abstand von jeweils 8,6 m in einer dreieckigen Anordnung. Vor der Bauphase wurden die geologischen Verhältnisse am Standort umfassend mittels geophysikalischer Methoden charakterisiert. Dieser Datensatz wurde mit Daten aus Vertical-Seismic-Profiling (VSP) Messungen, einer seismischen Crosshole-Tomographie, sowie geophysikalischen Logs ergänzt. Im Rahmen eines enhanced Geothermal Response Tests (eGRT) sollen Mitte 2023 zunächst die thermischen Eigenschaften des Bohrlochs und des umgebenden Gesteins an einer Erdwärmesonde charakterisiert werden. Anschließend wird über einen einjährigen Testbetrieb das Verhalten des Speichersystems in der Praxis untersucht. Die gewonnenen Daten sollen anschließend zur Validierung vorhandener numerischer Simulationstools genutzt werden, um die Prognosefähigkeit von Modellen für zukünftige Projekte durch gestützte Modellsimulationen zu erhöhen.

1 Einleitung

Da ein großer Teil des Energieverbrauchs in Deutschland für Heizzwecke verwendet wird [1], ist die Entwicklung neuer Technologien zur Wärmeversorgung und -speicherung von großer Bedeutung. Ein Problem für erneuerbare Wärmequellen wie Solarthermie ist die jahreszeiten- und wetterabhängige Leistungsbereitstellung. Im Sommerhalbjahr kann bei niedrigem Bedarf viel Wärme bereitgestellt werden, während im Winterhalbjahr die Leistung abnimmt.

Erdwärmesondenspeicher (EWSS) bieten eine Lösung für dieses Problem, da überschüssige Wärme im Sommer gespeichert und in Zeiten mit hohem Wärmebedarf im Winter entnommen werden kann. Zu diesem Zweck sind bereits einige oberflächennahe EWSS in Betrieb [2–5]. Da oberflächennahe Systeme jedoch oft auf den obersten Grundwasserleiter zugreifen, kann eine negative Auswirkung auf

das Grundwasser nicht ausgeschlossen werden. Außerdem befinden sich oberflächennahe BTES oft in Gebieten mit einer vergleichsweise höheren hydraulischen Durchlässigkeit und sind daher anfällig für konvektive Wärmeverluste durch Grundwasserströmung [6; 7].

Mitteltiefe Erdwärmesondenspeicher (MT-EWSS) sind ein vielversprechender neuer Ansatz und erlauben die Wärmespeicherung in tieferen und damit in der Regel weniger durchlässigen Gesteinen [8]. Dies ermöglicht eine thermische Isolierung der oberen, mit dem Grundwasser in Kontakt stehenden Bereiche der Erdwärmesonde (EWS). Zudem benötigen MT-EWSS weniger Fläche an der Oberfläche, was sie für den Einsatz in urbanem Umfeld attraktiv macht (Abbildung 1). Allerdings ist das Konzept bisher nur durch numerische Simulationen belegt [7; 9–11]. Daher wurde im Sommer 2022 am Campus Lichtwiese

der Technischen Universität Darmstadt im Rahmen des Projektes SKEWS (**S**aisonaler **K**ristalliner **E**rd**W**ärme**S**ondenspeicher, BMWK Förderkennzeichen 03EE4030A) eine Pilotanlage errichtet, um die numerischen Simulationsergebnisse in der Praxis zu verifizieren und das Konzept mitteltiefer EWSS auf seine praktische Anwendbarkeit zu testen.

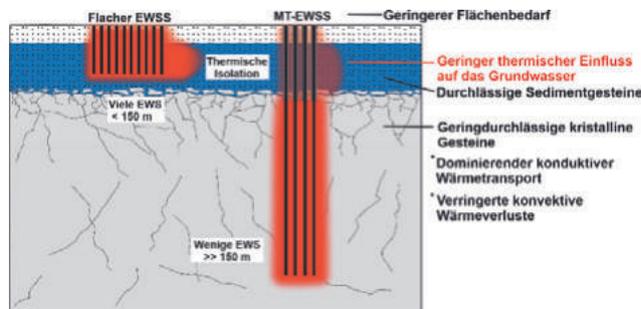


Abbildung 1 Charakteristik von MT-EWSS im Vergleich mit flachen EWSS (Verändert nach [12])

Vor der Bauphase wurde die Geologische Situation am Standort umfassend mittels geologischer und geophysikalischer Methoden charakterisiert. Dieser Datensatz wurde mit Daten aus VSP Messungen, einer seismischen Crosshole -Tomographie, sowie geophysikalischen Logs aus den Bohrlöchern ergänzt. Im Rahmen eines enhanced Geothermal Response Tests (eGRT) soll Mitte 2023 zunächst die thermischen Eigenschaften des Bohrlochs und des umgebenden Gesteins an einer Erdwärmesonden gemessen. Im Weiteren soll über einen, direkt an den eGRT anschließenden, einjährigen Testbetrieb das Verhalten des Speichersystems in der Praxis untersucht werden. Die gewonnenen Daten sollen dann zur Validierung vorhandener numerischer Simulationstools genutzt werden, um die Prognosefähigkeit von Modellen für zukünftige Projekte durch gestützte Modellsimulationen zu erhöhen.

2 Geologischer Hintergrund

Das Untersuchungsgebiet der Studie liegt am nördlichen Rand des Odenwalds, dem größten Aufschluss der mitteldeutschen Kristallinschwelle. Im Norden des Odenwaldes erstrecken sich die Gesteine des Frankenstein-Komplexes, einer Untereinheit des Odenwaldes [13] nach Norden und bilden das Grundgebirge des Sprendlinger Horst, an dessen südliche Grenze sich Darmstadt befindet (Abbildung 2). Der westliche Teil des Campus Lichtwiese besteht entsprechend aus Granodioriten und Graniten des Frankenstein-Komplexes unter einer 2 m – 6 m mächtigen Abdeckung aus quartären Sedimenten.

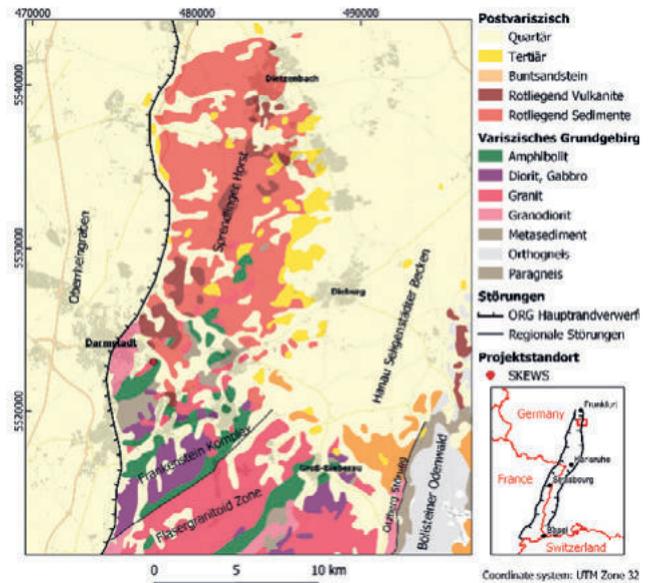


Abbildung 2 Geologischer Überblick über den Sprendlinger Horst und den nördlichen Odenwald (Verändert nach [14])

Der obere Teil des Grundgebirges ist lokal durch eine geringmächtige Verwitterungszone von wenigen Metern gekennzeichnet [15]. Im unmittelbaren Bereich des MT-EWSS treten mächtige vulkanische Ablagerungen aus permischen Basalten auf. Im Osten und Süden des Campus Lichtwiese überlagern grob- bis feinkörnige Sande, die aus verwittertem Sedimentgestein des Rotliegend stammen, diskordant das variszische Grundgebirge. Es wird vermutet, dass die geologischen Einheiten durch mehrere tektonische Störungen in einzelne Schollen unterteilt sind [16; 17].

3 Speicherkonfiguration

Der Demonstrator besteht aus drei coaxialen EWS in einer dreieckigen Anordnung in einem Abstand von 8,6 m (Abbildung 3). Die mitteltiefen Bohrungen bestehen jeweils aus einer 10 ¾“ Standrohrtour. Das Casing der Bohrung hat einen Durchmesser von 7“ und stellt gleichzeitig das Außenrohr der Erdwärmesonde dar. Das Innenrohr der coaxialen EWS besteht aus einem Stahl-PE Verbundrohr. Drei Grundwassermessstellen mit einer Tiefe von 36 m, 24 m und 24 m wurden bereits Anfang 2022 am den künftigen EWSS-Standort platziert, um Informationen über Temperatur- und hydrochemische Veränderungen in der Umgebung des Speicherstandorts zu liefern. Gemäß Planung wurde der oberflächennahe Bereich des Erdwärmesondenspeichers bis 160 m Tiefe mit thermisch gering leitendem Zement hinterfüllt, um eine negative thermische und hydrologische Beeinflussung des Grundwassers während des Betriebs ausschließen zu können. Die verbleibenden



590 m des Speichers sind zur bestmöglichen Ankopplung an das Umgebungsgestein mit einem thermisch hochleitfähigen Baustoff hinterfüllt. Die drei Bohrungen weisen jeweils eine leicht Bohrfadabweichung nach Westen und Nordwesten von der Vertikalen auf. Der Speicher wird mit Wasser als Wärmeträgermedium betrieben.

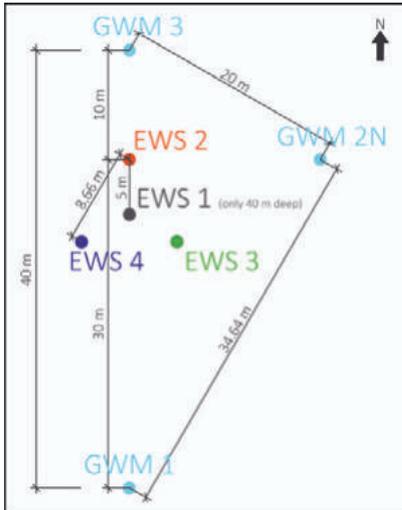


Abbildung 3 Abstände und Lage der Bohrungen und Grundwassermessstellen. EWS 1 konnte im Zuge des Forschungsprojekts aufgrund von Kostensteigerungen nicht fertiggestellt werden

4 Methodik

4.1 Geologische Erkundung

Im Rahmen einer Vorerkundung wurden neben geologischen Studien in Zusammenarbeit mit dem Leibniz Institut für Angewandte Geophysik umfangreiche geophysikalische Messungen zur besseren Erkundung der geologischen Situation am Projektstandort durchgeführt.

