

IGF-Vorhaben Nr.: 17996 N
Bewilligungszeitraum: 01.12.2013 – 30.11.2016 (verlängert bis 30.04.2017)
Forschungsthema: Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Laborprüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes von vorgefertigten Straßenbauerzeugnissen auf Praxisverhältnisse
Forschungsstelle 1: VDZ Düsseldorf
Forschungsstelle 2: Universität Kassel

1 Ziel und Struktur des Forschungsvorhabens

Das Ziel des Forschungsvorhabens bestand in der Beantwortung der Frage, ob die beiden gängigen Frost-Tausalz-Prüfverfahren für Betonpflastersteine (Arbeitspaket C „Normfrost“ – der Slab-Test nach DIN EN 1338 und das CDF-Verfahren nach DIN CEN/TS 12390-9 – in ihrer derzeitigen Form geeignet sind, den Frost-Tausalzwiderstand von verlegten Betonpflastersteinen unter praktischen Umgebungsbedingungen ausreichend genau abzubilden. Hinweise aus der Praxis deuteten darauf hin, dass dies nicht immer gegeben ist. Daher wurde das Verhalten verlegter Betonpflastersteine mit Ergebnissen aus Laborfrostprüfungen verglichen. Aus diesem Vergleich sollten Hinweise abgeleitet werden, ob und (wenn ja) welche Parameter bzw. Bedingungen im Prüfverfahren verändert werden sollten.

Das Forschungsvorhaben war in fünf Arbeitspakete gegliedert. Im Mittelpunkt des Arbeitspakets A (Forschungsstelle 1) standen die repräsentative Probenahme und die Eingangsuntersuchung an den Betonpflastersteinen aus den Werken. Im Rahmen des Arbeitspakets B wurden einzelne Betonpflastersteine von seit mehreren Jahren in der Nutzung befindlichen Betonpflasterflächen mit Messtechnik ausgestattet über mehrere Winter beobachtet (Forschungsstelle 2). Im Arbeitspaket C wurde der Frost-Tausalzwiderstand von Betonpflastersteinen mit den beiden o. g. Laborprüfverfahren untersucht (Forschungsstelle 1). Im Arbeitspaket D wurden in der Forschungsstelle 1 verlegte Betonpflasterflächen in Frostkammern unter praxisnahen Umgebungsbedingungen untersucht. In Arbeitspaket E beschäftigte sich die Forschungsstelle 2 mit der Untersuchung des Einflusses von Maschinenparametern der Fertigungsanlage auf die Verbundfestigkeit zwischen Vorsatz- und Kernbeton. Im letzten Teil des Forschungsprojekts wurden zusätzliche Betonpflastersteine mit geringerer Güte in einer Technikumsanlage hergestellt und untersucht.

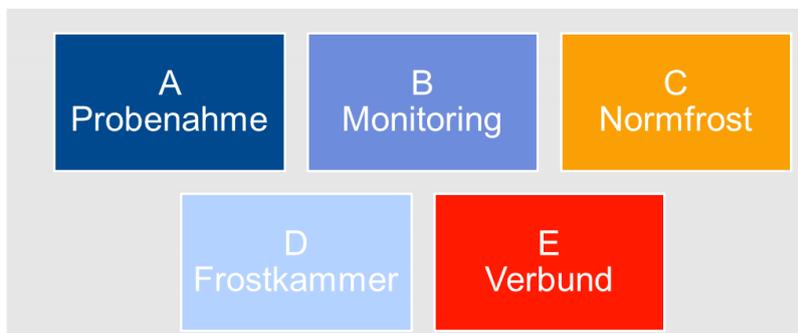


Bild 1 Arbeitspakete im Forschungsvorhaben IGF 17996 N

2 Untersuchungen

2.1 Probenahme, Eingangs- und Begleituntersuchungen (AP A)

2.1.1 Großtechnisch hergestellte Betonpflastersteine

Im Arbeitspaket A wurde der Frage nachgegangen, auf welchem Wege die unterschiedliche Güte bzw. Qualität von Betonpflastersteinen in Bezug auf ihren Frost-Tausalz-widerstand (FTSW) ggf. bereits in den Eingangsuntersuchungen für das Projekt erkannt werden kann. Weiterhin war zu klären, ob die entnommenen Proben für die gesamte Produktionslinie repräsentativ waren. Die Hersteller lieferten Betonpflastersteine, die sie aus allen Bereichen eines Herstellbretts entnommen hatten. Für die Untersuchungen wurden die Betonpflastersteine nach Ihrem Unterscheidungsmerkmal „Steinrohddichte“ (als Maß für die Dichte des Gefüges) ausgewählt. Nach Anlieferung der Steine auf Paletten fanden lagenweise die Eingangsuntersuchungen statt. In **Tabelle 1** sind die gelieferten Pflastersteinsorten aufgeführt. Die Sorten V0, V1 und V2 unterschieden sich in Ihrer Steinrohddichte, die insbesondere infolge unterschiedlicher Einstellungen des Betonpflastersteinfertigers erzielt wurden. Die Sorten KC und KN unterschieden sich in Ihrer Steinrohddichte hauptsächlich aufgrund ihrer unterschiedlichen Betonzusammensetzung (Rezeptur).

