

## Einfluss der Betonzusammensetzung von Straßenbeton auf die Spaltzugfestigkeit unter Berücksichtigung einer ausreichenden Dauerhaftigkeit

FA 8.255

Forschungsstelle: Universität Duisburg-Essen, Institut für Massivbau (Prof. Dr.-Ing. M. Schnellenbach-Held)

Bearbeiter: Schnellenbach-Held, M. / Eßer, A. / Johansen, R.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Mai 2022

### 1 Einleitung

Die Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen erfolgt sowohl nach den standardisierten Vorgaben gemäß RStO [N1] als auch, für stark frequentierte und sonderbeanspruchte Verkehrsflächen, nach den Vorgaben gemäß RDO Beton [N2]. Die nach RStO dimensionierten Betonfahrbahndecken werden primär über die Betondruckfestigkeit klassifiziert. Die Betonfahrbahndecken werden allerdings aufgrund von mechanischen und witterungsbedingten Einwirkungen auf Biegung beansprucht, sodass die Betonzugfestigkeit als Bauteilwiderstand gefragt ist. Die Biegemomente erzeugen wechselseitig an der unteren und oberen Randfaser der Betonfahrbahndecke Zugspannungen. Überschreiten die Zugspannungen die Betonzugfestigkeit, so entstehen Risse, die ein sicheres Überfahren und die Dauerhaftigkeit beeinträchtigen. Da eine theoretische Ableitung der Betonzugfestigkeit aus der Druckfestigkeit mit großen Ungenauigkeiten behaftet ist, wurde seit Einführung der RDO Beton [N2] die charakteristische Spaltzugfestigkeit als maßgebliche Baustoffkenngröße im semiprobabilistischen Bemessungsverfahren eingeführt. Die Spaltzugfestigkeit wird gemäß AL Sp Beton 06 [N3] beziehungsweise TP Beton-StB [N4] an 5 cm dicken zylindrischen Betonscheiben ( $D = 10 \text{ cm}$ ) geprüft. Die Prüfmethode wurde so gewählt, dass sie außer bei der Erstprüfung für einen Neubau ebenfalls an bereits fertiggestellten Betonfahrbahndecken anhand entnommener Bohrkerne angewandt werden kann.

Der notwendige Erfahrungsschatz im Hinblick auf das zielsichere Erreichen einer erforderlichen Spaltzugfestigkeit für eine Betonfahrbahndecke in Abhängigkeit von den Ausgangsstoffen und der Mischungszusammensetzung soll weiter ausgearbeitet werden. Daher wurde in diesem FE-Projekt das Ziel verfolgt, in umfangreichen, grundlegenden Untersuchungen mit aktuell praxisüblichen und modifizierten Mischungszusammensetzungen die Auswirkungen einzelner Ausgangsstoffe auf die Spaltzugfestigkeit und die Dauerhaftigkeit von Straßenbetonen zu quantifizieren. Dabei wurden auch über die aktuellen Regelungen hinaus alternative Ausgangsstoffe eingesetzt, um ressourcenschonend und nachhaltig die Wirtschaftlichkeit und die Ökobilanz der Betonfahrbahndeckenbauweise ohne Verlust von Dauerhaftigkeit und Leistungsfähigkeit zu erhöhen, besonders

auch mit Augenmerk auf die Entwicklung von Betonfahrbahndecken, deren Oberflächen durch Grinding zur Lärminderung und zur Erhöhung des Nutzungskomforts beitragen sollen.

In mehreren Arbeitsphasen wurden Betonprobekörper mit variierender Zusammensetzung der Ausgangsstoffe hergestellt, bis zu 91 Tage gelagert, die Spaltzug-, die Biegezug- und die Druckfestigkeit geprüft. Des Weiteren wurde der Einfluss unterschiedlicher Lagerungsbedingungen der Probekörper auf die erreichte Spaltzugfestigkeit untersucht. Abschließend durchliefen ausgewählte Betone den CDF-Test zur Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands und es wurden die Festbetonluftporenkennwerte ermittelt.