Im Rahmen einer geologischen Erkundung wurden in regionalen Aufschlussanalogen Proben entnommen und zur Gewinnung der petrophysikalischen Gesteinskennwerte, insbesondere der Dichte, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, im Labor untersucht.

Die geophysikalischen Untersuchungen beinhaltet 16 geoelektrische 2D-Tomographie Profile für die Erkundung des oberflächennahen Untergrundes, eine Gravimetrie Messkampagne, sowie 2 vibrationsseismische 2D-Profile. Weiterhin wurden neben Messungen des Bohrlochkalibers und akustischen Bohrlochtelevieweraufnahmen, umfangreiche bohrlochgeophysikalische Messungen der magnetischen Suszeptibilität, der natürlichen Gamma Strahlung,

des elektrischen Widerstandes und des Eigenpotenzials durchgeführt (vgl. Abbildung 4.).

Aufgrund der einzigartige Geometrie der Bohrungen mit dem geringen Achsabstand von 8,6 m wurde zudem eine seismische Tomographie gemessen, durch die der Bereich zwischen den Bohrlöcher detailliert erkundet werden kann. Dabei wird durch einen Sparker in einem Bohrloch ein seismischer Impuls angelegt, der im benachbarten Bohrloch durch eine Geophonkette aufgenommen wird (Abbildung 5). Dies erlaubt durch die Analyse der Laufzeitgeschwindigkeiten eine detaillierte Auflösung des Bereiches zwischen den Bohrungen.

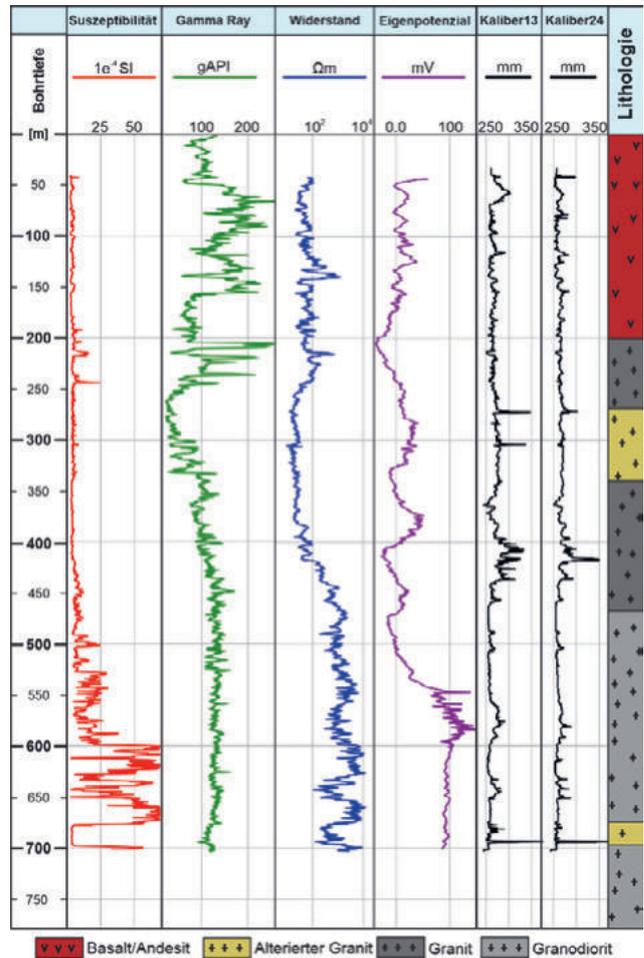


Abbildung 4 Exemplarische bohrlochgeophysikalische Messprofile mit dem auf den Cuttingproben basierenden geologischen Profil für EWS 2

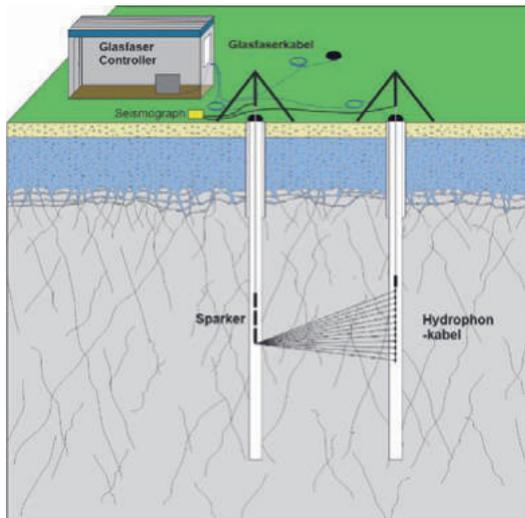


Abbildung 5 Konzept einer seismischen Tomographie zwischen zwei Bohrlöchern. Die Messungen wurden zum Generieren einer 3D Abbildung zwischen allen drei Bohrlöchern durchgeführt

4.2 Testbetrieb

Zunächst wird zur finalen Auslegung des Testbetriebs über einen enhanced Geothermal Response Test (eGRT) an einer Bohrung die thermischen Eigenschaften der Erdwärmesonde und des Untergrundes in-situ untersucht. Dazu wird durch die Erdwärmesonde über 6 Wochen Wärme in den Untergrund abgegeben und dabei tiefenaufgelöst durch Glasfasermesstechnik die Fluidtemperaturen aufgezeichnet bis annähernd ein Gleichgewichtszustand erreicht wird. Im Anschluss an den eGRT folgt eine Abklingphase, während der die Untergrundtemperaturen weiter aufgezeichnet werden.

Nach der Abklingphase des eGRT folgt der Speichertestbetrieb. Da EWSS typischerweise eine Verbesserung des Speichernutzungsgrades in den ersten Betriebsjahren zeigen, wird der Speichertestbetrieb in fünf verkürzten Einspeicherungs- und Entzugszyklen mit Temperaturen von ca. 80°C während der Speicherphase und ca. 30°C während der Entzugsphase durchgeführt. Die daraus resultierenden stetigen Temperaturverläufe von Vor- und Rücklauf, sowie die mit Glasfaserkabeln aufgezeichneten Temperaturprofile entlang der EWS sollen anschließend zur Evaluation der Speichereffizienz und zur Charakterisierung von externen geologischen und hydrogeologischen Einflussfaktoren auf den Speicher genutzt werden.

Das Wasser für den Vorlauf der EWS wird aus einem Pufferspeicher entnommen, der, je nach Zyklus, konstant mit Wärme oder Kälte aus einem Heiz- bzw. Kühlaggregat versorgt wird (Abbildung 6). Die Vor- und Rücklauftemperaturen, sowie der Volumenstrom werden für jedes Bohrloch am Sondenkopf aufgenommen. Zudem befinden sich in jedem Bohrloch

Glasfaserkabel zur tiefenaufgelösten faseroptischen Temperaturmessung im Hinterfüllmaterial und im Inneren des Sondenrohres der EWS (Abbildung 6).

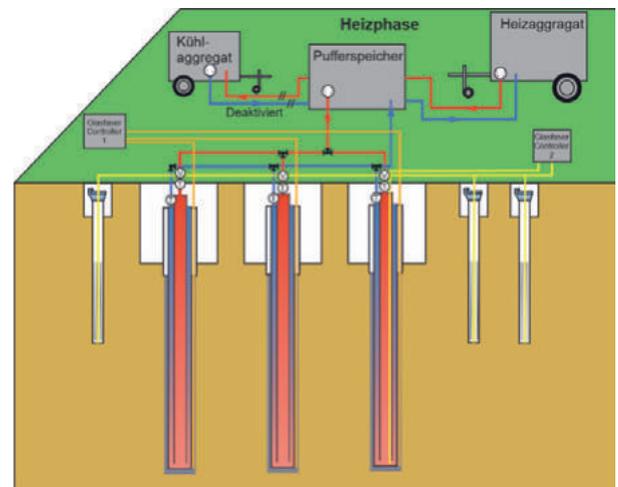


Abbildung 6 Konzept des Testbetriebes während einer Heizphase. Dargestellt sind die drei EWS mit den umliegenden Grundwassermessstellen

5 Diskussion

Durch die Daten der geophysikalischen Erkundung in Kombination mit den gewonnen Bohrdaten aus Cuttingmaterial konnte die Kenntnisse über die geologische Situation am Projektstandort erheblich verbessert werden. Demnach handelt es sich bei den in der Bohrung durchörterten Vulkaniten um Überreste eines eng durch Störungen begrenzten permischen Basaltförderschlot. Darunter wird eine Abfolge von intensiv alterierten Graniten und Granodioriten mit vermutlich cadomischen und variszischen Alter angetroffen. Aus den gewonnen Daten lassen bereits erste Prognosen über die draus resultierenden Konsequenzen für den Speicherbetrieb im Vergleich zu einem homogenen Gesteinskörper ziehen.

Der an der Oberfläche bis ca. 200 m Tiefe ange-troffene Basalt besitzt gemäß Labormessungen von Aufschlussanalogen eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von 1.7 W/m*K, sodass von vergleichsweise langsamem konduktivem Wärmetransport ausgegangen werden kann. Sowohl die geophysikalischen Profile als auch die während der Bohrungen aufgetretenen Bohrspülungsverluste zeigen eine erhebliche Klüftigkeit an. Aufgrunddessen kann für diesen Bereich neben den geringeren Wärmeleitfähigkeiten von einem erhöhten konvektiven Wärmeverlust durch Grundwasserfluss ausgegangen werden, weswegen bereits während der ersten Bohrung entschieden wurde, den Basalt bis 160 m mit thermisch geringleitendem Zement abzudichten, um den Wärmeverlust zu reduzieren.



Der darunter anstehende Granit weist Wärmeleitfähigkeiten von $2.7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ auf und zeigt mit der aus den Bohrlochtelevieraufnahmen abgeleiteten geringen Kluftdichten gute Eigenschaften zur Wärmespeicherung.

Der Granodiorit im untersten Bohrlochbereich hat eine durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit von 2.75 [18]. Der Granodiorit zeigt im akustischen Bohrlochtelevier Log eine hohe Kluftdichte. Da nur sehr lokal Spülungsverluste während der Bohrvorgangs aufgetreten sind, wird jedoch vermutet, dass ein großer Teil dieser Klüfte nicht durchflusswirksam ist. Daher kann auch hier von gute Speichereigenschaften ausgegangen werden. Für eine abschließende Einschätzung werden jedoch die Daten der Testzyklen benötigt.

