

## Prüfung und Bewertung der Dauerhaftigkeit zeitweise fließfähiger und selbstverdichtender Verfüllbaustoffe (ZFSV) im Unterbau von Verkehrsflächen

FA 5.205

Forschungsstelle: Technische Universität München, Zentrum Geotechnik, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau (Prof. Dr.-Ing. R. Cudmani)

Bearbeiter: Birle, E. / Huber, S. / Cudmani, R. / Zeni, M

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: September 2022

### 1 Einleitung

Zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) sind Baustoffe, die in der Regel aus einem mineralischen Basismaterial, Zement, Tonmehl, Wasser und eventuell Zusatzstoffen bestehen und im Einbauzustand in flüssiger Konsistenz vorliegen. Diese ermöglicht es dem Baustoff, allein unter Einwirkung der Schwerkraft zu fließen und Hohl- und Zwischenräume auszufüllen. Als Basismaterial können sowohl natürliche Baustoffe (zum Beispiel Bodenaushub) als auch rezyklierte oder industrielle Gesteinskörnungen eingesetzt werden. Durch die Zugabe von Zusatzstoffen wie zum Beispiel Beschleunigern, Plastifikatoren und Farbpigmenten können die Eigenschaften des Gemischs verbessert beziehungsweise angepasst werden. Durch die hydraulische Reaktion des Wassers mit dem Bindemittel wird das Wasser mit der Zeit wieder gebunden und der Baustoff gewinnt an Festigkeit. Die Endprodukteigenschaften können mit den in der Bodenmechanik üblichen Kennwerten für die Scherfestigkeit (Reibungswinkel und Kohäsion) und die Steifigkeit beschrieben werden (Sandig, 2015). Je nach Anwendungsbereich sind unterschiedliche Anforderungen an die zeitlich veränderlichen mechanischen, physikalischen und rheologischen Eigenschaften von ZFSV zu stellen, die durch die Wahl einer geeigneten Rezeptur erzielt werden können.

Im Vergleich zu anderen Baustoffen sind ZFSV relativ neu und werden deswegen nur teilweise im erdbautechnischen Regelwerk berücksichtigt. Die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB 17, FGSV 2017) geben dabei lediglich vor, dass die Übereinstimmung der Baustoffeigenschaften mit den vorab festgelegten Anforderungen an das zulässige Größtkorn, die Fließfähigkeit, die Tragfähigkeit, die Druckfestigkeit, die Wiederaushubfähigkeit sowie die Volumen- und Raumbeständigkeit nachzuweisen sind. In den Hinweisen für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau (H ZFSV, FGSV 2012) werden geeignete Baustoffe zur Herstellung von ZFSV und geeignete Prüfverfahren zur Bestimmung der Frisch- und Endprodukteigenschaften genannt.

Unter dem Begriff Dauerhaftigkeit versteht man die Fähigkeit eines Baustoffs, seine Eigenschaften (zum Beispiel Festigkeit, Permeabilität, Volumenstabilität) über lange Zeiträume trotz der auftretenden Einwirkungen (zum Beispiel witterungsbedingte Einwirkungen wie Austrocknung, Wiederbefeuchtung oder Frost-Tau-Wechsel) aufrechtzuerhalten. Die Frostbeständigkeit sowie die Beständigkeit gegenüber Trocken-Feucht-Wechsel von ZFSV wurde bisher vereinzelt anhand von Prüfverfahren, die für Beton beziehungsweise bindemittelbehandelte Böden entwickelt worden sind, untersucht. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass die Versuche insbesondere bei Frostbeanspruchung frühzeitig abgebrochen werden mussten, da die Proben zumeist zu stark beansprucht wurden und bereits während der Versuchsdurchführung zerfielen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden umfangreiche Versuche an verschiedenen ZFSV aus unterschiedlichen Basismaterialien durchgeführt. Es wurden Versuchsabläufe entwickelt, mit denen die Beständigkeit von ZFSV gegenüber Frost-Tau- und Trocken-Feucht-Wechsel sowie gegenüber Wasserlagerung untersucht werden kann. Unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse wurde eine Prüfvorschrift entworfen und Vorschläge für ein Kriterium zur objektiven und zuverlässigen Bewertung der Dauerhaftigkeit von ZFSV abgeleitet.

