



**Berichte des Lehr- und Forschungsgebietes Geotechnik**

---

Nr. 40

März 2024

Beiträge zum 13. RuhrGeo-Tag 2024

**Zement in der Geotechnik – noch zeitgemäß?**



**Bergische Universität Wuppertal**  
**Fakultät für Architektur**  
**und Bauingenieurwesen**

**Berichte des Lehr- und  
Forschungsgebietes Geotechnik**

---

**Nr. 40**

**März 2024**

---

Markus Herten (Hrsg.)

Beiträge zum 13. RuhrGeo-Tag 2024

**Zement in der Geotechnik - noch zeitgemäß?**

---

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. M. Herten

Veröffentlicht als Heft Nr. 40  
des Lehr- und Forschungsgebietes Geotechnik

**Herausgeber (im Eigenverlag):**

Prof. Dr.-Ing. M. Herten

Bergische Universität Wuppertal

Lehr- und Forschungsgebiet Geotechnik

Print: ISBN 978-3-00-078295-4

eBook: ISBN 978-3-00-078296-1

# Inhaltsverzeichnis

– Seite –

**Vorwort** ..... iii

## **Klimaneutrale Produktion von Stahl, Zement und Kunststoffen – Lösungswege und Herausforderungen**

*Georg Holtz, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH*

*Dietmar Schüwer, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH*

*Sascha Samadi, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH*..... 1

## **Klinkerarme Bindemittel im Spezialtiefbau**

*Frank Rüßmann, Dyckerhoff GmbH, Wiesbaden* ..... 11

## **Ressourcenschonender Beton im Kontext der Normung**

*Steffen Anders, Bergische Universität Wuppertal*

*Jasmin Otto, Bergische Universität Wuppertal*..... 19

## **Verpressanker im Kontext normativer Einschränkungen und CO2-Einsparungen**

*Fabian Heidenreich, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe*

*Torsten Wichtmann, Ruhr-Universität Bochum*

*Markus Herten, Bergische Universität Wuppertal* ..... 35

## **Nachhaltige Gründungsplanung, mehr als nur Zementreduzierung**

*Thomas Garbers, Aarsleff Spezialtiefbau GmbH, Hamburg*

*Dirk Windeln, Aarsleff Grundbau GmbH, Oberhausen*

*Peter Wardinghus, Centrum Pfähle GmbH, Hamburg* ..... 45

## **In-situ-Messungen zum Verlauf des Frischbetondrucks in Bohrpfählen und Schlitzwänden**

*Hanna Nissen, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe*

*Matthias Pulsfort, IGW Ingenieurgesellschaft für Geotechnik Wuppertal mbH*

*Markus Herten, Bergische Universität Wuppertal* ..... 55



**Der Beitrag von Pfählen kleiner Durchmesser zu einer nachhaltigen  
Spezialtiefbauindustrie**

*Freddy Lopez, TIROLER ROHRE GmbH, Vertrieb Pfahlsysteme Deutschland*

*Jörg Heiland, TIROLER ROHRE GmbH, Vertrieb Pfahlsysteme Deutschland.....67*

**Injektions- statt Düsenstrahlsohle: Wesentlich sanfter und damit ökologischer**

*Christoph Black, Züblin Spezialtiefbau GmbH, Stuttgart*

*Markus Wegerl, Züblin Spezialtiefbau GmbH, Stuttgart*

*Larissa Wynands, Züblin Spezialtiefbau GmbH, Stuttgart .....77*

**Zementreduzierung durch Ausnutzung plastischer Verformungseigenschaften bei  
Dichtwänden**

*Karsten Beckhaus, BAUER Spezialtiefbau GmbH, Schrobenhausen*

*Jan Kayser, Bundesanstalt für Wasserbau*

*Frank Kleist, SKI GmbH + Co.KG*

*Jürgen Quarg-Vonscheidt, Hochschule Koblenz*

*David Alós Shepherd, Karlsruher Institut für Technologie.....89*

**Biologische Methoden in der Geotechnik - Wegweiser oder Wunschdenken?**

*Wolfgang Lieske, Untere Bodenschutz-, Wasser- und Hafenbehörde, Stadt Herne*

*Wiebke Baille, Ruhr-Universität Bochum*

*Torsten Wichtmann, Ruhr-Universität Bochum.....103*

**Ressourcenschonendes Bauen – geogitterbewehrte Erdkörper als  
Ergänzung und Alternative zum klassischen Ingenieurbau**

*Oliver Detert, HUESKER Synthetic GmbH, Gescher*

*Hartmut Hangen, HUESKER Synthetic GmbH, Gescher.....117*

**Entlastungssammler Wupper**

*Marcus Kornweibel, WSW Energie & Wasser AG, Wuppertal*

*Christian Massig, WSW Energie & Wasser AG, Wuppertal*

*Michael Kalz, WSW Energie & Wasser AG, Wuppertal .....129*

# Vorwort

Der von den vier Geotechnik-Lehrstühlen in Bochum, Dortmund, Duisburg-Essen und Wuppertal gemeinsam veranstaltete RuhrGeo-Tag hat sich mittlerweile als regionales Forum für Nordrhein-Westfalen und die angrenzenden Nachbarländer zur fachlichen Diskussion und zum Erfahrungsaustausch über aktuelle geotechnische Fragestellungen und Projekte entwickelt und etabliert.

Der 13. RuhrGeo-Tag widmet sich dem Thema "Zement in der Geotechnik - noch zeitgemäß?". Mit dem Tagungsthema soll zum einen der Tatsache Rechnung getragen werden, dass der Bausektor maßgeblich für klimaschädliche Emissionen verantwortlich ist, zum anderen aber auch die gesellschaftlichen Aufgaben in Bezug auf Wohnen und Infrastruktur weiterhin erfüllt werden müssen. Viele geotechnische Bauwerke wurden erst durch die Entwicklung spezieller Verfahren wie Spritzbeton, Schlitzwände, Gründungspfähle, Verpressanker bis hin zu Senkkästen möglich. Allen gemeinsam ist ein enormer Verbrauch an Zement und Stahl, der gravierend zu den CO<sup>2</sup>-Emissionen beiträgt. Da für viele Anforderungen noch keine emissionsarmen Alternativen zur Verfügung stehen, wird mittlerweile selbst bei Infrastrukturbauten wie dem Tunnelbau für eine U-Bahn hinterfragt, ob die Einsparungen im Verkehr die Belastungen durch den Bau überhaupt aufwiegen. Dies zeigt, wie dringend Lösungen benötigt werden. Diese Veranstaltung soll mit ihren Vorträgen einerseits die in der Geotechnik verwendeten Baustoffe Stahl, Zement und Kunststoff hinsichtlich ihrer Emissionen bewerten sowie Alternativen und Optimierungen aufzeigen, aber andererseits auch deutlich machen, dass in vielen Bereichen noch Alternativen fehlen.

Trotz des regionalen Bezugs verursacht auch eine Tagung, wie der RuhrGeo-Tag, klimaschädliche Emissionen. Es bleibt aber zu hoffen, dass die geführten Diskussionen zumindest zu kleinen Verbesserungen, vielleicht aber auch zu großen Innovationen führen, die diese Emissionen um ein Vielfaches aufwiegen. Betrachten Sie also diese Veranstaltung als eine Investition in die Zukunft und in diesem Sinne wünsche ich uns allen viel Erfolg.

Wuppertal, März 2024

Im Namen der Veranstalter

Markus Herten

# Klimaneutrale Produktion von Stahl, Zement und Kunststoffen – Lösungswege und Herausforderungen

Dr. Georg Holtz, *Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH*

Dietmar Schüwer, *Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH*

Dr. Sascha Samadi, *Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH*

## Zusammenfassung

Der vorliegende Artikel beschreibt die besonderen Herausforderungen und Lösungsansätze für die Transformation der drei energieintensiven Branchen Stahl, Chemie und Zement auf dem Weg zu einer klimaneutralen Produktion.

Die Industrie war im Jahr 2022 mit rund 164 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten für 22 % der gesamtdeutschen Treibhausgas-Emissionen verantwortlich (UBA 2023).<sup>1</sup> Rund 60 % der Emissionen des Industriesektors sind auf die drei energieintensiven Branchen Stahl, Chemie und Zement zurückzuführen (AGORA ENERGIEWENDE UND WUPPERTAL INSTITUT 2019). Der Übergang zu einer klimaneutralen Produktion bis zum Jahr 2045 ist in diesen Branchen aufgrund ihrer prozessbedingten<sup>2</sup> CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie hoher Prozesstemperaturen besonders herausfordernd. Für sein Gelingen sind innovative technologische Konzepte, der Aufbau von Infrastrukturen und langfristig angelegte politische Rahmenbedingungen essentiell, um der Industrie Planungssicherheit für notwendige Investitionen in klimaneutrale Produktionsverfahren zu geben. Zentrale Aufgabe für die kommenden Jahre ist die konkrete und beschleunigte Umsetzung der Transformation und das „Vorausdenken“ der zukünftigen Schritte. Das Wuppertal Institut treibt dieses Vordenken mit seiner wissenschaftlichen Industrie- und Energiesystemforschung insbesondere auch im Rahmen des Forschungsprojekts SCI4climate.NRW bzw. der Initiative IN4climate.NRW mit voran.

---

<sup>1</sup> Dies umfasst nur die direkten Emissionen der Industrie, d. h. indirekten Emissionen, die insbesondere durch die Nachfrage nach Strom im Sektor der Energiewirtschaft entstehen, sind hier nicht enthalten.

<sup>2</sup> „Prozessbedingt“ werden CO<sub>2</sub>-Mengen genannt die nicht aus der Bereitstellung von Energie entstehen, sondern aus chemischen Umwandlungsprozessen bei der Herstellung von Grundstoffen. Z. B. wird bei der Herstellung von Zementklinker Calciumcarbonat (CaCO<sub>3</sub>) in Calciumoxid (CaO) und CO<sub>2</sub> aufgespalten.

# 1 Strategien für die Transformation zu einer klimaneutralen Industrie

Die bisherige eher evolutionär angelegte Strategie einer stetigen Verbesserung der Energieeffizienz in der Industrie kommt angesichts der Aufgabenstellung einer (zumindest weitgehend) klimaneutralen Produktion zunehmend an ihre Grenzen. So sind die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Produktion von Grundstoffen wie Stahl und Zement in den vergangenen zwei Jahrzehnten nur um wenige Prozent gesunken. Es braucht daher einerseits eine beschleunigte Umsetzung bereits etablierter CO<sub>2</sub>-Minderungsmaßnahmen, aber insbesondere auch das Heranziehen weiterer CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategien inkl. der Entwicklung und Umsetzung völlig neuer disruptiver Innovationen.

Drei grundsätzlich erfolgversprechende Transformationsstrategien mit jeweils drei Substrategien können unterschieden werden (AGORA ENERGIEWENDE UND WUPPERRAL INSTITUT 2019):

## 1) Bedarf an (primären) Grundstoffen senken

Dieses Ziel kann durch **Materialsubstitution** (z. B. Verwendung von Holz statt Beton), durch **Materialeffizienz** (z. B. Nutzung von Gradienten-Beton) und insbesondere durch die Etablierung einer **Kreislaufwirtschaft** (z. B. Recycling von Kunststoffen) erreicht werden.

## 2) CO<sub>2</sub>-Entstehung bei der Energiebereitstellung vermeiden

Der zweite Ansatz fokussiert auf die Dekarbonisierung der Energiebereitstellung und beinhaltet unter anderem das klassische Konzept der **Energieeffizienzsteigerung**. Darüber hinaus kommen mit der **Elektrifizierung**, also der Umstellung von verbrennungsbasierten Prozessen auf elektrisch beheizte Prozesse sowie der Umstellung von fossilen Brennstoffen auf **grünen Wasserstoff** oder biogene Brennstoffe weitere Lösungsansätze hinzu.

## 3) Kohlenstoffkreisläufe schließen

Das Schließen von Kohlenstoffkreisläufen als dritter Ansatz vermindert bzw. neutralisiert die Emission derjenigen CO<sub>2</sub>-Mengen, deren Entstehung sich prozessbedingt nicht vermeiden lässt. Das betrifft z. B. in der Zementindustrie das Entweichen von CO<sub>2</sub> aus dem Ausgangsmaterial beim Brennen von Kalkstein. Dies kann durch **Carbon Capture and Storage** (CCS), also dem Einfangen und der dauerhaften Verwahrung von Kohlendioxid geschehen. Wo weiterhin kohlenstoffbasierte Grundstoffe benötigt werden, wie z. B. in der chemischen Industrie, können fossile Ausgangsstoffe (Erdgas und Rohöl) durch **biogene Grundstoffe** oder durch synthetisierte Stoffe auf Basis von Kohlendioxid (**Carbon Capture and Usage, CCU**) und erneuerbaren Energien ersetzt werden.

## 2 Transformation der Stahlindustrie

Bei der Stahlindustrie liegt der Fokus auf der besonders energieintensiven **Primärstahlerzeugung**, welche in Deutschland rund 70 % der Gesamtstahlproduktion ausmacht. Der heute dominierende Prozess ist dabei die Hochofenroute (Abb. 2.1), bei der durch den Einsatz von Koks Kohle – in seiner Funktion als Energieträger und Reduktionsmittel zugleich – hohe spezifische Emissionen von ca. 1,7 t CO<sub>2</sub> pro Tonne Rohstahl freigesetzt werden. Im Gegensatz dazu wird bei der **Sekundärstahlerzeugung** Rohstahl im Elektrolichtbogenofen (EAF) durch Schmelzen von Eisenschrott hergestellt. Da der Strom für den Lichtbogenofen im bundesdeutschen Strommix im Jahr 2023 bereits zu rund 50 % aus erneuerbaren Energien erzeugt wurde (AG ENERGIEBILANZEN 2023) und spätestens im Jahr 2045 klimaneutral sein muss<sup>3</sup>, ist die Sekundärstahlroute relativ einfach (weitgehend) zu dekarbonisieren.

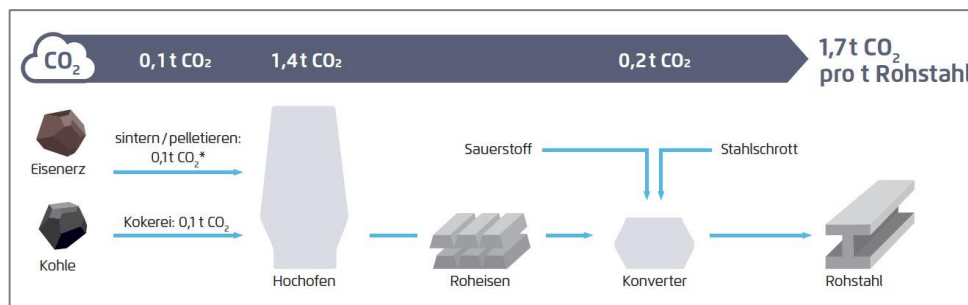


Abb. 2.1: Heute dominierender Prozess zur Primärstahlherstellung: Hochofenroute (AGORA ENERGIEWENDE UND WUPPERTAL INSTITUT (2019), Lizenz: CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>))

Als die erfolgversprechendste Alternativroute zur Primärstahlherstellung kristallisiert sich derzeit die wasserstoff- (oder übergangsweise auch erdgas-) basierte **Direktreduktion von Eisenerz (DRI)** zu Eisenschwamm im Schachtofen heraus. Bei diesem Verfahren werden Eisenerzpellets zu schmelzfähigem Eisenschwamm („Direct Reduced Iron“, DRI) direktreduziert. Als Reduktionsmittel wird anstelle von Koks Kohle Wasserstoff verwendet, der nahezu klimaneutral hergestellt werden kann. Der erzeugte Eisenschwamm wird anschließend entweder im EAF (vgl. Sekundärstahlroute) oder in einem Einschmelzer mit anschließendem klassischem Konverter mit Hilfe von „grünem“ Strom zu Rohstahl veredelt. Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck lässt sich dadurch gegenüber der Hochofenroute um rund 97 Prozent von 1,7 t<sub>CO2</sub> auf etwa 0,05 t<sub>CO2</sub> pro Tonne Rohstahl reduzieren. Weltweit wurde in den letzten Jahren ein erheblicher Kapazitätsaufbau von DRI-Anlagen angekündigt.

<sup>3</sup> Das Erneuerbare-Energien-Gesetz 2023 setzt für das Jahr 2030 ein Zwischenziel von mind. 80 % erneuerbarem Stromanteil am Bruttostromverbrauch.

Weitere Alternativen zur Hochofenroute sind die strombasierte **Elektrolyse** von in Natronlauge gelöstem Eisenerz mit anschließender Weiterverarbeitung im EAF zu Rohstahl. Dieses Verfahren weist zwar im Vergleich zur Direktreduktion theoretisch eine höhere Energieeffizienz auf, befindet sich jedoch derzeit noch in Entwicklung und es ist unklar, wann erste kommerzielle Anlagen errichtet werden können. Auch die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung/-Nutzung (**CCUS**) an bestehenden Hochofen oder mit Umstellung auf Schmelzreduktionsverfahren (sog. **HISARNA**-Verfahren) kämen zur Dekarbonisierung in Frage. Sie sind jedoch sowohl hinsichtlich Energieeffizienz als auch aus ökologischer Sicht als „End-of-Pipe“-Technologie dem DRI-Verfahren unterlegen.

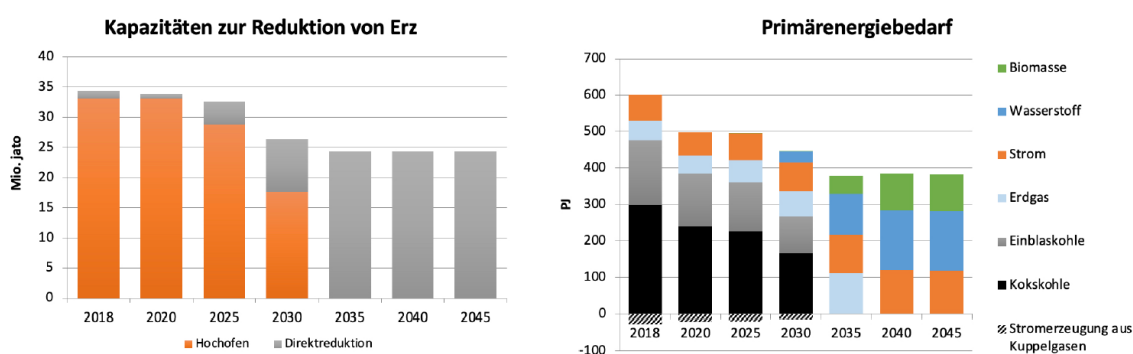


Abb. 2.2: Klimaschutzszenario zur Transformation der Stahlerzeugung (SCI4CLIMATE.NRW 2023)

Wie Abb. 2.2 anhand eines Klimaschutzszenarios zeigt, ließen sich die Kapazitäten zur Roheisenerzeugung in Deutschland im Rahmen üblicher Reinvestitionszyklen bereits bis zum Jahr 2035 komplett auf DRI-Anlagen umrüsten. Der dafür erforderliche Primärenergiebedarf könnte dabei vorübergehend teilweise noch mit Erdgas gedeckt werden, bevor dann ab dem Jahr 2040 zu 100 % auf die klimaneutralen Energieträger Strom, Wasserstoff und Biomasse umgestellt würde.

### 3 Transformation der Chemieindustrie

Die chemische Industrie ist sehr komplex und durch eine Vielzahl von Produkten und hochgradig integrierten Prozessen auf unterschiedlichen Temperaturniveaus charakterisiert, auf die hier nicht vollumfänglich und detailliert eingegangen werden kann. Der Fokus des vorliegenden Beitrags liegt auf der Herstellung von Kunststoffen durch die Petrochemie. Selbst dieser (zentrale) Ausschnitt der Chemie kann im Rahmen des vorliegenden Beitrags nicht detailliert diskutiert werden. Es gibt jedoch zwei wesentliche Bereiche, die für die Transformation zentral sind und für die nachfolgend grundsätzlichen Lösungsansätze beschrieben werden:

- Prozessdampf als Querschnittstechnologie und
- Ausgangsstoffe für die Herstellung chemischer Grundstoffe

**Prozessdampf** wird heute überwiegend in industriellen, fossil befeuerten KWK-Anlagen sowie mit Erdgasdampfkesseln erzeugt. Als Alternativen kommen hier die Elektrifizierung mit Hochtemperatur-Wärmepumpen (bis ca. 200 °C) in Kombination mit einer Abwärmequelle, Elektro- bzw. Elektrodenkessel (>200 °C), erneuerbare Wärmequellen wie Solarthermie (konzentrierende Systeme bis ca. 300 °C) oder Tiefengeothermie (bis ca. 180 °C) sowie alternative Brennstoffe wie Biomasse oder grüner Wasserstoff in Frage. Nähere Ausführungen zu den Stärken und Schwächen dieser Alternativen und daraus abgeleitete Priorisierungen sind in dem Vier-Stufen-Modell von IN4climate.NRW und SCI4climate.NRW beschrieben (SCHÜWER UND HOLTZ 2023).

Die große Vielfalt an heute produzierten Kunststoffen wird aus einer überschaubaren Menge von chemischen Grundstoffen erzeugt, die den Gruppen der **Olefine** (Ethylen, Propylen) und **Aromate** (Benzol, Toluol oder Xylol) zugehörig sind. Diese Grundstoffe werden heutzutage standardmäßig aus dem **Feedstock Naphtha**, welches in einer Raffinerie aus Rohöl gewonnen wird, in einem sog. **Steamcracker** hergestellt und anschließend durch Polymerisation zu Plastikprodukten weiterverarbeitet (s. Abb. 3.1). Über den gesamten Lebensweg (inklusive thermischer Verwertung) betrachtet, verursacht eine Tonne konventionell hergestelltes Plastik ca. fünf Tonnen CO<sub>2</sub>.

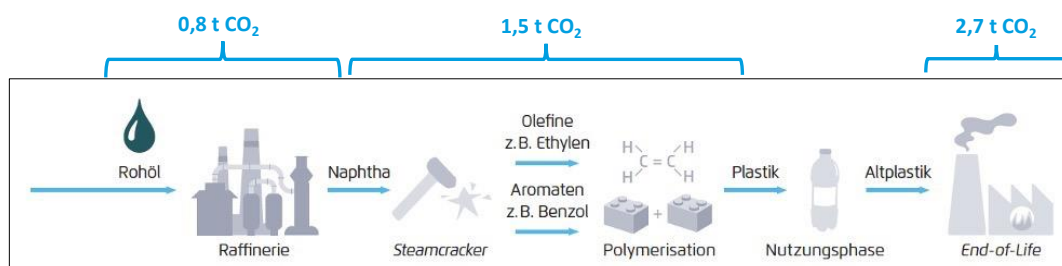


Abb. 3.1: Heute dominierende Prozesskette zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Kunststoffen und CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Prozessschritt pro Tonne Kunststoff (AGORA ENERGIEWENDE UND WUPPERTAL INSTITUT (2019), eigene Ergänzungen, Lizenz: CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>))

Um die Kunststoffproduktion zu defossilisieren, bieten sich mit dem chemischen Recycling, der Nutzung von grünem Naphtha und der Etablierung neuer Plattformchemikalien drei unterschiedliche Lösungswege an.

Beim **chemischen Recycling** werden Kunststoffabfälle unter sehr hohen Temperaturen (bis zu 1.500 °C) und hohem Druck entweder per **Pyrolyse** (Zersetzung von Kohlenwasserstoffen unter Luftabschluss) oder per **Gasifizierung** (Erzeugung von Synthesegasen unter Sauerstoffeinfluss) wieder in ihre chemischen Bestandteile

(Monomere) zerlegt. Sie können dann wieder als Grundstoffe für die Polymerisation genutzt werden und somit fossiles Naphtha bzw. Rohöl einsparen. Beispielsweise hat Covestro in Leverkusen im Jahr 2023 eine Pilotanlage zum Recycling von Polycarbonaten in Betrieb genommen. Auch wenn das chemische Recycling keine Nachteile wie beispielsweise den Effekt des Downcyclings beim mechanischen Recycling aufweist, sind viele Fragen in Bezug auf einen erheblichen Logistik-, Energie- und Kostenaufwand noch ungelöst (NABU 2024).

Einen weiteren Weg bietet die Umstellung des fossilen Naphthas auf **grünes Naphtha** unter Beibehaltung der Steamcracker-Route. Naphtha ( $C_{10}H_8$ ) kann in sog. Fischer-Tropsch-Anlagen aus Synthesegas gewonnen werden, welches aus Biomasse oder synthetisch aus  $CO_2$  und Wasserstoff hergestellt werden kann. Eine Fischer-Tropsch-Anlage produziert immer eine gewisse Bandbreite an Kohlenwasserstoffen, so dass die Produktion von grünem Naphtha über diese Route analog zur heutigen Produktion in Raffinerien auch zukünftig an die Herstellung von Kraftstoffen (z. B. Kerosin) gekoppelt wäre.

Als dritte Alternative ermöglicht die Etablierung von **grünem Methanol** als eine neue sog. Plattformchemikalie die Umgehung der Steamcracker-Route. Methanol ( $CH_3OH$ ) wird dabei ebenfalls ausgehend von Biomasse oder den Grundbaustoffen Wasserstoff und Kohlendioxid synthetisiert. Aus dem Methanol lassen sich wiederum jeweils die für die Kunststoffproduktion erforderlichen Grundstoffchemikalien, d.h. Olefine (Methanol-zu-Olefin-Route = **MtO**) bzw. Aromate (Methanol-zu-Aromate-Route = **MtA**), herstellen.

Für eine  $CO_2$ -basierte Synthese von sowohl grünem Naphtha als auch von grünem Methanol muss für die Klimaneutralität der Wasserstoff per Elektrolyse mit erneuerbarem Strom produziert werden. Zudem muss das  $CO_2$  aus biogenen Quellen stammen oder – mit weiterem Energieaufwand – aus der Luft mit Direct-Air-Capture-Anlagen gewonnen werden. Neben diesen Herausforderungen ergeben sich über die Nutzung von Kohlenstoff aus biogenen Quellen oder aus der Atmosphäre jedoch auch neue Potenziale zur Kohlenstoffbindung in langlebigen Produkten (negative Emissionen).

Welche der drei beschriebenen Pfade – ggf. auch kombiniert – von der Industrie eingeschlagen werden, ist aus heutiger Sicht noch unklar.



## 4 Transformation der Zementindustrie

Abb. 4.1 zeigt den Prozess zur Herstellung von Zement. Zunächst wird der Ausgangsstoff Kalkstein im Zyklonvorwärmer erwärmt, im Kalzinator<sup>4</sup> weitgehend „entsäuert“ und anschließend im Drehrohrföfen zu Zementklinker gebrannt. Der Klinker wird in der Zementmühle schließlich gemahlen und mit weiteren Zuschlagstoffen zu Zement gemischt.

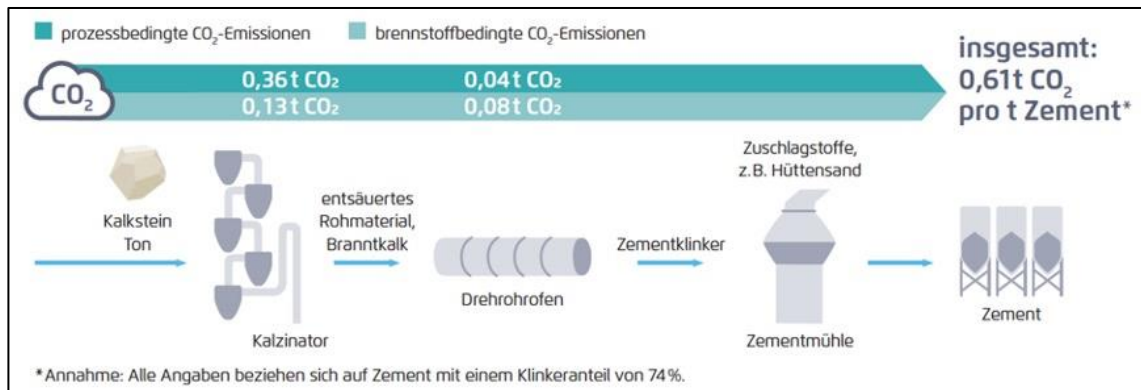


Abb. 4.1: Der Drehföfen als heute dominierender Prozess zur Herstellung von Portlandzementklinker (AGORA ENERGIEWENDE UND WUPPERTAL INSTITUT (2019), Lizenz: CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>))

Die mögliche zukünftige Transformation der Zementindustrie in Richtung einer klimaneutralen Produktion wird in SCHÜWER ET AL. (2024) ausführlich in Form von Roadmaps beschrieben. Sie muss im Wesentlichen in diesen drei Bereichen stattfinden:

1. Substitution fossiler Energieträger im thermischen Klinkerbrennprozess
2. Entwicklung und Markteinführung neuer CO<sub>2</sub>-reduzierter Zemente und materialeffizienter Betonbautechniken
3. Auffangen der prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Entsäuern des Rohmaterials und Brennen von Zementklinker

Bereits heute wird ca. 70 % der in der Zementindustrie eingesetzten **thermischen Energie** durch die Nutzung von abfallbasierten Brennstoffen (ABS) erzeugt. Ca. 30 % der dafür eingesetzten Abfälle sind biogenen Ursprungs. Eine Beibehaltung und auch Ausweitung der ABS-Anteile erscheinen insbesondere dann sinnvoll, wenn dafür auch zukünftig nur nicht recycelbare Abfälle eingesetzt werden, die in jedem Fall einer thermischen Verwertung zugeführt werden müssen. Als Substitute für verbleibende fossile Brennstoffe wie Kohlenstaub oder Petrolkoks kommen prinzipiell Strom, Wasserstoff und Biomasse in Frage, wobei sich die entsprechenden Technologien für

<sup>4</sup> Nicht jedes Zementwerk verfügt über einen Kalzinator. In Anlagen ohne Kalzinator wird das Rohmaterial im Drehrohrföfen entsäuert.

die Nutzung von Strom bzw. Wasserstoff teils in fortgeschrittenen (z. B. elektrische Kalzinatoren), teils aber noch in frühen Entwicklungsstadien (H<sub>2</sub>- oder Plasma-Brenner in Drehrohröfen) befinden.

Rund 2/3 der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Klinkerbrennprozess sind jedoch prozessbedingt. Sie stammen aus dem Ausgangsstoff Kalkstein (Calciumcarbonat, CaCO<sub>3</sub>) und werden bei der Umformung („Entsäuerung“) zu Branntkalk (Calciumoxid, CaO) freigesetzt. Daher kommt in der Zementindustrie dem Auffangen und dauerhaften Einlagern (**CCS**) bzw. Wiederverwenden (**CCU**) von CO<sub>2</sub> als Hebel zur Reduktion der nicht-vermeidbaren prozessbedingten Emissionen eine große Bedeutung zu.

Zusätzlich können die Entwicklung und Markteinführung neuer **CO<sub>2</sub>-reduzierter Zemente** und **materialeffizienter Betonbautechniken** wirksame Hebel zur Reduktion des Bedarfs an Zementklinker und der mit seiner Herstellung einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen sein.

## 5 Fazit

Die Transformation der Stahl-, Chemie- und Zementindustrie hin zu einer (nahezu) klimaneutralen Produktion ist technisch möglich, aber an verschiedene Voraussetzungen gebunden:

- Ein schneller Ausbau der erneuerbaren Energien, um zukünftig ausreichende Mengen an grünen Energieträgern zur Verfügung zu haben.
- Die baldige Errichtung von benötigten Infrastrukturen (insbesondere Wasserstoff- und CO<sub>2</sub>-Pipelines sowie Stromnetze), z. T. durch den Umbau bestehender Infrastrukturen.
- Rahmenbedingungen, in denen der Umbau für Unternehmen wirtschaftlich tragfähig ist (ausreichend hohe CO<sub>2</sub>-Preise, Klimaschutzverträge, u. a.).
- Gesellschaftliche Akzeptanz für die notwendigen Anlagen und Infrastrukturen und dafür eine frühzeitige und angemessene Partizipation aller relevanten Stakeholder am Transformationsprozess.

Eine Realisierung der Transformation hin zu einer klimaneutralen Industrie innerhalb der nächsten 20 bis 25 Jahre wird deutlich wahrscheinlicher und nachhaltiger, wenn es gelingt, nicht nur die Prozesse umzustellen, sondern auch weniger Primärgrundstoffe zu nutzen, indem die Recyclingraten erhöht, die Materialeffizienz gesteigert und Lebensstile suffizienter werden.

## Literatur

- AG ENERGIEBILANZEN (2023): *Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern*, [https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/10/STREERZ\\_Abgabe-12-2023.pdf](https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/10/STREERZ_Abgabe-12-2023.pdf)
- AGORA ENERGIEWENDE und WUPPERTAL INSTITUT (2019): *Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement*, [www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung\\_Industrie/164\\_A-EW\\_Klimaneutrale-Industrie\\_Studie\\_WEB.pdf](http://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf)
- NABU (2024): *Chemisches Recycling von Kunststoffen - Potenziale, Risiken und viele offene Fragen*, [www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html](http://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/recycling/27543.html)
- SCHÜWER ET AL. (2024): *Dekarbonisierung der industriellen Produktion (Dekarblnd). AP3: Bewertung von Dekarbonisierungsmaßnahmen und Erarbeitung von Eckpunkten einer Roadmap für die Zementindustrie*, [www.umweltbundesamt.de/publikationen/dekarbonisierung-der-industriellen-produktion-1](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/dekarbonisierung-der-industriellen-produktion-1)
- SCHÜWER, D. und HOLTZ, G. (2023): *Bereitstellung klimaneutraler Prozesswärme für die Industrie: Ein 4-Stufen-Modell*, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* et 10/2023, S. 37 ff, <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-84165>
- UBA (2023): *Emissionsübersichten in den Sektoren des Bundesklimaschutzgesetzes vom 15.03.2023*, [www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2023\\_03\\_15\\_em\\_entwicklung\\_in\\_d\\_ksg-sektoren\\_pm.xlsx](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2023_03_15_em_entwicklung_in_d_ksg-sektoren_pm.xlsx)



# Klinkerarme Bindemittel im Spezialtiefbau

Dipl.-Ing. Frank Rüßmann, *Dyckerhoff GmbH, Wiesbaden*

## Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat der Klimaschutz in Deutschland erheblich an Bedeutung zugenommen. Das kürzlich überarbeitete Klimaschutzgesetz gibt klare Vorgaben mit dem Ziel der Klimaneutralität bis 2045. Da Portlandzementklinker einen nicht unerheblichen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck aufweist, steht die Zementindustrie vor großen Herausforderungen auf ihrem Weg zur Klimaneutralität. Dyckerhoff als Teil der italienischen Buzzi-Gruppe nimmt diese Verantwortung ernst und hat feste Etappenziele der CO<sub>2</sub>-Reduzierung in ihrer Roadmap festgeschrieben. Ein wesentlicher Hebel zur Erreichung des Zwischenziels 2030 wird der Einsatz klinkereffizienter Zemente sein. Gerade im Spezialtiefbau werden klinkerarme Bindemittel, wie Fertigdichtwandmassen, HDI-Binder oder CEM III-Zemente bereits seit Jahren erfolgreich eingesetzt. Weitere Zementsorten mit geringerer CO<sub>2</sub>-Belastung (z. B. CEM II/C) werden seit einigen Jahren angeboten und finden im DSV-Verfahren oder auch in Betonsorten für Pfähle/Schlitzwände ihre Anwendung. Die Etablierung von klinkereffizienten Zementen in Ausschreibungen und Richtlinien sollte das gemeinsame Ziel der „Bauindustrie“ sein. Denn nur so lassen sich die notwendigen CO<sub>2</sub>-Einsparungen erreichen, so dass Zement und Beton auch zukünftig als „zeitgemäße“ Baustoffe angesehen werden.

## 1 Quo Vadis Zement

Im aktualisierten Bundesklimaschutzgesetz vom 21.06.2023 wird bis 2030 eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von mindestens 65% und bis 2040 um mindestens 88% bezogen auf das Basisjahr 1990 festgeschrieben. 2045 soll dann die Klimaneutralität in Deutschland erreicht sein. Dies stellt insbesondere die Zementindustrie vor eine große Herausforderung. Erforderliche Technologien zur Dekarbonisierung, wie z. B. die Abscheidung und Speicherung bzw. Nutzung von CO<sub>2</sub> (CCS/CCU), stehen heute noch nicht vollständig im industriellen Maßstab zur Verfügung und erfordern immense Investitionen. Zement und Beton werden auch in den kommenden Jahren unersetzbare Baustoffe bleiben, um die zukünftigen Herausforderungen im Bausektor zu meistern.

## 2 Roadmap Dyckerhoff

Dyckerhoff als Teil der italienischen Buzzi-Gruppe nimmt diese Verantwortung ernst und hat feste Meilensteine der CO<sub>2</sub>-Reduzierung in ihrer Roadmap festgeschrieben. Der Weg zur Klimaneutralität wird stets flexibel an die Randbedingungen angepasst.

Bei der Zementherstellung wird bei hohen Temperaturen der Rohstoff Kalkstein zu Klinker gebrannt. Die im Drehofen stattfindende chemische Reaktion setzt bei der Entsäuerung des Kalksteins CO<sub>2</sub> frei. Weitere CO<sub>2</sub>-Emissionen resultieren aus dem Brennstoffeinsatz, dem Stromverbrauch z. B. für Mahlung sowie den Transportprozessen.

### 2.1 Hebel zur CO<sub>2</sub>-Reduktion bis 2030

Dyckerhoff/Buzzi will durch folgende Maßnahmen bis 2030 weitere CO<sub>2</sub>-Einsparungen realisieren:

- Steigerung der Effizienz der eigenen Betonproduktion, CO<sub>2</sub>-optimierte Betonrezepturen/Bauweisen fördern
- Effizienz beim Verbrauch thermischer und elektrischer Energie verbessern. Anteil an „grünem Strom“ erhöhen durch Aufbau von Photovoltaik -und/oder Windkraftanlagen
- Erhöhung des Anteils der Brennstoffe mit geringerem Emissionsfaktor bzw. mit mehr Biomasse
- Entwicklung und Ausbau klinkereffizienter Zemente und Bindemittel im Produktportfolio. Reduzierung des Klinkergehaltes bis 2030 auf 63%
- Investitionen in Projekte zur Abscheidung und Speicherung bzw. Nutzung von CO<sub>2</sub> (CCS/CCU). Ab 2027 startet der Bau einer Anlage im Werk Deuna – Ziel für 2030 etwa 280.000 t CO<sub>2</sub> pro Jahr abzuscheiden

### 2.2 Minderungspfad über die verschiedenen Hebel bis 2050

Bis 2030 liegen die Schwerpunkte der CO<sub>2</sub>-Einsparungen bei der Optimierung der Produktpalette hin zu klinkereffizienten Zementen, dem Ausbau von „grünem Strom“ im Strommix sowie der Optimierung der Brennstoffe hin zu höheren Biomasseanteilen. Die Effizienzsteigerung bei unseren eigenen Betonbeteiligungen leistet ebenfalls einen Beitrag. Ab 2030 sollen die CCU/CCS Technologien verstärkt ihren Einsatz finden und 2045/2050 mehr als 50% der CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren, so dass dann eine CO<sub>2</sub> neutrale Zementproduktion möglich wird. Den geplanten Minderungspfad bei Buzzi/Dyckerhoff zeigt Abb. 2.1.

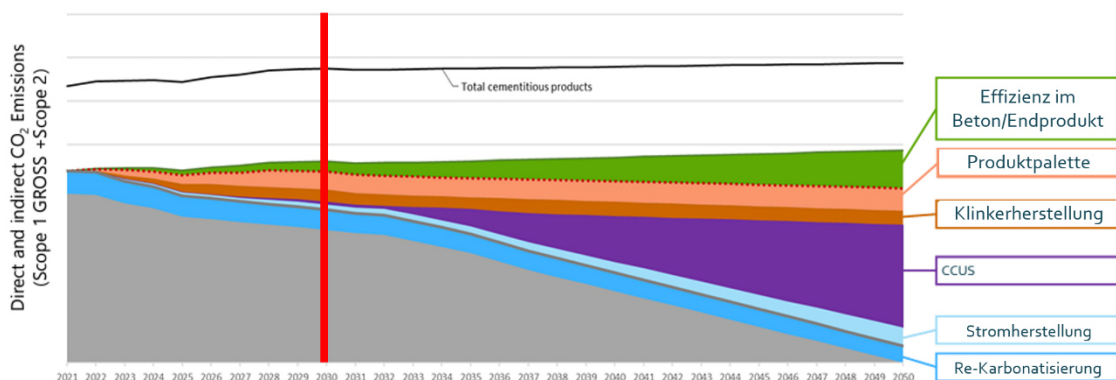


Abb. 2.1: Minderungspfad über die verschiedenen Hebel

### 2.3 Geplante Produktpalette Dyckerhoff in 2030

Der Klinkeranteil beeinflusst maßgeblich den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Zementsorte. Auf klinkerreiche CEM I-Zemente sollte demnach möglichst verzichtet werden, wenn dies technisch möglich ist. Dyckerhoff wird folglich 2030 nur noch eine kleine Auswahl an sehr leistungsfähigen CEM I 52,5-Zementen produzieren. CEM I-Zemente werden sukzessive durch leistungsfähige Kompositzemente ersetzt werden. Der Anteil an CEM III-Zementen wird bis 2030 leicht zurückgehen, da erwartet wird, dass die Verfügbarkeit von „reaktiven“ Hüttensanden durch die Transformation der Stahlindustrie rückläufig sein wird und der verfügbare Anteil Hüttensand insbesondere für klinkereffiziente CEM II-Zemente benötigt wird. Alternativen zum Hüttensand wären calcinierte Tone oder natürliche Puzzolane neben Kalksteinmehl als Zementhauptbestandteile. Der Anteil klinkereffizienter Zemente wie CEM II/B, CEM II/C wird zunehmen und auch CEM VI- oder CEM X-Zemente mit weiter reduzierten Klinkeranteilen (34-49%) werden angeboten.

## 3 Anwendungen von Zement / Bindemitteln im Spezialtiefbau

Zemente und mineralische Bindemittel finden in nahezu allen Bereichen des Spezialtiefbaus Anwendung. Sei es für die Herstellung von Dicht- und Schmalwänden, im Beton für Schlitzwände und Bohrpfähle, für Injektionen mit Nieder- oder Hochdruck (DSV-Verfahren), bei der Anker-/Mikropfahlherstellung sowie bei Verfüllungen. Für all diese Anwendungsgebiete liefert Dyckerhoff seit Jahrzehnten Zemente und Spezialbindemittel.

### 3.1 CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der verwendbaren Dyckerhoff Bindemittel / Zemente

Um einen Eindruck des „CO<sub>2</sub>-Rucksacks“ der einzelnen Spezialbindemittel und Zementsorten zu erhalten, wurden im Vortrag die in den Anwendungsgebieten verwendbaren Dyckerhoff Zemente und Bindemittel beispielhaft aufgeführt und jeweils das Global Warming Potential (GWP net) angegeben. Dieser Wert umfasst CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Scope A1-A3, das bedeutet alle direkten und indirekten Emissionen aus der Herstellung inkl. Mahlung und Rohstofftransporte bis zur Bilanzgrenze Werkstor. Der Transport zur Baustelle ist nicht berücksichtigt. Basisjahr für die Berechnung ist 2022. In Deutschland ist es üblich, diese Werte als Nettowerte anzugeben (analog DIN 16908, d.h. es fehlen die Emissionen aus der Verbrennung von Abfällen). Zusätzlich wurde eine ökonomische Allokation für Hüttensand und Flugasche berücksichtigt. Alle angegebenen Werte sind über eine zertifizierte Software auf Basis der Produktionsdaten berechnet worden und nicht extern verifiziert. Auf Anfrage stellt Dyckerhoff seinen Kunden „Umweltdatenblätter“ (Environmental data sheet) als Selbstauskunft (self declaration) für die genutzte Zement/Bindemittelsorte aus.

Beispielhaft werden hier lediglich folgende Anwendungsgebiete vorgestellt: Dichtwände, Niederdruckinjektionen und Beton für Bohrfähle/Schlitzwände.

#### 3.1.1 Dichtwände mit Zement-Bentonitmischungen (Dyckerhoff SOLIDUR)

Zum Bau von Dichtwänden zur vertikalen Abdichtung von Dämmen, Baugruben oder Deponien (vgl. Abb. 3.1) werden Zement-Bentonitsuspensionen verwendet, häufig als Trockenfertigmischungen, wie z. B. Dyckerhoff SOLIDUR.

Das Global Warming Potential (GWP net) von Dyckerhoff SOLIDUR beträgt 146 kg CO<sub>2</sub>-eq pro t SOLIDUR. Unter Annahme einer Transportentfernung vom Herstellwerk zur Baustelle von 250 km kommen noch 22 kg CO<sub>2</sub>-eq. / t hinzu (= 168 kg CO<sub>2</sub>-eq. / t).



Abb. 3.1: Dichtwandbau im Greiferverfahren mit SOLIDUR



### 3.1.2 Niederdruckinjektionen

Niederdruckinjektionen im Lockergestein dienen meist zur Verfestigung, zum Teil auch der Abdichtung des Baugrundes. Ausführungen als Lanzen-, Schlauch oder Manschettenrohrinjektionen sind üblich. Je nach Injektionsaufgabe und Baugrund werden entweder DÄMMER, Normzemente, Feinzemente ( $d_{95} < 30 \mu\text{m}$ ) oder Feinstzemente ( $d_{95} < 20 \mu\text{m}$ ) eingesetzt. Dyckerhoff bietet die gesamte Bandbreite an. Die untenstehende Tab. 3.1 zeigt das GWP net der einzelnen Produkte

Tab. 3.1: GWP net von Dyckerhoff Injektionsbindemitteln

DY-Produktname	Normbezeichnung	Feinheit	GWPnet (self decl.)
DÄMMER M		$d_{95} < 60 \mu\text{m}$	326 kg CO <sub>2</sub> -eq. / t
Sulfadur Doppel	CEM I 42,5 R SR0 (na)	$d_{95} < 55 \mu\text{m}$	679 kg CO <sub>2</sub> -eq. / t
PZ Dreifach	CEM I 52,5 R	$d_{95} < 45 \mu\text{m}$	707 kg CO <sub>2</sub> -eq. / t
Variodur 50	CEM III/A 52,5 N SR/NA	$d_{95} < 30 \mu\text{m}$	445 kg CO <sub>2</sub> -eq. / t
MIKRODUR RU	(Basis CEM III/C)	$d_{95} < 9,5 \mu\text{m}$	320 kg CO <sub>2</sub> -eq. / t
MIKRODUR PU	(Basis CEM I)	$d_{95} < 9,5 \mu\text{m}$	860 kg CO <sub>2</sub> -eq. / t

### 3.1.3 Bohrpfähle / Stahlbetonschlitzwände

Bohrpfähle eignen sich zur Gründung von Bauwerken, bei denen hohe Lasten in den Baugrund abgetragen werden müssen. Sie werden zum Teil auch wie Stahlbetonschlitzwände für Baugrubenumschließungen eingesetzt. An den Beton werden bei diesen Bauweisen besondere Anforderungen gestellt, die in der DIN EN 1536 und DIN SPEC 18140 festgelegt sind. Dyckerhoff Beton verfügt seit Jahren über eine Vielzahl an Betonrezepturen gemäß diesen Anwendungsnormen. Vorgestellt werden hier 2 aktuelle Betone mit zugehörigem GWP.

#### **C 25/30, Expositionsklasse: XC4, XF1, XA1**

Zement: Dyckerhoff CEDUR - CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N

Zementgehalt: 325 kg/m<sup>3</sup> + FA

W/Z = 0,52

**GWP net: 168 kg CO<sub>2</sub>-eq. / m<sup>3</sup>**

#### **C 35/45, Expositionsklasse: XC4, XD3, XS3, XF2, XA2**

Zement: Dyckerhoff HOZ Doppel - CEM III/A 42,5 N

Zementgehalt: 395 kg/m<sup>3</sup>

W/Z = 0,45

**GWP net: 180 kg CO<sub>2</sub>-eq. / m<sup>3</sup>**

### **3.2 IST-Zustand und weitere Einsparpotentiale**

Im Spezialtiefbau werden klinkerarme Bindemittel, wie Fertigdichtwandmassen, HDI-Binder oder CEM III-Zemente schon seit Jahren erfolgreich eingesetzt. Weitere CO<sub>2</sub>-reduzierte Zementsorten (z. B. CEM II/C) werden mittlerweile auch angeboten und finden im DSV-Verfahren oder in Betonsorten für Pfähle/Schlitzwände ihre Anwendung. Um weitere CO<sub>2</sub>-Einsparungen zu realisieren, muss auch bei Planern und Genehmigungsbehörden ein Umdenken stattfinden. Der Bau der U5 in Hamburg ist dafür ein gutes Beispiel. Hier wurde von der Hamburger Hochbahn der Fokus schon in der Planung auf klimaschonendes Bauen gelegt. Als Standardzement wurde ein CEM III/B festgelegt, der aufgrund der normativen Zusammensetzung einen geringen Klinkeranteil (20 % bis 34 %) aufweist (vgl. <https://schneller-durch-hamburg.de/u5-klimaschutz.de>).