### 2 Versuchsprogramm

Insgesamt wurden in diesem FE-Projekt drei Arbeitsphasen (AP) mit differenzierten Zielsetzungen bearbeitet:

- AP 1: Untersuchungen zum Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Spaltzugfestigkeit an 73 geplanten Betonrezepturen mit insgesamt neun Variationsparametern im Alter von 28 und 56 Tagen, begleitend die Ermittlung von Frischbetonkennwerten und Druckfestigkeiten. Auf Basis der Untersuchungen aus AP 1 wurden 41 Labormischungen für die weiteren Arbeitsphasen 2 und 3 ausgewählt.
- AP 2: Untersuchungen zum Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Festigkeitsentwicklung der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeit nach 28, 56 und 91 Tagen. Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Lagerungen auf die Spaltzug- und Druckfestigkeit bis zum Probenalter von 28 Tagen, unterschieden wurden dabei die folgenden Lagerungsarten:
  - "A": Lagerung gemäß TP B-StB [N5] unmittelbar bis zum Prüfzeitpunkt in Wasser gelagert,
  - "B": Lagerung nach dem Ausschalen 13 d unter Wasser und anschließend bis zur 28-d-Prüfung 14 Tage im Normklima (20 °C / 65 % r. F.),
  - "C": Lagerung nach dem Ausschalen bis zur 28-d-Prüfung im Normklima (20 °C / 65 % r. F.).

Begleitend erfolgte die Ermittlung von Frischbetonkennwerten.

- AP 3: Untersuchungen zum Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Dauerhaftigkeitskennwerte (Frost-Taumittel-Widerstand, Festbetonluftporenkennwerte). Begleitend wurden Frischbetonkennwerte sowie die Spaltzug- und Druckfestigkeit ermittelt.

Es wurden drei Prüfserien unterschieden, Wasch-, Ober- ( $D > 8$ ) und Unterbetone. Als Ausgangsrezeptur je Prüfserie wurden praxisübliche und normkonforme Straßenbetonrezepturen gewählt (Tabelle 1)

Tabelle 1: Überblick über die Betonzusammensetzungen der Ausgangsmischungen Waschbeton, Oberbeton (D > 8) und Unterbeton

Rezeptur-ID	w/z-Wert	Zement		Gesteinskörnung			Sieblinie	Zusatzmittelbasis
Ausgangsrezeptur	-	Art	Gehalt [kg/m³]	0/2 [mm]	>2 [mm]	Größtkorn [mm]	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Waschbeton 1-0.1	0,40	CEM I 42,5 N	420	A	Rhyolith	8	A(s)	Acrylat
Oberbeton (D>8) 2-0.1	0,43		340		Rhyolith	22	AB(s)	
Unterbeton 3-0.1	0,43		340		Kies	32	AB(s)	

Tabelle 2: Überblick über die Variationsparameter

Variationsparameter	Variationen						
1	2						
Grobkornart:	Rhyolith-Splitt,	Gabbro-Splitt,	Diabas-Splitt,	Basalt-Splitt,	Gneis-Splitt <sub>2,3</sub> ,	Kies gebrochen,	Kies rund <sub>3</sub>
Zementart:	CEM I 42,5 N,	CEM I 42,5 R,	CEM III/A-S 42,5 R,	CEM II/B-S 32,5 N <sub>2,3</sub> ,	CEM II/B-S 42,5 N,	CEM II/B-S 42,5 R,	CEM III/A 42,5 N
Zementmenge in [kg/m³]:	340 <sub>2,3</sub>	360 <sub>2,3</sub>	420 <sub>1</sub>	450 <sub>1</sub>	480 <sub>1</sub>		
Größtkorn in [mm]:	8	16 <sub>2,3</sub>	22 <sub>2,3</sub>	32 <sub>2,3</sub>			
Sieblinienart:	A stetig	AB stetig	B stetig <sub>2,3</sub>	Ausfallkörnung			
Sandart:	A	B	Brechsand - Rhyolith				
Luftporengehalt in [Vol. %]:	4,0 - 5,0	5,0 - 6,0	> 6,0				
w/z - Wert:	0,40	0,43	0,45				
Zusatzmittelbasisart:	Acrylat	Polycarboxylatether					