Aus den gewonnen geologischen Daten wurde ein erstes numerisches Modell zur Vorabsimulation des Speichertestbetriebes, sowie zum späteren Vergleich und zur Kalibration mit den gewonnen Testdaten generiert (Abbildung 7). Weiteres Ziel des Modell war eine Approximation des durch Bohrfpadabweichungen aufgetretenden Effizienzverlust des Speichers. Aufgrund dem höheren Abstand der EWS im untren Bohrlochbereich ist demnach mit erhöhten Speicherverlusten in einer Größenordnung von ca. 10-15 % im Vergleich zu perfekt vertikalen Bohrungen zu rechnen.

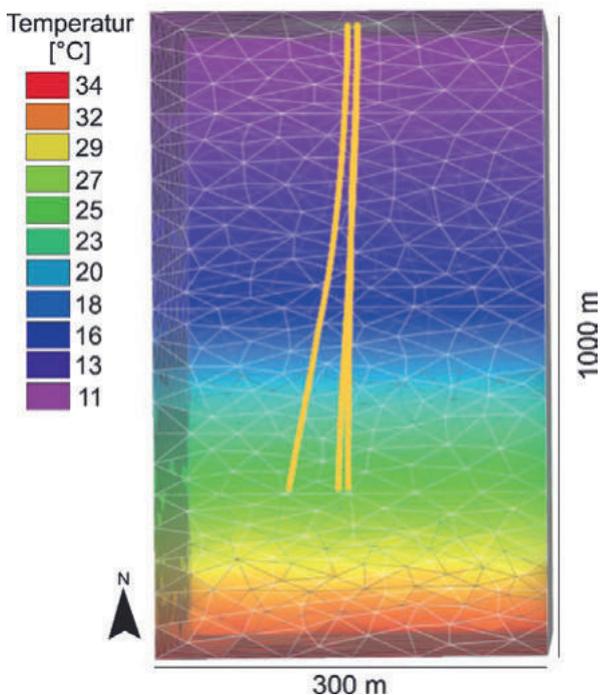


Abbildung 7 Numerisches Modell zu Simulation des EWSS

6 Ausblick

Der eGRT mit anschließendem Testbetrieb des Erdwärmespeichers soll nach der Komplettierung der Erdwärmesonden mit dem Einbau des koaxialen Innenrohrs Mitte 2023 beginnen. Die Daten aus den Testbetriebszyklen der BHEs ermöglichen eine Optimierung des numerischen Modells. Schließlich soll ein Benchmark-Modell für MD-BTES erstellt werden, das auf größere Speichersysteme skaliert werden kann. Außerdem kann das kalibrierte Modell für die Simulation von Speichersystemen unter unterschiedlichen geologischen Bedingungen und unterschiedlichen Konfigurationen der Oberflächenanlagen und Fernwärmesysteme angepasst werden.

Im Anschluss an das Forschungsprojekt wird der Speicher an das Fernwärmenetz der Technischen Universität Darmstadt angeschlossen. Eine Erweiterung auf 19 oder 37 EWS in konzentrischer Anordnung wird unter Berücksichtigung der wissenschaftlichen Erkenntnisse und Optimierungsmöglichkeiten angestrebt.

7 Literaturverzeichnis

- [1] BMWI (2020) *Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen* [online]. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- [2] Dincer, I.; Rosen, M. A. (2007) *A Unique Borehole Thermal Storage System at University of Ontario Institute of Technology* in: Paksoy, H. Ö. [Hrsg.] *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption*. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 221–228.
- [3] Miedaner, O.; Mangold, D.; Sørensen, P. A. [Hrsg.] (2015) *Borehole thermal energy storage systems in Germany and Denmark - construction and operation experiences*.
- [4] Schmidt, T.; Mangold, D.; Müller-Steinhagen, H. (2004) *Central solar heating plants with seasonal storage in Germany* in: *Solar Energy* 76, 1-3, S. 165–174.
- [5] Tordrup, K. W.; Poulsen, S. E.; Bjørn, H. (2017) *An improved method for upscaling borehole thermal energy storage using inverse finite element modelling* in: *Renewable Energy* 105, S. 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.011>
- [6] Nguyen, A.; Pasquier, P.; Marcotte, D. (2017) *Borehole thermal energy storage systems under the influence of groundwater flow and time-varying surface temperature* in: *Geothermics* 66, S. 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.11.002>



- [7] Welsch, B. et al. (2016) *Characteristics of medium deep borehole thermal energy storage* in: International Journal of Energy Research 13, H. 40, S. 1855–1868.
<https://doi.org/10.1002/er.3570>
- [8] Stober, I.; Bucher, K. (2007) *Hydraulic properties of the crystalline basement* in: Hydrogeology Journal 15, H. 2, S. 213–224.
- [9] Schulte, D. O. et al. (2016) *Optimization of Medium-Deep Borehole Thermal Energy Storage Systems*. in: Energy Technology 1, H. 4, S. 104–113.
<https://doi.org/10.1002/ente.201500254>
- [10] Schulte, D. O. et al. (2016) *Modeling insulated borehole heat exchangers* in: Environmental Earth Sciences 75, H. 10.
<https://doi.org/10.1007/s12665-016-5638-x>
- [11] Welsch, B. (2019) *Technical, Environmental and Economic Assessment of Medium Deep Borehole Thermal Energy Storage Systems* [Dissertation]. Technische Universität Darmstadt.
- [12] Sass, I.; Welsch, B.; Schulte, D. (2016) *Mitteltiefe Erdwärmesondenspeicher – Lösung für den Nutzungskonflikt Grundwasserschutz versus Geothermienutzung?* in: Bochumer Geowissenschaftliche Arbeiten, H. 23, S. 9–17.
- [13] Stein, E. (2001) *The geology of the Odenwald Crystalline Complex* in: Mineralogy and Petrology, H. 72, S. 7–28.
- [14] (2007) *Geologische Übersichtskarte von Hessen 1:300000*. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie.
- [15] Greifenhagen, G. (2000) *Untersuchungen zur Hydrogeologie des Stadtgebietes Darmstadt mit Hilfe eines Grundwasserinformationssystems unter Verwendung von einer Datenbank, Datenmodellierung und ausgewählten statistischen Methoden* [Dissertation]. Technische Universität Darmstadt.
- [16] Fahlbusch, K. (1980) *Die geologischen Grundlagen der alten Wasserversorgung Darmstadts* in: Notizblatt des hessischen Landesamts für Bodenforschung, H. 108, S. 223–240.
- [17] Hoffmann, R. (2006) *Das Bruchmuster im Sprendlinger Horst und sein Zusammenhang mit der Genese der isolierten Eozänvorkommen – Linearanalytische Untersuchungen von Luft- und Satellitenbildern* in: Geologisches Jahrbuch Hessen, H. 133, S. 29–74.
- [18] Bär, K.; Reinsch, T.; Bott, J. (2019) *P³ - PetroPhysical Property Database*.



Bohrtechnische Erfahrungen bei der Errichtung eines mitteltiefen Forschungs-Erdwärmesondenspeichers (SKEWS)

Matthias Landau ^{1,2}, Lukas Seib ^{1,2}, Claire Bossennec ³, Heiko Handke ⁴, Jürgen Muhl ⁵,
Jürgen Stumpf ⁶, Uwe Schindler ⁶, Ingo Sass ^{1,2,3}

Affiliationen:

1 Institut für Angewandte Geowissenschaften, Fachgebiet Angewandte Geothermie,
Technische Universität Darmstadt, Schnittspahnstraße 9, 64287 Darmstadt, Germany

2 Darmstadt Graduate School of Excellence Energy Science and Engineering, Technische Universität Darmstadt,
Otto-Berndt-Straße 3, 64287 Darmstadt, Deutschland

3 GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum, Sektion 4.8: Geoenergie, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Germany
4 Handke Brunnenbau GmbH, 67246 Dirmstein, Deutschland

5 STEP Oiltools GmbH, 29683 Bad Fallingb., Deutschland

6 H. Angers Söhne Bohr- und Brunnenbaugesellschaft mbH, 37235 Hessisch Lichtenau, Deutschland

Am Campus Lichtwiese der Technischen Universität Darmstadt wurde im kristallinen Grundgebirge ein **Saisonaler Kristalliner ErdWärmeSondenspeicher** (Forschungsvorhaben SKEWS, Projektträger Jülich, BMWK Förderkennzeichen 03EE4030A) mit drei 750 m tiefen Bohrungen in einem Achsabstand von ca. 8,6 m hergestellt. Die Bohr-
löcher sind mit einem 7" Casing bis Endteufe ausgebaut und verfügen über je ein am Außenrohr mitgeführtes
Glasfaserkabel für Temperatur- und Dehnungsmessungen. Der koaxiale Innenausbau der Sonden, sowie die
überträgige hydraulische Verschaltung der Sondenköpfe erfolgt Mitte 2023. Im Anschluss startet ein einjähriger
Forschungsbetrieb, welcher einen enhanced Geothermal Response Test (eGRT) sowie fünf Heiz- und Abkling-
phasen enthält. Mit dem weltweit ersten mitteltiefen Erdwärmesondenspeicher sollen neben dem Nachweis der
Bau- und Betriebsfähigkeit insbesondere die Erfahrungen und Erkenntnisse für die Planung, Bemessung, Errich-
tung und Kalkulation zukünftiger Projekte genutzt werden.

Mit Hinblick auf die Bohrphase wurden bereits in der Planungsphase besondere Herausforderungen zur Einhal-
tung der Vertikalität der Bohrungen, zum Einsatz der Wasserhammerteknik sowie zu den tatsächlichen geologi-
schen und hydrogeologischen Bedingungen diskutiert. Das während des Bohrvorgangs gewonnene Ad-hoc Wis-
sen führte zu verschiedenen Anpassungen der Bauweise und Bohrtechnik. Aufgrund von Abweichungen der an-
getroffenen geologischen Verhältnisse zu der Prognose musste unter laufendem Betrieb die Bohrtechnik von
Wasserhammer auf Rotary-Bohren mit einer Ton-Süßwasserspülung umgestellt werden. Dies nahm auch direkten
Einfluss auf die Vertikalität der Bohrungen. Mit den vorliegenden detailliert aufgezeichneten Bohrdaten unter Ein-
bezug der erkundeten geologischen Verhältnisse, der seismischen Untersuchungen im Bohrloch sowie den Er-
gebnissen der Glasfasertechnik erfolgt nun eine korrelative Bewertung zwischen notwendigen Materialeinsatz,
Verschleiß und Bohrpfadabweichung je Gesteinseinheit. Im Weiteren sollen durch Modellierungsansätze die Prog-
nosefähigkeit für zukünftige Projekte in ähnlichen Settings präzisiert werden. Dadurch sollen Fehler bereits in der
Planungsphase reduziert und Bewertungs- und Optimierungsmöglichkeiten geschaffen werden.

