

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

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 200

bast

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

von

Martina Schnellenbach-Held
Angelika Eßer
Roman Johansen

Fakultät Ingenieurwissenschaften
Abteilung Bauwissenschaften
Institut für Massivbau
Universität Duisburg-Essen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 200

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 08.0255

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

Fachbetreuung

Christoph Becker

Referat

Betonbauweisen

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-768-6

Bergisch Gladbach, Dezember 2023

Kurzfassung – Abstract

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

Die Dimensionierung der Dicke von Straßenbetondecken erfolgt neben den standardisierten Vorgaben gemäß RStO [N1] mittels rechnerischer Dimensionierung des Oberbaus gemäß RDO [N3]. Dabei werden den Straßenbetonklassen charakteristische Spaltzugfestigkeiten zugeordnet. Die Erfahrungen hinsichtlich des zielsicheren Erreichens der erforderlichen Spaltzugfestigkeit oder ihrer Beeinflussung bei der Wahl der einzusetzenden Ausgangsstoffe sowie weiterer verarbeitungstechnischer Parameter bei den konventionellen, aber auch neuartigen Betonfahrbahndecken sollten weiterentwickelt werden. Es bestand daher eine Notwendigkeit, im Rahmen einer breit angelegten Parameterstudie durch zielgerichtete Laboruntersuchungen ergänzende Erfahrungen zur Verarbeitung, Erreichung der erforderlichen Festigkeitswerte und der Dauerhaftigkeit für zu konzipierende Betonzusammensetzungen zu erlangen. Der Einsatz alternativer Ausgangsstoffe und das Anpassen verarbeitungstechnischer Parameter könnten ressourcenschonend und nachhaltig die Wirtschaftlichkeit und die Ökobilanz der Betonfahrbahndecken ohne Verlust von Dauerhaftigkeit und Leistungsfähigkeit erhöhen, besonders auch im Hinblick auf die Entwicklung von Betonfahrbahndecken, deren Oberflächen durch Grinding zur Lärminderung und Erhöhung des Nutzungskomforts beitragen sollen.

In umfangreichen, grundlegenden Untersuchungen mit aktuell praxisüblichen und modifizierten Mischungszusammensetzungen galt es, die Auswirkungen einzelner Ausgangsstoffe von Straßenbetonen auf die Spaltzugfestigkeit und die Dauerhaftigkeit zu quantifizieren. Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen sollten Einflüsse auf die Betonzusammensetzungen definiert und Empfehlungen für die Praxis abgeleitet werden. In mehreren Arbeitsphasen wurden Betonprobekörper mit variierender Zusammensetzung der Ausgangsstoffe hergestellt, bis zu 91 Tage gelagert und geprüft. Weiterhin wurden die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Ausgangsstoffen, den damit konzipierten Mischungszusammensetzungen sowie deren Festigkeits- und Dauerhaftigkeitskennwerte detailliert un-

tersucht und bewertet. Zusätzlich wurde der Einfluss unterschiedlicher Lagerungsbedingungen der Probekörper auf die erreichte Spaltzugfestigkeit untersucht.

Auf Basis der theoretischen und labortechnischen Erkenntnisse wurde die vor- oder nachteilige Auswirkung von insgesamt neun betrachteten Variationsparametern identifiziert und gewichtet. Die im Labor ermittelte Spaltzugfestigkeit lässt sich demnach durch die Anpassung des Luftporengehaltes im Frischbeton und des w/z-Wertes sowie durch den Einsatz alternativer Zementarten deutlich beeinflussen. Durch die Untersuchung ausgewählter Dauerhaftigkeitskenngrößen konnte gezeigt werden, dass alle betrachteten Laborbetone die normativen Anforderungen an Luftporenkennwerte der Festbetone erfüllten sowie ein hohes Maß an Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen konnten. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse kann eine Empfehlung für die Praxis formuliert werden, wie Betonzusammensetzungen durch gezieltes Anpassen der untersuchten Variationsparameter beeinflusst werden können, um den Anforderungen an die Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit der Straßenbetonklasse gerecht zu werden.

Influence of the concrete composition of road concrete on the splitting tensile strength under consideration of sufficient durability

In addition to the standardised specifications according to RStO [N1], the thickness of road concrete pavements can be determined by means of mathematical dimensioning of the superstructure according to RDO [N3]. Characteristic splitting tensile strengths are assigned to the road concrete classes. The experience with regard to the targeted achievement of the required splitting tensile strength or its influence when selecting the starting materials to be used as well as other processing parameters for conventional as well as new types of concrete road pavements should be further developed. Thus, there was a need to gain the complementary experience for processing, achieving the required strength values and durability for concrete compositions to be designed within the framework of extensive experimental investigations. The use of alternative raw materials and the adaptation of processing parameters could increase the economic efficiency and the life cycle assessment of concrete pavements without a loss of durability and performance, especially with regard to the development of concrete pavements that contribute to noise reduction and increased user comfort through grinding.

It was considered necessary to determine the effects of individual raw materials of road concretes on the splitting tensile strength and the durability by means of extensive investigations with mixture compositions according to the state of the art as well as modified mixture compositions. Based on the results obtained, influences on the concrete compositions should be defined and recommendations for practice should be derived. In several work phases, concrete specimens with varying compositions of the raw materials were produced, stored up to 91 days and tested. Furthermore, the relationships between the individual raw materials, the mixture compositions and the strength and durability characteristics were studied and evaluated in detail. In addition, the influence of different storage conditions of the test specimens on the achieved splitting tensile strength was investigated.

Based on the theoretical and experimental studies, the advantageous or disadvantageous effect of a total of nine variation parameters considered was identified and weighted. Accordingly, the splitting

tensile strength can be significantly influenced by adjusting the air void content in the fresh concrete and the w/c ratio as well as by using alternative cement types. By investigating selected durability parameters, it could be shown that all concretes fulfilled the normative requirements for air void characteristics of hardened concretes, and exhibited a high degree of freeze-thaw resistance. Based on the findings, a recommendation for practice can be formulated on how concrete compositions can be influenced by specifically adapting the variation parameters studied in order to meet the requirements for the splitting tensile strength depending on the road concrete class.

Summary

Influence of the concrete composition of road concrete on the splitting tensile strength under consideration of sufficient durability

1 Introduction

Concrete pavements, including those with noise-reducing structuring, can be specified or dimensioned according to the standardised specifications of the RStO [N1]. However, parameters such as the selected materials or further stress specifications are not taken into account when dimensioning. Referring to the current status, road concretes must primarily fulfil the minimum values of concrete compressive strength.

On the one hand, road concrete is exposed to mechanical influences, which have been increasing gradually over the years, and on the other hand, they are also subjected to weather-related influences. This loading situation generates bending moments that alternately create tensile stresses at the lower and upper edge fibres of the concrete pavements. If the tensile stresses exceed the concrete tensile strength, cracks develop that impair safe overrunning and durability. The theoretical derivation of the concrete tensile strength from its compressive strength is fraught with great inaccuracies. Therefore, the characteristic splitting tensile strength has been introduced as a building material parameter in the semi-probabilistic design procedure for the computational dimensioning of concrete pavements in the superstructure of traffic areas since the introduction of the RDO Concrete [N3]. Its use is becoming increasingly relevant, especially for heavily frequented and specially stressed traffic areas. While doing so, an assignment of the characteristic splitting tensile strengths to the road concrete classes takes place. The splitting tensile strength is tested according to AL Sp Beton 06 [N4] or TP B-StB [N7] on a 5 cm thick cylindrical concrete disc ($D = 10\text{cm}$). The test method was chosen in such a way that, apart from the initial test for a new building, it can also be used on already completed concrete road pavements using drill cores. The necessary wealth of experience regarding the unerring achievement of the required splitting tensile strength as well as other processing

parameters to guarantee performance and durability, especially for new types of concrete road pavements, is still in its initial stages. In this project, the aim was to identify and assess the effects of several concrete technology influencing parameters on the splitting tensile strength development as well as on selected durability parameters by means of extensive laboratory tests. Based on this experience, a recommendation for practice was to be formulated in a further step.

In order to achieve the desired goal, concrete formulations were to be designed that should always differ from the respective initial formulation for each test series (exposed aggregate concrete, top concrete ($D > 8$), bottom concrete) by only one variation parameter.

In the numerous studies on selected road concrete formulations (sample age up to 91 days), a comparison of the achieved splitting tensile strengths, the selected durability parameters, the determined air void characteristics on hardened concrete and the values for freeze-thaw resistance was of particular significance for the development of the collection of experience. Furthermore, the potential of different storage conditions of the manufactured test specimens to influence the strength development was investigated.

2 Materials and methods

Experimental matrix

In total, three work phases with differentiated objectives were planned in this FE project:

- 1) Testing of the splitting tensile strength up to the specimen age of 56 days under the influence of nine variation parameters using an extensive selection of formulations and selection of relevant laboratory formulations for the investigations in the further work phases based on these data.
- 2) The influence of the concrete composition and the different storage types of the specimens on the strength characteristics up to the specimen age of 91 days.
- 3) The determination and evaluation of the influence of the selected variation parameters on the selected durability parameters.

Characteristics/Cement		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
Specific surface area (BLAINE)	[cm ² /g]	3065	2935	3575	3823	4030	4314	4260
Na₂O-equivalent	[M.-%]	0,70	0,68	0,75	0,62	K.A.	0,82	0,74
GGBFS content	[M.-%]	0,0	0,0	14,6	28,0	31,0	30,7	40,4
Water demand	[%]	27,3	29,1	29,2	26,4	28,8	30,0	30,9
Compressive strength [28d]	[MPa]	58,9	59,0	60,1	50,1	59,3	60,4	59,5

Caption: K.A. - no specification received from the manufacturer.

Tab. 1: Cement properties of the cements used

At the suggestion of the supervisors, additional investigations were carried out in an intermediate phase, which had the following objectives:

- 4) The comparability of the test results with regard to the strength characteristic values of concrete specimens produced in the laboratory and in the course of the initial test.

Normal road concrete formulations that are common in practice and conform to standards were used in this project as wash concrete, top concrete and bottom concrete. The following raw materials and concrete technology parameters were considered as influencing parameters on the splitting tensile strength:

- Cement type and cement content,
- Aggregate (type of coarse grain, maximum grain size, grading curve, type of sand),
- w/c ratio,
- air void content,
- admixtures.

In the framework of the experimental investigations, 73 different road concretes were produced, each differing only in one variation parameter from the respective initial formulation.