Tabelle 3: Zementeigenschaften der verwendeten Zemente

Eigenschaften / Zemente		CEM I		CEM II/A-S	CEM II/B-S			CEM III/A
		42,5 N	42,5 R	42,5 R	32,5 R	42,5 N	42,5 R	42,5 N
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Spezifische Oberfläche nach BLAINE	[cm²/g]	3065	2935	3575	3823	4030	4314	4260
Na2O-Äquivalent	[M.-%]	0,70	0,68	0,75	0,62	K.A.	0,82	0,74
Hüttensandgehalt	[M.-%]	0,0	0,0	14,6	28,0	31,0	30,7	40,4
Wasseranspruch	[%]	27,3	29,1	29,2	26,4	28,8	30,0	30,9
Zementdruckfestigkeit [28d]	[MPa]	58,9	59,0	60,1	50,1	59,3	60,4	59,5

Vergleichend dazu erfolgte die Herstellung verschiedener Straßenbetone, die sich nur in jeweils einem Variationsparameter von der jeweiligen Ausgangsrezeptur unterschieden. Variiert wurden folgende Ausgangsstoffe beziehungsweise betontechnologische Kennwerte:

- Zementart und Zementgehalt,
- Gesteinskörnung (Grobkornart, Größtkorn, Sieblinie, Sandart),
- w/z-Wert und
- Luftporengehalt.

Detaillierte Angaben zu den Variationsparametern sind Tabelle 2 zu entnehmen. Je Prüfsérie wurden bis zu sieben unterschiedliche Zemente mit variierenden Festigkeitsklassen und Hüttensandgehalten eingesetzt, einen Überblick gibt Tabelle 3.

### 3 Untersuchungsergebnisse

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der umfangreichen Festigkeitsuntersuchungen aus AP 1 konnte einen ersten Einblick über den Einfluss der betrachteten Parameter auf die

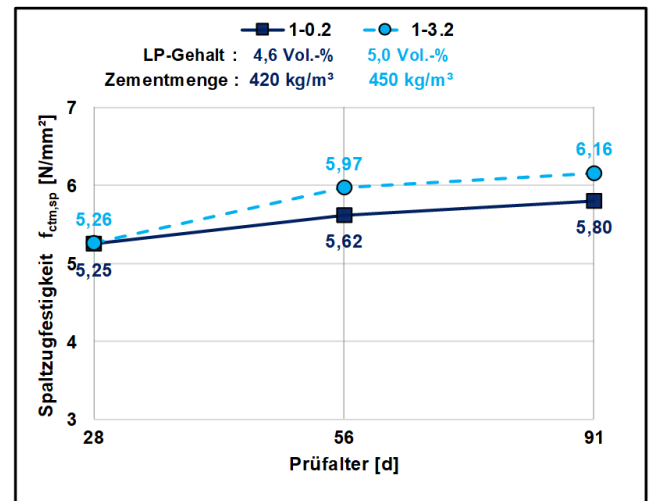
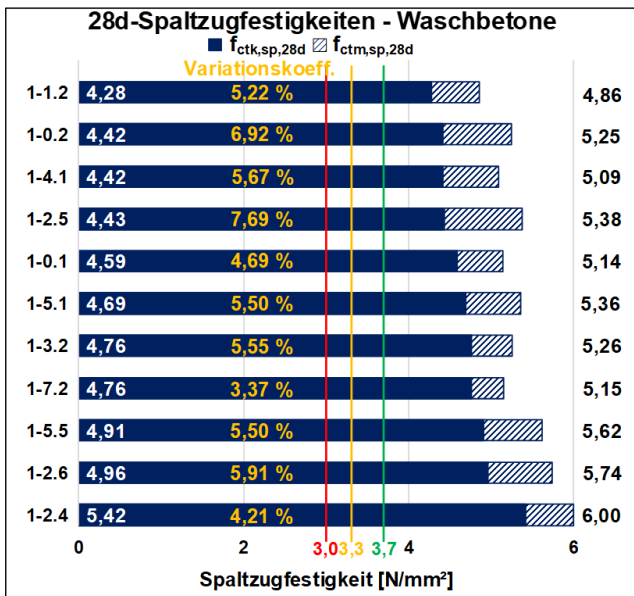
Spaltzugfestigkeiten der Straßenbetone geben. Auf Basis der ersten Erfahrungen wurden 41 Betonrezepturen für die Untersuchungen in den nachfolgenden Arbeitsphasen 2 und 3 ausgewählt. Unter anderem wurde in den nachfolgenden Arbeitsphasen angestrebt, den Frischbetonluftporengehalt auf einen Maximalwert von 6,0 Vol.-% einzustellen. Der w/z-Wert wurde auf maximal 0,43 begrenzt. Bei der Variation der Zementart wurden die Betone mit den Zementen CEM II/B-S 32,5 R und CEM I 42,5 R aufgrund niedriger Festigkeiten aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