1 Einleitung

Im Zuge der Energiewende, ausgelöst durch das Ziel der Reduzierung der CO₂ – Emissionen [1], der zu-
nehmenden Ressourcenknappheit und der Unab-
hängigkeit von Rohstoffen aus internationalen Kri-
senherden, ist vor allem der Ausbau grundlastfähiger
erneuerbarer Energien sehr gefragt. Insbesondere
beträgt in Deutschland im Wärme- und Kältesektor
der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergiever-
brauch bislang lediglich 17,4 % [2].

Einen großen Beitrag kann hierbei die Geothermie
leisten, womit die Wärme direkt aus dem Untergrund

genutzt wird und keine Umwandlung aus z.B. elektri-
scher Energie notwendig ist. Eine neuartige Techno-
logie stellen hierbei die mitteltiefen, kristallinen Erd-
wärmesondenspeicher dar, welche eine Speiche-
rung überschüssiger Wärme aus z.B. Solarthermie o-
der Industrieprozessen mit Temperaturen bis zu ca.
90 °C im Untergrund sowie die Entnahme mit einem
erwarteten Nutzungsgrad von 60 - 70 % in Bedarfs-
zeiten ermöglichen [3], [4]. Daneben weisen die mit-
teltiefen Systeme gegenüber den oberflächennahen
Erdwärmesondenspeicher durch die thermische Iso-
lierung des oberen Aquifers, die in der Regel gerin-
gere hydraulische Leitfähigkeit im tieferen Unter-
grund und die geringere Sondenanzahl erhebliche
Vorteile auf.

Auf dem Lichtwiese Campus der TU Darmstadt soll mit dem Bau eines Demonstrators, bestehend aus drei 750 m tiefen coaxialen Erdwärmesonden (EWS 2, 3 und 4) in einem Achsabstand von 8,6 m, sowohl die einhergehenden numerischen Modelberechnungen zur Effizienz des Speichers validiert werden, als auch konkret die technische Umsetzbarkeit unter Berücksichtigung der ökonomischen und ökologischen Randbedingungen wissenschaftlich untersucht werden (Abbildung 1). Ziel ist es mit dem Pilotprojekt die Grundlage für weitere innerstädtische Anlagen mit besonderem Blick auf die ökonomische und ökologische Randbedingungen zu bilden.

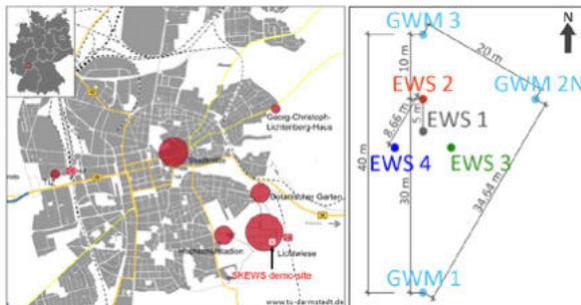


Abbildung 1: Lokation des SKEWs Demonstrators in Darmstadt an der Lichtwiese der TU Darmstadt (links). Anordnung der Erdwärmesonden EWS 1 – 4 und der drei Grundwassermessstellen GWM 1 – 3 (rechts). Die EWS 1 wurde aufgrund von Kostensteigerungen nicht hergestellt.

2 Bohrvorgang

In dieser Studie wird ein besonderes Augenmerk auf den Bohrprozess während der Bauphase gelegt, da dieser für den erheblichen Anteil der Kosten verantwortlich ist und meist über die grundsätzliche Umsetzbarkeit entscheidet.

Im Vorfeld der Tiefbohrarbeiten wurden mittels eines Lufthammers 10 3/4" Standrohre bis ca. 40 m Tiefe in den anstehenden Fels eingebracht. Durch die Hinterfüllung mit einem Brunnendämmer Spezial Zement soll der umströmende Aquifer vor thermischen und hydrologischen Einflüssen geschützt werden.

Im Anschluss hieran erfolgte die eigentliche Tiefbohrung bis 750 m (

Abbildung 2). Auf Grundlage der während der Planung zur Verfügung gestandenen geologischen und hydrogeologischen Kenntnisse war zunächst der Einsatz eines 9,5" Lufthammers bis 400 m Tiefe und im Anschluss ein 9,5" Wasserhammer mit reiner Wasserspülung vorgesehen. Die Feinpartikel sollten in der Wasserspülung über Schüttelsiebe, Hydrozyklonen und Zentrifugen separiert werden, um einen möglichst verschleißfreien Einsatz des Wasserhammers zu ermöglichen.



Abbildung 2: Drohnenaufnahme des Bohrplatzes während der Bohrphase.

Infolge abweichender geologischer und hydrogeologischer Verhältnisse zur Prognose aus der Planungsphase mit bereichsweise starke geklüfteten und instabilen Zone mit hohen hydraulischen Durchlässigkeiten und Nachfällen war während der Bohrphase eine Umstellung von Wasserhammer- zu Rotarybohren mit Ton-Süßwasserspülung notwendig (Abbildung 3).



Abbildung 3: Wasserhammer (links). Rollenmeißel mit Stabilizer (rechts).

Des Weiteren wurde durch zusätzliche Zwischenzementationen bei 40 m – 250 m (EWS 2 – 4) und bei 350 m – 550 m (EWS 3) die Bohrlöcher zusätzlich stabilisiert und die Spülungsverluste reduziert.

In definierten Tiefenbereichen wurden während des Bohrbetriebs Tests mit dem Wasserhammer mit reiner Wasser- sowie Tonspülung vorgenommen.

Nach Herstellung der Bohrungen bis zur Endteufe wurde das 7" Außenrohr mit einem an den Zentralisern befestigten Glasfaserkabel eingebaut. Die Hinterfüllung mit den thermisch gut (3,0 W/m*K) und gering (0,6 W/m*K) leitenden Zementen erfolgte für die EWS 3 über eine zwei Stopfzementation und für die EWS 2 und 4 über ein Stagetool. Die Trennlinie wurde aufgrund der abweichenden geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse von 40 m auf 180 m gesetzt.



3 Datengewinnung

Mit Hinblick auf die Untersuchung der Vertikalität der Bohrungen, den Verschleiß, Energieverbrauch, Bohrgeschwindigkeit und Kosten wurden während der ca. 3-monatigen Bohrphase kontinuierlich Bohrdaten, wie z.B. Teufe, Meißelbelastung, Pumpendruck, etc. direkt am Bohrergerät in Zeitintervallen von einer Sekunde aufgezeichnet. Des Weiteren erfolgte eine tägliche Kontrolle der Spülung hinsichtlich Zusammensetzung, Rheologie und Verluste. Die Energiedaten wurden durch Strom- und Wasserzähler sowie Betankungsprotokolle aufgezeichnet und dokumentiert. In den drei Grundwasserstellen auf dem Bohrplatz wurden Datenlogger für die Aufzeichnung der Vor-Ort Parameter installiert sowie wöchentlich chemische Untersuchungen durchgeführt. Das gewonnene Bohrklein wurde mehrmals täglich geologisch angesprochen und in Teufenabständen von ca. 3 m bis zur Endteufe für weitere Dünnschliff, XRD-XRF- Analysen beprobt. Ferner wurden geophysikalische Messungen, wie z.B. Kaliber, Gamma-Ray, Suszeptibilität, Akustik, etc. in den offenen Bohrlöchern durchgeführt. Diese Vorgehensweise stellte eine kontinuierliche und lückenlose Datenaufzeichnung für die weitere wissenschaftliche Auswertung sicher. Dabei war insbesondere die kontinuierliche geologische Ansprache des Bohrkleins sowie die Aufzeichnung der Bohr- und Spülungsparameter für die ad-hoc Entscheidungen infolge abweichender geologischer und hydrologischer Verhältnisse von größter Wichtigkeit.

4 Ergebnisse

Aufgrund mehrerer vorangegangener geologischer Aufschlussanalogstudien [5], [6], [7], [8] und Bohrdaten [9] wurde kompakter Granodiorit des Odenwaldkristallins in ca. 40 m Tiefe vermutet. Dementsprechend sollte der Einsatz eines 9,5" Wasserhammers mit einer reinen Wasserspülung erstmalig bis in 750 m im kristallinen Festgestein demonstriert werden. Aufgrund von bis 200 m Tiefe permischen Basalten und dem Antreffen von zwei unterschiedliche granitische Plutonkörper mit deutlich erhöhten hydraulischen Durchlässigkeiten musste jedoch wegen hoher Bohrspülungsverluste auf eine Ton-Süßwasser-Spülung mit Rotarybohren umgestellt werden. Ebenfalls waren zusätzliche Zwischenzementationen bei 40 m – 250 m (EWS 2 – 4) und bei 350 m – 550 m (EWS 3) zur Stabilisierung der Bohrlöcher notwendig.

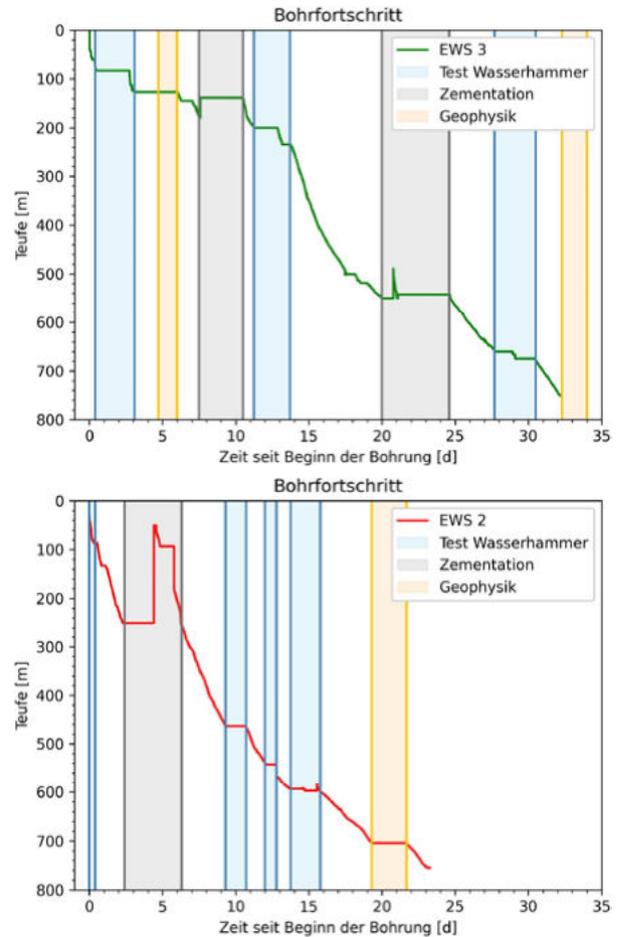


Abbildung 4: Bohrfortschritt der EWS 3 und 2 mit Unterbrechungen aufgrund von Spülungshammertests, Zementierung, geophysikalischen Untersuchungen und Reparaturen am Bohrergerät. EWS 3 war die erste Bohrung, gefolgt von EWS 4 und schließlich EWS 2.