Tabelle 1 Merkmale der untersuchten Betonpflastersteinsorten aus großtechnischer Herstellung

Hersteller	Steinsorte	Merkmale (Güte) ¹⁾	minimale Rohddichte [kg/dm ³]	mittlere Rohddichte [kg/dm ³]	maximale Rohddichte [kg/dm ³]
1	V0	Betonpflastersteine mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand (CDF-Verfahren) - Standardprodukt	2,34	2,40	2,44
	V1	Hauptrüttelzeit von 5,8 auf 2,8 s verkürzt	2,29	2,34	2,39
	V2	- Hauptrüttelzeit von 5,8 auf 2,8 s verkürzt - Wasser/Zement-Verhältnis von 0,38 auf 0,36 verringert - Auflastdruck 2,5 s nach Beginn des Hauptrüttelns	2,27	2,33	2,38
2	KC	Betonpflastersteine mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand (CDF-Verfahren)	2,29	2,32	2,36
	KN	Betonpflastersteine mit normalem Frost-Tausalz-Widerstand (CDF-Verfahren)	2,18	2,25	2,31
3	RS	Normale Güte ¹⁾	2,18	2,22	2,25

¹⁾ gemäß den Aussagen des Herstellers

Im Labor der Forschungsstelle 1 wurden folgende Eigenschaften zur Charakterisierung der Güte der entnommenen Betonpflastersteine bestimmt:

- Rohddichte nach EN 1338
- Wasseraufnahme nach EN 1338
- kapillare Wasseraufnahme (in Anlehnung an DAfStb Heft 422)
- Spaltzugfestigkeit EN 1338
- Druckfestigkeit DIN 18501

Ergänzend wurden die Ausgangsstoffe zur Herstellung der Betonpflastersteine untersucht.

Die höchste Rohdichte der untersuchten Betonpflastersteine aus großtechnischer Herstellung betrug $2,44 \text{ kg/dm}^3$ (Sorte V0, siehe Tabelle 1). Die geringste Steinrohddichte betrug $2,18 \text{ kg/dm}^3$ (Sorte RS). Die mittleren Rohdichten dieser Betonpflastersteine-Sorten unterschieden sich von Sorte zu Sorte um maximal $0,07 \text{ kg/m}^3$ voneinander. Die Wertebereiche der einzelnen Sorten (minimale und maximale Steinrohddichte) überlappten sich teilweise. Nimmt man die Rohdichte als Kriterium für die Güte, so lagen diese für alle Betonpflastersteinsorten aus großtechnischer Herstellung nahe beieinander. Alle Betonpflastersteinsorten erfüllten die Anforderung der DIN EN 1338 an die maximale Wasseraufnahme von 6 M.-%. Die kapillare Wasseraufnahme (Fußbad-Verfahren) korrelierte mit der Steinrohddichte. Betonpflastersteine mit einer geringen Rohddichte wiesen die höchste kapillare Wasseraufnahme auf. Eine hohe kapillare Wasseraufnahme wurde als Indiz für eine zu erwartende hohe Abwitterung in den Frost-Tausalz-Prüfungen gewertet. Daher wurde die Steinrohddichte als Auswahlkriterium der Betonpflastersteine für die Untersuchungen verwendet.

Mit Ausnahme der Sorte KN (3,5 MPa) erreichten alle Betonpflastersteine die in DIN EN 1338 geforderte mittlere Mindestspaltzugfestigkeit von 3,6 MPa. Bei der Sorte KN handelte es sich gemäß Herstellerangabe um eine nicht CDF-beständige Rezeptur, d. h. es wurden hohe Abwitterungen im CDF-Verfahren erwartet.

Die Mindestdruckfestigkeit der zurückgezogenen nationalen Betonpflastersteinnorm DIN 18501 von 60 MPa wurde von einigen, aber nicht von allen Sorten erreicht. Von jeder Sorte wurden fünf Betonpflastersteine mit hoher und fünf mit geringer Rohddichte untersucht. Im hohen Rohddichtebereich (V0 (2,44); V1 (2,38); V2 (2,36); KN (2,29); KC (2,34); RS (2,22) kg/dm^3) erreichten die Betonpflastersteine der Sorten V0, KN und KC die Mindestdruckfestigkeit. Im niedrigen Rohddichtebereich (V0 (2,38); V1 (2,33), V2 (2,31), KN (2,22), KC (2,31); RS (2,17) kg/dm^3) wurde die Mindestdruckfestigkeit von den Betonpflastersteinen der Sorten V0 und KC erreicht.

Die Karbonatisierungstiefe (Betonpflastersteinalter 182 Tage) im Laborklima (20/65) war mit rd. 9,5 bis 11,5 mm (Vorsatz) bzw. 16,5 bis 18,0 mm (Kernbeton) um den Faktor 5 höher als die Karbonatisierungstiefe der im Freien gelagerten Herstellersteine. Die Karbonatisierungstiefe eines nach der Frostkammeruntersuchung ausgebauten Betonpflastersteins lag im Vorsatzbeton bei 1,0 bis 2,5 mm bzw. bei 1,5 bis 3,5 mm im Kernbeton und war damit vergleichbar mit der Karbonatisierungstiefe (eines untersuchten) im Freien gelagerten Betonpflasterstein aus großtechnischer Produktion.

In den Untersuchungen zum tiefenabhängigen Chloridgehalt hat sich gezeigt, dass die aufgebrauchte Tausalzlösung den gesamten Betonpflasterstein durchdringt.

2.1.2 Auf einer Technikumsanlage hergestellte Betonpflastersteine

Zusätzlich zu den Betonpflastersteinen aus großtechnischer Herstellung wurden von Mitarbeitern des Technikums der HeidelbergCement AG in Leimen auf einem Labor-Betonsteinfertiger Betonpflastersteine mit unterschiedlicher Güte / Qualität hergestellt (siehe Bild 2 und Bild 3).