In der Arbeitsphase 2 wurden die Festigkeitsentwicklungen der ausgewählten Straßenbetone bis zum Probenalter von 91 Tagen untersucht. So konnten unter anderem die erreichten charakteristischen Spaltzugfestigkeiten der betrachteten Straßenbetone durch die statistische Auswertung beurteilt werden. Die Ergebnisse der Waschbetone sind dem Bild 1, links, zu entnehmen.

Die charakteristischen Spaltzugfestigkeiten der Waschbetone liegen in einer Größenordnung von 4,28 bis 5,42 N/mm². Die Höchstwerte werden bei den Waschbetonen 1-5.5 (Variation: Gesteinskornart: Diabas), 1-2.6 (Variation Zementart: CEM III/A 42,5 N) und 1-2.4 (Variation Zementart: CEM II/B-S 42,5 N)

beobachtet. Die höchsten Einzelwertstreuungen der Spaltzugfestigkeiten (> 6,9 %) sind bei den Waschbetonen 1-0.2 und 1-2.5 zu verzeichnen. Ein Beispiel für die Spaltzugfestigkeitsentwicklung aus der Langzeitstudie der Waschbetone unter Variation der Zementmenge ist in Bild 1, rechts, dargestellt. Eine

Erhöhung des Zementgehalts von 420 auf 450 kg/m<sup>3</sup> führte ab einem Probalter von 56 Tagen zu einer Erhöhung der Spaltzugfestigkeit um ca. 6 %.



**Bild 1:** Waschbeton – Spaltzugfestigkeit bis zum Prüfalter von 28 Tagen (links), Spaltzugfestigkeitsentwicklung der Betone 1-0.2 und 1-3.2 (rechts)

Beispielhaft wird für Oberbetone (D > 8) die zeitliche Festigkeitsentwicklung der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeit bis zum Prüfzeitraum von 91 Tagen in Abhängigkeit der variierenden Zementart in Bild 2 dargestellt. Bei diesem Vergleich zeichnet sich der Zement CEM II/B-S 42,5 R (Rezeptur 2-2.5) als besonders festigkeitssteigernd aus. Bei seinem Einsatz lassen sich im Vergleich zu den Betonen mit anderen Zementen entweder gleich hohe oder bedeutend höhere Festigkeiten erzielen.

entwicklung aus. Bei Waschbetonen lag der Festigkeitsanstieg im Schnitt bei 6 % ( $f_{ct,sp}$ ), bei Oberbetonen (D>8) bei 15 % ( $f_{ct,sp}$ ) und bei Unterbetonen bei 17 % ( $f_{ct,sp}$ ).