## **4 Entwicklung und Einführung neuer Zemente**

Um die vorhandenen CO<sub>2</sub>-Einsparpotentiale zu nutzen, muss eine performancebasierte Zementauswahl am besten schon bei der Planung und in der anschließenden Ausschreibung, bezogen auf die einzelnen Anwendungen, getroffen werden. Für Dyckerhoff als Zementhersteller bedeutet das, unser Angebot an klinkereffizienten Zementen stetig auszubauen. Werden lediglich die Anwendungen betrachtet, in denen es auf Endfestigkeit (bzw. 28-Tage-Festigkeit) ankommt, können klinkerreduzierte Zemente, wie CEM II/C oder CEM III-Zemente auch heute schon einen effektiven Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung leisten. Bei hohen Anforderungen an die Frühfestigkeit müssten CEM II/A oder CEM II/B-Zemente eingesetzt werden, da die frühe Reaktivität des Bindemittels hauptsächlich vom Portlandzementanteil und der Feinheit beeinflusst wird. Der herkömmliche CEM I 42,5 R lässt sich bereits heute schon durch Kompositzemente ersetzen. Aus diesem Grund hat Dyckerhoff die Produktion des CEM I 42,5 R zum Ende des Jahres 2023 eingestellt.

Die neuen Zementnormen (DIN EN 197 – 5 + 6) ermöglichen noch weitere klinkerreduzierte Kompositzemente, wie z. B. CEM VI-Zemente mit Klinkeranteilen von 34-49% oder Zemente mit Feinanteilen aus dem Recyclingprozess von Beton. Ein Einsatz dieser Zemente ist bei passenden Anwendungen (z. B. tiefliegende Sohle beim DSV-Verfahren) oder mit geringeren W/Z Werten möglich.

## 5 Fazit

Bereits heute besteht die Möglichkeit durch anwendungsbezogene, performancebasierte Auswahl der zu verwendenden Zemente oder Bindemittel einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung zu leisten. Zukünftig werden CEM VI-Zemente mit weiter reduziertem Klinkergehalt auf den Markt kommen, die ebenfalls Anwendungsgebiete finden werden. Die Etablierung klinkereffizienter Zemente sollte dort, wo sie technisch sinnvoll sind, unser aller Ziel sein. Denn nur so können die CO<sub>2</sub>-Einsparungsziele erreicht und dafür gesorgt werden, dass der Einsatz von Zement und Beton im Spezialtiefbau auch in 2030 noch „zeitgemäß“ ist.

## Literatur

HAMBURGER HOCHBAHN, (13.09.2022) *U5 setzt Maßstäbe beim Klimaschutz*, (online) <https://schneller-durch-hamburg.de/u5-klimaschutz.de> (abgerufen am 15.01.2024)

SIEVERT, T., HAINER, T., SCHEIDT, J., REMARQUE, W., (2023) *Neue Zemente um Spannungsfeld zwischen Ressourcenverfügbarkeit und Dauerhaftigkeit*, veröffentlicht in Zeitschrift Beton, Ausgabe 04/23, S136 -139, Verlag concrete content UG



# Ressourcenschonender Beton im Kontext der Normung

Prof. Dr.-Ing. Steffen Anders, *Bergische Universität Wuppertal / Institut für Konstruktiven Ingenieurbau & Lehrstuhl für Werkstoffe im Bauwesen*

M.Sc. Jasmin Otto, *Bergische Universität Wuppertal / Lehrstuhl für Werkstoffe im Bauwesen*

## Zusammenfassung

Ressourcenschonender Beton wird in diesem Beitrag sowohl im Hinblick auf die Treibhausgasemissionen bzw. den Primärenergiebedarf als auch auf die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung betrachtet. Zunächst werden kurz Anforderungen beispielsweise aus Gebäudezertifizierungen oder neuen Richtlinien beschrieben, die in Zukunft die Anforderungen an die Nachhaltigkeit nicht nur von Beton erhöhen werden.

Im Anschluss werden Möglichkeiten zur Senkung der Treibhausgasemissionen bei der Verwendung von Zement bzw. Beton beschrieben. Anschließend werden Einsatzbereiche und -grenzen rezyklierter Gesteinskörnung in Beton dargestellt. Es wird jeweils unterschieden, ob die Verwendung im allgemeinen Hoch- und Tiefbau oder in den Regelungsbereichen der ZTV-ING und ZTV-W stattfinden soll.

In die Betrachtung fließen darüber hinaus Änderungen ein, die sich mit der in Kürze zu erwartenden Einführung der neuen Beton- und Ausführungsnormen DIN 1045-2/3 ergeben werden. In diesem Zusammenhang werden kurz die Auswirkungen der Einführung der Betonbauqualitätsklassen (BBQ) skizziert.

## 1 Einleitung

Zement besitzt durch seine energieintensive Herstellung und die bei der Herstellung chemisch unvermeidlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Kalksteinentsäuerung eine schlechte CO<sub>2</sub>-Bilanz. Um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren muss entweder der Zementgehalt im Beton oder/und der Klinkergehalt im Zement verringert werden. Hierzu stehen seit Jahren zahlreiche Möglichkeiten zum teilweisen Ersatz des Klinkers im Zement durch Zuschlagstoffe zur Verfügung (EN 197-1). Darüber hinaus ist die Betonherstellung neben dem Tief-, Straßen- und Erdbau der größte Verwender geogener Gesteinskörnungen (BBS 2022). Mit einer sinkenden Zahl neuer Auskiesungsgenehmigungen und damit einer Verknappung des Angebots geogener Gesteinskörnung wird der Druck zur Verwendung sekundärer Gesteinskörnung und ggf. industrieller

Gesteinskörnungen zunehmen. Um diese steigenden Anforderungen an die Nachhaltigkeit zu erfüllen, sollten die normativ bestehenden Möglichkeiten zur Reduktion der Umweltauswirkungen von Beton konsequent genutzt werden.

Zunächst wird kurz dargestellt, welche neuen Anforderungen sich im Hinblick auf die Treibhausgasemissionen und den Primärenergiebedarf bei der Herstellung von Beton bzw. Zement ergeben werden und welche Möglichkeiten bestehen, insbesondere die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Anschließend werden die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes rezyklierter Gesteinskörnung dargestellt. In beiden Fällen ist zu unterscheiden in Anwendungen im allgemeinen Hoch- und Tiefbau sowie Anwendungen in den Geltungsbereichen zusätzlicher technischer Vertragsbedingungen, wie z. B. der ZTV-ING 2022 oder der ZTV-W 2019 fallen. Für die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung wird die (noch) aktuelle Normenlage für Betone nach EN 206-1 2001 zusammen mit DIN 1045-2 2008 und der Richtlinie für Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen (DAFSTB 2010) skizziert.

Die Frage der Verwendung nachhaltigerer Zemente mit geringeren Umweltauswirkungen (DBV 2022), (DBV 2023), (HAIST 2016), (HAIST 2022) spielt bereits heute eine große Rolle und wird zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen. Die Ressourcenschonung durch Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen sowie die Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen sind bereits Elemente der Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden und Bauwerken. Nicht nur aus der Nachhaltigkeitszertifizierung wird sich ein zunehmender Druck ergeben, ressourceneffiziente Betone einzusetzen.

## **2 Anforderungen an die Nachhaltigkeit aus Normen, Richtlinien und Zertifizierungen**

### **2.1 Gebäude und öffentlicher Hochbau**

Anforderungen zum Einsatz nachhaltigerer Betone ergeben sich aus zahlreichen Quellen. Zertifizierungen von Gebäuden z. B. durch die „Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB)“ sowie die Regelungen des „Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB 2019)“ primär für Bundesgebäude des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, bewerten Umweltwirkungen von Gebäuden über den gesamten Lebenszyklus. Insofern ist der Beton ein Bauprodukt unter vielen, wenngleich er bei Treibhausgasemissionen, Primärenergiebedarf und Ressourceneinsatz neben Stahl wesentlich zu den Umweltwirkungen der Herstellungsphase beiträgt. Konkrete Anforderungen für einzelne Baustoffe sind in der Regel nicht gefordert. Das „Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB 2019)“ bietet verbindliche Bewertungsschemata für Büro-, Unterrichts- und Laborgebäude sowie Außenanlagen. Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) fokussiert auf Gebäude sowie auf

Quartiere mit unterschiedlichen Nutzungsprofilen. Mittlerweile werden weitere Zertifikate für Innenräume, Bauen im Bestand sowie den Rückbau von Gebäuden angeboten.

Um z. B. eine Förderung von Neubau- und Sanierungsmaßnahmen mit der „Bundesförderung für effiziente Gebäude“ zu erreichen, hat das Bundesbauministerium das „Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG)“ entwickelt (siehe auch [www.qng.info](http://www.qng.info)). Es wird derzeit in zwei Anforderungsniveaus „PLUS“ und „PREMIUM“ vergeben. Die Zertifizierung nach QNG kann derzeit unter anderen auf Grundlage der Bewertungssysteme der DGNB oder der BNB erfolgen. Zum Erreichen der Niveaus „PLUS“ oder „PREMIUM“ werden quantitative Anforderungen z. B. an die Treibhausgasemissionen im Gebäudelebenszyklus, den Primärenergiebedarf oder die nachhaltige Herkunft der Baustoffe gestellt. Zusätzliche Anforderungen werden an den Ressourcenschutz gestellt, beispielsweise Holz aus nachweislich nachhaltiger Forstwirtschaft oder die Verwendung von Betonen mit „erheblichem Recyclinganteil“. Ein erheblicher Recyclinganteil ist gleichbedeutend mit der Verwendung des maximal möglichen Anteils rezyklierter Gesteinskörnung (siehe Abschnitt 4).

Um den Beton in das System der Gebäudezertifizierung einbeziehen zu können, besteht herstellerseitig die Möglichkeit, Zement, Gesteinskörnung und den daraus hergestellten Beton vom „Concrete Sustainability Council (CSC)“ zertifizieren zu lassen ([www.csc-zertifizierung.de](http://www.csc-zertifizierung.de)). Da sich Lieferketten und die Produktion in den einzelnen Zement- und Transportbetonwerken unterscheiden, sind CSC-Zertifizierungen immer werksgebunden. Für Transportbeton kann ein zusätzliches „CO<sub>2</sub>-Modul“ zum Nachweis einer Reduktion der Treibhausgasemission gegenüber der Branchenreferenz bzw. ein „R-Modul“ zur Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung beantragt werden. Aktuell ist die übergeordnete CSC-Zertifizierung bereits weit verbreitet, das „CO<sub>2</sub>-Modul“ bzw. das „R-Modul“ sind teilweise vorhanden.

Diese Zertifizierungen und Nachweise sind im privaten Recht angesiedelt. Ihre Einhaltung ergibt sich zumeist über das vom Bauherrn angestrebte Zertifikat. Verbindliche Grenzwerte, z. B. aus den Bauordnungen oder den Verwaltungsvorschriften Technische Baubestimmungen der Länder existieren aktuell noch nicht. Allenfalls können Sektorziele aus dem Klimaschutzgesetz 2021 abgeleitet werden.

Für die Betonbauweise ist ein erster Schritt zur verpflichtenden Reduzierung der Treibhausgasemissionen die derzeit in der Einspruchsphase befindliche „Richtlinie Treibhausgasreduzierte Betontragwerke“ des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfSTB 2023). Richtlinien des DAfStb werden üblicherweise in die Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen aufgenommen und werden mit der Umsetzung in den Ländern verpflichtendes Baurecht. Die Richtlinie sieht eine schrittweise Reduktion der Treibhausgasemissionen bis zum Erreichen der CO<sub>2</sub>-Neutralität in 2046 vor. In der Richtlinie werden „Treibhausgasminderungsklassen (TM<sub>t</sub>)“ festgelegt, die sich auf das Jahr der Bauantragstellung beziehen. Entsprechend der folgenden Abb. 2.1 würde ein

Betontragwerk mit Bauantragsdatum 2030 einer Treibhausgasminderungsklasse  $TM_{2030}$  zugeordnet. Dies bedeutet eine nachzuweisende Minderung der Treibhausgasemissionen auf 48 % bezogen auf das Referenzjahr 2020. Die DGNB weist in einer Studie (DGNB 2021) für Gründungen einen durchschnittlichen Anteil der Treibhausgasemissionen von 13 % aus, daher wird mit Anforderungen auch für die Geotechnik zu rechnen sein. Da eine emissionsfreie Herstellung von Zementklinker chemisch unmöglich ist, ist die Decarbonisierung der Zementherstellung ohne Abscheidungs-technologien wie „Carbon Capture and Storage (CCS)“ (DBV 2022) nicht möglich.

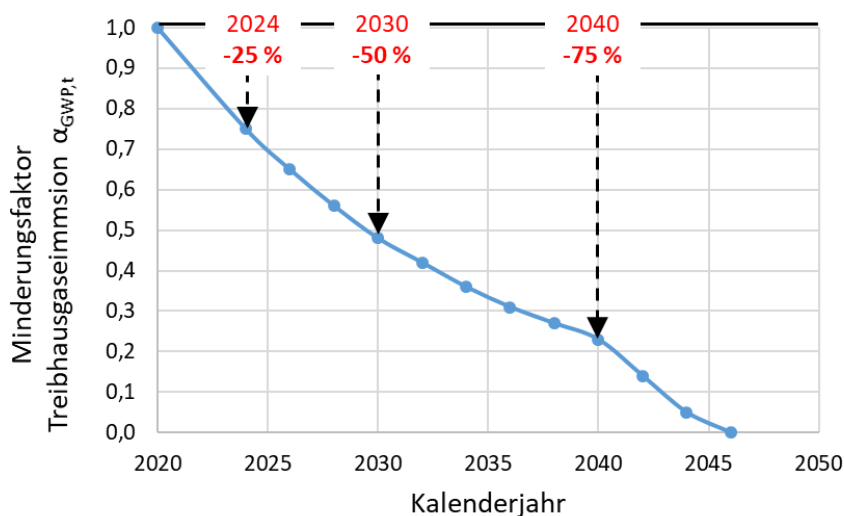


Abb. 2.1: Geplante Entwicklung der Treibhausgasreduktion für Betontragwerke nach Richtlinien-Entwurf August 2023 in Anlehnung an (DAFSTB 2023)

Um die in DAFSTB (2023) formulierten Reduktionziele nachweisen zu können, wird über kurz oder lang ein Nachweis der  $CO_2$ -Emissionen über werkspezifische „Environmental Product Declarations (EPD)“ oder die genannten CSC-Zertifikate mit ergänzendem  $CO_2$ -Modul notwendig und üblich werden.

## 2.2 Ingenieurbauwerke, Wasserbau, Tunnelbau

Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, existieren bereits verschiedene Bewertungssysteme für den Bereich der Wohn- und teils der Nichtwohngebäude. Für Ingenieurbauwerke, Tunnel und Bauwerke des Wasserbaus wurde einige Forschungsprojekte durchgeführt. Die Ergebnisse sind bislang jedoch nicht verbindlich in die entsprechenden Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen eingeflossen. Nach FREITAG (2023) ist jedoch z. B. in Planfeststellungsverfahren Stellung zu den vorhabenbedingten Treibhausgasemissionen zu nehmen.

Beispiele bisheriger Ansätze sind die „Einheitliche Bewertungskriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel“ (FISCHER 2016),“ Pre-Check zur Nachhaltigkeitsbewertung von Brücken“



(GRAUBNER 2016) oder „Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Ertüchtigungskonzepte von Straßenbrücken“ (FISCHER 2016A). Von MIELECKE (2016) wurden Potentiale für Brücken, Tunnel und Strecke untersucht. Im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau wurde 2009 ein Forschungsvorhaben zur Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung abgeschlossen (BÖDEFELD 2009, BÖDEFELD 2011). Siehe hierzu auch Abschnitt 4.3. Nach FREITAG (2023) werden in der Bundesanstalt für Wasserbau derzeit verschiedene Handlungsstränge zu Nachhaltigkeitsaspekten von Baustoffen und Bauweisen verfolgt. Insbesondere durch die im Wasserbau oft lange Bauzeit und die Notwendigkeit geringer Hydratationswärmeentwicklung ist der Einsatz von Zementen mit sehr geringem Klinkeranteil jahrzehntelange Praxis. Auch die Verlängerung des Nachweiszeitpunktes für die Druckfestigkeit auf Alter jenseits der 28 Tage-Festigkeit ist durchaus üblich.

### **3 Möglichkeiten zur Reduktion von Treibhausgasemissionen**

Bei der Reduktion von Treibhausgasemissionen und dem Primärenergiebedarf ist zu unterscheiden zwischen den Möglichkeiten, die bei der Verwendung von Transportbeton bzw. dem Einsatz von Zement und einer Mischung in-situ bestehen. Bei der Verwendung von Transportbeton nach Eigenschaften hat der Verwender zunächst keine Möglichkeit auf die Zusammensetzung des Betons Einfluss zu nehmen. Soweit es ausführungsseitig möglich ist, sind folgende Betoneigenschaften (DBV 2022A) mit klinkereffizienten Zementen bzw. geringeren Zementgehalten korreliert:

- Betone mit langsamer oder sehr langsamer Festigkeitsentwicklung.
- In Abstimmung mit dem Bauherrn kann der Nachweiszeitpunkt der Druckfestigkeit auf einen späteren Zeitpunkt als 28 Tage verlegt werden. Insbesondere beim massigen Bauteilen kann sich in diesen Fällen zudem eine Reduzierung der rissbreitenbeschränkenden Bewehrung ergeben.
- Zahlreiche Transportbetonhersteller bieten spezielle Betonsorten an, die vor allem auf eine Reduktion der Treibhausemissionen optimiert sind.

Kommt bei geotechnischen Maßnahmen ausschließlich Zement zum Einsatz, sollte auf den Klinkergehalt und die Hauptbestandteile des Zementes geachtet werden. Es stehen zahlreiche genormte Zemente mit verringertem Anteil an Portlandzementklinker und damit einem höheren Anteil an Zusatzstoffen wie Hüttensand oder Kalksteinmehl zur Verfügung. Einige Zementhersteller bieten explizit klinkerreduzierte Zemente mit bauaufsichtlicher Zustimmung an, die ggf. einen eingeschränkten Anwendungsbereich haben können. Beispiele für Zemente mit reduziertem Klinkeranteil sind:

- Genormte CEM II/A und CEM II/B-Zemente mit verschiedenen Hauptbestandteilen (Ersetzt werden 6 bis 20 % des Portlandzementklinkers bei CEM II/A und 21 bis 35 % bei CEM II/B).
- In CEM II/C-Zementen werden mehrere Hauptbestandteile eingesetzt. Ersetzt werden zwischen 36 und 50 % des Portlandzementklinkers. Diese Zemente werden auf Grundlage einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung vertrieben, in der die Verwendungsbereiche spezifisch festgelegt sind.
- Genormter CEM III/A (Ersatz von 36 bis 65 % des Portlandzementklinkers durch Hüttensandmehl) und wenn verfügbar CEM III/B (Ersatz von 66 bis 80 % des Klinkers). Dieser hohe Ersatz des Klinkers führt zu einer deutlich verlangsamten Festigkeitsentwicklung, jedoch hoher Nacherhärtung.

Da es sich in allen Fällen um genormte bzw. zugelassene Betone und Zemente handelt, können diese Zemente verwendet werden. Eine Überprüfung der vorgesehenen Verwendungen mit den Grenzen der jeweiligen Regelwerke wie z. B. ZTV-ING, ZTV-W oder Zulassungen ist - wie bisher auch - notwendig.

## **4 Stand zur Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen in Beton**

### **4.1 Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen**

Unter anderen (ABBROCK 2019) rechnet der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung zukünftig großes Potential zu. Aus immer schwieriger zu beantragenden Auskiesungsgenehmigungen und Anforderungen an eine nachhaltige Materialgewinnung in Gebäudezertifizierungen folgt eine zunehmende Notwendigkeit, Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen einzusetzen. Gleichzeitig ist Beton- und Bauwerksaufbruch im Straßenbau ein gefragter Rohstoff, um geogene Gesteinskörnung zu ersetzen (BBS 2022). In der Folge hängen die lieferbaren Mengen von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung maßgeblich von deren Verfügbarkeit ab.

Rezyklierte Gesteinskörnungen werden nach DIN EN 12620 in vier Typen unterteilt. Typ 1 ist eine Gesteinskörnung, die nahezu ausschließlich aus Betonaufbruch besteht. Mit steigender Typenklasse dürfen größere Anteile vor allem an Mauerklinker oder Kalksandstein enthalten sein. Für die Herstellung von Beton nach EN 206-1 2001 und DIN 1045-2 2008 sind nur die hochwertigeren Typen 1 und 2 zugelassen. Je nach Anwendung und Expositionsklassen werden zusätzliche Anforderungen z. B. an die Frostbeständigkeit gestellt.

Eine maßgebliche Einschränkung der Anwendbarkeit ist die im Regelfall unbekanntes Herkunft der Gesteinskörnungen, sodass sie in die Alkali-Empfindlichkeitsklasse E III-S nach DAfStb 2013 eingestuft werden müssen. Dies schränkt die Einsatzmöglichkeiten

von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung deutlich ein. Beispielsweise sind Anwendungen, die in eine Feuchtigkeitsklasse WA (Vorhandensein von Feuchte und externem Eintrag von Alkalien wie Tausalzen) einzustufen sind, nur mit besonderen Nachweisen zulässig. An rezyklierte Gesteinskörnung werden im Rahmen der Aufbereitung weitere Anforderungen gestellt, wie z.B. die Wasseraufnahme, eluierbare Schadstoffe, Chloridgehalt oder Frost-Tau-Beständigkeit. Sie sind allerdings vom Hersteller der rezyklierten Gesteinskörnung und dem Betonhersteller zu berücksichtigen.

#### **4.2 Einsatzbereiche von Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung**

Vereinfachend können die Einsatzgebiete nach Tab. 4.1 unterschieden werden in Bauteile ohne Frostbeanspruchung und Bauteile mit Frostbeanspruchung. Der Kontakt der Bauteile mit Tausalzen ist wegen der zumeist unbekanntenen Alkaliempfindlichkeit der rezyklierten Gesteinskörnung nahezu ausgeschlossen. Tab. 4.1 ist zu entnehmen, dass mit zunehmender Exposition die zulässige Menge rezyklierte Gesteinskörnung sinkt. Bei reiner Beanspruchung durch Karbonatisierung dürfen bei rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 maximal 45 Vol.-% der gesamten Gesteinskörnung durch grobe Gesteinskörnung ausgetauscht werden, bei Frostbeanspruchung (ohne Taumittleinsatz) maximal 35 Vol.-% und bei geringem chemischen Angriff XA 1 maximal 25 Vol.-%. Mit Ausnahme des chemischen Angriffs darf bei Typ 2 Gesteinskörnung ein um 10 % geringerer Anteil verwendet werden. Einige Transportbetonhersteller überlegen, geringere Anteile einzusetzen, um die Abnahme der rezyklierten Gesteinskörnung zu vergleichmäßigen. Zu beachten ist jedoch, dass Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung, der in Gebäuden eingesetzt wird, die nach QNG zertifiziert werden sollen, in der Regel die maximalen Gehalte verwendet werden müssen. Neben den genannten Einschränkungen ist die Verwendung auf Bauteile bis einschließlich der Druckfestigkeitsklasse C30/37 begrenzt.

Wird die Nachhaltigkeit von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen einschließlich der Treibhausgasemissionen betrachtet, muss berücksichtigt werden, dass für die Aufbereitung des Abbruchs mindestens genauso viel Treibhausgase emittiert und Primärenergie aufgewendet wird, wie für die Aufbereitung rezyklierter Gesteinskörnung (INFORMATIONSZENTRUM BETON 2021). In einer von ABBROCK (2019) zitierten Studie der btu Cottbus wird ein doppelt so hoher Ausstoß von Treibhausgasen angegeben. Zudem wird Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung vor allem nachhaltig, wenn die Transportwege der rezyklierten Gesteinskörnung kurz sind. Aufgrund der raueren Oberfläche der rezyklierten Gesteinskörnung wird zudem berichtet, dass zur Herstellung höhere Zementgehalte erforderlich sind, um eine normale Beton vergleichbare Verarbeitbarkeit zu erreichen.

Typische Anwendungsbereiche von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung sind vor allem Innenbauteile und Außenbauteile ohne Taumittelangriff solange die Druckfestigkeitsklasse nicht größer ist als C30/37 und nur ein geringer chemischer Angriff

vorliegt. Auch wasserundurchlässige Baukörper sind mit rezyklierter Gesteinskörnung herstellbar, da die Wasserundurchlässigkeit des Betons primär über den Wasserzementwert des Betons erreicht wird.

Tab. 4.1: Einsatzgebiete und maximal zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnung > 2 mm bezogen auf die gesamt Gesteinskörnung (Vol.-%) in Anlehnung an (DAFSTB 2010)

Anwendungsbereich		Kategorie der Gesteinskörnung	
Alkali-Richtlinie (DAfStb 2013)	(EN 206-1 2001) (DIN 1045-2 2008)	Typ 1	Typ 2
WO (trocken)	Karbonatisierung XC1		
	Keine Korrosion X0 Karbonatisierung XC1 bis XC4	≤ 45 Vol.-%	≤ 35 Vol.-%
WF <sup>a)</sup> (feucht)	Frostangriff ohne Taumittel XF1 <sup>a)</sup> & XF3 <sup>a)</sup>	≤ 35 Vol.-%	≤ 25 Vol.-%
	Chemischer Angriff (XA1)	≤ 25 Vol.-%	≤ 25 Vol.-%

<sup>a)</sup> An die Gesteinskörnung und die Betonzusammensetzung werden zusätzlich Anforderungen im Hinblick auf Alkali-Richtlinie gestellt (DAfStb 2013), sowie zusätzlich Anforderungen an die Frostbeständigkeit

### 4.3 Rezyklierte Gesteinskörnung in ZTV-ING und ZTV-W

Die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen im Geltungsbereich der ZTV-ING ist nahezu ausgeschlossen. Dies ergibt sich aus der Forderung, dass alle Bauwerke der Bundesfernstraßen der Feuchtigkeitsklasse WA zuzuordnen sind. Außerdem muss die Gesteinskörnung generell einen Frost-Tau Widerstand der Kategorie F<sub>2</sub> aufweisen. Dies entspricht der Anforderung an rezyklierte Gesteinskörnung, die bei einer XF3 Beanspruchung eingesetzt werden soll (DAFSTB 2010). Inwieweit ein Einsatz von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung außerhalb des Bereiches der Bundesfernstraßen möglich und sinnvoll ist, ist im Einzelfall zu klären.

In der geltenden ZTV-W (2019) ist die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung generell ausgeschlossen. Im Bereich der Bundesanstalt für Wasserbau wurde 2009 Forschungsvorhaben zur Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung abgeschlossen (BÖDEFELD 2009, BÖDEFELD 2011). Hierin wird u.a. empfohlen, die Anteile rezyklierter Gesteinskörnung nach einer älteren Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton zur Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung aus dem Jahr 1998 auf 20 % bis 25 % zu

begrenzen. Bei darüber hinaus gehenden Anteilen wurde eine Festigkeitsreduktion beobachtet. Zudem war die Frostbeständigkeit nicht mehr nachweisbar. Mit den zwischenzeitlich fortgeschriebenen Regelungen für (siehe Abschnitt 5.2) sind Anteile rezyklierter Gesteinskörnung bis zu maximal 45 Vol.-% möglich.

#### **4.4 Verfügbarkeit rezyklierter Gesteinskörnungen**

Wie bereits erwähnt, ist aufbereiteter Beton- und Bauwerksaufbruch ein begehrter Sekundärrohstoff (BBS 2022), (ABBROCK 2019). Danach sind jährlich ca. 45 Mio. t Bauschutt recyclingfähig, hiervon werden knapp 20 % (ca. 8 - 9 Mio. t) als rezyklierte Gesteinskörnung aufbereitet. Der größte Anteil wird als Sekundärmaterial im Straßen- und Wegebau verwendet. Dies nicht zuletzt, weil die Aufbereitung für den Straßenbau weniger aufwändig ist. Hinzu kommt, dass die Abnahme der rezyklierten Gesteinskörnung für die Betonherstellung stark schwankt und Transport sowie Lagerung für die Verwendung in Beton aufwändiger ist. Darüber ist Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung in aller Regel teurer, als Beton ohne rezyklierte Gesteinskörnung.

In zahlreichen Projekten ist daher die Verwendung von Recyclingbeton erwünscht und teilweise durch das Ziel einer QNG-Zertifizierung notwendig. Jedoch kann die geforderte Menge rezyklierter Gesteinskörnung von den Betonherstellern nicht immer verbindlich zugesagt werden. Daher wäre eine kontinuierliche Anforderung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung aus dem Markt ggf. mit Anteilen rezyklierter Gesteinskörnung unterhalb der maximal zulässigen Menge wünschenswert, um eine kontinuierliche Abnahme bei den Aufbereitungsunternehmen gewährleisten zu können.

## **5 Zukünftige normative Änderungen**

### **5.1 Aktuelle normative Veränderungen**

Nach längerer Bearbeitungszeit sind die für die Zusammensetzung und Verwendung von Beton relevanten Normen EN 206 (2021) zusammen mit dem nationalen Anwendungsdokument DIN 1045-2 (2023) im Weißdruck erschienen. Die bauaufsichtliche Einführung soll mit der aktuell im Einspruchsverfahren befindlichen Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen MVVTB 2024/1 kurzfristig erfolgen. Grundsätzlich werden in der EN 206 (2021) und der DIN 1045-2 (2023) in den Anhängen D zusätzliche Anforderungen für Bohrpfähle, Schlitzwände, Ortbeton-Verdrängungspfähle oder Mikropfähle gestellt. Die Anforderungen beziehen sich u.a. auf Zemente, Gesteinskörnungen, Mindestgehalte an Mehlkorn und Zement sowie Frischbetoneigenschaften. Daneben ergeben sich leicht veränderte Anwendungsgrenzen für rezyklierte Gesteinskörnung (siehe Abschnitt 5.2).

Zudem wird über die DIN 1045-1000 (2023) das grundlegend neue Konzept der Betonbauqualitätsklassen eingeführt (FINGERLOOS 2019). Hiermit soll die Kommunikation und

Information in allen Fragen des Betons von der Planung über die Betonherstellung bis zur Ausführung sichergestellt werden. Siehe hierzu auch Abschnitt 5.3.

## 5.2 Veränderte Anwendungsgrenzen rezyklierter Gesteinskörnung

Die Änderungen der Anwendungsgrenzen für rezyklierte Gesteinskörnung ist in der folgenden Tab. 5.1 im Vergleich zu Tab. 4.1 dargestellt. Änderungen sind fett und kursiv unterlegt. Wesentliche Neuerung ist, dass der Anteil rezyklierter Gesteinskörnung bei frostbeanspruchten Betonen (XF 1 und XF 3, d.h. ohne Taumittel) um 10 % erhöht werden darf und nun für Typ 1 Körnung 45 Vol.-% und für Typ 2 Körnung 35 Vol.-% beträgt (BREIT 2023). Beschrieben wird zudem die Möglichkeit, rezyklierte Gesteinskörnung auch bei Expositionsklassen mit Taumitteln einzusetzen. Allerdings nur unter der Voraussetzung, dass ein gesonderter Nachweis einer Alkali-Empfindlichkeitsklasse E I-S für die Gesteinskörnung vorliegt.

Tab. 5.1: Einsatzgebiete und zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnung > 2 mm bezogen auf die gesamt Gesteinskörnung (Vol.-%) nach (DIN 1045-2 2023), Änderungen ggü. den geltenden Grenzen sind fett unterlegt

Anwendungsbereich		Kategorie der Gesteinskörnung	
Alkali-Richtlinie (DAfStb 2013)	(EN 206 2021) und (DIN 1045-2 2023)	Typ 1	Typ 2
WO (trocken)	Karbonatisierung XC1	≤ 45 Vol.-% <sup>b)</sup>	≤ 35 Vol.-%
WF <sup>a)</sup> (feucht)	Keine Korrosion X0 Karbonatisierung XC1 bis XC4 Frostangriff ohne Taumittel XF1 <sup>a)</sup> & XF3 <sup>a)</sup>	<b>≤ 45 Vol.-%</b>	<b>≤ 35 Vol.-%</b>
	Chemischer Angriff (XA1)	≤ 25 Vol.-%	≤ 25 Vol.-%
<b>WA</b> <sup>a),c)</sup>	<b><i>XD1, XD2</i></b> <b><i>XS1, XS2</i></b> <b><i>XF2, XF4</i></b>	<b>≤ 30 Vol.-%</b>	<b>≤ 20 Vol.-%</b>

<sup>a)</sup> An die Gesteinskörnung und die Betonzusammensetzung werden zusätzlich Anforderungen im Hinblick auf Alkali-Richtlinie gestellt (DAfStb 2013), sowie zusätzlich Anforderungen an die Frostbeständigkeit.

<sup>b)</sup> Ausnahmsweise dürfen Teile der feinen Gesteinskörnung durch rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt werden.

<sup>c)</sup> nur zulässig bei Nachweis der Qualität der RC-Gesteinskörnung nach E I-S.

### **5.3 Konzept der Betonbauqualitätsklassen (BBQ)**

Das Ziel der Betonbauqualitätsklassen ist, betonbezogene Festlegungen in der Planung, Herstellung, Ausführung und Nachbehandlung unter projektspezifischen Randbedingungen systematisch zu verbessern. Damit soll eine durchgehende Kommunikation und Abstimmung der am Bau Beteiligten erreicht werden.

Die technischen Anforderungen werden unterteilt in die Bereiche:

- Planungsklassen (PK)
- Betonklassen (BK)
- Ausführungsklassen (AK)
- Daraus folgt die Betonbauqualitätsklasse BBQ als höchste Anforderung aus PK, BK und AK

Die Komplexität in Kommunikation, Planung, Baustoff und Ausführung wird unterschieden in:

- „N“ normale Anforderungen
- „E“ erhöhte Anforderungen
- „S“ speziell festzulegende Anforderungen

Die Kategorisierung nach „N“, „E“ und „S“ wird einzeln für Planungs-, Beton- und Ausführungsklasse durchgeführt. Die höchste Anforderung ergibt die Betonbauqualitätsklasse (BBQ-N, BBQ-E oder BBQ-S). Maßnahmen in den Klassen BBQ-E und BBQ-S können beispielsweise Ausschreibungsgespräche, Startgespräche zu Beginn der Ausführung, erweiterte Eignungsprüfungen oder/und die Einbindung „Fachkundiger Personen“ sein. Es ist damit zu rechnen, dass die BBQ für national geregelte Bauprodukte wie z. B. Vergussmörtel/-beton oder Stahlfaserbeton detailliertere Regelungen für die Umsetzung der BBQ einbezogen werden. In der folgenden Tab. 5.2 sind beispielhaft einige BBQ-Einstufungen zusammengestellt. Beispielsweise sind sämtliche Ingenieurbauwerke nach Regeln öffentlicher Verkehrsträger (Straße, Schiene, Wasserstraßen) durchgehend in die Klasse „S“ einzustufen. Schlagworte für eine Einstufung in erhöhte Anforderungen sind z. B.: Expositionsclassen XF2/XF3/XA2, rezyklierte Gesteinskörnungen mit einem Anteil > 25 % (also sehr häufig), massige Bauteile sowie Pfähle oder Schlitzwände.

Tab. 5.2: Auszug aus der Tabelle 2 „Zuordnung von Anwendungsfällen zu Planungs- (PK), Beton- (BK), Ausführungs- (AK) und BBQ-Klassen der DIN 1045-1000 (2023)

Anwendung	PK	BK	AK	BBQ
Anforderungen an die Nutzung				
Betonbauteile mit geplanter Nutzungsdauer nach technischer Spezifikation (für gewöhnliche Tragwerke von 50 Jahren)	N	N	N	N
Ingenieurbauwerke nach Regeln der öffentlichen Verkehrsträger (siehe Literaturhinweise)	S	S	S	S
Expositionsklassen und Feuchtigkeitsklassen				
Bauteile in Expositionsklasse XC3 oder Außenbauteile in Expositionsklassen XC4/XF1/XA1/XD1/XS1/XM1	N	N	N	N
Gründungsbauteile in den Expositionsklassen XC1/XC2	N	N	N	N
Bauteile in Expositionsklassen XF2/XF3 (ohne künstliche Luftporen), XD2/XD3, XS2/XS3, XM2/XM3	N	N	E	E
Bauteile in Expositionsklasse XA2	E	N	E	E
chemischer Angriff XA3 oder stärker	S	N	S	S
Beton für verschiedene Anwendungen				
Betone der Konsistenzklassen F1 bis F5 oder C0 bis C4	N	N	N	N
Betone der Konsistenzklassen F6	N	E	E	E
Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen ≤ 25Vol.-% [...]	N	N	N	N
Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen > 25Vol.-% Austausch der groben Gesteinskörnung [...]	N	E	E	E
Bauteile oder Bauwerke mit verschiedenen Anforderungen an die Bemessung, Konstruktion und Ausführung				
massige Bauteile nach DAfStb-Richtlinie Massige Bauteile aus Beton	E	N	E	E
Bauteile im Spezialtiefbau (Pfähle, Schlitzwände, usw.)	E	N	E	E
Bauverfahren und Nachbehandlung				
besondere Förderverfahren (z.B. über lange Strecken über große Höhenunterschiede oder bei geringen Rohrdurchmessern)	N	S	E	S
Betonförderung durch Pumpen (übliche Strecken)	N	N	N	N
Nachbehandlung nach DIN1045-3:2023-08, Tabelle 5	N	N	N	N

## 6 Zusammenfassung

In der Zukunft werden sich z. B. durch Nachhaltigkeitszertifizierungen sowie zunehmende Aufnahme der Umweltauswirkungen und Ressourcenschonung in die Normung erhöhte Anforderungen an Baustoffe ergeben. Bei Zement und Beton werden der Ausstoß von Treibhausgasen, der Primärenergiebedarf und die Ressourcenschonung im Vordergrund stehen. Unterschieden werden muss jeweils, ob das Bauwerk nur dem öffentlichen Baurecht oder zusätzlichen Anforderungen z. B. durch die ZTV-ING oder die ZTV-W unterliegt. Letztgenannte sind z. B. bei der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung deutlich strenger. Zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und dem Primärenergiebedarf bestehen bei der Verwendung von Beton vereinfachend vor allem folgende Möglichkeiten:



- Wenn baubetrieblich möglich, Verwendung von Betonen mit langsamer Festigkeitsentwicklung. Aufbauend ggf. Verschiebung des Nachweises der Druckfestigkeitsklasse auf einen späteren Zeitpunkt als 28 Tage.
- Zahlreiche Transportbetonhersteller bieten spezielle Betonsorten an, die vor allem auf eine Reduktion der Treibhausemissionen optimiert sind.

Wenn ausschließlich Zement zur Verarbeitung in-situ zum Einsatz kommt, sollte auf den Klinkergehalt des Zementes geachtet werden. Es stehen zahlreiche genormte Zemente mit reduziertem Anteil an Portlandzementklinker zur Verfügung. Einige Zementhersteller bieten spezielle klinkerreduzierte Zemente mit bauaufsichtlicher Zustimmung mit ggf. eingeschränktem Anwendungsbereich an. Gegebenenfalls können in den Geltungsbereichen der ZTV-ING und der ZTV-W weitere Einschränkungen bestehen. Beispiele genormter Zemente sind:

- CEM II/A und CEM II/B-Zemente mit verschiedenen Hauptbestandteilen.
- CEM III/A und wenn verfügbar CEM III/B Zemente mit hohem Hüttensandgehalt.

Zur Ressourcenschonung besteht die Möglichkeit, Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung einzusetzen, zumindest außerhalb der Geltungsbereiche von ZTV-ING und ZTV-W. Zu beachten ist, dass aktuell eine Verwendung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung bei Beaufschlagung mit Taumitteln (XS, XD sowie XF2/4) nahezu ausgeschlossen ist. Soll Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung in größeren Mengen eingesetzt werden, ist es ratsam, vorab die Verfügbarkeit zu erfragen.

Mit der Einführung der neuen DIN 1045-1000 (2023) wird das Konzept der Betonbauqualitätsklassen (BBQ) umgesetzt. Für die Verwendung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung sowie für einige übliche Anwendungen in Tiefbau und Geotechnik werden sich zusätzliche Verpflichtungen im Bereich der Kommunikation und Dokumentation ergeben, um einen durchgehenden Informationsfluss von der Planung über die Festlegung des Betons bis zur Ausführung sicherzustellen. Für Bauvorhaben im Bereich der Verkehrsinfrastruktur sind jeweils projektspezifische Regelungen notwendig.

## Literatur

- Aßbrock, Olaf (2019): *Rohstoffversorgung für die Betonherstellung – Entwicklungen, Ressourcen und Umweltschutz*. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): *Neubau von Wasserbauwerken*. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 42-48
- BBS 2022 Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (2022): *Die Nachfrage nach primär- und Sekundärrohstoffen der Steine und Erden Industrie bis 2040 in Deutschland*.
- Bödefeld, J., Reschke, T., Bundesanstalt für Wasserbau (2009): *Verwendung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen bei Verkehrswasserbauten*. FuE-Abschlussbericht A39510110050. Projekt Nr. 8161. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.
- Bödefeld, Jörg; Reschke, Thorsten (2011): *Verwendung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen bei Verkehrswasserbauten*. In: BAWMitteilungen 93. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 49-60
- BNB Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (2019): *Leitfaden Nachhaltiges Bauen – Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden*. [www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Leitfaden\\_2019/BBSR\\_LFNB\\_D\\_190125.pdf](http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Leitfaden_2019/BBSR_LFNB_D_190125.pdf)
- Breit, W., Burgmann, S. (2023): *Concrete with Recycled Aggregates – Update of the Application Rules in Germany and Outlook*. ce/papers 6, Ernst & Sohn Verlag, 2023, doi.org/10.1002/cepa.2864
- DAfStb (2010): *DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin, 2010
- DAfStb (2013): *DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, 2013
- DAfStb (2023): *Entwurf DAfStb-Richtlinie Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton – Teil 0 „Grundlagen“*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin, 2023
- DBV (2022): *Nachhaltiges Bauen mit Beton – Quick Wins für den Klimaschutz*. DBV-Heft 50 / Band 2, Deutscher Beton- und Bautechnik Verein, Berlin 2022
- DBV (2023): *Nachhaltiges Bauen mit Beton – Graue Emissionen und Lösungsansätze zum Klimaschutz*. DBV-Heft 50 / Band 1, Deutscher Beton- und Bautechnik Verein, Berlin 2023
- DIN 1045-2 (2008): *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*. Beuth-Verlag, Berlin, 2008
- DIN 1045-2 (2023): *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton*. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2023
- DIN 1045-1000 (2023): *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1000: Grundlagen und Betonbauqualitätsklassen (BBQ)*. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2023

- DGNB Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen: [www.dgnb.de](http://www.dgnb.de)
- DGNB (2021): *Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion – Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden*. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., August 2021
- EN 197-1 (2011): *Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*. Beuth Verlag, Berlin, 2011
- EN 206 (2021): *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A2:2021*. Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2021
- EN 206-1 (2001): *Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1 mit Änderungen A1 (2004) und A2 (2005)*. Beuth Verlag, Berlin, 2001
- Graubner, C.-A., Ramge, P., Hess, R., Ditter, M., Lohmeier, M., Roos, D. (2016): *Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 132
- Fingerloos, F., Meyer, L., Breitenbücher, R. (2019): *Die BBQ-Richtlinie des DAfStb – Best Practice für die Qualitätskette im Betonbau*. Beton- und Stahlbetonbau, Volume 114, Issue 11, Ernst & Sohn Verlag, 2019 ([doi.org/10.1002/best.201900069](https://doi.org/10.1002/best.201900069))
- Fischer, O., Gehrlein, S., Lingemann, J., Jungwirth, J. (2016a): *Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Ertüchtigungskonzepte von Straßenbrücken*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 134
- Fischer, O., Gehrlein, S., Lingemann, J., Jungwirth, J. (2016a): *Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Ertüchtigungskonzepte von Straßenbrücken*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 134
- Fischer, O., Sauer, J., Jungwirth, J., Baumgärtner, U., Hess, R., Ditter, M., Roth, C., Walter, S. (2016): *Einheitliche Bewertungskriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit - Straße und Tunnel*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft S 97
- Freitag, Nancy (2023): *Nachhaltigkeitsbetrachtungen bei massiven Verkehrswasserbauwerken*. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): *Instandsetzung und Neubau von Verkehrswasserbauwerken: Innovativ – risikominimiert – nachhaltig*. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 66-72.
- Haist, M., Moffatt, S., Breiner, R., Vogel, M., Müller, H. S. (2016): *Ansatz zur Quantifizierung der Nachhaltigkeit von Beton auf der Baustoffebene*. Beton- und Stahlbetonbau, Volume 111, Issue 10, Ernst & Sohn Verlag, 2016 ([doi.org/10.1002/best.201600036](https://doi.org/10.1002/best.201600036))
- Haist, M., Bergmeister, K., Curbach, M., Forman, P., Gaganelis, G., Gerlach, J., Mark, P., Moffatt, J., Müller, C., Müller, H.S., Rainers, J., Scope, C., Tietze, M., Voit, K. (2022): *Nachhaltig konstruieren und bauen mit Beton*. Beton-Kalender 2022, Ernst & Sohn Verlag, 2022

- InformationsZentrum Beton (2021): *Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung – R-Beton*. Zement Merkblatt Betontechnik B 30, Stand 11.2021, InformationsZentrum Beton, Düsseldorf
- Mielecke, T., Graubner, C.-A., Ramge, P., Hess, R., Pola, V., Caspari, W. (2016): *Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 133
- ZTV-ING (2022): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (Gesamtfassung) Stand 2022/10*. Bundesministerium für Digitales und Verkehr (<https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Baudurchfuehrung/ZTV-ING-Gesamtfassung.pdf>)
- ZTV-W (2019): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau für Bauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215) Ausgabe 2012 mit A1 Änderung 2019*. Bundesministerium für Digitales und Verkehr (<https://izw.baw.de/wsv/planen-bauen/stlk-w-ztv-w>)

# Verpressanker im Kontext normativer Einschränkungen und CO<sub>2</sub>-Einsparungen

Fabian Heidenreich, *Bundesanstalt für Wasserbau*

Prof. Dr.-Ing. Markus Herten, *Bergische Universität Wuppertal*

Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Wichtmann, *Ruhr-Universität Bochum*

## Zusammenfassung

Verpressanker werden seit rund 90 Jahren im Bauwesen eingesetzt. Der Einsatz ist jedoch bei betonangreifenden Stoffen im Grundwasser durch normative Vorgaben begrenzt. Um die chemische Beschaffenheit des Grundwassers zuverlässig zu bestimmen, sind in der Regel wiederholte Analysen erforderlich, da natürliche Schwankungen auftreten können. Um Planungssicherheit zu gewährleisten, können Übersichtskarten mit Hintergrundwerten zur Grundwasserbeschaffenheit als erster Indikator für betonangreifende Inhaltsstoffe herangezogen werden. Die in situ gewonnenen Erfahrungswerte bei Schleusenbauprojekten am Dortmund-Ems-Kanal bezüglich der expliziten Auswirkungen des chemischen Angriffs auf die Tragfähigkeit von Verpressankern stehen nicht im Einklang mit den bisherigen Ergebnissen aus Modellversuchen. Unter den gegebenen Randbedingungen konnten bei diesen Baumaßnahmen in einem Zeitraum von bis rund sechs Jahren keine signifikanten Tragfähigkeitsverluste festgestellt werden, weshalb weitere Untersuchungen zur Korrelation mit den Modellversuchen erforderlich sind.

Im Hinblick auf Nachhaltigkeitsbetrachtungen im Bauwesen ist es von Bedeutung, mögliche Einsparungen beim Materialverbrauch von Verpressankern hinsichtlich des CO<sub>2</sub>-Äquivalents zu identifizieren. Zur Optimierung sind unter anderem Betrachtungen der Ausnutzungsgrade und Einflussfaktoren der Tragfähigkeit notwendig.