### 2 Untersuchungskonzept

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden unter Berücksichtigung der aus der Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnisse geeignete Prüfverfahren identifiziert, mit denen die Dauerhaftigkeit von ZFSV für die Anwendung im Unterbau und Untergrund von Verkehrsflächen realitätsnah, praxisgerecht und zuverlässig geprüft werden kann. Als Beanspruchungsarten wurden dabei Frost-Tau- und Trocken-Feucht-Wechsel sowie der Einfluss einer Wasserlagerung berücksichtigt. Zunächst wurde eine Rezeptur aus einem grobkörnigen Basismaterial (SE) entwickelt, die die Anforderung an die Frischprodukteigenschaften (Ausbreitmaß von 50 bis 70 cm und keine Entmischungsneigung) sowie die Empfehlungen für die einaxiale Druckfestigkeit gemäß den H ZFSV erfüllte. Der hergestellte ZFSV wurde dann hinsichtlich seiner Dauerhaftigkeit untersucht. Frost-Tau-, Trocken-Feucht- und Wasserlagerungsprüfungen wurden dazu in Anlehnung an deutsche und internationale Prüfverfahren durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass diese Verfahren, die in der Regel für die Prüfung von Beton beziehungsweise bindemittelbehandelten Böden entwickelt wurden, für ZFSV nicht geeignet sind. Die Prüfverfahren wurden dann stufenweise angepasst, bis durchführbare Prüfverfahren für die drei Beanspruchungen gefunden wurden. Die drei entwickelten Prüfverfahren wurden dann an weiteren zwei Rezepturen aus dem grobkörnigen Basismaterial sowie an einer Rezeptur aus einem feinkörnigen Basismaterial (TL) wiederholt.

Die Reihenuntersuchungen dienten der Validierung der drei entwickelten Prüfverfahren. Dafür wurden zwei weitere Rezepturen aus dem feinkörnigen Basismaterial sowie drei Rezepturen aus einem gemischtkörnigen Basismaterial (SU) hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit untersucht. Dabei wurde beobachtet, dass die drei entwickelten Versuche selbst an stark beschädigten Proben (zum Beispiel Rezepturen mit TL nach Frost-Tau-Prüfung mit hohem Ausgangswassergehalt) nicht nur durchführbar waren, sondern auch plausible Ergebnisse lieferten. Es war deshalb nicht erforderlich, den Versuchsablauf im Rahmen der Reihenuntersuchungen weiter anzupassen.

Die im Rahmen der Vor- und Reihenuntersuchungen entwickelten Prüfverfahren wurden als Grundlage zur Entwicklung einer Prüfvorschrift für die Eignungsprüfung zur Dauerhaftigkeit von ZFSV verwendet. Der Entwurf der Prüfvorschrift enthält nicht nur eine detaillierte Beschreibung der eigentlichen Versuche zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit bei Frost-Tau- und Trocken-Feucht-Wechseln sowie bei Wasserlagerung, sondern auch Hinweise zur Probenvorbereitung und zu den Lagerungsbedingungen der Proben während der Aushärtung. Zusätzlich sind im Entwurf auch die Versuchsgерäte und das Verfahren zur Auswertung der Versuchsergebnisse beschrieben.

Unter Berücksichtigung der im Forschungsvorhaben durchgeführten Reihenuntersuchungen an neun ZFSV und in Anlehnung an in der Literatur bereits vorhandene Kriterien zur Beurteilung der Frostbeständigkeit von Böden und Boden-Bindemittel-Gemische wurden Vorschläge zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von ZFSV konzipiert. Für eine abschließende Beurteilung und Aufnahme in das erdbautechnische Regelwerk fehlen jedoch noch Anforderungswerte, die von ZFSV zu erfüllen sind, um diese als beständig beurteilen zu können. Dazu besteht weiterer Forschungsbedarf.

### 3 Entwickelte Prüfverfahren zur Dauerhaftigkeit von ZFSV

#### 3.1 Vorversuche zur Dauerhaftigkeit von ZFSV

Ziel der Vorversuche war die Auswahl und – falls erforderlich – die Weiterentwicklung geeigneter Prüfverfahren zur Bewertung der Dauerhaftigkeit von ZFSV. Auf die zu beurteilenden Materialien werden als typische Beanspruchungen in der Regel Frost-Tau- sowie Trocken-Feucht-Zyklen und eine Wasserlagerung aufgebracht und deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des zu beurteilenden Materials anhand von unterschiedlichen Parametern ermittelt. Die Prüfverfahren wurden auf Grundlage der Literaturrecherche ausgewählt und stammen aus dem Bereich der bindemittelbehandelten Böden.

Zunächst wurde eine Rezeptur aus einem grobkörnigen Basismaterial beziehungsweise aus einem enggestuften 0/2 mm Quarzsand (Bodengruppe SE nach DIN 18196) und einem Kalksteinmehl entwickelt. Als Bindemittel wurde, wie bei allen später entwickelten Rezepturen, ein reiner Portlandzement CEM I 42,5 N verwendet. Der Zement wies eine Korndichte nach DIN EN

ISO 17892-3 von  $\rho_s = 3,09 \text{ g/cm}^3$  auf. Dieser Zement besitzt eine begrenzte langfristige Festigkeitsentwicklung, wodurch eine unerwünschte Festigkeitszunahme mit der Zeit vermieden werden kann und eine leichte Wiederaushubfähigkeit gewährleistet wird. Als Additiv wurde ausschließlich aktivierter Natriumbentonit (Na-Bentonit, Bodengruppe TA nach DIN 18196) zugegeben, um die Frischprodukteigenschaften zu optimieren beziehungsweise um eine Entmischung der Suspension zu verhindern. Dem trockenen Gemisch wurde stufenweise Wasser zugegeben, bis eine ausreichende Fließfähigkeit beziehungsweise ein Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 zwischen 50 und 70 cm erreicht wurde. Zusätzlich wurde das Absetzmaß nach DIN EN 445 ermittelt, um eine eventuelle Wasserabsonderung beurteilen zu können. Es wurden anschließend zylindrische Probekörper ( $H/D = 2/1$ ) hergestellt, an denen die einaxiale Druckfestigkeit nach 7, 28 und 56 Tagen nach TP BF-StB Teil B 11.3 ermittelt wurde. Die Mischungsverhältnisse wurden so lang variiert, bis sowohl die Anforderungen an die frische Suspension als auch an die zeitliche Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit erfüllt wurden. Entsprechend dem Merkblatt H ZFSV sollte dabei die einaxiale Druckfestigkeit in einer Bandbreite liegen, die eine leichte bis mittlere Wiederaushubfähigkeit gewährleistet.

Zunächst wurden alle Versuche zur Dauerhaftigkeit an der ersten Rezeptur (Referenzrezeptur SE2) durchgeführt. Zur Prüfung der Beständigkeit von ZFSV gegenüber Frost-Tau- sowie Trocken-Feucht-Wechsel wurden zunächst für Boden-Zement-Gemische entwickelte Prüfverfahren identifiziert. Die Prüfung sollte nach den jeweiligen Beanspruchungen der ZFSV anhand von einaxialen Druckversuchen erfolgen. Sowohl bei der Prüfung der Beständigkeit von ZFSV gegenüber Frost-Tau-Wechseln nach den TP BF-StB Teil B 11.1 als auch bei der Prüfung der Beständigkeit von ZFSV gegenüber Trocken-Feucht-Wechseln nach ASTM D 559 hat sich jedoch gezeigt, dass eine Prüfung freistehender Probekörper (das heißt von Probekörpern ohne seitliche Stützung) aufgrund einer zu starken Schädigung der Probekörper durch die jeweilige Beanspruchungsart nicht möglich ist. Als weiteres Prüfverfahren zur Bewertung der Beständigkeit von ZFSV gegenüber Frost-Tau-Wechsel wurde die Prüfung nach DIN CEN/TS 13286-54 durchgeführt. Bei der Prüfung werden die Probekörper in eine Plastikfolie eingeschlagen und sind aufgrund der fehlenden Wasseraufnahme gegenüber einer Frost-Tau-Beanspruchung deutlich unempfindlicher. Aus diesem Grund liefert die Prüfung eine zu günstige Darstellung der Frostbeständigkeit von ZFSV und ist damit für diese Materialien nicht geeignet.

Es wurden in der Folge drei Prüfverfahren in Anlehnung an TP BF-StB Teil B 7.1 entwickelt. Die drei Beanspruchungen (Frost-Tau- beziehungsweise Trocken-Feucht-Wechsel und Wasserlagerung) werden an in CBR-Formen eingebaute Proben ab einem Probealter von 28 Tagen nach Herstellung aufgebracht. Am Ende des jeweiligen Dauerhaftigkeitsversuchs wird der CBR-Wert ermittelt und mit dem CBR-Wert verglichen, der an unbeanspruchten Proben aus der gleichen Mischung nach 28 Tagen

bestimmt wurde. Die drei Versuche wurden dann an weiteren Rezepturen aus dem grobkörnigen Basismaterial mit unterschiedlichen Wassergehalten durchgeführt. Zusätzlich wurde auch eine Rezeptur aus einem feinkörnigen Basismaterial untersucht. Dabei handelte es sich um einen leicht plastischen Ton (Bodengruppe TL nach DIN 18196).

### 3.2 Reihenuntersuchungen zur Dauerhaftigkeit von ZFSV

Das Ziel der Reihenuntersuchungen war die Validierung der im Rahmen der Vorversuche entwickelten Prüfverfahren zur Bewertung der Dauerhaftigkeit von ZFSV gegenüber Frost-Tau- beziehungsweise Trocken-Feucht-Wechsel und Wasserlagerung. Zunächst wurden die drei Versuche an zwei weiteren Rezepturen aus dem feinkörnigen Basismaterial durchgeführt. Um die Übertragbarkeit der Prüfverfahren auf ein drittes Basismaterial zu überprüfen, wurden zusätzlich drei Rezepturen aus einem gemischtkörnigen Basismaterial beziehungsweise aus einem schluffigen Sand (Bodengruppe SU nach DIN 18196) entwickelt. Die drei Rezepturen unterschieden sich lediglich im Wassergehalt beziehungsweise im Wasser-zu-Zement-Verhältnis. An den drei ZFSV wurden dann die Versuche der drei Prüfverfahren zur Dauerhaftigkeit durchgeführt.

Die Anwendbarkeit der drei Prüfverfahren wurde im Rahmen der Reihenuntersuchungen bestätigt und eine Ermittlung des CBR-Werts war immer möglich, selbst an stark beschädigten Proben (zum Beispiel an einer Rezeptur aus dem feinkörnigen Basismaterial mit hohem Ausgangswassergehalt nach drei Frost-Tau-Zyklen). Es war deshalb nicht erforderlich, die im Rahmen der Vorversuche entwickelten Prüfverfahren zu ändern beziehungsweise anzupassen. Außerdem lassen sich zusätzlich deutliche Trends aus den an neun unterschiedlichen ZFSV durchgeführten Versuchen erkennen. Erstens hat eine Wasserlagerung kaum einen Einfluss auf die Festigkeit beziehungsweise auf den CBR-Wert von ZFSV. Die Erklärung dafür ist, dass die Proben hydraulisch abbinden und eine Wasserlagerung im Hinblick auf den Abbindeprozess eine günstige Situation darstellt und eine Austrocknung verhindert. Eine Frost-Tau-Einwirkung führt hingegen bei allen untersuchten Mischungen zu einem starken Festigkeitsabfall (um ca. 75 % bezogen auf den CBR-Wert nach 28 Tagen, das heißt Restfestigkeit von ca. 25 %). Der Grund dafür ist der hohe Ausgangswassergehalt von ZFSV, der während der Frostbeanspruchung aufgrund der Volumenvergrößerung des Wassers beim Gefrieren zu Hebungen führt und damit die Proben stark beschädigt. Bei den Trocken-Feucht-Versuchen wurde beobachtet, dass diese Beanspruchung einen Festigkeitsverlust von ca. 35 % verursacht, wobei eine Rissbildung während der Austrocknungsphase zu beobachten war.

### 3.3 Entwurf einer Prüfvorschrift

Für die drei entwickelten Verfahren zur Prüfung der Dauerhaftigkeit von ZFSV gegenüber Frost-Tau- beziehungsweise Trocken-Feucht-Wechsel und Wasserlagerung wurde ein Vorschlag für eine Prüfvorschrift in Anlehnung an TP BF-StB Teil B 7.1

formuliert. Zunächst werden darin die erforderlichen Geräte für die Herstellung der Probekörper und für die Durchführung der einzelnen Versuche beschrieben. Danach wird auf die Herstellung der Mischungen und der Probekörper sowie auf die Lagerungsbedingungen der Proben zwischen Herstellung beziehungsweise Einbau und Beginn der Dauerhaftigkeitsversuche eingegangen. Anschließend werden die Vorbehandlung der Proben bei Wasserlagerung und die Durchführung der Frost-Tau- und der Trocken-Feucht-Beanspruchungen beschrieben. Abschließend wird im Entwurf der Prüfvorschrift die Durchführung des CBR-Versuchs und die Auswertung der Ergebnisse erläutert.

### 3.4 Ableitung von Kriterien zur Bewertung der Dauerhaftigkeit von ZFSV

Damit aus den Ergebnissen der Dauerhaftigkeitsversuche an ZFSV Aussagen über die Beständigkeit von ZFSV getroffen werden können, sind Anforderungskriterien zu definieren. Dafür werden im Bericht unterschiedliche Verfahren vorgeschlagen. Diese greifen beispielsweise Anforderungswerte an den CBR-Wert oder an den Verformungsmodul  $E_{v2}$  auf. Die eindeutige Formulierung eines Kriteriums ist jedoch noch nicht möglich, da im erdbautechnischen Regelwerk bisher keine Anforderungen an den CBR-Wert für ZFSV zu finden sind.

## 4 Folgerungen und Empfehlungen

Aus den Versuchsergebnissen hat sich gezeigt, dass die drei untersuchten Beanspruchungen unterschiedliche Einflüsse auf ZFSV beziehungsweise auf ihre Festigkeit haben. Eine Wasserlagerung hat keinen schädigenden Einfluss auf den CBR-Wert von ZFSV, da diese bereits vor Beginn des Dauerhaftigkeitsversuchs wassergesättigt sind und die Wasserlagerung eine Austrocknung verhindert. Der hohe Wassergehalt führt jedoch zu einer großen Frostempfindlichkeit, die nach Durchführung von Frost-Tau-Wechseln nicht nur visuell sichtbar ist, sondern sich auch durch einen niedrigen CBR-Wert ausdrückt. Vor diesem Hintergrund ist zu überlegen, ob ZFSV in frostgefährdeten Bereichen überhaupt eingesetzt werden sollten. Nach der Trocken-Feucht-Beanspruchung wurden ebenfalls kleinere CBR-Werte ermittelt, wobei der Festigkeitsverlust geringer als nach der Frost-Tau-Beanspruchung war. Noch ungeklärt ist jedoch, welcher CBR-Wert nach Beanspruchung zu fordern ist, um von einer ausreichenden Beständigkeit des Materials ausgehen zu können. In diesem Zusammenhang sollten Anforderungswerte an ZFSV beim Einsatz im Erdbau erstellt werden, mit denen die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der jeweiligen Bauwerke sichergestellt werden kann. In diesem Zusammenhang sollte auch untersucht werden, inwieweit Trocken-Feucht-Wechsel und Frost-Tau-Beanspruchungen im Feld auftreten und inwieweit die Laborversuche auf reale Verhältnisse übertragen werden können.