Mit den bohrtechnischen und geologischen Erfahrungen aus der ersten Bohrung EWS 3 konnte eine Reduzierung der Bohrtage in den beiden anderen Bohrungen um bis zu sieben Tage erreicht werden (Abbildung 4). Insbesondere die erfolgreiche Zementation in 550 m Tiefe in der EWS 3, was weitgehend zum Verschluss der Klüfte im näheren Umfeld der Bohrung geführt hat, erwirkte eine Reduzierung um 4,5 Tage. Signifikante Spülungsverluste traten vor allem in den instabilen Zonen 40 m – 250 m sowie in der stark geklüfteten Zone in 550 m Tiefe in EWS 3 auf (Abbildung 5).

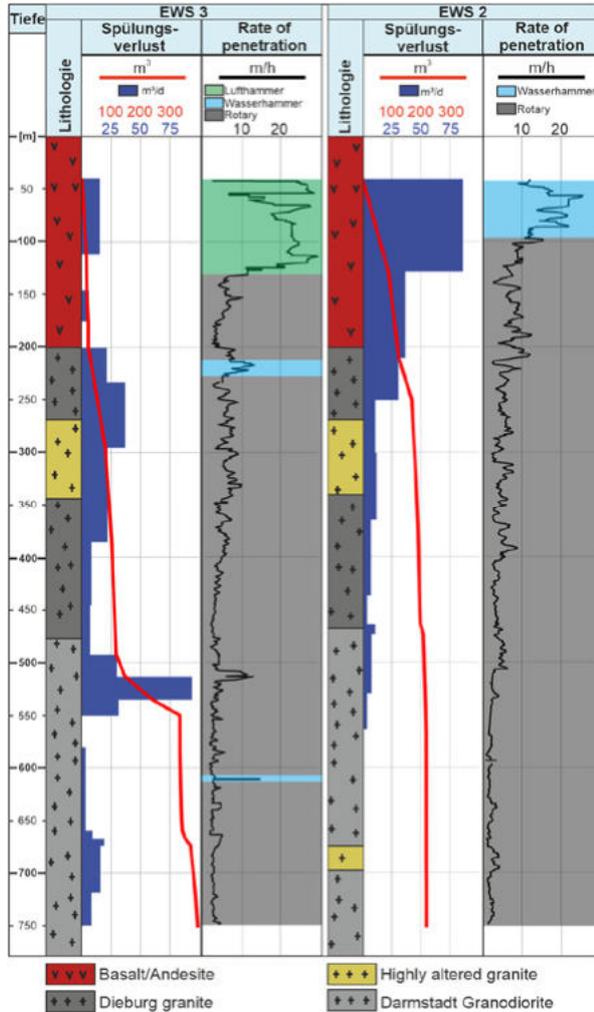


Abbildung 5: Bohrprofile mit täglichen und kumulativen Spülungsverlusten und der Rate of Penetration (ROP).

Die höchsten Bohrgeschwindigkeiten wurden mit dem Luft- und Flüssigkeitsbohrhammer mit Geschwindigkeiten von bis zu ca. 10 m/h - 20 m/h gegenüber dem Drehmeißel mit ca. 2 m/h - 5 m/h erreicht. Somit ist durch den gezielten Einsatz der Wasserhammerteknik unter Berücksichtigung der geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten eine erhebliche Steigerung der Bohrgeschwindigkeit zu erwarten. Im Hinblick auf den weiteren Ausbau des Speichers sind weitere Zeiteinsparungen durch die Reduzierung der geophysikalischen Untersuchungen, der Wasserhammersversuche und durch die Vertiefung des Standrohres von 40 m auf 150 m - 200 m zu erwarten. So würde die Vertiefung des Standrohres neben der thermischen und hydrologischen Isolierung dem Bohrloch deutlich mehr Stabilität verleihen und Nachfall verhindern. Der Einsatz des Wasserhammers könnte so voraussichtlich bis zur Endteufe ermöglicht werden und insbesondere in den tieferen Bereichen einen deutlichen Geschwindigkeitsvorteil bewirken.

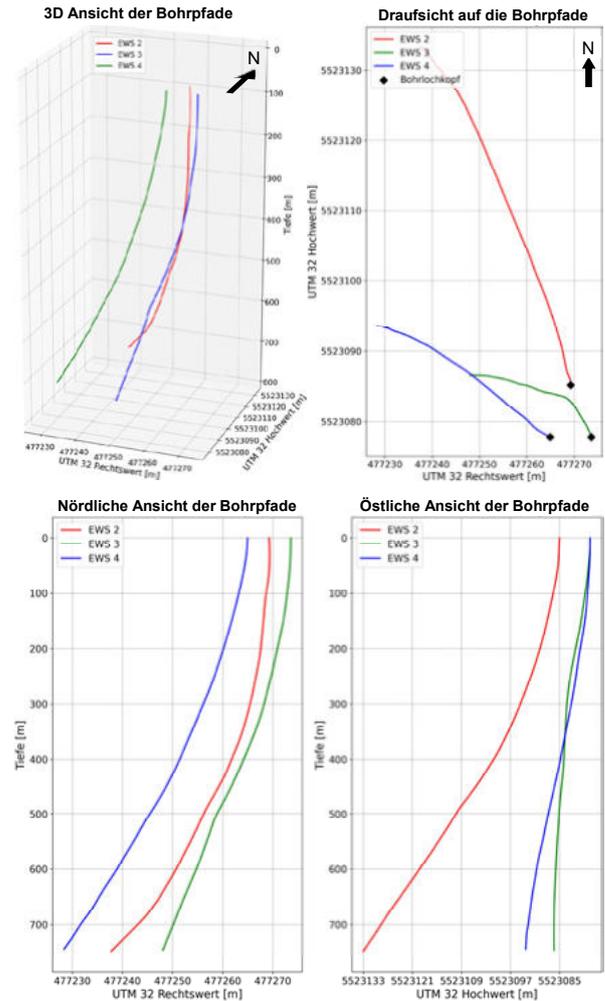


Abbildung 6: 3D sowie 2D Ansichten von oben, Osten und Norden der Bohrpfade.

Im Hinblick auf die Kollisionsvermeidung und die Effizienz des Speichers mit den Interaktionen zwischen den EWS sind die Vertikalität und Richtungsgenauigkeit der Bohrungen von besonderer Bedeutung. Die allgemeine Richtung der Bohrfadabweichung ist NW/NWW mit einer durchschnittlichen Abweichung von der Vertikalen von 5,0° für EWS 2, 2,3° für EWS 3 und 3,3° für EWS 4 (Abbildung 6). Dies ist voraussichtlich auf die lokalen geologischen Verhältnisse und den Einsatz des Rotationsverfahrens zurückzuführen, bei dem die Vertikalität durch die ausgeprägte Rotation wesentlich schwieriger einzuhalten ist als beim Wasserhammer, der mit vertikalen Hammerschlägen und geringer Rotation arbeitet.

Für die ökologische und ökonomische Bewertung des Bohrprozesses ergibt eine erste Auswertung der Datensätze einen Gesamtverbrauch von 1650 m³ Wasser, 91.000 l Diesel und 112 MWh Strom. Dabei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der Lage des Bohrplatzes der gesamte Strom für den Bau der Erdwärmesonden vorübergehend mit einem 350 kVA Dieselgenerator erzeugt wurde. Für den Vollausbau



des Erdwärmesondenspeichers mit ca. 37 Bohrungen würde eine stationäre Stromanbindung sowohl ökologisch als auch ökonomisch erhebliche Vorteile bieten. Der Treibstoffverbrauch würde sich damit auf den Einsatz der kleineren Baumaschinen und der Spülpumpen reduzieren, was ca. 21.500 l Diesel für dieses Projekt entsprechen würde.

5 Ausblick

In der weiteren Untersuchung zur Kausalität der abgelenkten Bohrpfade sollen Modellierungsansätze angewendet werden, um den Einfluss der verschiedenen bohrtechnischen und geologischen Parameter zu bewerten. Demnach kann bei zukünftigen Bohrprojekten mit ähnlichen Rahmenbedingungen diese verwendet werden, um Vorhersagen über Bohrpfadabweichungen und -geschwindigkeiten treffen zu können.

Die Datensätze werden dabei um die Auswertung von akustischen Bohrlochteleviewer-Daten zu den Eigenschaften der Klufnetzwerke, sowie um die physikalische Gesteinseigenschaften zur Abrasivität und einaxialen Druckfestigkeit weiter vervollständigt.

Anschließend wird nach Abschluss des Projektes eine vollständige ökologische und ökonomische Bilanzierung unter Einbeziehung aller Energieverbräuche- und Grundwasserdaten durchgeführt [10].