Bild 2 Vollständig befüllte Betonpflastersteinformen kurz vor dem Hauptrütteln in der Technikumsanlage (Stempel fahren soeben herunter)



Bild 3 Entnahme der hergestellten Betonpflastersteine aus der Technikums-Anlage

Ausgehend von den Rezepturen der Hersteller wurden unter technischer Begleitung erfahrener Fachleute aus der Betonpflasterstein- und Zementindustrie auf der Technikumsanlage in Anlehnung an Betonpflastersteine hergestellt. Durch Variation der Vorrüttelzeit (während des Einfüllens des Kernbetons), der Zwischenrüttelzeit (nach dem Einfüllen des Kernbetons,

Verdichtung des Kernbetons) und der Hauptrüttelzeit (nach dem Einfüllen des Vorsatzbetons, gleichzeitige Verdichtung von Vorsatz- und Kernbeton) wurde die Herstellung von Betonpflastersteine mit Basaltsplitt mit hohen und geringen Abwitterungen in den Frost-Tausalz-Prüfungen angestrebt (Sorten B8 und B9). Ohne besondere Variation der Maschinenparameter wurden die Betonpflastersteine mit Kies als Gesteinskörnung hergestellt. Im Gegensatz zu den Betonpflastersteinen mit Basaltsplitt wurde bei der Herstellung der Sorten K10 und 11b variierte allein die Betonzusammensetzung der beiden unterschiedlichen Herstellerrezepturen.

Alle hergestellten Betonpflastersteine lagerten bis zur Erreichung einer ausreichenden Transport-Festigkeit im Technikum Leimen. Die auf der Technikumsanlage hergestellten Betonpflastersteine wiesen Rohdichten auf, die bis zu $0,14 \text{ kg/dm}^3$ geringer waren als die Rohdichten der Betonpflastersteine aus großtechnischer Herstellung. Mit Ausnahme der Sorte B9 (siehe Nach Anlieferung der Steine auf Paletten fanden lagenweise die Eingangsuntersuchungen statt. In **Tabelle 1** sind die gelieferten Pflastersteinsorten aufgeführt. Die Sorten V0, V1 und V2 unterschieden sich in Ihrer Steinrohichte, die insbesondere infolge unterschiedlicher Einstellungen des Betonpflastersteinfertigers erzielt wurden. Die Sorten KC und KN unterschieden sich in Ihrer Steinrohichte hauptsächlich aufgrund ihrer unterschiedlichen Betonzusammensetzung (Rezeptur).

Tabelle 1) erfüllten alle Betonpflastersteine aus der Technikums-Anlage die Anforderung aus DIN EN 1338 an eine maximale Wasseraufnahme von 6 M.-%. Die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme der Betonpflastersteine aus der Technikumsanlage erfolgte durch Prüfung der längsseitigen Stirnfläche im „Fußbad“. Damit konnte am selben Betonpflasterstein die kapillare Steighöhe des Vorsatz- und des Kernbetons bestimmt werden. In den Vorsatzbetonen der Sorten B8, B9 und K10 stieg das Wasser im Vorsatzbeton kapillar bis zu 18 % höher als im Kernbeton. Im Vorsatzbeton der Sorte K11b hingegen war die kapillare Steighöhe um bis zu 8% niedriger als im Kernbeton.

Die in DIN EN 1338 geforderte Mindestspaltzugfestigkeit von 3,6 MPa wurde nur von Betonpflastersteinen der Sorte B8 (4,1 MPa) erreicht. Bei den Sorten B9, K10 und K11b war die die Spaltzugfestigkeit geringer als die Mindestspaltzugfestigkeit (3,3; 3,3; 3,9 MPa).

Die in der früheren nationalen Norm für Betonpflastersteine DIN 18501 geforderte Mindestdruckfestigkeit von 60 MPa wurde von keiner Steinserie aus der Technikumsanlage erreicht.

2.2 Monitoring an Betonpflastersteinflächen im Nutzungszustand (AP B)

Im Arbeitspaket B wurde ein Monitoringsystem zur Erfassung von praxisnahen Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnissen in verlegten Betonpflastersteinen aufgebaut. Für das Monitoring wurden drei Standorte mit unterschiedlicher Exposition, d. h. mit der Lage in jeweils einer der drei Frosteinwirkungszonen (FEZ) der RStO 2012, gewählt (siehe Bild 4).

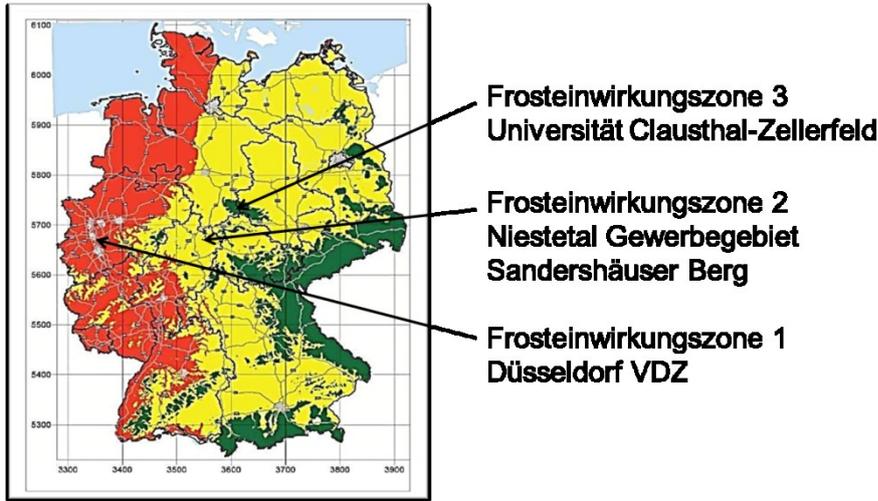


Bild 4 geographische Lage der messtechnisch beobachteten Steinflächen (Monitoringstandorte, rot=FEZ1, gelb=FEZ2, grün=FEZ3)