## 1 Einleitung

Die Historie des Einsatzes von Verpressankern beginnt gemäß WICHTER UND MEINIGER (2017) in der Mitte der 1930er Jahre. Zunächst wurden Rückverankerungen zur Aufnahme großer Zugkräfte im Festgestein oder Beton von Staumauern verwendet. Im Jahr 1958 wurden bei Neubauten des Bayerischen Rundfunks in München durch die Firma Bauer erstmals Verpressanker zur Rückverankerung einer Baugrubenwand im Lockergestein eingesetzt. Seither sind der Gebrauch und die Einsatzmöglichkeiten aufgrund wirtschaftlicher, zeitsparender und bauablauftechnischer Aspekte deutlich

angestiegen. Verpressanker werden unter anderem als Rückverankerung bei Baugrubenverbauten, Stützbauwerken, Uferwänden und Sohlsicherungen eingesetzt. Vorteile sind beispielsweise der erschütterungsfreie und geräuscharme Einbau im Vergleich zu Rammpfählen, die Platzersparnis im Vergleich zu Totmannkonstruktionen, baubetriebliche Vorteile durch den Wegfall von Steifen und eine schnelle Herstellungsweise. Allerdings führen Einschränkungen bei der Nutzung von Verpressankern infolge aggressiver Grundwässer zu erhöhten Aufwendungen mit entsprechenden Auswirkungen auf die Emissionen.

## 2 Verpressanker bei chemisch angreifenden Grundwässern

### 2.1 Normative Einschränkungen

Der Einsatz von Verpressankern wird durch die DIN EN 1537:2014-07 in Verbindung mit der DIN/TS 18537:2021-05 geregelt. Die Verwendung bei aggressivem Grundwasser ist abhängig von der entsprechenden Expositionsklasse (XA 1 bis XA 3), der Einsatzdauer (Kurzzeitanker  $\leq 2$  Jahre, Daueranker  $> 2$  Jahre) sowie dem anstehenden Boden (Festgestein, Lockergestein). Die Untersuchungsparameter der einzelnen chemischen Merkmale sind in der DIN 4030-1:2008-06 festgelegt. Anhand der bestimmten Gehalte der relevanten Parameter erfolgt eine Zuordnung zu einer der drei Expositionsklassen (XA 1 - schwach angreifend, XA 2 - stark angreifend, XA 3 - sehr stark angreifend). In Abb. 2.1 sind die Nutzungseinschränkungen von Verpressankern bei aggressivem Grundwasser auf Grundlage der DIN EN 1537:2014-07 in Verbindung mit der DIN/TS 18537:2021-05 dargestellt. Bei höheren Angriffsgraden, in der Regel ab XA 2, ist ein Einsatz von Verpressankern nur mit Bestätigung eines Betonsachverständigen zulässig.

	Kurzzeitanker (Einsatzdauer $\leq 2$ Jahre)			Daueranker (Einsatzdauer $> 2$ Jahre)		
	XA 1	XA 2	XA 3	XA 1	XA 2	XA 3
Lockergestein	Zementmörtel muss den Vorgaben der DIN EN 1537:2014-07 (Abschn. 6.4.1) und der DIN 1045-2:2008-08 (Tabelle F2.2) entsprechen. Bei Sulfat zusätzlich Verwendung von SR-Zement.	Einsatz erlaubt, wenn ausschließliches Vorhandensein von Sulfat. Verwendung SR-Zement und Vorgaben DIN 1045-2:2008-08 (Tabelle F2.2) einhalten.	Bestätigung eines Betonsachverständigen, dass das Tragverhalten durch zeitabhängige Verminderung der Mantelreibung nicht beeinträchtigt wird	Einsatz erlaubt, wenn ausschließliches Vorhandensein von Sulfat. Verwendung SR-Zement und Vorgaben DIN 1045-2:2008-08 (Tabelle F2.2) einhalten.	Bestätigung eines Betonsachverständigen, dass das Tragverhalten durch zeitabhängige Verminderung der Mantelreibung nicht beeinträchtigt wird	Bestätigung eines Betonsachverständigen, dass das Tragverhalten durch zeitabhängige Verminderung der Mantelreibung nicht beeinträchtigt wird
Festgestein	Zementmörtel muss den Vorgaben der DIN EN 1537:2014-07 (Abschn. 6.4.1) und der DIN 1045-2:2008-08 (Tabelle F2.2) entsprechen. Bei Sulfat zusätzlich Verwendung von SR-Zement.	Einsatz erlaubt, wenn ausschließliches Vorhandensein von Sulfat. Verwendung SR-Zement und Vorgaben DIN 1045-2:2008-08 (Tabelle F2.2) einhalten.	Bestätigung eines Betonsachverständigen, dass das Tragverhalten durch zeitabhängige Verminderung der Mantelreibung nicht beeinträchtigt wird	Einsatz erlaubt, wenn ausschließliches Vorhandensein von Sulfat. Verwendung SR-Zement und Vorgaben DIN 1045-2:2008-08 (Tabelle F2.2) einhalten.	Einsatz erlaubt, wenn ausschließliches Vorhandensein von Sulfat. Verwendung SR-Zement und Vorgaben DIN 1045-2:2008-08 (Tabelle F2.2) einhalten.	Bestätigung eines Betonsachverständigen, dass das Tragverhalten durch zeitabhängige Verminderung der Mantelreibung nicht beeinträchtigt wird

Abb. 2.1: Einsatz von Verpressankern in Abhängigkeit der Nutzungsdauer, des chemischen Angriffes und der Bodenart gemäß DIN/TS 18537:2021-05 in Verbindung mit der DIN/TS 18537:2021-05

## 2.2 Übersichtskarten mit Hintergrundwerten des Grundwassers

Anhand des Kartenmaterials des Geoportals der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) lässt sich eine erste Orientierungsmöglichkeit hinsichtlich der chemischen Parameter des Grundwassers gewinnen. Die Hintergrundwerte relevanter chemischer Parameter wurden aus etwa 60.000 Wasseranalysen ermittelt und in hydrogeochemische Einheiten zusammengefasst. Darunter fallen auch die nach DIN 4030-1:2008-06 relevanten betonangreifenden Parameter pH-Wert, Ammonium (NH<sub>4</sub>), Magnesium (Mg) sowie Sulfat (SO<sub>4</sub>). In Abb. 2.2 ist eine Auswertung der Hintergrundwerte des Grundwassers der BGR hinsichtlich der Grenzwerte der Expositionsklassen nach DIN 4030-1:2008-06 für die chemischen Stoffe Ammonium, Magnesium und Sulfat dargestellt. Für diese drei Stoffe ist keine hydrogeochemische Einheit der Expositionsklasse XA 3 zugeordnet. Die Kategorisierung in die Expositionsklasse aufgrund erhöhter Werte an betonangreifenden Grundwasserparametern ist regionalgeologisch und geomorphografisch bedingt. Insbesondere in den Mittelgebirgsregionen, dem Hessischen Bergland, dem Rheinischen Schiefergebirge sowie entlang des Oberrheins, der Weser und der Elbe treten großflächig erhöhte Werte an Sulfat und Ammonium auf.

Eine Übersichtskarte zur kalklösenden Kohlensäure im Grundwasser wird demnächst veröffentlicht. Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) haben in Zusammenarbeit eine solche deutschlandweite Karte erstellt, ähnlich der Aufbereitung der BGR.

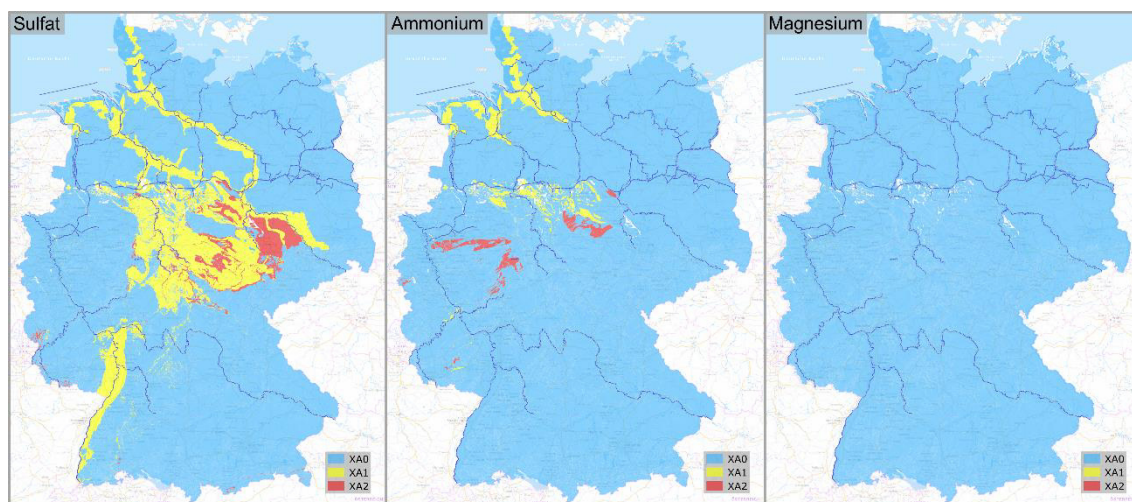


Abb. 2.2: Expositionsklassen einzelner Stoffe des Grundwassers auf Basis der Kartenwerke: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) & Staatliche Geologische Dienste (SGD); Kartendarstellung und Präsentationsgraphiken: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie; Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes ([www.wsv.de](http://www.wsv.de)).

Diese Übersichten zu den verschiedenen betonangreifenden Stoffen sind nur ein erster Anhaltspunkt für die chemische Beschaffenheit des Grundwassers. Zusätzliche qualifizierte Grundwasseruntersuchungen im Rahmen der geotechnischen Erkundung sind aufgrund regionaler und kleinräumlicher Abweichungen trotzdem unumgänglich.

### **2.3 Auswirkungen in der Praxis**

Die Schleuse Gleesen befindet sich am Dortmund-Ems-Kanal (DEK), einer der bedeutendsten künstlichen Wasserstraßen Deutschlands (VGL. MABMANN 2015). Da die bestehende große Schleuse eine Lebensdauer von über 100 Jahren erreicht hat, wird derzeit ein Ersatzneubau durchgeführt. Weitere Informationen zu den Baumaßnahmen finden sich in MABMANN (2019 A), MABMANN ET AL. (2019 B), HEIDENREICH ET AL. (2019) sowie HEIDENREICH, HERTZEN (2020).

Bei den ersten geotechnischen Untersuchungen am Standort Gleesen wurden erhöhte Werte an kalklösender Kohlensäure im Grundwasser festgestellt. Die Ergebnisse dieser Grundwasseranalysen wiesen zumeist einen Angriffsgrad von XA 1 auf. Im Zuge weiterer geotechnischer Untersuchungen und Grundwasseranalysen wurden zeitliche Schwankungen des Gehalts an kalklösender Kohlensäure deutlich. Zur Beweissicherung wurden alle sechs Monate weitere Analysen an ausgewählten Grundwassermessstellen durchgeführt. Die Analysewerte lagen temporär im XA 2 und an einer Messstelle sogar im XA 3 Bereich. Auch bei anderen Baumaßnahmen konnten zeitlich veränderliche Werte der kalklösenden Kohlensäure beobachtet werden, die Unterschiede von bis zu zwei Expositionsklassen aufwiesen. Folglich sollte in Regionen mit betonangreifenden Grundwässern auch eine zeitliche Betrachtung der chemischen Parameter erfolgen, da gegebenenfalls ein Einzelwert auf der unsicheren Seite liegen kann.

Temporäre Rückverankerungen zur Sicherung von Baugruben sind im Rahmen von Baumaßnahmen oft über einen Zeitraum von mehr als zwei Jahren erforderlich. Aufgrund der zeitlichen Einordnung, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, müssen diese temporären Verpressanker bei einer Einsatzdauer von über zwei Jahren als Daueranker hinsichtlich des chemischen Angriffes bewertet und ausgeführt werden. Aufgrund der Werte an kalklösender Kohlensäure im Bereich von XA 1 bis XA 2 wurde für die Baumaßnahmen in Gleesen zunächst die Nutzung von dauerhaften Verpressankern gemäß Normung ausgeschlossen. Die dauerhafte Rückverankerung im Uferbereich wurde zum Teil durch Totmannkonstruktionen ersetzt. Aufgrund von Liegenschaften und angrenzenden Grundstücken waren die Platzverhältnisse abschnittsweise jedoch nicht ausreichend für diese Konstruktionen. In diesen Bereichen wurden die ursprünglich geplanten Verpressanker durch rund 24 m lange Stahlrammpfähle ersetzt, die an die bestehende Uferwand im Kopfbereich angeschweißt wurden (vgl. Abb. 2.3). Zur exemplarischen Veranschaulichung ist in Abb. 2.4 ein Vergleich der Geräte und Dimensionen zwischen der Installation eines Rammpfahls in



Gleesen gegenüber der Herstellung eines Verpressankers in Venhaus dargestellt. Resultierend entstanden längere Bauzeiten, höhere Lärmemissionen, Erschütterungen und gestiegene Kosten. Insgesamt zeigt sich, dass alternative Lösungen gegenüber dem Einsatz von Verpressankern zu einem deutlichen Mehraufwand führen können.



Abb. 2.3: Anschluss der Rückverankerung an die Spundwand in Gleesen



Abb. 2.4: Einbringung der Rückverankerung für die Uferwand in Gleesen (links) bzw. Venhaus (rechts).

Um die Auswirkungen des kalklösenden Angriffs auf die Tragfähigkeit von Verpressankern besser zu verstehen, wurden weitere Untersuchungen in situ an verschiedenen Standorten des DEK (Gleesen, Venhaus und Bevergern) durchgeführt (vgl. HEIDENREICH 2019, HERTEN UND HEIDENREICH 2022). Die Ergebnisse aus wiederholten Ankerprüfungen und neuen Forschungsankern an den Standorten zeigen keine signifikanten Tragfähigkeitsverluste. Dies steht im Widerspruch zu den Ergebnissen von Modellversuchen von MANN (1993), HOF (2004) und TRIANTAFYLIDIS UND SCHREINER (2008), die eine signifikante Abnahme der Tragfähigkeit infolge des chemischen Angriffs festgestellt haben. Die Gründe für diese Unterschiede zwischen Labor- und in situ Ergebnissen sind bisher nicht bekannt. Basierend auf den Erkenntnissen der in situ Versuche wurden Verpressanker bis zu fünf Jahre unter Berücksichtigung einer Tragfähigkeitsreserve verwendet. Im Zuge der

bisherigen Einsatzzeit konnte keine Reduzierung der Tragfähigkeit an diesen Verpressankern beobachtet werden.

## 2.4 Aktuelle Forschung

Die Auswirkungen des chemischen Angriffs auf die Tragfähigkeit von Verpressankern sind zum Teil noch nicht ausreichend untersucht worden. Ein wichtiger Aspekt ist die Betrachtung des kalklösenden Angriffs auf den Zementstein in Abhängigkeit dessen Eigenschaften, die durch den Verpressvorgang bestimmt werden. Bisherige Untersuchungsergebnisse zur Eindringtiefe des kalklösenden Angriffs beruhen zumeist auf Versuchen an unverpressten Zementleimen (u.a. GRUBE UND RECHENBERG 1987, HOF 2004). Beim Verpressvorgang in nichtbindigen Böden wird ein Teil des Anmachwassers jedoch aufgrund des aufgetragenen Drucks ausfiltriert, was in einem reduzierten Wasserzementwert resultiert (u.a. DOMES 2015). Untersuchungen von WAGEMANN ET AL (2023) zeigen deutliche Unterschiede des Zementsteins zwischen verpresster und unverpresster Herstellung hinsichtlich Festigkeitsentwicklung und Porengrößenradien. Die durch den Verpressvorgang veränderten Eigenschaften des Zementsteins könnten sich positiv auf den Widerstand gegen kalklösende Kohlensäure auswirken. Erste Untersuchungen an verpressten Modellankern zeigen eine geringere Eindringtiefe bei Einwirkungsdauern des chemischen Angriffs von bis zu zwölf Monaten im Vergleich zu Ergebnissen aus herkömmlich unverpresst hergestellten Zementsteinproben (vgl. Abb. 2.5).

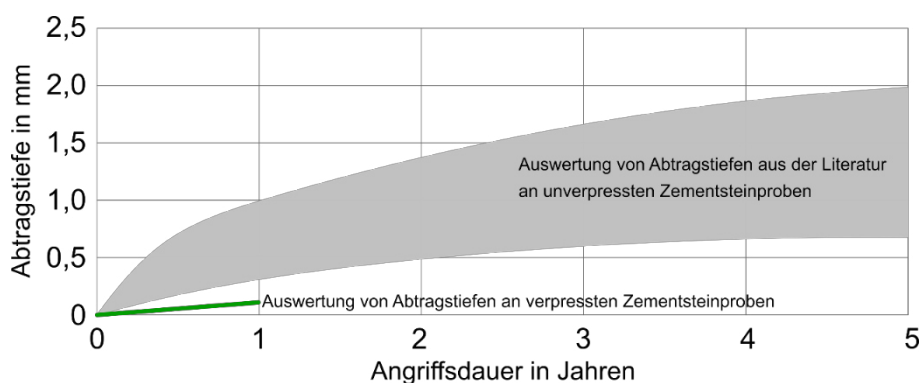


Abb. 2.5: Abtragstiefen von unverpressten bzw. verpressten Zementsteinproben infolge des Angriffs durch kalklösende Kohlensäure

## 3 Verpressanker im Kontext der CO<sub>2</sub>-Einsparung

Neben den normativen Bestimmungen für Verpressanker sollte auch ihre Nachhaltigkeit im Zuge von CO<sub>2</sub>-Einsparungen betrachtet werden. Laut der Auswertung der KEI (2022) trägt die Industrie in Deutschland fast 25% zu den gesamten Treibhausgasemissionen bei. An diesem haben die Zement- und Stahlindustrie einen Anteil von rund 30%. Aufgrund der emissionsintensiven Ausgangsmaterialien, Zement und Stahl, ist es

wichtig, Verpressanker hinsichtlich ihres CO<sub>2</sub>-Äquivalents zu betrachten und idealerweise zu optimieren.

Die in Kapitel 2.3 beschriebenen Umplanungen, bei denen die Verpressanker durch Rammpfähle ersetzt wurden, können auch hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit betrachtet werden. Bei dem eingesetzten Rammpfahl weist das CO<sub>2</sub>-Äquivalent im Vergleich zu den produktionsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Verpressankers einen höheren Wert auf. Bei der Produktion von Stahl und Zement für einen einzelnen Verpressanker muss mit rund 1.000 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent gerechnet werden. Die eingesetzten Rammpfähle (Annahme ohne Recyclingstahl) zur Rückverankerung haben ein ungefähres CO<sub>2</sub>-Äquivalent von rund 4.500 kg. Diese Zahlen verdeutlichen, dass Verpressanker im Vergleich zu möglichen Alternativen geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweisen können und daher zukünftig weiterführende Untersuchungen zum optimalen und nachhaltigen Einsatz unumgänglich sind.

Vorplanungen und Dimensionierungen von Verpressankern werden in der Regel über die Ostermayer-Diagramme (OSTERMAYER UND SCHEELE 1977) anhand der geotechnischen Erkundung des Bodens bezüglich seiner Zusammensetzung und der Lagerungsdichte durchgeführt. Eine Abminderung der abgeleiteten Werte für die Grenztragfähigkeit soll gemäß WICHTER UND MEINIGER (2017) mit dem Faktor 0,5 erfolgen. Durchzuführende Untersuchungsprüfungen an den eingesetzten Verpressankern werden nur teilweise bis zum Versagen durchgeführt, da der Nachweis der statisch benötigten Ankerkraft ausreichend ist. Eine nachträgliche Auswertung der Ergebnisse im Vergleich zur Vordimensionierung erfolgt selten, wodurch die tatsächliche Ausnutzung nicht bekannt ist. Erste Erkenntnisse und Auswertungen verschiedener Untersuchungsprüfungen an Verpressankern zeigen, dass der Faktor 0,5 oft zu konservativ ist und zumeist eine Überdimensionierung vorliegt (STEIN 2022).

Im Rahmen eines Kooperationsprojekts zwischen der BAW und dem Lehr- und Forschungsgebiet Geotechnik der Bergischen Universität Wuppertal werden weitere Laborversuche an Verpressankern durchgeführt, um weitere Einflussparameter auf die Tragfähigkeit zu identifizieren. Hierbei sollen der Einfluss von Verpressdruck, Spannungsänderungen, Zementsorten sowie unterschiedlicher bodenmechanischer Kennwerte auf die Tragfähigkeit untersucht werden.

## 4 Fazit

Es zeigt sich, dass zum einen Verpressanker trotz eines extremen Zementeinsatzes insgesamt emissionsseitig günstiger als alternative Bauweisen sein können und zum anderen die angestrebte Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementindustrie durch veränderte Zementzusammensetzungen und die Einführung neuer Zementarten auch zum Anlass genommen werden sollte, die Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe besser zu verstehen und zu erhöhen. Somit ist der Verpressanker trotz seiner über 90jährigen Tradition ein aktuelles und lohnendes Forschungsthema.

## Literatur

- DIN 4030:2008-06 (2008): *Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase - Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte.*
- DIN EN 1537:2014-07 (2014): *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Verpressanker; Deutsche Fassung 1537:2013.*
- DIN/TS 18537:2021-05 (2021): *Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 1537:2014-07, Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Verpressanker.*
- Domes, X. A. L. (2015): *Cement grouting during installation of ground anchors in non-cohesive soils.* Phd thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- Grube, H., Rechenberg, W. (1987): *Betonabtrag durch chemisch angreifende saure Wässer.* Beton 37 (11), 446-451 and Beton 37 (12), 495-498.
- Heidenreich, F.; Herten, M.; König, D. (2019): *Attack of lime-dissolving carbonic acid in in situ tests on the load capacity of grouted anchors in sands.* In: Sigursteinsson, Haraldur; Erlingsson, Sigurður; Bessason, Bjarni (Hg.): Conference proceedings, XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering - ECSMGE 2019, Reykjavík, Iceland, 1 – 6 of September 2019. Jarðtæknifélag Íslands: Icelandic Geotechnical Society. S. 1-8.
- Heidenreich, F.; Herten, M. (2020): *Auswirkungen von kalklösender Kohlensäure im Grundwasser auf den Neubau von fünf Schleusen an der Schleusentreppe. Rheine.* In: Technische Akademie Esslingen (Hg.): 12. Kolloquium Bauen in Boden und Fels. Fachtagung über aktuelle Herausforderungen der Geotechnik. Tagungshandbuch 2020. Tübingen: Expert verlag GmbH. S. 367-376.
- Hof, C. (2004): *Über das Verpressankertragverhalten unter kalklösendem Kohlensäureangriff.* Bochum: Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum (Dissertation, Heft 35).
- Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI) (2022): *Auf dem Weg zur klimaneutralen Industrie.*
- Manns, W.; Lange, H.-D. (1993): *Einfluss aggressiver Wässer und Böden auf das Langzeitverhalten von Verpreßankern und Verpreßpfählen.* Stuttgart:

- Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg  
(Abschlußbericht zu Teil II - Ausziehversuche -).
- Maßmann, B. (2015): *100 Jahre alte Schleusen werden ersetzt: „Das Projekt Neue Schleusen DEK-Nord“*. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): *Projekte der Geotechnik an Bundeswasserstraßen*. Karlsruhe. S. 73-81.
- Maßmann, B. (2019 a): *Das Projekt Neue Schleusen DEK-Nord und die praktische Anwendung verschiedener Bauverfahren*. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): *Verfahren des Spezialtiefbaus*. Karlsruhe. S. 51-56.
- Maßmann, B.; Neif, S.; Renze, H. (2019 b): *Planung und Umsetzung von fünf großen Bauprojekten an der Dortmund-Ems-Kanal-Nordstrecke*. In: *Bautechnik* 96 (8). S. 632-637.
- Ostermayer, H. und Scheele, F. (1977): *Research on ground anchors in non-cohesive soils*. In 'Proceedings of the 9. Int. Conf. Soil. Mech. and Found. Engen., Tokyo, Japan. S. 92–97.
- Stein, P. (2022): *Äußere Tragfähigkeiten von Rückverankerungselementen – Datenanalyse und dominierende Einflussfaktoren als Grundlage einer wissensbasierten Prognose*. In: *BAW Aktuell* 01/2022. S. 16-17.
- Triantafyllidis, T.; Schreiner, V. (2008): *Tragverhalten von Verpressankern unter kalklösender CO<sub>2</sub>-Belastung*. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl. (Abschlussbericht, Bauforschung T. 3167).
- VDZ (Hrsg.) (2021): *Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien: Eine CO<sub>2</sub>-Roadmap für die deutsche Zementindustrie*.
- Wagemann, F.; Schmidt-Döhl, F.; Rahimi, A. (2023): *Quellverhalten von Portland- und Hochofenzementstein bei unterschiedlichen Temperaturen*. *ce/papers*, 6: 1091-1100.
- Wichter, L.; Meiniger, W. (2017): *Verpressanker, Bodennägel und Zugpfähle*. Grundbau-Taschenbuch, 8. Auflage, Abschnitt 2.5 im Teil 1, Berlin, Verlag Ernst und Sohn



# Nachhaltige Gründungsplanung, mehr als nur Zementreduzierung

Dipl.-Ing. Thomas Garbers, *AARSLEFF Spezialtiefbau GmbH*

Dipl.-Ing. Dirk Windeln, *Aarsleff Grundbau GmbH*

Dipl.-Ing. Peter Wardinghus, *Per Aarsleff A/S*

## Zusammenfassung

Im Beitrag werden verschiedene Ansätze der Bauindustrie vorgestellt, um den CO<sub>2</sub>-Footprint von Pfahlgründungen bei der Herstellung zu reduzieren und über den Lebenszyklus des Gebäudes auszugleichen. Wie die Darstellung in Abb. 1.0 zeigt, können die ausführenden Firmen den größten Anteil aber nicht beeinflussen, da sie auf die Zulieferung durch die Zementhersteller angewiesen sind. Deshalb wird ein besonderes Augenmerk auf die Planung, Ausführung und der Optimierung einer Pfahlgründung gelegt, da hierüber für die Produktion und die Einbringung der Pfähle das größte Einsparpotential besteht. An einem ausgeführten Projekt wird erläutert, welche Mittel Bauherren und Planer schon heute nutzen können und wie diese durch die Nutzung von BIM zukünftig optimiert werden können.

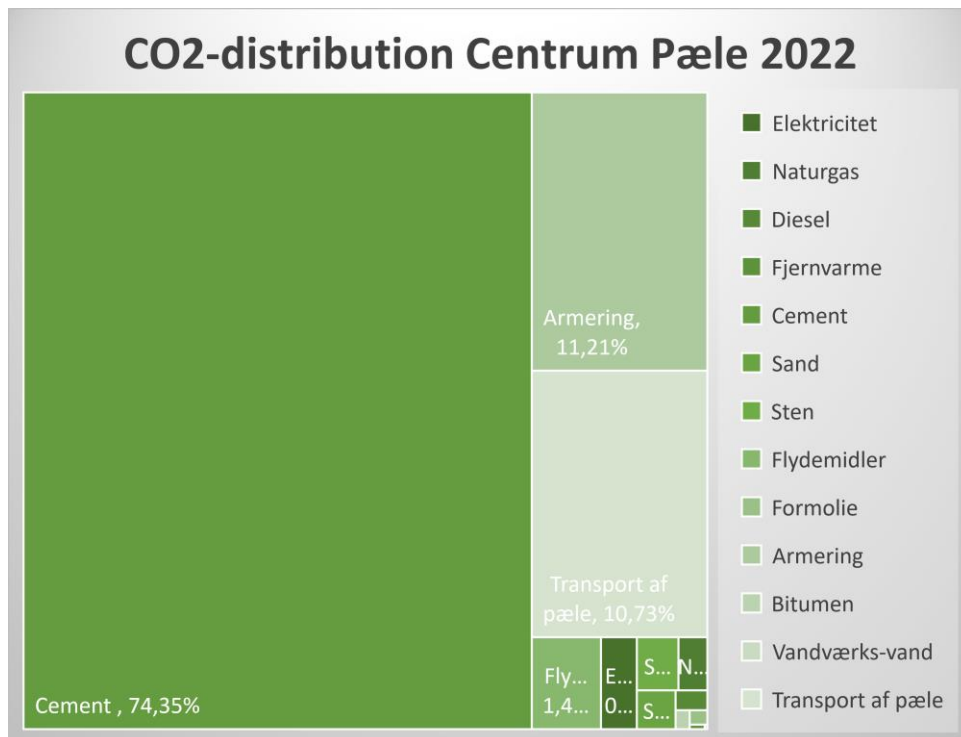


Abb. 1.0: CO<sub>2</sub>-Anteile bei der Produktion von CENTRUM-Fertigbetonrammpfählen



# 1 CO<sub>2</sub>-Emissionen im Spezialtiefbau

Der Zement bzw. seine Produktion trägt den größten Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung von Beton. Da die Bauindustrie in diesem Punkt nur Nutzer des Produktes Zement bei der Herstellung von Beton ist, sind die Einflussmöglichkeiten an dieser Stelle begrenzt.

Trotzdem gibt es auch bei den Pfahlherstellern Ideen und Wege den CO<sub>2</sub>-Footprint zu reduzieren. Erste Ideen wurden durch die Spezialtiefbauunternehmen, die im EFFC organisiert sind, erarbeitet und 2022 im Guide No. 1 Carbon Reduction (Abb. 1.1) veröffentlicht. Zudem steht der Carbon Calculator zur Verfügung, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen der geplanten Maßnahmen zu ermitteln und unterschiedliche Verfahren zu vergleichen.

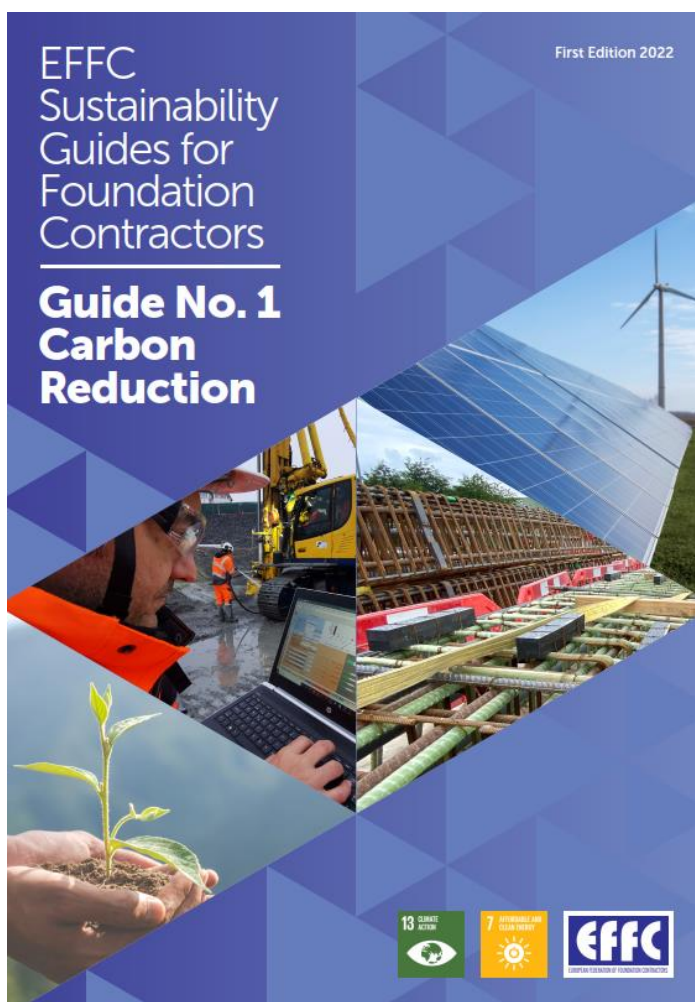


Abb. 1.1: EFFC Guide Carbon Reduction



## 1.1 Entwicklungen bei der Herstellung von Fertigbetonrammpfählen

Bei der Produktion von Fertigbetonrammpfählen werden verschiedene Möglichkeiten genutzt, um bei der Herstellung des Betons die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren oder durch andere Maßnahmen auszugleichen. Unter anderem wird an folgenden Punkten gearbeitet.

- Reduzierung des Mindestzementgehaltes in den Ausführungsnormen.
- Verwendung von CEM II statt CEM III, 11% Reduzierung.
- Produktion von Hohlquerschnitten, um Beton zu sparen und Transporte aufgrund der Gewichtsreduktion optimieren zu können.
- Nutzung der hohlen Querschnitte zur geothermischen Aktivierung der Pfähle.
- Entwicklung von Pfahlkupplungen mit Durchgängen für Geothermieleitungen, um Pfähle auf ganzer Länge nutzen zu können.
- Nutzung anderer Kraftstoffe bzw. Antriebe der Maschinen
- Nutzung der Produktionshallen zur Erzeugung von Strom (PV-Anlagen)



Abb. 1.1: Fertigbetonrammpfahl als Hohlquerschnitt



*Abb. 1.2: DEP Joint mit Verlängerungsmöglichkeiten der Geothermieleitungen*

## **1.2 Entwicklungen beim Einbringen von Fertigbetonrammpfählen**

Auch für das Einbringen der Fertigbetonrammpfähle können die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden, auch wenn dies nur einen kleineren Beitrag leisten kann:

- Verwendung von HVO-Diesel, 90% Reduzierung.
- Start-/Stopp-Automatik zur Reduzierung der Betriebsstunden.
- Umstellung der Geräteflotte auf Stromantrieb.
- Automatische Aufzeichnung und Überwachung, zur Optimierung der Einbringung.

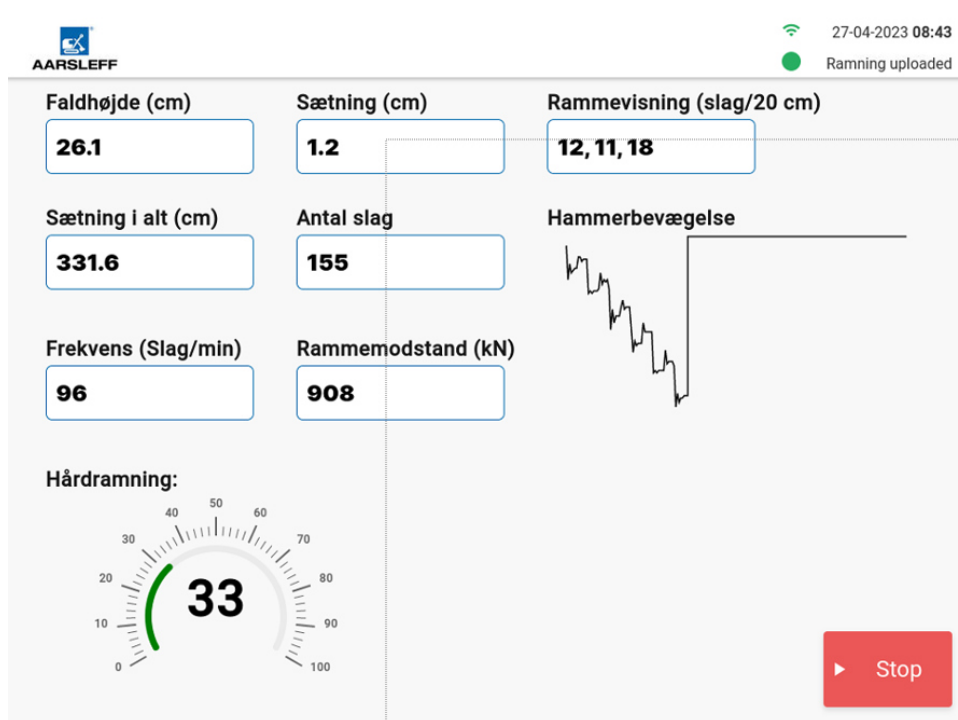


Abb. 1.3: Steuerung der Pfahleinbringung

## 2 Reduzierung durch Planungsoptimierungen

Ein Weg die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren, bietet die Ausnutzung der Möglichkeiten der Bemessungsnormen. Diese Möglichkeiten müssen aber durch die Bauherren frühzeitig erkannt und umgesetzt werden. Nur wer am Anfang investiert, kann am Ende auch die Ernte einfahren. Ein gute und auch über die Mindestforderungen der Normen hinausgehende Baugrunderkundung schafft die Möglichkeit zutreffende Annahmen für die Planung der Gründung zu finden. Mit den Ergebnissen der Erkundungen kann dann ein erstes Baugrundmodell erstellt werden und Widerstände und Pfahllängen festgelegt werden. Da die gängigen Programme zur Ermittlung von Pfahlwiderständen auf den Ergebnissen von Drucksondierungen nach DIN EN 22746-1 beruhen, sind sie das bevorzugte Erkundungssystem. Mit den Koordinaten aus dem Tragwerk und der Lage der Drucksondierungen, lassen sich dann auf der Basis von Erfahrungswerten (z.B. EA-Pfähle) Pfahllängen verschiedener Pfahlsysteme automatisch ermitteln. Aus dem Modell lassen sich dann Bereiche erkennen, in denen dann der Rasterabstand der Erkundungen verdichtet werden muss.

Ein weiteres Element, um Pfahlwiderstände und erforderliche Pfahllängen zu optimieren, bieten statische und dynamische Pfahlprobelastungen nach DIN EN ISO 22477-1, 2 und 4. Die geringsten Teilsicherheitsbeiwerte und Streuungsfaktoren lassen sich durch die Ausführung von statischen Pfahlprobelastungen erzielen. Um mit den Ergebnissen der Probelastungen nicht nur die Pfähle, sondern auch das aufgehende Tragwerk zu optimieren, ist ein zeitlicher Vorlauf vor Ausführungsbeginn zu berücksichtigen.

Bei der Ausführung selbst, wird die Einbringung von Fertigbetonrammpfählen automatisch überwacht und aufgezeichnet. Die Daten werden zur Erstellung der großen Rammerichte verwendet. Zukünftig sollen die Daten auch in das Baugrundmodell einfließen, um das Modell und die erforderlichen Pfahllängen anzupassen. Somit können Stillstände auf der Baustelle vermieden und die erforderlichen Pfahlmassen auf das notwendige Maß reduziert werden.

### 3 Umrichterstation SuedLink, Brunsbüttel

Die Siemens Energy errichtet für die TenneT im Zuge des Projektes SuedLink in Brunsbüttel eine Umrichterstation. Die Gründung der Station erfolgt auf Centrum Fertigbetonrammpfählen. Um die Gründungsplanung zu optimieren, wurden vor Ausführungsbeginn sechs statische Probelastungen ausgeführt. Dabei wurden alle geplanten Querschnitte getestet. Bei der Festlegung der Einrammtiefen, wurde darauf geachtet bei den Belastungen die char. Widerstände der Pfähle zu erreichen. Damit sollte für die Ausführung ein Optimum zwischen erforderlicher Rammenergie und erzielbarem Pfahlwiderstand erzielt werden.



Abb. 3.1: Lage der Baustelle mit Probefelder (@Google maps)

Folgende Massen waren vor der Durchführung der Belastungen geplant:

- 0 Fertigbetonrammpfähle 30\*30 cm,  $R_{c,d} = 1100$  kN,  $L = 23$  m
- 2062 Fertigbetonrammpfähle 35\*35 cm,  $R_{c,d} = 1400$  kN,  $L = 23$  m
- 298 Fertigbetonrammpfähle 40\*40 cm,  $R_{c,d} = 1750$  kN,  $L = 23$  m
- 28 Fertigbetonrammpfähle 45\*45 cm,  $R_{c,d} = 2150$  kN,  $L = 23$  m



### 3.1 Ergebnisse der Probelastungen

Um möglichst genaue Kenntnisse des Baugrundes am Standort der Probepfähle zu erhalten, wurden in allen Ansatzpunkten vor Pfahlherstellung Drucksondierungen ausgeführt. Dies ermöglichte den Vergleich mit den Mantelreibungs- und Spitzendruckwiderständen der EA-Pfähle, ohne Messtechnik in die Pfähle einbauen zu müssen. Aufgrund der hohen Anzahl an Probelastungen konnten die Streuungsfaktoren auf  $\xi= 1,0$  reduziert werden. Die geplanten Absetztiefen der Pfähle, wurden mit den oberen Erfahrungswerten der EA-Pfähle anhand der Drucksondierungsergebnisse ermittelt. Um die Absetztiefen auf ihre Ausführbarkeit hin zu überprüfen, wurden Rammanalysen ausgeführt und bei der Festlegung der Absetztiefen berücksichtigt. Der Aufbau der Belastungen wurde mit ausreichenden Reserven konzipiert, um die Widerstände der Pfähle möglichst voll auszunutzen.

Durch die Ausführung von dynamischen Belastungen an separat hergestellten Pfählen, konnten zudem Erkenntnisse für die gewünschte Überprüfung von Bauwerkspfählen gesammelt werden.

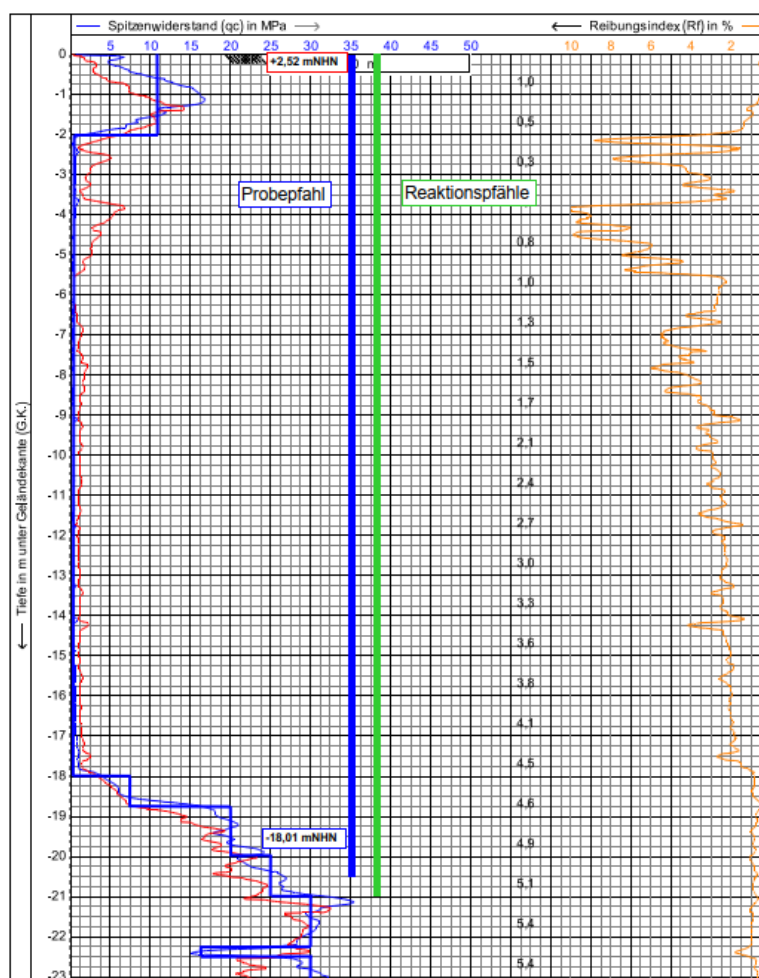


Abb. 3.2: Baugrund am Probepfahl P6

Pfähle		Belastungen										Widerstände			
Nr.	Abm. cm	max. Pp kN	Setzung mm	EA-Pfähle			Fusswid.	dynamisch			Ausnutzung EA-P	Rc,m	Rc,k	Rc,d	
				Mantelreibung				Mantelreibung		Fusswid.		kN			
				Auff.	Weich.	Sand		Auff.	Weich.	Sand		%			
P1	40/40	3000	15,49	573	129	848	1708	-	-	-	-	70	2298	1838	1671
P2	35/35	2500	22,11	279	77	668	1476	-	-	-	-	120	2144	1715	1559
P3	40/40	3000	23,50	408	226	657	1708	-	-	-	-	70	2366	1893	1721
D1	40/40	4226	-	-	-	-	-	23	308	1853	2042	-	-	-	-
D2	35/35	2946	-	-	-	-	-	0	438	1038	1470	-	-	-	-
D3	40/40	3434	-	-	-	-	-	24	412	1242	1861	-	-	-	-
P4	45/45	3750	35,36	533	137	696	2385	-	-	-	-	110	3080	2464	2240
P5	35/35	2500	36,06	196	157	570	1577	-	-	-	-	150	2147	1718	1561
P6	30/30	2000	21,07	246	181	414	1189	-	-	-	-	150	1573	1258	1144
D4	45/45	4102	-	533	137	137	-	75	419	1067	2541	-	-	-	-
D5	35/35	2940	-	196	157	157	-	40	181	708	2011	-	-	-	-
D6	30/30	2225	-	246	181	181	-	1	122	569	1533	-	-	-	-

Abb. 3.3: Ergebnisse statische und dynamische Belastungen

Nach der Auswertung der statischen Probelastungen konnten die auszuführenden Massen wie folgt optimiert werden:

- Ermittlung der erforderlichen Absetztiefen mit den oberen Erfahrungswerten der EA-Pfähle
- Teilsicherheitsbeiwert der Widerstände  $Y_t = 1,1$
- Streufaktor  $\xi = 1,0$
- 551 Fertigbetonrammpfähle 30\*30 cm,  $R_{c,d} = 1100$  kN,  $L = 21$  m
- 1395 Fertigbetonrammpfähle 35\*35 cm,  $R_{c,d} = 1400$  kN,  $L = 21$  m
- 442 Fertigbetonrammpfähle 40\*40 cm,  $R_{c,d} = 1950$  kN,  $L = 21$  m
- 0 Fertigbetonrammpfähle 45\*45 cm,  $R_{c,d} = 2150$  kN,  $L = 21$  m

### 3.2 Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

Durch die Ausführung der Pfahlprobelastungen konnten die geplanten Querschnitte höher ausgelastet bzw. die erforderlichen Pfahllängen reduziert werden. Auf der Grundlage der Umwelt-Produktionsdeklaration für Centrum-Fertigrammpfähle ergeben sich die in der Abb. 3.5 dargestellten CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Die Einsparungen entsprechen

**ca. 196.000 km oder 40 Erdumrundungen mit einem Diesel-Pkw.**

Die größten Einsparungen werden durch die reduzierten Pfahlmassen erzielt. Die Einrammung der Pfähle liefert nur einen kleinen Beitrag, da nur die erforderliche Rammenergie und Einbringzeit im Bereich des tragfähigen Baugrundes reduziert werden können. Für die kleineren Querschnitte, muss zudem die Rammenergie reduziert werden, um die Fertigrammpfähle bei der Einrammung nicht zu beschädigen. Durch die geringere Rammenergie reduziert sich die Einbringzeit nur unwesentlich und somit auch die CO<sub>2</sub>-Emission. Es ergibt aber den positiven Nebeneffekt, dass das Einbringen der Pfähle deutlich Geräte schonender erfolgen kann.