Literaturverzeichnis

- [1] BMUB (2016). Klimaschutzplan 2050. *Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit; 91
- [2] AGEE-Stat (2023). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)*. Umweltbundesamt. V 1.5 Energiedaten; Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)
- [3] Bär, K., Rühaak, W., Welsch, B., Schulte, D., Homuth, S., & Sass, I. (2015). *Seasonal High Temperature Heat Storage with Medium Deep Borehole Heat Exchangers*. Energy Procedia; 76:351–60
- [4] Welsch, B., Rühaak, W., Schulte, D. O., Bär, K. & Sass, I. (2016). *Characteristics of medium deep borehole thermal energy storage*. International Journal of Energy Research, 40(13), 1855-1868
- [5] Bossennec, C., Frey, M., Seib, L., Bär, K., & Sass, I. (2021). *Multiscale Characterisation of Fracture Patterns of a Crystalline Reservoir Analogue*. Geosciences 11, no. 9: 371
- [6] Fahlbusch, K. (1980). *Die geologischen Grundlagen der alten Wasserversorgung Darmstadts*. Notizblatt des hessischen Landesamts für Bodenforschung; (108):223–40
- [7] Frey, M., Weinert, S., Bär, K., Vaart, J. van der, Dezayes, C., Calcagno, P., & Sass, I. (2021). *Integrated 3D geological modelling of the northern Upper Rhine Graben by joint inversion of gravimetry and magnetic data*. Tectonophysics, 813, S. 228927
- [8] Kempe, S., Strassenburg, J., Belzer, S., Henschel, H.-V., & Fahlbusch, K. (2001). *Der Darmstädter Granodiorit im Stollen in der der Dieburger Straße, Mathildenhöhe, Darmstadt*. Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins; (17):51–63
- [9] Hessische Bohrdatenbank (2022). Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
- [10] Welsch, B., Göllner-Völker, L., Schulte, D.O., Bär, K., Sass, I. & Schebek, L. (2018). *Environmental and Economic Assessment of Borehole Thermal Energy Storage in District Heating Systems*, Applied Energy, v. 216, p. 73–90





Zur Bewertung der Nachhaltigkeit einer Deponie

Prof. Dr.-Ing. Gunnar Heibrock, Hochschule Kaiserslautern
Dr.-Ing. Hanna Viefhaus, REMONDIS Production GmbH
Carsten Lesny, Asmus + Prabucki Ingenieure GmbH
Andreas Witzsche, Ingenieurbüro Roth&Partner GmbH
Prof. Dr.-Ing. Robert-Balthasar Wudtke, Hochschule Nordhausen

Aufbauend auf der Grundlage einer Klarstellung der Bedeutung des Begriffes Nachhaltigkeit wird ein Vorschlag für eine systematische Vorgehensweise für die Bewertung der Nachhaltigkeit einer Deponie bzw. ihrer Komponenten vorgestellt und exemplarisch angewendet.

1 Einleitung

Die hohe Ressourcennutzung und die Art der Produktion führen im Zusammenhang mit der Industrialisierung und der Globalisierung in einem Ausmaß zu Veränderungen in den Ökosystemen, dass die Lebensgrundlagen des Menschen perspektivisch in Frage stellt. Vor diesem Hintergrund ist der Druck, das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung in konkretes Handeln zu übersetzen, gestiegen. Zurzeit wird das Hauptziel zum Erreichen dieses Leitbilds in der Begrenzung des Klimawandels und damit der Reduzierung von Treibhausgasen gesehen.

Dies spiegelt sich in Betrachtungen zur Nachhaltigkeit wider, die häufig auf die CO₂-Emissionen fokussiert sind und die Herstellung, die Verwendung sowie die Entsorgung eines Produktes mit einem Prozess verbunden sind. Der Nachhaltigkeitsbegriff ist jedoch deutlich weiter gefasst und beinhaltet beispielsweise auch Aspekte der Biodiversität, der Bewahrung von Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten und der Ökonomie.

Im Bausektor ist der Begriff der Nachhaltigkeit heute im Hochbau und einigen wenigen Bereichen des Tiefbaus verankert (DGNB-Zertifizierungssystem für Gebäude, Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) BMWB). Zunehmend findet die Forderung nach Nachhaltigkeit auch in der Geotechnik Einzug. Mit dem vorliegenden Beitrag wird der Versuch unternommen, anhand der Betrachtung zur Nachhaltigkeit einer Deponie ein Vorgehen vorzuschlagen, mit dem diese projektspezifisch analysiert und bewertet werden kann.

2 Grundlagen

2.1 Definition „nachhaltige Deponie“

Eine nachhaltige Deponie ist dadurch gekennzeichnet, dass sie mit angemessenem Aufwand (1, 2) so geplant, hergestellt, betrieben und überwacht wird,

dass sie mit Bezug auf ökologische (umweltbezogene), ökonomische und soziale Kriterien (3) den Bedürfnissen (4) der gegenwärtigen und zukünftigen Generation entspricht.

Die Nummern kennzeichnen die der Definition zugrundeliegenden kennzeichnenden Eigenschaften, die im Folgenden als Nachhaltigkeitskriterien bezeichnet werden.

2.2 Nachhaltigkeitskriterien

(1) Der Aufwand für die Planung, die Herstellung, den Betrieb ergibt sich aus dem Ressourcenverbrauch (Energie, Rohstoffe, Wasser, Reststoffe, Fläche/ Untergrund, Artenvielfalt, Zeit, Arbeitskraft und Kapital), den Emissionen (Treibhausgase, Feinstaub, gelöste Stoffe, Lärm) und den Abfällen. Der Ressourcenverbrauch und die Emissionen werden projektspezifisch anhand quantitativ messbarer Größen beschrieben, die im Folgenden als Indikatoren bezeichnet werden

(2) Die Angemessenheit bzw. das zulässige Maß des Aufwandes für die Herstellung, den Betrieb, die Stilllegung und die Nachsorge der Deponie werden in Form von Grenzwerten für den Aufwand beschrieben. Dabei werden ggf. mehrere Indikatorwerte zu einem Potentialwert zusammengefasst. Ein Potentialwert beschreibt dabei die Auswirkung der Deponie auf ihre Umwelt (Boden/ Wasser/ Luft), die Ressourcen und die Abfälle. Beispiele für Potentialwerte sind das Treibhausgaspotential oder das Biodiversitätsschadenspotential. Die jeweiligen Grenzwerte sind projektspezifisch festzulegen, ggf. kann je nach Ziel der Nachhaltigkeitsanalyse auf eine Festlegung der Angemessenheit verzichtet und nur eine Analyse und Ermittlung der Indikatorwerte erfolgen.

(3) Die Berücksichtigung der ökologischen, ökonomischen und sozialen Kriterien erfolgt durch eine Bewertung der Wechselwirkungen der Deponie (zugehörige Materialien, Produktes und Prozesse) mit dem Ökosystem und dem sozialen und wirtschaftlichen



Umfeld. Die Beschreibung der Wechselwirkung erfolgt auf der Grundlage projektspezifisch ermittelter Sachbilanzen für die Indikatoren. Die Berücksichtigung muss nicht vollständig sein, es muss lediglich transparent und nachvollziehbar sein, welche Anforderungen die bewertete Deponie (bzw. das Bauteil) erfüllen muss (funktionales Äquivalent) und welche Kriterien und Wirkungen berücksichtigt, bzw. nicht berücksichtigt werden (Systemgrenzen s. Abschnitt 2.2).

(4) Vor allem die projektspezifische Konkretisierung der Bedürfnisse der gegenwärtigen und zukünftigen Generation scheint auf den ersten Blick nur schwer umsetzbar. Aus Sicht der Autoren, bieten die in der von den vereinten Nationen aufgestellten Agenda 2030 formulierten 17 Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals, SDGs) eine sinnvolle allgemeine Auflistung der möglichen Bedürfnisse. Aus Sicht der Geotechnik sind grundsätzlich die der Tabelle 1 zusammengestellten SDGs relevant

Tabelle 1: Entwicklungsziele und exemplarische, zugehörige Indikatoren (orientiert an Destatis 2021)

SDG – Entwicklungsziel – Bedürfnis (4)	Bewertungskriterien / Indikatoren (1)
Sauberes Wasser (Oberflächen- und Grundwasser)	Grenzwerte für Schadstoffkonzentrationen, Wasserverbrauch
Gesundheit und Wohlergehen (Luftbelastung)	Grenzwerte für Luftbelastung, Feinstaub
Bezahlbare und saubere Energie	Primärenergieverbrauch, Endenergieproduktivität, Anteile Art der Energiequelle
Industrie, Innovation und Infrastruktur	Förderung innovativer Bauweisen
Nachhaltige Städte und Gemeinden	Flächenverbrauch, Endenergieverbrauch Güterverkehr, Entsorgungssicherheit
Nachhaltiger Konsum und Produktion	Zertifizierte Produkte, Umweltmanagementsysteme, Abfallmengen und Art
Klimaschutz (Klimaschutzgesetz)	Treibhausgasemissionen
Leben an Land (Artenvielfalt, Wiederaufbau von Wäldern, Bodenschutz)	Artenvielfalt, Wiederaufbau von Wäldern, Bodenschutz

3 LCA als Leitlinie für die Bewertung der Nachhaltigkeit

Eine vollständige Bewertung der Nachhaltigkeit ist im konkreten Fall so gut wie unmöglich und je nach betrachteter Planungs- und Bauphase auch nicht zielführend. In einem ersten Schritt zur Bewertung der Nachhaltigkeit müssen also die zu betrachtenden Entwicklungsziele und damit das projektspezifische Ziel der Nachhaltigkeitsbewertung festgelegt und als messbare Projektziele konkretisiert werden. Daraus ergeben sich die zugehörigen Bewertungskriterien und Indikatoren. In einem zweiten Schritt müssen die

durch das Bauwerk bzw. das zu betrachtende Bauteil zu erfüllenden Anforderungen zusammengestellt werden. Diese Zusammenstellung wird als „funktionales Äquivalent“ bezeichnet. Wichtig ist auch die zielspezifische Formulierung der Systemgrenzen (welche Prozesse werden im Rahmen der Analyse betrachtet und welche nicht und von welchen Voraussetzungen wird ausgegangen und welche Datenquellen werden verwendet). Je nach Zielsetzung können somit räumliche Grenzen und auch der Betrachtungszeitraum entsprechend gewählt werden. Ebenso können explizit Einflüsse aus potentieller, stofflicher und energetischer Verwertung, die außerhalb des Lebenszyklus bzw. der definierten Systemgrenze des Bauwerks auftreten, erfasst und in die Bewertung einbezogen werden (sofern dies variantenübergreifend erfolgt). Abschließend ist für eine Bewertung die Definition von realistischen und repräsentativen Szenarien für jede Lebenszyklusphase des Bauwerks und die darin enthaltenen Prozesse erforderlich. Die Festlegung von funktionalem Äquivalent, Systemgrenze und Szenarien ermöglicht dabei nicht nur die Vergleichbarkeit von Varianten, sondern auch die separate Betrachtung und anschließende Zusammenführung der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit, i.e. die Bewertung der ökologischen,

der ökonomischen und der sozialen Qualität des Bauwerks.