Das Monitoringsystem umfasste in die Betonpflastersteine eingebaute Temperatur- und Feuchtesensoren, eine jeweils in unmittelbarer Nähe aufgestellte Wetterstation zur Erfassung von Lufttemperaturen und Niederschlagsereignissen sowie eingebaute Mikrowellensensoren zur Ermittlung der Feuchtigkeit des Kernbetons der Betonpflastersteine (siehe Bild 5).

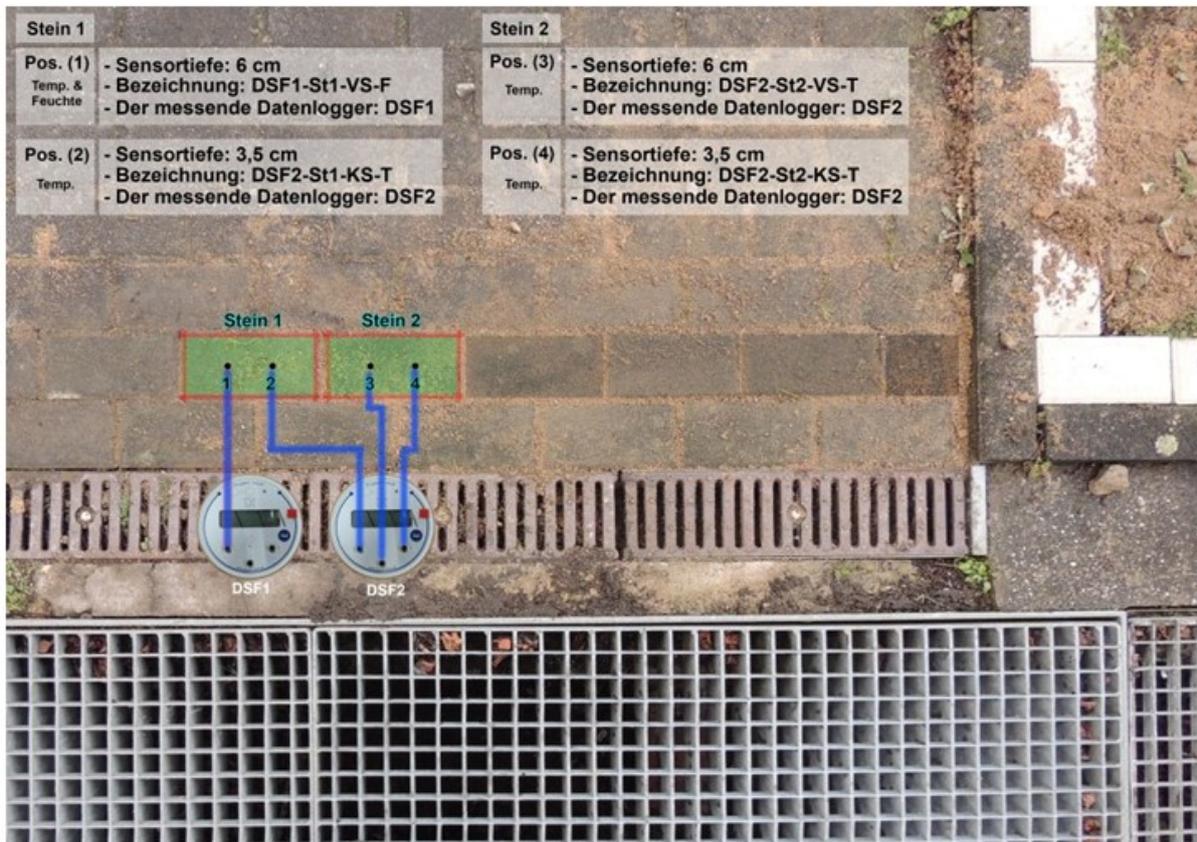


Bild 5 Mit Sensoren für Temperatur und Feuchte versehene Betonpflastersteine am Monitoring-Standort Düsseldorf, Einfahrt Tannenstraße (Quelle: Torsten Braun, Projektpartner Universität Kassel)

Die Auswertung der Daten erfolgte in einer Gegenüberstellung der Lufttemperaturen mit den Temperaturen in den Betonpflastersteinen, der Auswertung der Anzahl der Frost-Tauwechsel (FTW) und der Ermittlung der Feuchtigkeit in den Betonpflastersteinen. Als grundsätzliches Temperaturverhalten zeigte sich in allen drei Frosteinwirkungszonen, dass in den Wintermonaten die Tiefsttemperaturen der Luft in den Betonpflastersteinen nicht erreicht wurden, wobei die Temperaturen der Betonpflastersteine in den Sommermonaten größtenteils über der gemessenen Lufttemperatur lagen. Dies hängt von der Exposition der Betonpflastersteine – insbesondere der Möglichkeit der direkten Sonneneinstrahlung ab. In Bezug auf die FTW zeigte sich, dass die FTW der Luft gegenüber den FTW in den Betonpflastersteinen wesentlich häufiger eintraten und in der Anzahl von FEZ 1 bis FEZ 3 anstiegen. Bei den eingetretenen FTW in den Betonpflastersteinen kam es in der FEZ 2 zu den häufigsten Wechseln, gefolgt von der FEZ 3 und FEZ 1. Somit dürfte im Hinblick auf die Anzahl der FTW die FEZ 2 die maßgebende Beanspruchung für die Betonpflastersteine sein. Beim Vergleich der FTW in Vorsatz- und Kernbeton zeigt sich, dass im Vorsatzbeton mehr FTW auftraten als im Kernbeton.