In der AP 2 wurde auch der Einfluss verschiedener Lagerungsarten "A", "B" und "C" auf die Festigkeitsentwicklung bis zum Alter von 28 Tagen untersucht, um die Auswirkungen verschiedener Feuchtezustände in den Proben bis hin zur Wassersättigung auf die Spaltzug- und Druckfestigkeit zu erfassen.

In der abschließenden Arbeitsphase 3 wurde anhand der durchgeführten Untersuchungen gezeigt, dass die untersuchten Laborbetone alle Anforderungen an die Luftporenkennwerte erfüllen konnten und sich bei der CDF-Prüfung als resistent gegen den Frost-Tausalz-Angriff erwiesen. Für Oberbetone (D > 8) werden in Bild 3, links, beispielhaft die Abwitterungsmengen (g/m<sup>2</sup>) nach 28 Frost-Tausalz-Wechseln und die Flüssigkeitsaufnahme (M.-%) dargestellt. Bei den Oberbetonen (D > 8) zeigte der Einsatz alternativer Zemente (2-2.x) anstelle zum CEM I 42,5 N der Ausgangsmischungen (2-0.1, 2-0.2) mit bis zu ca. 350 (g/m<sup>2</sup>) deutlich höhere Abwitterungsmengen. Der Einsatz von gebrochenem Grobkorn (2-5.2, 2-5.5) statt rundem Kies (2-5.7) erhöhte die Resistenz gegen den Frost-Tausalz-Angriff.

Eine prozentuale Gegenüberstellung der Spaltzugfestigkeitsergebnisse aller Prüfserien ist Tabelle 4 zu entnehmen. Es zeigen sich große Unterschiede in Abhängigkeit von der Lagerungsart. Verblieben die Proben nach dem Ausschalen bis zur 28d-Prüfung im Normklima 20 °C/65 %, r. F. (Lagerungsart "C"), so wurden überwiegend um bis zu 30 % geringere Festigkeitskennwerte als bei den kontinuierlich wassergelagerten "A"-Proben festgestellt. Am stärksten wurden die Oberbetone (D > 8) durch die Lagerungsart "C" beeinflusst, wobei im Schnitt 10 % geringere Festigkeitskennwerte beobachtet wurden. Wurde anstelle kontinuierlicher Wasserlagerung die Lagerungsart "B" verwendet, wirkte sich diese günstig auf die Festigkeits-

