

Nachhaltigkeit in der Geotechnik – Herausforderungen und Perspektiven

Dr.-Ing. Antje Müller-Kirchenbauer, MKP Müller-Kirchenbauer Ingenieurgesellschaft mbH, Neustadt a. Rbge.

Dr.-Ing. Fabian Kirsch, GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH, Berlin

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann, Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik, Stuttgart

Dr.-Ing. Thomas Voigt, Ed. Züblin AG, Stuttgart

Die Geotechnik steht im Zeichen der Klimakrise vor großen Herausforderungen und tiefgreifenden Veränderungen, die mit dem Begriff der Nachhaltigkeit zusammengefasst werden können. Alle Beteiligten, Bauherren, Planer und Ausführende sowie die Wissenschaft sind in diesem Prozess gefordert. Gleichzeitig eröffnen sich neue Chancen. Es gilt, u. a. neue Konzepte für nachhaltiges Bauen im und mit Boden und Fels, Möglichkeiten zur Nutzung erneuerbarer Energien sowie Systeme zum Schutz vor Klimawandelfolgen zu entwickeln. Der Beitrag liefert aus der Sicht der DGGT einen Überblick über die Nachhaltigkeitsdefinition, Randbedingungen, Lösungsansätze und Perspektiven mit Fokus auf den Erd-, Grund- und Spezialtiefbau.

1 Einleitung

Der Begriff der Nachhaltigkeit entwickelte sich seit seiner ersten Verwendung vor etwa 300 Jahren im Bereich der Holzwirtschaft kontinuierlich weiter. Etwa in der 90er Jahren wurde das Drei-Säulen-Modell entwickelt, welches ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit definiert. Innerhalb dieser Dreiecksverbindung findet die Geotechnik ihre derzeitige Aufgabenstellung vor allem im Bereich der ökologischen und ökonomischen Aspekte. Klima- und Ressourcenschutz werden demzufolge in den kommenden Jahren einen wesentlichen Aspekt im Zuge der Geotechnischen Projektbearbeitung darstellen.

Das Bauwesen ist in der Europäischen Union für 36 % des CO₂-Ausstoßes und für 40 % des Energieverbrauchs verantwortlich (EU-Taxonomie-Verordnung, Meyer 2022). Hieran haben Ingenieur- und Infrastrukturbauwerke und damit auch der Tief- und Spezialtiefbau einen wesentlichen Anteil. In der Geotechnik ist das klima- und ressourcenschonende Bauen bedingt durch den traditionell hohen Beton- und Stahlbedarf eine besonders große Herausforderung, zumal diese Materialien im Grund- und Spezialtiefbau – anders als im Hochbau – nicht ohne Weiteres substituiert werden können. Die im Sinne der Ressourcenschonung re-

levanten gewaltigen Volumina an Erdstoffen sind ebenfalls den geotechnischen Aspekten zuzuordnen. Zugleich wird die Ressourcenverknappung bewährter Rohstoffe wie Stahl oder Bentonit sowie die Abhängigkeit von globalen Lieferketten spürbar. Für die am Bau beteiligten Akteure, stellen sich im Hinblick auf die geotechnischen Belange sehr unterschiedliche Herausforderungen. So liegt ein wichtiger Grundstein bereits in einer effizienten Baugrunderkundung und deren fachkundiger Interpretation, einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Planung und einer möglichst emissionsarmen Umsetzung. Zudem muss die Optimierung von Materialien, Produkten und Prozessen dringend voranschreiten. Um sich dieses wichtigen Themas anzunehmen, wurde innerhalb der DGGT der Arbeitskreis AK 6.7 „Nachhaltigkeit in der Geotechnik“ gegründet. Dieser Arbeitskreis verfolgt die grundlegende Zielsetzung, die projektbezogene Berücksichtigung der Nachhaltigkeit in der Geotechnik zu verankern und einen entsprechenden Leitfaden zu entwerfen. Um dem Thema den nötigen Rahmen zu geben wird dieser Arbeitskreis zunächst die planerisch nachhaltige Nutzung des Projekts voraussetzen und einen zukünftigen Rückbau mitberücksichtigen.

Es soll eine in der Praxis umsetzbare Vorgehensweise entwickelt und dargestellt werden, wie



Nachhaltigkeitsaspekte in die Planung und Dimensionierung sowie den Bau und den Betrieb geotechnischer Bauwerke integriert und von den Planungsbeteiligten wie den Bauherren und den Genehmigungsbehörden bewertet werden können.

Von der Bundesrepublik Deutschland werden im Zuge der Agenda 2030 Nachhaltigkeitsziele definiert. Diese 17 Ziele sollen auf Übertragbarkeit auf die Geotechnik geprüft, aussortiert oder priorisiert werden. Dabei sollen auch Zwischenziele gesetzt werden. Der Arbeitskreis differenziert die Zielsetzungen derzeit in folgende Arbeitsschritte:

- Definition der Bedeutung der Nachhaltigkeit für die Geotechnik und Priorisierung der grundlegenden Nachhaltigkeitsziele beispielsweise auf der Basis der Agenda 2030.
- Entwicklung eines gemeinsamen Verständnisses zur Nachhaltigkeit in der Geotechnik zwischen den Arbeitskreismitgliedern.
- Recherche zu im Bauwesen bereits vorliegenden Schemata zur Bewertung der Nachhaltigkeit. Bewertung, inwieweit solche Schemata auf die Belange geotechnischer Fragestellungen übertragbar sind.
- Identifikation und Bewertung möglicher Kennzahlen für nachhaltigkeitspezifische Vergleiche von Materialien, Produkten und Prozessen.
- Im Bedarfsfall Definition weiterer quantitativer Kennzahlen oder qualitativer Möglichkeiten für entsprechende Vergleiche.
- Entwicklung von Bewertungsmöglichkeiten für Bauherren/Investoren/Genehmigungsbehörden zur Beurteilung der Nachhaltigkeit geotechnischer Bauwerke.
- Entwicklung von Kriterien zur Berücksichtigung der Nachhaltigkeit im geotechnischen Entwurfsbericht (Kompetenz/Erkundungsprogramm/Bestandteil des Berichtes/Auswirkung auf die Aus-/Weiterbildung Geotechnischer Sachverständiger).
- Dokumentation – auch anhand geeigneter Monitoringsysteme – und Evaluation der Nachhaltigkeit temporärer und dauerhafter geotechnischer Bauwerke.

- Möglicherweise Erstellung von Leitfäden zur Berücksichtigung der Nachhaltigkeit in der Geotechnik.

2 Herausforderungen für Planungs- und Ingenieurbüros

2.1 Kreislaufwirtschaft im Bauwesen

In der Bauwirtschaft wird künftig statt eines linearen Projektablaufs, bei dem man innerhalb der Wertschöpfungskette nur den vorgelagerten und den nachgelagerten Prozess kennt und berücksichtigt, das Modell einer Kreislaufwirtschaft (Bild 1) dominieren. Während der Entstehungs- und Nutzungszeit ergeben sich dabei verschieden große mögliche Teilkreisläufe der eingesetzten Stoffe. Grundsätzliches Ziel ist es, möglichst kleine (lokale) Kreisläufe zu ermöglichen. Im Zentrum der Bewertungen im Hinblick auf die Nachhaltigkeit steht dabei das Erderwärmungspotential (Global Warming Potential – GWP).

Im Planungsstadium muss durch Vermeidung unnötiger Baumassen, Verbesserung der Bemessung und Verringerung des Materialverbrauchs (Refuse – Rethink – Reduce) eine nachhaltige Struktur entstehen, die auch in der Errichtungs- und (Um-)Nutzungsphase kurze Stoffkreisläufe ermöglicht. Die Bauteile müssen reparierbar sein und um- sowie weitergenutzt werden können (Repair – Reuse – Refurbish). Schließlich ist wiederverwendeten Baustoffen (Sekundärrohstoffe) der Vorzug vor neu in den Stoffkreislauf eingebrachten Rohstoffen zu geben (Recycle). Nur ein Bruchteil – idealerweise nichts – der errichteten Strukturen darf einer Entsorgung zugeführt werden. Davon ist die (Bau-)Wirtschaft noch weit entfernt. Aktuell (2021) liegt der Anteil von Sekundärrohstoffen als Baustoff bei nur 13% (Deloitte und BDI 2021).

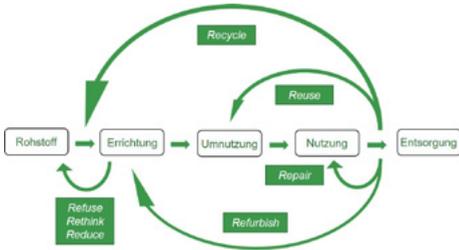


Bild 1: Kreislaufwirtschaft

Für das geotechnische Ingenieurbüro ergeben sich neue Anforderungen und Aufgaben, die nachfolgend schlaglichtartig beleuchtet werden. Dazu zählen u. a.:

- BIM als Planungsmethode und in der Begleitung des Lebenszyklus mit Dokumentation „aller“ Baustoffe und Geometrien verwenden.
- Die spätere Wiederverwendung von Baustoffen, Bauteilen und Teilbauwerken bei der neu zu errichtenden Struktur ermöglichen.
- Vorhandene Gründungselemente, Bauteile oder ganze Bauteilgruppen (z. B. Baugruben) wiederverwenden, wenn das Bauwerk ersetzt wird. Dies bedarf einer Neubewertung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit sowie geeigneter Test-, Sanierungs- und Ertüchtigungskonzepte.
- CO₂-Bedarf aller geotechnischen Elemente untersuchen und in die (Wirtschaftlichkeits-)Bewertung einbeziehen.
- Erweiterte Dokumentation und Prüfung von Unterlagen z. B. von UmweltproduktDeklarationen (Environmental Product Declaration – EPD) im Rahmen der Fachüberwachung berücksichtigen.
- Intensivierte Beratung für Bauherren mit Umbauplänen (Bauen im und mit dem Bestand).
- Neue Anforderungen an die Kommunikation mit den Genehmigungsbehörden, wobei häufig Zielkonflikte zwischen GWP und Umweltschutz neu abzustimmen sind, wie z. B. bei Anforderungen an Trogbaugruben oder die Genehmigungsfähigkeit von Grundwasserabsenkungen.

2.2 Aspekte bei Grundlagenermittlung, Planung und Beratung

Für sämtliche Bauwerke ist ein geringes GWP anzustreben und die Möglichkeiten der Nutzung erneuerbarer Energien sind zu beurteilen.

Im Rahmen des *Baugrundgutachtens* sind Baustoffgewinnung und Energieversorgung zu thematisieren: Ist der Standort für eine geothermische Nutzung geeignet? Sind lokal (Sekundär-)Rohstoffe bspw. für Erdarbeiten (Dämme, Aufschüttungen) vorhanden? Wo und wie können Aushubmaterialien sinnvoll zwischengelagert werden, um unnötigen CO₂-Anfall durch Transporte oder Zersetzungsprozesse organischer Böden zu vermeiden? Gibt es Bestandsbauteile (Pfähle, Bodenplatten, Baugrubenumschließungen), die möglicherweise weitergenutzt werden können?

Generell muss die Geotechnik durch mehr und vertiefte Untersuchungen eine genauere Beschreibung der Böden bereitstellen, um eine schlanke und von „versteckten Sicherheiten“ bspw. durch Verwendung sehr vorsichtiger Schätzwerte befreite Planung zu ermöglichen. Dies geht nur mit mehr – auch finanziellem – Aufwand in der Phase der Grundlagenermittlung.

Die Aufgaben der *geotechnischen Fachplanung* werden um die Berechnung (und Optimierung) des GWP erweitert. Die Grundlage für derartige Berechnungen liefern die EPDs und Erfahrungswerte zum Bauprozess bzw. zum Baustellenbetrieb. Unterschiedliche Szenarien zum Baustellenbetrieb, deren Untersuchung vormals eher eine Aufgabe der ausführenden Firmen war, werden für den Planungsprozess und damit auch für das Planungsbüro relevant. Nur in Kenntnis der möglichen Szenarien können die GWP-Prognosen realitätsnah erstellt und als Entscheidungsgrundlage für unterschiedliche Bauweisen herangezogen werden.

Folgende Beispiele zeigen, dass eine nachhaltige Planung in der Geotechnik oft einen Wechsel der Betrachtungsweise erforderlich macht:



- Während für die Nachweise der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit die minimalen (Nenn-) Bauteilabmessungen maßgebend sind, ist für die Ermittlung des GWP die tatsächliche Betonmenge inkl. erwartetem Überbeton bspw. bei einer Schlitzwand oder einer Gründung auf Bohrpfählen relevant.
- Der Vorteil einer „hindernisfreien“ Baugrube durch den Einsatz von Verpressankern, muss der mangelhaften Wiedernutzbarkeit der Anker im Vergleich zu einer Aussteifungslösung gegenübergestellt werden.
- Der Imperativ des Nachbarschafts- und Grundwasserschutzes beim Bauen im Grundwasser hat zu einem fast völligen Verschwinden von Grundwasserabsenkungen geführt, die jedoch im Hinblick auf das GWP um Größenordnungen günstiger zu bewerten sind als Trograbaugruben.
- Klimafreundliche Bauweisen und Bauarten wie Weichgelsohlen oder Bodenmischwände müssen einer Neubewertung im Vergleich zu anderen Bauweisen mit evtl. größerer „Systemicherheit“, aber auch höherem GWP unterzogen werden.
- Gründungskörper müssen oftmals nicht maximal steif, d.h. setzungsreduziert, ausgelegt werden. Klimafreundlicheren Baugrundverbesserungen, bspw. durch Rütteldruck- oder Rüttelstopfverdichtungen, ist der Vorzug vor Tiefgründungen zu geben.
- Generell wird eine Reduktion von Verformungen im Umfeld von Baumaßnahmen durch steifere Lösungen und größere Bauteilabmessungen beim Bauen im Bestand erkaufte. Hier sind die Anforderungen an zulässige Verformungen vom wünschenswerten auf das notwendige Maß zu reduzieren.

Viele Bauverfahren im Spezialtiefbau beruhen auf dem Einsatz von *Baustoffen* wie Zement und Stahl, die ein hohes GWP aufweisen. Für die geotechnische Fachplanung ergibt sich ein Anpassungsdruck zur Substitution dieser Baustoffe. So können (steifere) Schlitzwände durch (flexiblere) wiedergewinnbare Spundwände ersetzt werden. Geländesprünge können mittels Geokunststoff- oder

Bewehrte-Erde-Konstruktionen klimafreundlicher gesichert werden als mit Winkelstützwänden aus Stahlbeton. In Zukunft kann Bewehrungsstahl durch Nicht-Metallwerkstoffe wie z. B. eine „Basaltbewehrung“ ersetzt werden.

Im Hinblick auf die *Bauprozesse* wird das GWP die Bewertungsmaßstäbe verändern. Baugrundverbesserungen werden vorzugsweise nicht durch den Einsatz von Zement erreicht, sondern durch (Tiefen-) Verdichtung bzw. Vorkonsolidierung und Drains oder Schottersäulen. Eine Abdichtung (z. B. eine dichtende Trogsohle) wird vorzugsweise mittels einer Weichgelinjektion anstelle des Düsenstrahlverfahrens erzeugt. Im Verkehrswegebau sind lokal anstehende Böden oder lokal vorhandene Recyclingmaterialien der Planung zugrunde legen, um Transporte und Rohstoffgewinnung zu vermeiden.

Neben den oben beschriebenen reinen Ingenieur-Aufgaben kommt auf die begutachtenden und planenden Ingenieure ein gesteigerter Erklärungs- und *Beratungsaufwand* hinzu. Alle Beteiligten (Bauherrn, Ausführende, Planer, Genehmigungsbehörden, Nachbarn und weitere Dritte) müssen die vermeintlichen Nachteile (mehr Verformungen, geringere Reserven, mehr Aufwand in der Grundlagenermittlung) mit den übergeordneten Zielen der Vermeidung von herkömmlichem und gasförmigem Abfall (CO₂) und der Verringerung des GWP abwägen. Dazu bedarf es der kompetenten Beratung durch Geotechnik-Ingenieure.

3 Herausforderungen für ausführende Firmen

Die ausführenden Unternehmen im Bereich des (Spezial-)Tiefbaus und der Geotechnik stehen im Zusammenhang mit dem Thema Nachhaltigkeit aktuell vielfach in einer Zwickmühle. In dem Dreiklang, den das Thema Ressourcenschonung erfordert, „Vermeiden – Verringern – Verbessern“, scheinen sie in den meisten Projekten nach erfolgter Ausschreibung zunächst nur wenig Einfluss zu haben. Warum? (Geo-) Technik ist nicht alles!

Insbesondere Projekte im Bereich der (öffentlichen) Infrastruktur werden auch heute noch überwiegend im Status einer Genehmigungsplanung auf der Grundlage von Planfeststellungsverfahren ausgeschrieben. Wesentliche Grundlagen sowohl für das endgültige Bauwerk, z.T. aber auch für die Herstellungsphase des Bauwerkes, sind mit der Ausschreibung bereits festgelegt und damit vorgegeben, oftmals auch die Materialien. Im Bereich des Tiefbaus ist naturgemäß eines der wesentlichen Materialien der anstehende Boden mit z.T. über die gesamte Baumaßnahme hinweg nicht genau spezifizierbaren Eigenschaften und vielen Regelungen zu seiner Verwendung.

Erfreulicherweise werden die Projekte und damit die Ausschreibungen zunehmend mit dem allgemeinen Wunsch bzw. Forderung zu nachhaltigen Lösungen versehen. Damit stellen sich allerdings aktuell zum Zeitpunkt einer Ausschreibung für die Abgabe eines verbindlichen Angebotes aus Sicht der Ausführenden noch einige nicht allgemein geregelte Sachverhalte und Fragen unter dem Motto: Wie weit darf oder muss ich gehen?

- Was sind die Nachhaltigkeitsziele des Auftraggebers? Sind diese als grundlegende Guideline für das Projekt bekannt und kommuniziert?
- Ist der Bauherr an nachhaltigeren Lösungen interessiert, die ggf. in der Herstellung einen etwas höheren monetären Aufwand erfordern, er ggf. aber nur die Herstellung des Bauwerkes verantwortet. Der Betrieb und der (hoffentlich) späte Abriss und das Recycling der Baumaterialien des Bauwerkes wird von Dritten verantwortet werden, die dann ggf. den wirtschaftlichen Vorteil einer Lebenszyklusplanung ausnutzen können?
- Der Einsatz von Primärrohstoffen soll minimiert werden. Sekundärrohstoffe sollen hingegen vermehrt eingesetzt werden. Welche „nachhaltigen“ Materialien (z.B. mit einer geringeren CO₂-Bilanz) können als Ersatz für herkömmliche Materialien (die vielleicht in der Ausschreibung bereits spezifiziert wurden) eingesetzt werden? Um welchen Betrag dürfen sie ggf. teurer sein, sofern sie nachweisbar eine bessere CO₂-Bilanz

aufweisen? Gibt es verlässliche Bewertungssysteme hierfür, zumindest innerhalb eines Projektes?

- Dürfen Recyclingmaterialien aus dem stetig wachsenden „Urban Mining“ (der Wiederverwendung bereits verwendeter Materialien im Sinne einer Kreislaufwirtschaft/Cradle to Cradle) verwendet werden, auch wenn es an dieser Stelle ggf. noch keine entsprechenden Vorschriften und Normen gibt? Wer trägt aktuell das finanzielle und zeitliche Risiko von Zulassungen im Einzelfall und wie wird das im Rahmen einer Ausschreibung bewertet? Darf z.B. der Pflahlbeton mit Recyclingmaterialien hergestellt werden?
- Gibt es ein vereinbartes System in der Ausschreibung, mit dem die Erreichung der zu Projektbeginn vereinbarten Projektziele zur Nachhaltigkeit regelmäßig überprüft werden? Was passiert, wenn man diese aus nicht absehbaren Gründen nicht erreichen kann?
- Was sind die maßgeblichen Parameter, mit denen man das Thema Nachhaltigkeit im Rahmen der Ausschreibung bewertet?
- Nachhaltigkeit steht auf drei Säulen: Ökologie, Ökonomie und Soziales. Die drei Säulen stehen in Wechselwirkung zueinander. Derzeit wird die CO₂-Bilanz als Leitparameter herangezogen und damit die Ökologie. Wie damit umgehen, wenn Ökologie (z.B. CO₂) und Ökonomie (EURO) divergieren, Ökologie schlichtweg Geld kostet?
- Im Hochbau werden i. w. die permanenten Bauwerke bewertet. Wie bewertet man im Infrastrukturbereich die signifikant größeren temporären Baumaßnahmen oder die langen Transportwege z.B. Erdtransport bei einem Verkehrswegebau?
- Welches einheitliche und verbindliche daten- und faktenbasierte Bewertungssystem für die Ermittlung der maßgebenden Parameter und deren zu verwendende Zahlenwerte gibt es für den Infrastrukturbereich und damit auch für die Gewerke des Spezialtiefbaus? Oder welches soll in dem jeweiligen Fall angewendet werden? Ein allgemein gültiges System wie beispielsweise das der DGNB oder des BREAM für den Hochbau ist für den Infrastrukturbau in Deutschland noch nicht allgemein anerkannt verfügbar und muss projektbezogen vorgegeben werden.



- Was ist die Basis für einheitliche Zahlenwerte und Maßzahlen für die einzelnen Materialien und Verfahrensprozesse, damit man nicht Äpfel mit Birnen vergleicht? Welche Liste der sogenannten EPDs (Environmental Product Declaration) soll verwendet werden?
- In welcher Form, in welchem Bewertungssystem und mit welcher Tiefenschärfe wird die Nachhaltigkeit der Lieferketten berücksichtigt?
- Das Thema „Nachhaltigkeit“ als Synonym für eine Vorgehensweise, Beeinträchtigungen der Umwelt möglichst zu minimieren, lässt sich mit dem größten Hebel in der Phase der Grundlagenfestlegung und Planung des Bauwerkes steuern, also wenn man den gesamten Lebenszyklus des Bauwerkes betrachtet bzw. am einfachsten betrachten kann. Wie weit darf bzw. kann man zum Zeitpunkt der Ausschreibung noch Einfluss nehmen? Wenn eine Baugrube im Grundwasser z. B. mit einer Schlitzwand mit Injektionssohle ausgeschrieben ist. Kann und muss man nicht spätestens als Ausführender darüber nachdenken, diese mittels einer Grundwasserhaltung auszuführen und damit erhebliche Beeinträchtigungen im Bereich der andernfalls dauerhaft beeinflussten Grundwasserwegsamkeiten durch die tiefreichenden wasserdichten Verbauwände zu vermeiden? Ganze U-Bahnen wurden z. B. in Berlin und Stuttgart in der Vergangenheit so hergestellt. Darf man dies vorschlagen und gemeinsam mit dem Bauherrn und den zuständigen Behörden in Kauf nehmen, planmäßig für einen Teil des eingesparten Geldes Rückstellungen für ggf. erforderliche Sanierungen in Nachbargebäuden zu berücksichtigen (Ökonomie und Soziales/ Nachbarn), dafür aber die dauerhafte Beeinflussung des Grundwasserstromes zu minimieren (Ökologie)? Wieviel wäre eine solche Lösung wert und welche rechtlichen Vorgaben müssten ggf. neu bewertet werden?
- Wenn bereits vorhandene Bauteile wiederverwendet werden können (z. B. vorhandene Pfahlwände als Verbau oder vorhandene Gründungselemente), wer trägt zum Zeitpunkt einer Ausschreibung, soweit zu diesem Zeitpunkt noch nicht geklärt, das Risiko der zulässigen Wiederverwendung?
- Auch der ausgehobene und bewegte Erdstoff oder Fels ist ein Recyclingmaterial, welches optimal im Sinne einer Gesamtumweltbilanz verwendet werden muss. Darf dieser z. B. mit einer geringen natürlichen Belastung somit im Rahmen einer Neubewertung trotzdem wieder an Ort und Stelle eingebaut werden und muss nicht klimaschädlich weite Strecken zu einer Deponie abtransportiert werden? Ggf. entgegen oder in Ergänzung bisheriger Regelungen? Ist hier nicht eine gesellschaftliche Neubewertung auch im Rahmen von Normen und Richtlinien erforderlich? Wie geht man aber damit in einer Ausschreibung um?

Diese beispielhaften Fragen und Anmerkungen zeigen, dass die Beschäftigung mit dem Thema Nachhaltigkeit jenseits der technischen Lösungen anderer/neuer Materialien zahlreiche neue Gesichtspunkte im Rahmen einer bisher klassischen Ausschreibung aufwirft. Nicht alle sind durch die neu hinzukommenden vielfältigen und unterschiedlichen Interessen in den bisherigen formalen Verfahrensabläufen ohne Weiteres zu berücksichtigen. Aber auf alle müssen wir gemeinsam eine Antwort und eine gemeinsame Vorgehensweise finden und vereinbaren.

Aus diesem Grund muss jenseits aller technischen Fragestellungen vor allem für große Infrastrukturprojekte auch diskutiert werden, ob die derzeit verwendeten klassischen Vertragsmodelle insbesondere im durch öffentliche Auftraggeber dominierten Infrastrukturbereich im Hinblick auf die sich ausweitende Verantwortung aller am Bau Beteiligten für das Thema Klimaschutz und Nachhaltigkeit noch adäquat sind. Mindestens müssen alle Beteiligten sich der Aufgabe der Weiterentwicklung sowohl klimaschonender Materialien und Bauweisen aber auch der formalen vertraglichen Aspekte widmen.

Wäre es nicht überlegenswert, Vertragsmodelle wie beispielsweise das Early Contractor Involvement (ECI) zu verwenden? Hier werden der Planer und die ausführende Firma in einer sehr frühen Phase bereits gemeinsam mit dem Bauherrn in den Ent-

wurf und die Planung eingebunden. Dieses ermöglicht allen Beteiligten bereits frühzeitig im Entwurf einen gemeinsamen Beitrag zum Value Engineering zu leisten, und erleichtert die Berücksichtigung zahlreicher der o. a. Fragestellungen.

4 Forschung für mehr Nachhaltigkeit in der Geotechnik

4.1 Motivation

Um die notwendigen Entwicklungen hin zu grundlegend ressourcenschonenderen Bauweisen anzustoßen und die damit einhergehenden Herausforderungen zu bewältigen, bedarf es einer gewaltigen Intensivierung der Forschung in der Geotechnik. Dabei besteht die Dringlichkeit, schnell praxistaugliche Lösungen für ein klima- und ressourcenschonendes Bauen mit und in Boden und Fels zu entwickeln und die Forschungsergebnisse zügig in die Praxis zu überführen (Heinzelmann 2022).

Die aktuellen Forschungsaktivitäten, über die nachfolgend ein Überblick gegeben werden soll, lassen sich grob gliedern in Forschung

- zu optimierten Erkundungs- und Bemessungsansätzen sowie Nachweiskonzepten,
- zu neuen Materialien und Bauweisen,
- zu Optimierungen durch Digitalisierung, Automatisierung und Monitoring sowie
- zu regenerativen Energiekonzepten.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden hierfür nachfolgend Ansätze und Beispiele genannt.

4.2 Optimierte Erkundungs- und Bemessungsansätze

Die Geotechnik leistet einen wesentlichen Beitrag zum Infrastrukturbau. Schienenverkehrswege, der Verkehrswasserbau sowie ober- und unterirdische Strukturen des öffentlichen Personennahverkehrs in unseren Städten sind einerseits ressourcenintensive Maßnahmen, die aber andererseits zugleich mit ihrer langen Lebensdauer und ihrer hohen Leistungsfähigkeit überhaupt erst die Voraussetzungen

für ein nachhaltiges Mobilitätsverhalten der Bürger schaffen. So zeigen Studien, dass 80 % der CO₂-Emissionen in der Bauphase von Tunneln auf die Baustoffe Zement und Stahl zurückzuführen sind (Sauer 2016). Leucker & Schmitz (2021) weisen zutreffend darauf hin, dass Klimabilanzen die Klimawirkungen des Infrastruktur- bzw. Verkehrswegebbaus und des Mobilitätsverhaltens immer ganzheitlich berücksichtigen müssen, wofür es neuer Bewertungsansätze bedarf, die auch den Lebenszyklus und die Wertschöpfung solcher Bauwerke für eine nachhaltige Mobilität einbeziehen müssen.

Am Beispiel des Tunnelbaus zeigen Wittke et al. (2022) die Bedeutung und das Potential optimierter Bemessungsansätze, mit denen der Baugrund und die Baugrund-Tragwerk-Interaktion wirklichkeitsnah simuliert werden, für Einsparungen beim Zement- und Stahlbedarf und damit für den CO₂-Fußabdruck auf, indem die Querschnittsform eines Tunnels so optimiert wird, dass Biege- und Querkraftbeanspruchungen vermieden und so Sicherungen und Betonquerschnitte reduziert werden können, oder aber indem anstelle von Teilausbrüchen ein Vollausbruch realisiert werden kann.

In diesem Kontext gilt es auch, die etablierten Bemessungskonzepte zu hinterfragen, die durch die pauschale Anwendung von Teilsicherheiten, häufig noch ergänzt durch additive Modell- und Streuungsfaktoren etc. zu baulichen Lösungen führen, die zwar robust, gegebenenfalls aber auch konservativ und hinsichtlich des Ressourceneinsatzes nicht optimiert sind. Stochastische Bemessungsansätze, die u. a. bei Offshore-Strukturen (u. a. Arnold et al. 2022), aber auch im Hochwasserschutz (u. a. Hicks et al. 2019, Kool et al. 2020) bereits seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt werden, um projektspezifisch Versagenswahrscheinlichkeiten unter Berücksichtigung der vorhandenen Baugrundvariabilität in Verknüpfung mit numerischen Modellen zur wirklichkeitsnahen Abbildung der Baugrund-Tragwerk-Interaktion zu ermitteln, zeigen das Potential solcher nicht-deterministischer Ansätze auf (u. a. Huber et al. 2011, Moormann et al. 2012), die sich auch dazu eignen, die mit der Wahl des



Berechnungsmodells verbundenen Unsicherheiten zu beurteilen (u. a. Lesny 2017).

Nicht nur in diesem Zusammenhang ist auf die Bedeutung optimierter Konzepte für die Baugrunderkundung zu verweisen. Erst eine ausreichende qualifizierte Baugrunderkundung liefert die Grundlage für eine zuverlässige Beurteilung der Baugrundsituation und ihrer Unschärfen und damit die Basis für einen technisch zutreffenden, verlässlichen und zugleich optimierten Entwurf. Es ist im Sinne der Nachhaltigkeit kontraproduktiv, wenn Defizite in der Baugrunderkundung und hieraus resultierende Unsicherheiten durch „auf der sicheren Seite liegende“ bauliche Entwürfe kompensiert werden. Auch hier ist weitere Forschung zur Identifikation optimierter Erkundungsstrategien erforderlich.

Forschungsarbeiten zur Anwendung numerischer Optimierungsverfahren auf geotechnische Fragestellungen (u. a. Kinzler 2011, Pucker & Grabe 2011) zeigen, dass mit solchen Werkzeugen ein wesentlicher systemischer Beitrag geleistet werden kann, um auch bei hochdimensionalen Aufgaben, die eine intuitive Herangehensweise nicht als zielführend erscheinen lassen, die ressourceneffizienteste und zugleich ökonomische geotechnische Struktur für ein vorgegebenes Sicherheitsniveau zu identifizieren, bei denen die Abmessungen, der Materialverbrauch und die Materialanforderungen im Sinne einer Reduktion der „Verschwendung“ optimiert sind.

4.3 Neue Materialien und Bauweisen

Die Kernthemen für mehr Nachhaltigkeit in der Geotechnik und damit auch für die Forschung auf der Material- und Werkstoffebene lassen sich auf dem Weg zur „klimaneutralen Tiefbau-Baustelle“ daher wie folgt definieren:

- Optimierung von Stoffkreisläufen entsprechend des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrWG 2020) im Sinne der dreistufigen Hierarchie, wonach Bauabfälle grundsätzlich zu vermeiden sind und dort, wo dies nicht möglich, Baustoffe wiederzuverwerten sind, bevor sie –

als letzte Möglichkeit – entsorgt werden.

- Reduktion des Materialverbrauchs durch optimiertes Design (siehe 4.2).
- Reduktion des Verbrauchs bzw. Ersatz zementhaltiger Werkstoffe; in diesem Kontext auch Entwicklung innovativer, gegebenenfalls auch biobasierter bzw. – bei temporärer Funktion – auch natürlich abbaubarer Werkstoffe.
- Verwendung von Zementen und Betonen aus karbonisierten Prozessen.

Recyclingbaustoffe kommen im Erd- und Grundbau vor allem im Rahmen von Bodenverbesserungen, bspw. als Rüttelstopfsäulen oder Flüssigböden und als Dammschüttmaterial zum Einsatz (u. a. Huber & Heyer 2018). Hier besteht weiterer Forschungsbedarf zur Untersuchung des Materialverhaltens und der dauerhaften umwelttechnischen Bewertung solcher Mischstoffe. Durch den Ersatz von Betonpfählen durch Rüttelstopfsäulen kann beispielweise in erheblichem Maße CO₂ eingespart, das Bohrgut reduziert und Recyclingmaterial eingesetzt werden. Zudem lassen sich die eingesetzten Materialien bei späterem Abriss freilegen und wiederverwenden (Keller Grundbau 2020).

Neben dem Einsatz von Recyclingbaustoffen bei der Bodenverbesserung wird u. a. auch die Implementierung wasserlöslicher Polymere in den Boden erforscht. Durch die Modifikation der mechanischen und hydro-mechanischen Eigenschaften von Böden mit wasserlöslichen Polymeren kann die Erosionsstabilität von Böschungen sowie die Abbaubarkeit bindiger Böden im maschinellen Tunnelbau verbessert werden (u. a. DeJong et al. 2022). Des Weiteren wird die Polymermodifizierung von Bentonitsuspensionen zur Flüssigkeitsstützung mit dem Ziel untersucht, eine umweltverträgliche Bauweise zu generieren und damit den CO₂-Fußabdruck zu verringern. (u. a. Lieske et al. 2021).

Auch Weichgele auf Silikatbasis, welche unbedenklich für den Boden sind, weniger Abfall erzeugen und eine geringere CO₂-Bilanz haben, können als Ersatz für Zement-Bentonit bei Injektionsprojekten eingesetzt werden.

Eine zentrale Aufgabe ist die Entwicklung von hinsichtlich des CO₂-Footprints optimierten Betonen und deren Adaption für den Einsatz im Tiefbau. Dazu gehören zum einen Faserbetone – insbesondere auch Carbonbetone, Ökobetone, sowie Biozemente/Biobetone, die durch Bakteriensporen eine selbstheilende Wirkung besitzen (u.a. Royné, A. et al. (2019)). Der Ersatz von Stahlbeton im Tiefbau durch nachhaltigere, langlebigere Baustoffe generiert ein enormes Einsparpotential hinsichtlich Energie und Ressourcen. Beim Einsatz von Carbonfasern in Verbindung mit Hochleistungsbeton kann beispielsweise bis zu 80 % des Materials und der Energie bei der Herstellung eingespart sowie bis zu 50 % des CO₂-Ausstoßes reduziert werden. Carbonbeton ist zudem langlebiger, da er zum einen eine höhere Tragfähigkeit und zum anderen eine geringere Korrosionsanfälligkeit als Stahlbeton aufweist. Anwendung findet Carbonbeton/Faserbeton in der Geotechnik in Tunneln (Spritzbetonschale oder Sanierung) sowie bei Gründungspfählen schon jetzt (u.a. Pons, O. et al. 2021, Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e.V. 2019). Das erste Gebäude aus Carbonbeton ist das Leuchtturmprojekt von C³ (Carbon Concrete Composite). Alle Tief- sowie Hochbauarbeiten wurden mit Carbonbeton realisiert (Kupke 2022). Um Ressourcen weiter einzusparen, wird zum einen daran geforscht, Carbonfasern aus Lignin zu gewinnen, einem nachwachsenden Rohstoff aus Holz und zum anderen an der Rezyklierbarkeit.

Auch zementreduzierter Beton, 'Ökobeton' genannt, der einen verringerten Anteil an Portlandzementklinker aufweist und damit gegenüber herkömmlich eingesetzten Betonen ein um ca. 30 % bis 70 % verringertes Treibhauspotenzial besitzt, wurde bereits vereinzelt erfolgreich im Spezialtiefbau, z.B. für Schlitzwände (Franki 2014) und im Tunnelbau (Proske et al. 2013) verwendet. Einen Schritt weiter in der Entwicklung eines Ökobetons geht die Erforschung eines Kalziumkarbonatbetons, welcher aus Altbeton und CO₂ aus der Atmosphäre hergestellt wird (Maruyama et al. 2021).

Durch die Reduzierung des Wassergehalts, die Umstellung auf ein Hochleistungsfließmittel und eine deutliche Erhöhung des Gehalts an umweltfreundlichen inerten und reaktiven Feinstoffen wie beispielsweise Flugasche und Hüttensand kann eine Zementreduzierung bei Beibehaltung der geforderten Eigenschaften erreicht werden (Proske et al. 2012). Für eine weite Anwendung im (Spezial-)Tiefbau ist aber weitere Forschung notwendig.

Ein weiterer sehr ressourceneffizienter Trend ist der Einsatz von Mixed-in-Place-Verfahren oder ähnlicher Konzepte, bei denen der anstehende Boden als Zuschlag verwendet und anstelle von Betonen zementbasierte Granulate oder Suspensionen zum Einsatz kommen. Neben dem Materialverbrauch werden bei solchen Verfahren auch die Transporte signifikant reduziert, denn der Boden verbleibt an Ort und Stelle, wodurch Ressourcen geschont und unnötige Transporte vermieden werden (u.a. Wenzel & Klima 2014). Auch in diesem Kontext besteht weiteres Entwicklungspotential u.a. bezüglich der verwendeten Bindemittel. So wird in dem Projekt Sandbukta-Moss-Sastad (SMS), das zum derzeit größten Verkehrsprojekt in Norwegen gehört, für das DSM-Verfahren ein Bindemittel eingesetzt, welches auf Portlandzement und Zementofenstaub (CKD) basiert. Der Einsatz dieses Bindemittels generiert gegenüber dem Bindemittel auf Basis von Standardzement einen um bis zu 40 % reduzierten CO₂-Fußabdruck, wobei es eine vergleichbare Festigkeit aufweist (Besler et al. 2022).]

Auch durch den Einsatz von Geokunststoffen anstelle beispielsweise einer Bodenstabilisierung mit Feinbindemittel kann eine deutliche Einsparung von Treibhausgasen bewirkt werden, wobei hinsichtlich der Recyclierbarkeit von kohlenstoffbasierten Geokunststoffen ebenso wie hinsichtlich der Entwicklung von biologisch abbaubaren Geobaustoffen noch Forschungsbedarf besteht (u.a. Hoyme 2021).

Die wirkungsvollste Reduktion des Materialverbrauchs wird erzielt, wenn bestehende Gründungsstrukturen und Basements wiederverwendet



werden. Dabei ist es eine Herausforderung, die Eignung der Bestandsstrukturen im Bezug auf Integrität und Tragfähigkeit zu definieren. Das Fehlen von Informationen über das bestehende Fundament (ursprüngliche Bodenuntersuchungen, Entwurfsberechnungen, Pfahlabmessungen und Installationsprotokolle) erschwert häufig die Beurteilung, ob die Gründungselemente wiederverwertet werden können (u.a. Keltbray et al. 2022, Offenberg et al. 2022). Auch hier sind neue Konzepte und eine durchgehende Digitalisierung erforderlich.

4.4 Optimierung durch Digitalisierung, Automatisierung und Monitoring

Für eine nachhaltige Entwicklung sind im klassischen Erd- und Grundbau sowie im Spezialtiefbau gewaltige Anstrengungen erforderlich, um durch die Wahl bzw. Entwicklung von weniger energieintensiven Prozessen, Bauverfahren und Baumaschinen die heute anfallenden CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Dabei wird eine konsequente Digitalisierung aller Prozesse und Stoffströme eine erhebliche Rolle für ökonomische und ökologische Optimierungen spielen. Die Entwicklung wird auch durch den zunehmenden Fachkräftemangel gefördert. Die im Vergleich zu anderen Branchen relativ geringe Wertschöpfung und der gleichermaßen geringe Digitalisierungsgrad im Erd- und Grundbau indiziert, dass u.a. durch die konsequente Digitalisierung von Herstellungsvorgängen ein großes Potential für eine Optimierung von Herstellungsabläufen, für einen effizienteren Materialverbrauch und Maschineneinsatz und damit in der Summe für nachhaltigere Prozesse auf der Baustelle bestehen (Peter & Oppe 2017). Dabei stellen digitale Informations- und Kommunikationstechnologien – auch in Verbindung mit BIM – die systemische Grundlage zur Effizienzsteigerung und Fehlerminimierung dar, da technische Daten während der Herstellungsphase (z.B. Produktionsparameter einer Pfahlbohranlage) über das gesamte Projekt hinweg in Echtzeit aufgenommen und bewertet sowie in Modelle übertragen werden können. Herausfordernd bleibt in diesem

Kontext insbesondere die Analyse, z.B. die Korrelation von Herstellparametern mit geotechnischen Verhältnissen (u.a. Liu & Lacasse 2022).

Ein weiterer Trend ist die Automatisierung der Herstellprozesse, durch die sich das Bild auf Baustellen und die Interaktion zwischen Mensch und Maschine auch bei Tiefbauprojekten sukzessive verändern wird. Die diesbezüglich relevanten Forschungsdisziplinen liegen überwiegend außerhalb des Bauingenieurwesens im Bereich des Maschinenbaus, der Informatik und der Künstlichen Intelligenz. Inwieweit auch im Grund- und Spezialtiefbau am Ende der Entwicklung die autonome mobile Baumaschine in einem voll automatisierten Prozess stehen wird, wird die Zukunft weisen.

Letztlich kann durch das Monitoring geotechnischer Strukturen sowohl das Verständnis über das Tragverhalten deutlich verbessert und damit die Grundlage für nachhaltigere Bemessungen geschaffen werden. Dies ist in der Geotechnik im Sinne der Beobachtungsmethode seit Jahrzehnten erprobte Praxis (u.a. Peck 1969) und etabliert sich im Hochbau – beispielsweise beim Monitoring von Brücken – sich zur Verlängerung der Lebensdauer zunehmend., In Verbindung mit einer Echtzeitauswertung kann die Voraussetzung für ein interaktives geotechnisches Design geschaffen werden, bei dem eine Real Time Back Analysis die Voraussetzungen für eine ausführungsbegleitende Optimierung des Entwurfs schafft (u.a. Cañavate-Grimal et al. 2022).

4.5 Regenerative Energiekonzepte

Die Geotechnik kann einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende leisten. Dies gilt einerseits bei dem Ausbau der Windenergie, bei der seit vielen Jahren Forschungsarbeiten zur Optimierung der Bemessung von Gründungen und deren optimierter Einbringung z.B. im Vibrationsverfahren laufen. Dies gilt aber auch für das Feld der Geothermie, wo noch immer ein relevantes Potential für die Aktivierung per se vorhandener Bauteile wie Bodenplatten, Pfählen (Ma 2013) Tunneln (Schneider 2013, Buhmann 2019), Kanälen (Moormann et al. 2022),

Uferwänden (Koppmann et al. 2022) oder auch Mixed-in-Place-Wänden (Jäger et al. 2022) besteht.

Dabei wird es in Zukunft verstärkt darauf ankommen, solche Lösungen in Kombination mit anderen regenerativen Energiequellen in quartiersbezogene Gesamtkonzepte zu integrieren (u.a. Kugler et al. 2022), da nur durch einen Energieausgleich auf Quartiersebene und im Verbund unterschiedlicher regenerativer Energiequellen eine weitgehend autarke Energieversorgung im städtischen Kontext möglich wird.

4.6 Ausblick

Nie war es wichtiger als jetzt, Forschungsaktivitäten in der Geotechnik im Hinblick auf die sich aus dem Klimawandel ergebenden Anforderungen zu intensivieren, zu bündeln und gemeinsam zu handeln. Dies ist auch eine zentrale Aufgabe und eine gesellschaftliche Verpflichtung für die Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, die wie kaum ein anderer technisch-wissenschaftlicher Fachverband in Deutschland Forschungsinstitutionen, Bauindustrie, Consulting und Behörden vereint und damit die besten Voraussetzungen dafür mitbringt, dass Innovationen schnell ihren Weg von der Wissenschaft in die Bauindustrie und die Ingenieurpraxis finden. Dies ist von besonderer Bedeutung, da Schnelligkeit und Effektivität im Zeichen des rasanten Klimawandels zwingend sind. Dabei liegt in gemeinsamen Projekten von Bauindustrie und Wissenschaft ein besonderes Potential.

Mehr Forschung in der Geotechnik kann einen maßgebenden Beitrag leisten, die Auswirkungen des Klimawandels zu beherrschen und eine klimaneutrale Welt zu realisieren (Moormann, Ch. 2021).

Literaturverzeichnis

- Arnold, P., Kirsch, F., Kuske, S., Wilhelm, S. (2022): *Zur Anwendung probabilistischer Methoden am Beispiel der Planung von Pfahlgründungen*. Vorträge der Baugrundtagung 2022 in Wiesbaden, DGGT
- Besler, O. et al. (2022): *Alternative Binder for ground improvement to reduce CO₂*. Proc. International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement, Berlin 18th-20th May 2022
- Buhmann, P. (2019). *Energetisches Potential geschlossener Tunnelgeothermiesysteme*. Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart, Heft 73
- Cañavate-Grimal, A., Nicholson, D., Chen, Y. (2022): *A probabilistic analysis to assess the most probable design parameters for use in the observational method*. Proc. 20th ICSMGE, Sydney 2022, Rahman, M. & Jaksa, M. (eds.), Australian Geotechnical Society, 4525-4530
- DeJong, J.T et al. (2022): *State of the Art: MICP soil improvement and its application to liquefaction hazard mitigation*. Proc. 20th ICSMGE, Sydney 2022, Rahman, M. & Jaksa, M. (eds.), State of the Art and Invited Lectures, Australian Geotechnical Society, 534-558
- Deloitte und BDI (2021), *Zirkuläre Wirtschaft – Herausforderungen und Chancen für den Industriestandort Deutschland*
- Franki Report Grundbau (2014): *Baugruben & Pfahlgründungen: Neubau* Forschungsinstitut Humboldt Universität Berlin, https://stumpftraki.de/fileadmin/s_franki/Medien/FRANKI_report_Nr5.pdf
- Jäger S., Abdel-Hamid, M., Beckhaus, K. (2022): *Die geothermisch aktivierte Bodenmischwand*. Vorträge der Baugrundtagung 2022 in Wiesbaden, DGGT
- Heinzelmann, Ch. (2022): *Die Bauforschung stärken*. Editorial in Bautechnik 99(5), 329



- Hicks, M.A., Varkey, D., Eijnden, A.P. van den, Gast, T. de, Vardon, P.J. (2019): *On characteristic values and the reliability-based assessment of dykes*. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 13(4), 313-319
- Hoyme, H. (2021) *Biologisch abbaubare Geokunststoffe – Mögliche Anwendungen und technische Hintergründe*. <https://dggt.de/images/PDF-Dokumente/kgeo04s.pdf>
- Huber, M., Vermeer, P.A., Moormann, Ch., Hicks, M.A. (2011): *Reliability based design in tunneling*. Proc. Europ. Safety and Reliability Conf. (ESREL), Troyes, France, Bérenguer, Ch. et al. (Ed.): CRC Press/Taylor & Francis, 308-314
- Huber, S.; Heyer, D. (2018): *Anwendungen von Recycling Baustoffen im Erdbau*. Zentrum Geotechnik, TU München
- Keller Grundbau (2020): *Verwendung von recycelten Einbaustoffen*. <https://www.kellergrundbau.de/verwendung-von-recycelten-einbaustoffen>
- Keltbray A. et al. (2022) *From linear to circular economy; Using hollow piles to reduce embodied carbon and promote pile reuse*. Proc. International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement, Berlin 18th-20th May 2022
- Kinzler, S. (2011): *Zur Parameteridentifikation, Entwurfs- und Strukturoptimierung in der Geotechnik mittels numerischer Verfahren*. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg, Heft 23
- KiWVG (2020): *Kreislaufwirtschaftsgesetz*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
- Kool, J.J., Kanning, W., Jommi, C., Jonkman, S. N. (2020): *A Bayesian hindcasting method of levee failures applied to the Breitenhagen slope failure*. Georisk. 15(4), 299-316.
- Koppmann, D., Ziegler, M., Aulbach, B., Semmling,, T. (2022): *Die thermische Aktivierung von Stahlspundwänden als Maßnahme zur CO₂-Einsparung – Ausgewählte Projekte zur regenerativen Klimatisierung von Gebäuden*. Vorträge der Baugrundtagung 2022 in Wiesbaden, DGGT
- Kugler, T., Schittenhelm, C., Volkmer, S., Ryba, M., Moormann, Ch., Kurth, D., Koenigsdorff, R., (2020): *Sustainable Heating and Cooling Management of Urban Quarters*. Sustainability 2022, 14, 4353.
- Kupke, M. (2022) CUBE Projektvorstellung. Beton- und Stahlbetonbau. <https://doi.org/10.1002/best.202200021>
- Lesny, K. (2017): *Evaluation and consideration of model uncertainties in reliability based design*. Joint TC205/TC304 Working Group on Discussion of statistical/reliability methods for Eurocodes, Phoon, K.K. & Simpson, B. (eds.), ISSMGE, Chapter 2.
- Leucker, R., Schmitz, M. (2021): *Klimaschutz im Verkehrswegebau – Gesamtoptimierung oder interessenorientierte Segmentierung?* STUVA-tagung 2021, Karlsruhe, Forschung + Praxis 56, STUVA e.V., 26-39
- Lieske, W. et al. (2021): *Potentiale wasserlöslicher Polymere bei der Modifikation von Bodeneigenschaften*. Fachsektionstage Geotechnik – 3. Bodenmechanik-Tagung „Mechanisches Verhalten bei der Bodenverbesserung“
- Liu, X., Lacasse, S. (2022): *Machine learning in geotechnical engineering: Opportunities and applications*. Proc. 20th ICSMGE, Sydney 2022, Rahman, M. & Jaksá, M. (eds.), State of the Art and Invited Lectures, Australian Geotechnical Society, 534-558
- Ma, X. (2013): *Nutzung der oberflächennahen Geothermie mittels Energiepfählen und Erdwärmesonden*. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg, Heft 25
- Maruyama, I. et al. (2021): *A new concept of calcium carbonate concrete using demolished concrete and CO₂*. Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 19

- Meyer, L. (2022): *Green means lean – der Weg zur „Klimaneutralen Betonbaustelle“*. Bautechnik 99(5), 409-417
- Moormann, Ch., Huber, M., Proske, D. (eds.) (2012) Proc. 10th International Probabilistic Workshop. Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart, Heft 67
- Moormann, Ch. (2021): *Geotechnik im Zeichen des Klimawandels*. Editorial in Geotechnik 44(3), 149-150
- Moormann, C.; Kugler, T.; Liaghi, M.; (2022): *Integrative consideration of sustainable heat management of urban quarters by thermal activation of infrastructure systems of residential water management*. Proc. 20th ICSMGE, Sydney 2022, Rahman, M. & Jaksá, M. (eds.), Australian Geotechnical Society, 4953-4958
- Offenberg R. et al. (2022): *Re-use of old pile foundations in Amsterdam*. Proc. International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement, Berlin 18th-20th May 2022
- Peck, R. B. (1969). *Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics*. Géotechnique, 19(2), 171-187
- Peter, B.; Oppe, M. (2017) *Die Digitalisierung im Bauwesen ist eine Chance*. In: Stahlbau 86 (3), 202-207
- Pons, O. et al (2021): *Sustainability-Driven Decision-Making Model: Case Study of Fiber-Reinforced Concrete Foundation Piles*. Journal of Construction Engineering and Management Vol. 147, No. 10
- Proske, T et al. (2012) *Stahlbetonbauteile aus klima- und ressourcenschonendem Ökobeton – Technische Innovation zur Realisierung nachhaltiger Betonbauwerke*. Beton- und Stahlbetonbau 107, Heft 6
- Proske, T et al. (2013): *Eco-Friendly Concrets with Reduced Water and Cement Contents – Mix Design Principles and Laboratory Tests*. Cement and Concrete Research Nr. 51
- Pucker, T., Grabe J. (2011): *Structural optimization in geotechnical engineering: Basics and application*. Acta Geotechnica 6(1):41-49
- Royne, A. et al. (2019): *Towards a low CO₂ emission building material employing bacterial metabolism: The bacterial system and prototype production*. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0212990>
- Sauer, J. (2016): *Ökologische Betrachtungen zur Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken der Verkehrsinfrastruktur*. Dissertation am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München
- Schneider, M (2013). *Zur energetischen Nutzung von Tunnelbauwerken – Messungen und numerische Berechnungen am Beispiel Fasanenhofunnel*. Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart, Heft 68
- Wenzel, P; Klima, S (2014): *Mixed-in-Place-Wände als integraler Bestandteil von Hochwasserschutzmaßnahmen*. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-658-03740-6_55.pdf
- Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e.V. (2019): *Beton mit Flugasche – nicht nur überirdisch gut*. https://www.win-ev.org/fileadmin/win-ev.org/Anwendungen/Anwendungsbericht_Flugasche_im_Tunnelbau_2019-10.pdf
- Wittke, W., Wittke-Schmitt, B., Wittke, M., Wittke-Gattermann, P., Druffel, R. (2022): *Saving Energy and Resources and Reducing the Carbon Footprint in Tunnel Construction*. Tunnel 3/2022, 10-27