Die Auswertungen der Feuchtegehalte, bestimmt mittels Mikrowellenmesssonden, ergaben für alle drei Monitoring-Standorte im gesamten Messzeitraum ein überwiegend gleichbleibendes Niveau der Feuchtegehalte in den Betonpflastersteinen. Die Feuchtigkeitsgehalte lagen in guter Übereinstimmung mit der Wasseraufnahme nach DIN EN 1338 im Rahmen der Charakterisierungsuntersuchungen der vor Ort verlegten Betonpflastersteine. Auch im jahreszeitlichen Wechsel zwischen Niederschlagsereignissen und niederschlagsfreien Zeiträumen zeigten sich keine wesentlichen Änderungen des Feuchtigkeitsgehaltes. Dies führt zu der Erkenntnis, dass das Gefüge verlegter Betonpflastersteine im Nutzungszustand i. d. R. dauerhaft feuchtegesättigt ist.

2.3 Frost-Laborprüfungen und Frostkammeruntersuchungen (AP C und D)

2.3.1 Ergebnisse mit großtechnisch hergestellten Betonpflastersteinen

Im Arbeitspaket C wurde in den Slab-Tests nach DIN EN 1338 und in den CDF-Verfahren nach DIN CEN/TS 12390-9 die Abwitterungsmenge der Vorsatzbetone der Betonpflastersteine aus großtechnischer Herstellung bestimmt.

In den Frostkammeruntersuchungen wurden Betonpflastersteine der Hersteller im Rechteckverband auf regelgerecht hergestelltem Splittbett verlegt und mit Frost-Tauwechseln (Tiefsttemperatur -6 °C bzw. -15 °C , 15 bzw. 5 pro Woche), Feuchtigkeit ($2 \times 1\text{ L}/(\text{m}^2 \times \text{Woche})$) und Tausalz ($130\text{ g}/(\text{m}^2 \times \text{Woche})$) beaufschlagt. In zeitlichen Abständen wurden die Vorsatzbetone optisch auf Schädigungen untersucht. Die innere Schädigung wurde mittels Ultraschalllaufzeitmessung bestimmt. Die Ergebnisse sind im folgenden Abschnitt dargestellt.

Sowohl im Slab-Test als auch im CDF-Verfahren wiesen die Vorsätze der Betonpflastersteine der Herstellersteine Abwitterungen auf, die weit unter dem Annahmekriterium lagen (siehe Tabelle 2). In den Frostkammeruntersuchungen zeigten sich nach 958 FTW in einzelnen Vorsätzen der Betonpflastersteinsorte KN erste Risse, die sich immer weiter ausbreiteten und nach 1334 FTW zu Abplatzungen des Vorsatzbetons führten. Ursache für die Abplatzungen waren Schädigungen des Kernbetons.

Zum gleichen Zeitpunkt (ebenfalls nach 1334 FTW) traten in einigen Vorsätzen einzelner Betonpflastersteine der Sorte KC erste Risse und Kantenabplatzungen auf. In Summe gab

es bei zwei Drittel der Steine der Sorten KN und KC Schädigungen in den Frostkammeruntersuchungen, die im Vergleich zu den anderen Steinsorten einen geringeren Frost-Tausalz widerstand vermuten lassen. Zusätzlich wurde an Betonpflastersteinen der Sorte KN eine verlängerte Ultraschalllaufzeit (USL) bestimmt - ein Indiz für die innere Schädigung. Der vergleichsweise geringe Frost-Tausalz widerstand der Betonpflastersteine der Sorten KN und KC wurde mit den gängigen Verfahren der Vorsatzbetonprüfung weder mit dem Slab-Test nach DIN EN 1338 noch mit dem CDF-Verfahren DIN CEN/TS 12390-9 erkannt.

Tabelle 2 Ergebnisse den Untersuchungen der Herstellersteine in der Frostkammerlagerung und den in den Frostlaborprüfungen (Slab-Test und CDF-Verfahren)

Sorte	Frostkammeruntersuchung		Slab-Test Abwitterung in g/m ²			CDF-Verfahren Abwitterung in g/m ²			Übereinstimmung
	Schädigung (FTW)	USL in μ s min-max (MW)	LD	MD	HD	LD	MD	HD	SLT/CDF/FK
V0	Keine (1039)	n. b. ¹⁾	4,5	7,5	4,5	58	55	159	✓
V1	Keine (1039)	n. b. ¹⁾	n. b.	7,0	n. b.	38	358	111	✓
V2	Keine ²⁾ (1334)	30,9-35,0 (33,0)	n. b.	27	n. b.	63	178	66	✓
RS	Keine ³⁾ (1322)	31,8-35,5 (33,0)	n. b.	6,8	n. b.	n. b.	46	n. b.	✓
KN	Risse (958) Abplatz. ⁴⁾ (1334)	32,8-123,0 (55,8)	n. b.	6,5	n. b.	168	88	60	✗
KC	Risse, Schollen (1334) ⁵⁾	31,8-35,5 (33,3) ⁵⁾	n. b.	8,0	n. b.	84	40	38	✗