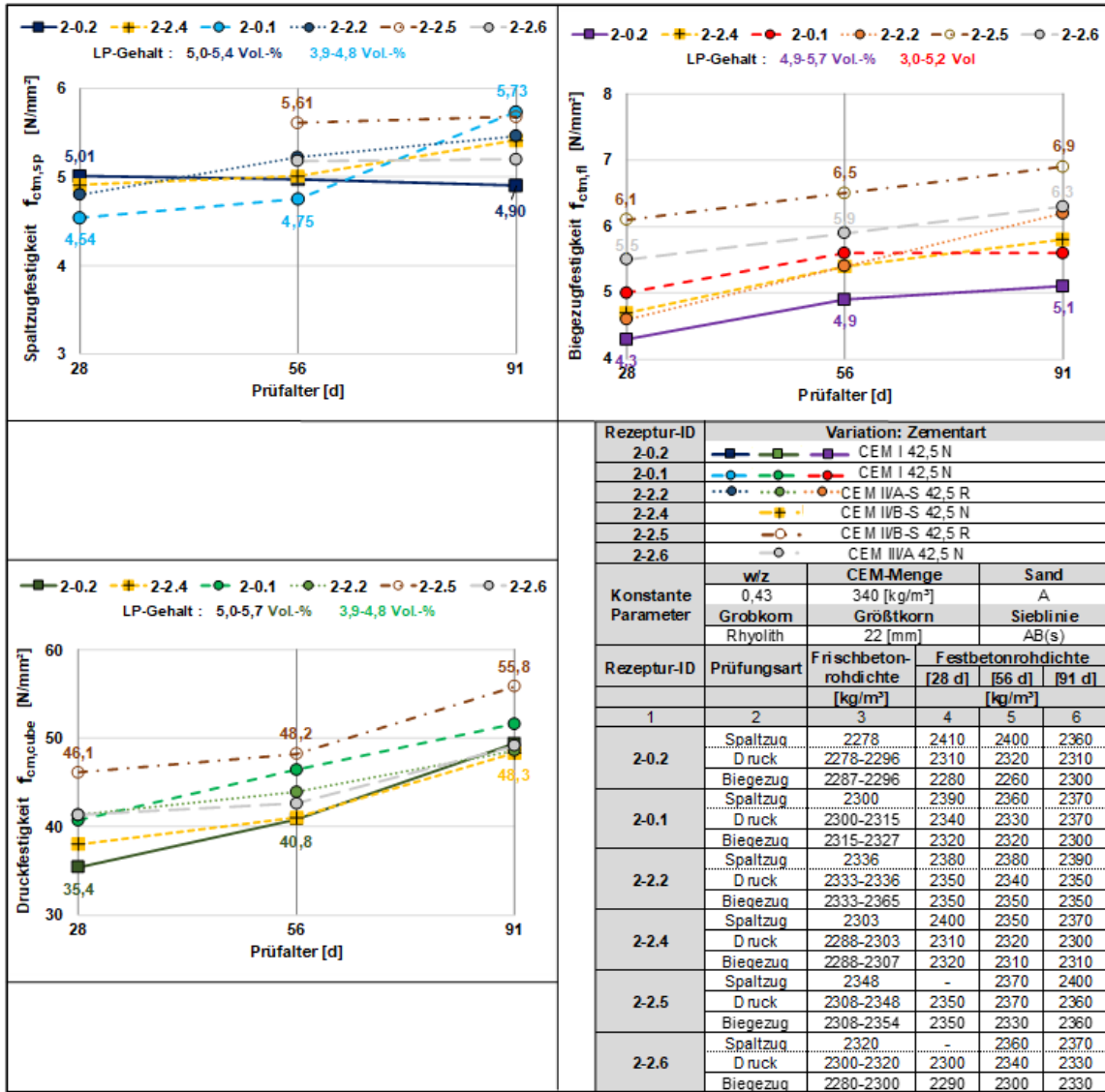


Bild 2: Oberbetone (D > 8) – Festigkeitsentwicklung – Variationsparameter Zementart

Tabelle 4: Einfluss verschiedener Lagerungsarten – Gegenüberstellung der Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsuntersuchung (prozentual bezogen auf die Werte nach Lagerungsart "A")

Spaltzugfestigkeit		LP-Gehalt		w/z-Wert	Zementart				Z-Menge	Sand	Kornart				Größtkorn	Sieblinie	Z-Mittel	
Betonart	Lagerung	3	4	[%]	6	7	8	9	[%]	[%]	12	13	14	15	16	17	18	19
Waschbeton	Variation	3,7 Vol. %	4,6 Vol. %	0,43		31% HS	31% HS	40% HS	450 kg/m³	B	Gab 8	Dia 8						
	ID	1-0.1	1-0.2	1-1.2		1-2.4	1-2.5	1-2.6	1-3.2	1-4.1	1-5.1	1-5.5					AB (s)	
	"C"	87	87	81		87	90	82	84	80	93	97					86	
	"A"	100	100	100		100	100	100	100	100	100	100					100	
	"B"	113	108	106		97	107	100	108	108	102	109	108				112	
Oberbeton (D>8)	Variation	4,8 Vol. %	5,4 Vol. %	0,40	15% HS	31% HS	31% HS	40% HS		B	Gnei 16	Dia 22	Kie (g) 16	8 mm	32 mm	B (s)		Polycar.
	ID	2-0.1	2-0.2	2-1.1	2-2.2	2-2.4	2-2.5*	2-2.6*		2-4.1*	2-5.6	2-5.5	2-5.2	2-6.1*	2-6.4*	2-7.4*		2-8.1
	"C"	76	68	81	80	77	73	74		70	90	87	99	76	70	64		80
	"A"	100	100	100	100	100	100	100		100	100	100	100	100	100	100		100
	"B"	112	104	124	115	105	99	102		100	119	124	121	100	100	90		114
Unterbeton	Variation	4,5 Vol. %	5,2 Vol. %	0,40	15% HS	31% HS	31% HS	40% HS	360 kg/m³	B		Dia 16	Kie (g) 16	8 mm	22 mm	B (s)	AB (a)	Polycar.
	ID	3-0.1	3-0.2	3-1.1	3-2.2	3-2.4	3-2.5	3-2.6	3-3.1	3-4.1		3-5.5	3-5.2	3-6.1	3-6.3	3-7.4	3-7.5	3-8.1
	"C"	104	115	85	108	90	104	104	96	87		90	99	111	104	104	97	96
	"A"	100	100	100	100	100	100	100	100	100		100	100	100	100	100	100	100
	"B"	117	117	112	115	109	119	104	116	111		110	121	119	132	125	128	117