Darüber hinaus muss ein Bewertungssystem vorhanden sein, mit dem der Grad der Zielerreichung bestimmt werden kann. Dies setzt die Messbarkeit der Kriterien anhand sogenannter Indikatoren sowie die Formulierung eines Bewertungskriteriums (z.B. Grenzwerte) voraus. Einen für die projektspezifische Analyse der Nachhaltigkeitskriterien geeigneten Rahmen bieten die etablierten Verfahren der Lebenszyklusanalyse/Ökobilanz oder LCA (ökologische Kriterien), die Lebenszykluskostenrechnung

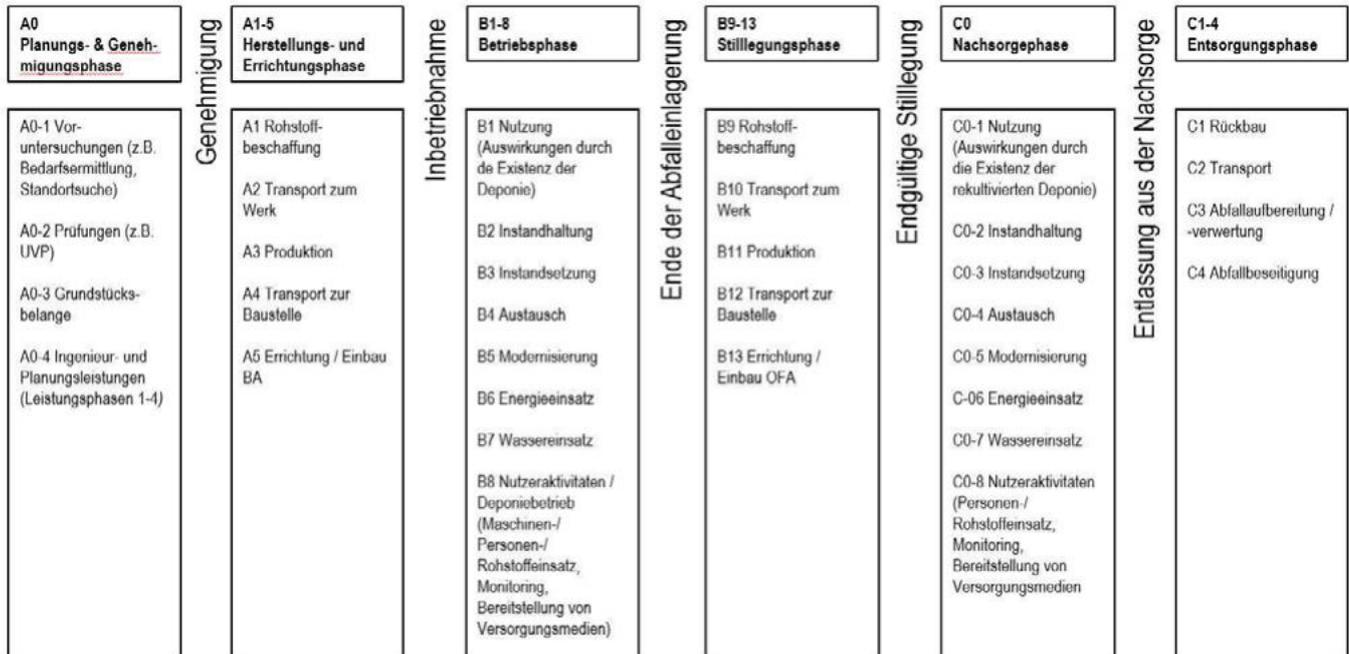


Abbildung 1: Lebenszyklus einer Deponie (in Anlehnung an die DIN 15643 bzw. 17472)

oder LCC (ökonomische Kriterien) sowie die Sozialbilanz oder LsCA (soziale Kriterien). In allen Fällen ist eine projektspezifische Datenerhebung erforderlich, die vor allem für die LsCA aufwändig ist, da hierfür in der Regel nicht auf vorhandene Datensätze zurückgegriffen werden kann. Grundlage der Analyse ist jeweils eine Sachbilanz, d.h. die Input-Output-Analyse des Ressourcenverbrauches (Energie, Rohstoffe, Wasser, Reststoffe, Fläche/ Untergrund, Zeit, Arbeitskraft und Kapital) sowie der Emissionen CO₂, Feinstaub, gelöste Stoffe) über den Lebenszyklus der Deponie.

Die Abbildung 3.1 zeigt eine erste Version der für die Bewertung der Nachhaltigkeit zu berücksichtigenden Prozesse im Zusammenhang mit den Lebenszyklusphasen einer Deponie. Das Vorgehen ist an das bei der Analyse der Nachhaltigkeit von Bauwerken (DIN 15643 bzw. 17472) angelehnt und um deponiespezifische Lebenszyklusphasen ergänzt.

In der Kopfzeile finden sich die Deponielebenszyklusphasen, denen jeweils phasenbezogene Module zugeordnet sind. Die Module bilden die für die Realisierung der jeweiligen Phase erforderlichen Prozesse ab. Modulspezifisch erfolgt dann die Input-Output-Analyse des Ressourcenverbrauches und der Emissionen (Sachbilanz) und der zugehörige Indikatorwert wird nach einem Matrizenrechenverfahren (gemäß DIN 15978) für alle im Modul vorhandenen Prozesse berechnet (Wirkungsabschätzung).

Der Lebenszyklus der Deponie lässt sich durch die Module A0 bis C4 beschreiben (Abb. 1). Die vorbereitenden Arbeiten finden in der Planungsphase statt (Modul A0). Dazu gehören z.B. vorläufige Untersuchungen und Gutachten, die Planung sowie die Genehmigung des Bauvorhabens, etc. Darauf folgt die Herstellungsphase, in der zunächst Rohstoffe gewonnen, zum Produktionsstandort transportiert und in der Produktion schließlich zu fertigen Baustoffen/Produkten weiterverarbeitet werden (Module A1-3). Die Errichtungsphase beinhaltet alle Vorgänge, die zur Errichtung des eigentlichen Bauwerks beitragen. Das sind zusätzlich zur reinen Bautätigkeit auch der Transport zur Baustelle sowie deren Einrichtung, Erschließung und Beräumung und ggf. weitere infrastrukturelle Maßnahmen (Module A4-5).

In der Betriebsphase wird unterschieden zwischen der eigentlichen Nutzung des Bauwerks (Modul B1), der Instandhaltung (Modul B2), der Instandsetzung (Modul B3), dem Austausch von einzelnen Teilen (Modul B4) und der Modernisierung (B5). Darüber hinaus ergeben sich durch den Betrieb eines Bauwerkes weitere Faktoren in der Nutzungsphase, so etwa der Energie- und Wassereinsatz für den Betrieb und die sonstigen Nutzeraktivitäten (Module B6-8). Hinzu kommen Rohstoffeinsätze wie z.B. zur Sickerwasseraufbereitung. Nach der Betriebsphase folgt die deponiespezifische Stilllegungs- und Nachsorgephase (Module B10-C0). Wenn die Entlassung aus der Nachsorgephase gelingt, folgt ggf. eine Rückbau- und Entsorgungsphase, welche neben dem eigentlichen Rückbau des Bauwerks (Modul C1) den Transport zur Entsorgungsstätte (Modul C2), die Abfallbehandlung bzw. Aufbereitung des Abfalls für die

Wiederverwendung (Modul C3) miteinschließt und schließlich die Beseitigung nicht wiederverwertbarer Abfälle (Modul C4) beinhaltet. Die Lebenszyklusphase der Module C1-4 entspricht der bauwerksspezifischen Entsorgungsphase.

4 Anwendungsbeispiele

Im Folgenden werden beispielhaft vergleichende Berechnungen von Indikatorwerten vorgestellt, die im Falle der Nachhaltigkeitsbewertung eines Deponiebauwerks von Bedeutung sind. Bei den nachfolgend vorgestellten Beispielen geht es weniger um die Vorstellung eines umfangreichen Beispiels als um die exemplarische Verdeutlichung der Vorgehensweise, insbesondere die Bedeutung der Formulierung klarer Bewertungsziele, Systemgrenzen und Szenarien.

Betrachtet wird die Verwendung unterschiedlicher Materialien für die Abdichtungskomponente sowie für die Drainagekomponente eines Basisabdichtungssystems für eine DKI-Deponie. Verglichen wird die Ausführung der Abdichtungskomponente als tonmineralische Abdichtung bzw. als Kunststoffdichtungsbahn sowie die Ausführung der Entwässerungskomponente mit Kies bzw. mit Recyclingmaterial, in diesem Fall teerhaltigem Straßenaufbruch. Bewertet werden soll die Wirkung im Hinblick auf das Entwicklungsziel Klimaschutz, womit die Einhaltung des 1,5 °C-Ziels bis 2050 gemeint ist. Aus dieser Zielsetzung lässt sich die Systemgrenze wie folgt ableiten: Da das Ziel durch jegliche klimarelevanten Emissionen unabhängig vom Ort der Entstehung beeinflusst wird, besteht die räumliche Systemgrenze weltweit. D.h. dass auch ein Rohstoffabbau oder eine Fertigung der einzusetzenden Produkte im Ausland in die Bilanz mit einfließt. Würde auf der anderen Seite das Ziel nicht der weltweite Klimaschutz, sondern z.B. die Erhaltung eines am Standort angrenzenden Biotops sein, so würde sich auch die räumliche Systemgrenze auf das emissionspezifische Einzugsgebiet dieses Biotops beschränken. Eine Rohstoffgewinnung oder Fertigung im Ausland würde dann nicht in der Bilanz berücksichtigt werden und zeitlich wäre dann der Horizont bis 2050 nicht mehr maßgebend, sondern über der Zeitraum des gesamten Lebenszyklus der Deponie. Vor diesem Hintergrund ergeben sich die folgenden relevante Module: Module A0 – A5 (Planung, Herstellung & Errichtung) sowie B1 – B8 (Betrieb) unter der Annahme, dass dieser bis 2050 andauert und in diesem Zeitraum keine Stilllegungs- und Nachsorgephase stattfindet.

Als funktionales Äquivalent wird das gesamte Basisabdichtungssystem (bestehend aus Abdichtungskomponente, Entwässerungsschicht etc.) in einem

auf Entwurfsplanungsniveau beschriebenen Deponieabschnitt (Bauwerksebene) definiert. Die funktionelle Einheit auf der Produktebene ist dementsprechend 1 m² Abdichtungskomponente bzw. Entwässerungsschicht. Da die gesamten Quadratmeter für das Abdichtungssystem identisch sind, wird nachfolgend lediglich die Produktebene in Bezug auf das funktionale Äquivalent betrachtet und zwischen den Ausführungsvarianten verglichen.