Legende:
 Abkürzungen USL – Ultraschalllaufzeit, SLT – Slab-Test, CDF – CDF-Verfahren, FK – Frostkammer, LD/MD/HD Betonpflastersteine mit geringer / mittlerer / hoher Rohdichte, n. b. – nicht bestimmt
 1) keine Schädigungen am Vorsatz nach 1039 FTW (24/13/11 Winter in FEZ 1/2/3) aus Kapazitätsgründen ausgebaut
 2) keine Schädigungen am Vorsatz nach 1334 FTW (31/17/15 Winter in FEZ 1/2/3)
 3) keine Schädigungen am Vorsatz nach 1322 FTW (31/17/15 Winter in FEZ 1/2/3)
 4) erste Risse nach 958 FTW (30/17/15 Winter in FEZ 1/2/3) – abplatzende Vorsätze nach 1334 FTW
 5) erste Risse an den Ecken/Kanten und beginnende abblätternde Vorsätze (Schollenbildung) nach 1334 FTW



2.3.2 Betonpflastersteinen aus der Technikumsanlage

Vier Labore untersuchten den Vorsatzbeton der in der Technikumsanlage hergestellten Betonpflastersteine mit dem Slab-Test nach DIN EN 1338 und dem CDF-Verfahren nach DIN CEN/TS 12390-9. An um 180° gedrehten Betonpflastersteinen wurde in einem Labor zusätzlich der Kernbeton untersucht.

Die Betonpflastersteine aus der Technikumsanlage wurden wie zuvor die Herstellersteine in den Frostkammeruntersuchungen im Rechteckverband auf Splittbett verlegt und mit Frost-Tauwechseln (Tiefsttemperatur -6 °C bzw. -15°C, 15 bzw. 5 pro Woche), Feuchtigkeit (2 x 1 L/(m² x Woche)) und Tausalz (130 g/(m² x Woche)) beaufschlagt. In zeitlichen Abständen wurden die Vorsatzbetone optisch auf Schädigung untersucht. Die innere Schädigung wurde mittels Ultraschalllaufzeitmessung bestimmt.

2.3.2.1 Ergebnisse aus den Vorsatzbetonuntersuchungen

Nach dem Slab-Test wiesen die Vorsätze aller Steinsorten geringe Abwitterungsmengen auf. Tabelle 3 enthält einen Vergleich der Ergebnisse aus den Frostkammeruntersuchungen mit den Ergebnissen aus dem Slab-Test und aus dem CDF-Verfahren. Grün dargestellte Abwit-

terungsmengen lagen unterhalb der gängigen Beurteilungskriterien (1.000 g/m² für den Slab-Test und 1.500 g/m² für das CDF-Verfahren). Die Ergebnisse am Vorsatzbeton sind im oberen Teil der Tabelle dargestellt. Die Prüfergebnisse am Kernbeton sind im unteren Teil der Tabelle dargestellt. Die Übereinstimmung der Ergebnisse aus der Frostkammeruntersuchung mit dem Ergebnis der Frost-Laborprüfung wurde mit einem weißen Haken auf grünem Grund gekennzeichnet. Ein rotes Kreuz weist auf die nicht gegebene Übereinstimmung hin.

Nach dem CDF-Verfahren zeigten die Vorsätze der Sorten K10 und K11b in allen vier Laboren Abwitterungsmengen, die über dem Annahmekriterium (1.500 g/m² gemäß SETZER 94) lagen. Labor 3a ermittelte an allen vier Steinsorten jeweils über dem Annahmekriterium liegende Abwitterungsmengen.

In der Frostkammeruntersuchung waren nach 326 FTW (entspricht 7,5 Jahre in Frosteinwirkungszone 1) an einzelnen Betonpflastersteinen der Sorte K10 Aufwölbungen an den Ecken der Vorsatzbetone und seitlich von den Ecken ausgehende, parallel zur Oberfläche verlaufende Risse zu erkennen. Die bestimmte Ultraschalllaufzeit war mit 53,9 µs (Mittelwert) gegenüber den anderen drei Sorten signifikant erhöht (34,7; 34,5; 35,6 µs). Dies wurde als Indiz für die innere Schädigung des Kernbetons gewertet. Tabelle 3 enthält einen Vergleich der Ergebnisse aus den Frostkammeruntersuchungen mit den Ergebnissen aus dem Slab-Test bzw. aus dem CDF-Verfahren.

Tabelle 3 Ergebnisse den Untersuchungen der Technikumssteine in der Frostkammerlagerung und in den Frostlaborprüfungen (Slab-Test und CDF-Verfahren)