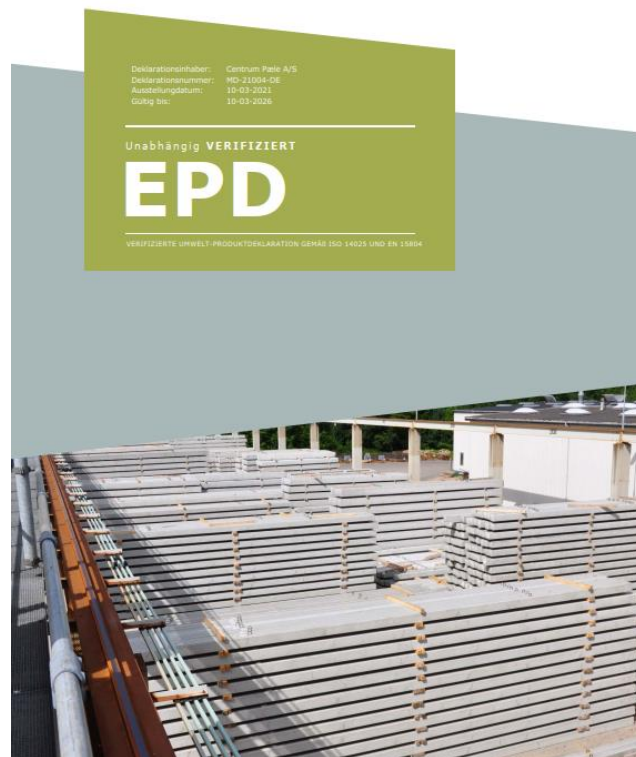


Abb. 3.4: Umwelt-Produktionsdeklaration für Centrum-Fertigrammpfähle

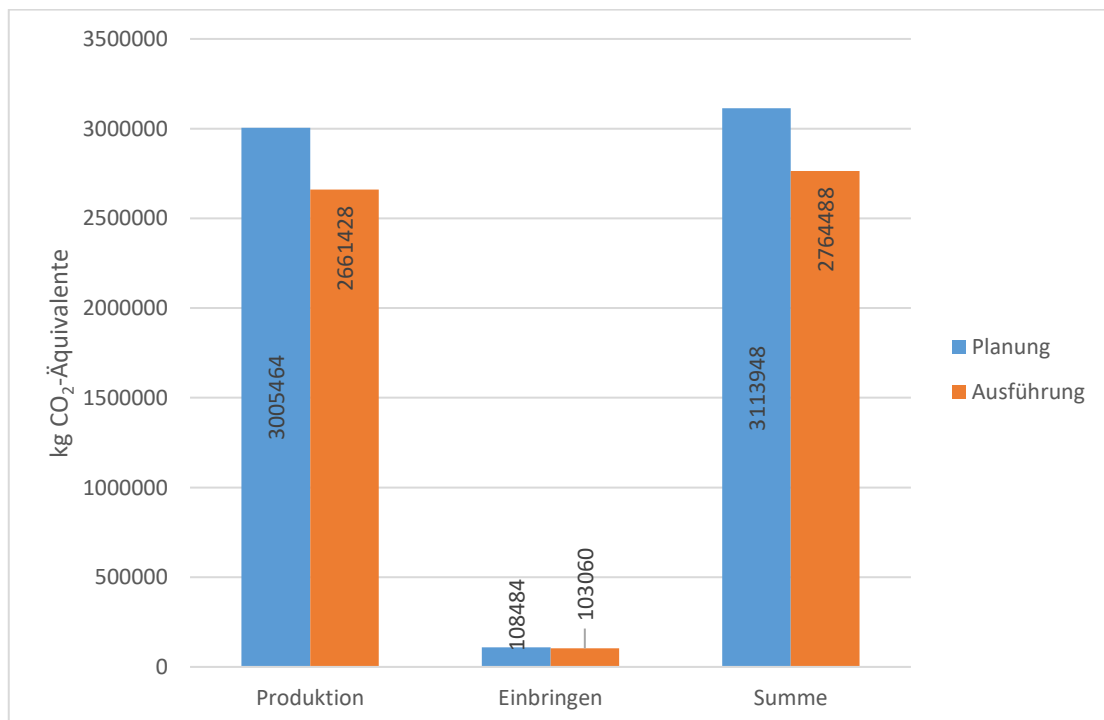


Abb. 3.5: Gegenüberstellung der CO<sub>2</sub>-Äquivalente

## 4 Ausblick, zukünftige Entwicklungen

Durch bessere Kenntnisse der Baugrundverhältnisse und Pfahlwiderstände sowie der Ausnutzung der Möglichkeiten der Normen, sind in der Planung erhebliche Reduzierungen von CO<sub>2</sub>-Emissionen möglich. Das jetzt für die Planung der Pfahllängen vorliegende, digitale Baugrundmodell, soll zukünftig durch die Ergebnisse der Ausführung überprüft und verfeinert werden. Damit wird die Prognosesicherheit der Pfahllängen an den noch auszuführenden Pfahlansatzpunkten erhöht. Mit den besseren Kenntnissen können die erforderlichen Pfahllängen und damit der Materialverbrauch optimiert werden. Zudem werden Stillstände auf der Baustelle reduziert, da Anomalien im Baugrund frühzeitig erkannt und planerisch berücksichtigt werden können.

Dadurch dass alle Pfähle eines Fundamentes bei Fertigbetonrammpfählen nacheinander eingebracht werden können, sind die Fahrwege schon optimiert. Durch die Aufzeichnung der Fahrwege ermöglicht das eingesetzte Protokollierungsprogramm aber eine weitere Optimierung (vgl. Abb. 4.1). Mit dem Einsatz von Elektrorammen (vgl. Abb. 4.2) oder der Verwendung von HVO-Diesel kann die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Produktion und beim Einbringen weiter reduziert werden.

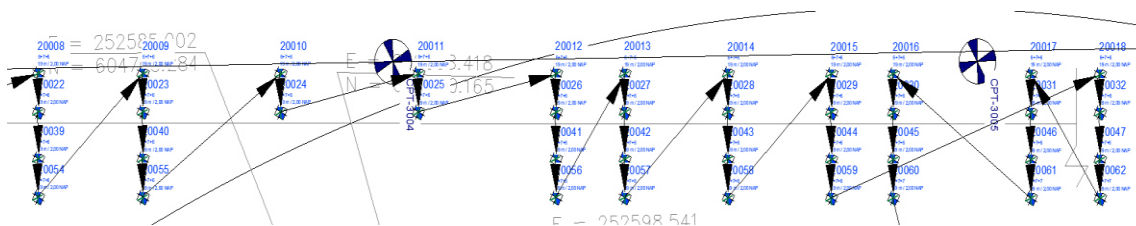


Abb. 4.1: Aufzeichnung der Fahrwege



Abb. 4.2: Elektroramme Junttan PM x2e



# In-situ-Messungen zum Verlauf des Frischbetondrucks in Bohrpfählen und Schlitzwänden

Hanna Nissen, M.Sc., *Bundesanstalt für Wasserbau*

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Pulsfort, *IGW - Ingenieurgesellschaft für Geotechnik mbH*

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Herten, *Bergische Universität Wuppertal*

## Zusammenfassung

Beim Neubau von Schleusen wird in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung auf innovative Maßnahmen gesetzt, die eine Reduzierung der Betonmengen mit sich bringen und eine wirtschaftliche und nachhaltige Alternative zu dem herkömmlichen Schleusenneubau darstellen sollen. Im Rahmen dessen werden unter anderem Bohrpfahlwände als tragender Bestandteil der dauerhaften Kammerwände der Schleusen eingesetzt. Denkbar sind dafür auch Schlitzwände, die den Vorteil einer erheblich geringeren Fugenanzahl bieten. An die Bohrpfähle bzw. Schlitzwände sind dann besonders hohe Qualitätsanforderungen zu stellen. Um ein besseres Verständnis der Betonage und deren Auswirkungen auf den Boden zu erhalten, wurden auf einigen Baustellen Frischbetondruckmessungen in Bohrpfählen bzw. Schlitzwänden während der Betonage durchgeführt. Dies soll dazu beitragen, das Risiko von Fehlstellen zu reduzieren und die dauerhafte Integrität der Bohrpfähle bzw. Schlitzwände zu gewährleisten.

## 1 Einleitung

Für einen ressourcenschonenden Bau von Schleusenkammern gab es bereits erste Pilotprojekte, bei denen die Baugrubenumschließung in Form von Schlitzwänden und Bohrpfahlwänden als Schleusenkammerwand eingesetzt wurden. In der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung wurde in Dörverden erstmalig eine Schleusenkammerwand in Form einer rückverankerten Bohrpfahlwand mit Vorsatzschale hergestellt (SAATHOFF ET AL. 2013). Diese Bauweise (vgl. Abb. 1.1) führt zu einer deutlichen Reduzierung des Beton- und Zementverbrauchs und damit auch des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks beim Schleusenbau. Die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und die Integrität der Bohrpfahl- bzw. Schlitzwand sind dabei hoch. Während der Herstellung kommt es jedoch immer wieder zu Schäden und mangelnder Betonüberdeckung bei Schlitzwänden sowie



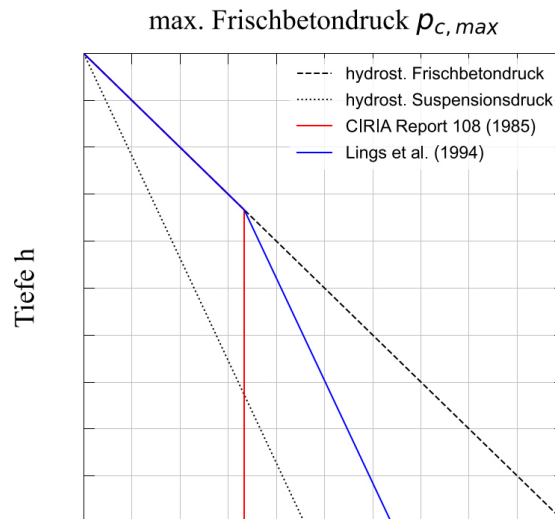


Abb. 1.2: Vergleich des Ansatzes des maximalen Frischbetondrucks über die Tiefe nach LINGS ET AL. (1994) mit einem beispielhaften Verlauf des CIRIA REPORT 108 (1985) für  $h_{krit} = 1/3 h$  (NISSEN ET AL. 2020b)

## 2 Messtechnik

Für die eigenen Messungen kam ein einfacher Piezodruckaufnehmer zum Einsatz. Dieser erhielt zum Schutz der empfindlichen Sensormembran einen mit einer Zweikomponenten-Silikonmasse vergossenen Aufsatz. Um einen möglichen Einfluss der Silikonschicht auf die Messergebnisse auszuschließen, wurden vorab umfangreiche Vorversuche im Labor durchgeführt. Dabei wurde sowohl die Druckübertragung im Wasser als auch im Frischbeton untersucht. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die modifizierten Sensoren (mit Silikonschicht) vergleichbare Ergebnisse mit denen von unveränderten Sensoren liefern (NISSEN ET AL. 2020.b). Die Sensoren eignen sich entsprechend für die Messung der totalen Spannungen im Frischbeton. Vergleichbare Druckaufnehmer haben ebenfalls GRUBER (2008) und DOMES ET AL. (2016) bei Untersuchungen in Frischbeton und Mörtel eingesetzt.

Für die in situ Messungen erfolgte die Befestigung der Sensoren vorab am Bewehrungskorb (Abb. 2.1). Die Kabel für die Strom- und Datenübertragung wurden an den Längsbewehrungsstäben nach oben geführt. Der Datenlogger und die Stromversorgung befinden sich in einem Schutzgehäuse, das oben am Bewehrungskorb so befestigt ist, dass der Herstellungsablauf während der Betonage nicht behindert wird.



Abb. 2.1: Eingebauter Piezodruckaufnehmer mit Silikonverguss am Bewehrungskorb

### 3 Eigene Messungen

Bisher wurden Frischbetondruckmessungen auf Baustellen in Brunsbüttel, Gleesen, Karlsruhe, Lehmen und im Inntal ausgeführt. Die Betonage der verroht hergestellten Bohrpfähle bzw. der Schlitzwandlamellen erfolgte im Kontraktorverfahren. Die Sohl-sicherung der Pfahlbohrungen wurde in Brunsbüttel mit einer Suspensionsstützung und bei den anderen Baustellen mit Hilfe einer Wasserauflast gewährleistet. Auf der Baustelle in Gleesen war es möglich, neben den Bohrpfahlmessungen auch in zwei Schlitzwandlamellen zu messen. Dadurch ist ein direkter Vergleich von Bohrpfahl- und Schlitzwandmessung in demselben Untergrund realisierbar. Eine Übersicht über die Untersuchungen gibt Tab. 3.1.

Tab. 3.1: Übersicht über die eigenen Messungen

Baustelle	Anzahl Pfähle	Anzahl Schlitzwandlamellen	Höhe h in m	Suspensionsstützung	Boden
Brunsbüttel (DEU)	2	-	~ 29,00	ja	Klei, Sand
Gleesen (DEU)	2	-	21,50	nein	Sand
	-	2	21,50	ja	
Inntal (AU)	1	-	19,60	nein	Kies
Karlsruhe (DEU)	3	-	15,90	nein	Kies, Sand
Lehmen (DEU)	2	-	15,00	nein	Kies
	2	-	17,00	nein	Kies, Fels

Der Fokus liegt im vorliegenden Beitrag auf dem Verlauf der gemessenen Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Tiefe. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der Messergebnisse bei unterschiedlichen Herstellungsabläufen sowie einen Vergleich mit den bekannten Ansätzen aus der Literatur. Die gemessenen Maximaldrücke sind für die Untersuchungen mit Wasserauflast in Abb. 3.1 und für die mit Suspensionsstützung in Abb. 3.2 aufgetragen. Abgebildet ist zudem der Verlauf des theoretischen hydrostatischen Frischbetondrucks.

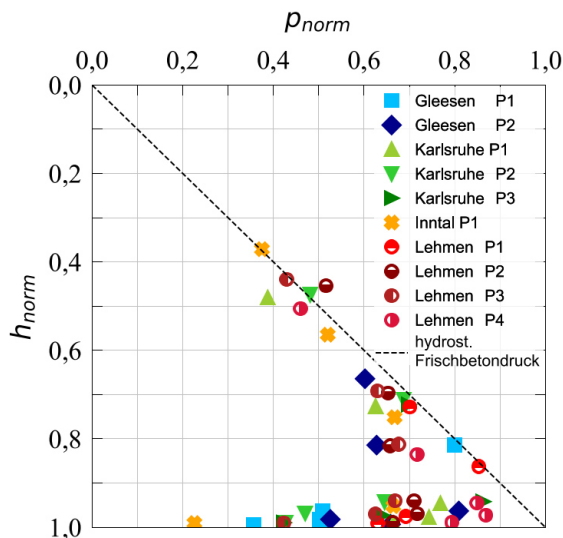


Abb. 3.1: Max-Werte der Bohrpfahlmessungen mit Wasserauflast (NISSEN ET AL. 2021)

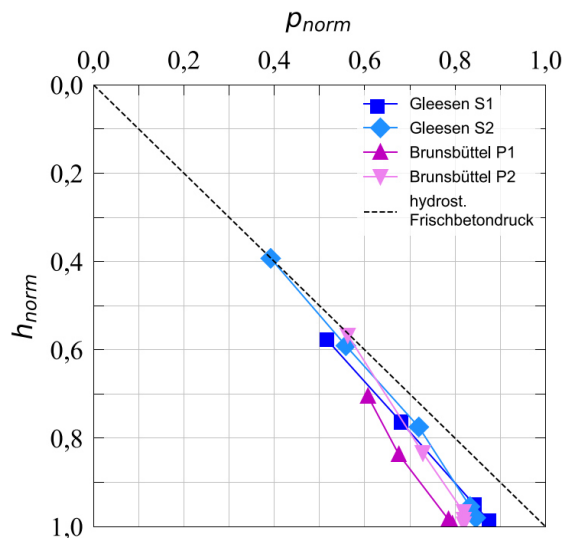


Abb. 3.2: Max-Werte der Messungen mit Suspensionsstützung (NISSEN ET AL. 2020.a)

Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Höhenlagen der Sensoren  $\Delta h$  normiert auf die maximale Frischbetonhöhe und die Frischbetondrücke normiert auf den maximalen hydrostatischen Frischbetondruck am Pfahlfuß dargestellt (NISSEN ET AL. 2021):

$$h_{norm} = \frac{\Delta h + h_u}{h + h_u} \quad (1)$$

$$p_{norm} = \frac{p_{c,max}}{(h + h_u) \cdot \gamma_c} \quad (2)$$

mit:  $h_{norm}$  = normierte Sensortiefe;  $\Delta h$  = Sensortiefe;  $h_u$  = Überbetonage bei Bohrpfählen;  $h$  = Höhe Pfahl bzw. Schlitzwand;  $p_{norm}$  = normierter Frischbetondruck;  $p_{c,max}$  = gemessener maximaler Frischbetondruck;  $\gamma_c$  = Frischbetonwichte

Ein Vergleich der Maximalwerte zeigt, dass die erreichten Drücke bei den Bohrpfählen unter Wasserauflast auf den verschiedenen Baustellen in einem vergleichbaren Bereich liegen. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Messung Karlsruhe P1 frühzeitig abgebrochen wurde. In den oberen beiden Sensorlagen sind daher in der Realität ebenfalls annähernd hydrostatische Frischbetondrücke zu erwarten. Die Ergebnisse der Bohrpfähle mit Suspensionsstützung weisen einen ähnlichen Verlauf wie die Maximalwerte bei den Schlitzwandmessungen auf. Dies deutet darauf hin, dass bei den vorliegenden Untersuchungen die gemessenen maximalen Drücke maßgeblich durch die Suspensionsstützung und weniger durch die Aushubgeometrie beeinflusst werden. Bei der Messung Brunsbüttel P2 traten im Pfahlfuß in der Realität ebenfalls etwas höhere Drücke auf. Hier wurde in den unteren drei Sensorlagen der mit den Sensoren maximal messbare Druck von 6 bar (relativ) überschritten.

Bei den Messungen mit Wasserauflast ist im Pfahlfußbereich eine starke Reduzierung des Frischbetondrucks gegenüber dem hydrostatischen Druck sichtbar. Die maximalen Frischbetondrücke liegen hier zum Teil weit unter dem theoretischen hydrostatischen Druck (vgl. Abb. 3.1) und nur leicht über dem ursprünglichen Wasserdruck. Dies weist auf einen Einfluss des Pfahlfußbereichs hin. Ein vergleichbarer Einfluss des Pfahlfußes hat sich bei den suspensionsgestützt hergestellten Bohrpfählen und den Schlitzwänden nicht gezeigt.

Folglich lässt sich ein positiver Einfluss der Suspensionsstützung auf die Fließfähigkeit und die Konsistenz des Frischbetons vermuten. So ist bekannt, dass sich bei der Verwendung einer Bentonitsuspension als Stützflüssigkeit im Übergangsbereich zum Boden eine Filterschicht (äußerer bzw. innerer Filterkuchen) ausbilden kann (vgl. HAUGWITZ UND PULSFORT 2018). Der Filterkuchen kann die Abgabe des Anmachwassers aus dem Frischbeton verringern, sodass die Frischbetonkonsistenz länger erhalten bleibt. Im Gegensatz zur Verwendung von Stützflüssigkeiten kann bei den Pfählen mit Wasserauflast davon ausgegangen werden, dass an der Sohle des Pfahls der Frischbeton Anmachwasser in den Boden abgibt. Mit dem Ziehen der Verrohrung steht der Frischbeton auch seitlich in Kontakt mit dem Boden, wodurch im gesamten Mantelbereich Anmachwasser abfiltert. Zum Zeitpunkt des ersten Kontakts wird dies nicht von einem Filterkuchen verhindert. Mit der Zeit ist eine Ausbildung eines Filterkuchens im Frischbeton ebenfalls denkbar. Neben der Abgabe des Anmachwassers hat unter anderem das thixotrope Verhalten des Frischbetons einen maßgeblichen Einfluss auf die Frischbetonkonsistenz bzw. -verhalten.

Bei der Betrachtung der maximalen Frischbetondrücke ist zu berücksichtigen, dass die verwendeten Sensoren die totalen Spannungen messen. Nur solange sich der Frischbeton wie ein Fluid verhält, können diese den Flüssigkeitsdruck anzeigen. Sobald der Beton zu erstarren beginnt, messen sie totale Spannungen als Summe aus Flüssigkeitsdruck und Korn-zu-Korn-Spannung. Vergleichbar zu Spannungsmessungen im Boden kann es dabei zu einer Gewölbewirkung vor der Sensormembran kommen, wodurch geringere totale Spannungen als in der Realität gemessen werden.

Mit dem bilinearen Ansatz von LINGS ET AL. (1994) werden die tatsächlich gemessenen Drücke unterschätzt. Bei den vorliegenden Ergebnissen verläuft die Druckzunahme bis in eine größere Tiefe als die dort angegebene kritische Tiefe von  $1/3 h$  nahe des hydrostatischen Frischbetondrucks. Eine ausgeprägte gemeinsame kritische Tiefe, ab der der Druck parallel zum hydrostatischen Suspensionsdruck verlaufen würde, ist ebenfalls nicht erkennbar. Tendenziell sollte ein annähernd hydrostatischer Verlauf über die Tiefe für die maximalen Frischbetondrücke bei Schlitzwänden und Bohrpfählen angesetzt werden. Lediglich im Pfahlfußbereich der Bohrpfähle – die verrohrt mit Wasserauflast hergestellt werden – sind deutlich geringere Drücke zu erwarten. Bis zu einer Höhe von 3 m über der Aufstandsfläche, schwanken die maximalen Drücke

zwischen dem Grundwasserdruck und dem hydrostatischen Frischbetondruck. Der anzusetzende Frischbetondruck richtet sich hier nach der untersuchten Fragestellung.

Die zeitliche Entwicklung des Frischbetondrucks wurde ebenfalls untersucht. Demnach wurden bei den Schlitzwandmessungen die Maximalwerte tendenziell gegen Ende der Betonage erreicht. Insbesondere bei den Bohrpfählen mit Wasserauflast kam es teilweise schon zu einem frühzeitigen Erreichen der Maximalwerte und im Anschluss zu einem Abfall der Drücke. Weitere Informationen zur Druckentwicklung über die Zeit sind in NISSEN ET AL. (2020.a, 2021) zu finden.

## 4 Vergleich mit Literaturdaten

Neben den Messungen von DIBIAGIO UND ROTI (1972), URIEL UND OTEO (1977) sowie von LINGS ET AL. (1994), auf denen der aktuelle bilineare Ansatz für Schlitzwände beruht, sind aus der Literatur noch weitere Frischbetondruckmessungen in Schlitzwänden bekannt. Dabei erfolgte die Anordnung der Sensoren in zwei unterschiedlichen Varianten (NISSEN ET AL. 2020.b). Bei den neueren Untersuchungen waren die Sensoren wie bei den hier beschriebenen Messungen am Bewehrungskorb und damit im Frischbeton angeordnet. Davor war die Anordnung der Sensoren im Übergangsbereich zwischen Boden und Frischbeton üblich (vgl. Abb. 4.1). Diese Untersuchungen hatten das primäre Ziel, die Spannungsänderungen im Boden im Anschluss an die Schlitzwandherstellung (z.B. während des Baugrubenaushubs) zu erfassen.

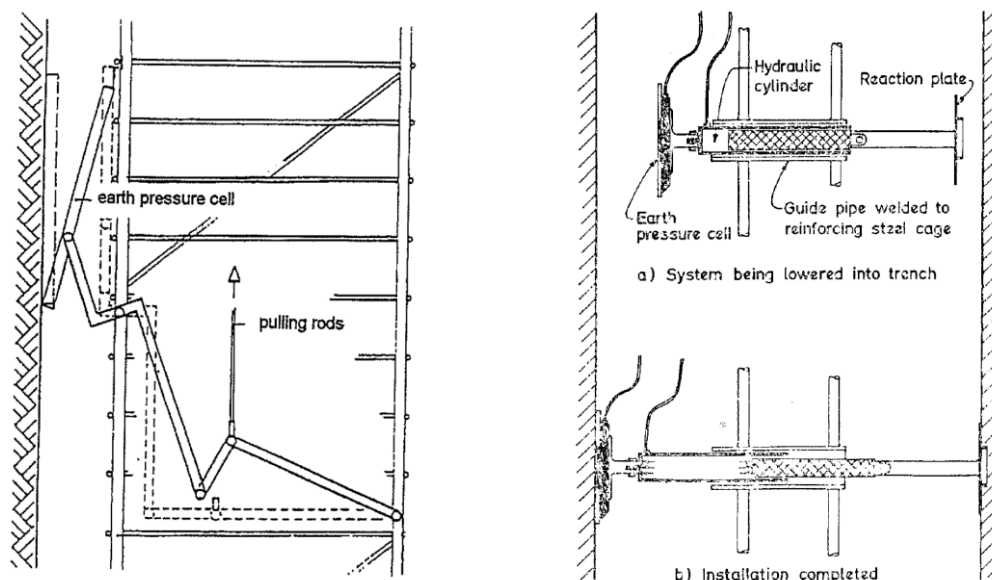


Abb. 4.1: Darstellung der Verspannung der Erddruckgeber gegen den Boden: links von RODATZ ET AL. (1994), rechts von DIBIAGIO UND ROTI (1972)

Nach NISSEN ET AL. (2020.b) unterscheiden sich die Ergebnisse der Maximaldrücke in Abhängigkeit von der Anordnung der Sensoren. Der Ansatz von LINGS ET AL. (1994) baut auf Messungen der oben zitierten Autoren auf, die im Übergangsbereich Frischbeton und Boden durchgeführt worden. Die Messungen von RODATZ ET AL. (1994) bzw. DELATTRE UND DUCA (2002), die ebenfalls im Übergangsbereich Frischbeton - Boden durchgeführt wurden, bestätigten den Ansatz von LINGS ET AL. (1994) (Abb. 4.2).

Untersuchungen im Frischbeton mit einer zu den vorliegend beschriebenen Messungen vergleichbaren Anordnung der Druckaufnehmer haben de WIT UND LENGKEEK (2002), GRUBER (2008) sowie LÄCHLER UND NEHER (2008) durchgeführt. Die Messergebnisse in der Schlitzwandlamelle L3 von de WIT UND LENGKEEK (2002) wurden von LORECK (2008) neu aufbereitet. Die resultierenden maximalen Frischbetondrücke sind in Abb. 4.3 zusammengefasst.

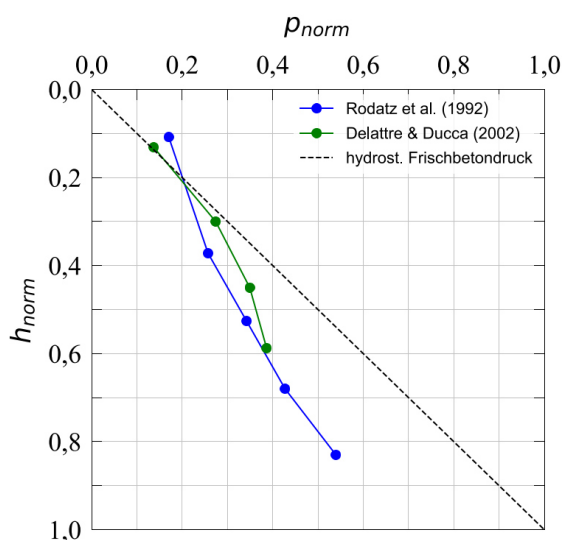


Abb. 4.2: Maximaler Druckverlauf der Schlitzwandmessung im Übergangsbereich Boden – Frischbeton von RODATZ ET AL. (1992) und DELATTRE & DUCCA (2002)

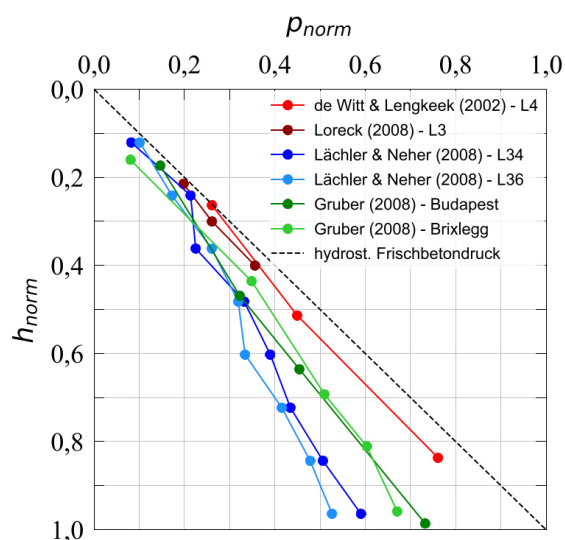


Abb. 4.3: Maximaler Druckverlauf der Schlitzwandmessungen im Frischbeton

Die Messergebnisse von DE WIT UND LENGKEEK (2002) erreichen – wie die Untersuchungen in Gleesen – noch in größerer Tiefe annähernd den theoretischen hydrostatischen Verlauf. Die von GRUBER (2008) maximal gemessenen Drücke sind niedriger, dennoch wird der Druck mit dem bilinearen Verlauf von LINGS ET AL. (1994) im unteren Bereich der Schlitzwand unterschätzt (s. NISSEN ET AL. 2020.b). Zu der Messung aus Brixlegg ist zu ergänzen, dass es dabei zu einer Betonageunterbrechung von ca. 15 Minuten kam und die Messtechnik zum Ende der Betonage ausgefallen ist. Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass ohne Betonageunterbrechung im



unteren Schlitzwandbereich höhere Drücke erreicht worden wären. Zum Zeitpunkt des Ausfalls entsprachen die gemessenen Drücke in den oberen Sensoren dem hydrostatischen Frischbetondruck (GRUBER 2008). Entsprechend werden sich die Drücke dem hydrostatischen Verlauf insgesamt weiter angenähert haben. Die beiden Messungen bestätigen die Erkenntnis aus den eigenen Untersuchungen, dass sich der Ansatz von LINGS ET AL. (1994) nicht eignet, um den tatsächlichen Verlauf und Maximalwert des Frischbetondrucks abzubilden.

Abweichend hiervon liegen die Messergebnisse von LÄCHLER UND NEHER (2008) unter dem Ansatz von LINGS ET AL. (1994). Die Anordnung der Sensoren erfolgte bei den beiden untersuchten Schlitzwandlamellen direkt vor einem Inklinometerrohr und nicht wie bei den anderen Messungen im Frischbeton am Bewehrungskorb. Warum genau hier geringere Drücke gemessen wurden, lässt sich nicht eindeutig erklären. Es kann mit der Abschirmwirkung der im Vergleich zur Bewehrung deutlich größeren Querschnitte der Inklinometerrohre zusammenhängen.

Eine Erklärung für die bei Messungen im Frischbeton grundsätzlich höheren Frischbetondrücke im Vergleich zu den Messungen im Übergangsbereich Frischbeton-Boden ist, dass bei diesen neben den Spannungsänderungen im Frischbeton auch anteilig Änderungen der Korn-zu-Korn-Spannungen und des Porenwasserdrucks im Boden erfasst werden (NISSEN ET AL. 2020.b).

## **5 Fazit und Ausblick**

Die Messungen haben ergeben, dass sich die Idealisierung nach LINGS ET AL. (1994) für eine realitätsnahe Abschätzung der maximalen Frischbetondrücke im Tiefbau nicht eignet. Die gemessenen Drücke lagen um bis zu 40 % unterschätzt. Dies gilt sowohl für die untersuchten Schlitzwandlamellen als auch für die Bohrpfähle. Bei beiden zeigte sich im oberen Bereich maximale Drücke nahe dem hydrostatischen Frischbetondruck. Dies setzt sich bei den Schlitzwandlamellen und Bohrpfählen mit Suspensionsstützung bis in den Aufstandsbereich fort. Bei verrohrt und unter Wasserauflast hergestellten Bohrpfählen ist von einem geringeren Frischbetondruck im Pfahlfußbereich auszugehen. Ursache hierfür ist vermutlich ein Abfiltrieren von Anmachwasser aus dem Frischbeton in den mehr oder weniger wasserdurchlässigen umgebenden Boden, dass mit einem Ansteifen des Betons einhergeht. Bei zukünftigen Fragestellungen – z. B. bei numerischen Simulationen – sollte dies berücksichtigt werden.

Die Betrachtung der Druckverteilung über die Tiefe liefert erste Erkenntnisse zu den Herstellungseinflüssen. Für eine genauere Beurteilung der Einflusskriterien der Herstellungsparameter wie Kontraktorrohr und Verrohrung erfolgt derzeit eine weitere Betrachtung der zeitlichen Druckentwicklung. Dadurch soll ein besseres Verständnis möglicher Einflussfaktoren auf die Entstehung von Fehlstellen erlangt werden.

Die Verwendung von Bohrpfahl- und Schlitzwänden als Teil des dauerhaften Bauwerks liefert ein großes Einsparungspotenzial in Bezug auf den Betonverbrauch bei Massivbauschleusen. Zur Ermittlung des mit solchen Bauweisen tatsächlich einhergehenden Verbesserungspotenzials hinsichtlich Klimaschutz und Ressourceneinsparungen sind weitere Untersuchungen notwendig. Die potenziellen Einsparungen der Treibhausgasemissionen im Vergleich zu konventionellen Massivbauweisen von Schleusen können mit Hilfe einer Ökobilanz ermittelt werden. Neben den unterschiedlichen Mengen verbauter Baustoffe für die verschiedenen Bauweisen sind hierbei die anforderungsbedingt variierenden Betonzusammensetzungen, insbesondere bezogen auf die verwendete Zementart und den Zementgehalt, einzubeziehen. Zu berücksichtigen ist auch, dass sich die Zemente in Zukunft verändern werden, da nicht mehr alle Zementausgangsstoffe im heutigen Maß verfügbar sind (VDZ 2022).

An der Bundesanstalt für Wasserbau wird aktuell im Rahmen eines Forschungsvorhabens ein System zur Nachhaltigkeitsbewertung des Neubaus von massiven Verkehrswasserbauwerken entwickelt. Im Rahmen dessen wird mit Hilfe von vergleichenden Ökobilanzen das Einsparpotenzial durch die Nutzung von Bohrpfahlwänden oder Schlitzwänden als Schleusenkammerwände genauer quantifiziert.

## 6 Danksagung

An dieser Stelle sei der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung für ihre Unterstützung und die Bereitstellung der Flächen für die Untersuchungen sowie allen Beteiligten, die Messungen auf verschiedenen Baustellen ermöglicht haben gedankt. Ein besonderer Dank gilt den Kooperationspartnern der BAW, Bauer Spezialtiefbau GmbH und Dyckerhoff<sup>1</sup>, die an der Herstellung von Forschungspfählen in Lehmen beteiligt waren und somit die Durchführung von Messungen ermöglicht haben.

---

<sup>1</sup> Dyckerhoff GmbH; Dyckerhoff Beton GmbH & Co. KG; Dyckerhoff Beton Rheinland-Pfalz GmbH & Co. KG

## Literatur

- CLEAR, C. A.; HARRISON, T. A. (1985): *Concrete pressure on formwork*. Hg. v. CIRIA. Construction Industry Research and Information Association. London (Report, 108).
- DE WIT, J. C.; LENGKEEK, H. J. (2002): *Full scale test on environmental impact of diaphragm wall trench installation in Amsterdam - the final results*. In: Kastner, R., Emeriault, F. et al. (Hg.): *Proceedings of the Third International Symposium on Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*. Toulouse, 23.-25. Dezember 2002. Lyon: Spécifique, S. 433–440.
- DELATTRE, L.; DUCA, V. (2002): *Measured pressure exerted by fine soil on a diaphragm wall under construction*. In: Kastner, R., Emeriault, F. et al. (Hg.): *Proceedings of the Third International Symposium on Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*. Toulouse, 23.-25. Dezember 2002. Lyon: Spécifique, S. 547–552.
- DIBIAGIO, E.; ROTI, J. A. (1972): *Earth Pressure Measurements on a Braced Slurry Trench Wall in Soft Clay*. In: Norwegian Geotechnical Institute (Hg.): *Contributes to the Fifth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Madrid. Sarpsborg, NOR: Frank Vardings Trykkeri (Publikation Nr. 91), S. 51–59.
- DOMES, X. A.; HERTEN, M.; BENZ, T. (2016): *Verpressdruckmessung im Bohrloch während der Herstellung von Ankern in nichtbindigen Böden*. In: Stahlmann, J. (Ed.): *Messen in der Geotechnik 2016*. Unter Mitarbeit von Gattermann, J. und Stein, P. Braunschweig, 17.-18. März 2016. Braunschweig (Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 101), S. 235–254.
- GRUBER, G. (2008): *Druckverhältnisse bei Betonierarbeiten mit weichen Betonen im Spezialtiefbau*. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, Wien. Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement.
- HAUGWITZ, H.-G.; PULSFORT, M. (2018): *Pfähle, Schlitzwände, Dichtwände*. In: Karl Josef Witt (Hg.): *Grundbau-Taschenbuch. Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke*. 8. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn, S.885-908
- LÄCHLER, A.; NEHER, H. (2008): *Verbundprojekt: Bauwerksschonende Geotechnik - Teilvorhaben B. Optimierung der Herstellung von Verbauwänden im Hinblick auf Verformungen benachbarter Bauwerke*. Stuttgart.
- LORECK, C. (2008): *Die Entwicklung des Frischbetondrucks bei der Herstellung von Schlitzwänden*. Dissertation. Bochum: Ruhr Universität Bochum.
- NISSEN, H.; HERTEN, M.; PULSFORT, M. (2020.a): *Herstellungseinflüsse auf die Druckentwicklung im Frischbeton bei Bohrpfählen in nichtbindigen Böden*. In: Moormann, C. und Vogt-Beyer, C. (Hg.): *12. Kolloquium Bauen in Boden und Fels. Fachtagung über aktuelle Herausforderungen der Geotechnik. Tagungshandbuch 2020*. Esslingen, 21.-22. Januar 2020. Tübingen: expert Verlag GmbH, S. 357–364.
- NISSEN, H.; HERTEN, M.; PULSFORT, M. (2020.b): *Neue Erkenntnisse zur Frischbetondruckentwicklung in Schlitzwänden*. In: Stahlmann, J. (Hg.): *Messen in der Geotechnik 2020*. Unter Mitarbeit von Hinzmann, N., Stein, P. und Gattermann, J. Braunschweig, 20.-21. Februar 2020. Institut für

Geomechanik und Geotechnik - Technische Universität Braunschweig.  
Braunschweig (Mitteilung des Instituts für Geomechanik und Geotechnik,  
Technische Universität Braunschweig, 110), S. 189–206.

- NISSEN, H.; HERTEN, M.; PULSFORT, M. (2021): *Fresh Concrete Pressure in Cast In-Situ Bored Piles*. In: Deep Foundation Institute (Hg.): 46th Annual Conference on Deep Foundations. Las Vegas, USA, S.213-222.
- RODATZ, W.; HARTUNG, M.; MAYBAUM, G. (1994): *Back analysis of geotechnical measurements at the Port of Hamburg based on FEM*. In: Siriwardane, H. J. (Hg.): Computer methods and advances in geomechanics. Proceedings of the Eighth International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. Morgantown, USA, 22.-28.Mai 1994. Rotterdam: Balkema, S. 2005–2010.
- SAATHOFF, J.; KAUTHER, R.; MÜLLER, H.; HERTEN, M. (2013): *Bohrpfahlwände als Baugrubenverbau und Kammerwandbauteil der neuen Schleuse Dörverden*. In: Beton- und Stahlbetonbau 108 (4), S. 276-281.
- URIEL, S.; OTEO, C. S. (1977): *Stress and Strain besides a Circular Trench Wall*. In: Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (Hg.): Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bd. 1. Tokyo, S. 781–788.
- VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V. (VDZ) (Hg.) (2022): *Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien*.

# **Der Beitrag von Pfählen kleiner Durchmesser zu einer nachhaltigen Spezialtiefbauindustrie**

M.Sc.-Ing. Freddy Lopez, *Tiroler Rohre GmbH*

Dipl.-Ing. Jörg Heiland, *Tiroler Rohre GmbH*

## **Zusammenfassung**

Wie vom UN-Generalsekretär António Guterres bei der Eröffnung der 27. Weltklimakonferenz COP27 am 06.11.22 in Sharm el-Sheikh (Ägypten) angesprochen, ist der Klimawandel nicht nur eine unerlässliche Herausforderung in diesem Jahrhundert sondern eine entscheidende Angelegenheit unseres Zeitalters.

Die von Menschen geschaffene oder bebaute Umwelt (und die dafür verantwortliche Bauindustrie) verursacht ca. 39% der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Als Teil der Bauindustrie liegt es dann in unserer Verantwortung, stärkere Maßnahmen zu ergreifen und eine führende Rolle zu übernehmen.

Der vorliegende Fachartikel befasst sich mit dem Beitrag von Pfählen kleiner Durchmesser (verpresste Mikropfähle, Duktirammpfähle usw.) zu einer erheblichen Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Bilanz von implementierten Tiefgründungsmaßnahmen und somit zu einer nachhaltigen Spezialtiefbauindustrie. Die Quantifizierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen (allem voran das enthaltene oder gebundene Kohlenstoffdioxid), die eine wesentliche Rolle bei der Planung und Realisierung jedes nachhaltigen Bauvorhabens spielt, wird im Vorfeld ausführlich behandelt. Des Weiteren werden die Anwendungsmöglichkeiten innovativer und nachhaltiger Bauprodukte diskutiert.

## **1 Treibhausgasemissionen und Klimawandel**

Die Arbeit von Wissenschaftlern und Forschern auf der ganzen Welt berichtet von Veränderungen, die über die natürlichen Temperaturschwankungen an Land und im Meer hinausgehen, von abnormalen Trends im zeitlichen Ablauf von Jahreszeiten und Niederschlagsmengen, sowie über das Auftreten extremer Klimaereignisse, die Millionen von Menschen weltweit betreffen. Die wissenschaftliche Gemeinschaft erkennt den unwiderlegbaren Zusammenhang zwischen den vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen (THG) und dem in den letzten Jahrzehnten beobachteten globalen Klimawandel an.

Als Reaktion darauf wurde 2015 ein rechtsverbindlicher internationaler Vertrag zum Klimawandel – das Pariser Abkommen – verabschiedet, mit dem die globale Erwärmung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf 1,5 °C (im Vergleich zum vorindustriellen Niveau) begrenzt werden soll. Dies ist nur dann möglich, wenn die globalen Netto-Null-Emissionen bis spätestens 2050 erreicht werden (CLIMATE WATCH 2023).

## 2 Auswirkungen der bebauten Umwelt

Die bebaute Umwelt, bestehend aus Gebäuden und Infrastruktur, ist für einen großen Teil der vom Menschen verursachten globalen Umweltbelastung verantwortlich, darunter ca. 40 % des weltweiten Energieverbrauchs, 50 % der gesamten Rohstoffgewinnung, 33 % des gesamten Trinkwasserverbrauchs, 35 % des gesamten Abfallaufkommens sowie 39 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen (AIB & IRISH GREEN BUILDING COUNCIL 2022).

### 2.1 Treibhausgasemissionen (THG)

Schätzungen zufolge werden jährlich ca. 48 Milliarden Tonnen THG (gemessen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten) weltweit erzeugt. Fast 39 % davon werden von der bebauten Umwelt verursacht (vgl. Abb. 2.1). Diese Emissionen setzen sich aus dem „betrieblichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß“ (28% aus Gebäudebetrieb, z.B.: Heizung, Kühlung, Beleuchtung, usw.) und dem „gebundenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß“ (11% aus Emissionen der Bau- und Bauproduktenwirtschaft) zusammen.

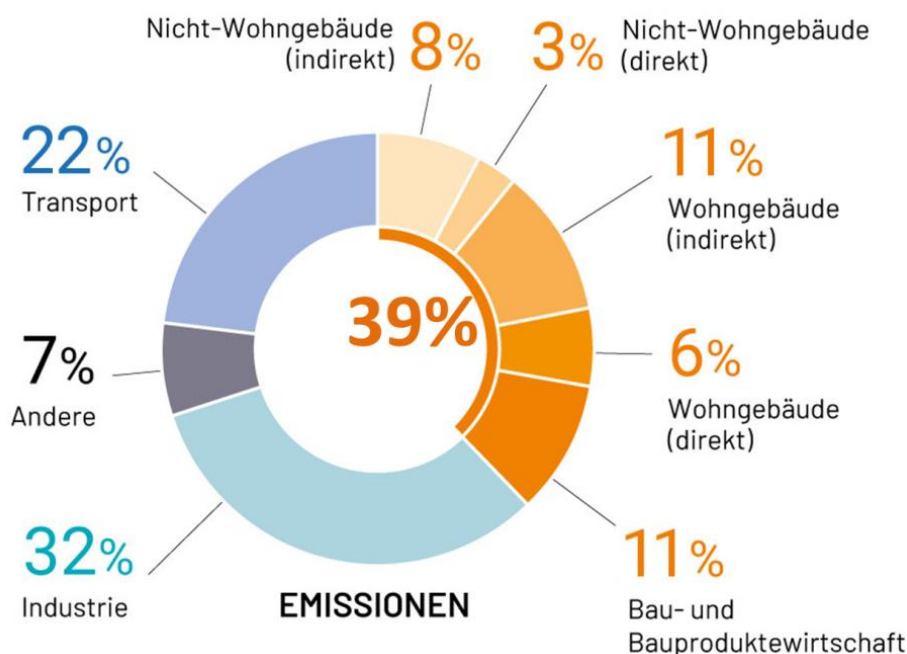


Abb. 2.1: Globaler Anteil an Emissionen der bebauten Umwelt (modifiziert nach UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME 2020)

Der gebundene CO<sub>2</sub>-Ausstoß resultiert aus der Herstellung von Baustoffen, Bauprozessen und aus den Endphasen des Lebenszyklus aller Gebäude und Infrastruktur (vgl. Abb. 2.2).

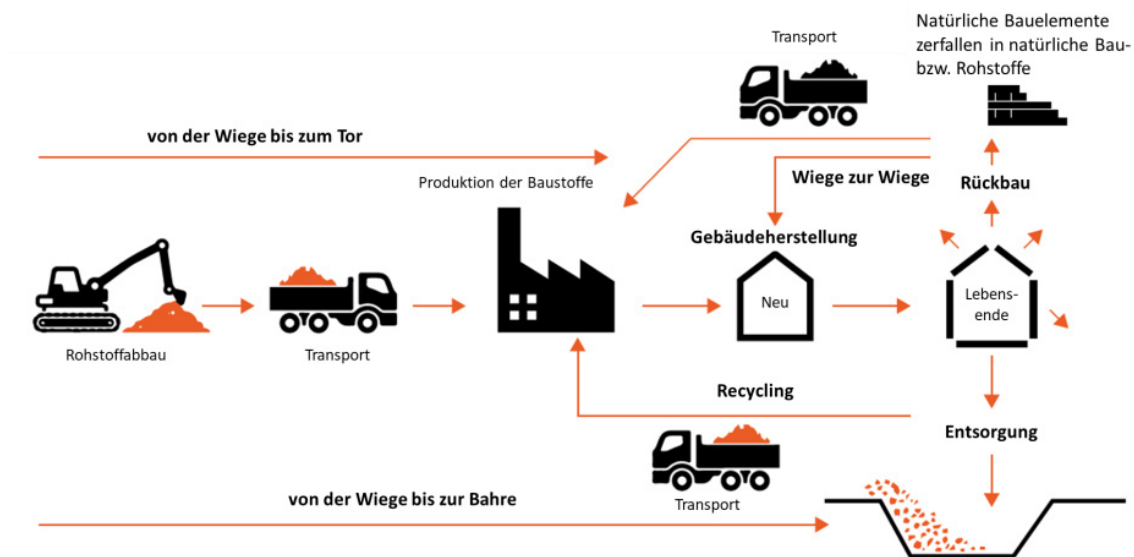


Abb. 2.2: Gebundenes CO<sub>2</sub> im Lebenszyklus der bebauten Umwelt (modifiziert nach UNIVERSITY COLLEGE LONDON 2023)

## 2.2 Bedeutung des gebundenen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes

Die gebundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bauindustrie wurden in der Vergangenheit weitgehend übersehen, machen aber ca. 11 % aller globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus (vgl. Abb. 1) und werden bereits vor der Nutzung eines Gebäudes bzw. Infrastrukturobjekts freigesetzt. Während die Bauindustrie in den letzten Jahren auf „betrieblicher Ebene“ große Fortschritte gemacht hat (Dekarbonisierung der Strom- und Gasnetze, effizientere Heiz-/Kühlsysteme usw.), wird der gebundene CO<sub>2</sub>-Ausstoß bis 2050 für die Hälfte des gesamten CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von Neubauten verantwortlich sein (WORLD GREEN BUILDING COUNCIL 2019). Unter Berücksichtigung des gebundenen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes ist die Bauindustrie weltweit der größte Verursacher globaler Emissionen (ARCHITECTURE2030 2023).

## 2.3 Die Antwort der Bauindustrie

Parallel zur Reduzierung des betrieblichen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes hat die Bauindustrie erkannt, dass ihre Anstrengungen nun rasch verstärkt werden müssen, um auch die gebundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen (Grauemissionen) auf globaler Ebene anzugehen und zu reduzieren. In diesem Zusammenhang entstanden im Bausektor verschiedene globale Initiativen wie *Advancing Net Zero* (World Green Building Council), *Envision* (Institute for Sustainable Infrastructure, USA), *Level(s)* (Europäische Kommission) usw. zur Dekarbonisierung der Bauindustrie bis 2050. Das Bauen und Sanieren von Gebäuden ist ein Kernbereich des

europäischen Green Deals, mit dem sich Europa das Ziel gesetzt hat, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen.

Da die Grauemissionen bereits vor der Inbetriebnahme eines Gebäudes bzw. Infrastrukturobjekts im Projekt gebunden sind, können sie nicht mehr zurückgenommen oder reduziert werden. Aus diesem Grund liegt der Schwerpunkt der Bauindustrie darauf, den gebundenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Vorfeld so weit wie möglich zu minimieren und die verbleibenden Emissionen zu reduzieren oder auszugleichen, um über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes oder einer Infrastrukturanlage eine Netto-Null-Bilanz zu erreichen (WORLD GREEN BUILDING COUNCIL 2019).

Emissionen können zu jedem Zeitpunkt der Projektentwicklungsphase reduziert werden; allerdings sind die Möglichkeiten, den gebundenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Voraus zu begrenzen und/oder zu reduzieren, in den frühesten Phasen größer (HM TREASURY 2013). Bei fortgeschrittenen Projektphasen wird es immer schwieriger, Designänderungen vorzunehmen, die auf das gleiche Ergebnis abzielen (vgl. Abb. 2.3).

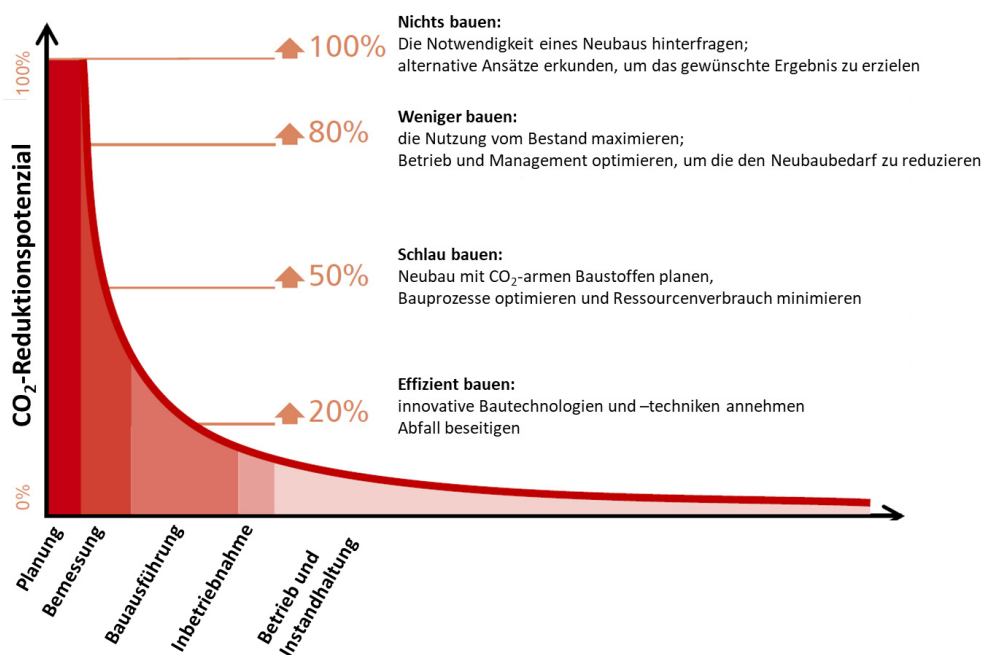


Abb. 2.3: CO<sub>2</sub>-Reduktionskurve (modifiziert nach HM TREASURY 2013)

Auch wenn es nicht immer möglich ist, den „Nichts bauen“-Ansatz zu verfolgen, können Interventionen in bestehenden Gebäude- und Infrastrukturanlagen zur ihrer Wiederverwendung (*weniger bauen*) zu einer erheblichen CO<sub>2</sub>-Reduktion führen.

Die Ansätze „*schlau und effizient bauen*“ beziehen sich hauptsächlich auf die Auswahl CO<sub>2</sub>-armer Baustoffe und -produkte, sowie auf den Einsatz neuer Techniken zur Abfallvermeidung (z.B. Fertigteilbau). Diese sind bei neuen Gebäude- und Infrastrukturobjekten uneingeschränkt anwendbar und führen zu wichtigen CO<sub>2</sub>-Reduktionen (HM TREASURY 2013).



### 3 Gebundene CO<sub>2</sub>-Ausstöße bei Tiefgründungen

Tiefgründungen sind ein wesentlicher Bestandteil der bebauten Umwelt und der gesamten Bauindustrie. Die positiven Auswirkungen der Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen sind ausreichende Gründe dafür, die Arbeitsweise der Spezialtiefbauindustrie zu ändern (MARTIN 2022). Der erste Schritt zur Reduzierung des in Tiefgründungen gebundenen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes besteht darin, die Öko-Bilanz (CO<sub>2</sub>-Fußabdruck) der geplanten und ausgeführten Lösungen zu quantifizieren (Lebenszyklusanalyse). Darauf basierend ist es möglich, verschiedene Alternativlösungen für jedes Bauvorhaben hinsichtlich der Umwelteinwirkungen gegenüberzustellen und miteinander zu vergleichen. Darüber hinaus lassen sich die Quellen identifizieren, die die größten Emissionen verursachen (z.B. Bauprodukte), sowie Optimierungsmaßnahmen zu ergreifen, um die Grauemissionen effektiv zu reduzieren und/oder ihre Auswirkungen einzudämmen.

Ein sehr hilfreiches Tool hierfür ist der von der *European Federation of Foundation Contractors* (EFFC, UK) und dem *Deep Foundations Institute* (DFI, USA) entwickelte CO<sub>2</sub>-Rechner (*Carbon Calculator*), welcher validierte und standardisierte Daten verwendet, um den gebundenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß verschiedener Spezialtiefbautechniken abzuschätzen. Die Auswertung verschiedener Untersuchungen zeigt, dass der größte Anteil am gesamten CO<sub>2</sub>-Fußabdruck bei den meisten Techniken auf Bauprodukte (vgl. Abb. 3.1) entfällt (MARTIN 2022), allen voran Zement und Stahl, beide Materialien mit einem vergleichsweise hohem Treibhausgaspotenzial (vgl. Abb. 3.2).

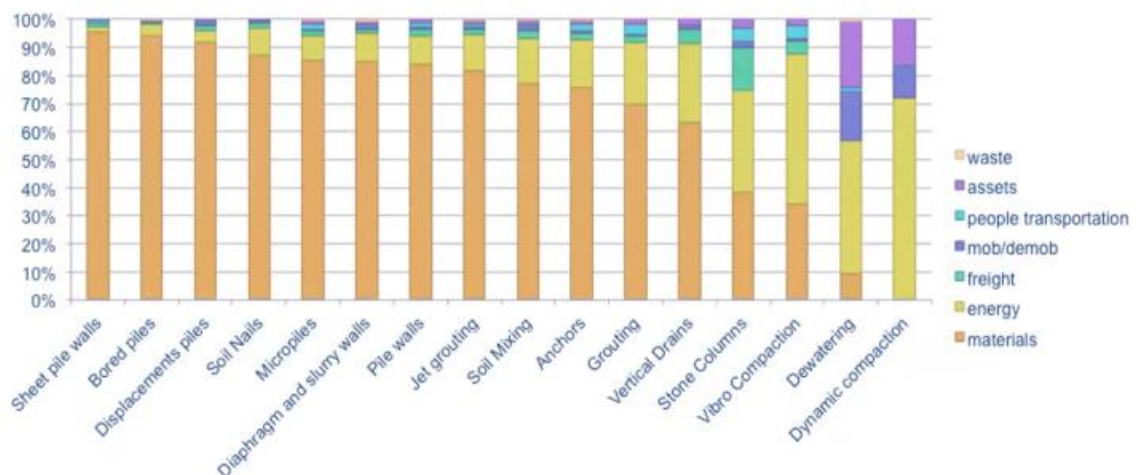


Abb. 3.1: Beitrag verschiedener Emissionskategorien zum gesamten CO<sub>2</sub>-Fußabdruck bei verschiedenen Techniken im Spezialtiefbau (MARTIN 2022)

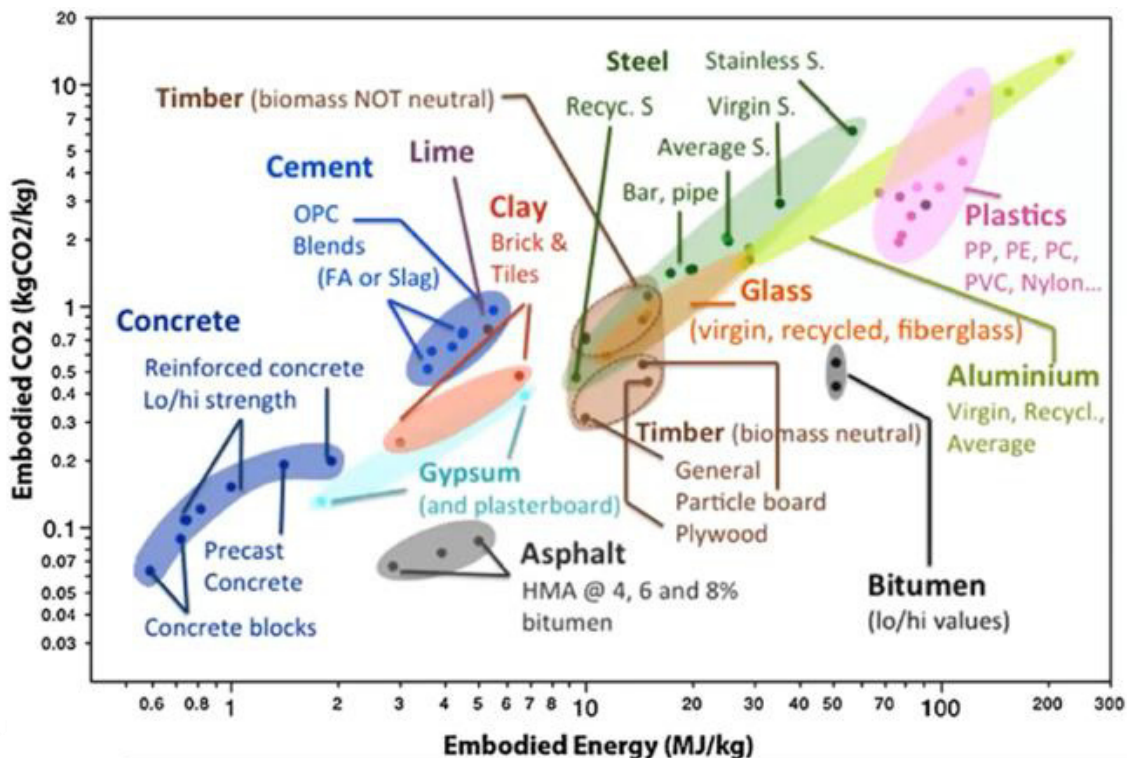


Abb. 3.2: Grauemissionen und -energie für versch. Bauprodukte (BARCELO ET AL 2014)

Eine noch verlässlichere Quelle, um die Umweltauswirkungen von Bauprodukten und -materialien zu bewerten, ist die Umwelt-Produktdeklaration (*Environmental Product Declaration, EPD*). EPD ermöglichen es Bauherren, fundierte Entscheidungen zu treffen, die auf ökologischen Kriterien basieren und zur Nachhaltigkeit im Baubereich beitragen. Eine EPD basiert auf internationalen Normen und Richtlinien, die die Grundsätze und Anforderungen für die Durchführung von Umweltbewertungen festlegen (vgl. Abb. 3.3). Sie folgt einem standardisierten Verfahren, das eine umfangreiche Datensammlung, Datenvalidierung und die Berechnung von Umweltindikatoren umfasst, wie z. B. Treibhausgasemissionen, Energieverbrauch, Wasserverbrauch und Abfallaufkommen (SCHRÖTTER & HEILAND 2023).

Abb. 3.3: Umwelt-Produktdeklaration (BAU-EPD 2022)

## 4 Der Beitrag von Pfählen kleiner Durchmesser

Tiefgründungslösungen mit Pfählen kleiner Durchmesser (verpresste Mikropfähle und Duktilrammpfähle) entsprechen der Kernphilosophie der Reduzierung von Grauemissionen (vgl. Abb. 2.3).

Pfähle kleiner Durchmesser sind - durch die Flexibilität ihrer erschütterungsarmen Installation - für Nachgründungsmaßnahmen besonders geeignet (vgl. Abb. 4.1). Dadurch wird eine sichere Wiederverwendung bestehender Bauwerke (z.B. Brücken, Wohn- und Industrieanlagen, usw.) ermöglicht, die mit einem großen CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial verbunden sind, in Anlehnung an den „weniger bauen“-Ansatz.



Abb. 4.1: Weniger bauen: Nachgründung mit Pfählen kleiner Durchmesser

Ein schlaues Bauen wird mit der Anwendung Pfähle kleiner Durchmesser ebenfalls begünstigt. Als Verankerungselemente für Auftriebssicherungsmaßnahmen und als Gründungselemente turmartiger Bauwerke (z.B. Funk- und Hochleitungsmasten, Silos, usw.) ermöglichen sie eine erhebliche Reduzierung der Fundamentabmessungen (vgl. Abb. 4.2). Als Ersatz für größere Tiefgründungselemente (z.B. Großbohrpfähle) können somit große Mengen an treibhausgasreicheren Baustoffen wie Beton und Bewehrungsstahl eingespart werden. Dadurch können Ressourcen geschont und weitere Reduzierungen des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes erzielt werden.

In diesem Zusammenhang erweisen sich Duktilrammpfähle als emissionsarme Bauprodukte. Aufgrund der Verwendung von 100 % recycelten Baustoffen (Stahlschrott) und kontinuierlicher Verbesserungen im Herstellungsprozess zur Reduzierung der Grauenergie (Wiederverwendung von Abwärme, Nutzung erneuerbarer Energien usw.) stellen sie ein vergleichsweise ressourcenschonendes Bauprodukt dar.





Abb. 4.2: Schlau bauen: Auftriebssicherung und Tiefgründung turmartiger Bauwerke mit Pfählen kleiner Durchmesser

Durch den Einsatz von Pfählen kleiner Durchmesser in Verbindung mit innovativen Fertigteilenelementen (Fundamentkörpern) wird dem „effizient bauen“-Prinzip Sorge getragen, da die Gründungsgeometrie optimiert, die Qualität erhöht und die Abfallentstehung auf der Baustelle gezielt reduziert werden kann (vgl. Abb. 4.3).

Darüber hinaus kann die Fertigstellung der Gründungen deutlich beschleunigt werden, mit der damit verbundenen positiven Einwirkung auf die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen.



Abb. 4.3: Effizient bauen: Einsatz von Fertigteilenelementen (Fundamentkörpern)

## 5 Fazit und Ausblick

Weltweit ist die bebaute Umwelt (Gebäude und Infrastruktur) für etwa 39 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen, ca. 40% des Energieverbrauchs und 50% aller Rohstoffgewinnung sowie Abfallmassen verantwortlich und trägt so in hohem Maße zur Klimaerwärmung und Ressourcenverbrauch bei. Die heutige Art zu Bauen ist nicht nachhaltig, dies erfordert ein grundsätzliches Umdenken im Bausektor.

Die Dekarbonisierung der Bauindustrie ist eine der kostengünstigsten Möglichkeiten, die schlimmsten Auswirkungen des Klimawandels einzudämmen, allerdings müssen das Tempo und der Umfang der Dekarbonisierungsbemühungen radikal erhöht werden, denn die Zeit läuft uns davon: bereits zwischen Januar und Oktober 2023 ist die globale Durchschnittstemperatur seit 1850 schon um 1,4 °C angestiegen. 2023 war das wärmste

Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnung (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION 2023).

Die gesamte Wertschöpfungskette in der Bauwirtschaft soll dazu beitragen, CO<sub>2</sub>-ärmere Alternativen zu entwickeln und einzusetzen, die erforderlich sind, um das erforderliche Ausmaß an Veränderungen zu erreichen (WORLD GREEN BUILDING COUNCIL 2019). Dafür sind einige erprobte Lösungen bereits vorhanden, jetzt gilt es, sie in der Breite umzusetzen. Dazu gehören Pfähle kleiner Durchmesser (verpresste Mikropfähle und Duktilrammpfähle), deren Anwendung der Kernphilosophie der Reduzierung von gebundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen entspricht, ein *schlaues* sowie *effizientes Bauen* ermöglicht und einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigeren Spezialtiefbauindustrie leistet.

Es ist eindeutig, dass die Erreichung der Klimaziele eine Herkulesaufgabe ist. Die gesamte Bauindustrie ist gefragt, innovative, ressourcenschonende und energieeffiziente Bautechnologien und -prozesse zu entwickeln. Eine „*Bauwende*“ ist dringend nötig, um eine nachhaltige Entwicklung und die Klimaziele zu erreichen. Dabei können wir den Wandel als Chance für Innovation annehmen.

Aber eins dürfen wir nicht tun, nämlich aufgeben, denn egal wie gering unser Beitrag auch erscheinen mag, es liegt in unserer Hand, echte Veränderungen für eine bessere Zukunft herbeizuführen. Wenn es einen Weg gibt in eine bessere Zukunft, wer wenn nicht wir sollte ihn bauen (STRABAG 2023).

## Literatur

- AIB & IRISH GREEN BUILDING COUNCIL (2022): *Sustainability and commercial real estate*, online abrufbar unter: [www.igbc.ie/resources/sustainability-and-commercial-real-estate/](http://www.igbc.ie/resources/sustainability-and-commercial-real-estate/), 20.10.2023
- ARCHITECTURE 2030 (2023): online abrufbar unter: [www.architecture2030.org/](http://www.architecture2030.org/), 19.12.23
- BARCELO, L., KLINE, J., WALENTA, G., and GARTNER, E. (2014): *Cement and carbon emissions*, Materials and Structures / Materiaux et Constructions, 47(6), pp. 1055–1065,
- BAU EPD GMBH (2022): *Umwelt-Produktdeklaration TRM Pfahlsysteme*, Wien, Österreich, Bericht Bau EPD-TRM-2022-1-ECOINVENT-Pfahlsysteme, online abrufbar unter <https://www.bau-epd.at/epd/data/trm-pfahlsysteme-2022-ecoinvent>, 19.01.2024
- CLIMATE WATCH (2023): Online abrufbar unter: [www.climatewatchdata.org/](http://www.climatewatchdata.org/), 11.12.2023

- HM TREASURY (2013): *Infrastructure carbon review*, London, UK, Rep. PU1593, online abrufbar unter: [www.gov.uk/government/publications/infrastructure-carbon-review](https://www.gov.uk/government/publications/infrastructure-carbon-review), 13.12.2023
- MARTIN, K., (2022): *The EFFC/DFI Carbon Calculator: Why and how to use it*, Deep Foundations, Nov/Dec 2022, 47(6), pp. 87–90
- SCHRÖTTER, B. & HEILAND, J. (2023): *Duktilrammpfahl – innovative Entwicklungen der letzten Jahre*, Der Eisenbahningenieur, September 2023, pp. 9–13,
- STRABAG SE (2023): *Work on progress – Manifest zur Klimaneutralität bis 2040*, online abrufbar unter <https://work-on-progress.strabag.com/> ,10.01.2024
- UNIVERSITY COLLEGE LONDON, ENGINEERING (2023): *Refurbishment & Demolition of Housing – Embodied Carbon (Factsheet)*, Online abrufbar unter: <https://www.ucl.ac.uk/engineering-exchange/sites/engineering-exchange/files/fact-sheet-embodied-carbon-social-housing.pdf>, 12.01.2024
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2020): *2020 Global status report for buildings and construction*, Online abrufbar unter: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/34572>, 06.01.2024
- WORLD GREEN BUILDING COUNCIL (2019): *Bringing embodied carbon upfront*, online abrufbar unter: [www.worldgbc.org/reports/](https://www.worldgbc.org/reports/), 12.12.2023
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2023): *Provisional state of the global climate in 2023*, online abrufbar unter: <https://wmo.int/publication-series/provisional-state-of-global-climate-2023>, 19.01.2024

# Injektions- statt Düsenstrahlsohle: wesentlich sanfter und damit ökologischer

Dipl.-Ing. (FH) Christoph Black, *Züblin Spezialtiefbau*

B.Sc. Larissa Wynands, *Züblin Spezialtiefbau*

Dipl.-Ing. Markus Wegerl, *Züblin Spezialtiefbau*

## Zusammenfassung

Dichtsohlen aus Silikatgelen, im Niederdruckverfahren injiziert, gelten als deutlich umweltschonender im Vergleich zu Dichtsohlen im Düsenstrahlverfahren.

Der Hauptgrund liegt in der Menge der erforderlichen eingesetzten Materialien und dem Herstellverfahren. Der vorliegende Beitrag zeigt dies anhand einer Beschreibung der Verfahren und eines fiktiven Beispiels auf.

## 1 Erfordernis „sanfter“ Bauen

Die Bauwirtschaft ist ein wesentlicher Akteur und Verursacher von Treibhausgasemissionen und wird sich ihrer Verantwortung zunehmend bewusst. Nach Angaben der Vereinten Nationen verursacht der Gebäudesektor (Bau und Betrieb) mehr als 40 % der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>1</sup> (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2022). Neben den klimaschädlichen Emissionen verantwortet die Bauwirtschaft 60 % des weltweiten Ressourcenverbrauchs und ist damit der größte Verbraucher an Rohstoffen (SOBEK, 2020).

Eine tragende Rolle aufgrund seiner bauphysikalischen Eigenschaften und des massiven Einsatzes spielt Beton, das Gemisch aus Sand, Kies, Wasser und Zement. Auch zukünftig wird auf den Einsatz von Beton kaum verzichtet werden können. Das Problem ist, dass der Baustoff Beton im Zuge seiner Herstellung hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund des Bindemittels Zement verursacht.

Um Zement herstellen zu können, wird Zementklinker benötigt. Mit großem Energieeinsatz (Brenntemperaturen um 1400 °C) wird dieser aus Kalkstein, Ton und Sand gebrannt. Neben dem brennbedingten CO<sub>2</sub>-Ausstoß fällt der größere Teil (rd. 2/3) an CO<sub>2</sub>-Emissionen durch eine chemische Reaktion an – die Entsäuerung des Kalksteins (VDZ, 2020). Weltweit gilt die Zementindustrie mit 4,5% Anteil an allen CO<sub>2</sub>-

---

<sup>1</sup> Vereinfacht wird im Text „CO<sub>2</sub>“ verwendet, nicht Co<sub>2</sub>-Äquivalente („Co<sub>2</sub>e“, „Co<sub>2</sub>-equ“)

Emmissionen als einer der größten Verursacher des Klimawandels (BETON DIALOG, 2024).

Für den Spezialtiefbau ist der Einsatz von Beton (Bohrpfähle, Schlitzwände) und reinem Zement (Anker, Injektionen, Düsenstrahlverfahren) kaum wegzudenken.

Umso dringender ist es, wo nicht unbedingt technisch erforderlich, auf zementbasierte Bauweisen zu verzichten und diese durch andere Bauverfahren zu ersetzen. Ein Beispiel hierfür sind Dichtsohlen gegen Grundwasser, wo die Festigkeit des Zements zumeist eine völlig untergeordnete Rolle spielt.

## 2 Dichtsohlen

### 2.1 Vorarbeiten / Analogien

Erfordert die Tiefe einer Baugrube eine technisch wasserdichte Umschließung nicht nur am vertikalen Verbau, sondern auch horizontal, beispielsweise weil keine natürliche Dichtschicht im Untergrund vorliegt oder erreicht werden kann, so ist eine künstliche Dichtsohle gegen Grundwasserzustrom erforderlich.

Für das Herstellen als Sperre gegen vertikalen Grundwasserzutritt sind zwei Verfahren etabliert: Dichtsohlen im Düsenstrahlverfahren oder Dichtsohlen aus Weichgel.

Beiden Verfahren zur Herstellung von Dichtsohlen sind zwei Dinge gemeinsam:

- die (Lage-)Planung der einzelnen Elemente erfolgt im Grundriss idealisiert als kreisförmiges Element (real: DSV als Zylinder, Gel als Ellipsoid oder Kugel)
- vor Ausführung ist ein Einstich- oder Werkplan zu erstellen

Dieser Einstichplan besteht aus einem Raster gleichseitiger Dreiecke, die Eckpunkte markieren jeweils den Bohransatzpunkt. Aus dem vorab festgesetzten Durchmesser des Dichtelements, bzw. der Injektionsreichweite (abhängig von Baugrundverhältnissen) ergibt sich das erforderliche Dreieckraster. Alle „Kreis“segmente treffen sich idealtypisch in einem Punkt, bzw. überschneiden sich bedingt durch den Einbezug von Bohrabweichungen, Sicherheitszuschläge, u.ä.).



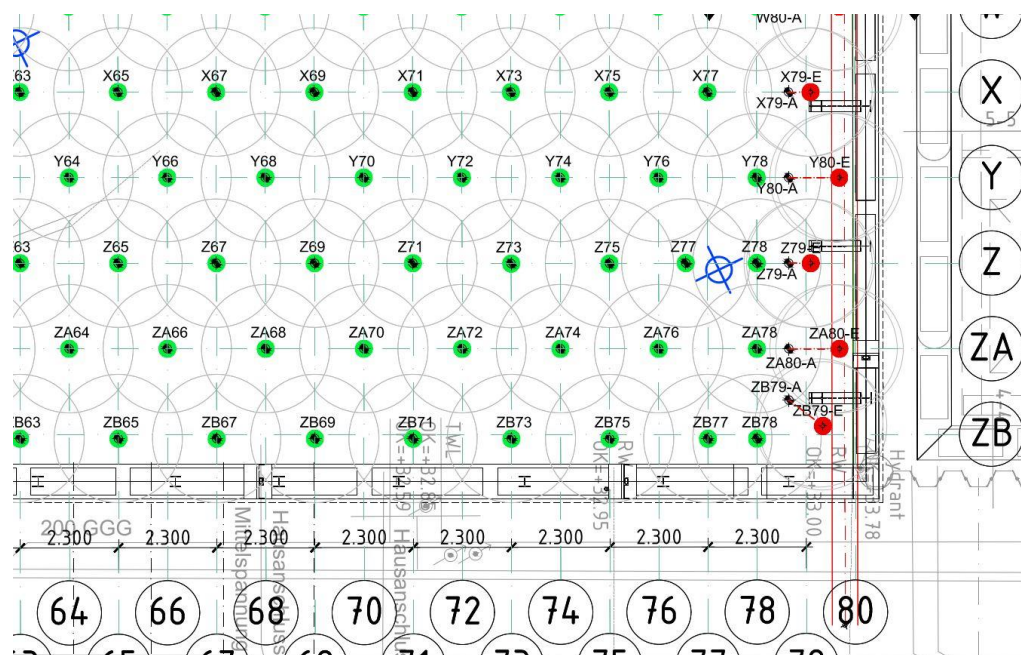


Abb. 2.1: Austeilungsplan DSV-Sohle (GABRIEL 2018)

Die Bohr- oder Rammunkte werden mit Gauss-Krüger-Koordinaten versehen, um die eindeutige Lage am Baufeld zu gewährleisten. Die Einmessung erfolgt mittels GPS.

## 2.2 Herstellung Dichtsohle im Düsenstrahlverfahren

Das Düsenstrahlverfahren lässt sich in 3 Arbeitsschritte einteilen: Aufstellen des Bohrgeräts am Bohrpunkt, Abteufen der Bohrung, Herstellen des Düsenstrahlkörpers.

Für das Herstellen des Körpers bestehen drei Varianten (jeweils mit weiteren Teilvarianten):

- klassisches Einfachverfahren: Schneidstrahl aus Zementsuspension
- Zweifach-Verfahren: Schneidstrahl aus Zementsuspension mit Druckluftummantelung
- Zweifach-Verfahren: Vorschneiden mit Wasser (oder Zementsuspension) und Nachverpressen mit Zementsuspension

Die Herstellung einer Düsenstrahlsohle erfolgt ähnlich dem klassischen DS-Verfahren, welches bei Unterfangungen eingesetzt wird: Nach Einmessen des Ansatzpunktes am Baufeld und Aufstellen des Bohrgeräts werden die Bohrungen abgeteuft.

Die Bohrung erfolgt im Spülbohrverfahren, zumeist mit Zementsuspension, um den Bohrkanal zu stützen. Selten wird in standfesten Böden mit reiner Wasserspülung gearbeitet.

Nach Abteufen der Bohrung wird mittels Hochdruckpumpe (400 bar und mehr) über das Bohrgestänge und eine am Bohrlochtieftsten angebrachte Düse Zementsuspension (bis

zu 600 lit/min) in den Boden injiziert. Hierdurch wird der Boden aufgeschnitten und durch gleichzeitiges langsames Drehen und Ziehen des Bohrgestänges mit der Zementsuspension vermischt und verdrängt. Durch die Rotation des Bohrgestänges und die Reichweite des Düsenstrahls entsteht ein zylinderförmiges einzelnes Dichtelement. Der Zieldurchmesser jedes Düs-Elements beträgt je nach Baugrund, Bohrtiefe, Geometrie der Baugrube zwischen 2,50m und 3,80m.

Als Bindemittel sind alle gängigen Zemente und Bindemittel der Baustoffhersteller grundsätzlich geeignet.

Überschüssige Zementsuspension und erodierter Boden treten als Überschusssuspension („Rücklauf“) am Bohrlochmund aus, werden aufgefangen und entsorgt.



*Abb. 2.2: DSV-Herstellung mit Rücklaufgraben (ZÜBLIN SPEZIALTIEFBAU 2019)*

Beim Herstellen von Düsenstrahlensohlen wird zumeist das Zweifach-Verfahren mit Druckluftummantelung gewählt. Durch ein doppelwandiges Bohrgestänge wird über einen separaten Kanal der Zementstrahl mit Druckluft ummantelt und gebündelt. Hierdurch erhöht sich die Reichweite und der Energieeintrag in den Boden und größere Durchmesser als im klassischen Einfach-Verfahren können erzielt werden.

An Gerätschaften ist erforderlich:

- Zementsilo 70-90 to Kapazität
- leistungsfähiger Mischer mit Vorratsbehälter
- dieselbetriebene Hochdruckpumpe
- Raupenbohrgerät (ca. 25-40 to Einsatzgewicht)
- dieselbetriebener Hochleistungskompressor für Druckluft
- Raupenbagger und Schlammpumpe für Rücklaufmanipulation



*Abb. 2.3: DSV-Anlagentechnik (HOFFMANN 2022)*

### **2.3 Herstellen Dichtsohle im Weichgelverfahren**

Die Arbeitsschritte beim Herstellen einer Gelsohle sind: Aufstellen am Bohrpunkt, Abbohren (oder Einrütteln) und Verdämmen der Injektionslanzen mit Mantelmischung, Aushärtezeit, Injektion des Deckels (falls im Projekt erforderlich), Injektion des Gels.

Für das Einbringen der Injektionslanzen gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Abbohren im Spülbohrverfahren mit Suspensionsstützung und Einbau der Injektionslanzen nach Ziehen des Bohrgestänges
- Einrütteln eines Bohrgestänges mit verlorenem Rammschuh, Einbau der Injektionslanzen und Verfüllen des Bohrlochs mit Suspension

Allen Verfahren ist eines gemeinsam: das Bohrloch wird mit Suspension gefüllt und Injektionslanzen nachträglich in die flüssige Suspension eingebracht.



Die Suspension besteht aus schwach zementhaltigen, stark bentonit- und steinmehlhaltigen Fertigmischungen (trockene Siloware) und dichtet den Bohrkanal gegen unkontrolliert aufsteigendes Injektionsgut ab.

Die Injektionslanzen bestehen aus 1 bis 3 Lanzen pro Bohrloch, abhängig davon, ob zusätzlich ein Deckel aus Dichtwandmasse vor dem Gel injiziert wird und ob 1- oder 2-lagig injiziert wird. Die Injektionslanzen bestehen aus PVC (seltener PE) mit Durchmesser 1-2cm und besitzen am unteren Ende ein Einfachventil.

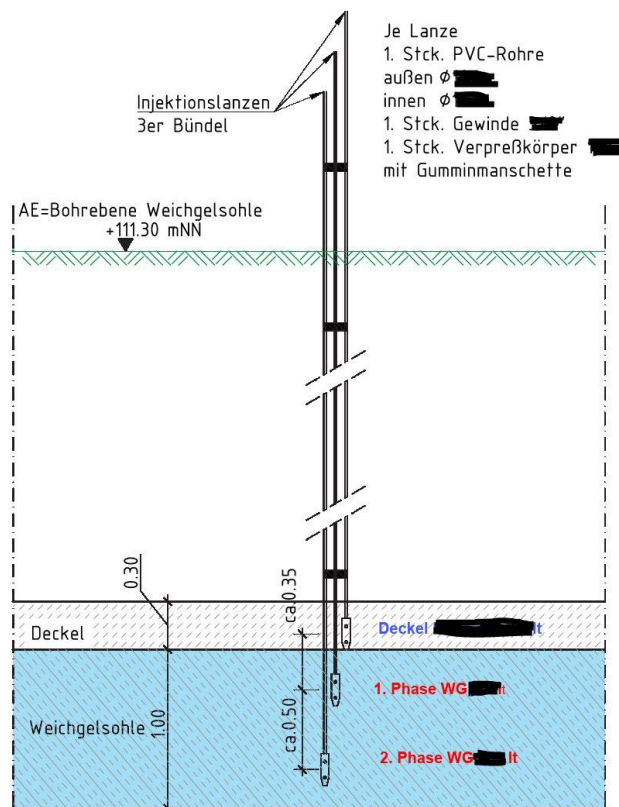
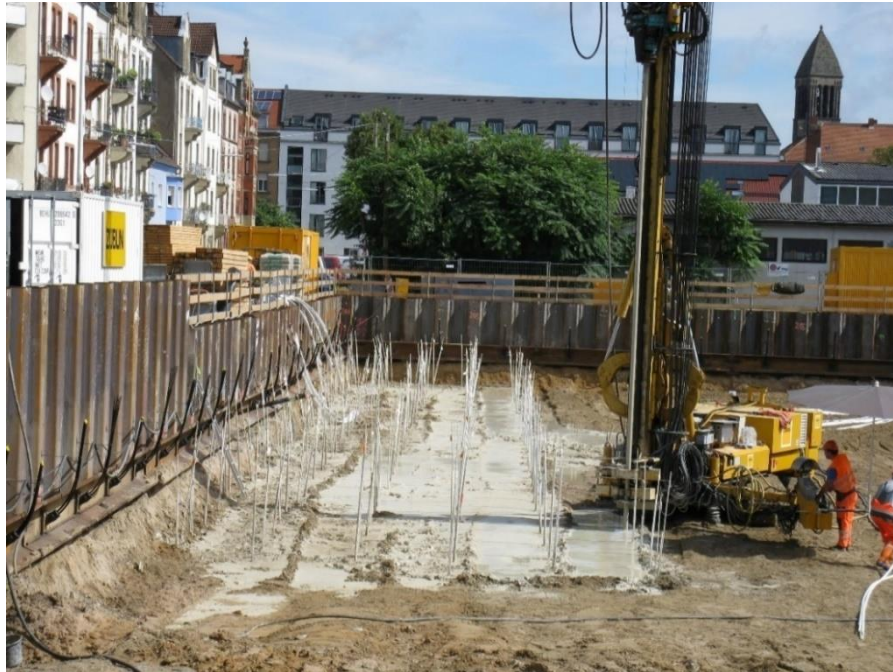


Abb. 2.4: Schema Lanzenbündel bei Gelsohle (ZÜBLIN SPEZIALTIEFBAU)

Überschüssiges Bohrgut (bei Spülbohrungen) fällt in geringer Menge an und wird im Zuge des Baugrubenaushubs abgetrennt und gesondert entsorgt. Ein Vorteil des Rüttelverfahrens ist, dass bei sorgsamer Arbeit so gut wie keine Suspension am Baufeld verbleibt, da das Bohrloch separat aufgefüllt wird.



*Abb. 2.5: Gelsohle: Spülbohrung und ca. 15cm Rücklaufschicht (BLACK 2016)*

Nach ausreichender Erhärtung der Mantelmischung (ca. 3-5d Dauer) kann mit der Injektion des Deckels begonnen werden. Vor allem in sehr grobkörnigen Böden unterstützt eine Deckelinjektion die horizontale Ausbreitung der späteren Gelinjektion. Der Deckel wird aus demselben Material wie die Mantelmischung hergestellt.

Sobald der Deckel ausgehärtet ist, beginnt die Injektion der eigentlichen Dichtschicht aus Silikatgel. Dieses ist eine 3-komponentige Mischung aus Wasserglas, Härter und Wasser. Wasserglas und Härter stellen ca. 20 Vol.-% der Mischung dar, die exakte Dosierung ist von der jeweiligen Zulassung und den Ausgangsprodukten abhängig. Über Injektionspumpen wird im Niederdruckverfahren mit ca. 6-15 bar die Gelmischung über die Injektionslanzen in die Porenräume des Bodens verpresst (in Abhängigkeit von Tiefenlage der Gelsohle und den Eigenschaften des Bodens sind auch höhere Drücke möglich). Ein Umlagern von Boden oder Austrag von Bodenteilen erfolgt nicht, das Gel umschließt die Kornfraktionen und verschließt die vorhandenen Hohlräume.

An Gerätschaften ist erforderlich (bei Spülbohrung mit Mantelmischung):

- Zementsilo 30-60 to Kapazität für Mantelmischung
- Mischer mit Vorratsbehälter
- Spülpumpe für Bohrung
- Raupenbohrgerät (ca. 25-40 to Einsatzgewicht)
- eventuell Raupenbagger 7,5 to und Schlammpumpe für Rücklaufmanipulation
- Nasssilo(s) 30-60 to für Wasserglas

- Lagerfläche für Härter (bei Flüssighärter erfolgt Lieferung in IBC-Tanks à 1000 liter)
- automatische Dosier- und Mischstation, sowie Injektionscontainer mit 4-8 Pumpen



Abb. 2.6: Gelsohle: Anlagentechnik und Lanzenfeld (HOFFMANN 2022)

### 3 Was macht Gelsohlen „sanfter“?

Warum eine Injektionssohle als „sanfter“ und damit „ökologischer“ im Vergleich zu einer Düsenstrahlsohle gelten kann, lässt sich anhand einiger Kriterien qualitativ wie quantitativ herleiten.

#### 3.1 Qualitative Betrachtung

Für die qualitative Beantwortung der obigen Frage wird die Betrachtung der Herstellweise herangezogen.

Beim Düsenstrahlverfahren wird das Bodengefüge aufgeschnitten, umgelagert und vermischt, durch den erforderlichen hohen Druck des Schneidstrahls, verbunden mit viel Menge an Zementsuspension, entsteht überschüssiges Material, das zu entsorgen ist.

Beim Injektionsverfahren wird das Korngerüst des Bodens nicht angetastet und lediglich die Hohlräume verfüllt. Überschussmaterial in geringer Menge muss entsorgt werden, beim Aushub ist darauf zu achten, dass die abgescherten Reste der PVC-Injektionslanzen aussortiert und gesondert entsorgt werden müssen.

Der Einsatz von Chemikalien im Grundwasser klingt zunächst abschreckend, im Gegensatz zu Zement, der nach Aushärtung als inert gelten kann. Alle ausführenden Firmen des Spezialtiefbaus, die Gele injizieren, haben hierfür vom DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) zugelassene Produkte. Diese müssen sich vor Zulassung intensiven Prüfverfahren unterziehen, vor der Ausführung ist die jeweilige Wasserbehörde zu informieren und während der Ausführung ist ein intensives Grundwassermonitoring zu betreiben (Schadstoffprüfung). In aller Kürze kann gesagt werden, dass der Einsatz von Weichgel im Vergleich zu Zement unschädlicher ist.

### **3.2 Quantitative Betrachtung**

Für die quantitative Betrachtung und einen zahlenbasierten Vergleich wird ein fiktives Rechenbeispiel herangezogen.

Gegenübergestellt wird bei beiden Verfahren die Menge an erforderlichen Hauptmaterialien inklusive Liefertransporte, die Menge an aufzubringender Energie für den Herstellprozess und die Anzahl an Abtransporten der überschüssigen Suspension. Zudem werden diese Werte mit einer überschlägigen CO<sub>2</sub>-Bilanzierung versehen.

Um nicht zu sehr in die Detailtiefe vorzudringen, werden Einflüsse aus Bohrverschleiß, An- und Abreise der Mannschaft und An- und Abtransporte der Baustelleneinrichtung nicht mit in die Betrachtung aufgenommen.

Als Beispiel dient eine Dichtsohle in 12m Tiefe (Bohrtiefe ab Planum 12m) in sandig-kiesigen Böden mit rd. 4000 m<sup>2</sup> Grundfläche. Die Dicke der Dichtsohle beträgt 1,0m.

Für die Düsenstrahl-Sohle wird ein erzielbarer Durchmesser von 3,20m angesetzt, woraus das Bohrraster und somit die Anzahl der Bohrungen resultieren. Die zu düsende Strecke beträgt beträgt 1,0m.

Für die Gelsohle wird ein gleichseitiges Dreieckraster von 1,50m Kantenlänge angesetzt, einschließlich Deckelinjektion und 3-fachem PVC-Injektionslanzenbündel. Der Deckel hat eine Dicke von 20cm (1. Lanze), die Gelschicht von 1,0m (2. und 3. Lanze).

Unter Berücksichtigung kalkulatorischer Parameter wie Bohrabweichungen, Mehrverbrauch, Zusatzbohrungen, Spülvorgänge, ergeben sich für die beiden Varianten die in Tab. 3.1 dargestellten Mengen an Material, Energie und Transporten:

Tab. 3.1: Material und Transporte beider Dichtsohlvarianten (Black 2024)

Material	Menge	ME	Transport-Anzahl	Entfernung	km gesamt	Anmerkung
<b>DSV-Sohle</b>						
Zement CEM II 32,5	2.950,0	to	110,0	50,0 km	5500,0 km	regional verfüg
Diesel	36.000,0	lit	18,0	20,0 km	360,0 km	vor Ort
Strom	41.600,0	kWh	---	---	---	---
Wasser	3.100,0	m3	---	---	---	---
Rücklauf (Abtransp.)	4.250,0	m3	250,0	35,0 km	8750,0 km	regional
			<b>378,0</b>		<b>14.610,0</b>	<b>km gesamt</b>
<b>Gel-Sohle</b>						
Bindemittel	320,0	to	12,0	350,0 km	4200,0 km	75% Anteil für
Injektionslanzen PVC	61.700,0	m	2,0	500,0 km	1000,0 km	nicht regional
Härter	33,0	to	2,0	500,0 km	1000,0 km	nicht regional
Wasserglas	327,0	to	13,0	350,0 km	4550,0 km	nicht regional
Diesel	12.300,0	lit	7,0	20,0 km	140,0 km	vor Ort
Strom	65.000,0	kWh	---	---	---	---
Wasser	3.100,0	m3	---	---	---	---
Rücklauf (Abtransp.)	1.100,0	m3	65,0	35,0 km	2275,0 km	regional
			<b>101,0</b>		<b>13.165,0</b>	<b>km gesamt</b>

Die Summierung der CO<sub>2</sub>-Anteile zeigt Tab. 3.2, wobei ein deutlich niedrigerer CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Gelsohle gegenüber der Düsenstrahlsohle ersichtlich ist. Auch bei möglicher Änderung der Einflussparameter bliebe die Tendenz deutlich.

Tab. 3.2: CO<sub>2</sub>-Überschlag beider Varianten (Black 2024)

	CO <sub>2</sub> / Einheit	CO <sub>2</sub> gesamt	Quelle / Anmerkung
<b>DSV-Sohle</b>			
Zement CEM II 32,5	689,00 kg/EH	2032,6 to	ökobaudat, Hersteller-EPDs
Diesel	3,20 kg/EH	115,2 to	well-to-wheel
Strom	0,41 kg/EH	17,1 to	electricity-maps
Wasser	0,35 kg/EH	1,1 to	Studie Gutcert
Rücklauf (Abtransp.)	---	---	in Transporten enthalten
Liefer/Entsorg-Transp.	1,12 kg/EH	16,4 to	35lit/100km * 3,2 kg Co <sub>2</sub> e/lit
		<b>2182,3 to</b>	
<b>Gel-Sohle</b>			
Bindemittel	190,00 kg/EH	60,8 to	Herstellerangabe
Injektionslanzen PVC	0,197 kg/EH	12,2 to	PVC gemäß eew-Infoblatt
Härter	1246,00 kg/EH	41,1 to	eew-Infoblatt (vglb. Produkt)
Wasserglas	765,00 kg/EH	250,2 to	eew-Infoblatt
Diesel	3,20 kg/EH	39,4 to	well-to-wheel
Strom	0,41 kg/EH	26,7 to	electricity-maps
Wasser	0,35 kg/EH	1,1 to	Studie Gutcert
Rücklauf (Abtransp.)	---	---	in Transporten enthalten
Liefer/Entsorg-Transp.	1,12 kg/EH	14,7 to	35lit/100km * 3,2 kg Co <sub>2</sub> e/lit
		<b>446,1 to</b>	
<b>FAZIT:</b>			
Gelsohle:		20,4%	CO <sub>2</sub> der DSV-Variante
Gelsohle:		79,6%	CO <sub>2</sub> weniger als DSV-Variante



## **4 Fazit**

### **4.1 Einflussgrößen und Optimierung**

Welche der beiden Varianten für Ausschreibung oder Ausführung die sinnvollere ist, hängt allerdings auch von weiteren, projektspezifischen Punkten ab.

Solche Punkte sind beispielweise die Bauzeit, Platz am Baufeld, wirtschaftliche Überlegungen, Nahtstellen bei Unterbrüchen in der Herstellphase oder weitere.

Düsenstrahlsohlen können aufgrund ihrer Festigkeitsentwicklung durch den eingesetzten Zement auch als Aussteifungselement im Baugrubenkonzept dienen. Ob dann hierdurch andere Elemente wie z.B. Ankerungen, Unterfangungen o.ä. entfallen oder „schlanker“ ausgeführt werden können, ergibt sich aus einer ganzheitlichen Untersuchung des Gesamtprojekts.

Unter CO<sub>2</sub>-Gesichtspunkten lassen sich Düsenstrahlsohlen durch die Wahl des Bindemittels optimieren. Durch Einsatz eines CEM III sind Einsparungen des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes aus dem Anteil des verwendeten Zements um 30% und mehr möglich (abhängig von Verfahrenstechnik und Ausgangsstoffen des Zementwerks).

Bei Gelsohlen ist die Herstellung auch ohne Deckel und/oder nur einlagiger Gel-Injektion möglich, die Einsparpotentiale an CO<sub>2</sub> liegen hier bei ca. 5%. Vorsicht ist aber geboten, ob baugrundbedingt dann eine höhere Gelmenge pro Bohrpunkt erforderlich wird oder das Bohrraster verjüngt werden muss, was die Einsparung egalisieren würde.

Bei derzeitigem Stand der Forschung und Ausgangsstoffen für Gelsohlen sind diese unter dem Gesichtspunkt CO<sub>2</sub> wohl fast am Limit der Optimierung angelangt. Düsenstrahlsohlen haben aufgrund der fortschreitenden Zementtechnologie noch deutliches Potential vor sich. Ob CO<sub>2</sub>-Gleichheit mit einer Gelsohle zu erwarten ist, kann aus jetziger Sicht nicht abschließend beurteilt werden.

### **4.2 Gelsohlen sind sanfter**

Die quantitative Betrachtung zeigt, dass unter der Kenngröße „Materialeinsatz“ und „CO<sub>2</sub>“ ein deutlicher ökologischer Vorteil der Gelsohle gegenüber einer Düsenstrahlsohle besteht. Es werden weniger Primärressourcen benötigt und weniger CO<sub>2</sub> ausgestoßen.

Die Kenngrößen „Transporte“ und „Transportkilometer gesamt“ zeigen ein widersprüchliches Bild:

Die Anzahl erforderlicher Transporte ist deutlich geringer bei der Gelsohle. Aufgrund der nicht-regionalen Verfügbarkeit der speziellen Ausgangsstoffe ist die Kilometersumme und damit der CO<sub>2</sub>-Ausstoß aus Transportkilometern im o.a. Beispiel nur 1,7 to CO<sub>2</sub> geringer. Hier sollte in die Überlegung („qualitativ“) einbezogen werden, dass weniger

Transporte eine weniger aufwändige Logistik und auch eine wesentlich geringere Anwohnerbelästigung bedingen.

Zusammengefasst: Nach heutigem Wissensstand können Gelsohlen als sanfter, ressourcenschonender und ökologisch verträglicher angesehen werden als zementintensive Düsenstrahlsohlen.

## Literatur

- BETON DIALOG Österreich, (2024): <https://baustoffbeton.at/faq/wie-viel-co2-entsteht-durch-beton/> [abgerufen 05.02.2024]
- BLACK, C. (2016): *Technischer Bericht und Qualitätssicherungsprogramm: Ausführung Weichgelsohle KVBW Karlsruhe (Baustelle)*, Züblin Spezialtiefbau GesmbH
- BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE, (2023): *InformationsblattCO<sub>2</sub>-Faktoren.pdf*; [https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew\\_infoblatt\\_co2\\_faktoren\\_2022.html](https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2022.html) [abgerufen 06.10.2023]
- ELECTRICITY MAPS (2024): <https://app.electricitymaps.com/zone/DE> Stromproduktion Deutschland der letzten 12 Monate [abgerufen 01.02.2024]
- GABRIEL, P. (2018): *Ausführungsplanung Düsenstrahlsohle Gloria Berlin (Baustelle)*, Züblin Spezialtiefbau GesmbH
- GUT CERTIFIZIERUNGSGESELLSCHAFT (2020): *Vergleich des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von Mineral- und Trinkwasser*; Berlin
- HOFFMANN, B. (2022): *Verfahrensbeschreibung Silikatgelsohle Franklinstr. Berlin (Baustelle)*, Züblin Spezialtiefbau GesmbH
- MOOSLECHNER, F. (2023): *Verfahrensanweisung DSV Bonatzbau Stuttgart (Baustelle)*, Züblin Spezialtiefbau GesmbH
- OEKOBAUDAT.DE: [https://www.oekobaudat.de/no\\_cache/datenbank/suche/daten/db2.html#bereich2](https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche/daten/db2.html#bereich2) GWP der Lebenszyklusphasen A1-A3; [abgerufen regelmäßig; ÖKOBAUDAT gemäß EN 15804+A1]
- SOBECK, W. (2020): *17 Thesen zur Nachhaltigkeit*, online: [https://www.wernersobek.com/de/themen/17\\_thesen/](https://www.wernersobek.com/de/themen/17_thesen/) [abgerufen 06.12.2023]
- UN-ENVIRONMENT PROGRAMME (2022): *Global Status Report for Buildings and Construction. [Online]* <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction> [abgerufen am 22.10.2023]
- VDZ (2020): *Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien*; Düsseldorf
- ZÜBLIN Spezialtiefbau GesmbH, (20nn): *Grundlagen technischer Berichte / Werkplanung zum Gewerk Düsenstrahlarbeiten und Injektionsdichtsohlen*; Wien

# Zementreduzierung durch Ausnutzung plastischer Verformungseigenschaften bei Dichtwänden

Dr.-Ing. Karsten Beckhaus, *BAUER Spezialtiefbau GmbH*

Dr.-Ing. Jan Kayser, *Bundesanstalt für Wasserbau*

Dr.-Ing. Frank Kleist, *SKI GmbH + Co.KG*

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Quarg-Vonscheidt, *Hochschule Koblenz*

David Alós Shepherd, *Karlsruher Institut für Technologie*

## Zusammenfassung

Aktuell arbeitet eine gemeinsame Arbeitsgruppe der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. (HTG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) an Empfehlungen für ein neues Bemessungskonzept für nachhaltige Dichtwände aus „hochverformbaren Dichtwandmassen“. Der Fokus liegt im Wesentlichen auf einer höheren Ausnutzung des visko-elastischen und auch plastischen Verformungsvermögens zementgebundener Dichtwandbaustoffe geringer Festigkeit. Diese erlaubt eine geringeren erforderlichen Zementgehalt und bietet damit einen nachhaltigen Vorteil, da der äquivalente CO<sub>2</sub>-Fußabdruck signifikant geringer ist. Im Vergleich zum klassischen Bemessungsverfahren soll eine geringere Festigkeit erlaubt werden. Diese soll so hoch sein, dass sie die Erosionssicherheit gewährleistet, mit einem möglichst geringen Verformungsmodul aber gleichzeitig Verformung erlaubt, ohne dass die zulässigen Druck- und Zugspannungen überschritten werden und dann Risse entstehen. Im Beitrag wird vorgestellt, wie dieses hohe Verformungsvermögen in der Bemessung angewendet werden kann und damit wirtschaftlichere und ressourcenschonendere Dichtwände geplant werden können.

## 1 Motivation und Anwendungsbereich

In Vorbereitung auf die Auswirkungen von Klimaveränderungen sind insbesondere Betreiber von Stauhaltungsbauwerken in der Pflicht, vorsorgliche Maßnahmen an bestehenden Anlagen in Angriff zu nehmen oder auch neue Anlagen nach dem heutigen Stand der Technik zu planen.

In der Wasserwirtschaft werden folglich auch an die vertikalen Damm-, Deich- und Untergrundabdichtungen (im Folgenden: „Dichtwände“) sehr hohe Anforderungen gestellt; vor allem an deren Dichtigkeit über die gesamte Nutzungsdauer der wasserbaulichen Anlage unter den gegebenen und zukünftig zu erwartenden Einwirkungen.

Im Rahmen der Planung sind unter anderem die baustofftechnischen Eigenschaften der Dichtwandmassen festzulegen. Werden als vertikale Dichtungselemente hydraulisch gebundene Dichtwandmassen eingesetzt, wie sie etwa im Merkblatt DWA-M 512-1 „Dichtungssysteme im Wasserbau, Erdbauwerke“ als „selbsterhärtende Suspension“ beschrieben sind, sind damit auch spezifische technische Abhängigkeiten der Verformungseigenschaften und der hydraulischen Parameter von der baustofflichen Zusammensetzung verbunden. Nach derzeitigen Erfahrungen fließt das visko-elastische und sogar ausgeprägt plastische Verformungsvermögen von hydraulischen Dichtwandmassen niedriger Festigkeit nicht ausreichend in die Bewertung ein, sondern wird neben der Anforderung an eine maximal zulässige Wasserdurchlässigkeit oft zusätzlich nur eine Mindestfestigkeit zur Sicherstellung eines ausreichenden Erosionswiderstands gefordert. Die „vertragliche“ Forderung einer Mindestfestigkeit führt in der Konsequenz – in Verbindung mit einem (zu) großzügig gewählten Vorhaltemaß in der Ausführung – aber zu einer zu hohen Festigkeit und damit zwangsläufig einhergehend zu einem weniger duktilen Bauteilverhalten. Für die o.g. prinzipiell erforderliche Dichtigkeit – unter den üblichen Nutzungsbedingungen – muss aber die Dichtwandmasse gerade auch hochverformbar sein.

**Die Herausforderung wurde darin erkannt, objektive Kriterien für hochverformbare Dichtwandmassen zu etablieren, die schon in der Planungsphase und Ausschreibung definiert werden.**

Die Lösungsstrategie kann zumindest teilweise anhand eines Praxisbeispiels aus Bayern erarbeitet werden. Am Sylvensteindamm (Wasserwirtschaftsamt Weilheim) waren Ertüchtigungsmaßnahmen erforderlich, für die u.a. eine tiefe Dichtwand erstellt wurde. Im Zuge der Ausschreibung und Festlegung der Qualitätskriterien wurde neben anderen Kenngrößen *kein* Mindestwert, sondern ein „Zielwert“ für die einaxiale Druckfestigkeit der Dichtwandmasse festgelegt. Gleichzeitig wurden für die wesentlichen Eigenschaften Durchlässigkeit und Verformbarkeit direkte Grenzwerte definiert.

Die Relevanz der baustofflichen Parameter auf die Funktion der geplanten Dichtwand muss präzisiert werden. Entsprechend muss eine hohe Verformbarkeit einer Dichtwandmasse in der Bemessung von Dichtwänden berücksichtigt werden. Darüber hinaus sollte auch der Einfluss solcher hochverformbaren Dichtwandmassen auf die bauliche Nachhaltigkeit im Sinne des Klimaschutzes aufgezeigt werden. Konkret sind durch eine Reduzierung des Zementgehalts (bei im Mittel geringerer Festigkeitsanforderung) Einsparungen bei der Emission von Treibhausgasen fast in gleicher Größenordnung zu erwarten.

Die Lösung wird in einer Formulierung von konkreten Bemessungsregeln und Empfehlungen für die Planung und Ausführung gesehen, die im Wesentlichen auf die Baustofftechnologie und deren Bedeutung für die Robustheit bzw. Resilienz von Dichtwänden und damit für die effektive Dauerhaftigkeit von Wasserbauwerken aufbauen. Dafür hat die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) mit der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. (HTG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) eine gemeinsame Arbeitsgruppe „Hochverformbare Dichtwandmassen“ (Nr.: WW 6.6) eingerichtet. Die neuen Empfehlungen werden sich auf zementgebundene Dichtwandmassen unterschiedlicher Zusammensetzung beziehen und sind als Ergänzung zum bestehenden Merkblatt DWA-M 512-1 zu verstehen. Der Stand der Bearbeitung wird hier in wesentlichen Punkten vorgestellt und die Autoren als Mitglieder der Arbeitsgruppe freuen sich auf eine fachtechnische Diskussion, Kritik und Anregungen.

## **2 Hinweise zur Bemessung**

### **2.1 Anforderungen an Dichtungselemente**

Innen- und Untergrundabdichtungen in Erdbauwerken müssen verschiedene Anforderungen erfüllen:

**Durchlässigkeit:** Die Dichtwandmasse muss ausreichend dicht sein, damit die Dichtungsanforderungen an das Dichtungselement bzw. das Bauwerk erfüllt werden. Konkret ist die Permittivität ( $\Psi$ ) des Dichtungselements der maßgebliche Parameter. Beispielsweise kann eine 1,0 m dicke Schlitzwand bei größerer Durchlässigkeit ( $k = 10^{-8}$  m/s) die gleiche Permittivität aufweisen wie eine 0,1 m dünne Schmalwand mit einer Durchlässigkeit von  $k = 10^{-9}$  m/s.

**Erosionsstabilität:** Die Erosionsstabilität der Dichtwandmasse bestimmt die Dauerhaftigkeit des Dichtungselements.

Bei feststoffarmen Dichtwandmassen aus selbsterhärtender Suspension mit einer Dichte von  $\rho \leq 1,3$  t/m<sup>3</sup> wird eine Betrachtung der Erosionsstabilität im Einzelfall empfohlen.

Bei feststoffreichen Dichtwandmassen aus selbsterhärtender Suspension mit einer Dichte von  $\rho > 1,3$  t/m<sup>3</sup> wird eine einaxiale Druckfestigkeit von mindestens 0,3 MPa zur Erzielung eines erosionsstabilen Dichtungselements ( $i \leq 50$ ) als ausreichend angesehen. Bei höheren hydraulischen Gradienten werden Einzelfallprüfungen angeregt (Kap. 6.2.1.2 [DWA-M 512-1, 2012]).

Bei Dichtwandmassen aus selbsterhärtender Suspension mit einer hohen Dichte von  $\rho > 1,6$  t/m<sup>3</sup> können aufgrund der Praxiserfahrungen hydraulische Gradienten von  $i = 100$  (dauerhaft) bis  $i = 200$  (temporär) zugelassen werden (Kap. 6.2.7.6 [DWA-M 512-1, 2012]).

**Verformbarkeit:** Die Spannungs-Stauchungs-Beziehung und hier vor allem die Bruchstauchung bestimmt die Verformbarkeit einer Dichtwandmasse. Die Bruchstauchung muss ausreichend hoch sein, um die zu erwartenden Verformungen des Dichtungselements schadfrei aufnehmen zu können. Eine hohe Verformbarkeit wird in der Regel gleichzeitig durch einen geringen Verformungsmodul beschrieben, der als Materialkenngröße in numerischen Berechnungen eingesetzt wird.

Sind die Verformungen im zu dichtenden Erdbauwerk erheblich, werden durch steife Bauteile „Spannungen angezogen“. Im Bereich von kritischen Verformungspunkten kommt es dann sehr schnell zu einer Überschreitung der zulässigen Spannungen im Dichtungselement. Solche kritischen Verformungspunkte können beispielsweise an Felseinbindungen liegen. Bei der Planung von Dichtungselementen sind also hohe Verformbarkeiten des Dichtungselements anzustreben, um eine Überbeanspruchung der Dichtwandmasse zu vermeiden.

Der elastische Verformungsmodul  $E$  einer Dichtwandmasse korreliert weitestgehend linear mit der Festigkeit, so dass es beim Entwurf des Dichtungselements nach klassischer elastischer Theorie zu einem Zielkonflikt hinsichtlich der notwendigen Verformbarkeit kommen kann, wenn sich ein hoher  $E$ -Modul aus einer (zu) hohen Festigkeitsanforderung ergibt und damit die rechnerisch resultierenden Spannungen dann größer als die Festigkeit sind.

**Das hochverformbare Dichtungselement übernimmt planmäßig keine Tragwirkung und verformt sich mit seiner Umgebung.**

**Festigkeit:** Die Festigkeit der Dichtwandmasse muss ausreichend hoch sein, i.d.R. um hydraulische Einwirkungen zu beherrschen (vgl. Erosionsstabilität), und ausreichend klein sein, um die o.g. Verformbarkeit zu gewährleisten.

Die Festigkeit wird in der Regel im weggesteuerten einaxialen Druckversuch in Anlehnung an DIN 18136 (oder nach DIN EN ISO 17892-7) ermittelt.

Häufig wird an die Dichtwandmasse eine Festigkeitsanforderung gestellt, die irrtümlich darauf beruht, dass dem Dichtungselement eine Tragfunktion im Erdbauwerk oder Untergrund zugeordnet wird, die tatsächlich nicht vom Dichtungselement übernommen wird oder werden muss. Betrachtet man einen Erddamm oder einen Deich, wird man feststellen, dass – außer im Fall von statisch wirksamen Dichtungen – eine schadlose „Mitverformung“ des Dichtungselementes mit den Verformungen des Erdbauwerks gewünscht ist und große konstruktive Vorteile mit sich bringen kann.

**Beständigkeit:** Die dauerhafte Funktionstüchtigkeit eines Dichtungselements ist dann gegeben, wenn die auftretenden Verformungen aufgenommen werden können, ohne dabei die geforderte dauerhafte Dichtwirkung zu verlieren. Dabei sind auch wiederholt auftretende, gegebenenfalls wechselnde Verformungen zu beachten.

Die erhärtete Dichtwandmasse muss insbesondere erosionsstabil sein und beständig gegenüber witterungsbedingten, biologischen und chemischen Einwirkungen.

## 2.2 „Klassisches“ Bemessungsverfahren

Verformungen in Dichtungselementen im Wasserbau können planmäßig aus Setzungen des umgebenden Baugrunds oder Dammkörpers sowie aus betrieblichen Beanspruchungen (Stauspiegelveränderungen, Verkehrs- und Nutzlasten) entstehen. Daraus ergeben sich Beanspruchungen, die Bemessungsgrundlage für die Planung hochverformbarer Dichtungselemente sind.

In vielen Fällen können die o.g. Beanspruchungen planmäßig durch das elastische Verformungsvermögen der Dichtwandmasse aufgenommen werden. Für statische Nachweise wird im Allgemeinen der in DIN 18136 beschriebene „Modul des einaxialen Druckversuchs“ ( $E_u$ ) herangezogen, entsprechende der Wendepunkt tangente im Druckspannungs-Stauchungsdiagramm (vgl. Abb. 2.1).

Wegen der weitgehend proportionalen Abhängigkeit von Spannungen und Stauchungen im elastischen Bereich ( $E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ ) steigt mit der aufgezwungenen Verformung gleichermaßen die resultierende Druckspannung, die bei entsprechend begrenzter Stauchung deutlich unterhalb der Druckfestigkeit bleibt.

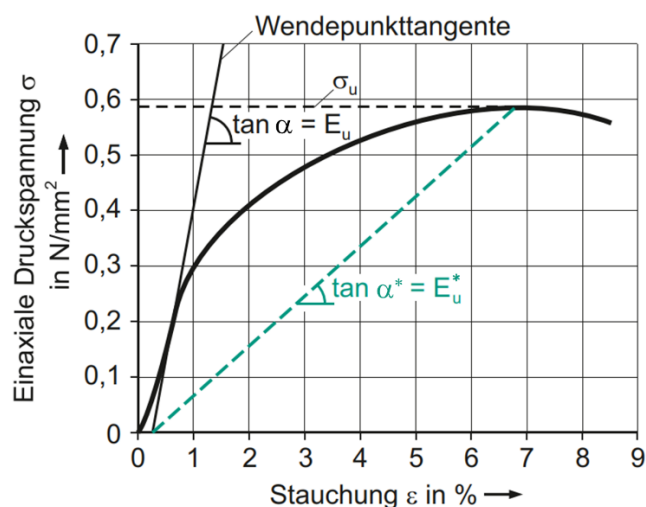


Abb. 2.1: Spannungs-Stauchungsdiagramm (qualitativ)

Eine Biegebeanspruchung ist i.d.R. nur durch eine „Überdrückung“ von sonst resultierenden Biegezugspannungen nachweisbar.

Bei differenzierten Nachweisen mit Hauptzugspannungen können in Anlehnung an die DIN 4093:2015 (s. Abbildung 2.1 aus DIN 4093:2015, Abschnitt 4.4.4 (3)) vereinfachend Zugspannungen bis zu 5% der dem Entwurf zugrunde gelegten charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit  $f_{m,k}$  zugelassen werden, ohne eine Rissbildung annehmen zu müssen. Bei höheren Zugspannungen ist sinngemäß anzunehmen, dass die Wand

aufreißen kann. In diesem Fall wird empfohlen, den Nachweis der hydraulischen und mechanischen Funktionstüchtigkeit am ungerissenen Restquerschnitt zu führen.

## **2.3 Bemessungskonzept für hochverformbare Dichtwände**

### **2.3.1 Abgrenzung zum klassischen Bemessungsverfahren**

Die wesentlichen Einwirkungen auf Dichtwände sind Verformungen aus dem System Dichtelement und umgebender Baugrund, Dammmaterial oder Bauwerk. Grundlage der Bemessung ist eine Berechnung der Spannungen und Verformungen im Bauwerk, ggf. mit entsprechenden Tragwiderstandsbedingungen nach DIN 19700. Deren Ergebnisse sind die Eingangswerte für die Bemessung der Dichtwand und zeigen die Integrität der gesamten Konstruktion. Aufgrund der häufig komplexen Randbedingungen an Dämmen und Deichen bieten sich Berechnungen nach der Finite Element Methode (FEM) an.

Aus den Verformungen werden Beanspruchungen als Spannungen oder Spannungsänderungen in der Dichtwand induziert, die bei einer elastischen Betrachtung direkt mit der Steifigkeit der Dichtwand korrelieren. Um die Spannungsänderungen aus Verformungen möglichst gering zu halten, soll die Dichtwand in der Regel einen möglichst geringen Verformungsmodul aufweisen und damit die Verformungen des Gesamtsystems nicht wesentlich beeinflussen.

Gegenüber dem klassischen Bemessungsverfahren unter Berücksichtigung ausschließlich elastischer Verformungen (vgl. Abb. 2.1) wird zur Berücksichtigung der Eigenschaften hochverformbarer Dichtungselemente die Duktilität, hier die Verformbarkeit über den elastischen Bereich hinaus, planmäßig bis zur Bruchstauchung  $\varepsilon_u$  genutzt.

Als wesentliche Bemessungsgröße für die FEM-Berechnung wird dafür ein reduzierter Verformungsmodul  $E_u^*$  eingeführt.  $E_u^*$  ergibt sich aus dem Tangens der Sekante zwischen dem Nullpunkt der im elastischen Bereich gebildeten Wendepunkt-Tangente (zur Bestimmung von  $E_u$ ) und dem Hochpunkt der Spannungs-Dehnungs-Kurve aus dem verformungsgesteuerten Druckversuch (bei  $q_u$ , vgl. Abb. 2.1). Für die FEM-Berechnungen können Erfahrungswerte herangezogen werden, die auf der sicheren Seite liegend die maximal zu erwartenden Verformungen ergeben. Entsprechend sind für die Bemessung niedrige Verformungsmodule für die Dichtwandmasse anzusetzen.

Als Ergebnis der Berechnung ergibt sich eine maßgebende charakteristische Stauchung  $\varepsilon_{k,DWM}$  im Dichtungselement. Für den Nachweis einer verträglichen Verformbarkeit muss die Bruchstauchung der Dichtwandmasse  $\varepsilon_u$  größer als  $\varepsilon_{k,DWM}$  sein.

### **2.3.2 Baustofftechnische Charakterisierung hochverformbarer Dichtwandmassen**

Hochverformbare Dichtwandmassen zeichnen sich gegenüber spröderen Baustoffen durch ihr ausgeprägtes plastisches Verformungsvermögen aus. Damit die



Materialsteifigkeit dieser hochverformbaren Baustoffe bei der Berechnung realitätsnah erfasst werden kann, darf sich die der Materialsteifigkeit, abweichend von den konventionellen Berechnungs- und Bemessungsverfahren, nicht auf die Betrachtung eines linear-elastischen Bereichs beschränken. Das plastische Spannungs-Stauchungsverhalten ist bei dem Bemessungskonzept Hochverformbarer Dichtwandmassen miteinzubeziehen. Durch eine Reduzierung des Verformungsmoduls von  $E_u$  auf  $E_u^*$ , infolge zugelassener Plastifizierung des Dichtungselements, werden Spannungen im Material bei aufgeprägter Verformung verringert.

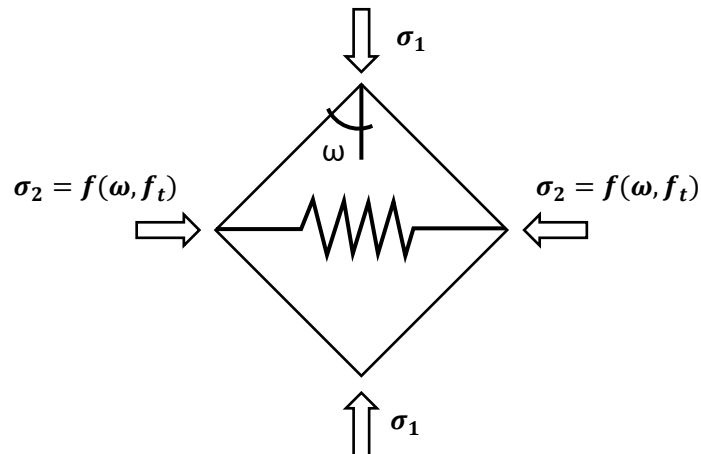


Abb. 2.2: Element des Modells der inneren Struktur

Die in Abb. 2.2 dargestellten Größen und Parameter seien:

$\sigma_1$ bzw. $\sigma_{2/3}$	Hauptspannungen	[Pa]
$\omega$	Winkel der inneren Struktur	[°]
$f_t$	Innere Zugfestigkeit des Materials	[Pa]

Das Last-Verformungsverhalten wird im Folgenden über das „Modell der inneren Struktur“ (vgl. Abb. 2.3) für einen druckbeanspruchten Körper beschrieben. Das Modell ermöglicht über die Definition der beiden Parameter ‚Winkel der inneren Struktur‘ und ‚Innere Zugfestigkeit‘ das Hauptspannungsverhältnis in einem zementgebundenen Material zu beschreiben.

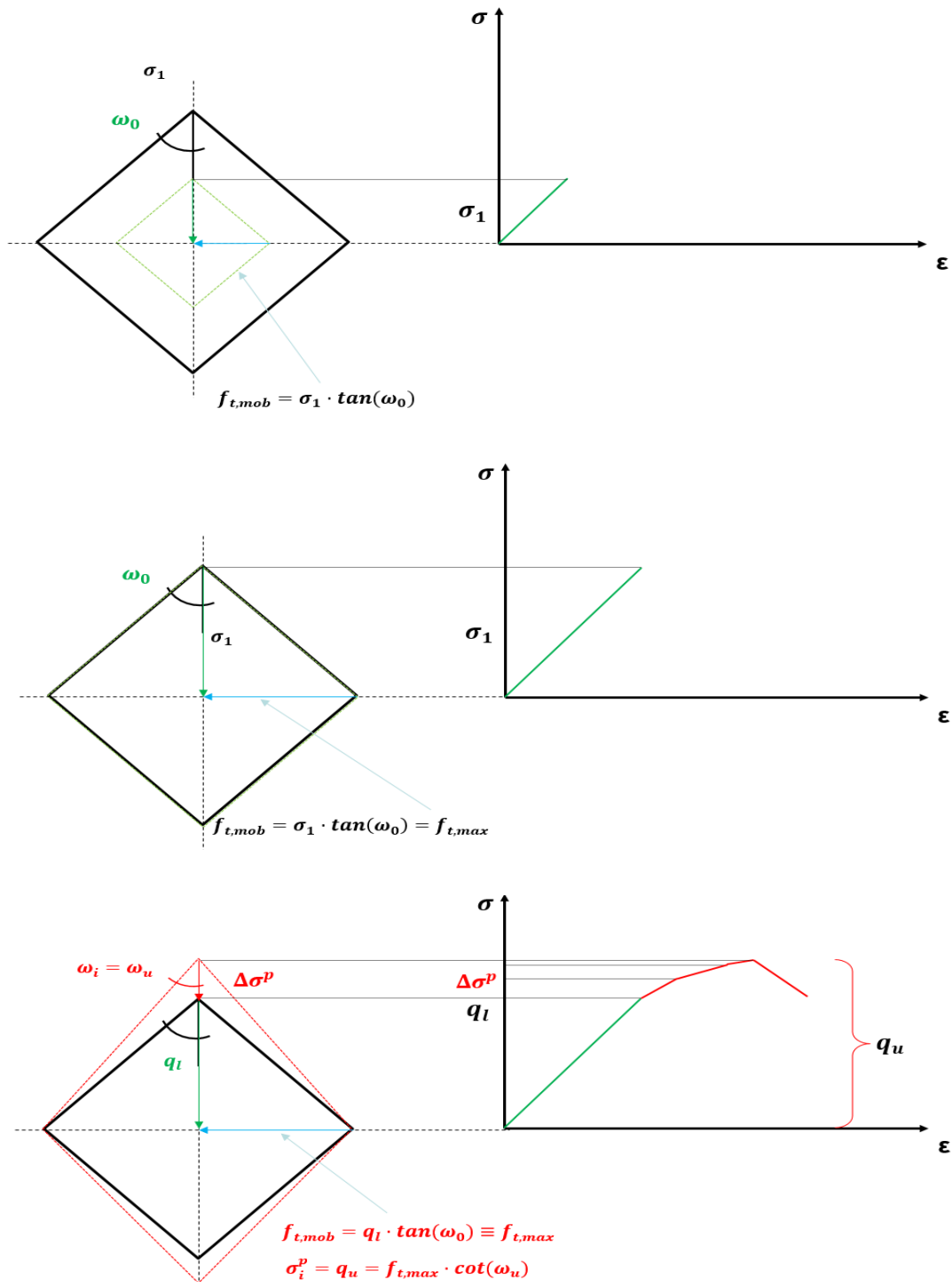


Abb. 2.3: Last-Stauchungsverhalten im Modell der inneren Struktur

Die innere Zugfestigkeit beschreibt hierbei den kohäsiven Widerstand des Gefüges, der Winkel der inneren Struktur gibt an, in welchem Maße eine Kraft im Material weitergeleitet wird. In einem ideal strukturierten Material erfolgt die Kraftweiterleitung ausschließlich in Belastungsrichtung ( $\omega = 0$ ). Bei einer Abweichung von dieser idealen Kraftweiterleitung ist der Winkel der inneren Struktur ungleich Null und es entstehen Zugspannungen. Das Zusammenwirken von innerer Struktur und kohäsivem Widerstand

und die daraus entstehenden kritischen Hauptspannungsverhältnisse sind am Beispiel von Asphalt dichtungen in TYNIOR (ET AL., 2020) beschrieben.

Für das in Abb. 2.3 gezeigte Modell wird unterstellt, dass eine Zugspannung durch lastinduzierte Verformung mobilisiert wird (oben) und am Ende des elastischen Verformungsbereichs ihren Maximalwert, also die Zugfestigkeit erreicht (Mitte). Der elastische Bereich ist dadurch gekennzeichnet, dass der Winkel der inneren Struktur bei Verformung konstant bleibt. Mit darüberhinausgehender Verformung verändert sich der Winkel bei gleichbleibender Zugspannung, was insgesamt zu einer erhöhten Belastbarkeit der inneren Struktur führt (unten).

Ein plastisches Materialverhalten lässt sich also auf ein entsprechend großes Potenzial der Strukturänderung zurückführen und durch die Materialparameter  $\omega_0$  und  $\omega_u$  beschreiben. Spröde Materialien besitzen i. A. kein nennenswertes Änderungspotenzial, die innere Struktur wird, wie z. B. bei Betonen, von einer steifen Zementmatrix bestimmt. Nach vollständiger Mobilisierung der inneren Zugfestigkeit ist keine weitere Lastaufbringung ( $\omega_u = \omega_0$ ) möglich, der Probekörper versagt damit spontan und ohne weitere Vorankündigung. Hierbei wird die innere Energie, welche in der elastischen Mobilisierung der Zugfestigkeit als potentielle Energie gespeichert ist, schlagartig als kinetische Energie freigesetzt. Hat das untersuchte Material hingegen ein entsprechendes Änderungspotential (wie eine hochverformbare Dichtwandmasse), orientiert sich die Lastweiterleitung im Material zunehmend in Belastungsrichtung und erhöht die Belastbarkeit der inneren Struktur des Materials. Bei zusätzlicher Lastaufbringung über  $\omega_u$  hinaus wird die Zugfestigkeit überschritten und es kommt zu einem instabilen Risswachstum.

Für die Ausnutzung eines plastischen Übergangsbereiches bei hochverformbaren Dichtwandmassen muss sichergestellt sein, dass die Dichtwirkung erhalten bleibt. Dafür darf es nach dem oben gezeigten Modell der inneren Struktur nicht zu einer Überschreitung der „inneren Zugfestigkeit“ kommen, die wiederum bis zum Erreichen der Druckfestigkeit  $q_u$  nicht überschritten wird.

### **2.3.3 Festlegungen für die Druckfestigkeit und die Steifigkeit der Dichtwandmasse**

Ziel des vorgeschlagenen Bemessungskonzepts ist es, die Materialanforderungen für eine Dichtwand festzulegen. Aus der Bemessung des Gesamtbauwerks ergeben sich Verformungen, die die Verformung der Dichtwand vorgeben (siehe Kap. 2.1), und für die Funktionstüchtigkeit der Dichtwand ist der maximale Dehnungszustand in der Wand maßgebend. Dieses charakteristische Verformungsbild kann beispielsweise mit der Finiten-Element-Methode (FEM) berechnet werden.

Der für die Bemessung zu verwendende charakteristische Wert  $\varepsilon_{k,DWM}$  ist die maximale Stauchung oder ggf. Dehnung aus allen untersuchten Lastfällen. Weiterer Eingangswert

ist die Zieldruckfestigkeit des Dichtwandbaustoffs. Die Basis für die Festlegung ist die erforderliche Mindestdruckfestigkeit  $q_{\text{erf}}$  der Dichtwand, die sich unabhängig von der mechanischen Beanspruchung in der Regel aus geohydraulischen Anforderungen (z.B. Erosion) ergibt. Das zu wählende Vorhaltemaß  $V$  zur Ermittlung der Zieldruckfestigkeit ist über die zu erwartenden Streuungen baustoffabhängig. Für eine Ersteinschätzung soll das Vorhaltemaß zu 50% von  $q_{\text{erf}}$ , jedoch mindestens zu 0,2 MPa gewählt werden können:

$$q_{\text{ziel}} = \max [1,5 q_{\text{erf}}; q_{\text{erf}} + 0,2 \text{ MPa}] \quad (1)$$

Für die Festlegung des Zielwerts der Verformbarkeit  $\varepsilon_{u,\text{Ziel}}$  ist die charakteristische Stauchung  $\varepsilon_{k,\text{DWM}}$  mit einem Teilsicherheitsbeiwert zu erhöhen.

$$\varepsilon_{u,\text{Ziel}} \geq \gamma_{\text{DWM}} \times \varepsilon_{d,\text{DWM}} = \gamma_{\text{GDWM}} \times \gamma_{\text{G}} \times \varepsilon_{k,\text{DWM}} \quad (2)$$

mit  $\gamma_{\text{G}}$  = Teilsicherheitsbeiwert auf Beanspruchungen = 1,35 (BS-P), vgl. DIN 1054.

mit  $\gamma_{\text{DWM}}$  = Teilsicherheitsbeiwert für die Dichtwandmasse

Die Größe des Teilsicherheitsbeiwerts für die Dichtwandmasse soll die Streuungen in Bezug auf die Zusammensetzung des Materials und auf die Herstellung berücksichtigen. Da hier lediglich Nachweise der Gebrauchstauglichkeit behandelt werden, ist es ausreichend, realistische baupraktische Erfahrungswerte für  $\gamma_{\text{DWM}}$  anzusetzen. Als Anhaltswert kann für werkmäßig hergestellte Dichtwandmassen ohne zu erwartende Einmischung von Boden ein Wert von 1,1 angegeben werden, bei Bodenmischverfahren je nach Heterogenität der zu erwartenden Dichtwandmasse Werte von bis zu 1,5 und darüber hinaus.

Für die Güteprüfung muss für alle Proben gezeigt werden, dass die erforderliche Druckfestigkeit und die erforderliche Bruchdehnung nicht unterschritten werden:

$$q_k \geq q_{\text{erf}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{u,k} \geq \varepsilon_{d,\text{DWM}} \quad (4)$$

### 2.3.4 Berücksichtigung von Zugspannungen

Für die Bemessung des Gesamtbauwerks ist eine „angemessene“ Verformbarkeit der Dichtwand anzunehmen, definiert durch den charakteristischen Verformungsmodul  $E_{u^*,k}$ . Damit ergeben sich charakteristische Spannungen in der Dichtwand,  $\sigma_{k,\text{DWM}}$ .

Als erste Näherung wird empfohlen, beim Auftreten von Zugspannungen nachzuweisen, dass dieser Bereich auf maximal 20% des Dichtwandquerschnitts beschränkt ist. Gleichzeitig ist für den verbleibenden Dichtwandquerschnitt von mindestens 80% die geohydraulische Sicherheit nachzuweisen.

## 3 Hochverformbare Dichtwandmassen

### 3.1 Allgemeines

Die folgenden Dichtwandmassen können bei entsprechender Zusammensetzung eine hohe Verformbarkeit, d.h. wesentliche nutzbare plastische Verformungsanteile über den elastischen Bereich hinaus, erreichen. Sie können in überschnittenen Bohrfahlwänden, Schlitzwänden und auch in Wänden aus sich übergreifenden Bodenmischelementen eingesetzt werden. Diese Bauarten sind in den Ausführungsnormen DIN EN 1536, DIN EN 1538 und DIN EN 14679 geregelt.

- (1) Dichtwandmasse aus selbsterhärtender Suspension, auch als „Einphasendichtwandmasse“ bekannt.
- (2) Dichtwandmasse aus plastischem Erdbeton, auch „Plastic Concrete“ oder „Tonbeton“ bekannt.
- (3) Dichtwandmasse mittels tiefreichender Bodenvermörtelung hergestellt, auch als „Bodenmörtel“ bezeichnet.

Welche Art Dichtwandmasse für ein konkretes Projekt zum Einsatz kommt, hängt wesentlich auch von der zum Einsatz kommenden Bauart zusammen. Sehr tiefe Dichtwände erfordern z.B. ein Zweiphasenverfahren, so dass aus obiger Auswahl nur eine Dichtwandmasse aus plastischem Beton in Frage kommt.

Für alle o.g. Baustoffe werden für den Anwendungsbereich als hochverformbare Dichtwandmassen Zielfestigkeiten im folgenden Bereich und mit einer maximalen Durchlässigkeit vorgeschlagen, die abhängig von verfügbaren Baustoffen und anderen Randbedingungen projektspezifisch zu überprüfen bzw. anzupassen sind:

- $q_u = 0,5 \text{ bis } 2,5 \text{ MPa}$
- $k \leq 10^{-8} \text{ m/s}$

### 3.2 Dichtwandmasse aus selbsterhärtender Suspension

Bei Dichtwandmassen aus selbsterhärtender Suspension, im Anwendungsbereich von Schlitzwänden auch als „Einphasendichtwandmasse (EDW)“ bekannt, dienen als Stützflüssigkeit während des Aushubs und bilden, zusammen mit Feinanteilen aus dem natürlichen Boden, das endgültige erhärtete Dichtwandbaustoff. Hierdurch ist das Verarbeitungsfenster wie auch die Dichtwandtiefe begrenzt.

Bei einer EDW-Masse handelt es sich um eine Suspension, die Zement, Wasser und zusätzliche Stoffe (z.B. Bentonit oder anderes Tonmineral) als Stabilisator enthält. Zudem können ebenfalls weitere Zusatzstoffe und Zusatzmittel enthalten sein. Gesteinskörnungen werden in der Regel nicht zugegeben. Häufig werden auch

Fertigtrockenmischungen verwendet, die herstellerseitig im Werk gemischt werden auf der Baustelle nur noch mit Wasser angemischt werden müssen.

### **3.3 Dichtwandmasse aus plastischem Beton (Plastic Concrete)**

Dichtwandmassen aus plastischem Beton (auch Plastic Concrete oder Tonbeton genannt) werden üblicherweise in einem Betonmischwerk hergestellt und im Zwei-Phasen-Verfahren bzw. Kontraktorverfahren in einem zuvor ausgehobenen Schlitz eingebaut.

Plastic Concrete besteht hierbei aus Zement, Wasser und Bentonit (analog einer EDW-Masse) und einem hohen Anteil an Gesteinskörnung (Sand und Feinkies). Zusatzmittel sowie Zusatzstoffe können ebenfalls zugegeben werden. Aufgrund der Zusammensetzung ähnelt Plastic Concrete am ehesten einem Normalbeton nach EN 206, besitzt aber einen deutlich höheren w/z-Wert sowie niedrigere Zementgehalte.

Die Betonrezeptur wird hierbei an die Anforderungen an Festigkeit, Verformbarkeit und Dichtigkeit angepasst und im Rahmen der Erstprüfung überprüft. Durch den kontrollierten Einbau im Zwei-Phasen-Verfahren (Kontraktorverfahren) werden die mechanischen Eigenschaften der erhärteten Dichtwandmasse im Wesentlichen durch die Betonrezeptur bestimmt.

Weitere Informationen zu den Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie zum Mischungsentwurf von Plastic Concrete können (ALÓS SHEPHERD ET AL, 2020) entnommen werden.

### **3.4 Dichtwandmasse aus tiefreichender Bodenvermörtelung**

Dichtwandmasse aus tiefreichender Bodenvermörtelung entsteht durch das mechanische Zerlegen durch rotierende Mischwerkzeuge und das Vermischen mit Zementsuspension oder Zement, ohne die Stützung des seitlich anstehenden Bodens aufzuheben. Diese Dichtwandmasse kann aufgrund ihrer Zusammensetzung vereinfacht auch als Bodenmörtel bezeichnet werden.

Zur Steuerung der Eigenschaften im frischen und erhärteten Zustand können Bentonit oder anderes Tonmineral, weitere Zusatzstoffe und (chemische) Zusatzmittel zugegeben werden. Die Art und Menge des verbleibenden Bodens sowie auch dessen natürlicher Wassergehalt bestimmen die mechanischen Eigenschaften der erhärteten Dichtwandmasse wesentlich mit.

Bodenmörtel als Dichtwandmasse kann bzgl. seiner technischen Eigenschaften zwischen EDW und Plastic Concrete eingeordnet werden. Ist der eingemischte natürliche Boden z.B. ein Kiessand, sind Eigenschaften nahe am Plastic Concrete zu erreichen. Je feinkörniger der eingemischte Boden, desto näher sind die erzielbaren Eigenschaften an denen einer EDW.

## **4 Nachhaltigkeit**

Die Nachhaltigkeit von Bauwerken und verwendeten Bauprodukten steht mehr und mehr im Fokus, spätestens seitdem die Weltgemeinschaft 2015 die Agenda 2030 verabschiedet hat. Die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung sind politische Zielsetzungen der Vereinten Nationen, die weltweit der Sicherung einer nachhaltigen Entwicklung auf ökonomischer, sozialer sowie ökologischer Ebene dienen sollen [Nachhaltigkeitspolitik der Bundesrepublik Deutschland]. Per Definition ist die Nachhaltigkeit damit nicht auf den Klimaschutz oder den Schutz natürlicher Ressourcen beschränkt.

In Bezug auf dieses Merkblatt und die Erstellung von Dichtwänden aus hochverformbaren Dichtwandbaustoffen soll aber im Fokus stehen, die Belastung für die Umwelt durch Auswahl der Ausgangsstoffe und die Mischungszusammensetzung so weit zu reduzieren, wie es technisch möglich ist, um die Funktion der Dichtwand zu gewährleisten. Das in Abschnitt 2.3 vorgeschlagene Konzept für die Bemessung hochverformbarer Dichtwände führt gegenüber der „klassischen Bemessung“ insbesondere zu einer Reduzierung des Zementgehalts und damit in Summe zu einer Reduzierung der Emission klimaschädlicher Gase für die Erfüllung der gestellten Bauaufgabe.

Durch die Verwendung des Bodens als Baustoff im „Bodenmörtel“ wird neben der Reduktion des Zementgehalts darüber hinaus das Potenzial der Reduktion der Transporte genutzt, u.a. für die Abfuhr von Aushub und die Anlieferung von Zement. Eine besondere Herausforderung stellt die im Vergleich zu werksmäßig hergestellten Dichtwandbaustoffen größere zu erwartende Streuung der Materialeigenschaften von Bodenmischmörtel dar. Um nicht neu in den Zielkonflikt einer geringen erforderlichen Festigkeit für eine hohe Verformbarkeit zu geraten, muss die Qualitätssicherung projektspezifisch angenähert werden.

Der relevante ökologische Fußabdruck, der für die Planung, die Erstellung und den Erhalt einer Dichtwand entsteht, kann berechnet werden. Um die Reduzierung der Umweltbelastung durch Verwendung und Ausnutzung eines hochverformbaren Dichtwandbaustoffs in Zahlen sichtbar zu machen, können sich Vergleichsberechnungen auf die Bauphase beschränken. Und wenn sonst keine wesentlichen Änderungen in der Zusammensetzung des Dichtwandbaustoffs oder im Bauablauf zu erwarten sind, reicht für die Beurteilung des Effekts zu wissen, um welchen Anteil der Zement reduziert ist.

Abb. 4.1 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Vergleichsberechnung für die Herstellung einer Zwei-Phasen-Dichtwand von 1 km Länge, bei 100 cm Dicke und einer Tiefe von 100 m. Variiert wurde lediglich die Mischungszusammensetzung der Dichtwandbetone (Plastic Concrete PC 1 und PC 2) zur Erzielung einer unterschiedlichen Festigkeit. Wenn der Zementgehalt von 200 auf 100 kg/m<sup>3</sup>, also um 50 % reduziert werden kann, wird in Summe eine Reduzierung der Emission von CO<sub>2eq</sub> um rund 25 % erreicht. Die

Zielfestigkeit wird ebenfalls reduziert, rechnerisch von ca. 3 MPa auf ca. 1 MPa (FA. BAUER).

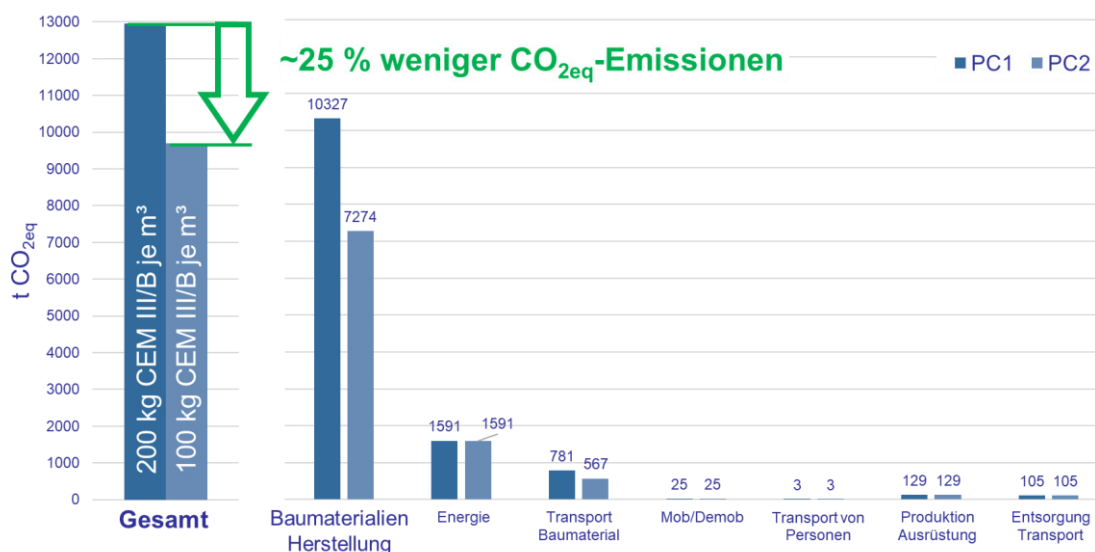


Abb. 4.1: Ergebnis einer Vergleichsberechnung der äquivalenten CO<sub>2</sub>-Emissionen für eine tiefe Dichtwand (Berechnung mit dem EFFC Carbon Calculator durch Fa. Bauer)

## Literatur

- DWA Merkblatt 512-1 (2012): *Dichtungselemente im Wasserbau*, Teil 1 Erdbauwerke, Hennef.
- DIN 18136:2003-11: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Einaxialer Druckversuch*.
- DIN 4093:2015-11: *Bemessung von verfestigten Bodenkörpern – Hergestellt mit Düsenstrahl-, Deep-Mixing- oder Injektions-Verfahren*.
- DIN 1054:2021-04: *Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1*.
- David Alós Shepherd, Engin Kotan, Frank Dehn, *Plastic concrete for cut-off walls: A review*, *Construction and Building Materials*, Volume 255, 2020, 119248, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119248>.
- Tynior, R., Meier, T. and von Wolffersdorff, P.-A. (2020), *Neuartiger Nachweis für die Gebrauchstauglichkeit von Asphalttinnendichtungen in Staudämmen*. *geotechnik*, 43: 224-236, <https://doi.org/10.1002/gete.202000012>.



# Biologische Methoden in der Geotechnik - Wegweiser oder Wunschdenken?

Dr.-Ing. Wolfgang Lieske, *Untere Bodenschutz-, Wasser- und Hafenbehörde, Stadt Herne*

Dr.-Ing. Wiebke Baille, *Ruhr-Universität Bochum*

Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Wichtmann, *Ruhr-Universität Bochum*

## Zusammenfassung

Dem Baugewerbe sind direkt und indirekt signifikante Treibhausgasemissionen zuzurechnen. Spätestens seit der Ratifizierung des Pariser Klimaschutzabkommens stellt sich daher die Frage, wie geotechnische Strukturen in Zukunft nachhaltiger errichtet werden können. Im vorliegenden Artikel wird die mikrobiell induzierte Kalzitausfällung als eine biologische und nachhaltige Methode zur Baugrundverbesserung diskutiert. Neben den grundlegenden Mechanismen und der technischen Implementierung werden auch Herausforderungen bei der Umsetzung erörtert.

## 1 Einleitung

Das Baugewerbe ist einer der Wirtschaftszweige mit dem größten Rohstoffverbrauch und den höchsten Treibhausgasemissionen. 20% der global verbrauchten Rohstoffe wie Steine, Kies und Sand, 25 % des Frischholzes und 16 % des Wasserverbrauchs können dem Bauwesen zugeordnet werden (DIXIT ET AL. 2010). Trotz großer Bestrebungen, durch Recycling Primärrohstoffe einzusparen, können Ersatzbaustoffe derzeit in Deutschland nur einen geringen Anteil des Bedarfs decken. Hinzu kommt der signifikante Energiebedarf (weltweit ca. 40 % der Gesamtenergie), der für die Produktion von Baustoffen anfällt (DIXIT ET AL. 2010). Bei der Bereitstellung von Energie, aber auch bei der Baustoffproduktion selbst werden darüber hinaus große Mengen von CO<sub>2</sub> freigesetzt. Im Jahr 2018 entstanden allein bei der Zementherstellung in Deutschland 20 Mio. t CO<sub>2</sub> bei der Kalzinierung von Kalkstein und durch das Verbrennen von Brennstoffen. Hinzu kommen 1.8 Mio. t CO<sub>2</sub> für die Erzeugung von Strom, der zur Herstellung von Zement benötigt wird (UMWELTBUNDESAMT 2020).

Aus der Ratifizierung des Pariser Klimavertrags, welcher die Begrenzung der globalen Erderwärmung auf unter 2°C forciert, resultieren für die Bundesrepublik Deutschland weitreichende Verpflichtungen zur Reduzierung von CO<sub>2</sub> Emissionen. Mit dem Klimaschutzgesetz hat die Bundesregierung das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 in der nationalen Gesetzgebung verankert. Bereits 2030 sollen die Emissionen auf

65 % des Niveaus von 1990 sinken. In der Vergangenheit lag der Fokus der Reduzierung von Emissionen im Bauwesen häufig auf dem Betrieb von Gebäuden, was insbesondere auf die hohe Anzahl von Bestandsgebäuden zurückzuführen ist. Zukünftig ist hier allerdings zu erwarten, dass auch die Erstellung von Bauwerken mehr in den Fokus rücken wird, da durch die hohe Energieeffizienz von Neubauten fast ausschließlich graue Emissionen auftreten, die durch die Konstruktion und Produktion von Baustoffen im Lebenszyklus eines Bauwerks entstehen.

In der Geotechnik sind bereits verschiedene Ansätze etabliert, um den hohen Anteil an grauen Emissionen und den Ressourcenverbrauch zu reduzieren. Dazu gehören z.B. :

- die Verwendung von Recyclingmaterialien (z.B. Betonbruch) oder von Materialien, die als Abfall bei der Produktion anfallen (z.B. Schlacken),
- die Substitution von Baumaterialien mit hohen grauen Emissionen durch solche, die mit geringeren Emissionen verbunden sind (z.B. Einsatz von Polymeren oder Geopolymeren als Bindemittel),
- die Wiederverwendung von Bestandsstrukturen in neuen Gebäuden,

um nur einige Möglichkeiten zu nennen (BASU ET AL. 2015).

Ein neuer Ansatz, der in den letzten Jahren in der internationalen Geotechnik viel Aufmerksamkeit erfahren hat, ist der Einsatz biologischer Methoden. Unter biologischen Methoden (auch als bio-inspirierte Methoden bezeichnet) versteht man den gezielten Einsatz (mikro-)biologischer Prozesse oder Stoffwechselprodukte und im weiteren Sinne auch den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen. Aber auch die Adaption natürlicher Strukturen beim Design geotechnischer Strukturen zählt zu den biologischen Methoden (MARTINEZ ET AL. 2022).

Eine bekannte und bereits seit langer Zeit auch in Deutschland bautechnisch etablierte biologische Methode ist die *enhanced natural attenuation*, die gezielte Stimulation von biologischen Abbaumechanismen in der Altlastensanierung. In den letzten Jahrzehnten gab es Entwicklungen, durch den Einsatz biologischer Methoden die hydro-mechanischen Eigenschaften von Böden zu verändern und dadurch konventionelle anorganische Bindemittel wie Zement zu ersetzen. Eine Methode aus dieser Kategorie ist die Biozementierung, bei der die Mechanismen der natürlichen Sandsteinbildung technisch adaptiert werden. Seit dem ersten bautechnischen Einsatz zum Verschließen von Gesteinsporen Mitte der 90er Jahre sind insbesondere in den letzten 20 Jahren über 1000 Fachartikel mit weitgehenden Meilensteinen erschienen, welche die Beherrschbarkeit der Methode, die erzielten bodenmechanischen Eigenschaften und auch die Anwendungen betreffen. Als Motivation der Forschung wurden häufig wirtschaftliche und technische Vorteile gegenüber konventionellen Bindemitteln genannt.

Im Folgenden wird die Biozementierung als ein Beispiel für eine biologische Methode vorgestellt. Neben dem grundsätzlichen Prinzip werden ihre bautechnische Implementierung, die potenziellen Anwendungen sowie Push- und Pull-Faktoren dieser Methode beleuchtet.

## 2 Mikrobiell induzierte Kalzit-Ausfällung

### 2.1 Theoretische Grundlagen der Biozementierung

Bei der Biozementierung, die auch als mikrobiell induzierte Kalzitausfällung (engl. *microbial induced calcite precipitation*, MICP) bezeichnet wird, wird durch den Stoffwechsel von Bakterien eine chemische Reaktion initiiert. Diese chemische Reaktion führt bei entsprechenden Randbedingungen durch eine Übersättigung mit Kalzit zum Ausfällen einer natürlichen Karbonatschicht im Porenraum.

Die chemischen Reaktionen, die der MICP zugrunde liegen, sind in den Gleichungen (1) und (2) dargestellt. Durch die bakterielle Verstoffwechselung von Harnstoff ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) und die anschließende Reaktion mit Kalziumchlorid ( $\text{CaCl}_2$ ) bildet sich eine natürliche zementierte Schicht aus dem Mineral Kalzit, welches chemisch gesehen Kalziumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) ist. Gleichung (1) stellt die Hydrolyse von Harnstoff dar, die zum Freisetzen von Ammonium und Carbonat führt. Die Spaltung erfolgt durch das Enzym Urease. Bei der Zufuhr von Kalzium entsteht Kalziumkarbonat (Gleichung (2)).



Abbildung 1(a) zeigt die Mikrostruktur von Karlsruher Feinsand mit ausgefälltem Kalzit. Dabei zeigt sich deutlich die Anlagerung von Kalzit an den Korn-zu-Korn Kontakten aber auch an der Oberfläche der Sandkörner. Abbildung 1(b) zeigt beispielhaft eine biozementierte Probe aus Karlsruher Feinsand.

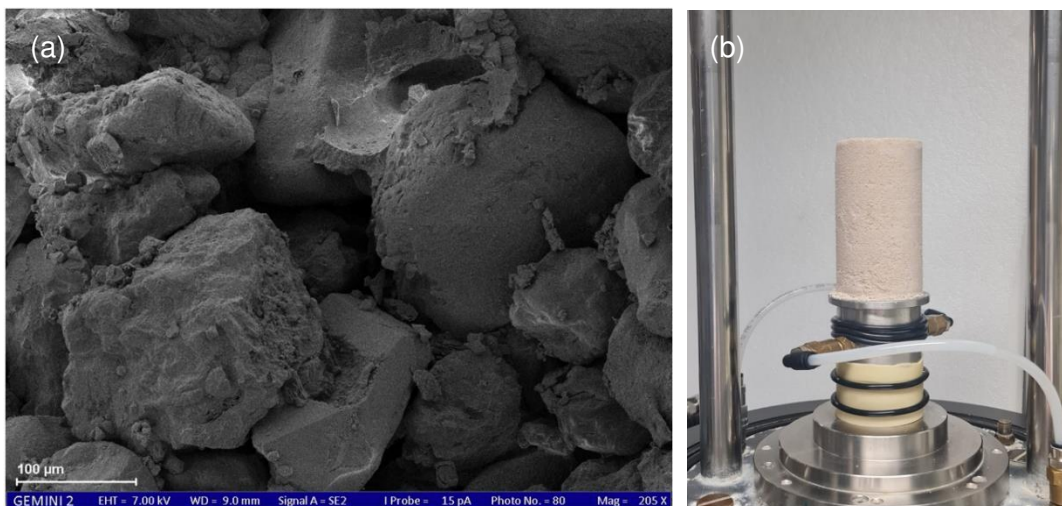


Abb. 2.1: Biozementierter Karlsruher Feinsand (a) Rasterelektronenmikroskopaufnahme der zementierten Sandkörner (Zeitouny et a. 2023) (b) Triaxialprobe

Das ausgefällte Kalzit wirkt sich auf verschiedene bodenmechanische Eigenschaften aus, wobei die Ausprägung unter anderem vom Anteil an  $\text{CaCO}_3$  und dessen Verteilung im Porenraum abhängt. Die Verteilung des  $\text{CaCO}_3$  wiederum ist eine Funktion verschiedener Parameter. Wie die in Abbildung 2 dargestellten Zusammenhänge zwischen der Durchlässigkeit sowie der einaxialen Druckfestigkeit (UCS) und dem  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt zeigen, ist deshalb nicht immer eine Korrelation zwischen  $\text{CaCO}_3$ , bodenmechanischen Kenngrößen und dem erzielten Effekt der Biozementierung möglich. Die signifikanten Unterschiede in dieser Abbildung können auf unterschiedliche Behandlungsprozeduren oder auch Ausgangsmaterialien zurückzuführen sein (ZEITOUNY ET AL. 2023).

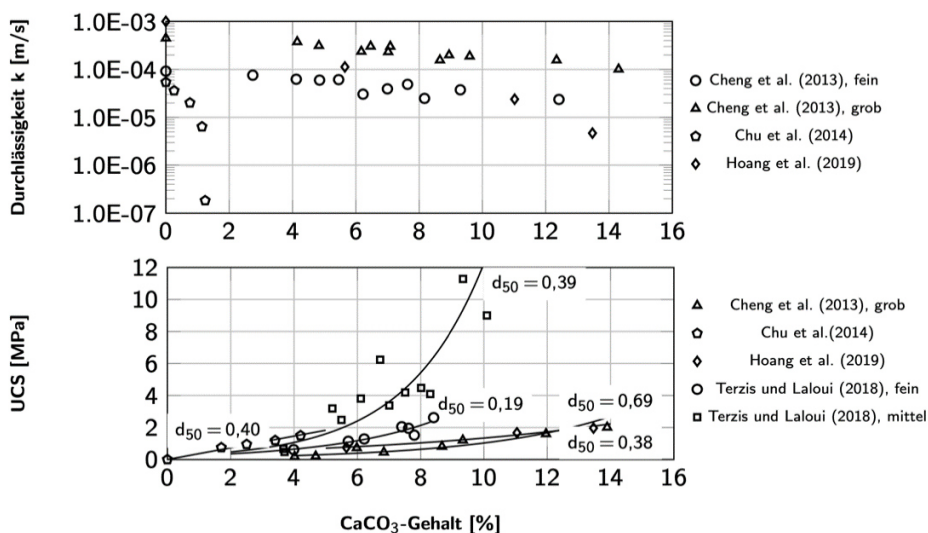


Abb. 2.2: Durchlässigkeit und einaxiale Druckfestigkeit (UCS) als Funktion des  $\text{CaCO}_3$ -Gehalts (Hengelbrock 2021)

Durch das Ausfällen des Kalzits verringert sich der Porenanteil und es kommt zu einer Erhöhung der Rauigkeit von Fließwegen, was zu einer Abnahme der Durchlässigkeit in Poren- und Kluftwasserleitern führt (WU ET AL. 2019; WHIFFIN ET AL. 2007, HATAF & BAHARIFARD 2020). Von WHIFFIN ET AL. (2007) wurde eine Reduktion der Durchlässigkeit eines mit MICP behandelten Sandes von 25 – 75 % im Vergleich zum unbehandelten Ausgangsmaterial gemessen, während in CHU ET AL. (2014) eine Abnahme um mehrere Zehner-Potenzen beobachtet wurde (siehe Abb. 2.1).

Wie den UCS-Werten in Abb. 2.2 zu entnehmen ist, führt die MICP dazu, dass aus dem behandelten Lockergestein ein zementiertes Gestein wird. Dies führt zu einer Erhöhung sowohl der Steifigkeit als auch der Scherfestigkeit (ZEITOUNY ET AL. 2023). Mikromechanisch ist dies neben der Zementierung der Kornkontakte auch darauf zurückzuführen, dass das ausgefällte Kalzit zu einer Erhöhung der globalen Dichte führt (Verdichtung). Dies ist in Abb. 2.3 durch die Verschiebung des Ausgangszustands vor Scherung vom Punkt UB (oberhalb der kritischen Gerade im Porenzahl-Druckbereich, sog. CSL) zu den Punkten BB und BB\* (unterhalb der CSL) illustriert. Die jeweiligen mikromechanischen Effekte sind in Abb. 2.3 (a) schematisch für locker gelagerten Sand im unbehandelten Zustand (Punkt UB) sowie die behandelten Zustände BB (verdichtet, zementiert) und BB\* (verdichtet, zerstörte Zementierung) dargestellt.

Bei undrainierter triaxialer Kompression zeigt die Probe des unbehandelten Sandes (UB) im vollgesättigten Zustand infolge des Anfangszustandes oberhalb der CSL ein kontraktantes Verhalten, das zu einem Anstieg des Porenwasserdrucks und damit zu einer Abnahme der effektiven Spannungen führt. Aufgrund der Verringerung der mittleren Spannung tritt das Versagen des Sandes bei einer vergleichsweise geringen mobilisierten Scherfestigkeit ein (vgl. Abb. 2.3 (c)). Infolge der höheren Dichte (was einer kleineren Porenzahl  $e$  entspricht), liegen die Ausgangszustände von BB und BB\* unterhalb der CSL. Bei Kompression ist dann ein weniger kontraktantes bzw. ein dilatantes Verhalten (vgl. Abb. 2.3 (b), (c)) zu beobachten. Darüber hinaus ermöglicht eine Zementierung das Erreichen höherer mobilisierter Schubspannungen, bevor es zum Versagen der Probe kommt. Durch die erhöhte Oberflächenrauigkeit der zementierten Sandkörner verändert sich auch der Reibungswinkel des Materials und es kommt sowohl zu einer Verschiebung der Critical state line (CSL\*, Abb. 2.3 (b)) im Porenzahl-Druck-Diagramm als auch zu einer Vergrößerung der Neigung  $M^*$  der kritischen Gerade im  $q$ - $p$ -Spannungsraum (vgl. Abb. 2.3 (c)). Daher zeigen auch Böden, deren kohäsive Zementierungskontakte zerstört wurden (Probe BB\*), im Vergleich zu unzementierten Proben deutlich verbesserte mechanische Eigenschaften (DEJONG ET AL. 2010, FU ET AL. 2023).

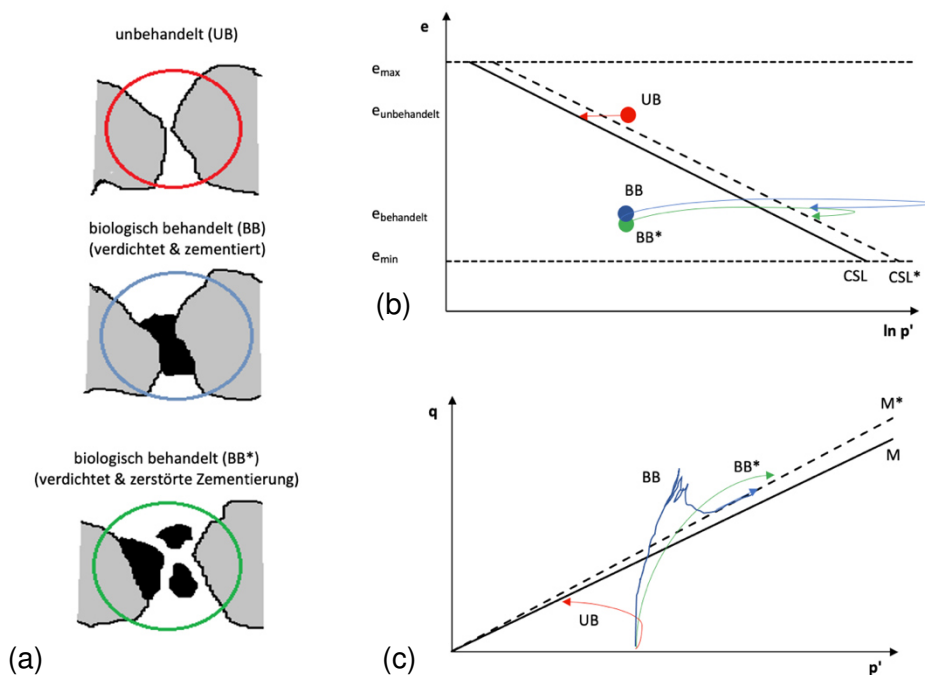


Abb. 2.3: Einfluss der Biozementierung auf das undrainierte Scherverhalten einer locker gelagerten Sandprobe (modifiziert nach DeJong et al. 2010)

## 2.2 Technische Adaptierung der MICP

Die MICP-basierte Bodenverfestigung beruht auf biochemischen Prozessen, bei denen durch Bakterien und chemische Zusätze  $\text{CaCO}_3$  entsteht. Zur technischen Adaptierung der MICP müssen Bakterien, Nährstoffe und entsprechende chemische Reagenzien (meist auch als Zementierungslösung bezeichnet) in den Boden eingebracht werden. Dabei haben die Qualität der Ausgangsmaterialien, die Art der Einbringung, die zeitliche Abfolge der Behandlung sowie die Anzahl der Behandlungszyklen einen bestimmenden Einfluss auf die bodenmechanischen Eigenschaften des behandelten Bodens.

Es existiert eine Vielzahl verschiedener Bakterien, die das für die Hydrolyse von Harnstoff relevante Enzym Urease bilden können. Dazu gehören *Sulfitobacter pasteurii*, *Oceanobacillus pasteurii*, *Bacillus pasteurii*, *Halomonas pasteurii* und *Sporosarcina pasteurii*, um nur einige zu nennen (RAHMAN ET AL. 2020). Solche Urease bildende Bakterien sind in Böden omnipräsent. Die Biozementierung kann daher auch ohne eine externe Zugabe von Bakterien durch Stimulation nativer Bakterienstämme erfolgen, allerdings mit eher moderat ausgeprägten Effekten. Diese Methode wird als Biostimulation bezeichnet.

Auf Grund seiner guten Eignung für die MICP wird für diese Methode häufig der Bakterienstamm *Sporosarcina pasteurii* verwendet (RAHMAN ET AL. 2020). Dieser kann z.B. über das Leibniz-Institut (Deutsche Sammlung von Mikroorganismen- und Zellkulturen DSMZ) im gefriergetrockneten Zustand erworben werden. Für die MICP

müssen die Bakterien zunächst in einem Nährmedium kultiviert und in einen lebensfähigen Zustand überführt werden (ZEITOUNY ET AL. 2023).

Für eine erfolgreiche MICP ist es wichtig, dass die verwendeten Bakterien in ausreichender Anzahl und in einem leistungsfähigen Zustand in den Boden eingebracht werden. Abb. 2.4 zeigt den typischen Verlauf des Bakterienwachstums über die Zeit. Die optische Dichte korreliert mit der Anzahl der Bakterien in einem Kulturmedium, wobei nur die Anzahl der Bakterien und nicht die Art der Bakterien erfasst wird. Werden Bakterien in ein frisches Nährmedium injiziert, richten sie ihren Stoffwechsel in der Latenzphase (auch lag-Phase genannt) zunächst auf die vorhandenen Nährstoffe aus, weshalb nur wenig Zellwachstum stattfindet. In der anschließenden Phase exponentiellen Wachstums (auch log-Phase genannt) sind die Bakterien auf die vorhandenen Randbedingungen eingestellt, was zu einem sehr starken Zellwachstum und optimalen Stoffwechsel führt. Limitierende Faktoren wie begrenzt verfügbare Nährstoffe oder eine zu hohe Populationsdichte führen dazu, dass die stationäre-Phase erreicht wird, gefolgt von der Absterbe-Phase. Für die MICP sollten die Bakterien in der exponentiellen Phase sein.

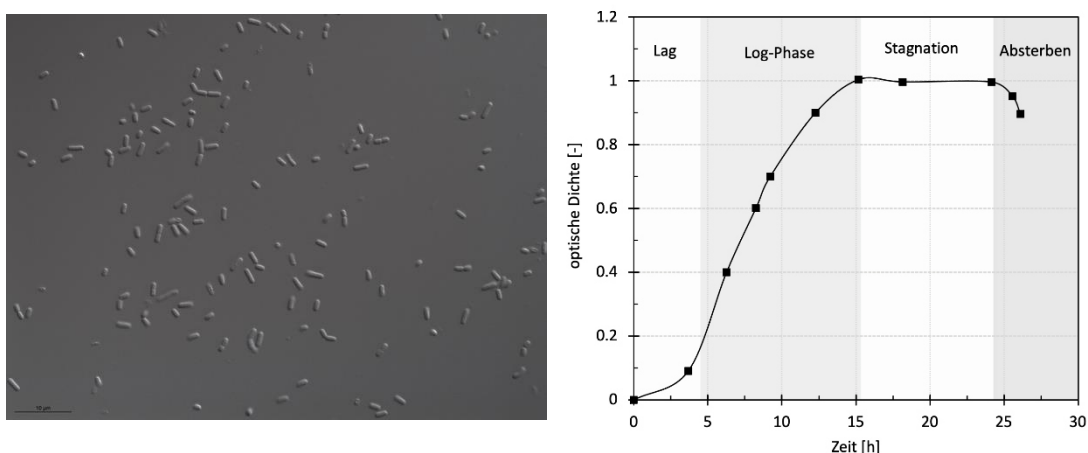


Abb. 2.4: (a) Mikroskopaufnahme von *Sporosarcina pasteurii* (b) Wachstumskurve von *Sporosarcina pasteurii* gemessen als optische Dichte

Durch den Umgang mit natürlichen Bodenproben finden sich in geotechnischen Laboren wie auch auf Baustellen zahlreiche Bakterien. Da diese in der Regel nicht pathogen sind und ihr Einfluss auf die bodenmechanischen Eigenschaften meist relativ gering ist, spielen sie im Allgemeinen eine untergeordnete Rolle in der Geotechnik. Im Rahmen der MICP müssen solche Bakterien allerdings berücksichtigt werden, da diese in direkter Konkurrenz zu den Urease bildenden Bakterien stehen. Wenn Urease-bildende Bakterien unter unsterilen Bedingungen vermehrt werden, kann es zu einer ungewollten Vermehrung von anderen Bakterienstämmen kommen, was die Anzahl der Urease bildenden Bakterien reduziert und entsprechend das Potenzial der verwendeten Bakterienlösung zur MICP verringert. Deshalb muss die anfängliche Kultivierung der

Bakterien unter sterilen Bedingungen stattfinden und bei der weiteren Vermehrung in bautechnisch relevante Mengen das Wachstum ungewollter Bakterien begrenzt werden. Für baupraktische Anwendungen kann dafür eine unsterile Nährlösung mit einer unter sterilen Bedingungen hergestellten Bakterienlösung geimpft werden. Damit wird forciert, dass die endgültige Konzentration der Urease bildenden Bakterien deutlich höher als die Konzentration der systemeigenen Bakterien ist.

Als Nährlösungen empfiehlt die DSMZ ein Gemisch aus Harnstoff, Natriumchlorid, Pepton und Sojamehl. Diese Materialien können als Rohstoff erworben werden, was die MICP auf Grund des teilweise hohen Preises der Ausgangsmaterialien unwirtschaftlich macht. Für großmaßstäbliche Anwendungen wird daher häufig auf alternative Nährmedien zurückgegriffen, welche lokal und teilweise als Rest-/Abfallprodukte verfügbar sind.

Die Bakterien können durch Injektion, Versickern oder Vormischen in den Boden eingebracht werden. Dabei hat die Art des Einbringens neben bautechnischen Restriktionen auch direkten Einfluss auf die Homogenität des  $\text{CaCO}_3$  im Boden. Die Anlagerung in der Nähe von Injektionsstellen führt bei injizierten Bakterien meist zu einer weniger homogenen  $\text{CaCO}_3$  Verteilung als bei gleichmäßigem Einmischen (WU ET AL. 2019, ZEITOUNY ET AL. 2023). Das Einbringen der Bakterien und der Zementierungslösung stellt dabei auch eine Anwendungsgrenze der MICP dar. Wenn aufgrund der Porenstruktur kein gleichmäßiges Einbringen möglich ist, oder die Poren zu klein sind, ist eine effektive Umsetzung der MICP nicht möglich.

Vor einer Injektion von Zementierungslösung ist zunächst eine mehrstündige Ruhezeit einzuhalten, in der sich die Bakterien an die Bodenmatrix binden. Die Zementierungslösung liefert den Bakterien Nährstoffe und eine Kalziumquelle, um die Biozementierung zu induzieren. Sie enthält daher die für die MICP relevanten Ausgangsstoffe Harnstoff und Kalziumchlorid. Darüber hinaus enthält sie auch einen Anteil von Nährstoffen, die ein weiteres Bakterienwachstum ermöglichen. Die genaue Zusammensetzung der Zementierungslösung ist dabei sehr unterschiedlich. Die frische Zementierungslösung wird sequenziell in den mit Bakterien beaufschlagten Boden injiziert. Die Dauer der Bodenbehandlung beträgt typischerweise 7 bis 14 Tage, entsprechend dem angestrebten  $\text{CaCO}_3$ -Gehalt. Dieser Zeitraum ist jedoch eher ein Richtwert, und auch längere oder kürzere Behandlungszeiten sind möglich.

## **2.3 Anwendungen**

Die MICP wurde bereits bei einer Vielzahl von geotechnischen Anwendungen eingesetzt, zum Beispiel zur Erhöhung der Druck- und der Spaltzugfestigkeit (AHENKORAH ET AL., 2020), zur Erhöhung des Verflüssigungswiderstandes (SHARMA ET AL. 2022), zur Verringerung der Durchlässigkeit (WHIFFIN ET AL. 2007, WU ET AL. 2019, HATAF & BAHARIFARD 2020) und zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von Böden



(VENULEO ET AL., 2016). LIU ET AL. (2024) konnten durch eine MICP-Behandlung eine austrocknungsinduzierte Rissbildung begrenzen. Darüber hinaus wurde die MICP zur Demobilisierung von Schadstoffen eingesetzt (WILCOX ET AL 2024).

Die MICP wird auch zur Stabilisierung geotechnischer Strukturen angewendet. Dazu gehören die Stabilisierung von Hängen (KOU ET AL., 2021), TUNNELWÄNDEN (PENG & ZHOU, 2021), Dämmen und Offshore-Strukturen (CHENG ET AL., 2014). MICP wurde in anderen Anwendungen gewählt, um gerissenen Beton zu heilen (KALHORI & BAGHERPOUR, 2017), Beschichtungen vor Wetterschäden zu schützen (LIU ET AL., 2020) und Oberflächen zu revitalisieren (LIAN ET AL., 2019). Darüber hinaus wurde MICP zur Herstellung alternativer Baumaterialien eingesetzt, z. B. für die Produktion von Bio-Ziegeln.

Diese Auswahl erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll vielmehr die Vielfalt möglicher Anwendungsbereiche jenseits der Baugrundverbesserung verdeutlichen. Eine umfangreichere Übersicht ist unter anderem in WANG ET AL. (2023) zu finden.

### **3 Push- und Pull-Faktoren**

Im Nachhaltigkeitscontrolling werden Push- und Pull-Faktoren betrachtet, um die Vorteile (Pull-Faktoren) oder Nachteile (Push-Faktoren) nachhaltiger Alternativen zu konventionellen Produkten oder Vorgehensweisen zu vergleichen und zu analysieren. Viele politische Maßnahmen zielen darauf ab, die Bilanz von Push- und Pull-Faktoren gezielt zu Gunsten der Nachhaltigkeit zu verschieben. Dies kann auf der Seite der Push-Faktoren durch Verteuerung (z.B. CO<sub>2</sub>-Bepreisung) und gezielte gesetzliche Veränderungen erfolgen und auf der Pull-Seite durch Förderungen. Was die Verwendung von Zement betrifft, so kann insbesondere der Preisanstieg einen starken Anreiz für die Suche nach Alternativen darstellen. Gleichzeitig kann die Einführung neuer Technologien wie der MICP einen erheblichen technologischen Vorteil bieten.

Bei der MICP zählen mangelnde Erfahrung bei der zunächst relativ komplexen bautechnischen Implementierung und daraus resultierende Investitionen als Push-Faktor. Dazu gehört neben der Technik zur Vermehrung der Bakterien in Bioreaktoren auch die Identifikation geeigneter Nährlösungen, die lokal verfügbar sind und eine Herstellung großer Mengen von Bakterien wirtschaftlich zulassen. Der interdisziplinäre Charakter der Methode kann ebenfalls ein starker Push-Faktor sein. Während die Verwendung von Zement Teil der traditionellen Ausbildung eines Bauingenieurs ist und auf eine lange Tradition zurückblicken kann, erfordert die Verwendung von Bakterien eine zusätzliche Qualifikation.

Ein weiterer Push-Faktor sind rechtliche Rahmenbedingungen. Das Einbringen der Bakterien und Nähr- bzw. Zementierungslösungen in Böden ist genehmigungsbedürftig,

wenn nicht ausgeschlossen werden kann, dass ein Teil davon mit Grundwasser in Kontakt kommt und Einfluss auf die Qualität des Grundwassers nimmt (WASSERHAUSHALTSGESETZ § 48). Daher ist eine MICP mit den lokalen Wasserbehörden bzw. mit der Bergbehörde bei unter Bergaufsicht stehenden Flächen wie ehemaligen Tagebauen abzustimmen. Auf Grund fehlender Präzedenzfälle ist zunächst mit einem erhöhten Aufwand und Abstimmungsbedarf zu rechnen.

Als Pull-Faktor können zunächst technologische Vorteile genannt werden, die sich aus der Methode ergeben. Die MICP kann für eine Vielzahl von geotechnischen Maßnahmen eingesetzt werden und ermöglicht darüber hinaus neue Konstruktionsverfahren. Dazu gehört z.B. die großräumige Stabilisierung von verflüssigungsgefährdeten Böden. Durch die Zementierung von Recyclingmaterial können potenziell Schadstoffe gebunden werden. Dies kann mit Blick auf eine Sickerwasserprognose den Einsatz von bisher nur begrenzt einbaufähigen Materialien erweitern. Neue Studien zeigen darüber hinaus, dass die MICP zur CO<sub>2</sub>-Speicherung verwendet werden kann (SARACHO & MAREK 2024). Die Schaffung einer geotechnischen CO<sub>2</sub>-Senke ist für die Erstellung von CO<sub>2</sub>-neutralen Gebäuden von höchster Relevanz, vor allem da auch in Zukunft bei einigen Bauteilen wie z.B. Fundamenten der Einsatz von Zement alternativlos ist.

Ein weiterer Pull-Faktor sind wirtschaftliche Vorteile. Der Einsatz der MICP gilt als günstiger im Vergleich zu z. B. zementbasierten Bindemitteln. Darüber hinaus ergeben sich aus den zuvor genannten Anwendungen weitere Möglichkeiten, wirtschaftliche Vorteile zu generieren. Dies könnte in Zukunft z. B. die Schaffung von künstlichen CO<sub>2</sub>-Senken sein.

Bei der MICP handelt es sich um einen natürlichen Prozess, der technisch adaptiert wird. Insbesondere mit Blick auf den Bodenschutz ist die MICP deshalb als weniger kritisch zu betrachten als das Einbringen anderer anorganischer Bindemittel, insbesondere wenn durch das Einbringen das Bodengefüge nachhaltig verändert wird.

Der Vergleich von Push- und Pull-Faktoren zeigt, dass vor allem mangelnde Erfahrung und die relativ aufwendige Implementierung der MICP-Methode Push-Faktoren sind. Dies kann auch darin begründet sein, dass biologische Methoden, insbesondere die MICP, in der deutschen geotechnischen Forschung bisher nur wenig Beachtung fanden. Im Gegensatz dazu hat die MICP in der internationalen Forschung große Aufmerksamkeit erfahren und zahlreiche Labor- und Feldstudien belegen das Potenzial und auch die Beherrschbarkeit der Methode. Daher wird die Methode bereits in verschiedenen Ländern als technische Lösung angeboten, unter anderem in den Niederlanden, der Schweiz und den USA. Die MICP-Methode ist ein vielseitiges und nachhaltiges geotechnisches Verfahren auf dem Weg in die Ingenieurpraxis.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Artikel befasst sich mit der mikrobiell induzierten Kalzitausfällung (MICP) als biologische Methode, bei der Bakterien in geotechnischen Anwendungen zum Einsatz kommen. Grundlage der MICP ist die Hydrolyse von Harnstoff durch das Enzym Urease im Rahmen des bakteriellen Stoffwechsels und eine anschließende Reaktion von Karbonationen aus diesem Prozess mit Calciumchlorid. Durch Ausfällen von Kalzit an den Korn-zu-Korn-Kontakten und im weiteren Porenraum können gezielt die hydro-mechanischen Eigenschaften behandelter Böden verändert werden. Für die praktische Anwendung müssen Bakterien in ausreichend großer Menge vermehrt werden und sequentiell mit Zementierungslösung in den Boden eingebracht werden. Aufgrund der großen Anzahl von Variablen, die sich daraus ergeben, ist die bautechnische Implementierung zunächst relativ komplex. Wie eine Vielzahl von Studien belegt, ist die Methode jedoch sowohl im Labor als auch im Feld beherrschbar.

Auf der Suche nach nachhaltigen Alternativen zu den bestehenden Methoden zur Veränderung der Bodeneigenschaften ist die MICP vielversprechend, was die Anwendungsmöglichkeiten und den fortgeschrittenen Stand der Forschung angeht. Während der Einsatz von Bakterien in der Geotechnik zunächst wie Wunschdenken klingt, ist die MICP vielerorts bereits auf dem Weg in die Baupraxis. Gegenwärtige Limitierungen der Methode wurden und werden in der Forschung intensiv behandelt. Darüber hinaus erweitern Abwandlungen der MICP sogar die möglichen Anwendungen. Dazu gehören die Biostimulation, bei der native Bakterien im Boden stimuliert werden, oder die EICP (enzym induced calcite precipitation), bei der extrahierte Urease anstelle von Urease produzierenden Bakterien eingesetzt wird. Letzteres kann auch für die Modifizierung von feinkörnigen Böden verwendet werden - eine Anwendung, bei der die Nutzung der MICP aufgrund von Größenbeschränkungen begrenzt ist.

## Literatur

- Ahenkorah, I., Rahman, M. M., Karim, M. R., & Teasdale, P. R. (2020). A comparison of mechanical responses for microbial-and enzyme-induced cemented sand. *Géotechnique Letters*, 10(4), 559-567.
- Basu, D., Misra, A., & Puppala, A. J. (2015). Sustainability and geotechnical engineering: perspectives and review. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(1), 96-113.
- Cheng, L., Shahin, M. A., & Cord-Ruwisch, R. (2014). Bio-cementation of sandy soil using microbially induced carbonate precipitation for marine environments. *Géotechnique*, 64(12), 1010-1013.
- DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), 197-210.

- Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S., & Culp, C. H. (2010). Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and buildings*, 42(8), 1238-1247.
- Fu, T., Saracho, A. C., & Haigh, S. K. (2023). Microbially induced carbonate precipitation (MICP) for soil strengthening: a comprehensive review. *Biogeotechnics*, 100002.
- Hataf, N., & Baharifard, A. (2020). Reducing soil permeability using microbial induced carbonate precipitation (MICP) method: A case study of shiraz landfill soil. *Geomicrobiology Journal*, 37(2), 147-158.
- Hengelbrock, A. (2021). Untersuchung des Einflusses von Biozementierung und Biopolymeren auf die Standsicherheit von Tagebauseeböschungen bei komplexen Randbedingungen, *Masterarbeit*, Ruhr-Universität Bochum.
- Kalhari, H., & Bagherpour, R. (2017). Application of carbonate precipitating bacteria for improving properties and repairing cracks of shotcrete. *Construction and Building Materials*, 148, 249-260.
- Kou, H., Wu, C., Jang, B.-A., & Wang, D. (2021). Spatial Distribution of CaCO<sub>3</sub> in Biocemented Sandy Slope Using Surface Percolation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(6), 6021004.
- Liu, B., Tang, C. S., Pan, X. H., Xu, J. J., & Zhang, X. Y. (2024). Suppressing Drought-Induced Soil Desiccation Cracking Using MICP: Field Demonstration and Insights. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 150(3), 04024006.
- Lian, J., Xu, H., He, X., Yan, Y., Fu, D., Yan, S., & Qi, H. (2019). Biogrouting of hydraulic fill fine sands for reclamation projects. *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(2), 212–222.
- Liu, S., Wang, R., Yu, J., Peng, X., Cai, Y., & Tu, B. (2020). Effectiveness of the anti-erosion of an MICP coating on the surfaces of ancient clay roof tiles. *Construction and Building Materials*, 243, 118202.
- Martinez, A., DeJong, J., Akin, I., Aleali, A., Arson, C., Atkinson, J., ... & Zheng, J. (2022). Bio-inspired geotechnical engineering: Principles, current work, opportunities and challenges. *Géotechnique*, 72(8), 687-705.
- Mitchell, J. K., & Santamarina, J. C. (2005). Biological considerations in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(10), 1222-1233.
- Rahman M. M., Hora R. N., Ahenkorah I., Beecham S., Karim M. R., & Iqbal A. (2020). State-of-the-Art Review of Microbial-Induced Calcite Precipitation and Its Sustainability in Engineering Applications. *Sustainability*. 12(15):6281.
- Saracho, C. A., & Marek, E. J. (2024). Uncovering the Dynamics of Urease and Carbonic Anhydrase Genes in Ureolysis, Carbon Dioxide Hydration, and Calcium Carbonate Precipitation.
- Sharma, M., Satyam, N., & Reddy, K. R. (2022). Large-scale spatial characterization and liquefaction resistance of sand by hybrid bacteria induced biocementation. *Engineering Geology*, 302, 106635.
- Umweltbundesamt (2020). Dekarbonisierung der Zementindustrie [Aufgerufen am 05.01.2024]

- Venuleo, S., Laloui, L., Terzis, D., Hueckel, T., & Hassan, M. (2016). Microbially induced calcite precipitation effect on soil thermal conductivity. *Géotechnique Letters*, 6(1), 39-44.
- Wang, Y., Konstantinou, C., Tang, S., & Chen, H. (2023). Applications of microbial-induced carbonate precipitation: A state-of-the-art review. *Biogeotechnics*, 100008.
- Wasserhaushaltsgesetz – (Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts). Fassung vom 22.12.2023.
- Whiffin, Victoria S., Leon A. Van Paassen, & Marien P. Harkes (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiology Journal* 24.5: 417-423.
- Wilcox S.M., Mulligan C.N., & Neculita C.M. (2024). Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation as a Bioremediation Technique for Mining Waste. *Toxics*. 12(2):107..
- Wu, C., Chu, J., Wu, S., Cheng, L., & van Paassen, L. A. (2019). Microbially induced calcite precipitation along a circular flow channel under a constant flow condition. *Acta Geotechnica*, 14, 673-683.
- Zeitouny, J., Lieske, W., Alimardani Lavasan, A., Heinz, E., Wichern, M., & Wichtmann, T. (2023). Impact of New Combined Treatment Method on the Mechanical Properties and Microstructure of MICP-Improved Sand. *Geotechnics*. 3(3):661-685.



# **Ressourcenschonendes Bauen – geogitterbewehrte Erdkörper als Ergänzung und Alternative zum klassischen Ingenieurbau**

Dr.-Ing. Oliver Detert, *HUESKER Synthetic GmbH*

Dipl.-Ing. Hartmut Hangen, *HUESKER Synthetic GmbH*

## **Zusammenfassung**

Im vorliegenden Beitrag werden anhand der konkreten Anwendung „Stützbauwerke“ aus dem Bereich des klassischen Ingenieurbaus Möglichkeiten aufgezeigt, wie mit Hilfe von Geogittern als Bewehrung für Böden in vielen Bereichen der Einsatz von Zement als Bindemittel oder auch Beton als Baustoff reduziert oder sogar gänzlich vermieden werden kann. Es werden Anwendungen erläutert, bei denen ein kombinierter Einsatz von Beton- und geogitterbewehrter Stützbauwerke erfolgt. Entweder in Form einer Erdruckabschirmung auf die Betonwand oder Baumaßnahmen, bei denen Geogitter als Bewehrung von mit hydraulischen Bindemitteln stabilisierten Böden verwendet werden. Ebenso ist es in vielen Fällen möglich Betonstützwände gänzlich durch geogitterbewehrte Stützbauwerke zu ersetzen. Anhand von Laborversuchen, Feldmessungen und Fallstudien werden unterschiedliche Anwendungen erläutern.

## **1 Einleitung**

Unter Ingenieurbauwerken versteht die DIN 1076 Brücken, Tunnel, Trogbauwerke, Stützbauwerke mit einer sichtbaren Höhe von mindestens 1,5 Metern, Lärmschutzwände mit einer sichtbaren Höhe von mindestens 2 Metern und Bauwerke, für die ein statischer Nachweis der Standsicherheit erforderlich ist, wie Regenrückhaltebecken und Schachtbauwerke. Die Verwendung von Geokunststoffen stellt bei vielen dieser Bauwerke eine sinnvolle Ergänzung dar, im Rahmen des vorliegenden Beitrags soll jedoch der Fokus auf die Anwendung im Bereich der Stützbauwerke liegen.

### **1.1 Einsatz und Arten von Stützbauwerken**

Zur Sicherung von instabilen Hängen, Einschnittböschungen, Geländesprüngen oder lokal begrenzter Geländeerhöhungen, bei denen die Ausbildung einer standsicheren Böschung nicht möglich ist, kommen Stützbauwerke zum Einsatz. Die Aufgabe von Stützbauwerken ist es, den dahinter liegenden Fels oder Erdkörper zu stützen und somit die Standsicherheit zu gewährleisten.

Es gibt diverse Arten von Stützbauwerken, die diese Aufgabe übernehmen können. Eine Untergliederung kann wie folgt vorgenommen werden:

- Gewichtsstützwände, auch Stützmauern genannt, bei denen das Gewicht der Stützwand selbst eine wesentliche Rolle beim Lastabtrag spielt. Sie werden auch als flach gegründete Stützbauwerke bezeichnet.
- in den Boden einbindende Stützwände, sogenannte tief gegründete Stützbauwerke, bei denen es sich um recht schlanke Bauwerke handelt und die Lasten im Wesentlichen über die Biegesteifigkeit der Wand und ggf. Verankerungen, Steifen sowie dem Erdwiderstand abgetragen werden.
- Zusammengesetzte Stützkonstruktionen

Die Wahl der geeigneten Stützwandart hängt wie immer von den Randbedingungen ab, wie zum Beispiel dem Bauablauf. Wenn der zu stützende Erdkörper durch einen Bodenabtrag entsteht, muss die Stützung entweder schrittweise mit dem Freilegen der Böschung von oben nach unten laufen oder die Stützelemente werden bereits vor dem Abtrag in den Boden eingebracht. Soll eine Geländeerhöhung erfolgen, so kann die Stützwand zuerst aufgebaut und hinterfüllt werden oder schrittweise mit fortschreitendem Aufbau errichtet werden.

Neben dem Bauablauf kommen weitere Faktoren wie Belastungsart und -größe, geplante Lebensdauer, Höhe der Stützwand, ökonomische sowie ökologische Aspekte usw. bei der Auswahl der Stützwandart zum Tragen.

Im Folgenden wird der Fokus auf die Verwendung von Stützbauwerken aus Beton und geogitterbewehrte Erde im Zuge von Geländeerhöhungen gelegt.

## **2 Beton- und geogitterbewehrte Erdstützwände**

Im folgenden Abschnitt wird kurz auf die Beton- und geogitterbewehrte Erdstützwänden eingegangen.

### **2.1 Betonstützwände**

Betonstützwände finden eine breite Anwendung im Baugewerbe. Wohl am häufigsten werden die sogenannten Schwergewichtsmauern und Winkelstützwände eingesetzt.

Die Schwergewichtsmauer stützt den anstehenden Boden, wie der Name schon sagt, über das Eigengewicht. Die Einwirkungen aus dem Boden werden in der Sohle der Schwergewichtsmauer über Reibung an den Untergrund übergeben. Wenn die Schwergewichtsmauer in den Untergrund einbindet, so kann in diesem Bereich vor der Mauer ein Erdwiderstand stützend wirken.

Bei den Winkelstützwänden wirkt der zu stützende Boden sowohl als Einwirkung auf den vertikalen Teil der Stützwand als auch durch sein Eigengewicht auf dem horizontalen



Fundamentsporn der Stützwand als Erhöhung der Vertikallast der Stützwand. Dies verhindert ein Kippen und Verschieben der Stützwand.

Schwergewichtsmauern und Winkelstützwände geringer Höhe werden häufig als Fertigbauteil angeliefert und können schnell an Ort und Stelle verbaut werden. Bei größeren Höhen erfolgt zunächst der Aufbau einer Schalung und das Verlegen der notwendigen Stahlbewehrung bevor dann der Ort beton eingefüllt und verdichtet wird. Nachdem der Beton ausreichend erhärtet ist, wird die Schalung entfernt und die Hinterfüllung der Winkelstützwand mit Boden kann erfolgen.

## **2.2 Geogitterbewehrte Erdstützwände**

Mit zunehmender Akzeptanz finden Stützwände aus geogitterbewehrter Erde Anwendung. Hierbei wird häufig mit lokal verfügbarem Boden und Geogittern als Bewehrung die Stützwand errichtet. Neigung von bis zu 90° und Höhen über 20 m können problemlos hergestellt werden. Die Geogitter werden bevorzugt mit einem Abstand von 40 cm bis 60 cm lagenweise beim Aufbau der Wand eingelegt (vgl. Abb. 2.1). Hierdurch wird eine gute Verbundwirkung zwischen Erdkörper und Bewehrungsgittern sichergestellt. Über Reibung und Verzahnung nehmen die Bewehrungsgitter Defizitkräfte im sogenannten aktiven oder übersteilen vorderen Wandbereich aus dem Bodenkörper auf und leiten sie in den standsicheren, hinteren Bereich der Stützwand ebenfalls über Reibung und Verzahnung wieder in den Boden ab. Der Bauablauf wird von der Art der gewählten Außenhautgestaltung bestimmt. In Abb. 2.1 sind gängige Ausführungsvarianten dargestellt.



*Abb. 2.1: Ausführungsvarianten der Frontgestaltung von geogitterbewehrten Stützwänden*

Sie reichen von einer Begrünung der Böschung, welche bis ca. 70° realisierbar ist, über Blocksteine und Gabionenkörbe bis hin zu klein- oder großformatigen Betonpaneelen. Je nach Frontgestaltung kann auch mit temporären oder verlorenen Schalungselementen gearbeitet werden.

### 3 Hydraulische Bindemittel und Geogittern in Kombination

Die zunehmende Knappheit von Sand oder auch die Notwendigkeit lokal anstehende, ggf. minderwertige Böden zu verwenden, kann mithilfe der Kombination aus hydraulischen Bindemitteln und Geogittern als Bewehrung entgegengewirkt werden. Mittels Zement- oder Kalkstabilisierung lassen sich bindige Böden so weit in ihren mechanischen Eigenschaften verbessern, dass sie für den Bau geogitterbewehrten Stützbauwerken geeignet sind. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Bewehrungsprodukte bzw. viel mehr der Rohstoff der Bewehrungsprodukte in dem veränderten chemischen Milieu dauerhaft beständig sind.

#### 3.1 Äußere Hydrolyse von Polyester bei pH-Werten größer 9

Für Bewehrungsaufgaben werden vornehmlich Polyester oder Polyvinylalkohol als Rohstoff eingesetzt, da die Kraft-Dehnungskurve dieser Rohstoffe eine hohe Kompatibilität mit der Scherkraftmobilisierung von Böden aufweist und zudem sehr geringe Kriechneigungen (zeitlich abhängige Längenzunahme unter einer [konstanten] Last) besitzen. Durch den Einsatz von Zement und/oder Kalk steigt der pH-Wert im Boden an und kann dauerhaft im alkalischen Milieu über pH 9 verbleiben. Bei diesen hohen pH-Werte unterliegt Polyester der sogenannten äußeren Hydrolyse. Hydrolyse ist der Prozess der Spaltung einer chemischen Bindung durch Reaktion mit Wasser. Lagert Polyester längere Zeit in einer Lösung mit pH-Werten über 9 findet also ein Abbau der Substanz statt. MÜLLER-ROCHHOLZ UND BRONSTEIN (1994) haben zusätzlich den Einfluss einer Zugbeanspruchung während der Einlagerung in einer alkalischen Lösung auf dem Abbau- bzw. Schädigungsprozess betrachtet und eine signifikante Geschwindigkeitszunahme des Abbauprozesses bzw. Reduzierung der Zugfestigkeit festgestellt (vgl. Abb. 3.1).

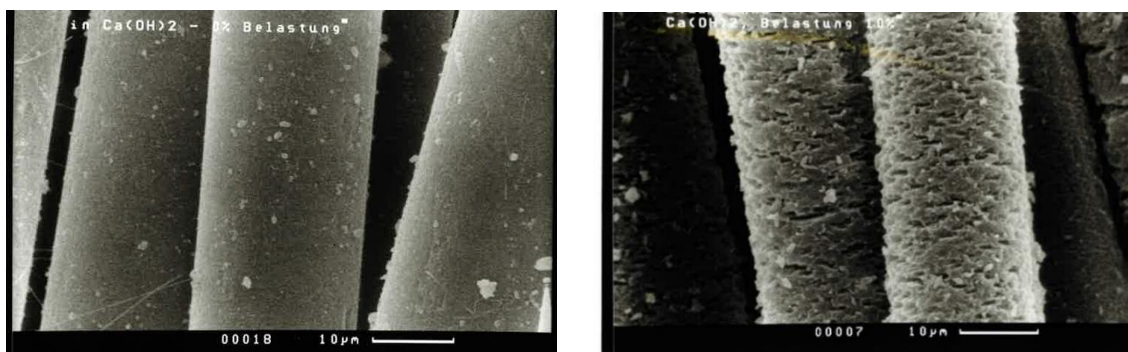


Abb. 3.1: Links: Eingelagerte PET-Faser in Kalkwasser ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ohne Belastung nach 91 Tagen ohne erkennbare Schädigung, Rechts: Eingelagerte PET-Faser in Kalkwasser ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) mit Zugkraftbeanspruchung in Höhe von 10% der maximalen Zugkraft nach 55 Tagen mit deutlich sichtbaren Schäden

Während eine spannungsfreie PET-Faser nach 91 Tagen Einlagerung in Kalkwasser (Calciumhydroxid-Lösung  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) bei  $40^\circ$  unter dem Elektronenmikroskop keine Schädigung aufweist, ist bei einer Zugkraftbeanspruchung in Höhe von 10% der maximalen Zugkraft bereits nach 55 Tagen eine deutliche Schädigung der Faser sowie Zugkraftverlust festzustellen.

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde untersucht, inwiefern dieser Prozess bei einer Bodeneinbettung relevant ist bzw. auftritt (STRAHBERGER, 2023). Hierzu wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der eine Einlagerung im gesättigten und teilgesättigten Boden sowie im Eluat mit konstanter Belastung der Probe ermöglicht (vgl. Abb. 3.2).



*Abb. 3.2: Versuchsaufbau zur Beprobung von eingebauten PET-Geogittern unter konstanter Zugbeanspruchung in kalkstabilisierten Böden (Strahberger, 2023)*

Insgesamt wurden bisher 4 Tests durchgeführt. Als Bodenmaterial wurde ein Kalk-Sand-Gemisch verwendet. Der pH-Wert dieses Materials lag über die Dauer der Versuche zwischen 12,6 und 12,7 und die Temperatur zwischen  $13^\circ\text{C}$  und  $19^\circ\text{C}$ . Im Test 1 betrug das Belastungsverhältnis 50% der maximalen Zugkraft, in den Tests 2, 3 und 4 jeweils 40%, was einer Beanspruchung gleicht, die leicht höher als die Bemessungsfestigkeit des Bewehrungsproduktes ist. In den Tests 1, 3 und 4 wurden die PET-Bewehrungsstränge im Boden eingebaut, während der Strang in Test 2 nur im Eluat gelagert wurde. Die Tests 3 und 4 sind identisch. Die Ergebnisse sind in Abb. 3.3 zu sehen. Aufgetragen ist die Belastungsgröße über der Zeit. Die schlagartige Abnahme der konstanten Belastung markiert den Bruch der Probe.

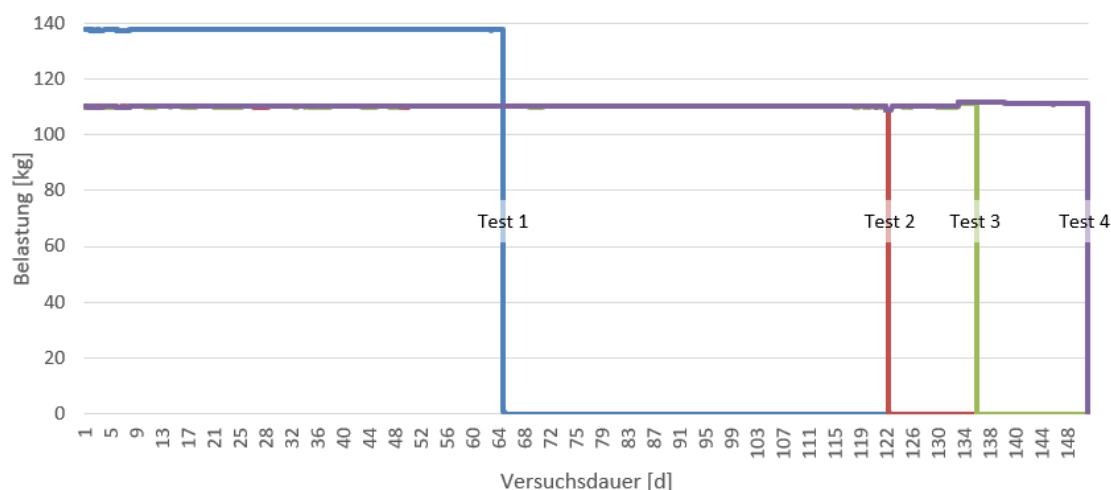


Abb. 3.3: Verlauf der Zugkraftbeanspruchung über die Zeit von PET-Bewehrungssträngen (Strahberger, 2023)

Erwartungsgemäß versagt die höher belastete Probe im Test 1 deutlich vor den anderen Proben. Die zeitliche Abfolge des Versagens in den Tests 2, 3 und 4 lässt den Schluss zu, dass kein signifikanter Unterschied in Bezug auf den Abbauprozess in Abhängigkeit der Lagerung im Eluat oder Einbettung im Boden besteht. In Bezug auf den Sättigungsgrad konnte kein eindeutiges Ergebnis abgeleitet werden. Im Test 1 trat der Bruch im gesättigten Bereich ein und in Test 3 und 4 im teilgesättigten.

Weitere Untersuchungen zum Schädigungsprozess bzw. der Verwendung von Geogittern aus Polyester bei pH-Werten über 9 stehen aus. Basierend auf den vorliegenden Erkenntnissen ist von einem dauerhaften Einsatz von PET-Geogitter unter solchen Randbedingungen abzusehen und auf alkaliresistente Rohstoffe zurückzugreifen.

### 3.2 Fallstudie: Geländeerweiterung mit geogitterbewehrten und zementstabilisiertem Boden

Im Zuge der Erweiterung eines Firmengeländes um 1.200 m<sup>2</sup> Nutzfläche mussten Geländesprünge von bis zu 12 m Höhenunterschied ausgeglichen werden. Das Finanzierungskonzept der Geländeerweiterung sah vor ca. 10.000 m<sup>3</sup> lokalen Boden sowie 15.000 m<sup>3</sup> Lieferboden (damals LAGA Kategorie Z1.2, nach neuer EBV BM-F3) zu verbauen und die entstehende Böschung mittels einer geogitterbewehrten Erdstützkonstruktion zu sichern. Die Verwendung des Lieferbodens wurde zum Zeitpunkt der Ausführung mit ca. 12 €/t vergütet. Der Transport zur Baustelle innerhalb der Stadt sowie der Einbau wurde mit ca. 5-7 €/t beziffert, sodass ein Überschuss zwischen 75.000 und 105.000 € erwartet wurde.

Zwecks Errichtung der neuen Böschung, mussten zunächst Teile der Bestandsböschung abgraben werden. Die zuvor durchgeführte Bodenuntersuchung ergab, dass es sich bei der Böschung um eine sehr inhomogene Auffüllung handelt, die sowohl Stein-

sowie Kiesmaterial, Schotter und Ziegelbruch als auch große Mengen Schluff aufwies. Ebenso war zum Zeitpunkt der Planung nicht bekannt, welche bodenmechanischen Eigenschaften das Liefermaterial aufweisen würde. Hierbei konnte es sich sowohl um RC-Material aus Betonbruch als auch um rolligen und/oder bindigen Bodenaushub handeln.

Während der Planungsphase wurden daher Mindestanforderungen bzgl. der Scherfestigkeit und Verformungsmodul für das Füllmaterial definiert, mit denen die Stand sicherheitsberechnungen der geogitterbewehrten Stützkonstruktion durchgeführt wurden. Es wurde dabei berücksichtigt, dass der Lieferboden im Fall von Betonbruch pH-Werte größer 9 aufweisen kann bzw. eine Bodenverbesserung mit hydraulischen Bindemitteln vor Einbau durchgeführt werden muss, falls die Mindestanforderungen an die Scherfestigkeit und den Verformungsmodul nicht erfüllt wurden. Ermöglicht wurde diese Vorgehensweise durch Verwendung einer Geogitterbewehrung aus dem alkali-resistenten Rohstoffe Polyvinylalkohol. Im Herbst 2021 wurde die Geländeerhöhung erfolgreich fertiggestellt.

## **4 Zusammenspiel von Beton- und geogitterbewehrten Stützwänden**

Die Verknüpfung von geogitterbewehrten Stützwänden und Betonstützwänden hat sich in der Praxis als durchaus gewinnbringend erwiesen. Hierbei können geogitterbewehrte Stützwände zum einen den Erddruck auf Betonstützwände eliminieren oder reine Betonstützkonstruktion bis hin zu Brückenwiderlager durch einen kombinierten Einsatz von geogitterbewehrtem Boden, mit und ohne Stabilisierung durch hydraulische Bindemittel, und einer Verkleidung aus Betonpanelen ersetzt werden. Wie in Kap. 2 erläutert, gibt es weitere Möglichkeiten der Außenhautgestaltung, so dass auch in Gänze auf hydraulische Bindemittel verzichtet werden kann.

### **4.1 Geogitterbewehrte Stützwand als „Erddruckfänger“**

Mittels geogitterbewehrter Stützwände kann der Erddruck auf (Stütz-)Wände aus Beton reduziert bzw. vermieden werden. Hierzu wird vor bzw. hinter der Betonwand eine geogitterbewehrte Stützwand in der Umschlagmethode aufgebaut und ein Abstand zur Betonwand eingehalten. Auf diese Weise wird der gesamte Erddruck auf die Wand eliminiert, wodurch die Dimensionierung bzw. der Querschnitt der Betonwand günstiger ausfällt. Ein Anwendungsbeispiel ist in Abb. 4.1 zu sehen, wo ein sogenannter Erddruckfänger hinter den Flügelwänden einer Bahnüberführung errichtet wurde.





Abb. 4.1: Links: Andeutung der zukünftigen geogitterbewehrte Erdkonstruktion in der Umschlagmethode; Rechts: Geogitterbewehrte Stützwand mit freiem Spalt zur Betonstützwand.

RAITHEL UND DETERT (2014) haben das Einsparpotential aufgrund der Erddruckeliminierung allein bei der benötigten Stahlbewehrung für Wandhöhen von 5 bis 20 m analysiert. Je höher die Wand, desto größer ist die Einsparung, die von gut 20% bei einer 5 m hohen Wand auf über 80% bei einer 20 m hohen Wand ansteigt. In einer zweiten Analyse wurden die Gesamtkosten einer 6 m hohen Betonstützwand mit und ohne Erddruck ermittelt und eine Kostenreduktion von 50% ermittelt.

#### 4.2 Geogitterbewehrte Erdstützkonstruktion als Brückenwiderlager

Bereits im Jahre 2000 wurde das erste Brückenwiderlager in Deutschland für eine Kreisstraße über einen Fluss als geogitterbewehrte Erdstützkonstruktion errichtet (HEROLD, 2001). Mittlerweile gehört diese Bauweise in vielen Ländern zu den Standardlösungen. In den Niederlanden wurden in einem einzigen Projekt, dem Großprojekt „Buitenring“ bei Parkstadt Limburg, 30 Brückenwiderlager in dieser Bauweise errichtet. In den USA ist der Entwurf und das Design von Brückenwiderlagern aus geogitterbewehrter Erde in diversen Richtlinien geregelt, wie z.B. in dem von der Federal Highway Administration herausgebenden Dokument „*Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes (2009)*“. Die positiven Erfahrungen mit den bestehenden Brückenwiderlagern sowie durchgeführten Großversuchen haben dazu geführt, dass nun auch in Deutschland erste Brücken über Autobahnen auf geogitterbewehrten Widerlagern gegründet werden.

#### 4.2.1 Last-Verformungsverhalten einer geogitterbewehrten Erdstützwand im Großversuch

Das sehr gute Last-Verformungsverhalten und die hohe Traglast wurde in einem Großversuch in den Laboren der LGA Nürnberg untersucht (ALEXIEW, 2007). Hierzu wurde eine 4,5 m hohe Wand in einer Testgrube errichtet (vgl. Abb. 4.2).

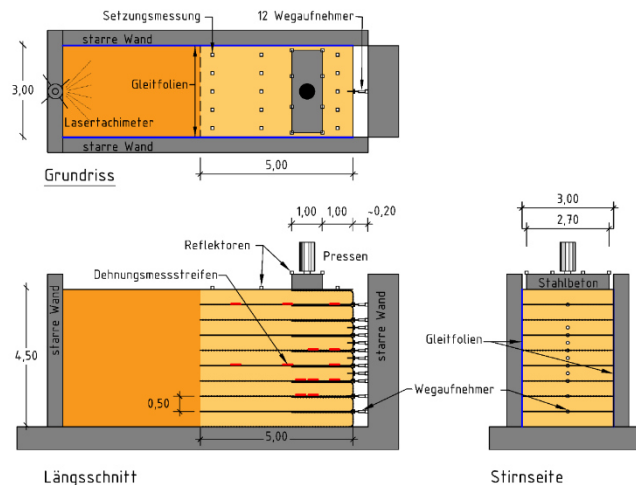


Abb. 4.2: Aufbau der Belastungsversuches

Alle 50 cm wurde ein gewebtes Geogitter aus Polyvinylalkohol mit einer Nennfestigkeit von 80 kN/m eingebaut. Die Wand wurde als Polsterwand errichtet, bei der die Geogitter in der Front hochgeführt und zurückgeschlagen werden, so dass sich „Polster“ mit 50 cm Stärke ergeben. Es gab keine weiteren aussteifenden Elemente in der Front. Der Auflagerbalken der Brücke wurde mittels eines Betonbalken mit 1 m breite simuliert, der in einem Abstand von 1 m parallel zur Böschungsfrent installiert wurde. Die Testwand war für eine Belastung von 250 kN/m<sup>2</sup> ausgelegt. Zunächst wurde die Last mit einer Presse aufgebracht und eine zweite Presse wurde im Verlauf der Versuchsreihe ergänzt, um die Last weiter zu steigern.

Unter anderem wurden folgende Erkenntnisse aus diesem Versuch gewonnen (ALEXIEW, 2007)

- Die horizontale Verformung bei einer Auflast von 250 kN/m<sup>2</sup>, der Designlast, beträgt ca. 2 mm und ca. 10 mm bei einer Auflast von 400 kN/m<sup>2</sup>, dem 1,6-fachen der Designlast
- Die Last konnte bis auf 650 kN/m<sup>2</sup> gesteigert werden, ohne dass ein Versagen der Wand eingetreten ist, wobei die Verformungsrate aber stark zugenommen hat
- Der Auflagerbalken hat sich gleichmäßig gesetzt, es hat keine Verdrehung stattgefunden

#### 4.2.2 Fallstudie: Feldmessungen an einem Brückenwiderlager in den Niederlanden

In den Niederlanden wurde die A74 bei Venlo neugebaut. Bei dieser Maßnahme wurden an verschiedenen Stellen Brückenbauwerke benötigt. Die Brückenbauwerke 4 und 4a wurden als geogitterbewehrte Erdstützwände in der Polsterbauweise errichtet. Die Höhen der Widerlager betragen 10 m und 6 m. Nach dem Aufbau der Stützwand wurde vor dem Auflegen der Brückendecks bzw. der Fahrbahnen eine Vorbelastung in Form von Betonblöcken aufgebracht (vgl. Abb. 4.3).



Abb. 4.3: Links: fertiggestellte Brückenwiderlager in Polsterbauweise mit Vorbelastung mittels Betonblocksteinen. Rechts: Fertiggestelltes Brückenwiderlager mit aufgelegten Fahrbahnen und angebrachter Frontverkleidung in Gabionenoptik

An insgesamt 4 Querschnitten (A, B, C und D) wurden die Vertikal- und Horizontalverformungen gemessen (vgl. Abb. 4.4). Die maximalen Horizontalverformungen aufgrund der Vorlast betragen zwischen 10 und 12 mm und weitere 8 mm nach Einbau der Brückendecks. Die maximalen Setzungen der Wand zwischen 25 und 28 mm, wobei 20 bis 25 mm davon aus dem Untergrund stammen und nur 2 bis 8 mm aus dem geogitterbewehrten Erdkörper selbst. Die Verkleidung der Polsterwand in Gabionenoptik hat nach Abklingen der Verformungen stattgefunden.

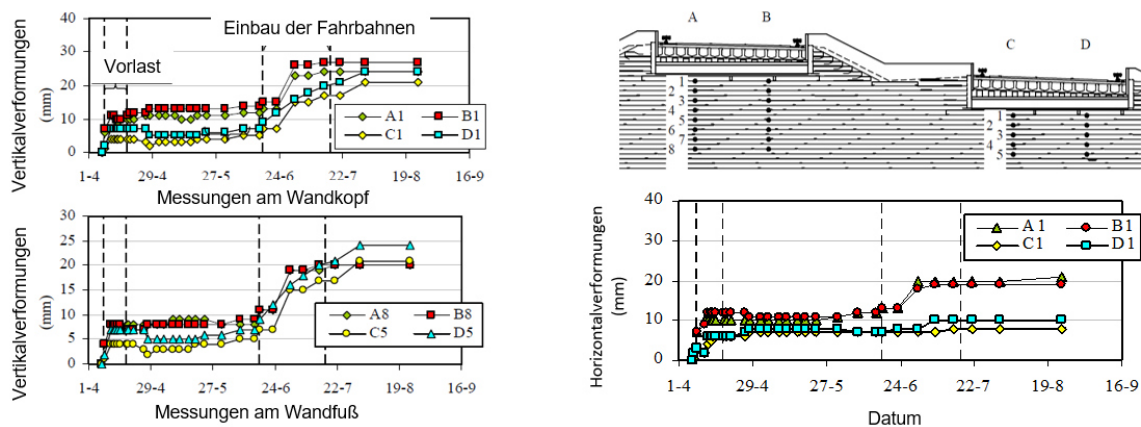


Abb. 4.4: Lage der Messquerschnitte und Ergebnisse der Vertikalverformungen am Wandfuß und – kopf sowie der Horizontalverformungen am Wandkopf



#### **4.2.3 Fallstudie: Ersatzneubau der Brücke Stokkumer Straße über die BAB A3 bei Emmerich**

In einem Pilotprojekt wurde 2019 der Ersatzneubau der Brücke Stokkumer Straße, welche bei Emmerich über die Autobahn A3 führt, mit Widerlagern aus geogitterbewehrter Erde und einer Verkleidung mit Betonpanelen im Fahrbahnbereich sowie Gabionenkörben im Übergangsbereich zu den bestehenden Böschungen umgesetzt. Für den Bau wurde lokaler Boden verwendet, der mittels Bindemittel zur Erhöhung der Steifigkeit verbessert wurde. Aufgrund hohen Dehnsteifigkeit als auch den erhöhten pH-Werte wurden gewebte Geogitter aus Polyvinylalkohol eingesetzt. Die Spannweite der Brücke beträgt 36,8 m. Das Brückendeck wurde auf einem naheliegenden Rastplatz gefertigt und mit Hilfe von SPMT's (Self-propelled Modular Transporter) an Ort und Stelle gebracht und auf die errichteten Brückenwiderlager abgesetzt (vgl. Abb. 4.5).



*Abb. 4.5: Absetzen des vorgefertigten Brückendecks mit Hilfe von SPMT's auf die geogitterbewehrten Widerlager (Heitkamp Brückenbau)*

Diese Bauweise ermöglichte es die gesamte Baumaßnahme in weniger als 80 Tagen und mit nur 2 Vollsperrungen der Autobahn an Wochenenden durchzuführen. Neben der äußerst kurzen Bauzeit konnte darüber hinaus im Vergleich zu einer konventionellen Konstruktion über 40% CO<sub>2</sub> Einsparung erzielt werden. Ein Verzicht auf das Bodenverbesserungsmittel hätte eine weitere CO<sub>2</sub>-Einsparung von 20% bedeutet.

In Bezug auf das Thema Nachhaltigkeit sei nach auf Studien wie z.B. STUCKI ET AL. (2011) oder den WRAP REPORT (2010) verwiesen, die CO<sub>2</sub>-Einsparung von bis zu 80% aufzeigen, wenn Betonstützwände durch geogitterbewehrte Stützwände ersetzt werden.

## 5 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit dem Einsatz von Betonstützwänden und geogitterbewehrten Erdstützwänden. Es werden Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt, bei denen eine Kombination der beiden Bauweisen sinnvoll ist und ökologische sowie ökonomische Vorteile erzielt werden können. So kann lokaler Boden mittels hydraulischer Bindemittel stabilisiert und zum Bau geogitterbewehrter Stützwände verwendet werden. Hierbei ist auf die Produktverträglichkeit mit Blick auf das veränderte chemische Milieu zu achten. Des Weiteren können geogitterbewehrte Stützbauwerke eingesetzt werden, um den Erddruck auf Betonstützwände zu eliminieren, so dass diese schlanker und günstiger dimensioniert werden können. Die hohe Tragfähigkeit sowie das sehr gute Last-Verformungsverhalten geogitterbewehrte Stützkonstruktion ermöglicht es darüber hinaus in vielen Fällen Betonstützwände gänzlich zu ersetzen, was neben Kosteneinsparungen auch günstige Auswirkungen auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Baumaßnahme mit sich bringt.

## Literatur

- Alexiew, D., 2007: *Belastungsversuche an einem 1:1 Modell eines geogitterbewehrten Brückenwiderlagers*, Vorträge zum 14. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, März 2007. S. 205 - 218.
- DIN 1076 - *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen; Überwachung und Prüfung*, Ausgabe 11/1999
- FHWA-NHI-10-024, 2009: *Design and Construction of MSE Walls and Reinforced Soil Slopes - Volume I*
- Herold, A., 2001: *Das erste Straßenbrückenwiderlager in Deutschland als Permanentkonstruktion in der Bauweise KBE - Kunststoffbewehrte Erde*, Sonderheft Geotechnik, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. -DGGT-, Essen, S. 113-11
- Müller-Rochholz, J., & Bronstein, Z., 1994: *Einfluß von Zugbeanspruchung auf das Hydrolyseverhalten von Polyester (PET)*.
- Raithel, M., & Detert, O., 2014: *Reinforced Earth Structures to Relieve Walls of Earth Pressure*, Proceedings of the 10th International Conference on Geosynthetics (10ICG), Berlin
- WRAP (2010): *Sustainable Geosystems in Civil Engineering Applications. Waste and Resources Action Programme*, Banbury, UK, Project MRF116
- Strahberger, M., 2023: *Untersuchungen zum Verhalten von Geokunststoffen in Böden mit erhöhtem pH-Wert*, Masterarbeit
- Stucki M., Büsser S., Itten R., Frischknecht R. and Wallbaum H., 2011: *Comparative Life Cycle Assessment of Geosynthetics versus Conventional Construction Material*. ESU-services Ltd. commissioned by European Association for Geosynthetic Manufacturers (EAGM), Uster and Zürich, CH.

# Entlastungssammler Wupper

Marcus Kornweibel, *WSW Energie & Wasser AG, Wuppertal*

Christian Massig, *WSW Energie & Wasser AG, Wuppertal*

Michael Kalz, *WSW Energie & Wasser AG, Wuppertal*

## Zusammenfassung

Der Entlastungssammler Wupper (ESW) ist das zentrale und wichtigste Bauwerk der Stadtentwässerung zur Regenwasserbehandlung und damit zur Reinhaltung der Wupper. Der ESW wurde in den Jahren 1990 bis 2001 auf einer Länge von ca. 10 km parallel zur Wupper von der Kläranlage Buchenhofen bis zum Alten Markt in Barmen gebaut.

Der ESW ist ein sehr flexibles und erweiterbares System mit großem Potential weiterer Anschlussgebiete. Darüber hinaus bietet der Entlastungssammler sehr gute Reaktionsmöglichkeiten auf veränderliche Rahmenbedingungen wie z.B. gesetzliche Änderungen. Seine geplante Verlängerung nach Osten leistet einen großen Beitrag zum Umweltschutz, die Gewässerqualität der Wupper wird nachhaltig verbessert und bei zukünftigen Starkregenereignissen sind auch die östlichen Stadtteile Barmen und Wichlinghausen besser vor Schäden durch Überflutungen geschützt.

## 1 Entlastungssammler Wupper (ESW)

### 1.1 Entstehungsgeschichte des ESW

In den 70er Jahren gab es im Stadtgebiet Wuppertal wegen der schlechten Wasserqualität keine Fische in der Wupper. Das hat sich in den letzten Jahrzehnten grundlegend geändert. Früher bedrohte Fischarten sind im Stadtgebiet keine Seltenheit mehr und ein sehr positives Signal für die mittlerweile gute Wasserqualität der Wupper. Wanderfische wie der Lachs sind wieder heimisch geworden. Die Wuppertaler Bürgerinnen und Bürger können zu Recht stolz auf ihren Fluss sein.

Gründe für diese positive Entwicklung sind u.a. der Ausbau der Kläranlagen und des Kanalnetzes durch die Stadtentwässerung Wuppertal.

Der Entlastungssammler Wupper ist das wichtigste Bauwerk zur Regenwasserbehandlung der Stadtentwässerung und damit zur Reinhaltung der Wupper.

Wenn es regnet, nimmt das über die Straßen abfließende Regenwasser diverse Schadstoffe wie Schwermetalle, organische Verbindungen (PAKs) und Mikroplastik auf, transportiert diese über die in die Kanalisation und schließlich in die Wupper. Diese Schadstoffe gehören nicht ins Gewässer, sie müssen dem Regenwasser vorher entzogen und einer Regenwasserbehandlungsanlage zugeführt und dort gereinigt werden. Das europäische Recht fordert in der EU Wasser-Rahmen-Richtlinie (WRRL) für alle Gewässer in Europa bis 2027 einen guten ökologischen Zustand. Deutschland und das Land NRW haben diese Vorgabe im Wasserhaushaltsgesetz und Landeswassergesetz konkretisiert. In NRW ist insbesondere der Erlass „Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren“ maßgeblich. In Wuppertal erfolgt die Ableitung des Regenwassers mit über 93 % im Trennverfahren. Das Regenwasser wird dabei in separaten Kanälen abgeleitet und über verrohrte Gewässer in die Wupper eingeleitet. Der Erlass sieht vor, verschmutztes Niederschlagswasser vor Einleitung in Gewässer einer Regenwasserbehandlung zuzuführen.

Zum Bau von Regenwasserbehandlungsanlagen benötigt man viel Platz, den Wuppertal mit seiner beengten Tallage nicht hat. Daher hat sich die Stadt Wuppertal in den 90er Jahren zum Bau des Entlastungssammlers Wupper entschlossen. Der Entlastungssammler beginnt heute an der Kläranlage Buchenhofen in Rutenbeck und endet nach ca. 10 km - entgegen der Fließrichtung - am Alten Markt in Barmen.

## **1.2 Der vorhandene Entlastungssammler Wupper**

Der vorhandene Entlastungssammler Wupper ist eines der zentralsten Abwasserbauwerke in Wuppertal. Die Herstellung des Vortriebskanals mit seinen dazugehörenden Staubawerken, in denen der Kanal kaskadenförmig aufgestaut werden kann, erfolgte von 1990 bis zum Jahr 2001. In den darauffolgenden Jahren wurden dann die Verzweigungsbauwerke (VZW) auf die bestehenden Regenwasserkanäle gebaut. Die Länge des ESW beträgt rund 10 km und die Sohltiefe liegt bei etwa 10 m unter GOK. Im Pumpwerk Rutenbeck liegt die Sohltiefe bei ca. 121 m ü NN und am Alten Markt bei 144,1 m ü NN. Damit hat der ESW ein durchschnittliches Gefälle von unter 3 Promille.

Neben den Verzweigungsbauwerken (Regentrennung) und den Staubawerken gibt es noch Verbindungs- und Schieberbauwerke (Verbindungen zwischen ESW und Hauptschmutzwasserkanälen) und Absturzbauwerke (Zugänge zum ESW, zum Teil mit Einleitstellen in den ESW).

Der Kanalbetrieb betreibt über 100 Betriebspunkte, die mit den Bauwerken an dem ESW zusammenhängen. Allein über 50 Verzweigungsbauwerke führen dem ESW den klärungspflichtigen Regenwasseranteil zu. Insbesondere die verrohrten Bachläufe scheiden im Regenwetterfall zum Teil über 1,5 m<sup>3</sup> Wasser je Sekunde in den ESW ab.

### 1.3 Die Verlängerung des Entlastungssammler Wupper

Aktuell nimmt der Entlastungssammler nur das verunreinigte Regenwasser von Sonnborn bis zum Alten Markt in Barmen auf. Die östlichen Stadtbezirke Barmen und Wichlinghausen leiten bisher ungereinigtes Regenwasser in die Wupper. Um auch hier die gesetzlichen Vorgaben erfüllen zu können, verlängert die WSW den vorhandenen Entlastungssammler nach Osten in Richtung Schwelm um ca. 1,5 km bis zur Wichlinghauser Straße.

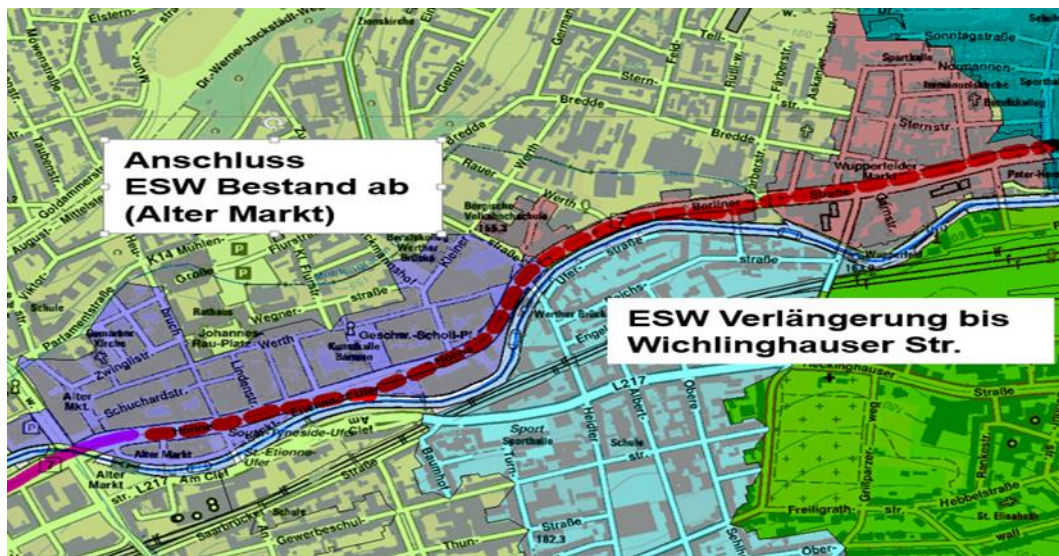


Abb. 1.1: Übersicht ESW Verlängerung

Die Verlängerung des Entlastungssammlers Wupper hat für die Stadt 3 wesentliche Vorteile:

- Mit der Weiterleitung des behandlungspflichtigen Regenwassers zur Kläranlage Buchenhofen werden die für die Wupper schädlichen Einleitungen von Schadstoffen aus den Bereichen Barmen und Wichlinghausen unterbunden. Damit hält Wuppertal die gesetzlichen Anforderungen auch in diesen Stadtteilen ein und hat die Möglichkeit, dafür einen Antrag auf Befreiung von der Abwasserabgabe an das Land NRW zu stellen.
- Die Starkregenereignisse am 29. Mai 2018 und 14./ 15. Juli 2021 sind bei den meisten Wuppertalerinnen und Wuppertalern noch sehr präsent. Damals haben sich extrem große Wassermassen in der Talachse gesammelt und aufgestaut. Durch den Entlastungssammler Wupper konnten diese Wassermassen in Elberfeld in kürzester Zeit abgeleitet und somit größere Schäden vermieden werden. Die Reduzierung des Gefährdungspotentials durch Starkregen wird durch die Verlängerung des Entlastungssammlers zukünftig auch für Barmen und Wichlinghausen gegeben sein.
- Der Schmutzwasserhauptsammler, der das Abwasser aus sämtlichen östlichen Stadtteilen inklusive Beyenburg transportiert, ist bereits heute hydraulisch ausgelastet. Durch die Verlängerung des Entlastungssammlers wird der

Schmutzwasserhauptsammler wesentlich entlastet. Positiver Nebeneffekt: Zur Inspektion oder Sanierung des Schmutzwasserhauptsammlers kann die Verlängerung des Entlastungssammlers als Umleitungskanal genutzt werden.

Der Entlastungssammler Wupper ist ein sehr flexibles und erweiterbares System mit großem Potential weiterer Anschlussgebiete. Darüber hinaus bietet der Entlastungssammler sehr gute Reaktionsmöglichkeiten auf veränderliche Rahmenbedingungen wie z.B. gesetzliche Änderungen.

Der Entlastungssammler und seine geplante Verlängerung nach Osten leisten einen großen Beitrag zum Umweltschutz, die Gewässerqualität der Wupper wird nachhaltig verbessert und bei zukünftigen Starkregenereignissen sind auch Barmen und Wichlinghausen besser vor Schäden durch Überflutungen geschützt.

## 2 Planung ESW Verlängerung

### 2.1 Ausschreibung und Vergabe der Planungsleistungen

Unter Berücksichtigung der Vergabeverordnung VGV haben hat sich die WSW für eine EU-weite Ausschreibung mit Teilnahmewettbewerb entschieden. Für die Wertung half uns eine Bewertungsmatrix jeweils für den Teilnahmewettbewerb/Eignung und zum anderen für die Zuschlagserteilung.

Kriterien für die den Teilnahmewettbewerb/Eignung:

- Technische und berufliche Leistungsfähigkeit, wie Bürostruktur, Qualitätsmanagement, Mitarbeiterstruktur, Objektliste, Büroreferenzen, Konzept zur kurzfristigen Verfügbarkeit
- Wirtschaftliche und finanzielle Leistungsfähigkeit, wie Jahresumsätze, Haftpflichtversicherung
- Befähigung und Erlaubnis zur Berufsausführung, wie Handelsregisterauszug, Erklärung über das Nichtvorliegen von Ausschlussgründen nach § 42 VGV.

Kriterien für den Zuschlag:

- Honorar (30 v.H.)
- Leistungsparameter des Ingenieurs (70 v.H.), wie Herangehensweise an die Planungsaufgabe, Referenzen, Klarheit der Organisation, Vergleichbarkeit mit bereits getätigten Projekten, Nachweis der Qualifikation, Präsentation, Einteilung der Bauabschnitte

Vor dem Hintergrund der Einhaltung der Gebührenstabilität, ist das verfügbare Budget ein entscheidender Faktor bei der Umsetzung von Großprojekten.

In Wuppertal sind das die Investitionskosten, die der WSW durch die Stadt Wuppertal jährlich zur Verfügung stehen. Vor diesem Hintergrund musste das Projekt zum einen in

zwei Bauabschnitte geteilt werden und zum anderen ein Zahlungsplan für die entsprechenden Jahre mit den ausführenden Firmen vereinbart werden. Die Gesamtbauzeit wurde auf 6 Jahre ausgelegt. Davon entfallen auf den 1. Bauabschnitt 4 Jahre (2022 bis 2025, Vortriebsstrecke ca. 990 m, 2 Haltungen) und auf den 2. Bauabschnitt 2 Jahre (2026 – 2027, Vortriebsstrecke ca. 600m, eine Haltung).

## **2.2 Ausschreibung und Vergabe der Ausführungsleistungen**

Auch die Vergabe der Bauleistungen erfolgte EU-weit mit Teilnahmewettbewerb, in 2022 für den 1. Bauabschnitt zwischen Alter Markt und Pfälzer Steg. Die Ausschreibung für den 2. BA (Pfälzer Steg bis Wichlinghauser Straße) wird in 2025 erfolgen.

Das Verfahren ist folgendermaßen strukturiert:

Stufe 1 - Abfrage indikativer Angebote

Stufe 2 - Aufklärungs- und Verhandlungsphase

Stufe 3 - Abfrage abschließender und verbindlicher Angebote

Auch hier wurde wieder mit einer Matrix gearbeitet:

- Kautionen und Sicherheiten mit Bereitschaftserklärung für Bankbürgschaften
- Handelsregister
- Wirtschaftliche Leistungsfähigkeit, wie Nettojahresumsatz, Berufshaftpflicht
- Technische Leistungsfähigkeit, wie Mitarbeiteranzahl/Fachpersonal, Berufserfahrung, vergleichbare Referenzobjekte mit entsprechenden Mindestanforderungen, Güteschutz Kanalbau VMD und AK1, Umweltmanagement

### Zusammenfassung

Großprojekte benötigen i.d.R. hohe Zeit- und Kostenbudgets. Eine Optimierung ist möglich, wenn im Vorfeld eine große Anzahl von Randbedingungen bereits geklärt sind, wie z.B. Baumfällungen, Bodengutachten, verkehrliche Regelungen zur Bauzeit, Planungsziele, Zeitachsen mit dem entsprechenden Zeitmanagement. Und dennoch bleibt immer ein Restrisiko.

Um es mit Albert Einstein zu sagen „**Planung ersetzt Zufall durch Irrtum.**“



### 3 Bau der Verlängerung des ESW

Die Verlängerung des Entlastungssammlers verläuft entlang der B7, in einer Tiefenlage von 9 -10 Metern, mit einem Innen-Durchmesser von DN 2000 (2 Metern). Die Herstellung erfolgt mit einem unterirdischen Rohrvortrieb mit minimalen Radien von 250 m.



*Abb. 3.1: Rohrvortrieb (hier Düker Industriestraße, Freigabe Foto durch Herrn Platten)*

Der 1. Bauabschnitt wurde zur Ausführung an die ARGE SONNTAG Baugesellschaft mbH & Co. KG / DA Ingenieur-Bau GmbH (ARGE ESW-Verlängerung Wuppertal) vergeben. Die Kosten für den ersten Bauabschnitt betragen ca. 14,1 Mio. € (netto).

Bei der Ausschreibung der Baumaßnahme mussten folgende Randbedingungen berücksichtigt werden:

- Verkehrliche Auswirkungen der Baumaßnahme
- Berücksichtigung der vorhandenen Ver- und Entsorgungsleitungen im direkten und durch die Baumaßnahme beeinflussten Umfeld
- Vorhandene Bebauung im Baufeld
- Vorhandene Bäume in den Baubereichen
- Vorherige Kampfmittelondierarbeiten
- Archäologische Baubetreuung
- Sonstige Behördliche Vorgaben und Auflagen
- Und zuletzt die Frage, welche technischen Möglichkeiten lassen die vorhandenen Boden- und Grundwasserverhältnisse überhaupt zu.



Unter Berücksichtigung der oberen Punkte wurden für die Verlängerung des ESW folgende Baugruben geplant:

- Bergegrube Alter Markt: Mit Verschiebung der Busspur aus der Mittellage in Richtung Parkstreifen wurde der Platz für die Bergegrube (direkt hinter dem bisherigen Abschlussbauwerk des ESW) und für das neue VZW112 hergestellt. Der Bereich soll nach der Fertigstellung der ersten Vortriebsstrecke und dem Anschluss des neuen Vortriebskanals an das bestehende AB 112 wieder in seinen Ursprungszustand zurückgebaut und für den Verkehr freigegeben werden.
- VZW 112: Dieses wird ebenfalls im Baufeld am Alten Markt gebaut. Das Bauwerk gehört eigentlich zum System des bereits erstellten ESW und wird aufgrund seiner Lage „im Schatten“ der Verlängerung des ESW erstellt. Das Bauwerk liegt exponiert zwischen einem Versorgungstunnel und dem alten Fußgängertunnel (Abstand unter 6 m). Zwischen den beiden Tunneln liegt ein vorhandener RW-Kanal (DN 900/1350) und über dem Kanal liegen zwei nicht verlegbare Formsteinkanäle der Telekom und der Nachrichtentechnik der Stadt (8 bzw. 16 zügig). Das VZW wird auf den Kanal und unter die Formsteinkanäle erstellt, die beiden Versorgungstunnel werden zum Teil als Verbau genutzt. Im Eckbereich der Baugrube muss noch ein Anschluss an den vorhandenen ESW (Tiefe des Scheitels rund 8 m unter GOK und damit 4 m unter dem Grundwasserniveau) erstellt werden.
- Doppelpressgrube St Etienne: Die Lage wurde absichtlich auf einem Parkplatz geplant. Die Herstellung der Baugrube findet daher außerhalb der öffentlichen Straßen statt. Von dort erfolgt der Vortrieb zuerst in Richtung Alter Markt und danach in Richtung Bredde. Nach Fertigstellung der Vortriebe muss das Staubauwerk 6 in der Baugrube erstellt werden.
- Bergegrube Bredde (Pfälzer Steg): Wurde auch auf einem Parkplatz geplant, damit die Baugrubenarbeiten außerhalb der öffentlichen Straßen durchgeführt werden können. Die jetzige Bergegrube wird die spätere Pressgrube für Los 2. Daher müssen bereits jetzt die Dichtblöcke für die Baugrubenausfahrt in Richtung Wichlinghauser Markt berücksichtigt werden.

- Verzweigungsbauwerk 99 an der Bachstraße: Das Bauwerk liegt in der Mittellage der B 7 an einer Hauptkreuzung. Der begrünte Mittelstreifen ist lediglich 1 – 2 m breit. Die B 7 wird in Richtung Oberbarmen einspurig geleitet. In Richtung Elberfeld wird der Verkehr zweispurig (eine gemischte Spur als Linksabbieger/Geradeaus und eine Geradeausspur) geführt. Trotzdem sind die Arbeitsräume minimal. Erschwerend sind die vorhandenen Hauptschmutzwasserkanäle, die in dem Baubereich mit dem neuen ESW verbunden werden sollen. Aufgrund des fehlenden Platzes erfolgen erst die Baugrubenarbeiten für das neue VZW und einen neuen Absturzschaft auf den ESW. Im Anschluss erfolgt eine Verkehrsumstellung über die bereits hergestellten Bauwerke. Erst dann werden die restlichen Bestandskanäle an die neuen Bauwerke angebunden.

Baustart war der 13. Februar 2023. Bisher wurden die Bohrpfähle der Vortriebsbaugruben erstellt und die Abdichtungsarbeiten mittels HDI durchgeführt. Der Vortrieb soll planmäßig Ende Februar 2024 starten.

# Mitteilungshefte

## Grundbau, Bodenmechanik und Unterirdisches Bauen

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. B. Walz

### **Bericht – Nr. 1, 1982**

H. Grasshoff:

*Optimierung der Baugrunderkundungen bei der Planung von Bauobjekten einfacher Art*

B. Walz:

*Bodenmechanische Modelltechnik als Mittel zur Bemessung von Grundbauwerken*

### **Bericht – Nr. 2, 1983**

M. Pulsfort, C. Drenkelfuß:

*Elastische Einspannung von Pfählen im Boden*

J. Gerlach, B. Walz:

*Die Berechnung des Erddruckes bei räumlichen Problemen mit einem geotechnischen Bruchmechanismus*

### **Bericht – Nr. 3, 1985**

D. Genske:

*Ingenieurgeologische Erkundung und Beurteilung von Felsböschungen im Rheinischen Schiefergebirge*

M. Pulsfort, J. Gerlach, B. Walz, H. Meckenstock:

*Einsatz der Nahbereichs-Photogrammetrie zur Messung von Bodendeformationen bei kleinmaßstäblichen Modellversuchen in der Bodenmechanik*

### **Bericht – Nr. 4, 1986**

M. Pulsfort:

*Untersuchungen zum Tragverhalten von Einzelfundamenten neben suspensionsgestützten Erdwänden begrenzter Länge*

### **Bericht – Nr. 5, 1986**

J. Gerlach:

*Experimentelle Ermittlung der Bruchkörperform und Entwicklung eines daraus abgeleiteten Berechnungsverfahrens zur Bestimmung des aktiven räumlichen Erddrucks*

### **Bericht – Nr. 6, 1987**

H. Graßhoff:

*Systemsteifigkeit und Flächengründung*

B. Walz, K. Hock:

*Berechnung des räumlich aktiven Erddrucks mit der modifizierten Elementscheibentheorie*

### **Bericht – Nr. 7, 1988**

G. Leonhardt:

*Gebirgsumlagerungen und Geländesenkungen bei Tunneln – das technische Modell des schubsteifen Balkens in seiner Anwendung auf Fragen des Tunnelbaus*

**Bericht – Nr. 8, 1988**

D. Genske:

*Ansatz für ein probabilistisches Sicherheitskonzept ungesicherter Felsböschungen im Rheinischen Schiefergebirge*

**Bericht – Nr. 9, 1991**

*Vorträge und Einzelveröffentlichungen 1989 bis 1991*

**Bericht – Nr. 10, 1991**

P. Waldhoff:

*Untersuchungen zum Setzungsverhalten von Einzelfundamenten neben flüssigkeitsgestützten Erdwänden begrenzter Länge*

**Bericht – Nr. 11, 1991**

R. Rauh:

*Beitrag zum Tragverhalten horizontal belasteter, im nichtbindigen Boden eingespannter Wandsysteme unter besonderer Berücksichtigung einer Böschungsgeometrie*

**Bericht – Nr. 12, 1992**

K. Hock-Berghaus:

*Berechnung aktiver Erddruckkräfte nach der Variationsrechnung*

**Bericht – Nr. 13, 1993**

J. Steinhoff:

*Standsicherheitsbetrachtungen für polymergestützte Erdwände*

**Bericht – Nr. 14, 1995**

M.-Th. Steinhoff:

*Die Belastung von Schächten in Deponien*

**Bericht – Nr. 15, 1995**

O. Emde:

*Der unterspannte schubsteife Balken – ein mechanisches Modell für geotextilbewehrte Tragschichten*

**Bericht – Nr. 16, 1996**

T. Happe:

*Entwicklung eines empirisch-mathematischen Verfahrens zur Abschätzung der Setzungen von Einzelfundamenten neben suspensionsgestützten Schlitzern begrenzter Länge*

**Bericht – Nr. 17, 1997**

K. Hock-Berghaus:

*Unterfangungen, Konstruktion, Statik und Innovation*

**Bericht – Nr. 18, 1998**

A. Kremer:

*Das Tragverhalten von eingespannten biegsamen Stützwänden im bodenmechanischen 1g-Modellversuch*

**Bericht – Nr. 19, 1998**

B. Schaupp:

*Grundlagen der Bewertung von Deponien unter Anwendung der Fuzzy-Logik*

## **Bodenmechanik und Grundbau**

**Herausgegeben von Prof. Dr. -Ing. B. Walz und Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort**

**Bericht – Nr. 20, 1999**

A. Kaddis:

*Untersuchungen zum Ankerquerdruck an vorspringenden Baugrubenecken*

**Bericht – Nr. 21, 1999**

M. Thewes:

*Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden*

**Bericht – Nr. 22, 1999**

M. Herten:

*Räumlicher Erddruck auf Schachtbauwerke in Abhängigkeit von der Wandverformung*

**Bericht – Nr. 23, 2000**

J. Quarg-Vonscheid:

*Berechnungsmodell für die Tragfähigkeit und das Gruppenverhalten von Zugpfählen*

**Bericht – Nr. 24, 2002**

B. Bergschneider:

*Zur Reichweite beim Düsenstrahlverfahren im Sand*

**Bericht – Nr. 25, 2003**

*Fach-Kolloquium Geotechnik, 26. September 2003*

**Bericht – Nr. 26, 2003**

N. Mörchen:

*Zur Grenzlast eines Druckpfahls – Untersuchungen für den Einzel- und den Gruppenpfahl*

**Bericht – Nr. 27, 2004**

K. Dörendahl:

*Das Tragverhalten von Einphasen-Dichtwandmassen als Ausfachung von Baugrubenwänden*

**Berichte des Lehr- und Forschungsgebietes Geotechnik**  
**Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort und Prof. em. Dr.-Ing. B. Walz**

**Nr. 28, 2005**

M. Pohl:

*Modellierung von granularen Böden und biegsamen Bauwerken mit Hilfe der DEM am Beispiel einer eingebetteten Spundwand*

**Nr. 29, 2005**

C. Hauser:

*Boden-Bauwerk-Interaktion bei parallelwandigen Verbundsystemen – Bodenmechanische Modellversuche unter Anwendung innovativer Auswerteverfahren*

**Berichte des Lehr- und Forschungsgebietes Geotechnik**  
**Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort**

**Nr. 30, 2010**

A. Stolz:

*Untersuchungen zur Beanspruchung von Vortriebsrohren beim Rohrvortrieb mit gekrümmter Linienführung in nicht bindigen Böden*

**Nr. 31, 2011**

Ch. Thienert:

*Zementfreie Mörtel für die Ringspaltverpressung beim Schildvortrieb mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust*

**Nr. 32, 2012**

M. Pulsfort (Hrsg.):

*Beiträge zum 3. RuhrGeo Tag 2012 – Innerstädtischer Tunnelbau und Spezialtiefbau*

**Nr. 33, 2012**

T. Welskopf:

*Untersuchungen zum Tragverhalten von Pfählen unter aktiver Horizontalbelastung*

**Nr. 34, 2015**

M. Pulsfort (Hrsg.):

*Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Matthias Pulsfort*

**Nr. 35, 2016**

M. Pulsfort (Hrsg.):

*Beiträge zum 7. RuhrGeo Tag 2016 – Qualitätssicherung und Schadensprävention im Grund- und Tunnelbau*

**Nr. 36, 2019**

M. Pulsfort (Hrsg.):

*Beiträge zum 10. RuhrGeo Tag 2019 – Neue Erkenntnisse und Bauverfahren in der Geotechnik*

**Nr. 37, 2019**

B. Böhle:

*Untersuchungen im Großmaßstab zum Fließ- und Ansteifverhalten von Beton bei der Herstellung von Bohrpfählen*

**Nr. 38, 2019**

C. Fierenkothen genannt Kaiser:

*Numerische Simulationen und Laborversuche zur Ausbreitung von Frischbeton in Bohrpfählen*

**Nr. 39, 2021**

R. Verst:

*Stabilisation mechanisms of polymer solutions in the context of temporary earth-wall support -*

*Stabilisierungswirkung von Polymerlösungen bei der Stützung von Erdwänden*

**Berichte des Lehr- und Forschungsgebietes Geotechnik**

**Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. M. Herten**

**Nr. 40, 2024**

M. Herten (Hrsg.):

*Beiträge zum 13. RuhrGeo Tag 2024 – Zement in der Geotechnik – noch zeitgemäß?*

Print: ISBN 978-3-00-078295-4  
eBook: ISBN 978-3-00-078296-1