Anschließend müssen Szenarien definiert werden, die der Ermittlung der Sachbilanzen zugrunde gelegt werden. In diesem Schritt werden z.B. die Lieferwege von Rohstoffen bzw. Produkten oder die zur Anwendung kommenden Herstellungs- und Einbauverfahren beschrieben. Ggf. werden hier für den Fall fehlender Informationen entsprechende Annahmen getroffen und dokumentiert. Die Sachbilanzen enthalten schließlich die benötigten km Transportwege oder die bei der Produktion eines Produktes benötigten Energiemengen und deren Quellen pro funktionelle Einheit. An diesem Punkt ist man häufig auf herstellereinspezifische Angaben angewiesen, die diese zunehmend in sogenannten EPDs (environmental product declarations) dokumentieren. Diese Angaben sind zumindest teilweise auch in generischen Datenbanken zusammengefasst, z.B. Ökobaudat.

Für den konkreten Anwendungsfall liegt für die KDB eine EPD vor – die hier zugrunde liegenden Szenarien sind allerdings nicht bekannt und werden als produktspezifische mittlere Werte angenommen. Für die Tondichtung bzw. den Einsatz von Kies bzw. Recyclingmaterial in der Entwässerungsschicht werden hingegen die folgenden Annahmen getroffen und entsprechende Werte aus der generische Datenbank Ökobaudat verwendet: Der Transport erfolgt mittels Lkw mit 50 tkm/m² funktioneller Einheit (Modul A4). Der Einbau der Tondichtung erfolgt mit 4 Geräten, der Einbau der Entwässerungsschicht mit 2 Geräten (Modul A5). Da die generische Datenbank lediglich Daten für das Gerät 100 kW Bagger enthält, werden diese für jedes Gerät zugrunde gelegt, mit der Annahme, dass 0,5 m³/m² funktioneller Einheit Materialeinsatz erfolgt. Gleiches gilt für den Abbau und die Verladung im Falle der Tondichtung mit einem Einsatz von zwei Geräten (Modul A1; Module A2 und A3 entfallen). Für den Einsatz von Kies bzw. Recyclingmaterial gibt es hier hingegen spezifische Daten aus der Ökobaudat zum Abbau, Waschen, Klassieren und Verladen (Module A1-3). Weiterhin sehen die Szenarien vor, dass die Module A0 sowie B1-8 entfallen, da hier für eine vergleichende Betrachtung keine Unterschiede zwischen den eingesetzten Materialien erwartet werden.



Im Anschluss an die Erstellung der Sachbilanz erfolgt die daraus abgeleitete Wirkungsabschätzung. Gemäß der Zielsetzung, dass 1,5°C-Ziel bis 2050 zu erreichen, ist als Indikator für die Bewertung aus der Liste aller der Wirkungsabschätzung nach DIN 17472 (Bauwerksebene) bzw. DIN 15804 (Produktebene) zugrunde liegenden Umweltindikatoren der Indikator Klimawandel – gesamt (kg CO₂-Äq.) ausgewählt. Im Falle der bereits zuvor genannten alternativen Zielsetzung, z.B. dem Erhalt eines am Standort angrenzenden Biotops, wären wiederum andere Indikatoren von Bedeutung, z.B. Versauerung (mol H⁺-Äq.) oder Eutrophierung (kg N-Äq.).

In der Abbildung 3.2 ist die beschriebene Vorgehensweise noch einmal als Abfolge von Arbeitsschritten dargestellt.

Auf dieser Grundlage ergeben sich für das betrachtete Beispiel der Basisabdichtung folgende Umweltindikatorwerte:

Beispiel 1: Kunststoffdichtungsbahn vs. mineralische Tondichtung als Abdichtungskomponente

	Ton	KDB
Modul A0:		entfällt ¹⁾
Modul A1 :	1,294 ²⁾	3,430 ³⁾
Modul A2:	entfällt	0,139 ³⁾
Modul A3:	entfällt	0,456 ³⁾
Modul A4 :	4,485 ⁴⁾	0,236 ³⁾
Modul A5:	2,588 ⁵⁾	0,253 ³⁾
Module B1-8:	entfällt ¹⁾	
Summe:	8,37	4,51

Beispiel 2: Kies vs. Deponieersatzbaustoff (z.B. teerhaltiger Straßenaufbruch)

	Kies	DepEBS
Modul A0:		entfällt ¹⁾
Modul A1-3:	2,569 ⁶⁾	2,569 ⁶⁾ / entfällt ⁷⁾
Modul A4:	4,485 ⁴⁾	4,485 ⁴⁾
Modul A5:	1,294 ²⁾	1,294 ²⁾
Module B1-8:	entfällt ¹⁾	
Summe:	8,35	8,35 / 5,78

¹⁾Annahme, da Prozesse für beide Varianten ähnlich
²⁾Ökobaudat (Bagger 100 kW Aushub mit 0,5 m³/m²) – 2 Geräte,
³⁾EPD Fa. Naue GmbH
⁴⁾Ökobaudat (Lkw mit 50 tkm/m²),
⁵⁾Ökobaudat (Bagger 100 kW Aushub mit 0,5 m³/m²) – 4 Geräte

⁶⁾Ökobaudat (Kies 2/32 mit 0,9 t/m²) – Abbau, Waschen, Klassieren, Verladen
⁷⁾Allokationsregel nach DIN 17472

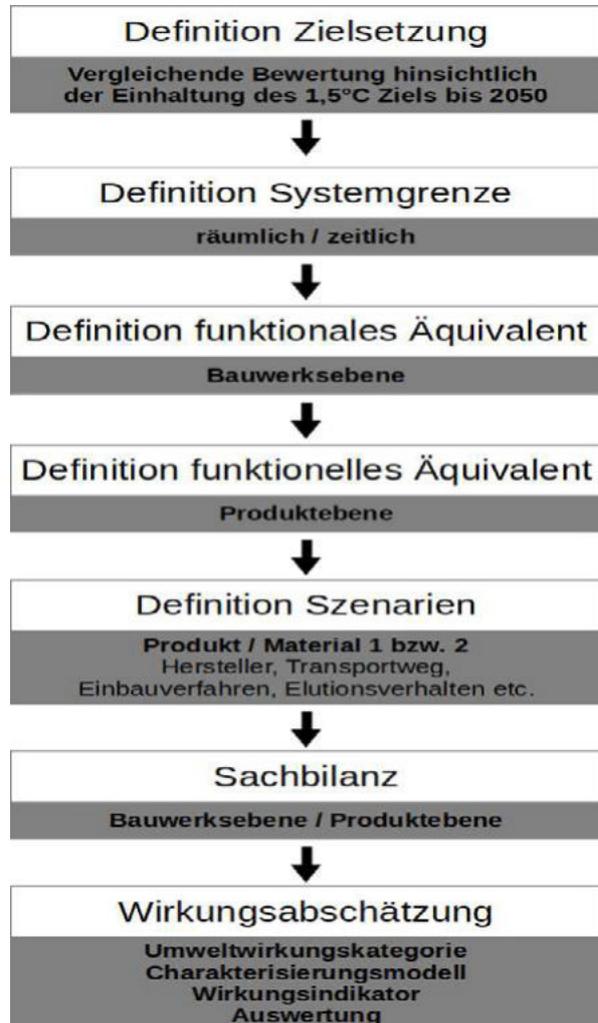


Abbildung 2: Vorgehensweise bei der Bewertung

Für den Vergleich zwischen den Abdichtungskomponenten KDB und Ton (Beispiel 1) ist ersichtlich, dass mit der Zielsetzung der Einhaltung des 1,5°C-Ziels bis 2050 und dem damit verbundenen Umweltindikator Klimawandel – gesamt (kg CO₂-Äq.) sowie unter Berücksichtigung der Annahme, dass während der Planungs- sowie der Betriebs- und Nachsorgephase beide Komponenten vergleichbare Indikatorwerte hervorrufen, eine geringere Umweltwirkung durch den Einsatz einer KDB erfolgt. Deutlich wird insbesondere der Impact der unterschiedlichen Module, da die Kunststoffherstellung (Module A1-3) zwar deutlich größere Umweltwirkungen pro funktionelle Einheit hervorruft, der Transport zur Baustelle (Modul A4) und auch der Einbau selbst (Modul A5) aber aufgrund des geringeren Materialeinsatzes bei Verwendung einer KDB den größeren Einfluss haben und zu einer insgesamt geringeren Umweltwirkung führen.



Weiterhin zeigt das Beispiel 2 zur Entwässerungsschicht, wie groß der positive Effekt beim Einsatz eines Ersatzbaustoffes anstelle eines Primärrohstoffes sein kann. Gemäß der in DIN 17472 erläuterten Allokationsregel sind Umweltwirkungen nicht mehrfach anzusetzen, d.h. wenn für die Betrachtung des Bauwerks „Straße“ die Lebenszyklusphase Entsorgungsphase für dieses Bauwerk bereits in Ansatz gebracht wird, ist dieser Vorgang nicht mehr im Rahmen der Herstellungs- und Errichtungsphase des Bauwerks Deponie anzusetzen. Die Module A1-3 entfallen damit, da sie bereits für das Bauwerk Straße innerhalb der Module C1-3 in Ansatz gebracht wurden. Die Summe pro funktionelle Einheit reduziert sich damit um ca. 30% von 8,35 kg CO₂-Äq. / m² auf 5,78 kg CO₂-Äq. / m².

DIN EN 15804:2022. *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundlagen für die Produktkategorie Bauprodukte.*

DIN EN 17472:2022. *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Nachhaltigkeitsbewertung von Ingenieurbauwerken - Rechenverfahren.*

5 Zusammenfassung

Kennzeichnend für alle nachhaltigkeitsbezogenen Arbeiten ist:

Der Projektbezug der konkreten Bedeutung des Begriffes Nachhaltigkeit (Bewertungskriterien).

- Die Vielzahl und Vielfalt (technisch, sozial, ökonomisch, ökologisch) der zu berücksichtigen Aspekte.
- Die aus der Vielzahl, teilweise nur unvollständig zu ermittelnden und qualitativ häufig stark unterschiedlichen Informationen resultierende Unsicherheit.
- Die häufig nicht abschließend auflösbare Widersprüchlichkeit der genannten Aspekte.

Eine Bewertung der Nachhaltigkeit erfordert deshalb immer entsprechende Annahmen und Vereinfachungen. Die systematische Auswahl und Dokumentation derselben ist integraler Bestandteil einer Nachhaltigkeitsbewertung. Eine Auflistung von Indikatorwerten ist nicht ziel- oder sogar irreführend. Es existieren bewährte Verfahren, die einen systematischen Umgang mit den beschriebenen Umständen erlauben. Der Beitrag zeigt, dass eine dieser Verfahren, die Lebenszyklusanalyse sinnvoll auf Nachhaltigkeitsbewertungen im Deponiekontext übertragen werden kann.

Literaturverzeichnis

DIN EN 15643:2021. *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken.*