Sorte	Frostkammer Schädigung (FTW)	Slab-Test					CDF-Verfahren						
		Prüffläche: Vorsatzbeton - Abwitterung in g/m ²											
		Lab1	Lab2	Lab3b	Lab4	Überein. FK/Slab	Lab1	Lab2	Lab3a	Lab4	Übereinst. FK/CDF		
B8	Keine (401)	14	60	19 ¹⁾	20	✓	334	840	2.113	131	✗		
B9	Keine (401)	14	113	8 ¹⁾	24	✓	1325	308	3.069	197	✗		
K10	Risse, Aufwölb. (326) ^{b)}	23	77	7 ¹⁾	25	✗	1.829 ³⁾	(197) ²⁾	1.842 ⁴⁾	3.753	✓		
K11b	Keine (401)	26	140	7 ¹⁾	181	✓	2.191	1.224 ⁵⁾	6.070	5.804	✗		
		Prüffläche: Kernbeton - Abwitterung in g/m ²											
USL ^{a)} in µs min-max (MW)													
B8	32,5-37,0 (34,7)	75					✓	360					✓
B9	32,8-36,9 (34,5)	736					✓	1.951					✗
K10	35-109,4 (53,9)	10.222					✓	83.340					✓
K11b	33,6-39,9 (35,6)	8					✓	2.405					✗

a) Ultraschalllaufzeit nach 326 Frost-Tauwechseln, b) Hebungen, Aufwölbungen an den Ecken, Horizontalrisse in Vorsatzbeton (Ecken)
 1) Tausalzlösung verbleibt nicht auf der Prüffläche 2) Ergebnis nach 22 FTW – alle Probekörper nach weiteren 4 FTW zerstört
 3) Ergebnis des letzten unzerstörten Steins, andere 4 Steine bereits nach 22 FTW zerstört 4) Wert nach 18 FTW nach 22 FTW 4 von 5 Steinen zerstört (Abw. nahm ab auf 909 g/m²) 5) einer von fünf Steinen nach 28 FTW zerstört

vdz.

Grün dargestellte Abwitterungsmengen lagen unterhalb der gängigen Annahmekriterien (1.000 g/m² für den Slab-Test und 1.500 g/m² für das CDF-Verfahren). Die Ergebnisse am Vorsatzbeton sind im oberen Teil der Tabelle dargestellt. Die Prüfergebnisse am Kernbeton sind im unteren Teil der Tabelle dargestellt. Die Übereinstimmung der Ergebnisse aus der Frostkammeruntersuchung mit dem Ergebnis der Frost-Laborprüfung wurde mit einem weißen Haken auf grünem Grund gekennzeichnet. Ein rotes Kreuz weist auf die nicht gegebene Übereinstimmung hin. Die Abwitterungen im Slab-Test am Vorsatzbeton standen in drei Fäl-

len in Übereinstimmung mit der Schädigung bzw. in einem Fall der Nichtschädigung der verlegten Betonpflastersteine. Die Risse und Aufwölbungen einzelner Betonpflastersteine der Sorte K10 wurden im Slab-Test an der Prüffläche des Vorsatzbetons nicht erkannt. Dies gelang mit dem CDF-Verfahren eindeutig. Die bisher vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass der FTSW der Sorte K11b hingegen mit dem CDF-Verfahren von allen vier Laboren zu scharf bewertet wurde. Die Ursache für die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen Labor 3a und den anderen Labor an den Sorten B8 und B9 konnten bisher nicht eindeutig aufgeklärt werden.

2.3.2.2 Ergebnisse aus den Kernbetonuntersuchungen

Am Ende des Slab-Tests zeigte der Kernbeton der Sorte K10 eine deutlich über dem Annahmekriterium (1.000 g/m² gemäß DIN EN 1338) liegende Abwitterungsmenge. Die Abwitterungsmengen der anderen drei Sorten lagen deutlich darunter. Am Ende des CDF-Verfahrens lagen die Abwitterungsmengen der Sorten B9, B10 und K11b über dem Annahmekriterium (1.500 g/m² gemäß SETZER 94).

Fazit:

Wurde der Kernbeton im Slab-Test geprüft, so hatte das Ergebnis Signalwirkung für das Verhalten in der Fläche im Hinblick auf die innere Schädigung (Serie K10).

Auf der Basis der bisher vorliegenden Ergebnisse ist zu empfehlen, sowohl den Kern- als auch den Vorsatzbeton mit dem Slab-Test zu untersuchen und zu bewerten.

2.4 Verbundfestigkeit (AP E)

Im Arbeitspaket E wurde der Einfluss der Verbundfestigkeit auf das häufig festgestellte Schadensbild von abplatzenden, bzw. teilweise abplatzenden Vorsatzschichten an zweischichtigen Betonpflastersteinen untersucht. Hierzu wurden betontechnologische Laboruntersuchungen am zweischichtigen Betonpflasterstein, mit variierten Kernbeton- und gleichbleibenden Vorsatzbetonzusammensetzungen und anschließender Prüfung der Verbundfestigkeit durchgeführt. Im Anschluss an diese Laborversuche erfolgte eine Validierung der Ergebnisse auf der zuvor beschriebenen Technikumsanlage anhand von Festigkeits- und Dauerhaftigkeitsuntersuchungen.

Die Laboruntersuchungen zur Verbundfestigkeit wurden nach DIN EN 1542 durchgeführt und zeigten ein Optimum der Haftzugfestigkeit zwischen Kern- und Vorsatzbeton bei einem Zementgehalt im Kernbeton von 300 kg/dm³. Ein darüber hinaus gesteigerter Zementgehalt führte zu einer Stagnation bzw. Reduktion der Haftzugfestigkeiten. Das Versagen der Verbundzone zwischen Vorsatz- und Kernbeton zeigte sich sowohl in der Abhängigkeit des Leimgehaltes (Feinstkorn-Bestandteile < 0,125 mm zzgl. Wasser) im Kernbeton als auch in der Abhängigkeit vom Zementgehalt. Mit steigendem Leimgehalt im Kernbeton ging das Versagen vom Kernbeton über in ein Versagen der Verbundzone und anschließend in ein Versagen des Vorsatzbetons. Mit einer Steigerung des Zementgehaltes im Kernbeton ging die Abreißzone vorrangig in den Vorsatzbeton über.

