

# Nachhaltigkeit im Tiefbau – zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe unter Verwendung von Recycling-Material

Sven Büschken  
sven.bueschken@hcu-hamburg.de

HafenCity University, Hamburg

## Kurzfassung

Im konventionellen Tiefbau werden Baugruben und -gräben mit Sand verfüllt und dieser beim Einbau verdichtet. Hierfür wird Sand als Bodenaustauschmaterial bereitgestellt, wenn das Aushubmaterial dem Abfallkreislauf zugeführt und aufbereitet oder entsorgt werden muss. Dieses Vorgehen ist logistisch mit einem hohen Aufwand verbunden und kann sowohl ökologisch, als auch ökonomisch hinterfragt werden. So werden begrenzte Sandressourcen in Anspruch genommen und durch An- und Abtransport des Materials vermeidbare Treibhausgase produziert. Ein möglicher Ansatz, diesem Trend entgegenzuwirken ist die Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV) als Alternative zu Sand. An der HafenCity Universität (HCU) läuft aktuell ein Forschungsprojekt zu ZFSV, mit einem speziellen Fokus auf den Einsatz von Recycling-Material.

In diesem Bericht soll der aktuelle Forschungsstand an der HCU auszugsweise vorgestellt und das Potenzial der Ressourcenschonung durch ZFSV angesprochen werden.

## Ausgewählte Aspekte zu Recycling-Material

Einen Anreiz für die Wirtschaft, Alternativen aus Recycling-Material (RC-Material) zu nutzen, schafft das 2012 in Deutschland verabschiedete Kreislaufwirtschaftsgesetz. „Zweck des Gesetzes ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen.“ (BMU 2021)

Recycling-Baustoffe sind zwar bereits ein fester Bestandteil in der Deckung des Bedarfs an Gesteinskörnungen (Fig. 1), liegen mit 13% aber weit hinter dem Anteil an Rohstoffen wie Naturstein, Kies und Sand mit insgesamt 82%.

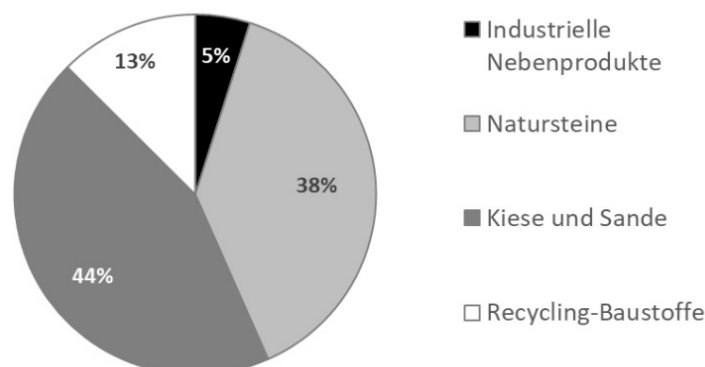


Fig. 1: Deckung des Bedarfs an Gesteinskörnungen 2018 in Prozent  
[Datenbasis:(Kreislaufwirtschaft Bau 2018)]

Mit der vom BMU verabschiedeten Ersatzbaustoffverordnung (EBV)/Mantelverordnung 2021 (Inkrafttreten: 25.06.2023) wird es erstmals bundesweit gültige Vorgaben für den Einsatz mineralischer Abfälle geben (BMU 2021).

### Ausgewählte Aspekte zu ZFSV

Bei ZFSV handelt es sich um „Böden und Baustoffe mit Bindemitteln, die insbesondere in schwer zugänglichen oder schwer verdichtbaren Bereichen zur Verfüllung verwendet werden. Sie fließen ohne Einwirkung zusätzlicher Verdichtungsenergie und füllen Hohl- und Zwischenräume vollständig aus.“ (FGSV 2012). Dies ermöglicht schmalere Gräben, eine schnellere Befüllung des Grabens, sowie eine Minimierung der Erschütterungsimmissionen für die angrenzende Baustruktur. Eine Besonderheit gegenüber anderen, fließfähigen Verfüllbaustoffen ist die spätere Möglichkeit des einfachen Wiederaushubs und der anschließenden Wiederverwendung Vorort (AGFW 2019).

ZFSV setzen sich aus Erdstoff, Wasser, hydraulischem Bindemittel und Additiven zusammen (Fig. 2). Je nach Anforderung an das Verfüllmaterial, gibt es verschiedene ZFSV-Rezepturen. Durch Variation der Anteile der Bestandteile lassen sich unterschiedlichen Eigenschaften, wie z.B. Wasserdurchlässigkeit, Tragfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit beeinflussen.

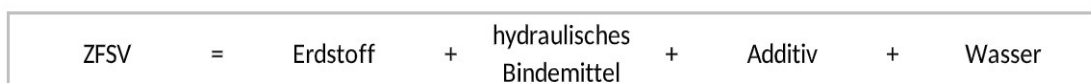


Fig. 2: Grundrezeptur von ZFSV

In der Praxis werden beim Herstellungsprozess von ZFSV und der Bereitstellung des Verfüllmaterials Vorort zwei Ansätze unterschieden (Fig. 3).

- Zum einen die Anmischung des Aushub-Materials Vorort. Hierbei dient das in situ ausgehobene Material als Grundmaterial für die jeweilige Rezeptur und wird entsprechend wieder als Verfüll- bzw. Bettungsmaterial verwendet. Selbst belasteter Boden kann teilweise wiederverwendet werden, da bestimmte ZFSV-Rezepturen die Bindung von Schadstoffen ermöglichen (RAL 2014).
- Zum anderen die Anmischung des ZFSV im Werk und der anschließende Transport zur Baustelle.

Vor allem der zweite Ansatz bietet sich für die Verwendung von Recycling-Baustoff als Grundmaterial an, worauf im Folgenden näher eingegangen wird.

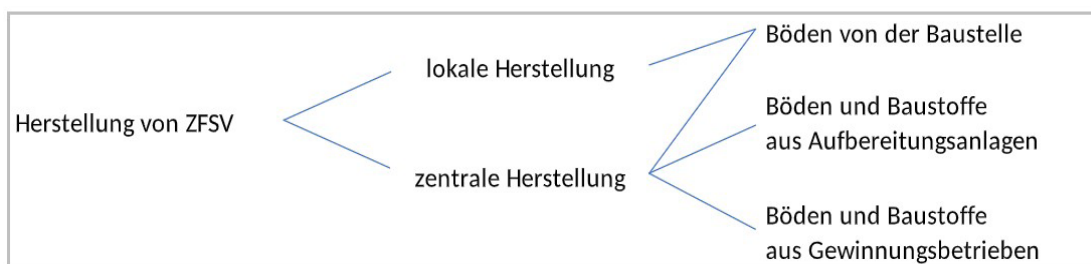


Fig. 3: Herstellung von ZFSV und Herkunft der Ausgangsmaterialien [Datenbasis: (AGFW 2017)]

### ZFSV aus Recycling-Material

Eine Möglichkeit, den Einsatz von mineralischen Ressourcen im Bausektor zu reduzieren bietet der Einsatz von ZFSV im Allgemeinen und im Speziellen in Verbindung mit Recycling-Baustoffen. ZFSV in Verbindung mit RC-Baustoffen sind bis dato noch wenig erforscht und bedürfen weiterer Untersuchungen und Erfahrungswerte, um eine ausreichende Akzeptanz bei potenziellen Anwendern zu schaffen.

Neben den technischen Anforderungen, die ZFSV erfüllen müssen, müssen auch die Umweltaspekte betrachtet werden. Es muss sichergestellt sein, dass weder der Boden noch das Grundwasser durch den Einsatz von ZFSV schädlich verändert werden. Es sind also auch die chemischen, stofflichen und standortspezifischen Anforderungen zu berücksichtigen.

Tabelle 1\* zeigt eine Übersicht von Regelwerken, die für die Herstellung von ZFSV bzw. den darin verwendeten Materialien relevant sind.

Anforderungen	Regelwerk	Geltungsbereich
technisch	Technisches Regelwerk ( <b>H ZFSV</b> )	Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau
	Technische Lieferbedingungen für Bodenmaterialien und Baustoffe für den Erdbau im Straßenbau ( <b>TL BuB E-StB</b> )	Stoffspezifische, erdbautechnische und umweltrelevante Anforderungen an Bodenmaterialien und Baustoffe, die zur Herstellung von Erdbauwerken eingesetzt werden
umweltrelevant	Bundes-Bodenschutzgesetz ( <b>BBodSchG</b> ) & Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung ( <b>BBodSchV</b> )	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten
	Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall - Mitteilung 20 ( <b>LAGA M 20</b> )	Bewertung der Schadloosigkeit der Verwertung von mineralischen Abfällen und Böden bei bestimmten Anwendungsfällen
	Wasserhaushaltsgesetz ( <b>WHG</b> )	Schutz der Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut

\*Hinweis: Die Tabelle hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Je nach Anwendung und Einsatzort, können weitere Richtlinien, technische Lieferbedingungen (TL), zusätzliche technische Vertragsbedingungen (ZTV) oder technische Prüfvorschriften (TP) zu beachten sein (Remex 2012).

Tab. 1: Relevante Regelwerke für die Herstellung von ZFSV und die Verwendung von RC-Baustoffen [Datenbasis: (FGSV 2012/2020)]

Ob, in welchem Umfang und unter welchen Rahmenbedingungen ein Baustoff wiederverwertet werden darf, regeln aktuell die Technischen Lieferbedingungen für Bodenmaterialien und Baustoffe für den Erdbau im Straßenbau (TL BuB E-StB).

Die Umweltaspekte sind in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) festgesetzt, die auf Länderebene durch die Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA M20) ergänzt wird. So werden in der LAGA M20 die unterschiedlichen Materialien sog. Einbauklassen zugeordnet (Tab. 2).

Einbauklasse	Zuordnung	Beschreibung
0	≤ Z 0	uneingeschränkter Einbau
1	≤ Z 1.1	eingeschränkter offener Einbau
	≤ Z 1.2	eingeschränkter offener Einbau bei hydrologisch günstigem Gebiet
2	≤ Z 2	eingeschränkter Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen
3-5	> Z 2	Einbau/Ablagerung in Deponien

Tab. 2: Einbauklassen nach LAGA M 20 [Datenbasis: (Handbuch ZTV E-StB 2017)]

### Untersuchungen an der HCU

Um auf dem Gebiet der ZFSV in Kombination mit Recycling-Baustoffen neue Erkenntnisse zu gewinnen, arbeitet die HafenCity Universität Hamburg (HCU) mit anderen Forschungspartnern an der weiteren Erforschung von ZFSV, mit einem Schwerpunkt auf der Verwendung von RC-Baustoffen. Diese Forschungsaktivitäten sind u.a. Bestandteil des Projektes "FW-ZFSV 4.0 - Fernwärmeleitungsbau 4.0 mit zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen für niedrige und hohe Betriebstemperaturen".

Neben klassischen Abbruchmaterialien wie Betonbruch, Ziegelbruch und Asphaltfräsgut werden auch Materialien untersucht, die zwar per Definition nicht zu Recycling-Material gezählt werden, aber lokal in großer Menge anfallen, ohne einem Verwendungszweck zugeführt zu werden und somit als Abfall gelten. Für den Raum Hamburg wäre das z.B. Hafenschlick. Hierbei handelt es sich um ein Ausgangsprodukt natürlicher Herkunft, welches anthropogene Schadstoffbelastungen aufweist. Es findet bereits Anwendung als Ersatzbaustoff für Dichtungsmaterial im Deponie- und Deichbau und als Ausgangsmaterial in der Ziegel- und Pelletherstellung. (HPA 2021).

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 3) zeigt, welche Materialien an der HCU im Rahmen des Projektes bereits untersucht wurden und sich nach den bisher durchgeführten Versuchen, die noch zu erweitern sind, grundsätzlich als geeignet erwiesen haben.

<b>RC -Material</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>bekannte Anwendungsfälle</b>	<b>potenzielle Verwendung in ZFSV</b>	<b>Herausforderung für Anwendung mit ZFSV</b>
Betonbruch	vorwiegend Beton	Straßen- und Wegebau (hohe Tragfähigkeit)	Erdstoff	Nachhärtung aufgrund z.B. puzzolanische Reaktionen
Ziegelbruch	gebrochenem Bauschutt, Ziegel sowie Kalk-Sandstein	Unterbau von Tragschichten mit geringen Tragfähigkeiten	Erdstoff	Nachhärtung aufgrund z.B. puzzolanische Reaktionen, Zulassung für Graben- und Wegebau aufgrund der hohen Materialvielfalt und geringen Frostbeständigkeit
Hafenschlick	feinkörnige Gewässersedimentfraktion	Dichtungsmaterial Deponie-/Deichbau, Ausgangsmaterial Ziegel- und Pelletherstellung	Erdstoff / Additiv	Zulassung für den Graben- und Wegebau aufgrund der anthropogene Schadstoffbelastungen

Tab. 3: An der HCU untersuchte Recycling-/Abfallmaterialien [Datenbasis: (HPA 2021), (Buhck 2021)]

In Fig. 4 sind die Korngrößenverteilungen der jeweiligen Materialien dargestellt. Durch eine Kombination der unterschiedlichen Materialien lässt sich die gewünschte Korngrößenverteilung erzielen.

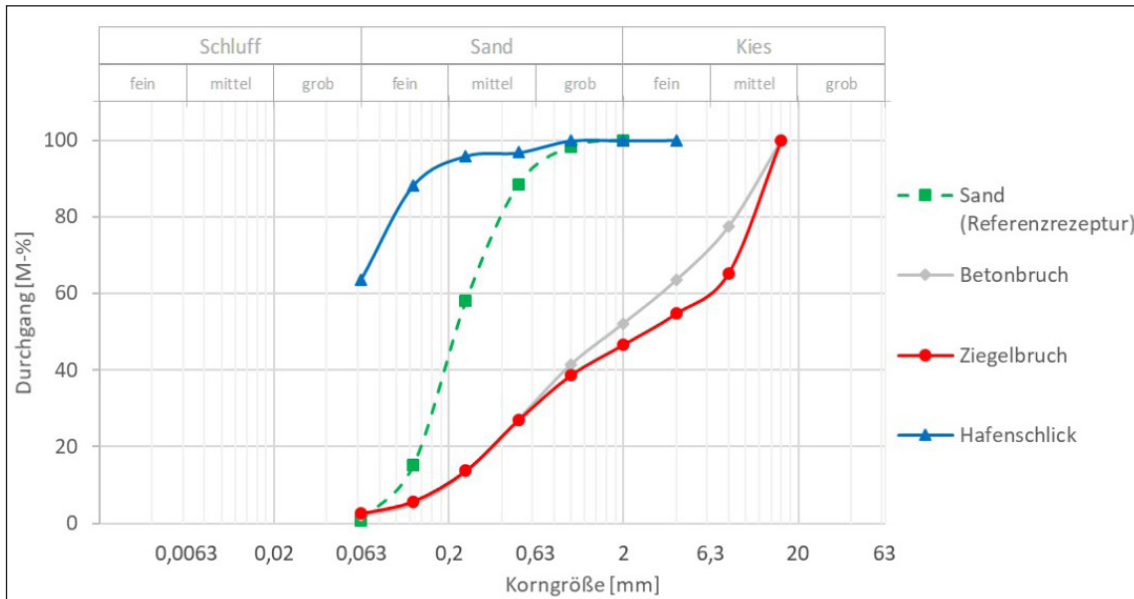


Fig. 4: Sieblinien des verwendeten Recycling-Materials (in Anlehnung an DIN EN ISO 17892-4)

Als Referenzrezept für die im Rahmen des Forschungsprojektes durchzuführenden Versuchsreihen wird an der HCU die in Fig. 5 aufgeführte Zusammensetzung ZFSV\_1 verwendet, wobei Sand und Wasser den Hauptanteil ausmachen. Die Materialien Betonbruch, Ziegelbruch und Hafenschlick werden dabei entsprechend den Rezepturen ZFSV\_2 und ZFSV\_3 eingesetzt.

ZFSV	=	Erdstoff	+	hydraulisches Bindemittel	+	Additiv	+	Wasser
	↓	↓		↓		↓		↓
ZFSV_1	=	Sand		Zement	+	Bentonit	+	Wasser
ZFSV_2	=	Hafenschlick	+	(Sand)	+	(Bentonit)	+	Wasser
ZFSV_3	=	RC-Material	+	(Sand)	+	Bentonit	+	Wasser

Hinweis: die in Klammern ( ) gesetzten Bestandteile werden, je nach Rezeptur, nur optional eingesetzt. Somit ergeben sich zu den hier aufgeführten Rezepturen weitere Variationen.

Fig. 5: ZFSV Rezepturen an der HCU

Fig. 6 zeigt die Probekörper der unterschiedlichen ZFSV-Rezepturen. Besonders die beiden Probekörper in der Mitte (ZFSV\_3- Beton- und Ziegelbruch ohne Sand) zeigen eine inhomogene Struktur mit verhältnismäßig vielen Lufteinschlüssen, was wahrscheinlich auf den fehlenden Feinanteil zurückzuführen ist. Die Probekörper mit einer gleichmäßigen Korngrößenverteilung, Beton- und Ziegelbruch mit Sand (ZFSV\_3- links) und Hafenschlick mit Sand (ZFSV\_2- rechts) weisen eine homogenere Struktur auf.

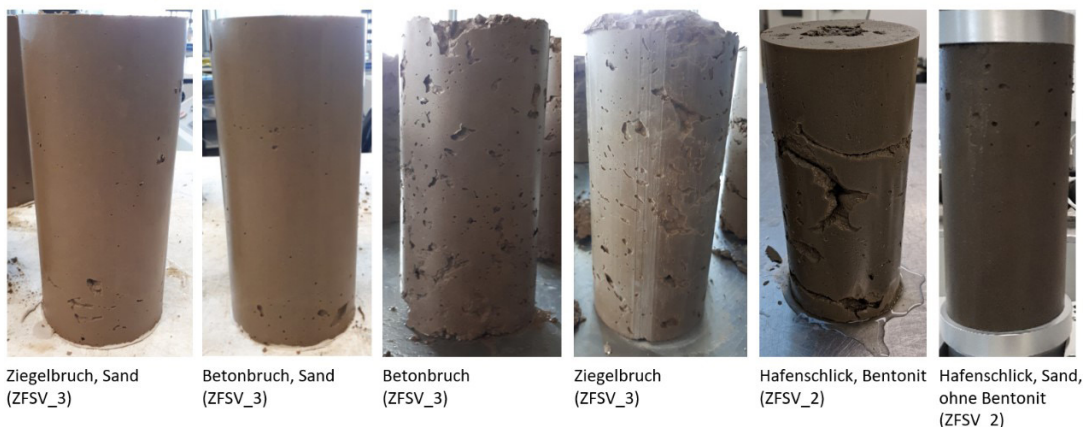


Fig.6: ZFSV-Probenkörper aus Recycling-Material

Die Anforderung der leichten Wiederaushubfähigkeit in Kombination mit einer erforderlichen Tragfähigkeit für entsprechende Aufbauten sind eine der wesentlichen technischen Herausforderung bei der Ermittlung einer geeigneten ZFSV-Rezeptur. Die leichte Wiederaushubfähigkeit nach H ZFSV mittels des Verfestigungsverlaufs wird anhand der Druckfestigkeit im ein-axialen Druckversuch gemäß DIN 18136 geprüft. Dafür sollen die Werte in einem definierten Bereich (Fig. 7) liegen.

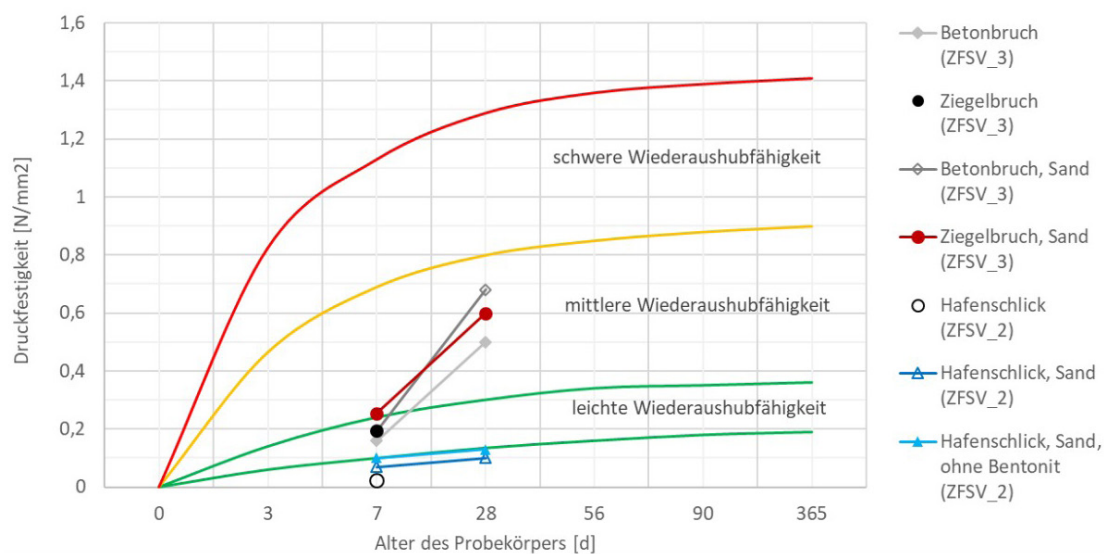


Fig. 7: Schematische Darstellung des Verfestigungsverlaufs [Datenbasis: (FGSV 2012)] und Messwerte von Recycling-Rezepturen (Fig. 6)

Erste Versuche haben ergeben, dass bei den Recycling-Materialien Beton- und Ziegelbruch starke Nachverfestigungen auftreten. Während die Druckfestigkeiten nach 7 Tagen noch innerhalb der leichten Wiederaushubfähigkeit lagen, liegen sie bereits nach 28 Tagen im oberen Bereich der mittleren Wiederaushubfähigkeit.

Hafenschlick verhält sich hier deutlich anders. Verwendet man reinen Hafenschlick als Grundmaterial (Fig. 5) erhält man einen Probekörper mit einer geringen Festigkeit. Kombiniert man die Erdstoffe Hafenschlick und Sand, erhält man sowohl mit als auch ohne Bentonit höhere Druckfestigkeiten, die bei den ersten Versuchen nur knapp unter der Grenze zur leichten Wiederaushubfähigkeit liegen.

### Interpretation der ersten Ergebnisse

Grundsätzlich lassen die bisher gesammelten Erkenntnisse den Schluss zu, dass die untersuchten Materialien für die Herstellung von ZFSV geeignet sind. Die starke Nachverfestigung der Mischungen mit Beton- und Ziegelbruch sind vermutlich auf puzzolanische Reaktionen zurückzuführen. Mit einer Reduzierung des Zementanteils in der Rezeptur kann man den Verlauf der Verfestigung abflachen, genaue Aussagen lassen sich aber erst nach umfangreicheren Untersuchungen und Langzeitversuchen treffen. Der Verfestigungsverlauf der Hafenschlick-Rezepturen lässt sich mit einer Erhöhung des Zement- bzw. Sandanteils verbessern, so dass für entsprechende Langzeituntersuchungen auch mit dem gewünschten Verfestigungsverlauf zu rechnen ist. Hafenschlick bindet viel Wasser, was auch die wesentliche Aufgabe von Bentonit als Additiv in ZFSV ist. Hafenschlick kann daher ggf. Bentonit als Additiv ersetzen. Auch hier müssen weitere Untersuchungen zeigen, ob diese Rezeptur alle Anforderungen erfüllt und sich für die Praxisanwendung eignet.

Bei den bisherigen Druckfestigkeitsprüfungen konnte beobachtet werden, dass die Streuung der Ergebnisse bei den grobkörnigeren Recycling-Materialien höher war, als beispielsweise bei den Probekörpern der Referenz-Rezeptur. Gründe hierfür könnten eine inhomogenere Struktur des ZFSV und eine größere Neigung zu Lufteinschlüssen im Probekörper sein. In weiteren und über einen längeren Zeitraum laufenden Versuchsreihen, müssen daher mehr Probekörper abgedrückt werden, um eine belastbare Datengrundlage zu erhalten.

### Fazit

Die aus den bisherigen Untersuchungen gesammelten Erkenntnisse zeigen, dass die Verwendung von Recycling-Material zur ZFSV-Herstellung eine interessante Alternative zu klassischen ZFSV und konventioneller Sandverfüllung ist.

Auch Hafenschlick zeigt in den ersten Versuchen vielversprechende Ergebnisse und rechtfertigt eine weitere und genauere Untersuchung. Die Verwendung von Hafenschlick als Baumaterial ist bis dato noch eine Ausnahme, da die anthropogene Schadstoffbelastung einen Einbau nur unter bestimmten Randbedingungen zulässt. Wenn die ZFSV-Rezeptur diese Schadstoffe ausreichend immobilisieren kann, könnte das eine neue Verwertungsmöglichkeit für Hafenschlick bedeuten. Durch seine feinkörnigere Zusammensetzung wäre auch eine Kombination mit den grobkörnigeren Recyclingbaustoffen wie z.B. Beton- und Ziegelbruch denkbar. Hierfür werden weitere Untersuchungen erforderlich sein, um eine belastbare Aussage treffen zu können. Neben der technischen Eignung der Materialien werden vor allem die umweltrelevanten Aspekte eine entscheidende Rolle spielen.

### Danksagung

An dieser Stelle sei dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung des Projektes "FW-ZFSV 4.0- Fernwärmeleitungsbau 4.0 mit zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen für niedrige und hohe Betriebstemperaturen" (FKZ 03EN3022D) gedankt. Zudem danke ich Dr. Bernd Wagner (AGFW) für das Peer-Review, sowie Dana Schmetkamp und Marcus Illguth für ihre Unterstützung bei den Laborversuchen.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Literatur

AGFW (2017) - Heft 43: „EnEff: Wärme: Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung“, Juni 2017; ISBN 3-89999-068-4

AGFW (2019) - Heft 50: „Nachhaltige Sektordurchdringung von ZFSV als Bettungsmaterial im Fernwärmeleitungsbau“, November 2019; ISBN 3-89999-079-X

BMU (2021) - <https://www.bmu.de/gesetz/kreislaufwirtschaftsgesetz>, zuletzt aufgerufen: 12.11.2021

BMU (2021) - Pressemitteilung Nr. 146/21 | Kreislaufwirtschaft (25.06.2021)]

Buhck (2021) - <https://wiershop.buhck-gruppe.de/was-wir-bieten/baustoffe/rc-produkte>, zuletzt aufgerufen: 12.11.2021

DIN 18136:2003-11, Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Einaxialer Druckversuch

DIN EN ISO 17892-7:2018-05, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 7: Einaxialer Druckversuch (ISO 17892-7:2017); Deutsche Fassung EN ISO 17892-7:2018

DIN EN ISO 17892-4:2017-04, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 17892-4:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17892-4:2016

FGSV (2012) - H ZFSV / Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau; ISBN 978-3-86446-033-3

FGSV (2020) - TL BuB E-StB 20 / Technische Lieferbedingungen für Bodenmaterialien und Baustoffe für den Erdbau im Straßenbau; ISBN: 978-3-86446-289-4

Handbuch ZTV E-StB (2019) - Kommentar und Kompendium Erdbau | Felsbau | Landschaftsschutz für Verkehrswege; ISBN: 978-3-7812-2052-2

HPA (2021) - Produktinformationsblatt Metha-Material (12.08.2020)

Kreislaufwirtschaft Bau (2018) - Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018 / Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018, Herausgeber: Bundesverband Baustoffe–Steine und Erden e.V

RAL (2014) –Pressemitteilung „Flüssigboden: Ungeahnte Möglichkeiten rund um den Bau“ - RAL Gütegemeinschaft Flüssigboden e. V. (24.01.2014)

Remex (2012) – Fachartikel ‚Ersatzbaustoffe: Grundlagen für den Einsatz von RC-Baustoffen und HMV-Asche im Straßen- und Erdbau‘ / Dipl.-Ing. A. Onkelbach MSc, Dr. rer. nat. J Schulz, August 2012