Legende: 2-0.1 - Ergebnisse der 28 d-Untersuchung; 15% HS - Hüttensandanteil; Gab 8 - Gesteinskornart; Größtkorn;

2-2.5\* - Ergebnisse der 56 d-Untersuchung;

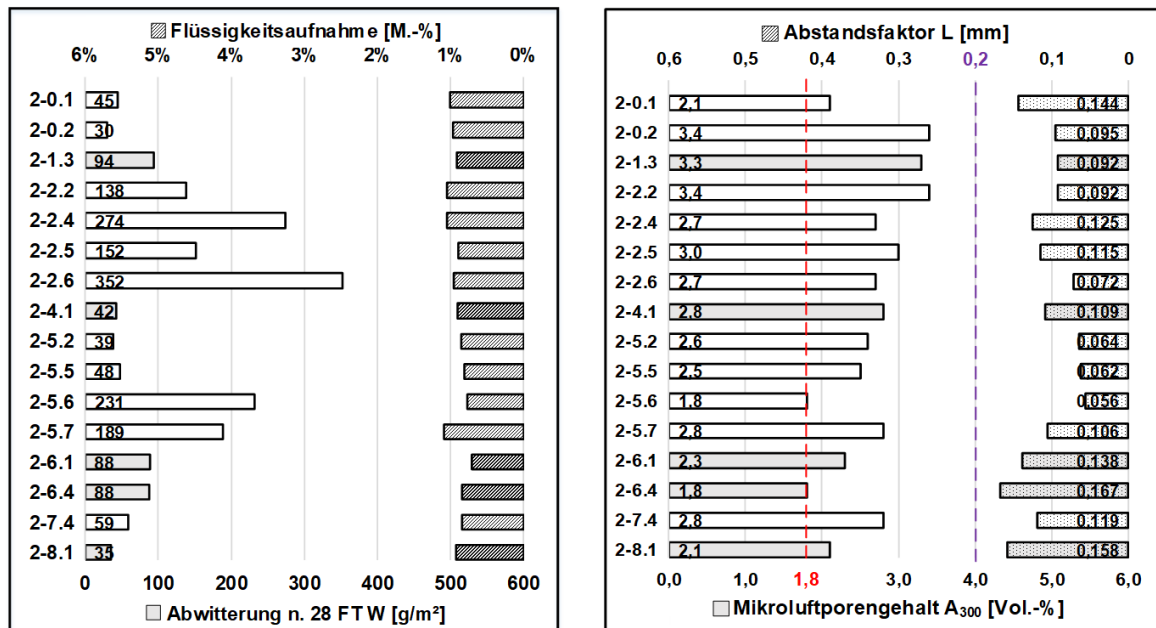


Bild 3: Ausgewählte Dauerhaftigkeitskennwerte der Prüferserie Oberbeton (D > 8)

In Bild 3, rechts, werden die Ergebnisse der Mikroluftporengehaltmessung durch die linken Balken dargestellt. Der einzuhaltende Mikroluftporengehalt A<sub>300</sub> von 1,8 (Vol.-%) wird bei den untersuchten Betonen erreichte beziehungsweise überschritten. Die rechten Balken geben den errechneten Abstandsfaktor L zwischen den Poren wieder, der Grenzwert von L = 0,2 mm wird unterschritten.

Die mikroskopische Analyse der meisten Oberbetone (D > 8) und Unterbetone zeigte, dass das Potenzial für eine zusätzliche Reduzierung des Festbetonluftporengehalts gegeben ist. Durch die Anpassung des Luftporengehalts könnte die Festigkeitsentwicklung der Straßenbetone deutlich begünstigt werden.

#### 4 Schlussfolgerung und Fazit

In umfangreichen, grundlegenden Untersuchungen mit aktuellen, aber auch außerhalb der Normregelungen modifizierten Mischungszusammensetzungen, wurden notwendige Erkenntnisse gewonnen, um die Auswirkungen einzelner Ausgangsstoffe von Straßenbetonrezepturen auf die Spaltzugfestigkeit und ausgewählte Dauerhaftigkeitskennwerte zu identifizieren und zu beurteilen. Die Parameterstudie umfasste neun verschiedene Variationsparameter. Zusätzlich wurde der Einfluss verschiedener Lagerungsarten auf die Spaltzugfestigkeit untersucht. Frischbetonkennwerte und Betondruckfestigkeiten wurden stets begleitend ermittelt. Bei den Untersuchungen zur Festigkeitsentwicklung bis zu 91 Tagen wurde auch die Biegezugfestigkeit geprüft.

Die Spaltzugfestigkeit lässt sich demnach durch die Reduzierung des Luftporengehalts im Frischbeton oder des w/z-Werts bei allen Prüferserien erhöhen.

Speziell bei Waschbetonen wirken sich der Austausch des Zements CEM I durch die Zemente CEM II/B-S 42,5 N und CEM III/A 42,5 R und der Einsatz der Sieblinien A(s) beziehungsweise AB(s) festigkeitssteigernd aus.

Bei Oberbetonen (D > 8) beeinflussen der Austausch des Zements CEM I durch die Zemente CEM II/A-S 42,5 R und CEM II/B-S 42,5 N, der Austausch des Grobkorns Rhyolith durch gebrochenen Kies und der Einsatz der Sieblinie AB(s) beziehungsweise B(s) die Festigkeitskennwerte positiv.

Bei Unterbetonen wirken sich ein Austausch des Zements CEM I durch alle hüttensandhaltigen Zemente, durch den Austausch des runden Kieses (D = 32 mm) durch feinere Splitte und durch den Austausch des Sands A durch feinkornreicheren Sand B festigkeitssteigernd aus.

Eine fehlende Nachbehandlung innerhalb der ersten 7 Tage führt zu Festigkeitseinbußen bei der Spaltzug- und Druckfestigkeit von bis zu 30 %. Die bis zur Prüfung wassergelagerten Proben zeigen stets geringere Festigkeiten als die Proben, die nach dem Ausschalen einer sechstägigen beziehungsweise 13-tägigen Wasserlagerung und anschließender Normlagerung (20 °C / 65 % r.F.) bis zur Prüfung ausgesetzt waren.

Durch die Untersuchung ausgewählter Dauerhaftigkeitskenngrößen konnte gezeigt werden, dass alle untersuchten Laborbetone die normativen Anforderungen an Luftporenkennwerte von Festbetonen erfüllten und einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen konnten.

Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Empfehlung für die Praxis.

### 5 Literatur

- [N1] RStO 12 – Richtlinien für Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. FGSV 499, 2012
- [N2] RDO Beton 09 – Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen. FGSV 497, 2009
- [N3] AL Sp-Beton 06 – Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Zylinderscheiben als Eingangsgröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehrsflächen. FGSV 410, 2006
- [N4] TP Beton-StB 10 - Technische Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. FGSV 892, 2010
- [N5] TP B-StB 17 – Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen. FGSV 893, 2017