Im Rahmen der weiteren Untersuchungen wurden Betonpflastersteine mit optimalen und pessimalen Haftzugsergebnissen unter werksähnlichen Bedingungen auf der Technikumsanlage hergestellt. Im Anschluss an diese Herstellungen im Werksmaßstab erfolgten Festigkeitsuntersuchungen anhand der Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 1338 und der Druckfestigkeit nach DIN 18501 sowie die Prüfung der Haftzugfestigkeit. Die Dauerhaftigkeitsun-

tersuchungen an den Betonpflastersteinen wurden mit dem CDF-Test am Vorsatz- und am Kernbeton nach DIN CEN 12390-9 durchgeführt. Die Ergebnisse der Spaltzug- und Druckfestigkeitsuntersuchungen zeigten, dass alle Ergebnisse unterhalb der Anforderungen aus den jeweiligen Normen lagen. Tendenziell waren die Spaltzugfestigkeiten der Basaltmischungen höher als bei den Kiesmischungen. Bei der Druckfestigkeit war es umgekehrt. Die Ergebnisse der Haftzugsprüfungen zeigten keine Zusammenhänge zu den Ergebnissen der Spaltzug- oder Druckfestigkeit. Die Reduzierung der Hauptrüttelzeit führte zu verringerten Spaltzug- und Druckfestigkeiten. Mit zunehmender Vorverdichtung des Kernbetons nahm die Wahrscheinlichkeit eines Versagens in der Verbundzone während der Haftzugfestigkeitsprüfung zu.

Die ermittelten Festigkeiten an den Betonpflastersteinen lagen gänzlich unter den Normanforderungen, während die Abwitterungen im CDF-Verfahren unter dem Annahmekriterium lagen. Die Abweichungen zu den Normen lagen bei der Spaltzugfestigkeit zwischen 3,3 % und 26,7 % und bei der Druckfestigkeit zwischen 4,3 % und 45,3 %. Diese großen Unterschiede deuten darauf hin, dass die Festigkeitsprüfung den gesamten Stein untersucht, während das CDF-Verfahren offensichtlich nur den Vorsatzbeton bewertet.

Das Versagen der Verbundzone zwischen Kern- und Vorsatzbeton stellte sich bei keinem Betonpflasterstein im CDF-Verfahren ein. Die erzielten CDF-Ergebnisse lieferten keine Anhaltspunkte für einen Zusammenhang zwischen den Mischungszusammensetzungen und dem Verbundverhalten zwischen Kern- und Vorsatzbeton (Haftzugfestigkeit).

2.5 Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

Derzeitig wird in der Praxis mit den Laborprüfverfahren Slab-Test und CDF-Test bei zweischichtigen Betonpflastersteinen nur der Frost-Tausalz-Widerstand des Vorsatzes beurteilt. Eine Beurteilung des Kernbetons erfolgt mit diesen beiden Prüfverfahren nicht.

Die tiefenabhängige Untersuchung des Chloridgehalts in Betonpflastersteinen nach den Frostkammeruntersuchungen zeigte, dass die Tausalzlösung den gesamten Betonpflasterstein durchdringt. Die Betonpflasterflächen waren im Verlauf der Frostkammeruntersuchungen nahezu wassergesättigt, was sich durch die Untersuchung der Wasseraufnahme nach DIN EN 1338 bestätigte. Diese Ergebnisse stehen in guter Übereinstimmung mit den Feuchtemessungen im Rahmen des Monitorings an Betonsteinflächen. Hierbei wurde ebenfalls festgestellt, dass der Feuchtegehalt der Kernbetone im Nutzungszustand in etwa dem Sättigungszustand entspricht. Temperaturmessungen im Monitoring zeigten, dass auf den Kernbeton nahezu genauso viele Frost-Tauwechsel einwirken, wie auf den Vorsatzbeton. Zur Überprüfung der technischen Gebrauchstauglichkeit und Funktionalität von zweischichtigen Betonpflastersteinen sollte daher auch der Frost-Tausalz-Widerstand des Kernbetons geprüft werden. Zwischen der Höhe der Verbundfestigkeit (Vorsatzbeton / Kernbeton) und den Abwitterungen im CDF-Verfahren konnte kein Zusammenhang festgestellt werden.

Der Vergleich der Ergebnisse aus Frostkammeruntersuchungen an Betonpflastersteinflächen unter praxisnahen Prüfbedingungen mit den Ergebnissen der Slab-Tests und der Untersuchungen mit dem CDF-Verfahren lässt folgende Schlussfolgerungen zu:

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Laborprüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes von zweischichtigen Betonpflastersteinen zum Verhalten im verlegten Zustand – hier auf Basis bisheriger Ergebnisse in Frostkammeruntersuchungen an Betonpflastersteinflächen unter praxisnahen Prüfbedingungen festgestellt - verbessert sich, wenn

zusätzlich zum Vorsatzbeton auch der Kernbeton mit dem Slab-Test (nach DIN EN 1338) untersucht wird.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Wir danken der HeidelbergCement AG (Engineering und Innovation) Leimen für die Herstellung der Betonpflastersteine auf ihrer Technikumsanlage (6-Steine-Fertiger).

Das IGF-Vorhaben 17996N der Forschungsvereinigung gemeinnützige GmbH – VDZ gGmbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages