

# **Materialeinsparung bei Bohrpfählen – Ein Beitrag zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bauwesen**

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 21/2026

Wien, 2026

## Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Isabella Warisch

Kontakt zur Mission „Klimaneutrale Stadt“: DI<sup>in</sup> (FH) Katrin Bolovich

Kontakt zu „Technologien und Innovationen für die klimaneutrale Stadt“: DI<sup>in</sup> (FH) Isabella Warisch

Autorinnen und Autoren:

Dipl.-Ing. Philip Tarek Wehbe, BSc BSc, FH-Prof. Dr.-Ing. Gert Eilbracht (FH Kärnten)

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Andreas Trummer, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Peters  
(TU Graz)

Graz, Wien, 2026. Stand: Februar 2026

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an [iii3@bmimi.gv.at](mailto:iii3@bmimi.gv.at).

## **Rechtlicher Hinweis**

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

## Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem FTI-Schwerpunkt „Klimaneutrale Stadt“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) und Klima- und Energiefonds (KLIEN). Im Rahmen dieses Schwerpunkts werden Forschung, Entwicklung und Demonstration von Technologien und Innovationen gefördert, mit dem Ziel, einen essentiellen Beitrag zur Erreichung der Klimaneutralität in Gebäuden, Quartieren und Städten zu liefern. Gleichzeitig wird dazu beigetragen, die Lebens- und Aufenthaltsqualität sowie die wirtschaftliche Standortattraktivität in Österreich zu erhöhen. Hierfür sind die Forschungsprojekte angehalten, einen gesamtheitlichen Ansatz zu verfolgen und im Sinne einer integrierten Planung – wie auch der Berücksichtigung aller relevanten Bereiche wie Energieerzeugung, -speicherung und -verteilung, Berücksichtigung von gebauter Infrastruktur, Mobilität und Digitalisierung – angewandte und bedarfsorientierte Fragestellungen zu adressieren.

Um die Wirkung des FTI-Schwerpunkts „Klimaneutrale Stadt“ zu erhöhen, ist die Verfügbarkeit und Verbreitung von Projektergebnissen ein elementarer Baustein. Durch Begleitmaßnahmen zu den Projekten – wie Kommunikation und Stakeholdermanagement – wird es ermöglicht, dass Projektergebnisse skaliert, multipliziert und „Von der Forschung in die Umsetzung“ begleitet werden. Daher werden alle Projekte nach dem Open Access Prinzip in der Schriftenreihe des BMIMI über die Plattform [nachhaltigwirtschaften.at](https://www.nachhaltigwirtschaften.at) frei zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.



# Inhalt

<b>Vorbemerkung .....</b>	<b>4</b>
<b>1 Kurzfassung .....</b>	<b>6</b>
<b>2 Abstract .....</b>	<b>8</b>
<b>3 Projektinhalt .....</b>	<b>10</b>
3.1 Ausgangslage und Zielsetzung .....	10
3.2 Methode und Vorgehensweise .....	16
3.2.1 Projektmanagement.....	16
3.2.2 Bohrpfähle: Modellierung und Simulation.....	16
3.2.3 Aussparungskörper: Modellierung und 3D-Druck.....	17
3.2.4 Laborversuche .....	17
3.2.5 Feldversuch .....	18
3.2.6 Reflexion und Optimierung .....	18
<b>4 Ergebnisse .....</b>	<b>20</b>
4.1 Ergebnisse aus Entwurf, Modellierung und 3D-Betondruck der Aussparungskörper .....	20
4.2 Laborergebnisse: Festigkeit und Auftriebssicherheit.....	23
4.3 Feldergebnisse: Herstellung, Befundung und Validierung.....	30
<b>5 Schlussfolgerungen.....</b>	<b>40</b>
<b>6 Ausblick und Empfehlungen .....</b>	<b>42</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>44</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>45</b>
<b>Abkürzungen .....</b>	<b>46</b>

# 1 Kurzfassung

Das Forschungsprojekt „MaBo – Materialeinsparung bei Bohrpfählen“ zeigt exemplarisch und praxisnah, wie durch den Einsatz 3D-gedruckter Aussparungskörper (Hohlkörper) in Bohrpfählen substanzielle Betonmengen eingespart und damit Ressourcenverbrauch sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen im Spezialtiefbau reduziert werden können. Die Neuerung besteht in der gezielten Optimierung des Pfahlquerschnitts und der Substitution gering ausgenutzter Bereiche, ohne das Lastabtragungsverhalten über Pfahlspitzendruck und Mantelreibung zu beeinträchtigen. Damit wird ein bislang wenig erschlossenes Anwendungsfeld adressiert, das unmittelbar auf klimafreundliches Bauen zielt, normkonform zu bestehenden Regelwerken bleibt und die Brücke zwischen Forschung und Baupraxis schlägt.

Zur Erarbeitung der Lösung wurden zunächst konventionelle Bohrpfähle modelliert und mittels Finite-Elemente-Methoden analysiert, um belastbare Kriterien zur Identifikation optimierbarer Querschnittssegmente abzuleiten. Auf dieser Grundlage entstanden praxistaugliche Hohlkörpergeometrien, deren Positionierung, Abmessungen und Übergangsbereiche so gewählt wurden, dass sie die für die Tragfähigkeit maßgebenden Beanspruchungen nicht negativ beeinflussen. Die Entwürfe wurden iterativ numerisch verifiziert und anschließend im Beton-3D-Druck als Prototypen hergestellt, wobei besondere Aufmerksamkeit auf Materialkennwerte, Fertigungstoleranzen und die Integrationsfähigkeit in Bewehrungskörbe gelegt wurde. Die Laborverifizierung umfasste Druck- und Biegezugversuche zur Festlegung der Widerstandskennwerte sowie Untersuchungen zur Reibung zwischen 3D-gedruckten Oberflächen und Frischbeton, um die Auftriebsicherheit während der Betonage belastbar zu quantifizieren. Diese Befunde ergänzen die klassische archimedische Betrachtung, indem sie zeigen, dass Reibungskräfte an den Kontaktflächen einen wesentlichen Gegenbeitrag zum Auftrieb leisten und daher methodisch zu berücksichtigen sind. Abschließend wurde der optimierte Bohrpfahl im Feld hergestellt. Die gesamte Prozesskette vom Entwurf über die Fertigung, den Einbau der Hohlkörper in den Bewehrungskorb bis zur Betonage und bauteilnahen Prüfung wurde dokumentiert, wodurch die praktische Umsetzbarkeit unter realen Randbedingungen nachgewiesen ist.

Die Ergebnisse belegen, dass Hohlkörper so positioniert und dimensioniert werden können, dass Tragsicherheit und Steifigkeit erhalten bleiben, während sich der Materialbedarf signifikant verringert. Die Herstellbarkeit wurde unter praxisrelevanten Bedingungen demonstriert, einschließlich der besonderen Anforderungen an Transportrobustheit, die Lagesicherung im Frischbeton und die Betonage bei eingeschränkter Einführung des Betonierrohres. Die Dichtheit und der Verbund der 3D-gedruckten Bauteile im Pfahlquerschnitt wurden feldseitig bestätigt. Für die Überführung in die Anwendung wurden die Erkenntnisse zu Entwurf, Fertigung und Nachweisführung strukturiert aufbereitet und von einem initiierten Bemessungsansatz flankiert, der auf den numerischen Berech-

nungen und den Bauteilversuchen basiert. Dieser Ansatz bildet den Ausgangspunkt für ein analytisches Bemessungskonzept und einen Konstruktionsleitfaden, mit dem Planerinnen und Planer die Technologie ohne ausschließliche Abhängigkeit von FEM-Software in der Praxis einsetzen können.

Für Anwenderinnen und Anwender ergeben sich technische und wirtschaftliche Vorteile: effizientere Konstruktionsverfahren bei gleichbleibender Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit, eine messbar verbesserte Nachhaltigkeitsbilanz sowie ein Wettbewerbsvorteil durch die Positionierung als Vorreiter im nachhaltigen Bauen. In der Perspektive zeigt sich, dass bei konsequenter Umsetzung erhebliche Einsparungen erschlossen werden können, mit jährlichen Potenzialen in der Größenordnung mehrerer Tausend Tonnen CO<sub>2</sub> und deutlichen Materialreduktionen. Die konsortiale Zusammenarbeit von Forschung und Industrie, die feldnahe Demonstration und die geplanten Verwertungsaktivitäten – von Publikationen über Leitfäden bis zu Schulungen – sichern Reichweite und Wirkung der Projektergebnisse in Wissenschaft und Praxis und erleichtern den Transfer in Lehre und Ausführung.

Im Ausblick stehen die Standardisierung und Skalierung der Methode im Vordergrund. Erforderlich sind eine erweiterte Datengrundlage, zusätzliche Labor- und Feldversuche zur Kalibrierung der Interaktionseffekte, die normative Einbettung der Nachweise und die Ausarbeitung eines konsistenten Konstruktions- und Bemessungsleitfadens mit Ausführungsregeln, Toleranzen und Prüfkriterien. Mit diesen Schritten kann die Technologie regelhaft in die Planungspraxis überführt, die Anwendungssicherheit weiter erhöht und der Nachhaltigkeitsbeitrag im Grundbau breit skaliert werden.

## 2 Abstract

The research project “MaBo – Material Savings in bored piles” demonstrates in an exemplary and practice-oriented manner how the use of 3D-printed recess formers (hollow bodies) in bored piles can save substantial amounts of concrete, thereby reducing resource consumption and CO<sub>2</sub> emissions in geotechnics. The innovation lies in targeted optimization of the pile cross-section and the substitution of low-utilized regions without impairing the load transfer behaviour via end bearing and shaft friction. This addresses a previously underexplored application field that directly aims at sustainable building, remains compliant with existing codes, and bridges research and construction practice.

To develop the solution, conventional bored piles were first modelled and analysed using finite element methods to derive robust criteria for identifying cross-section segments suitable for optimization. On this basis, practice-ready hollow-body geometries were created whose positioning, dimensions, and transition zones were chosen so that they do not negatively affect the actions governing loadbearing capacity. The designs were iteratively verified numerically and then manufactured as prototypes using concrete 3D printing, with particular attention to material properties, manufacturing tolerances, and integration in reinforcement cages. Laboratory verification included compression and tension tests to establish resistance parameters, as well as investigations into friction between 3D-printed surfaces and fresh concrete, to reliably quantify buoyancy safety during concreting. These findings supplement classical Archimedean considerations by showing that frictional forces at the contact surfaces make a significant counter-contribution to buoyancy and must therefore be considered methodologically. Finally, the optimized bored pile was produced in the field. The entire process chain—from design and manufacturing to installing the hollow bodies in the reinforcement cage, concreting, and near-component testing—was documented, proving practical feasibility under real boundary conditions.

The results show that hollow bodies can be positioned and dimensioned so that structural safety and stiffness are preserved while material demand is significantly reduced. Manufacturability was demonstrated under practice-relevant conditions, including the specific requirements of transport robustness, positional stability in fresh concrete, and concreting with restricted insertion of the concreting pipe. The tightness and bond of the 3D-printed components in the pile cross-section were confirmed in the field. For transfer to application, the findings on design, fabrication, and verification were structured and accompanied by an initiated design approach based on numerical calculations and component tests. This approach forms the starting point for an analytical design concept and a construction guideline enabling designers to apply the technology in practice without exclusive reliance on FEM software.

For users, technical and economic advantages arise: more efficient construction procedures with unchanged loadbearing capacity and serviceability, a measurably improved sustainability profile,

and a competitive edge by positioning as a pioneer in sustainable building. Looking ahead, consistent implementation can unlock considerable savings, with annual potentials on the order of several thousand tonnes of CO<sub>2</sub> and clear reductions in material consumption. The consortium-based cooperation between research and industry, field-near demonstration, and planned exploitation activities—from publications and guidelines to training—ensure reach and impact of the project results in science and practice and facilitate transfer into teaching and execution.

The outlook focuses on standardization and scaling of the method. Required steps include an expanded data basis, additional laboratory and field tests to calibrate interaction effects, normative embedding of verifications, and the development of a consistent construction and design guideline with execution rules, tolerances, and test criteria. With these steps, the technology can be routinely incorporated into planning practice, increase application safety, and broadly scale the sustainability contribution in geotechnics.

# 3 Projektinhalt

## 3.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Der Bausektor ist für rund 40% der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Über ein Viertel dieser Emissionen werden direkt durch die Bauindustrie verursacht. [1]

Weltweit wächst das Bewusstsein im Umweltschutz, was auch in der Baubranche spürbar ist. Alternative Bauweisen, regenerative Baustoffe und energieeffiziente Gebäude sind die ersten Antworten auf die Forderungen des nachhaltigen Bauens. Fakt ist auch, dass Bestandteile von Bauwerken – die Gründungen – nach den gültigen Regeln der Technik, aus Stahlbeton hergestellt werden. Vor allem bei Tiefengründungen, aber auch bei Baugrubensicherungen, kommen regelmäßig Bohrpfähle zum Einsatz. Alleine in Österreich werden jährlich zirka 80.000 bis 90.000 Laufmeter Bohrpfähle mit Durchmessern zwischen 90 und 120 cm hergestellt, wodurch ein durchschnittlicher Materialbedarf von rund 24.000 Kubikmetern Beton pro Jahr entsteht. Etwa die Hälfte dieser Bohrpfähle sind nach Schätzungen der Industrie zur Optimierung hinsichtlich des Betonverbrauches geeignet.

Die Motivation zur Durchführung des Projektes „MaBo – Materialeinsparung bei Bohrpfählen – Ein Beitrag zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bauwesen“, gründet sich auf der Dringlichkeit, nachhaltige Innovationen in der Herstellung von Bohrpfählen zu entwickeln, um das bestehende Potenzial der Ressourceneffizienz und den steigenden Anforderungen am Umweltschutz gerecht zu werden.

Die Entwicklung eines, sofort in der Praxis anwendbaren Konzeptes, zur Schonung der Ressourcen sowie der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen, ist Ziel des Forschungsprojektes. Solch ein Konzept stellt eine der innovativen, technologischen Lösung dar, Gebäude und Ingenieurbauwerke klimaneutraler errichten zu können. Denn ein geringerer Materialbedarf bei Bohrpfählen hat nicht nur eine positive Klimawirkung und Dekarbonisierung zur Folge, sondern eine effiziente Nutzung von Ressourcen führt ebenso zu einer effizienten Nutzung der benötigten Energien in der Herstellung von Beton.

Der Mehrwert, welcher durch das Forschungsprojekt „MaBo“ entsteht, beschränkt sich in technischer Hinsicht nicht auf die Projektpartner:innen, sondern resultiert für sämtliche Anwender:innen. Die Möglichkeit, durch innovative Konstruktionslösungen ressourcenschonender zu bauen, wird Planer:innen mit den Forschungsergebnissen dargeboten. So sollen eine Wertschätzung der Rohstoffe und Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen großflächig ermöglicht werden, um auch global positive Auswirkungen durch klimafreundliche Bauweisen zu erreichen.

Wirtschaftliche Auswirkungen des Forschungsprojektes sind im Wettbewerbsvorteil erkennbar, welcher durch die Anwendung des Konzeptes zur Materialeinsparung resultieren. Einerseits werden die

Projektpartner:innen und Anwender:innen als Vorreiter in nachhaltigen Baupraktiken positioniert, was zunehmend an Bedeutung gewinnt und das Marktpotenzial erhöht. Außerdem entsteht durch eine markante Ressourceneffizienz und die dadurch eingesparte Menge CO<sub>2</sub> ein Wettbewerbsvorteil hinsichtlich gegebener, ökologisch nachhaltiger Bestbieterkriterien.

Die Förderung war entscheidend für die Projektdurchführung. Sie ermöglichte umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, einschließlich Labortests, Simulationen und Prototypenbau. Darüber hinaus unterstützte sie die Zusammenarbeit zwischen der TU Graz, FH Kärnten und Keller Grundbau Ges.mbH, indem sie die notwendige finanzielle Basis für gemeinsame Forschungsanstrengungen schaffte. Die Fördermittel trugen somit maßgeblich zur Umsetzung innovativer Lösungen für die Materialeinsparung bei Bohrpfählen bei und fördern die nachhaltige Entwicklung im Bauwesen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist eine ökologisch nachhaltige Optimierung der Gründungsbauteile Bohrpfähle. Dies soll mittels Materialeinsparung des Betons geschehen. Hierbei werden zunächst konventionelle Bohrpfähle modelliert. Diese werden anschließend in Abhängigkeit verschiedener Belastungssituationen wie zum Beispiel zentrischer Druck, unter Betrachtung variierender Bodenbeschaffenheiten, mittels Finite-Elemente-Modellierungen, numerisch analysiert. Anhand der Simulationsergebnisse können Querschnittsbereiche der Gründungsbauteile ermittelt werden, welche sich für eine Materialreduktion eignen. Hierbei sollen Hohlkörper im Bohrpfahl eingesetzt werden, welche die Lastabtragung über den Pfahlsplitzendruck sowie die Mantelreibung nicht beeinflussen. Im Fall der Biegebemessung muss außerdem auf ausreichende Steifigkeit des Pfahlquerschnittes im optimierten Bereich geachtet werden. Der querschnittsoptimierte Pfahl wird nach seiner Materialreduktion erneut numerisch analysiert, um die innere und äußere Tragsicherheit nachzuweisen.

Die Aussparungskörper stellen 3D-betongedruckte Hohlkörper dar. Somit kann in der Lebenszyklusphase des Abbruchs von einem Stahlbetonbauwerk, ohne Bestandteile aus Kunststoff, ausgegangen werden. Bei der Herstellung der Aussparungskörper ist besonders auf eine geeignete Geometrie zu achten. Diese sollen die inneren Kraftzustände des Bohrpfahles nicht, beziehungsweise nicht negativ, beeinflussen. Außerdem soll die Kubatur des Aussparungskörpers ein größtmögliches Volumen aufweisen, um die maximale Ressourceneffizienz zu gewährleisten. Dies geschieht unter Berücksichtigung der benötigten Querschnittsflächen zur Kraftweiterleitung, benötigter Betondeckungen und auch des baupraktischen Platzbedarfs zur Betoneinbringung in den Bohrpfahl. Das Einbringen des Betons in querschnittsoptimierte Bohrpfähle stellt eine Herausforderung im Bauablauf dar. Der Arbeitsablauf bei konventionell hergestellter Bohrpfähle mit verrohrter Bohrung ist wie folgt:

1. Niederbringen der Verrohrung mittels Verrohrungsanlage
2. Lösen des Bodens mittels Greif- oder Drehbohrer
3. Einbau des (vorgefertigten) Bewehrungskorbes
4. Betonvorgang unter gleichzeitigem Ziehen des Rohres
5. Aushärtung des Bohrpfahls

In Schritt 4 wird der Beton entweder in das Bohrloch eingeschüttet, oder über den Schlauch der Betonpumpe befüllt. Das Befüllen mittels Einpumpens ist vor allem bei tieferen Bohrpfählen zu bevorzugen, um eine Entmischung bei zu großer Aufprallkraft des Betons zu verhindern. Die Herausforderung bei querschnittsoptimierten Bohrpfählen ist jene, dass die Hohlkörper in dem vorgefertigten Bewehrungskorb fixiert werden sollen, um die Lage der Aussparungen zu sichern. Da der Pumpschlauch somit nicht zentrisch ins Bohrloch eingeführt werden kann, ist eine Alternative Art der Einbringung zu entwickeln. Einschütten des Frischbetons könnte eine Zerstörung der Aussparungskörper bewirken, wodurch diese Alternative ebenfalls zu untersuchen ist.

Die Entwürfe der materialreduzierten Bohrpfähle können wie beschrieben numerisch nachgewiesen werden. Ein wichtiger Teil dieses Forschungsprojektes widmet sich außerdem der Verifizierung der Bemessungsergebnisse durch Bauteilprüfungen. Hierfür sind zunächst Laborversuche der Aussparungskörper vorgesehen. Geprüft werden die Festigkeiten der Hohlkörper hinsichtlich ihrer Druckbeanspruchungen, sowie den Biegezugfestigkeiten. Außerdem werden die Hohlkörper auf ihre Dichtigkeit überprüft. Hier soll nachgewiesen werden, dass das Eindringen von Feuchtigkeit durch Witterung vor der Bohrpfahlherstellung, aber vor allem auch durch die Bindemittel-Wasser Suspension des Frischbetons der Bohrpfähle verhindert ist. Ein wesentlicher Laborversuch bezieht sich auf die Auftriebssicherheit von Hohlkörpern in Frischbeton. Hier werden Reibungskräfte zwischen 3D-gedruckten Betonbauteile sowie dem Frischbeton untersucht.

Im weiteren Verlauf findet ein Großversuch (Feldversuch) zur Demonstration des innovativen Konzeptes statt, welcher sowohl die baupraktische Herstellung eines optimierten Bohrpfahls belegen, als auch mittels Bauteilbelastungen die numerischen Ergebnisse des gesamten Bauteils verifizieren soll.

Nachdem über die Optimierung der Ressourceneffizienz, unter Berücksichtigung des 3D-gedruckten Aussparungskörpers, eine Aussage über die ökologische Nachhaltigkeit durch die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen getroffen werden kann (hierbei werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen konventioneller und optimierter Bohrpfähle gegenübergestellt), kann auch eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit getroffen werden. Diese wird von mehreren Faktoren beeinflusst wie der Kosteneinsparung durch geringere Betonmengen, jedoch auch den Mehrkosten der Aussparungskörper. CO<sub>2</sub>-Steuern, Wettbewerbsvorteile durch innovative, nachhaltige Bauweisen sowie durch ein positives Unternehmens-Image durch bessere ökologische Fußabdrücke von Bauprojekten, können die Wirtschaftlichkeit ebenfalls positiv beeinflussen.

Das Forschungsprojekt zur Steigerung der Nachhaltigkeit in der Baubranche zeigt außerdem positive Auswirkungen auf die Vielfalt und Geschlechterdiversität im Fachpersonal. Die gezielte Ausrichtung auf nachhaltiges und ressourcenschonendes Bauen macht das Projekt besonders attraktiv für junge Menschen, da diese Werte in der heutigen Zeit von hoher Bedeutung für die neuen Generationen sind. Durch die Anziehungskraft dieser innovativen Inhalte wird das Interesse an einer Karriere in der Baubranche geweckt, was zu einer Steigerung der Geschlechtervielfalt führt.

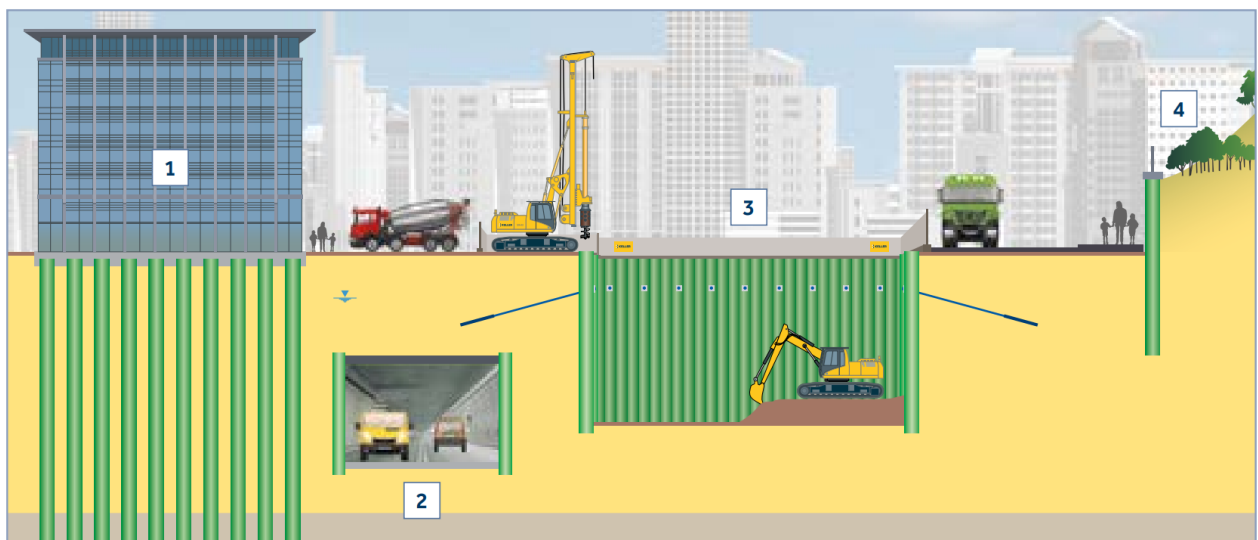
Die gezielte Ansprache junger Talente führt nicht nur zu einer vermehrten Beteiligung von Frauen und Männern, sondern trägt auch dazu bei, die Vielfalt in Bezug auf die Herkunft im zukünftigen Fachpersonal zu erhöhen. Die breite Anziehungskraft der nachhaltigen Bauinhalte ermöglicht eine vielfältigere Rekrutierung von talentierten Individuen verschiedener Hintergründe.

Insgesamt trägt das Projekt dazu bei, eine inklusivere und innovativere Arbeitsumgebung in der Baubranche zu schaffen, indem es auf die Werte und Interessen der neuen Generationen eingeht und dadurch die Diversität im Fachpersonal fördert.

### State-of-the-Art:

Die Herstellung von Bohrpfählen unterscheidet sich in ihrer Art in Abhängigkeit des Einsatzzweckes, sowie der der Bodenbeschaffenheiten. Zunächst ist zu verstehen, in welchen Situationen Bohrpfähle verwendet werden: [2]

Abbildung 1: Einsatz von Bohrpfählen [2] ©Keller Grundbau Ges.mbH

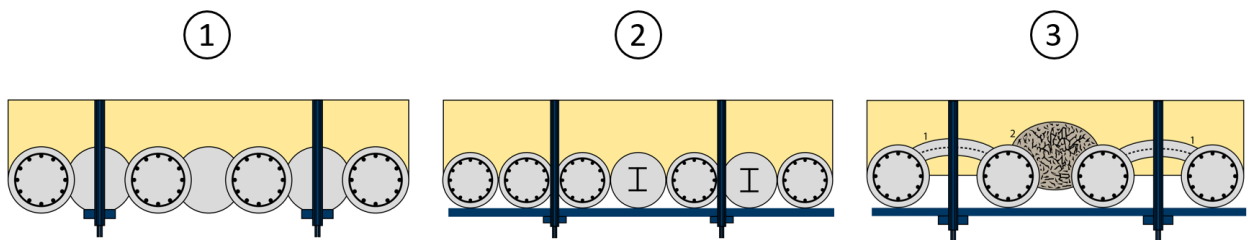


1. Bauwerksgründung / Fundamente:  
Bohrpfähle mit großem Durchmesser sind extrem tragfähig und können hohe Lasten äußerst effektiv abtragen. Dies erfolgt über den Sohldruck am Bohrpfehlfuß und/oder über die Mantelreibung.

2. Infrastruktur:  
Bohrpfähle können in verschiedensten Infrastrukturprojekten wie zum Beispiel im Tunnel-, Straßen- oder Brückenbau oder im Hochwasserschutz eingesetzt werden.
3. Baugruben:  
Bohrpfähle sind ein bewährtes Mittel zur Baugrubensicherung, auch direkt an angrenzenden Gebäuden. Zu diesem Zweck werden sie häufig mit weiteren Elementen wie vorgespannten Ankern, Bodennägeln, Soilcrete-Säulen und baugrubenseitigen Aussteifungen kombiniert.
4. Hang- und Böschungstabilisierung:  
Bohrpfähle mit großem Durchmesser werden eingesetzt, um das Abrutschen von Hängen und Böschungen zu verhindern oder bestehende Gebäude zu sichern.

Im Fall von Bohrpfahlwänden, wie in den oben genannten Situationen 2 bis 4 dargestellt, wird zwischen drei Arten unterschieden: [2]

Abbildung 2: Überschnittene, tangierende und aufgelöste Bohrpfahlwände [2] ©Keller Grundbau Ges.mbH



1. Überschnittene Bohrpfahlwände:
2. Tangierende Bohrpfahlwände
3. Aufgelöste Bohrpfahlwände

Zur Herstellung von Bohrpfählen kann im Wesentlichen zwischen folgenden Arten unterschieden werden:

1. Verrohrte Bohrung / verrohrter Aushub
2. Unverrohrte Bohrung mit Stützflüssigkeit
3. Schneckenbohren (Schneckenortbetonpfähle (SOB))

Zur Herstellung optimierter Bohrpfähle eignet sich die verrohrte Bohrung / der verrohrte Aushub, da in dieser Herstellungsart die Möglichkeit zur Einbringung der Hohlkörper besteht.

Bei Betrachtung der herkömmlich hergestellten Bohrpfähle stellt sich die Frage, ob das gesamte Volumen des zylindrischen Bohrpfahls ausbetoniert werden muss. Zur Beantwortung werden hierzu die zu führenden Nachweise von Pfahlgründungen analysiert. Es wird zunächst zwischen dem inneren und dem äußeren Tragverhalten unterschieden. [3]

Das innere Tragverhalten stellt die Anforderung, dass der Pfahl hergestellt, schadlos transportiert und eingebracht werden kann, sowie in der Lage ist die Lasten aus dem Bauwerk aufzunehmen. Einfluss auf das Tragverhalten haben dabei die Abmessungen und die Baustoffeigenschaften. Die Bemessung des Pfahls erfolgt dabei nach EN 1992-1 [4] für bewehrt oder unbewehrte Stahl- bzw. Spannbetonpfähle. Die für die Bemessung notwendigen Schnittgrößen sind laut EC7-1 [5] zu ermitteln.

Das äußere Tragverhalten beschreibt den Widerstand des Pfahls gegen das Versagen des Bodens in der direkten Pfahlumgebung. Dabei ist der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach EN 1997-1 zu führen. Beeinflusst wird der Widerstand von folgenden Faktoren:

Eigenschaften des Bodens in direkter Umgebung des Pfahls

Grundwasserverhältnisse

Die Einbindetiefe in der tragfähigen Schicht und deren Mächtigkeit

Form und Querschnittsfläche des Pfahls

Material des Pfahls

Geometrie (Pfahlfuß) und Beschaffenheit der Mantelfläche des Pfahls

Abstand zwischen den Pfählen

Eigenschaften der Deckschichten und deren Mächtigkeit

Da das Herstellungsverfahren einen wesentlichen Einfluss auf den Pfahl und dessen Lastübertragung in den Baugrund hat, wird für die diversen Pfahlarten in eigenen Normen auf die Besonderheiten eingegangen. Die ÖNORM EN 1536 [6] widmet sich den Bohrpfählen, dessen Toleranzen in der Herstellung und auch sogenannten Pfahlintegritätsprüfungen.

## **3.2 Methode und Vorgehensweise**

Die Vorgehensweise der lässt sich anhand der Strukturierung anfallender Arbeiten in thematisch getrennte Arbeitspakete nachvollziehen. Innerhalb dieses Projektes entstand die Aufteilung in sechs Arbeitspakete, beschrieben in nachfolgenden Abschnitten.

### **3.2.1 Projektmanagement**

Das Ziel des Arbeitspaketes Projektmanagement besteht darin, sowohl die Qualität als auch den zeitlichen Ablauf des Projekts sicherzustellen und effizientes Projektmanagement zu gewährleisten. Dies beinhaltet die organisatorische und qualitätssichernde Begleitung des Projektablaufs sowie die Dokumentation der Ergebnisse. Persönliche oder Online-Meetings der Projektpartner:innen werden bei Bedarf abgehalten, und Abstimmungen innerhalb des Konsortiums sind jederzeit möglich. Die Kommunikation erfolgt hauptsächlich über E-Mail und Telefon, während wichtige Ergebnisse in Protokollen festgehalten und durch eine To-Do-Liste ergänzt werden. Die laufende Projektkommunikation mit Stakeholdern sowie die Berichtslegung gegenüber der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft sind integraler Bestandteil der Methodik. Weitere Aufgaben umfassen die Verteilung von Aufgaben und Ressourcen, die Koordination im Projektteam, die Abhaltung und Initiierung von internen Meetings sowie regelmäßiges Projektcontrolling zur Qualitätssicherung. Administration, Koordination, Projektmeetings, Berichtslegung und Risikomanagement sind als zentrale Tasks definiert.

### **3.2.2 Bohrpfähle: Modellierung und Simulation**

Dieses Arbeitspaket konzentriert sich auf die umfassende Modellierung und Simulation von Bohrpfählen, um ein fundiertes Verständnis für ihre Tragfähigkeit und Interaktion mit dem Baugrund zu gewinnen.

Dies beginnt mit der Erhebung des aktuellen Stands der Technik und Wissenschaft. Anschließend erfolgt die detaillierte Modellierung konventioneller Bohrpfähle, wobei Materialien, Geometrie und andere relevante Parameter berücksichtigt werden. Die numerische Berechnung mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM, Programme: RFEM, Sofistik) ermöglicht eine umfassende Analyse des Tragverhaltens und der Wechselwirkung mit dem Baugrund.

Die Ergebnisse aus der Modellierung und Simulation werden kritisch ausgewertet, wobei die Querschnitts-Ausnutzungen aus den Simulationsergebnissen konventioneller Bohrpfähle analysiert werden. Ziel ist die Identifikation von Bereichen mit Optimierungspotenzial hinsichtlich einer möglichen Querschnittsverminderung und damit einhergehender Ressourcenschonung. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse für eine nahtlose Integration in das nächste Arbeitspaket zur Entwicklung praxistauglicher Lösungen aufbereitet.

### **3.2.3 Aussparungskörper: Modellierung und 3D-Druck**

Im Fokus des Arbeitspakets steht die umfassende Auseinandersetzung mit der Entwicklung innovativer Lösungen zur Materialeinsparung bei Bohrpfählen durch die Modellierung und den 3D-Druck von Aussparungskörpern. Der Prozess gliedert sich in mehrere Schritte. Zunächst erfolgt eine umfassende Erhebung des aktuellen Stands der Technik und Wissenschaft zur Materialeinsparung sowie des Beton-3D-Drucks, um eine fundierte Basis für die weiteren Schritte zu schaffen. Der Beton-3D-Druck stellt sich als eine belastbare, innovative Herstellungsmethode heraus, welche für tragwerksplanerische Aufgaben bis dato verhältnismäßig erforscht ist [7]. Anschließend werden Entwürfe für Aussparungskörper erarbeitet, wobei Materialien, geometrische Formen und weitere relevante Parameter berücksichtigt werden.

Die darauffolgende numerische Simulation bewertet die Tragfähigkeit der Hohlkörper. Die entwickelten Modelle werden dann mittels 3D-Betondruck umgesetzt, wobei ein besonderes Augenmerk auf Material- und Ressourceneffizienz gelegt wird. Abschließend erfolgt die Entwicklung einer umfassenden Versuchsanordnung für das nachfolgende Arbeitspaket der Laborversuche.

### **3.2.4 Laborversuche**

Dieses Arbeitspaket, welches sich auf die Laborversuche an Aussparungskörpern konzentriert, beinhaltet eine umfassende Analyse der Materialeigenschaften und des Verhaltens der entwickelten Aussparungskörper unter verschiedenen Belastungsbedingungen. Im ersten Schritt werden Festigkeitsprüfungen hinsichtlich der aufnehmbaren Druckspannungen, sowie ein Dreipunktbiegezugversuch durchgeführt, um die spezifische Tragfähigkeit der Aussparungskörper zu bestimmen.

Weitere Laborversuche behandelten die Auftriebssicherheit von Aussparungskörpern, wobei die Reibung zwischen 3D-gedruckten Betonoberflächen und Frischbeton untersucht wurde.

Die Dichtigkeit, Lagesicherheit im Korb sowie der Verbund zwischen 3D-betongedruckten Aussparungskörpern sowie Frischbeton kann im Folgenden Arbeitspakete des Feldversuchs überprüft werden.

### **3.2.5 Feldversuch**

Das Arbeitspaket Feldversuch bildet den umfassenden Rahmen für die praktische Umsetzung und Evaluierung der optimierten Bohrpfähle und durchläuft mehrere Schlüsselphasen, die aufeinander aufbauen. In der ersten Phase erfolgt der detaillierte Entwurf der optimierten Bohrpfähle, wobei Aspekte wie die Geometrie und die strukturelle Integration der Aussparungskörper berücksichtigt werden. Dieser Entwurf wird anschließend mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) numerisch simuliert, um das Tragverhalten und die Wechselwirkung mit dem Baugrund zu analysieren. In der nächsten Phase werden die Aussparungskörper durch 3D-Betondruck physisch hergestellt, wobei innovative Fertigungstechnologien zur Materialreduktion zum Einsatz kommen. Im Anschluss erfolgt das Einbringen der Aussparungskörper in den Bewehrungskorb des Bohrpfahls und das Betonieren des materialreduzierten Pfahls auf einem bereitgestellten Baufeld des Unternehmenspartners. Die gesamten Herstellungsprozesse des optimierten Bohrpfahls werden begleitend dokumentiert.

Den Abschluss des Arbeitspakets bildet schließlich das Freilegen, Schneiden und Bergen der Segmente des optimierten Bohrpfahls, um den Projekterfolg visuell darstellen zu können und die Anwendung zu verifizieren.

### **3.2.6 Reflexion und Optimierung**

Das Arbeitspaket Reflexion und Optimierung spielt eine entscheidende Rolle im Forschungsprojekt, indem es die gewonnenen Erkenntnisse aus den vorherigen Arbeitspaketen (Modellierung und 3D-Druck der Aussparungskörper, Laborversuche und Feldversuch) umfassend analysiert und darauf aufbauend Optimierungen für die Implementierung zur Herstellung eines optimierten Bohrpfahles entwickelt.

In der ersten Phase erfolgt die Analyse der Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen Aussparungskörper: Modellierung und 3D-Druck und Laborversuche der Aussparungskörper. Dabei werden Muster, Schwächen oder Verbesserungspotenziale identifiziert. Ebenso wird eine vergleichende Analyse der Erkenntnisse aus dem Feldversuch der optimierten Bohrpfähle durchgeführt.

Die Implementierung der identifizierten Optimierungen und Erkenntnisse in die bisherigen Modelle und Verfahren erfolgt in der dritten Phase. Ziel ist es, die praxistauglichen Lösungen weiter zu verbessern und mögliche Schwachstellen zu beheben.

Als weiteres zentrales Ergebnis des Arbeitspakets wird die Entwicklung eines analytischen Bemessungsansatzes für die optimierten Bohrpfähle angestrebt. Dieser Ansatz soll eine strukturierte und präzise Methode für die Tragwerksplanung unter Berücksichtigung der Materialeinsparung bieten.

# 4 Ergebnisse

Das Projekt erreichte sein Kernziel: die praxistaugliche Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bauwesen durch Materialeinsparung bei Bohrpfählen mittels 3D-betongedruckter Aussparungskörper in gering ausgenutzten Querschnittsbereichen. Über die Abfolge Modellierung und Simulation, Entwurf und 3D-Druck, Laborverifikation sowie Feldversuch wurden tragfähige Erkenntnisse gewonnen, die im Arbeitspaket „Reflexion und Optimierung“ reflektiert und für einen zukünftigen, analytischen Bemessungsansatz verdichtet wurden. Die Ergebnisse der Modellierungen zeigen, dass die Lastabtragung über Pfahlspitzendruck und Mantelreibung erhalten bleibt, wenn Hohlkörper gezielt in Zonen niedriger Querschnittsausnutzung platziert und geometrisch so ausgelegt werden, dass Biegesteifigkeit und Herstellungssicherheit gewährleistet sind. Ein zentraler methodischer Fortschritt ist der belastbare Nachweis, dass Reibungskräfte zwischen 3D-gedruckter Oberfläche und Frischbeton während der Betonage signifikant gegen die archimedische Auftriebskraft wirken und damit die Lagesicherheit der Hohlkörper stützen.

Im Ergebnis liegt ein belastbarer Proof of Concept vor. Ein materialreduzierter Bohrpfahl wurde auf einem Baufeld hergestellt, bauteilnah befundet (Freilegen, Aufschneiden, Bergen) und hinsichtlich Lagesicherheit, Dichtigkeit, Verbund und Integrität positiv bewertet. Die gewonnenen Parameter und Prozesskenntnisse sind unmittelbar in Ausführungsempfehlungen und eine praxisnahe Vorgehensweise überführbar. Zugleich bilden sie eine tragfähige Grundlage für die weiterführende Entwicklung eines analytischen Bemessungsansatzes mit normkonformer Einpassung.

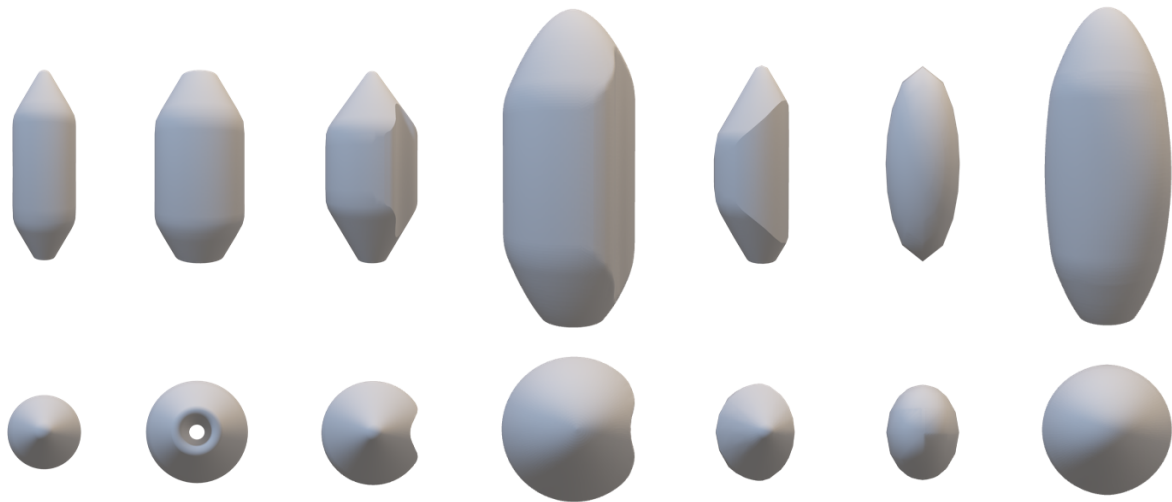
## 4.1 Ergebnisse aus Entwurf, Modellierung und 3D-Betondruck der Aussparungskörper

### Entwurf der Aussparungskörper

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem Arbeitspaket „Bohrpfähle: Modellierung und Simulation“ sowie den konsolidierten Randbedingungen zur Herstellung 3D-gedruckter Betonbauteile wurden geeignete Geometrien für Aussparungskörper entwickelt. Die Hohlkörper dürfen die Lastabtragung über Pfahlspitzendruck und Mantelreibung nicht negativ beeinflussen. Zugleich ist eine ausreichende Querschnittssteifigkeit in biegebeanspruchten Bereichen sicherzustellen. Parallel war das Volumen des Hohlkörpers unter Einhaltung der Betondeckungen und der baupraktischen Anforderungen an Betoneinbringung und Einbau in den Bewehrungskorb zu maximieren. Ergebnis waren Varianten mit definierten Leitmaßen als Eingangsgrößen für die nachfolgenden numerischen Verifi-

kationen. Die Entwürfe wurden explizit auf die Machbarkeit im 3D-Druck und die Integrationsfähigkeit in den Herstellprozess ausgerichtet. In nachfolgender Abbildung (vgl. Abbildung 3) ist die Variantenstudie des Forschungsvorhabens zusammengefasst.

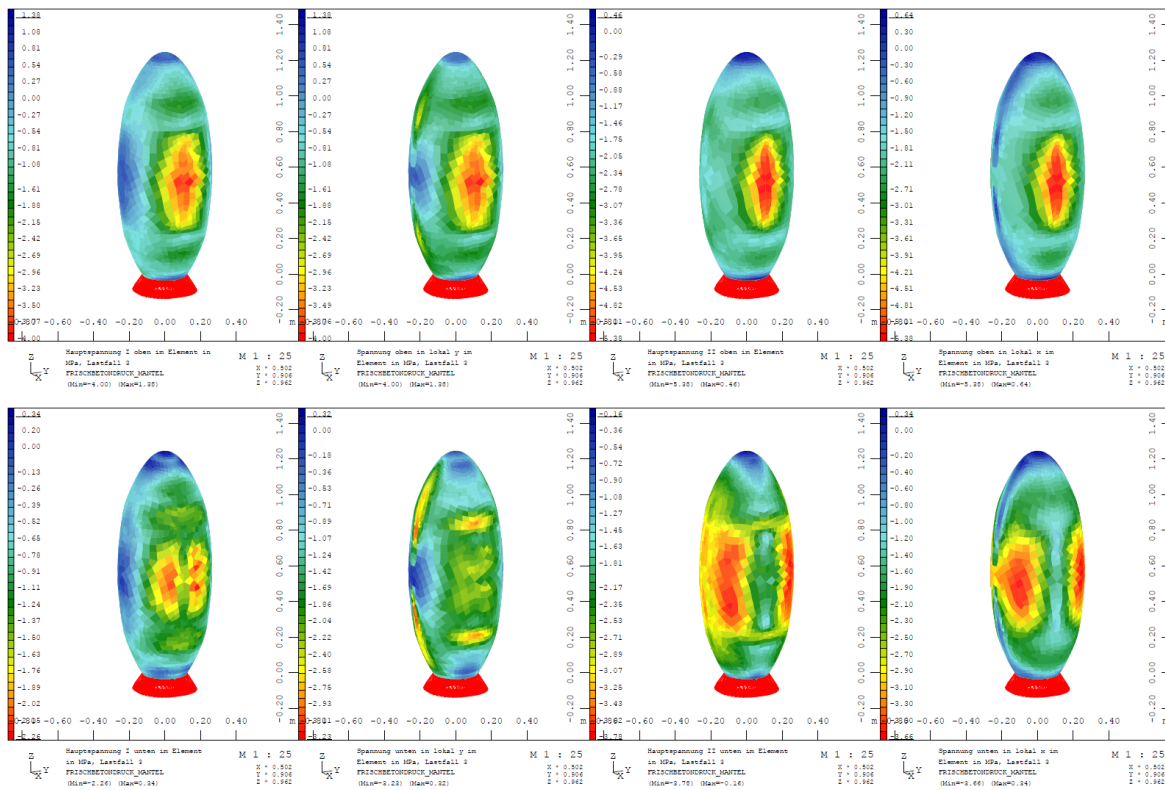
Abbildung 3: Variantenstudie möglicher Aussparungskörper-Geometrien ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



### Numerische Simulation der Aussparungskörper

Die entworfenen Hohlkörper wurden hinsichtlich Tragfähigkeit und Verformungsverhalten numerisch analysiert. Ziel war, jene Geometrien zu identifizieren, die bei minimalem Materialeinsatz die geforderte Trag- und Gebrauchstauglichkeit in der Pfahlumgebung erfüllen und die prozessbedingten Beanspruchungen über den Lebenszyklus der Herstellung abbilden. Die Simulationsergebnisse wurden in einem iterativen Vorgehen in den Entwurf zurückgeführt, um Geometrieparameter zu verfeinern und belastbar für die Prototypenherstellung zu machen. Die so validierten Entwurfsvarianten bildeten die unmittelbare Grundlage für den 3D-Betondruck. Maßgebend waren die entstehenden Biegezugspannungen in der Inneren Lage der Aussparungskörper, resultierend aus dem Frischbetondruck. Die Ergebnisse sind in folgender Abbildung (vgl. Abbildung 4) dargestellt.

Abbildung 4: Darstellung der FE-Bemessungsergebnisse der Simulation [8] ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



Die Ergebnisdarstellung in Abbildung 4 zeigt die resultierenden Spannungen, bestehend aus Normalspannungen (Druck- und Zugspannungen) sowie Biegespannungen in der oberen Zeile für die äußere Schicht des Aussparungskörpers, sowie in der unteren Zeile für die innere Seite. Dabei sind von links nach rechts folgende Spannungen dargestellt:

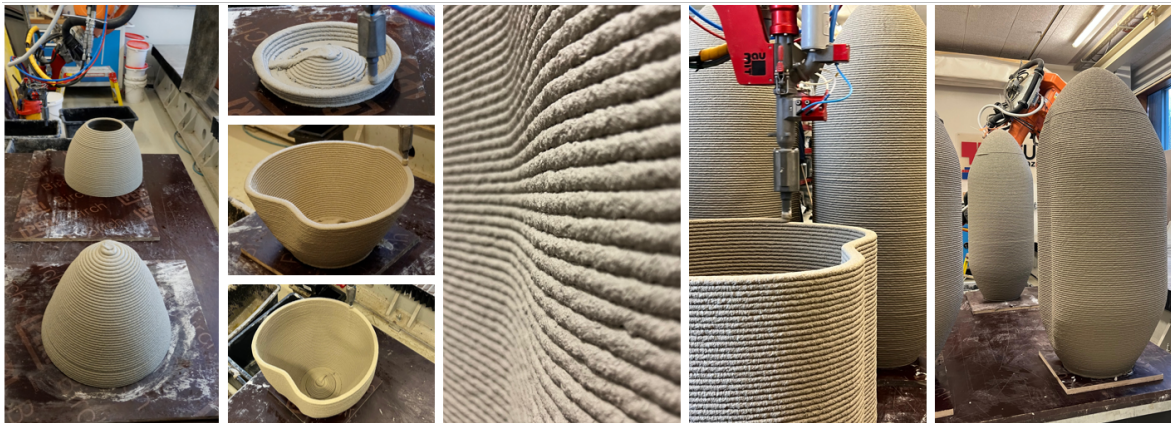
- 1) die Hauptspannungen I
- 2) die Spannungen in y-Richtung
- 3) die Hauptspannungen II
- 4) die Spannungen in x-Richtung

### 3D-Betondruck der Aussparungskörper

Die Herstellung der Hohlkörper mittels 3D-Betondruck überführte die numerisch verifizierten Geometrien in einen physischen Prototypenstatus. Der Schwerpunkt lag auf der Übertragung in einen robusten, reproduzierbaren Fertigungsprozess mit besonderem Augenmerk auf Material- und Ressourceneffizienz sowie auf der Sicherstellung der Bauteilstabilität und der relevanten Toleranzen für

den späteren Einbau in den Bewehrungskorb. Die hergestellten Hohlkörper (vgl. Abbildung 5) dienen als Prüfkörper für die im Anschluss geplanten Laborverifikationen und als Grundlage des weiteren Projektablaufs.

Abbildung 5: Darstellung des Herstellungsprozesses 3D-Betongedruckter Aussparungskörper ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



## 4.2 Laborergebnisse: Festigkeit und Auftriebsicherheit

### Laborversuche zur Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeiten des verwendeten Printbetons wurden über konventionelle Würfeldruckprüfungen erfasst. Hierbei wird ein Prüfkörper – ein Würfel mit einer Seitenlänge von 15 cm – in einer Universalprüfmaschine zentrisch bis zum Versagen mit einem Druckstempel belastet. Es resultieren charakteristische Druckspannungen als Widerstandskennwerte, welche die Grundlage für die Bemessung der Aussparungskörper darstellen. Zusätzlich zu konventionell gegossenen Prüfwürfeln wurde ein Quader im 3D-Druckverfahren hergestellt, aus welchem nach dessen Erhärtung drei Würfel mit Seitenlängen von 15 cm ausgeschnitten wurden (vgl. Abbildung 6). Dies dient dem Vergleich der zulässigen Druckspannungen zwischen Printbeton mit und ohne Zugabe von Erhärtungsschleunigern, wie sie beim 3D-Druck verwendet werden.

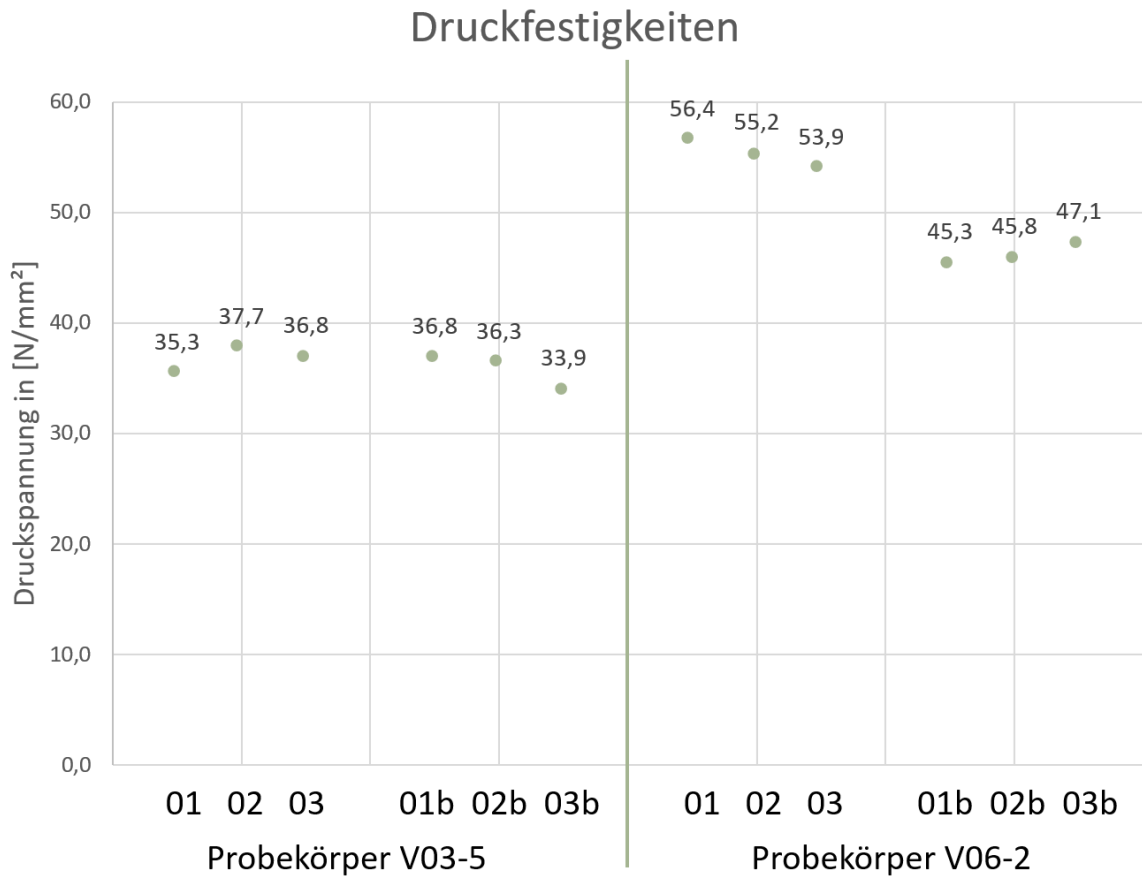
Abbildung 6: 3D-Betongedruckte Prüfkörper für den Druckversuch ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



Die Resultate der Druckfestigkeitsprüfungen entsprachen den erwarteten, zulässigen Druckspannungen der Herstellerangabe, bzw. übertrafen diese sogar. In nachfolgendem Diagramm sind die Ergebnisse der Würfeldruckprüfungen dargestellt. Getestet wurden insgesamt 12 Prüfkörper. Sechs stammen aus der Betoncharge der Aussparungskörpervariante „V03-5“, welche in der linken Hälfte der Abbildung gezeigt sind, während die rechten sechs Ergebnisse aus getesteten Prüfkörpern der Druckreihe „V06-2“ stammen. Diese sechs Ergebnisse bestehen aus drei unbeschleunigten Betonproben, sowie drei weiteren Betonproben, welche mit erhärtungsbeschleunigenden Zusatzmitteln hergestellt wurden. Beschleunigte Probewürfel sind mit dem Zusatzbuchstaben „b“ gekennzeichnet. Erkennbar ist, dass bei der Probekörper-Testreihe „V03-5“ ähnliche Druckfestigkeiten zwischen beschleunigtem und unbeschleunigtem Printbeton resultieren, während die beschleunigten Prüfkörper der Testreihe „V06-2“ eine um ca. 16,5% reduzierte Festigkeit aufweisen, wobei die Ergebnisse trotzdem höher sind, als bei der vorherigen Versuchsreihe.

Die grundsätzliche Erkenntnis hierbei ist, dass die angegebenen Festigkeiten zwar erreicht werden, ein geregeltes Prüfverfahren für 3D-gedruckte Betonbauteile jedoch nicht vorhanden ist und mittels Prüfung nach ÖNORM B 4710-3 keine konsistenten Ergebnisse resultieren.

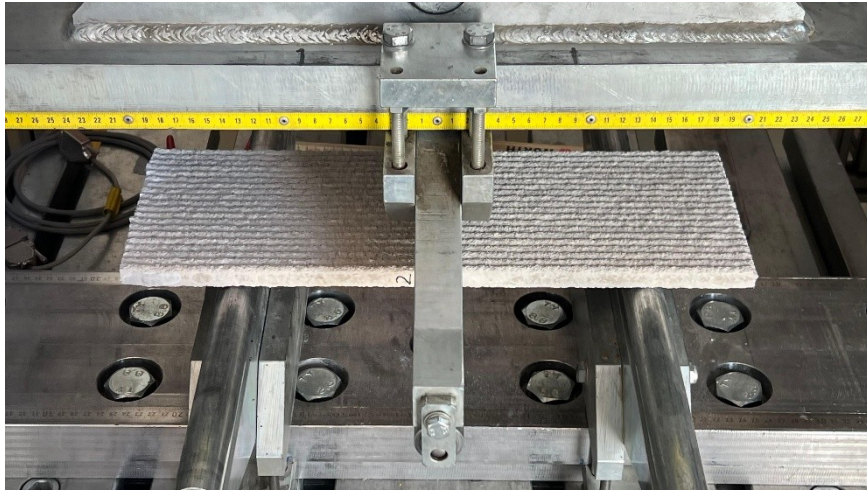
Abbildung 7: Auswertung der Würfeldruckfestigkeitsprüfungen ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



#### Laborversuche zur Biegezugfestigkeit

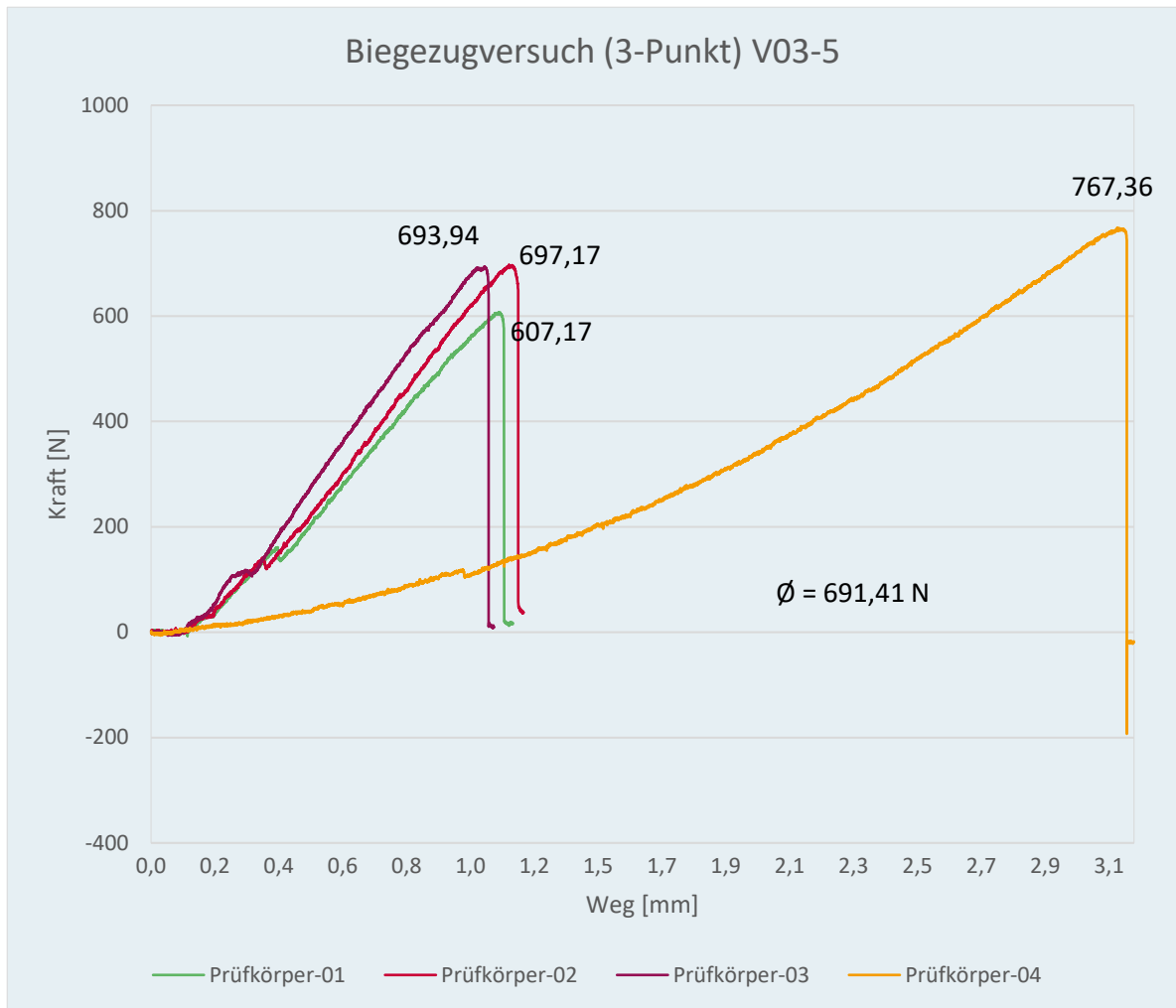
Die Zugfestigkeit im lastfall Biegung wurde an 3D-betongedruckten Prüfkörpern untersucht. Hierfür wurde eine Scheibe mit einer Länge von 40 Zentimetern, einer Höhe von 16 cm Und einer Wanddicke von 17 millimeter im 3D-Druckverfahren hergestellt. Im liegenden Zustand konnte mittels 3. Biegeversuch die resultierende Zugfestigkeit vermittelt werden (vgl. Abbildung 8).

Abbildung 8: Versuchsaufbau der Biegezugprüfung ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



Die Ergebnisse der Biegezugprüfung ist in nachfolgenden Diagrammen dargestellt. Das erste Diagramm in Abbildung 9 zeigt vier Versuchsergebnisse, wobei die mittlere aufgebrachte Kraft in Feldmitte rund 691 Newton ergibt. Es resultieren über die ermittelten Querschnittskennwerte des Probekörpers Zugspannungen von  $8,07 \text{ N/mm}^2$ . Die Ergebnisse der Prüfkörper 1-3 liegen im ähnlichen Bereich, während der vierte Versuchskörper mit einer deutlich höheren Kraft zum Versagenszeitpunkt belastet wird. Grund hierfür ist die Veränderung der Lagerbedingung: Es wurden Elastomer-Auflager hinzugefügt, um die auftretenden Kräfte besser über die unebene Oberfläche verteilen zu können und dadurch ein praxisnäheres Ergebnis zu erhalten. Da es bis dato keine geregelten Prüfverfahren für 3D-betongedruckte Bauteile gibt, ist die Wahl einer realitätsnahen Prüfmethode noch weiter zu Untersuchen.

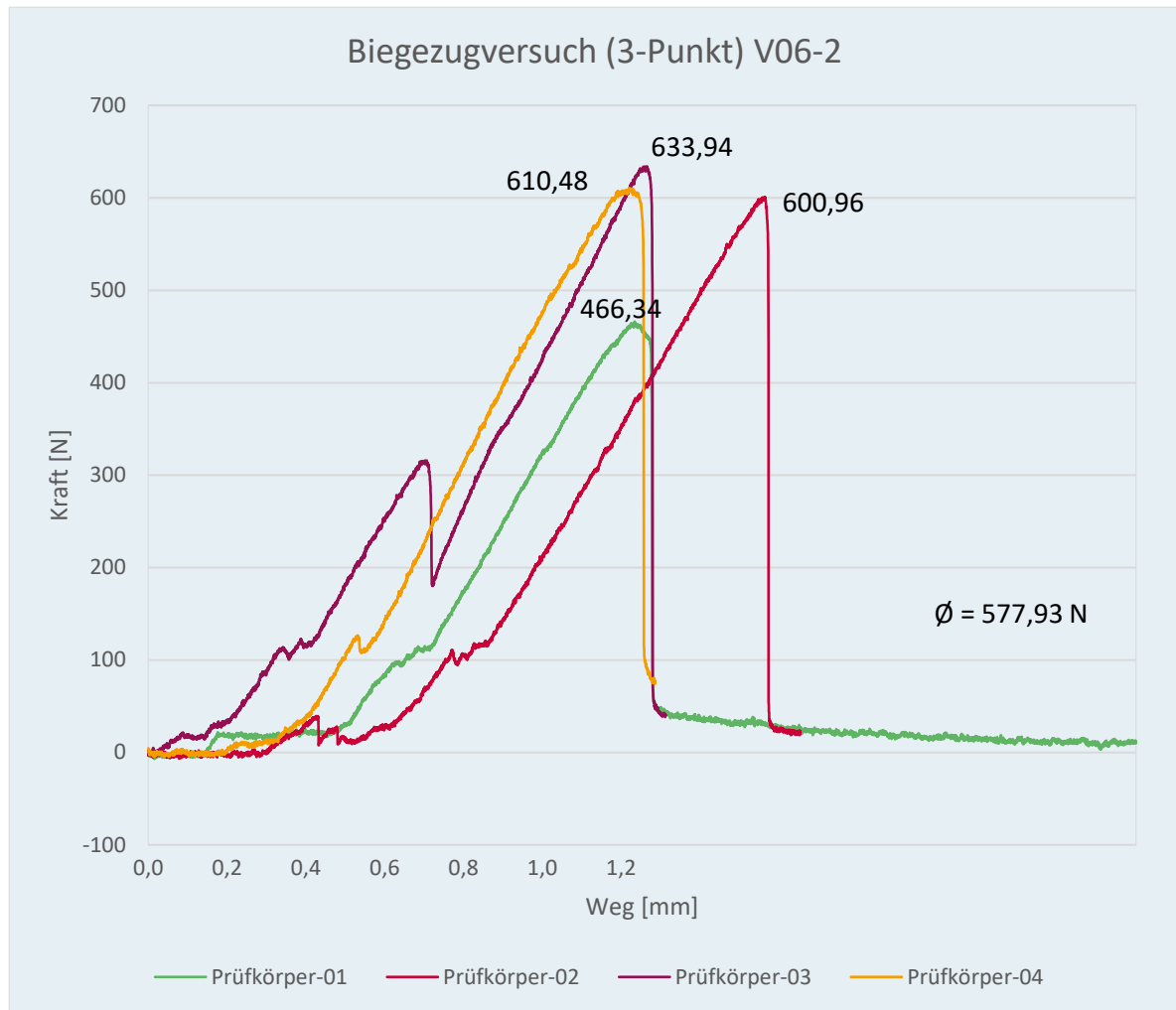
Abbildung 9: Ergebnisse des Biegezugversuchs der Versuchsreihe V03-5 ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



In Abbildung 10 sind die Testergebnisse der Versuchsreihe V06-2 dargestellt. Hier wurde eine gemittelte aufgebrachte Kraft zum Zeitpunkt des Versagens von 577,93 Newton gemessen, was bei gegebenem Querschnitt eine maximale charakteristische Zugspannung von  $6,75 \text{ N/mm}^2$  ergibt.

Erstaunlich ist, dass das Material mit deutlich höheren aufnehmbaren Druckspannungen nun geringere Zugspannungen vorweist.

Abbildung 10: Ergebnisse des Biegezugversuchs der Versuchsreihe V06-2 ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



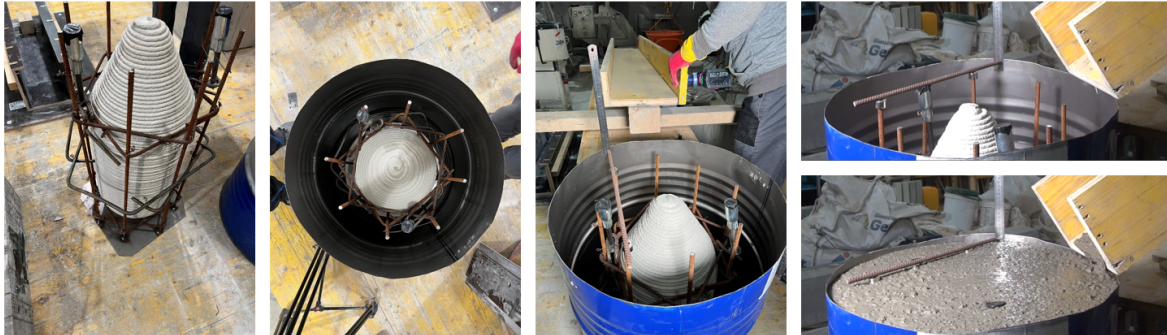
### Laborversuche zur Auftriebssicherheit / Reibung

Ergänzend zu konventionellen Festigkeitsprüfungen wurde eine Laboruntersuchung zur Reibung zwischen 3D-gedruckten Betonoberflächen und Frischbeton konzipiert und durchgeführt, um die Auftriebssicherheit der Hohlkörper während der Betonierphase zu quantifizieren. Der Versuch operationalisierte den Kontakt Zustand zwischen der 3D-gedruckten Oberfläche und Frischbeton und lieferte Reibungsparameter als Gegenkraftanteil zur Archimedischen Auftriebskraft.

Hierzu wurde zunächst ein Versuch durchgeführt, wobei ein geschlossener, 3D-betongedruckter Hohlkörper in einem Versuchsraum einbetoniert wurde (vgl. Abbildung 11). Entgegen der Logik des

Archimedischen Prinzips, fand kein Aufschwimmen des Prüfkörpers statt, welches aus der theoretischen Nachweisführung erwartet wurde.

Abbildung 11: Darstellung des ersten Auftriebversuches ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



Im Anschluss wurde ein weiterer Versuch durchgeführt, wobei 3D-betongedruckte Probekörper in einem eingeschalteten Raum einbetoniert, und anschließend mit einer definierten Geschwindigkeit aus dem Frischbeton herausgezogen wurden. Durch das Zwischenschalten einer Kraftmessdose konnten vorhandene Haftreibungswiderstände, zusätzlich zu der Haltekraft gegen den erwarteten Auftrieb, ermittelt werden (vgl. Abbildung 12 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Abbildung 12: Darstellung des Versuchsaufbaus zur Ermittlung eines Reibungskoeffizienten ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



- Hallenkran**  
Herausziehen des Auftriebskörpers bei 1,2 cm/s
- Kraftmessdose**  
Messung der benötigten Kräfte, um Auftriebskörper aus Frischbeton herauszuziehen



Volumen Frischbeton:  
 $b \cdot d \cdot h = 0,5 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m} = 0,375 \text{ m}^3$

- Auftriebskörper:**
- Außenvolumen = 22,8 dm<sup>3</sup>
- Innenvolumen = 16,25 dm<sup>3</sup>
- Eigengewicht  $G_k$  = 0,152 kN
- Verdrängte Wichte = 0,57 kN
- Auftriebskraft  $F_a$  = 0,42 kN

Die Ergebnisse belegen, dass Reibungskräfte einen erheblichen Einfluss auf die Auftriebssicherheit haben und damit die Lagesicherung der Hohlkörper im Frischbeton gewährleisten. Die Umrechnung der gemessenen Kräfte in Bezug auf die vorhandene Reibungsfläche ergab einen Reibungskoeffizienten von  $\mu = 0,035$ . Die Befunde fließen unmittelbar in Ausführungs- und Bemessungsempfehlungen ein und stehen in Ergänzung zu den Prüfungen der vorherigen Aufgaben im Arbeitspaket.

### 4.3 Feldergebnisse: Herstellung, Befundung und Validierung

Der Feldversuch verfolgte die praxisnahe Demonstration und Evaluierung des optimierten Bohrpfahls. Der Ablauf umfasste den Entwurf der optimierten Bohrpfähle, die numerische Simulation, den 3D-Betondruck der Aussparungskörper, das Einbringen der Hohlkörper in den Bewehrungskorb, die Herstellung des Bohrpfahls auf dem Baufeld sowie ursprünglich geplante Belastungsversuche. Begleitend wurden die Herstellungs- und Prüfprozesse fortlaufend dokumentiert und in einem Feldversuchsbericht konsolidiert, um Entwurf, Ausführung und Validierung konsistent nachzuweisen.

Der Arbeitspaketrahmen sah die vollständige Prozesskette auf einem bereitgestellten Baufeld des Unternehmenspartners vor, inklusive der Meilensteine zur hergestellten Pfahlkonstruktion sowie zum Abschluss der Validierungsschritte unter realen Randbedingungen. Die Dokumentation der Schritte ist als Anwendungsleitfaden zentrales Ergebnis des Forschungsvorhabens und in nachfolgenden Schritten dargestellt.

### Entwurf optimierter Bohrpfähle

Der Entwurf der optimierten Bohrpfähle wurde planmäßig erstellt. Dabei wurden die geometrische und konstruktive Integration der 3D-betongedruckten Aussparungskörper, die einzuhaltenden Betondeckungen sowie baupraktische Anforderungen an Transport, Einbau und Betonage berücksichtigt, um einen optimierten Querschnitt bei unverändertem Lastabtragungsverhalten über Mantelreibung und Pfahlspitzendruck sicherzustellen. Das Ergebnis ist ein konsistenter Entwurf als belastbare Grundlage für Simulation, Fertigung und Herstellung des abschließenden, optimierten Bohrpfahls.

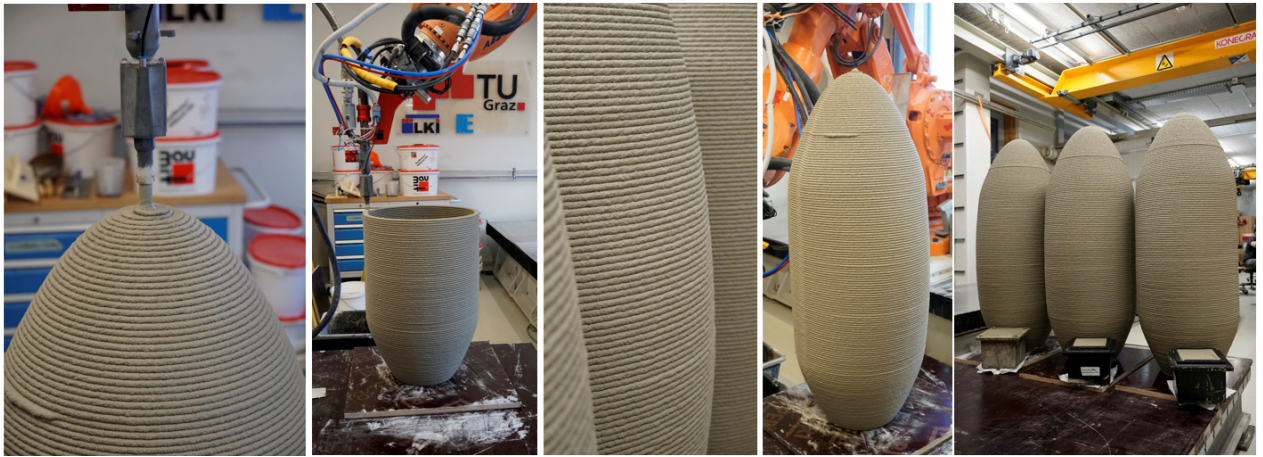
### Numerische Simulation der optimierten Bohrpfähle

Die numerische Simulation der optimierten Bohrpfähle wurde in vereinfachter Form umgesetzt. Vor dem Hintergrund der belastbaren Erkenntnisse aus vorherigen Arbeitspaketen und der Fokussierung auf einen Proof of Concept, war eine vertiefte numerische Ausarbeitung nicht mehr entscheidungsleitend für die Umsetzung im Feldversuch. Der vereinfachte Konstruktionsentwurf diente der finalen Konsistenzprüfung, wobei die wesentlichen Nachweisbezüge zur Interaktion und zu Querschnittsanforderungen gesichert blieben. In weiterführenden Forschungsprojekten ist dies jedoch unbedingt weiterzuverfolgen.

### 3D-Betondruck der Aussparungskörper

Die Aussparungskörper wurden planmäßig mittels 3D-Betondruck gefertigt (vgl. Abbildung 13) wodurch die verifizierten Geometrien in einen robusten Prototypenstatus für den Feldeinsatz überführt wurden. Die resultierenden, ausgehärteten Bauteile erfüllten die Voraussetzungen für den Einbau, den Transport und die Tragsicherheit hergestellter optimierter Bohrpfähle.

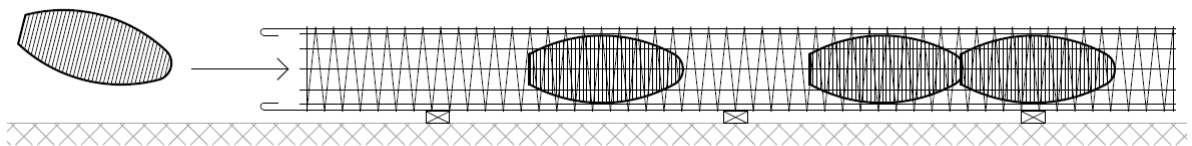
Abbildung 13: Herstellung der Aussparungskörpervariante für den Feldversuch ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



Einbringen der Aussparungskörper in den Bewehrungskorb des Bohrpfahls

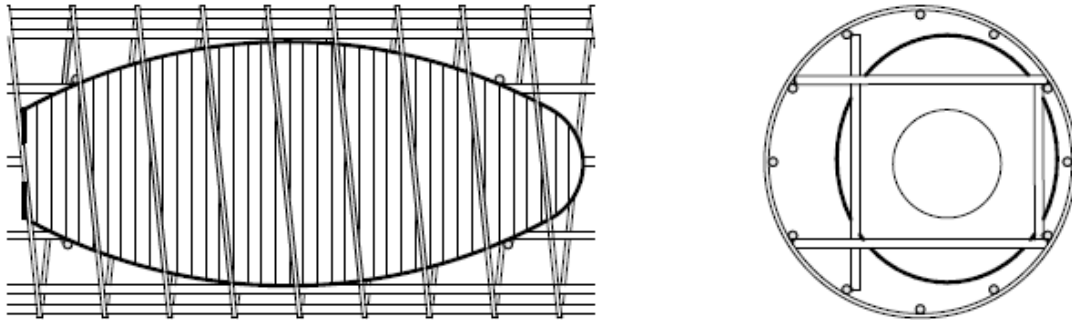
Das Einbringen der Aussparungskörper in den Bewehrungskorb erfolgte im liegenden Zustand, wie in Abbildung 14 dargestellt ist.

Abbildung 14: Einbringen der Aussparungskörper in den Bewehrungskorb ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



Gemäß Planung galt es, besonderes Augenmerk auf die Lagesicherung der Hohlkörper im späteren Pfahl zu legen, beziehungsweise zunächst der Lagesicherung im Bewehrungskorb bis nach dem Betoniervorgang. Die Fixierung erfolgte mittels Betonstahlstäben, welche mit Kontakt zum Aussparungskörper am Bewehrungskorb mittels Schweißnähten befestigt wurden (vgl. Abbildung 15).

Abbildung 15: Darstellung eines Aussparungskörpers im Bewehrungskorb mit mechanischer Befestigung ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



In nachfolgender Abbildung sind zwei mit Aussparungskörpern bestückte Bewehrungskörbe für den Feldversuch dargestellt (vgl. Abbildung 16). Im Bereich der Befestigungs-Stäbe können diese gehoben und bewegt werden.

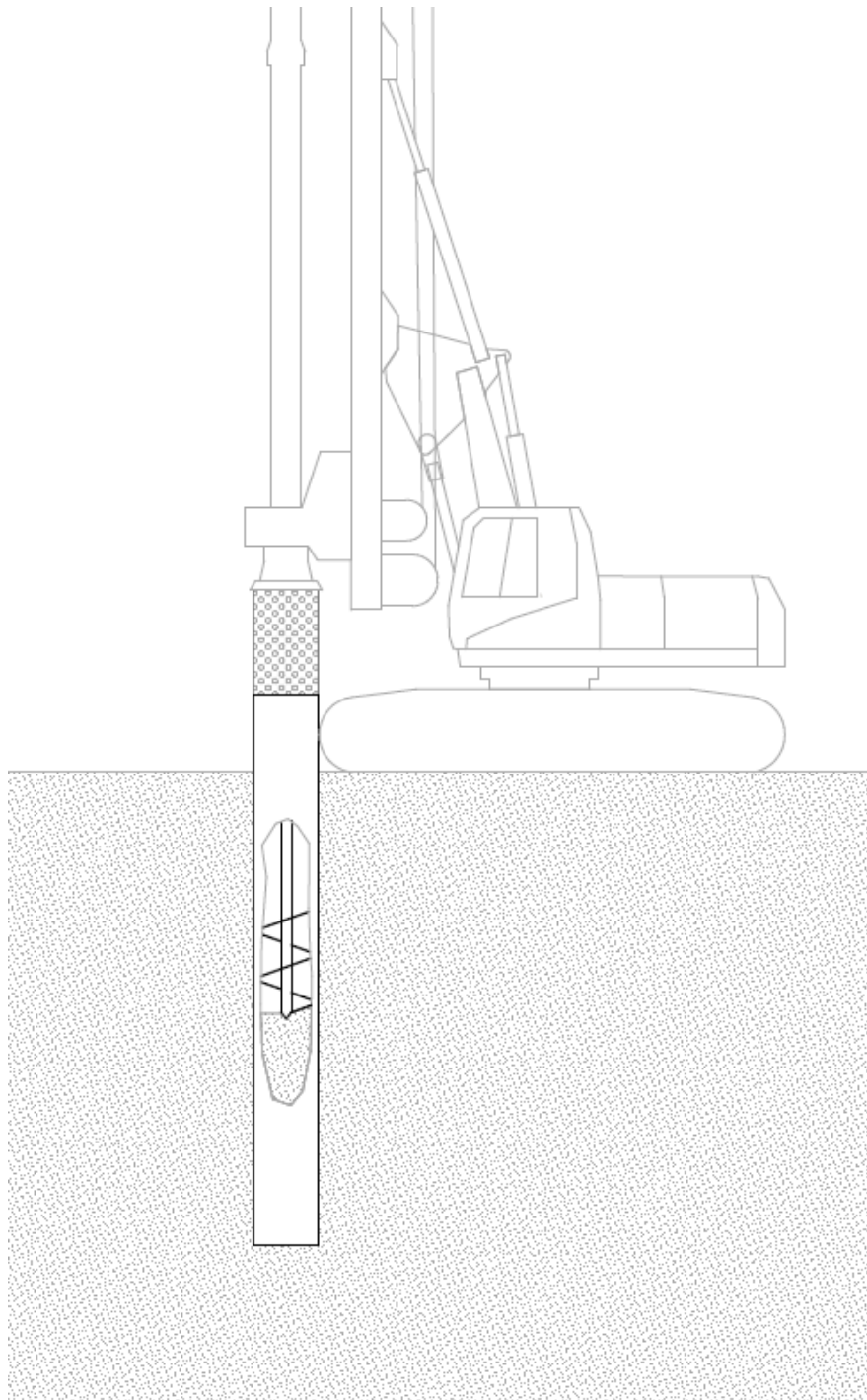
Abbildung 16: Mit Aussparungskörpern bestückter Bewehrungskorb für den Feldversuch ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



### Herstellen des Bohrpfahls mit Aussparungskörpern

Der Materialreduzierte Bohrpfahl wurde anschließend auf dem bereitgestellten Baufeld hergestellt. Dafür wird zunächst das Loch verrohrt gebohrt / abgeteuft (vgl. Abbildung 17).

Abbildung 17: Herstellen des Bohrlochs ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



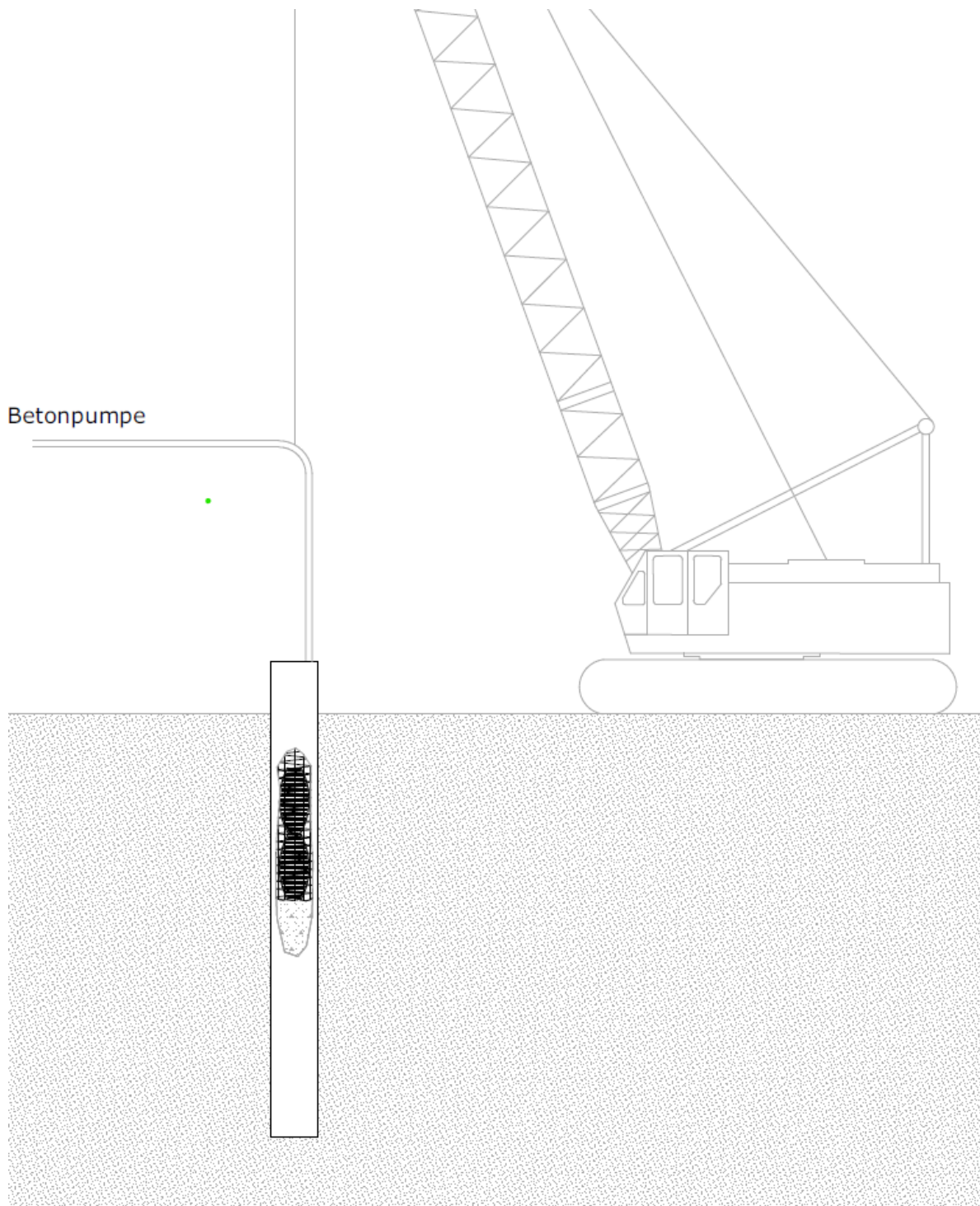
Nachdem das Bohrloch bis zur erforderlichen Tiefe hergestellt ist, kann der Bewehrungskorb eingeführt werden (vgl. Abbildung 18), bevor der Bohrpfahl ausbetoniert wird.

Abbildung 18: Einbringen des Bewehrungskorbes in das Bohrloch zur anschließenden Betonage  
©Philip Wehbe, ITE TU Graz



Die Betonage stellte in diesem Schritt die größte Herausforderung dar, da das Betonierrohr aufgrund der fixierten Hohlkörper nicht zentrisch in das Bohrloch eingeführt werden konnte. Wie in der Projektbeschreibung antizipiert, wurden alternative Einbringungsmethoden berücksichtigt, um den Bohrpfehl betonieren zu können, ohne eine Entmischung oder Bauteilschädigung zu verursachen. Resultat ist, ein Betonierrohr an der Betonpumpe anzubringen und zwischen den Aussparungskörpern und dem Bewehrungskorb in das Bohrloch einzubringen, um anschließend im Grundwasser im Kontraktorverfahren betonieren zu können (vgl. Abbildung 19).

Abbildung 19: Betonieren des Bohrpfahles mittels Betonpumpe und exzentrisch platziertem Betonierrohr ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



Nach dem Betonieren wird die Verrohrung gezogen und der nachrutschende Beton ergänzt. Es resultiert ein fertig betonierter, materialreduzierter Bohrpfahl.

### Freilegen, Aufschneiden und Bergen des optimierten Bohrpfahls

Wie bereits beschrieben konnte der Projekterfolg durch das Freilegen, Aufschneiden und Bergen des materialreduzierten Bohrpfahls verifiziert werden. In der folgenden Abbildung 20 ist der Schnitt durch den stehenden, optimierten Bohrpfahl repräsentativ für den Projekterfolg dargestellt.

Abbildung 20: Freigeschnittener, materialreduzierte Bohrpfahl ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



Durch das Freischneiden konnte nicht nur der Projekterfolg dokumentiert werden, sondern auch der Verbund zwischen 3D-betongedruckten Aussparungskörpern und Frischbeton sowie die Dichtigkeit der Hohlkörper überprüft werden, wie in folgender Abbildung 21 ersichtlich ist.

Abbildung 21: Freigeschnittenes Bohrpfahlsegment ©Philip Wehbe, ITE TU Graz



# 5 Schlussfolgerungen

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse lassen sich fachlich in zwei Bereiche gliedern:

Erstens ist die materialeffiziente Optimierung von Bohrpfählen über gezielt platzierte, 3D-betongedruckte Aussparungskörper in gering ausgenutzten Querschnittsbereichen praktisch umsetzbar, ohne die pfahltypischen Lastabtragungsmechanismen über Mantelreibung und Spitzendruck zu kompromittieren. Die FEM-gestützte Identifikation solcher Zonen, die iterativen Entwurfs- und Simulationsschleifen zu Hohlkörpergeometrien sowie die erfolgreiche additive Fertigung mit prozessrobusten Toleranzen belegen die technische Machbarkeit. Zudem zeigt die bauteilnahe Validierung im Feld, dass Lagesicherheit, Dichtigkeit, Verbund und Integrität der Hohlkörper unter realen Randbedingungen erreichbar sind, wenn Geometrie, Fixierung und Prozessführung (Transport, Einbau, Betonage) abgestimmt sind.

Zweitens erweitert der Nachweis der Auftriebssicherheit die bestehende Praxis entscheidend. Reibungs- beziehungsweise Haftbeiträge zwischen betongedruckter Oberflächen und Frischbeton wirken während der Betonage signifikant gegen die archimedische Auftriebskraft und sind als Gegenkräfte unbedingt zu berücksichtigen. Diese Erkenntnis schließt eine sicherheitsrelevante Lücke, die bislang durch rein theoretische Auftriebsbetrachtungen unzureichend adressiert war.

Hinsichtlich der Nachhaltigkeit können die Ergebnisse, getrennt nach ökologischer, sozialer und ökonomischer Nachhaltigkeit dargestellt werden:

## Ökologische Nachhaltigkeit

Das Projekt reduziert den Betonbedarf von Bohrpfählen durch den Einsatz 3D-Betongedruckter Hohlkörper in gering ausgenutzten Querschnittsbereichen, ohne die Lastabtragung über Pfahlspitzendruck und Mantelreibung zu beeinträchtigen. Die Optimierung wird mittels FEM ermittelt und ist auf unmittelbare Praxisanwendungen ausgerichtet, mit Nachweisen gemäß den einschlägigen Eurocodes für das innere und äußere Tragverhalten sowie den herstellungsbedingten Anforderungen an Bohrpfähle (EN1992-1, EN1997-1, EN1536). Für Österreich wird ein Einsparpotenzial von über 15.000 m<sup>3</sup> Beton pro Jahr ausgewiesen, bei rund 40% Materialreduktion von zirka der Hälfte der hergestellten Pfähle. In Abhängigkeit vom Emissionsfaktor (300 – 500 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>) entspricht dies über 6.000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr alleine in Österreich. Die Emissionen aus der Herstellung der Hohlkörper mindern diese Einsparungen zwar, jedoch wirkt dies insbesondere bei Einsatz von ökologisch optimierten Bindemitteln nur gering abmindernd.

## Soziale Nachhaltigkeit

Die konsequente Ausrichtung auf nachhaltiges und ressourcenschonendes Bauen erhöht die Attraktivität des Sektors für junge Fachkräfte und fördert Diversität sowie Geschlechtervielfalt im Fachpersonal. Damit leistet das Projekt einen Beitrag zur Verbreiterung der Fachkräftebasis und zur inklusiveren Arbeitsumgebung in der Baubranche.

## Ökonomische Nachhaltigkeit

Geringerer Betonmengen senken die Materialkosten. Trotz Zusatzaufwenden für Hohlkörper können CO<sub>2</sub>-Preiswirkungen durch nachhaltige Bauweisen und ein verbessertes Unternehmensimage die Wirtschaftlichkeit positiv beeinflussen. Die Bewertung erfolgt im Spannungsfeld aus Einsparungen und Mehrkosten, bleibt aber insbesondere vor dem Hintergrund steigender Materialpreise vielversprechend.

Die Ergebnisse sind für mehrere Zielgruppen relevant. Für Tragwerksplaner:innen bieten sie einen neuen Gestaltungsspielraum zur Reduktion grauer Emissionen, mit klaren Randbedingungen zur Erhaltung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Bauausführende und Spezialtiefbauunternehmen profitieren von prozessnahen Leitlinien für 3D-gedruckte Hohlkörper, einschließlich Transport- und Betonageprozessen. Material- und Maschinenhersteller im Bereich des 3D-Betondrucks können an Prozessparametern, Mischungsdesign und Druckstrategien weiterarbeiten, um die Anfangsfestigkeiten und die Reproduzierbarkeit zu erhöhen. Forschungs- und Normungsgremien finden in den Ergebnissen eine empirisch fundierte Basis für die Ergänzung bestehender Regelwerke um materialeffiziente Pfahlquerschnitte und den erweiterten Nachweis der Lagesicherheit im Frischbeton. Öffentliche Auftraggeber und Städte mit Klimaneutralitätszielen erhalten einen praktikablen Hebel zur Emissionsreduktion bei Gründungen, der mit Pilotprojekten skaliert werden kann.

Zusammenfassend bewertet das Projektteam die Ergebnisse als fachlich belastbar und praxisnah. Die gewonnenen Erkenntnisse – modellgestützte Querschnittsoptimierung, 3D-gedruckte Hohlkörper mit prozessrobusten Parametern, erweiterter Auftriebsnachweis mit Reibungsbeiträgen, feldseitige Validierung – bilden eine tragfähige Grundlage für die weitere Entwicklung hin zu standardisierten, normkompatiblen Lösungen. Die nächsten Schritte sind klar definiert: vertiefte Bemessungsentwicklung, breitere Datenerhebung, Leitfaden und Normschnittstelle. Die Zielgruppen sind identifiziert und können mit den Ergebnissen unmittelbar arbeiten. Die rechtlichen Hürden sind adressierbar. In Summe ist das Markt- und Verbreitungspotenzial gegeben und der Beitrag zur Klimaneutralität im Städtebau ist direkt und skalierbar.

# 6 Ausblick und Empfehlungen

Die Ergebnisse markieren den Übergang von der konzeptionellen Idee zur praxistauglichen Umsetzung und zeigen klar, wo vertiefende Forschung nötig ist, um von Pilotanwendungen zu standardisierbaren Lösungen zu gelangen. Im Mittelpunkt steht die Bemessung. Der begonnene, überschlägige Teilansatz belegt die prinzipielle Anwendbarkeit, ersetzt aber noch keinen generalisierbaren, normkonformen Nachweisrahmen. Empfohlen wird eine gestufte Entwicklung, die die maßgebenden Einflussgrößen systematisch parametrisiert (Geometrie der Hohlkörper, Erhalt der Biegesteifigkeit, Wechselwirkungen mit Mantelreibung und Spitzendruck, Lagesicherheit im Frischbeton inklusive Reibungs-/Haftbeiträge) und darauf aufbauend einen analytischen Ansatz mit klaren Gültigkeitsgrenzen und Kalibrierung an Labor- und Felddaten ableitet. Ziel ist ein prüffähiger Konstruktions- und Bemessungsleitfaden, der sich in die Nachweislogik der einschlägigen Normen integriert.

Parallel ist der Ausbau der Datenbasis erforderlich. Laborseitig sollten Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte für unterschiedliche Printbetonrezepturen, Druckstrategien und Umgebungsbedingungen erhoben und um Dauerhaftigkeitsthemen ergänzt werden. Für die Lagesicherheit sind Reibungs- und Haftkennwerte in Abhängigkeit von Oberflächenrauheit sowie Frischbetonrezeptur systematisch zu bestimmen, um repräsentative Bemessungswerte für die Herstellungsphase zu erhalten. Feldseitig empfiehlt sich die Ausweitung instrumentierter Demonstrationen mit strukturierter Dokumentation von Transport, Einbau, Betonage und bauteilnaher Befundung, um die Reproduzierbarkeit der Mechanismen statistisch abzusichern.

Ein weiterer Fokus liegt auf Fertigungs- und Prozessrobustheit im 3D-Betondruck. Empfohlen werden eng definierte Material- und Prozessbedingungen und digitale Qualitätssicherung. Sensorik zur Überwachung der Druckparameter, Materialverfolgung und standardisierte Abnahmen der Hohlkörper vor Einbau. Die Transportrobustheit lässt sich über Geometrieoptimierungen (lokale Verstärkungen), temporäre Aussteifungen und Schutzbefestigungen erhöhen. Für die Betonage sind alternative Einbringstrategien (Pump-/Rohrführungskonzepte) methodisch zu bewerten, um Entmischungsrisiken zu minimieren und unterschiedliche Baustellenlogistiken zu bedienen.

Die Schnittstelle zur Normung und Genehmigung sollte frühzeitig adressiert werden. Eine regulatorische Roadmap ist nötig, die Nachweisformate (innere/äußere Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit), Ausführungstoleranzen und Integritätsprüfungen für materialreduzierte Pfähle konkretisiert. Haftungsfragen entlang der Lieferkette (Planung, Druck, Einbau, Betonage, Prüfung) sind mit Auftraggebern zu klären, um Rechtssicherheit für Pilot- und Serienanwendungen zu schaffen.

Auf dieser Grundlage bietet sich ein hohes Potenzial für Demonstrationsvorhaben, besonders im urbanen Kontext und in Programmen zur Klimaneutralität. Chancen liegen in der direkten Reduktion grauer Emissionen bei Gründungen, der Anschlussfähigkeit an digitale/additive Fertigung und dem

praxiserprobten Prozessgerüst (Entwurf, Druck, Einbau, Befundung). Geeignete Einsatzfelder sind kommunale Hoch- und Tiefbauprojekte, Infrastruktorknoten und städtebauliche Leitvorhaben. Die Einbettung in öffentliche Beschaffung mit Innovationsfenstern oder Reallabore für klimaneutrale Quartiere erhöht Sichtbarkeit und Wirkung. Begleitendes Monitoring und Wissenstransfer sind zu integrieren.

Herausforderungen betreffen vor allem Prozessintegration und Nachweiswesen. Die eingeschränkte Betonierrohrführung verlangt projektspezifische Planung und Abstimmung von Betonageabläufen. Die Lagesicherheitsbewertung muss projektspezifisch verifiziert werden, basierend auf archimedischer Betrachtung plus gemessenen Reibungs-/Haftbeiträgen. Für Genehmigungen sind klare Dokumentationen der Entwurfs- und Qualitätssicherungs-Maßnahmen bereitzustellen. Schulungen des Baustellenpersonals zu Transport, Handhabung und Betonage sind wesentlich. Wirtschaftlich sind Einsparungen durch reduziertes Betonvolumen gegen Zusatzaufwände für Hohlkörper, Logistik und Qualitätssicherung zu bilanzieren. Steigende Material- und CO<sub>2</sub>-Preise verbessern die Perspektive.

Risikoseitig stehen drei Punkte im Vordergrund: Transport- und Handhabungsrisiken dünnwandiger Hohlkörper (beherrschbar über Sicherungen und angepasste Logistik), prozessbedingte Betonagerisiken (adressierbar über angepasste Einbringstrategien) und Nachweisrisiken mangels Standardisierung (abzufedern durch projektspezifische Bemessungs- und Qualitätssicherungskonzepte, instrumentierte Begleitforschung). Für Demonstrationsvorhaben empfiehlt sich ein Monitoringkonzept mit definierten Beobachtungen und Prüfungen (Sichtprüfungen, zerstörungsfreie Verfahren, ggf. Probenahmen).

Zusammenfassend eröffnet das Projekt einen klaren Pfad in Richtung Demonstration und spätere Standardanwendung: vertiefte Bemessungs- und Datengrundlagen, robuste Fertigungs- und QS-Prozesse, früh adressierte regulatorische Fragen und replizierbare Pilotprojekte. Werden diese Bausteine abgestimmt, kann die Material- und Emissionsreduktion bei Pfahlgründungen zügig vom Pilotmaßstab in die breite Praxis übergehen – ein direkt wirksamer Beitrag zu klimaneutralen städtischen Infrastrukturen.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einsatz von Bohrpfählen [2].....	13
Abbildung 2: Überschnittene, tangierende und aufgelöste Bohrpfahlwände [2].....	14
Abbildung 3: Variantenstudie möglicher Aussparungskörper-Geometrien (eigene Darstellung) ....	21
Abbildung 4: Darstellung der FE-Bemessungsergebnisse der Simulation [8] .....	22
Abbildung 5: Darstellung des Herstellungsprozesses 3D-Betongedruckter Aussparungskörper .....	23
Abbildung 6: 3D-Betongedruckte Prüfkörper für den Druckversuch.....	24
Abbildung 7: Auswertung der Würfeldruckfestigkeitsprüfungen .....	25
Abbildung 8: Versuchsaufbau der Biegezugprüfung.....	26
Abbildung 9: Ergebnisse des Biegezugversuchs der Versuchsreihe V03-5 .....	27
Abbildung 10: Ergebnisse des Biegezugversuchs der Versuchsreihe V06-2.....	28
Abbildung 11: Darstellung des ersten Auftriebversuches.....	29
Abbildung 12: Darstellung des Versuchsaufbaus zur Ermittlung eines Reibungskoeffizienten.....	30
Abbildung 13: Herstellung der Aussparungskörpervariante für den Feldversuch.....	32
Abbildung 14: Einbringen der Aussparungskörper in den Bewehrungskorb .....	32
Abbildung 15: Darstellung eines Aussparungskörpers im Bewehrungskorb mit mechanischer Befestigung.....	33
Abbildung 16: Mit Aussparungskörpern bestückter Bewehrungskorb für den Feldversuch .....	34
Abbildung 17: Herstellen des Bohrlochs .....	35
Abbildung 18: Einbringen des Bewehrungskorbes in das Bohrloch zur anschließenden Betonage. 36	
Abbildung 19: Betonieren des Bohrpfahles mittels Betonpumpe und exzentrisch platziertem Betonierrohr.....	37
Abbildung 20: Freigeschnittener, materialreduzierte Bohrpfahl.....	38
Abbildung 21: Freigeschnittenes Bohrpfahlsegment.....	39

## Literaturverzeichnis

- [1] S. Weidner, R. Bechmann, and W. Sobek, "Ressourcenminimierung im urbanen Kontext," *Mauerwerk*, vol. 26, no. 4, pp. 152–160, 2022, doi: 10.1002/dama.202210025.
- [2] Keller Grundbau Ges.m.b.H, *Bohrpfähle und Bohrspfahlwände: Geotechnische Lösungen für die Bauindustrie*. [Online]. Available: <https://www.kellergrundbau.at/sites/keller-at/files/2019-07/broschuere-bohrpfaehle-bohrpfahlwaende-at.pdf> (accessed: Feb. 2 2024).
- [3] G. Möller, *Geotechnik: Grundbau*. Berlin: Ernst & Sohn, 2006.
- [4] *Eurocode 2 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton und Spannbetontragwerken*, ÖNORM B 1992-1-1:2018 01 01, Austrian Standards Institute.
- [5] *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik*, ÖNORM B 1997-1-1:2021 06 01, Austrian Standards Institute.
- [6] *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrspfähle*, ÖNORM EN 1536, Austrian Standards Institute.
- [7] D. Gierlinger, G. Hansemann, R. Schmid, A. Trummer, and S. Peters, "Entwerfen und Konstruieren mit Beton-3D-Druck," *Bautechnik*, vol. 103, no. 1, pp. 12–26, 2026, doi: 10.1002/bate.70063.
- [8] SOFISTIK AG, *SOFISTIK FEA*. Nürnberg, Deutschland, 2025.

## Abkürzungen

3D	Dreidimensional
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
EC	Eurocode
EN	Europäische Norm
FEM	Finite-Elemente-Methode
Ges.mbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
kg	Kilogramm
kN	Kilonewton
m	Meter
MaBo	Materialeinsparung bei Bohrpfehlen
mm	Millimeter
N	Newton
N/mm <sup>2</sup>	Newton pro Quadratmillimeter (Spannung)
ÖNORM B	österreichische Normen im Bereich des Bauwesens
SOB	Schneckenortbetonpfahl