Variation of materials and composition of the concretes

Up to seven cements with different blastfurnace slag contents and different strength classes were used in this project. The corresponding cement properties can be found in Table 1.

The cement content was varied up to three times (340, 360 / 420, 450, 480 kg/m³) in compliance with the normative limits.

Up to seven types of coarse aggregate were tested, which had different properties such as grain shape, grain bulk density, proportion of broken grains, etc. The maximum grain size was varied from 8 to 32 mm. The variation of the maximum grain size from 8 to 32 mm was carried out exclusively for the top concretes (D>8) and the bottom concretes. The grading curve adjustment was carried out in compliance with the requirements for the maximum fines content between the standard grading curves A and B. Concrete mix designs with gap grading were also investigated. Three sands, different in terms of fines content and composition, were used. Two admixtures on different mechanisms of action to regulate the consistency of the fresh concrete were also studied.

The w/c ratio, as one of the most significant concrete technology parameters, was varied between the values of 0.40 and 0.45 in compliance with the normative limits.

The LP content of the fresh concretes produced varied between approx. 3.5 and 7.0% by volume due to the adaptation of the raw materials. In order to ensure a comparison of the results of parameter study to the respective initial mix with approximately similar fresh concrete air void content, the initial mixes were concreted several times with different fresh concrete air void contents. An example of the formulation matrix of the top concretes (D>8) with adjusted mixture composition designed in work phase 1 can be seen in Table 2. The variation of the respective parameter of the mix composition is highlighted in bold in the table.

Concrete ID	w/c-ratio	Cement		Aggregates			Grading curve	Type of additives	Fresh concrete bulk density	Compaction measure categorie	Air content	Variation
		Type	Content	0/2	>2	Largest grain						
1	2	3	[kg/m ³]	[mm]	[mm]	[mm]	8	9	[kg/m ³]	11	[Vol.-%]	13
2-0.1	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Rhyolite	22	AB(s)	Acrylat	2308	1,45-C1	4,5	Air content
2-0.2	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Rhyolite	22	AB(s)	Acrylat	2272	1,41-C1	5,5	
2-0.3	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Rhyolite	22	AB(s)	Acrylat	2217	1,29-C1	6,9	
2-1.1	0,40	CEM I 42,5 N	340	A	Rhyolite	22	AB(s)	Acrylat	2386	1,47-C0	3,4	w/c-ratio
2-1.3	0,45	CEM I 42,5 N	340	A	Rhyolite	22	AB(s)	Acrylat	2268	1,43-C1	5,7	
2-2.1	0,43	CEM I 42,5 R	340	A	Rhyolite	22	AB(s)	Acrylat	2265	1,29-C1	5,8	Type of cement
2-2.2	0,43	CEM II/A-S 42,5 R	340	A	Rhyolite	22	AB(s)	Acrylat	2275	1,38-C1	6,1	
2-2.3	0,43	CEM II/B-S 32,5 R	340	A	Rhyolite	22	AB(s)	Acrylat	2276	1,29-C1	5,6	
2-2.4	0,43	CEM II/B-S 42,5 N	340	A	Rhyolite	22	AB(s)	Acrylat	2268	1,33-C1	5,5	
2-2.5	0,43	CEM II/B-S 42,5 R	340	A	Rhyolite	22	AB(s)	Acrylat	2288	1,34-C1	5,1	
2-2.6	0,43	CEM III/A 42,5 N	340	A	Rhyolite	22	AB(s)	Acrylat	2264	1,45-C1	5,2	
2-3.1	0,43	CEM I 42,5 N	360	A	Rhyolite	22	AB(s)	Acrylat	2263	1,29-C1	5,9	Cement content
2-4.1	0,43	CEM I 42,5 N	340	B	Rhyolite	22	AB(s)	Acrylat	2266	1,37-C1	6,0	Type of sand
2-4.2	0,43	CEM I 42,5 N	340	Crushed	Rhyolite	22	AB(s)	Acrylat	2358	1,53-C0	3,1	
2-5.1	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Gabro	22	AB(s)	Acrylat	2379	1,31-C1	5,5	Type of aggregates
2-5.2	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Gravel (cr.)	16	AB(s)	Acrylat	2280	1,35-C1	6,2	
2-5.3	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Basalt (1)	22	AB(s)	Acrylat	2493	1,28-C1	6,0	
2-5.5	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Diabase	22	AB(s)	Acrylat	2351	1,31-C1	4,8	
2-5.6	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Gneiss	16	AB(s)	Acrylat	2323	1,45-C1	4,6	
2-5.7	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Gravel	22	AB(s)	Acrylat	2294	1,34-C1	5,5	
2-6.1	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Rhyolite	8	AB(s)	Acrylat	2246	1,33-C1	4,8	Largest grain
2-6.2	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Rhyolite	16	AB(s)	Acrylat	2265	1,32-C1	5,6	
2-6.4	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Rhyolite	32	AB(s)	Acrylat	2249	1,35-C1	5,8	
2-7.3	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Rhyolite	22	A(s)	Acrylat	2335	1,41-C1	4,0	Grading curve
2-7.4	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Rhyolite	22	B(s)	Acrylat	2229	1,37-C1	6,6	
2-7.5	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Rhyolite	22	AB(a)	Acrylat	2240	1,38-C1	6,1	
2-8.1	0,43	CEM I 42,5 N	340	A	Rhyolite	22	AB(s)	Polycarb	2277	1,38-C1	5,6	

Legend: Aggregates 0/2: „A“ - sand type A ; „B“ - sand type B; „Crushed“ – crushed sand Garding curve: (s) - permanent ; (a) - drop-out grain size
Aggregates >2: „Gravel (cr)“ - crushed gravel Additiv „Polycarb“ - polycarboxylate-ether base

Tab. 2: Recipes of the top concretes (D>8)

3 Results

The comparison of the results of the strength tests from WP 1 was able to provide an initial insight into the influence of the parameters considered on the splitting tensile strengths of road concretes. Based on the first experiences, 41 concrete mix designs were selected for the investigations in subsequent work phases 2 and 3. Among other things, attempts were made in the subsequent work phases to limit the fresh concrete air void content to a maximum value of 6.0 vol.-% or the w/c ratio to a maximum of 0.43. Due to low strength, the concretes with the cements CEM II/B-S 32.5 R and CEM I 42.5 R were excluded from further investigations

The strength developments of the selected road concretes up to the sample age of 91 days in work phase 2 were able to expand the acquired expertise from work phase 1 with regard to the influence of the variation parameters. Thus, among other things, the achieved characteristic splitting tensile strengths

of the considered road concretes could be assessed by the statistical evaluation. The results of the exposed aggregate concretes can be seen in Figure 1 on the left.

The characteristic splitting tensile strengths of the exposed aggregate concretes are in the range of 4.28 to 5.42 N/mm². Thus, a characteristic splitting tensile strength of more than 3.7 N/mm² could be determined for all exposed aggregate concretes. The maximum values were observed for the exposed aggregate concretes 1-5.5 (variation: aggregate type: diabase), 1-2.6 (variation cement type: CEM III/A 42.5 N) and 1-2.4 (variation cement type: CEM II/B-S 42.5 N). The highest single value scatter of the splitting tensile strengths (> 6.9%) is observed for the exposed aggregate concretes 1-0.2 and 1-2.5.

An example of the splitting tensile strength development from the long-term study of the laboratory washed concretes under the influence of

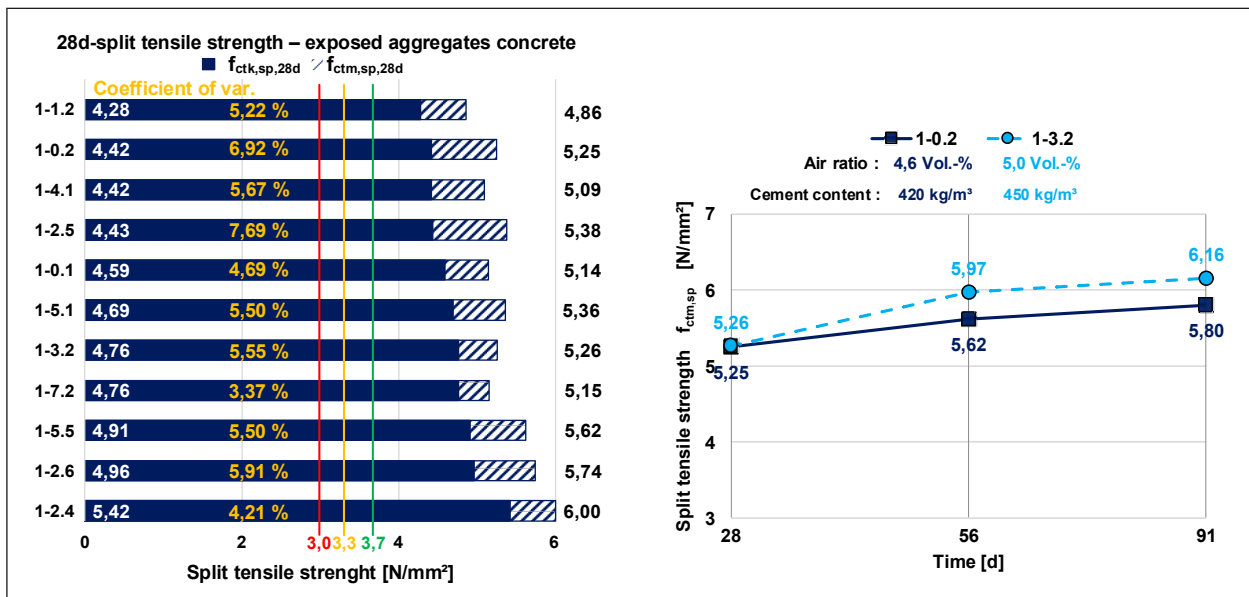


Fig. 1: Exposed aggregate concrete – splitting tensile strength up to the test age of 28 days (left), splitting tensile strength development of concretes 1-0.2 and 1-3.2

the cement quantity is shown in Figure 1 on the right. Increasing the cement content from 420 to 450 kg/m³ resulted in a rise of the splitting tensile strength from a sample age of 56 days on by approx. 6%.

The investigations on the influence of drying on the strength were carried out under the following storage conditions:

- Storage type A: Storage according to TP B-StB [N7] directly in water until the time of testing,
- Storage type B: Storage under water for 13 d after stripping and then in a standard climate 20/65 for 14 days until the 28 d test,
- Storage type C: storage after stripping until the 28 d test in standard climate 20/65.

The results confirmed that there is a relevant influence on the splitting tensile strength due to drying under the different storage types A, B and C. If the samples were stored continuously under standard climatic conditions (20°C/65% relative humidity) after stripping until the time of testing (storage type C), the strength values were predominantly up to 30% lower than for the continuously water-stored A samples. The top concretes (D>8) were most affected by the storage type C, with on average 10% ($f_{ct,sp}$) and 22% ($f_{c,cube}$) lower strength values being observed. If the storage type B was used it had a favourable effect on the

strength development. For washed concretes, the strength increase was on average 6% ($f_{ct,sp}$) and 11% ($f_{c,cube}$), for top concretes (D>8) 15% ($f_{ct,sp}$) and 23% ($f_{c,cube}$) and for bottom concretes 17% ($f_{ct,sp}$) and 15% ($f_{c,cube}$).

In the investigations (intermediate phase) initiated by the group of advisors to assess the practical relevance, the characteristic strength values determined in the initial test for the new construction of motorway sections were compared with subsequently conducted own laboratory tests (test series 4) using retention samples. Here, high splitting tensile strength values could also be achieved. A comparison of the compressive strengths of test series 4 with the characteristic strength values from the initial test documents is shown in Figure 2.

The minimum compressive strength requirements were met for test series 4 with one exception. The compressive strengths of the concretes with the material from BAB B are comparable with the values from the initial test. This is only partially true for those with the material from BAB A.

In the final work phase 3, it was shown that the laboratory concretes were able to fulfil all requirements for the air void characteristics and proved to be resistant to freeze-thaw attack in the CDF test.

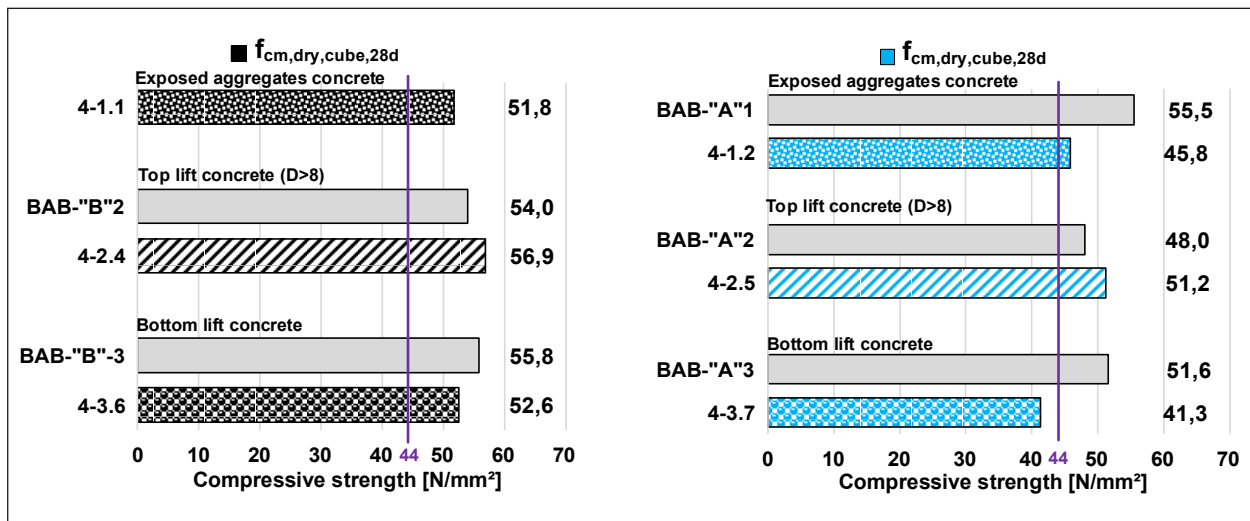


Fig. 2: Compressive strengths – comparison of specimens produced in the course of the initial tests (BAB) and in the researcher's own laboratory from reserve materials

Variation parameters	Initial recipe top lift concrete	Variation step	Influence not normalised		Influence normalised	
			Effect (up to)	Weighting	Effect (up to)	Weighting
1	2	3	4	5	6	7
Air content	4,0 Vol. %	+1 Vol. %	-0,53 N/mm ²	--		
w/c-ratio	0,43	+0,05	-1,14 N/mm ²	---	-0,59 N/mm ²	--
Type of cement	CEMI 42,5 N	CEM I/A-S 42,5 R	13%	++	7%	+
		CEM I/B-S 42,5 N	15%	++	11%	++
		CEM I/B-S 42,5 R	6%	+	0%	o
		CEM III/A 42,5 R	7%	+	0%	o
Cement content	340 kg/m ³	+20 kg/m ³	-0,14 N/mm ²	o	-0,03 N/mm ²	o
Type of sand	A	B	-1%	o	1%	o
Type of aggregates (concrete 0-22)	Rhyolite	Diabase	5%	+	12%	+
		Gravel	-2%	o	1%	o
Type of aggregates (concrete 0-16)	Rhyolite	Gravel (cr.)	22%	+++	24%	+++
		Gabro	7%	+	4%	o
Change largest grain	22 mm	from 8 to 16 mm	-0,28 N/mm ²		-0,15 N/mm ²	
		from 16 to 22 mm	-0,21 N/mm ²	-	-0,11 N/mm ²	o
		from 22 to 32 mm	-0,35 N/mm ²		-0,19 N/mm ²	
Grading curve	AB	A	-18%	--	-30%	---
		B	-1%	o	3%	o
Additives	Acrylat	Drop-out grain size	-17%	--	-7%	-
		Polycarb.	0%	o	8%	+

Legend: [-] Weighting of the negative effect; [] Weighting of the effect on the splitting tensile strength: „hardly“ + +/- - „significant“
 [+] Weighting of the positive effect; [] Weighting influenced by normalisation +/- „low“ + + +/- - - „strong“

Tab. 3: Summary – Influence of raw materials and concrete composition on the splitting tensile strength

4 Conclusions

Based on the analysis of the entire test results, a summarised assessment and weighting of the influence of different raw materials and concrete compositions on the splitting tensile strength of top concretes produced and tested in the laboratory is presented in Table 3.

The evaluation of the influences of the selected parameters on the splitting tensile strength of the road concretes was successfully completed within the work phases. According to this, the splitting tensile strength can be significantly influenced by adjusting the fresh concrete air void content, and the w/c-value, as well as by using alternative cements containing blastfurnace slag. For the top

and bottom concretes, replacing the initial coarse aggregate with alternative crushed aggregate proved to be particularly effective. The analysis of the selected durability parameters confirmed that all laboratory road concretes fulfilled the normative requirements and proved to be resistant to freeze-thaw attack.

Inhalt

1	Einleitung	13	5	Untersuchungsmethoden	39
2	Grundlagen	16	5.1	Frischbetonprüfungen	39
2.1	Spaltzugfestigkeit	16	5.2	Druckfestigkeitsermittlung	39
2.1.1	Einleitung	16	5.3	Spaltzugfestigkeitsermittlung	39
2.1.2	Historischer Hintergrund des Spaltzugversuches	17	5.4	Biegezugfestigkeitsermittlung	41
2.1.3	Grundlagen des Spaltzugsversuchs ..	17	5.5	Spaltzugprüfung – Bruchflächenanalyse	41
3	Versuchsprogramm	19	5.6	Ermittlung der Luftporenkennwerte am Festbeton	41
3.1	Allgemeines	19	5.7	CDF-Prüfung	41
3.2	Arbeitsphasen	19	6	Untersuchungsergebnisse – Arbeitsphase 1	42
3.2.1	Arbeitsphase 1	20	6.1	Allgemeines	42
3.2.2	Arbeitsphase 2	23	6.2	Ergebnisse der Festigkeitsentwicklung bis zum Probenalter von 56 Tagen ..	44
3.2.3	Arbeitszwischenphase 2-3	24	6.2.1	Allgemeines	44
3.2.4	Arbeitsphase 3	25	6.2.2	Variationsparameter Luftporen- gehalt	44
3.3	Überblick – Versuchsprogramm	26	6.2.3	Variationsparameter w/z-Wert	51
4	Ausgangsstoffe, Rezepturen und Herstellung der Betone	27	6.2.4	Variationsparameter Zementart	51
4.1	Ausgangsstoffe	27	6.2.5	Variationsparameter Zementmenge ..	52
4.1.1	Zemente	27	6.2.6	Variationsparameter Sandart	53
4.1.2	Gesteinskörnungen	27	6.2.7	Variationsparameter Gesteins- körnung	53
4.1.3	Luftporenbildner, Betonverflüssiger, Fließmittel und Schwindreduzierer ..	29	6.2.8	Variationsparameter Größtkorn	54
4.2	Betonrezepturen	30	6.2.9	Variationsparameter Sieblinie	55
4.2.1	Arbeitsphase 1	30	6.2.10	Variationsparameter Zusatzmittel ..	55
4.2.2	Arbeitsphasen 2 und 3	32	6.3	Bruchflächenanalyse	55
4.3	Herstellung, Lagerung und Vor- bereitung der Betonprobekörper	33	7	Untersuchungsergebnisse – Arbeitsphase 2	58
4.3.1	Allgemeines	33	7.1	Allgemeines	58
4.3.2	Arbeitsphase 1	33	7.2	Charakteristische Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen	60
4.3.3	Arbeitsphase 2	36	7.2.1	Allgemeines	60
4.3.4	Arbeitsphase 3	37			
4.3.5	Zwischenphase 2-3	38			

7.2.2	Untersuchungsergebnisse	60	9.3	Ergebnisse der mikroskopischen Analyse der Festbetonprüfkörper	93
7.3	Einfluss verschiedener Lagerungsarten der Probekörper auf die Spaltzug- und Druckfestigkeit	62	9.4	Fazit zu Untersuchungen der Straßenbetone aus Arbeitsphase 3	95
7.4	Festigkeitsentwicklung der Probekörper bis zum Probenalter von 91 Tagen	64	10	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse zum Einfluss der Ausgangsstoffe von Straßenbetonen auf die 28 d-Spaltzugfestigkeit	96
7.4.1	Allgemeines	64	10.1	Allgemeines	96
7.4.2	Variationsparameter Luftporengehalt.	66	10.2	Auswertungsverfahren	96
7.4.3	Variationsparameter w/z-Wert	66	10.3	Einflusspotenzial des Parameters „Luftporengehalt“	97
7.4.4	Variationsparameter Zementart	68	10.4	Einflusspotenzial des Parameters „w/z-Wert“	98
7.4.5	Variationsparameter Zementmenge	69	10.5	Einflusspotenzial des Parameters „Zementart“	99
7.4.6	Variationsparameter Sandart	71	10.6	Wichtung der Einflüsse der untersuchten Parameter.	101
7.4.7	Variationsparameter Gesteinskörnung	72	11	Zusammenfassung.	104
7.4.8	Variationsparameter Größtkorn	73		Literatur.	109
7.4.9	Variationsparameter Sieblinie.	75		Bilder.	111
7.4.10	Variationsparameter Zusatzmittel.	76		Tabellen.	113
7.5	Bruchflächenanalyse	79			
7.5.1	Zusammenfassung.	80			
8	Untersuchungsergebnisse – Zwischenphase 2-3	80			
8.1	Allgemeines	80			
8.2	Vergleich der Frischbetonkennwerte der Praxisbetone	81			
8.3	Spaltzugfestigkeitsentwicklung der Praxisbetone	82			
8.4	Druckfestigkeitsentwicklung der Praxisbetone	83			
8.5	Ergebnisse der Frost-Tausalz-Untersuchung.	85			
8.6	Ergebnisse der Luftporenauszählung an Praxisfestbetonproben	87			
8.7	Fazit zur Untersuchung der Praxisbetone	88			
9	Untersuchungsergebnisse – Arbeitsphase 3	88			
9.1	Gegenüberstellung der Festigkeitsentwicklung der Betone aus der Arbeitsphase 3 und Arbeitsphase 2	89			
9.2	Ergebnisse der Frost-Tausalz-Untersuchung.	90			

Die Anhänge I – III zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einleitung

Betonfahrbahndecken gelten insbesondere bei hohen Verkehrsbelastungen als dauerhaft und wartungsarm und stellen grundsätzlich eine wirtschaftliche Bauweise für den Oberbau von Verkehrsflächen dar. Sie müssen nicht nur beanspruchungsgerecht dimensioniert, frostsicher und dauerhaft sein, es müssen auch umwelttechnische Aspekte beachtet werden, die weitere Anforderungen auch an mechanische Kennwerte stellen, um z. B. für die Texturierung von Fahrbahnoberflächen geeignet zu sein. So ist die gesundheitsgefährdende Lärmbelastung durch den seit Jahren stetig ansteigenden Straßenverkehr ein umwelttechnischer Aspekt, der nicht nur in Deutschland zunehmend einen höheren Stellenwert einnimmt. Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass zu den zwei Hauptgeräuschquellen die Antriebsgeräusche des Fahrzeugs und das Reifen-Fahrbahn-Geräusch zählen. Werden die erzeugten Geräusche auf einer Schnellstraße betrachtet, so gewinnt das Reifen-Fahrbahn-Geräusch an Dominanz. Dieses wird im Allgemeinen durch aerodynamische und mechanische Prozesse zwischen den Reifen, der Luft und der Fahrbahn hervorgerufen. Durch die wachsende Bereitschaft der Gesellschaft, Elektrofahrzeuge zur Fortbewegung einzusetzen, wird die Reduzierung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches in der nahen Zukunft noch stärker an Bedeutung gewinnen. Vor diesem Hintergrund fordern Politik und Gesellschaft die Ausschöpfung von Optimierungsmöglichkeiten im Hinblick auf die akustische Wirkung von Straßenfahrbahndecken bei Überfahung. [1, 7, 13]

Das Reifen-Fahrbahn-Geräusch wird im Wesentlichen durch die Oberflächenstruktur der Fahrbahndecke beeinflusst. Seit 2006 wird in Deutschland eine Fahrbahndecke mit Waschbetontextur als Regelbauweise hergestellt, um die Lärmemissionen zu reduzieren. Die sogenannte „Plateau mit Schluchten“-Textur wird durch den Einsatz von Oberflächenverzögerern und Nachbehandlungsmitteln auf dem eingebauten, verdichteten und geglätteten Fahrbahnoberbeton erzeugt. Der Oberflächenverzögerer verhindert das Erstarren und die Anfangserhärtung der oberen Zementsteinschicht für einen begrenzten Zeitraum. Ist der Beton ausreichend erhärtet, erfolgt die Freilegung der obersten groben Gesteinskörnungskuppen durch Ausbürsten der vorbehandelten dünnen Zementsteinschicht. Mit dem genannten Verfahren wird nach RLS 90 [N11] eine Lärminderung von bis zu -2 dB(A) er-

reicht. Schon heute werden jedoch höhere Geräuschpegelminderungen gefordert, die durch die Waschbetonbauweise nicht mehr erfüllt werden können. [1, 13]

Ein weiteres, seit 15 Jahren eingesetztes Verfahren der Texturierung primär zur Griffigkeitsoptimierung der Fahrbahnoberflächen ist das sogenannte „Grinding“. Beim Grinding wird die feste Fahrbahnoberfläche mit Diamantschleifscheiben in Längsrichtung behandelt, die auf einer rotierenden Achse in definierten Abständen angebracht sind. Die Oberfläche erhält eine gerichtete Textur, die durch Rillen und Stege gekennzeichnet ist. Die gewünschte Texturgeometrie wird durch die Wahl von Abstand und Breite der Diamantscheiben bestimmt. [1, 6, 7, 13, 16]

In den letzten Jahren wurden mehrere Forschungsvorhaben zur Weiterentwicklung des oben genannten Texturierungsverfahrens für Fahrbahnoberflächen auch an Erprobungsstrecken durchgeführt. Die Erprobungsfahrbahndecken unterscheiden sich dabei sowohl in der Betonzusammensetzung als auch in der Variation der Texturgeometrie. Untersucht wurden das Lärminderungspotenzial und die Dauerhaftigkeit. [1, 15, 16]

Eine Festlegung bzw. Dimensionierung von Betondecken und deren Schichtenaufbau, unter anderem auch mit lärmindernden Fahrbahnstrukturierungen, kann in bewährten Bauweisen durch die „Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO)“ [N1] nach dort definierten standardisierten Oberbauten erfolgen. Dabei werden von der RStO Schichtdicken aufgrund der bemessungsrelevanten Beanspruchung und der daraus zugeordneten Belastungsklassen vorgeschlagen. Parameter, wie gewählte Baustoffe oder weitere Beanspruchungsspezifikationen, gehen in die Dimensionierung nach standardisierten Oberbauten der RStO nicht direkt ein. Nach heutigem Stand müssen die nach RStO dimensionierten Straßenbetone die Mindestwerte der Druckfestigkeit nach den „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau der Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton“ (ZTV Beton-StB 07) [N2] erfüllen.

Seit Einführung der „Richtlinie für rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen (RDO)“ [N3] zählt die gezielte Berechnung der erforderlichen Deckendicke zum Stand der Technik, so z. B. auch für die dimensio-

nierungsrelevante Beanspruchung [B] in Abhängigkeit von der Summe der gewichteten äquivalenten 10-t-Achsübergänge. Maßgebend sind Deckendicke und Betonzugfestigkeit. Bei der Berechnung erfolgt eine Gegenüberstellung von dem aus der Verkehrs- und Temperaturbeanspruchung resultierenden Moment mit dem aufnehmbaren Moment als Bauteilwiderstand. Die maximalen Zugspannungen infolge der Momentenbeanspruchungen treten wechselseitig an den oberen und unteren Randfasern der Betondecken auf. Wird die aufnehmbare Zugfestigkeit erreicht, kommt es zur Rissbildung und zum Versagen der unbewehrten Fahrbahnplatten. Die Spaltzugfestigkeit gibt einen guten indirekten Rückschluss auf die Betonzugfestigkeit als Beurteilungskriterium. Die Spaltzugfestigkeit kann an zylindrischen Betonproben ermittelt werden, somit können Laborproben und aus fertiggestellten Betondecken entnommene Bohrkernproben gleichermaßen geprüft werden. Zur Beurteilung der Zugfestigkeit der oberen und unteren Randfaser einer Betondecke kann die Spaltzugfestigkeit an 5 cm dicken, zuvor von den Bohrkernen abgesägten zylindrischen Scheiben separat geprüft werden. Somit geht die an den Zylinderscheiben ermittelte Spaltzugfestigkeit als maßgebender Materialkennwert bei der rechnerischen Dimensionierung in das Berechnungsverfahren mit ein. Zur Präzisierung der Prüfmethode wurde eigens die „Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Zylinderscheiben als Eingangsgröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehr“ (AL Sp-Beton) [N4] entwickelt.

Im Jahr 2013 wurde ein durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung (BAM) im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) breit aufgestellter Ringversuch zur statistischen Auswertung von Spaltzugversuchen abgeschlossen. Die Ergebnisse des Ringversuches zeigten, dass das Prüfverfahren gemäß AL Sp-Beton [N4] eine hinreichende Präzision aufweist. Der Einfluss des Einsatzes unterschiedlichen Personals sowie verschiedenartiger Prüftechnik bei den einzelnen Prüfstellen auf die Prüfergebnisse konnte als ausreichend gering ermittelt werden. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden Präzisierungen zur Spaltzugfestigkeitsprüfung bezüglich der Herstellung und Lagerung der Probekörper übernommen und führten zur Erarbeitung und Aufnahme der Spaltzugprüfung in die TP B-StB [N7]. Damit wurde die TP Beton-StB [N16] abgelöst. Somit ermöglicht die vorliegende

semiprobabilistische Verfahrensweise der RDO [N3] eine hinreichend präzise Berücksichtigung von material- und beanspruchungsspezifischen Parametern bei der direkten Dimensionierung der Straßenbetonschichtdicken. [14, 17, 19]

Weiterhin fand das Verfahren bereits Anwendung bei mehreren Untersuchungen zur Beurteilung der strukturellen Substanz von Betonfahrbahndecken. Zudem wird die an den Zylinderscheiben ermittelte Spaltzugfestigkeit verstärkt bei der Abwicklung konventioneller Bauverträge als zusätzlicher Festigkeitsparameter zum Aufbau einer Erfahrungssammlung ermittelt. Somit liegt momentan ein sehr umfangreicher Daten- und Erfahrungshintergrund hinsichtlich des o. g. Materialkennwertes bei konventionellen Baumaßnahmen für eingesetzte Ober- und Unterbetonrezepturen vor.

Die Erfahrungssammlung zu schallmindernden Grinding-Fahrbahndecken hinsichtlich des zielsicheren Erreichens der erforderlichen Spaltzugfestigkeit sowie weiterer verarbeitungstechnologischer Parameter befindet sich im weiteren Ausbau. Vor allem ist die Dauerhaftigkeit der o. g. Texturierungen ein signifikanter Parameter. Dazu findet die Profilierung in erster Linie in der obersten Gesteinskörnungsschicht statt, da im Vergleich zu der Zementsteinmatrix bei der Gesteinskörnung ein erhöhter Verschleißwiderstand vorliegt. Des Weiteren ist es vorteilhaft, eine vollständige Einbindung der Gesteinskörnung in die Zementsteinmatrix und gleichzeitig einen hinreichenden Deckenschluss durch das Konzipieren einer optimalen Zementsteinschichtdicke auszubilden. Die für das Grinding nötige Abtragstiefe der Fahrbahnoberfläche soll dabei technisch und wirtschaftlich vertretbar bleiben. Auf Basis vorliegender technischer Anforderungen sollen hierfür z. T. andere Ausgangsstoffe und verschiedenartige Betonzusammensetzungen, beispielsweise im Hinblick auf das Größtkorn oder die Packungsdichte, zum Einsatz kommen.

Zielsetzung

Ausgehend von aktuell praxisrelevanten Rezepturen für Waschbetone, Oberbetone ($D > 8$ mm) und Unterbetone wird in einer breit angelegten Parameterstudie (vgl. Kapitel 3) mittels Laboruntersuchungen der Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Spaltzugfestigkeit und die Dauerhaftigkeit zum Teil auch in Abhängigkeit von unterschiedlichen La-

gerungsarten untersucht. Dabei dienen manche Betonzusammensetzungen allein dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn und genügen somit nicht den Anforderungen an Fahrbahndeckenbetone gemäß ZTV Beton-StB 07 [N2] und TL Beton-StB 07 [N5].

In den ersten Feldversuchen zeigten die Fahrbahnoberflächen mit der neuartigen Grindingtextur gute Ergebnisse bezüglich der Dauerhaftigkeit, der Griffigkeit und des Lärminderungspotenzials. Zur Herstellung derartiger Texturfahrbahndecken sind jedoch neue Betonrezepturen unter Beachtung entsprechender betontechnologischer Besonderheiten zu entwickeln. Somit sind weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der Verarbeitung, Dauerhaftigkeit und Erreichung der erforderlichen Festigkeitswerte für spezielle zu konzipierende Betonzusammensetzungen erforderlich.

Im Rahmen des FE-Vorhabens ist mittels Laboruntersuchungen der Einfluss der Betonzusammensetzung auf die an Zylinderscheiben ermittelte Spaltzugfestigkeit zu identifizieren. Dabei ist es notwendig, die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Ausgangsstoffen, den daraus dimensionierten Betonrezepturen und deren Festigkeitswerte detailliert zu untersuchen und zu bewerten. Gleichzeitig wird eine Gegenüberstellung zwischen der erreichten Spaltzugfestigkeit und der Dauerhaftigkeit (z. B. im Kontext der Expositionsklasse) der betrachteten Betonrezepturen unter Berücksichtigung des Frost-Tausalz-Widerstandes und der Luftporenkennwerte erforderlich. Begleitend werden Frischbetonkennwerte und die Betondruckfestigkeit ermittelt. Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen wird der Weg für die Zukunft vorbereitet, Straßenbetone mit speziellem Anforderungsprofil auch unter Einbeziehung z. B. von Zementen mit im Vergleich zu Portlandzementen niedrigerer CO₂-Bilanz oder von Gesteinskörnungen aus weit verbreiteten Vorkommen nutzen zu können. Somit können Ressourcen ganz spezieller Gesteinskörnungen geschont und Transportwege verkürzt werden. Damit kann nicht nur ein entscheidender Beitrag zur Gewährung von Nachhaltigkeit geleistet werden, sondern auch die Akzeptanz und die Wirtschaftlichkeit z. B. für den Neubau von Betonfahrbahndecken unter Anwendung innovativer Oberflächentexturierungsverfahren erhöht werden.

Die Ergebnisse sind ebenso anwendbar zur gezielten Anpassung von Betonrezepturen, wenn z. B. im

Rahmen der Erstprüfung einer Betonrezeptur Anforderungswerte an die Spaltzugfestigkeit unterschritten worden sind.

Zusammenfassend sollte als Gesamtergebnis des FE-Vorhabens angestrebt werden, durch systematische Parameterwahl Betonrezepturen zu entwickeln und zu prüfen, um den Einfluss der Ausgangsstoffe auf die Spaltzugfestigkeit und die zugehörigen Dauerhaftigkeitskenndaten zu analysieren. Diese Erkenntnisse können zukünftig als Basis für zielgerichtete Rezepturenentwicklungen unter Einbeziehung einer größeren Auswahl an Ausgangsstoffen für Fahrbahndeckenbetone genutzt werden.

Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung

Die wissenschaftliche Bedeutung liegt in dem Erkenntnisgewinn über die Entwicklung der Spaltzugfestigkeit für Straßenbetone und den zugehörigen Dauerhaftigkeitskennwerten unter dem Einfluss systematisch variierender Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen auch unter verschiedenen Nachbehandlungen (vgl. Lagerungsarten). Dabei wurde je Prüfserie Bezug genommen auf die jeweiligen praxisüblichen Ausgangsmischungen eines Waschbetons, eines Oberbetons ($D > 8 \text{ mm}$) und eines Unterbetons.

Durch die gewonnenen Erfahrungen im Verlauf des FE-Vorhabens lässt sich neben derzeit praxisrelevanten Rezepturen u. a. auch für die Forschungs- und Entwicklungsaktivität zu den neuartigen Straßenbetonfahrbahndecken mit innovativen Grindingtexturierungen eine technische und wirtschaftliche Bedeutung ableiten, denn bei der Grindingbauweise ist die Qualität der Textur von der Kornform der Gesteinskörnung unabhängig, da die Gesteinskornschicht ebenfalls angeschnitten wird. Somit kann die verwendete Betonmischung vollständig runde Gesteinskörnung enthalten. Aufgrund der Unabhängigkeit von der Bruchflächigkeit besteht die Möglichkeit, bei den Betonzusammensetzungen kostengünstigere Gesteinskornarten ohne Beeinträchtigungen der Festigkeit und Dauerhaftigkeit zu verwenden. [1, 6, 14]

Mit Hinweis auf die zu erarbeitenden Empfehlungen für die Praxis können zielgerichtete Betonmischungszusammensetzungen zur Herstellung dauerhafter, lärmreduzierender Straßenbetonfahrbahndecken ausgearbeitet werden.

Besonders bedeutend sind auch die Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses verschiedener Zementarten auf die Festbetoneigenschaften. Laut TL-Beton-StB 07 [N5] wird für die Herstellung von Straßenbetonen als Regelfall ein Portlandzement (CEM I) vorgegeben. Begründet wird die favorisierte Verwendung von Portlandzement unter anderem durch das zielsichere Erreichen des Frost-Tausalz-Widerstandes der Zementsteinmatrix ohne besonderen Nachbehandlungsbedarf. Umwelttechnisch weist jedoch diese Zementart ein wesentliches Defizit auf. Die hohen Klinkeranteile erzeugen durch deren Herstellung sehr hohe CO₂-Emissionen, seit geraumer Zeit ein problematisches Thema in Politik und Gesellschaft [2]. Alternativ können unter Abstimmung mit dem Bauherrn CO₂-ärmere Zemente zur Straßenbetonherstellung zum Einsatz kommen. Darunter werden die Portlandhütten-, Portlandschiefer-Portlandkalkstein- sowie Hochofenzemente verstanden [N5]. Eine geringe Bereitschaft, hüttenandreiche Zemente für den Straßenbau zu verwenden, wird mit einer intensiveren Nachbehandlung und Bedenken bezüglich des Erreichens des ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstandes begründet.

Es wäre von wirtschaftlichem und ökologischem Interesse, wenn die aus dem vorliegenden FE-Vorhaben gewonnenen Erfahrungskennwerte die Einsatzquote klinkerärmerer, hüttenandhaltiger Zemente (CEM II/A-S, CEM II B-S, CEM III/A) im Betonstraßenbau erhöhen würde, und somit zur Optimierung der ökologischen Nachhaltigkeit von Straßenbetonen beitragen könnte.

Eine wirtschaftliche Bedeutung hat vor allem die Kenntnis über den Einfluss der Gesteinkörnungsorten auf die Spaltzugfestigkeit. In Abhängigkeit von der geforderten Straßenbetonklasse und der TL Gestein-StB 18 [N6] könnten, auch unter ökologischen Gesichtspunkten, möglichst Gesteine von ortsnahen Gewinnungsstätten in Betracht gezogen werden.

2 Grundlagen

2.1 Spaltzugfestigkeit

2.1.1 Einleitung

Zur zielsicheren Dimensionierung von Bauwerken muss der Beton während der gesamten Lebensdauer die erforderlichen Grenzwerte der Festigkeitskennwerte einhalten. Im Bereich des Straßenbaus hat durch Einführung der RDO Beton 09 [N3] die charakteristische Spaltzugfestigkeit im semiprobabilistischen Bemessungsverfahren zur Dickenbemessung der Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen als maßgebender Bemessungswert des Bauteilwiderstands den einstigen Stellenwert der Betondruckfestigkeit abgelöst. Eine direkte Korrelation zwischen der Zug- und Druckfestigkeit eines Betons ist nicht gegeben [3].

Die Betonfahrbahndecken werden durch Verkehrseinwirkung und aus klimatisch bedingten ungleichmäßigen Temperatur- und/oder Feuchteverteilungen über den Querschnitt auf Biegung und Zug wechselseitig beansprucht. Die Zug- und Druckspannungen sind an den oberen und unteren Randfasern maximal. Beim Nachweis muss das einwirkende Moment kleiner als das aufnehmbare Moment an der auf Zug belasteten Randfaser sein. Das aufnehmbare Moment wird über Beton- und Konstruktionseigenschaften abgeleitet. Um sicheres und dauerhaftes Befahren der Betonfahrbahndecken durch die genannten Belastungen zu gewährleisten, müssen die Beanspruchungen deutlich unter der Dauerfestigkeit des Werkstoffs Straßenbeton liegen. Eine Fehleinschätzung vorliegender Festigkeitseigenschaften des i. d. R. unbewehrten Betons kann zur Rissbildung, nicht Gewährleistung einer sichereren Befahrbarkeit oder zur Herstellung unwirtschaftlicher Konstruktionen mit hohen Instandhaltungskosten führen. [N3, 14]

Als Prüfvorschrift zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit im Sinne der RDO-Beton 09 [N3] wurde die „Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Zylinderscheiben als Eingangsgröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehrsflächen“, die AL Sp-Beton [N4], erarbeitet. Ihre Regelungen sind unter Beachtung der „Ergänzenden Anweisung zur Arbeitsanleitung „AL Sp-Beton“ in die TP B-StB [N7] eingeflossen. Die Grundzüge der Prüfvorschrift bildete die europäische Spaltzugfestigkeitsprüfnorm DIN EN 12390-6 [N20]. Wesentli-

che Unterschiede liegen in der Prüfkörpergeometrie und der Art der Lasteinleitung. Die Prüfung der Straßenbetone [N4, N7] wird an 5 cm breiten Betonscheiben mit einem Durchmesser von 100 mm durchgeführt. Nach europäischer Norm erfolgt die Prüfung an einem 30 cm langen Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm. Während bei der europäischen Norm die Lasteinleitung über ebene Schienen und Hartfaserstreifen vorgeschrieben ist, ist die Lasteinleitung gemäß AL Sp-Beton [N4] bzw. TP B-StB [N7] über eine konkave Lasteinleitung und Lasteinleitungstreifen aus Hartfilz festgelegt. Die Präzision des Prüfverfahrens gemäß AL Sp-Beton [N4] konnte über einen Ringversuch mit 13 beteiligten Prüfstellen an Labor- und Bestandsbetonen unter Vergleich- und Wiederholbedingungen statistisch abgesichert werden [19].

2.1.2 Historischer Hintergrund des Spaltzugversuches

Die Spaltzugprüfung wurde fast zeitgleich unabhängig voneinander von Akazana in Japan (1937), bekannt unter der Akazawa-Methode, und von Carneiro in Brasilien (1941), bekannt als Brazilian-Test entwickelt. Die Testmethode, die zunächst nur an zylindrischen Betonproben angewandt wurde, wurde schon bald nach Bekanntmachung auf internationalen Konferenzen in die Technische Normung (ASTM C496/C496M-04, DIN EN 123960-6) aufgenommen. In den folgenden Jahren wurde die Testmethode auch für die Anwendung an Betonprismen oder -würfeln erweitert. Die Proben können diagonal oder anliegend geprüft werden, vgl. Bild 2-1. [3, 10]

2.1.3 Grundlagen des Spaltzugversuchs

Bei der Spaltzugprüfung werden zylindrische Proben liegend auf sich gegenüberliegenden Mantellinien in eine Druckprüfmaschine eingebaut und bis zum Bruch belastet. Hierbei wird im Prüfkörper ein Spannungszustand erzeugt, bei dem Druckkräfte in Richtung der Linienlast und Zugkräfte senkrecht zur Belastungsrichtung, sogenannte Querkzugkräfte entstehen. Der Spannungszustand führt bereits bei verhältnismäßig geringen Bruchlasten zu einem Versagen.

Die Theorie dieses indirekten Zugversuches beruht unter anderem auf der Entwicklung der Frochts [9] Spannungsgleichungen in einem Punkt. Die genannten Gleichungen wurden durch eine Betrachtung einer sehr dünnen Kreisscheibe unter Beanspruchung von zwei gegenüberliegenden Einzellasten aufgestellt. Die dabei entstehenden Spannungen sind in Bild 2-2 dargestellt.

Auf Grundlage der Elastizitätstheorie [18] können so die Spannungen an jedem beliebigen Punkt durch die folgenden Gleichungen 1 bis 3 ermittelt werden.

$$\sigma_x = -\frac{2*F}{\pi*l} \left[\frac{(R-y)*x^2}{r_1^2} + \frac{(R+y)*x^2}{r_2^2} - \frac{1}{D} \right] \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\sigma_y = -\frac{2*F}{\pi*l} \left[\frac{(R-y)*x^3}{r_1^4} + \frac{(R+y)^3}{r_2^4} - \frac{1}{D} \right] \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\tau_{xy} = \frac{2*F}{\pi*l} \left[\frac{(R-y)^2*x}{r_1^4} + \frac{(R+y)^2*x}{r_2^4} \right] \quad (\text{Gl. 3})$$

Demnach treten die höchsten Normalspannungen im Mittelpunkt der Kreisscheibe auf, was zum Ver-

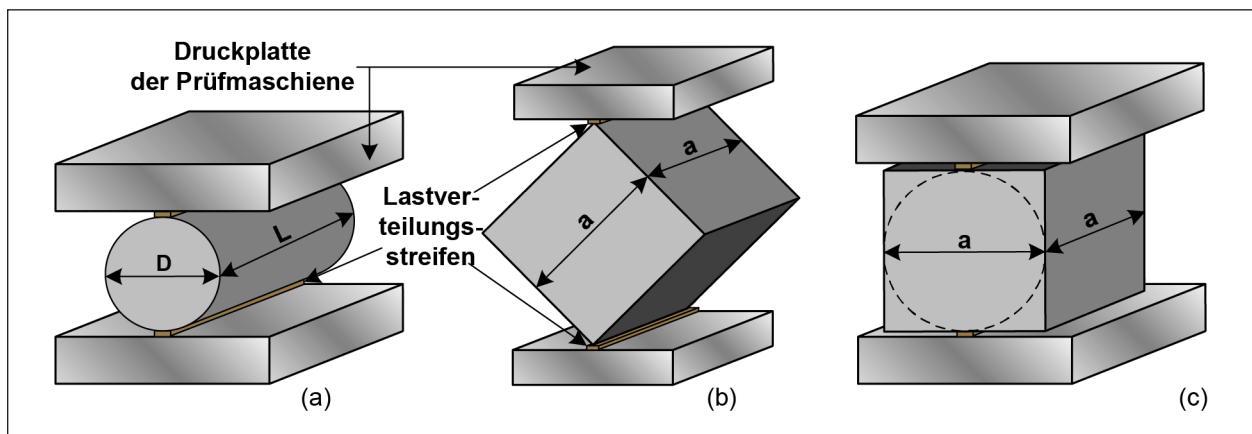


Bild 2-1: Spaltzugversuch – Versuchsaufbau an zylindrischen Prüfkörpern a), diagonal b) oder anliegend c) eingebauten prismatischen Betonproben [10]

sagen des Prüfkörpers durch Entstehung der Zugspannungen in Probenmitte führt. Die nominelle Zugfestigkeit der Spaltzugproben wird demnach nach [N7] wie folgt definiert:

$$\sigma_T = -\frac{2 \cdot F}{\pi \cdot l \cdot D} = f_{ct'sp} \quad (\text{Gl. 4})$$

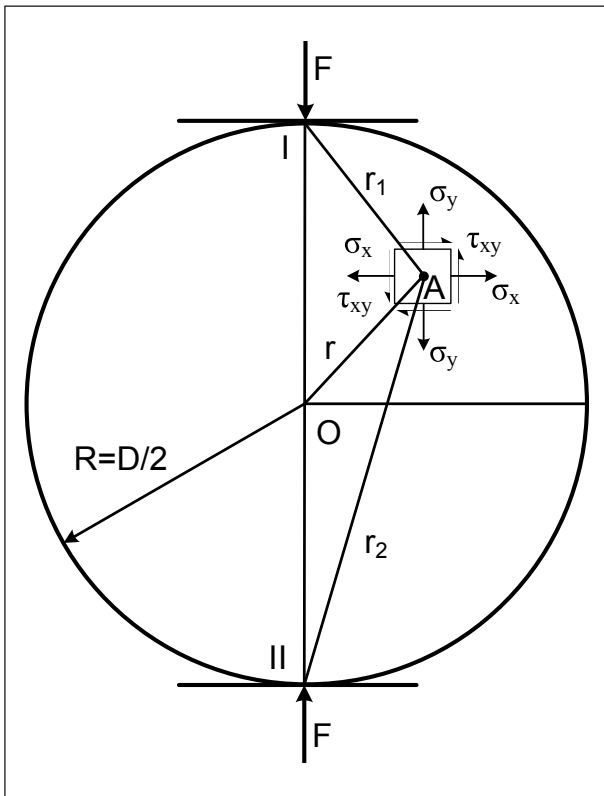
mit

$$\sigma_T = f_{ct'sp} = \text{Spaltzugfestigkeit [MPa]}$$

$$F = \text{Bruchlast [N]}$$

$$l = \text{Länge des Prüfkörpers [mm]}$$

$$D = \text{Durchmesser des Prüfkörpers [mm]}$$



Zur Vermeidung hoher Druckspannungen an den Lasteinleitungsstellen werden spezielle Lasteinleitungsstreifen zwischen den Lasteinleitungsplatten der Prüfmaschine und der Prüfkörper zur Steuerung der Kräfteinleitung eingesetzt. Durch den Einsatz von Lasteinleitungsstreifen kann zudem der Einfluss kleinerer Imperfektionen auf der Mantelfläche der Prüfkörper reduziert werden.

Die Untersuchungen zur Verwendung von Lasteinleitungsstreifen wurden unter anderem von MITCHELL [11] durchgeführt. In Bild 2-3 sind die Bruchbilder in Abhängigkeit von der Breite der Lasteinleitung dargestellt. Dabei konnte gezeigt werden, dass ohne Lasteinleitungsstreifen ein Druckbruch in der Probe erzeugt wird. Ein typisches Bruchbild ist in Bild 2-3 links dargestellt. Bei breiten Lasteinleitungsstreifen wird ein Schubbruch beobachtet (siehe Bild 2-3 rechts). Bei einer Breite der Lasteinleitung von $d/10$ bis $d/20$ tritt ein Zugbruch im Prüfkörper auf. [4, 8]

Bild 2-2: Spannungen in einer Kreisscheibe infolge gegenüberliegender Einzellasten in Anlehnung an [9]

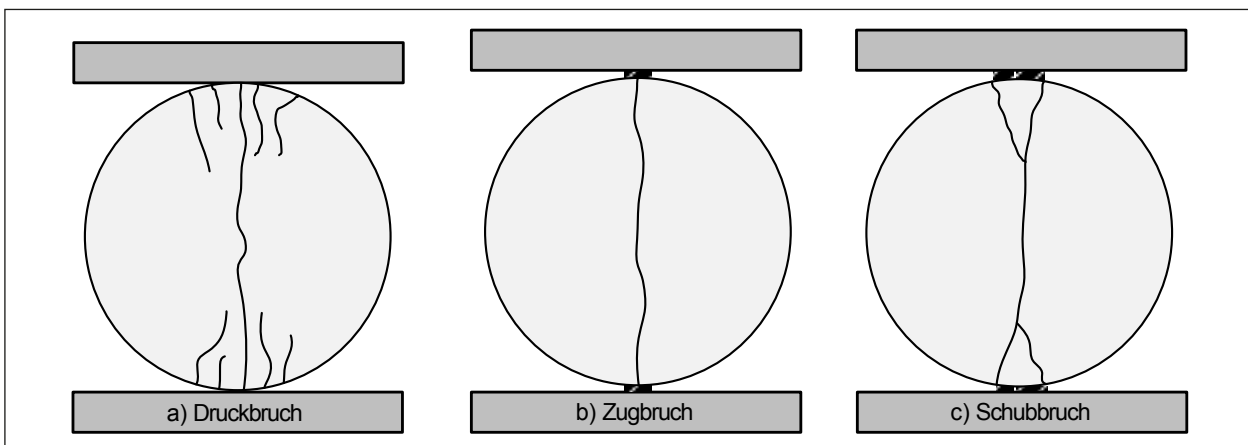


Bild 2-3: Bruchmöglichkeiten bei der Spaltzugprüfung nach MITCHELL [11]

3 Versuchsprogramm

3.1 Allgemeines

Um den Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Spaltzugfestigkeit unter Berücksichtigung von Frisch- und Festbetonkennwerten und der Dauerhaftigkeit zu untersuchen, wurde je Prüfsrie (Fahrbahndeckenbetonart) eine Ausgangsmischung systematisch durch zielgerichtetes Anpassen ihrer Ausgangsstoffe oder Zusammensetzung variiert und in Arbeitsphase 2 auch unterschiedlich nachbehandelt. Bei den drei Ausgangsmischungen handelt es sich jeweils um praxisübliche Betonzusammensetzungen eines Waschbetons, Oberbetons ($D > 8$ mm) und Unterbetons jeweils eines bereits hergestellten Autobahnabschnittes bzw. einer Teststrecke. Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die Betonzusammensetzungen.

In der weiteren Bearbeitung und Diskussion der Ergebnisse werden alle untersuchten Betone gemäß ihrer Art als Waschbeton, Oberbeton ($D > 8$) oder Unterbeton bezeichnet, ungeachtet dessen, ob alle Anforderungen an den Fahrbahndeckenbeton gemäß der ZTV Beton-StB 07 [N2] bzw. TL B-StB 07 [N5] erfüllt werden. In der Regel werden die Anforderungen eingehalten.

3.2 Arbeitsphasen

Inhaltlich kann das Laborprogramm in drei Arbeitsphasen (AP) und eine Zwischenphase unterteilt werden:

- Arbeitsphase 1: Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Spaltzug- und Druckfestigkeit der zu konzipierenden Unter-, Ober- und Waschbetone für den Straßenbau mit umfangreicher Parameterstudie bis zum Probekörperalter von 56 Tagen.
- Arbeitsphase 2: Auswirkung der Lagerungsbedingungen für die Probekörper der ausgewählten Straßenbetone mit differenzierten Betonzusammensetzungen auf die Spaltzug-, Druck-, und Biegezugfestigkeit zum Teil bis zum Probekörperalter von 91 Tagen.
- Arbeitsphase 3: Auswirkung der Betonzusammensetzung auf die Dauerhaftigkeit ausgewählter Straßenbetone mit differenzierten Betonzusammensetzungen (Frost-Tausalz-Widerstand, Luftporengehalt),
- Arbeitszwischenphase 2-3: Vergleichsuntersuchung zur Beurteilung der Praxisrelevanz von im eigenen Labor und im Rahmen der Erstprüfung hergestellten Betonproben aus mehreren Betonautobahnabschnitten.

Untersuchungsvariationen		Prüfsrie		
		Waschbeton	Oberbeton ($D > 8$)	Unterbeton
1	2	3	4	5
Zementart	CEM I	42,5 N	42,5 N	42,5 N
Zementmenge	-	420 kg/m ³	340 kg/m ³	340 kg/m ³
Gesteinskörnung grob	Vulkanite	Rhyolith - Splitt	Rhyolith - Splitt	-
	Kies	-	-	rund
Gesteinskörnung fein	Sand	a	a	a
Größtkorn	-	8 mm	22 mm	32 mm
Sieblinie	Art	A	AB (3)	AB (3)
	Abfolge	stetig	stetig	stetig
w/z-Wert	-	0,40	0,43	0,43
Luftporengehalt	-	4,0 - 5,0 Vol. %	5,0 - 6,0 Vol. %	4,0 - 5,0 Vol. %
Zusatzmittel	Luftporenbildner	wäss. Tensidlösung	wäss. Tensidlösung	wäss. Tensidlösung
	Betonverflüssiger	Acrylat	Acrylat	Acrylat

Tab. 3-1: Überblick über die Betonzusammensetzungen der Ausgangsmischungen Waschbeton, Oberbeton ($D > 8$) und Unterbeton

3.2.1 Arbeitsphase 1

In der Arbeitsphase 1 wurde der Einfluss der Betonzusammensetzung von Straßenbetonen auf die Spaltzug- und Druckfestigkeit im Probenalter von 28 und 56 Tagen in Abhängigkeit von umfangreichen Parameterkombinationen im Sinne von Vorversuchen für die fortlaufenden Arbeitsphasen untersucht. Die Probekörper wurden gemäß TP B-StB [N7] bis zur Prüfung in Wasser gelagert. Variiert wurden:

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

Tabelle 3-2 gibt die Anzahl der hergestellten Probekörper je Untersuchungsrezeptur in der Arbeitsphase 1 wieder. Bei 73 Rezepturvariationen (vgl. Tabelle 3-9) ergibt sich eine Anzahl von 1.314 Probekörpern.

Variation von Zementart und Zementgehalt

Gemäß TL Beton-StB 07 [N5] können außer den klassischen Portlandzementen bei der Fahrbahndeckenherstellung auch Zemente mit begrenztem Hüttensandgehalt zum Einsatz kommen. Die für das Forschungsprojekt ausgewählten Zemente (2 x CEM I, 1 x CEM II/A-S, 3 x CEM II/B-S, 1 x CEM III/A) unterscheiden sich in der Normfestigkeitsklas-

se, der spezifischen Oberfläche und ihrem Hüttensandgehalt. Die Normfestigkeitsklassen der verwendeten Zemente liegen zwischen 32,5 R und 42,5 R. Die Hüttensandgehalte variieren zwischen 0 und etwa 40 M.-%.

Darüber hinaus erfolgte eine Modifikation des Zementgehaltes als Variationsparameter innerhalb zulässiger Grenzen. Als Referenzwerte wurden die Mindestwerte des Zementgehaltes gemäß TL Beton-StB 07 [N5] eingesetzt. Bei der Ober- und Unterbetonbauweise entsprach dieser Wert 340 kg/m^3 und bei der Waschbetonbauweise 420 kg/m^3 . Die Modifikation erfolgte bei der Ober- und Unterbetonbauweise einmal um 20 kg/m^3 . Somit wurde der maximal zulässige Zementgehalt von 360 kg/m^3 , begründet durch die Expositionsklassen XM1 oder XM2 [12], erreicht. Bei der Waschbetonbauweise wurde der Zementgehalt zur Begrenzung der Feianteile bis 480 kg/m^3 variiert, ausgehend von 420 kg/m^3 wurde er in zwei Schritten um jeweils 30 kg/m^3 erhöht. Der jeweils als Referenz eingestellte w/z-Wert wurde dabei stets eingehalten, vgl. Tabelle 3-3.

Variation der Gesteinskörnung (Grobkornart, Größtkorn, Sieblinie, Sandart)

Für die Untersuchungen der Laborbetone wurden bis zu sieben unterschiedlich grobe Gesteinsarten verwendet, welche die gestellten Anforderungen nach TL Gestein-StB [N6] für diverse Straßenbetone erfüllen. Demgemäß wurden für die Mischungszusammensetzungen Kiese (rund, gebrochen), Plutonite (Gabbro), Vulkanite (Rhyolith, Basalt, Diabas) und Metamorphe (Gneis) eingesetzt. Diese wiesen Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften wie Kornrohddichte, Anteil der gebrochenen Körner, Polierwiderstand, Schlagzertrümmerungswert und Plättigkeitskennzahl untereinander auf.

Darüber hinaus wurde das Größtkorn als Parameter modifiziert. Es wurden Straßenbetone mit einem Größtkorn von 8 mm (Waschbetone), 16 mm, 22 mm (Oberbetone) und 32 mm (Unterbetone) hergestellt.

Des Weiteren wurden die Sieblinien der verwendeten Gesteinskörnungen variiert. Aufgrund der Anforderung gemäß TL Beton-StB 07 [N5] zur Begrenzung der feinen Gesteinskörnung ($D \leq 2 \text{ mm}$) auf höchstens 35 M.-%, wurden die Sieblinien von der Regelsieblinie A bis zur Regelsieblinie B variiert. Zusätzlich wurden Mischungen mit einer Ausfallkör-

Prüfungsart [AP 1]	Art und Anzahl der Probekörper je Betonrezeptur
1	2
Spaltzugfestigkeit	Zylinder 100 x 200 [mm]
28 d	6
56 d	6
Summe	12
Druckfestigkeit	Würfel 150 x 150 [mm]
28 d	3
56 d	3
Summe	6

Tab. 3-2: Probekörperanzahl je Mischungszusammensetzung für die Untersuchungen der Arbeitsphase 1

nung konzipiert, wobei die Anforderung an eine Mindestanzahl an Korngruppen stets eingehalten wurde. In dem Forschungsprojekt kamen drei unterschiedlich feine Gesteinskörnungen bei den Laborbetonen zum Einsatz, zwei Sande mit unterschiedlichen Feinanteilgehalten und ein Edelbrechsand mit erhöhtem Wasseranspruch.

Variation des w/z-Wertes

Für alle vorgesehenen Fahrbahndeckenbetonarten erfolgte eine w/z-Wert-Variation von 0,40, 0,43 bis zum maximal zulässigen Grenzwert von 0,45. Für die konzipierten Betone der Waschbetonbauweise wurde ein Referenzwert auf 0,40 und für Betone mit der Unter- und Oberbetonbauweise auf 0,43 in Anlehnung praxisüblicher Betonzusammensetzungen festgelegt.

Variation des Luftporengehaltes

Straßenbetone werden aufgrund des erforderlichen hohen Frost-Tausalz-Widerstands als Luftporenbetone hergestellt. Somit wurde der Luftporengehalt der hergestellten Frischbetone zwischen 4 und 7 Vol.-% variiert. Aufgrund der erwartungsgemäßen Schwankung des LP-Gehaltes durch die Variation der Ausgangsstoffe in den konzipierten Mischungen und des zu erwartenden Einflusses des LP-Gehaltes auf die Festigkeitseigenschaften wurden bei allen Fahrbahndeckenbetonen jeweils drei LP-Gehaltskategorien von 4 bis 5 Vol.-%, 5 bis 6 Vol.-% und > 6 Vol.-% festgelegt. Für jede gewählte LP-Gehaltskategorie wurde eine Ausgangsmischung mit dem passenden Luftporengehalt konzipiert und hergestellt. Somit konnten bei der Auswertung der Festigkeitsentwicklung die Ergebnisse der Rezepturen zu den passenden drei unterschiedlichen Luftporengehaltskategorien zugeordnet werden.

Variation der Zusatzmittel

Für die Herstellung aller Betonmischungen erfolgt der Einsatz von Luftporenbildnern und Betonverflüssigern, um die erforderliche Konsistenz für einen Betoneinbau mittels Gleitschalungsfertiger (Konsistenzklasse C1) und den notwendigen Luftporengehalt für die dauerhafte Nutzung zu gewährleisten. Diese sehr steifen Betone sind unter Laborbedingungen im Vergleich zu den Bedingungen in der Praxis, bei denen großflächig hohe Verdichtungsenergien eingeleitet werden, schwer zur ver-

arbeiten und zu verdichten. In den Untersuchungen wurde primär ein Betonverflüssiger auf Acrylatbasis eingesetzt. Als Variation kam einmal pro Fahrbahndeckenbetonart ein Fließmittel mit Polycarboxylatether als Wirkstoff zur Einstellung der erforderlichen Konsistenz zum Einsatz.

Tabelle 3-3 gibt einen Überblick über das Versuchsprogramm der Arbeitsphase 1 für die jeweilige Fahrbahndeckenbetonart (Prüfserie). Die gewählten Ausgangsparameter bzw. Ausgangsstoffe der sogenannten Ausgangsmischungen der jeweiligen Fahrbahndeckenbetonart sind in der Tabelle entsprechend markiert.

Untersuchungsvariationen		Waschbeton	Oberbeton (D>8)	Unterbeton
1	2	3	4	5
Zementart	CEM I	42,5 N	42,5 N	42,5 N
		42,5 R	42,5 R	42,5 R
	CEM II/A-S	42,5 R	42,5 R	42,5 R
		CEM II/B-S	42,5 N	32,5 R
	42,5 R		42,5 N	42,5 N
CEM III/A	42,5 N	42,5 N	42,5 N	
Zementmenge		420 kg/m³	340 kg/m³	340 kg/m³
		450 kg/m ³	360 kg/m ³	360 kg/m ³
		480 kg/m ³		
Gesteinskörnung grob	Plutonite	Gabbro - Splitt	Gabbro - Splitt	Gabbro - Splitt
	Kies	gebrochen	gebrochen	rund
				gebrochen
	Vulkanite	Rhyolith - Splitt	Rhyolith- Splitt	Rhyolith- Splitt
		Basalt - Splitt	Basalt- Splitt	Basalt- Splitt
Diabas- Splitt		Diabas- Splitt	Diabas- Splitt	
Metamorph		Gneis- Splitt	Gneis- Splitt	
Gesteinskörnung fein	Sand	a	a	a
		b	b	b
	Brechsand	Rhyolith	Rhyolith	Rhyolith
Größtkorn		8 mm	8 mm	8 mm
			16 mm	16 mm
			22 mm	22 mm
			32 mm	32 mm
Sieblinien	Art	A	A	A
		AB (3)	AB (3)	AB (3)
			B	B
	Abfolge Kornfraktion	stetig	stetig	stetig
	unstetig	unstetig	unstetig	
w/z-Wert		0,4	0,4	0,4
		0,43	0,43	0,43
		0,45	0,45	0,45
Luftporengehalt		4,0 - 5,0 Vol. %	4,0 - 5,0 Vol. %	4,0 - 5,0 Vol. %
		5,0 - 6,0 Vol. %	5,0 - 6,0 Vol. %	5,0 - 6,0 Vol. %
		> 6,0 Vol. %	> 6,0 Vol. %	> 6,0 Vol. %
Zusatzmittel	Luftporenbildner	wäss.Tensidlösung	wäss.Tensidlösung	wäss.Tensidlösung
	Fließmittel	Polycarboxylatether	Polycarboxylatether	Polycarboxylatether
	Betonverflüssiger	Acrylat	Acrylat	Acrylat
Untersuchungen		Anzahl der betrachteten Straßenbetonrezepturen		
Arbeitsphase 1	Spaltzugfestigkeit	21	26	26
	Druckfestigkeit			
	Bruchflächen			
Ausgangsparameter fett hinterlegt				

Tab. 3-3: AP 1 – Untersuchungsprogramm

3.2.2 Arbeitsphase 2

In der Arbeitsphase 2 wurde die Entwicklung von Spaltzug-, Druck- und Biegezugfestigkeit bis zum Probenalter von 91 Tagen bei Wasserlagerung und bis zum Alter von 28 Tagen in Abhängigkeit unterschiedlicher Lagerungsbedingungen untersucht.

Tabelle 3-4 zeigt das Versuchsprogramm mit ausgewählten Mischungszusammensetzungen der Arbeitsphasen 2 und 3. Die Auswahl der 41 weiteren in den Arbeitsphasen 2 und 3 relevanten Mischungs-

variationen beruhte auf den Ergebnissen der Arbeitsphase 1. Ebenso wie in Tabelle 3-3 sind die Ausgangsparameter der Ausgangsmischungen hervorgehoben dargestellt.

Gemäß TP B-StB [N7] müssen die gesondert hergestellten Probekörper bis zur Prüfung in Wasser gelagert werden. Um den Einfluss infolge Austrocknung durch die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen zu identifizieren, wurden die Probekörper bei den ausgewählten Betonzusammensetzungen

Untersuchungsvariationen		Waschbeton	Oberbeton (D>8)	Unterbeton
1	2	3	4	5
Zementart	CEM I	42,5 N	42,5 N	42,5 N
	CEM II/A-S		42,5 R	42,5 R
	CEM II/B-S	42,5 N	42,5 N	42,5 N
		42,5 R	42,5 R	42,5 R
CEM III/A	42,5 N	42,5 N	42,5 N	
Zementmenge		420 kg/m³	340 kg/m³	340 kg/m³
		450 kg/m ³		360 kg/m ³
Gesteinskörnung grob	Plutonite	Gabbro - Splitt		
	Kies		gebrochen	rund gebrochen
	Vulkanite	Rhyolith - Splitt	Rhyolith- Splitt	Diabas- Splitt
		Diabas- Splitt	Diabas- Splitt	
Metamorph		Gneis- Splitt		
Gesteinskörnung fein	Sand	a	a	a
		b	b	b
Größtkorn		8 mm	8 mm	8 mm
			22 mm	22 mm
			32 mm	32 mm
Sieblinien	Art	A	AB (3)	A
		AB (3)	B	B
	Abfolge Kornfraktion	stetig	stetig	stetig
w/z-Wert		0,4	0,4	0,4
		0,43	0,43	0,43
Luftporengehalt		4,0 - 5,0 Vol. %	4,0 - 5,0 Vol. %	4,0 - 5,0 Vol. %
		5,0 - 6,0 Vol. %	5,0 - 6,0 Vol. %	5,0 - 6,0 Vol. %
Zusatzmittel	Luftporenbildner	wäss.Tensidlösung	wäss.Tensidlösung	wäss.Tensidlösung
	Fließmittel		Polycarboxylatether	
	Betonverflüssiger	Acrylat	Acrylat	Acrylat
Untersuchungen		Anzahl der betrachteten Straßenbetonrezepturen		
Arbeitsphase 2	Spaltzugfestigkeit	11	15	15
	Druckfestigkeit			
	Biegezugfestigkeit			
	Bruchflächen			
Arbeitsphase 3	Spaltzugfestigkeit	11	15	15
	Druckfestigkeit			
	CDF-Prüfung			
	Luftporenauszählung			

Ausgangsparameter **fett** hinterlegt

Tab. 3-4: AP 2 und AP 3 – Untersuchungsprogramm

Prüfungsart [AP 2]	Probekörperart	Prüfalter	Anzahl der Probekörper je Betonrezeptur / Lagerungsart		
			Lagerungsart A	Lagerungsart B	Lagerungsart C
		[d]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6
Spaltzugfestigkeit	Zylinder 100 x 200 [mm]	28	15	5	5
		56	6	-	-
		91	6	-	-
		Summe	27	5	5
Druckfestigkeit	Würfel 150 x 150 [mm]	28	3	3	3
		56	3	-	-
		91	3	-	-
		Summe	9	3	3
Biegezugfestigkeit	Biegebalken 700 x 150 x 150 [mm]	28	3	-	-
		56	3	-	-
		91	3	-	-
		Summe	9	0	0

Tab. 3-5: AP 2 – Probekörperanzahl je Mischungszusammensetzung für die Untersuchungen

abweichend von der Wasserlagerung bis zum Prüfalter von 28 Tagen auf zwei weitere Arten gelagert. Demnach ergaben sich folgende Lagerungsszenarien:

- Lagerungsart A (1 d Schalung, bis zur 28 d-, 56 d- und 91 d-Prüfung Wasserlagerung gemäß TP B-StB [N7] (Regelfall)),
- Lagerungsart B (1 d Schalung, 13 d Wasserlagerung, weiter bis zur 28 d-Prüfung an Luft unter Klimabedingungen von 20 °C und 65 % rel. Feuchte (weiterhin als „Normklima 20/65“)),
- Lagerungsart C (1 d Schalung, bis zur 28 d-Prüfung unter Normklima 20/65).

Die Zusammenfassung über Anzahl und Art der Probekörper je Straßenbetonrezeptur für die Untersuchungen der Arbeitsphase 2 sind Tabelle 3-5 zu entnehmen. Im Folgenden werden die Lagerungsarten nach deren Kürzel A, B und C bezeichnet.

3.2.3 Arbeitszwischenphase 2-3

Zwischen den Arbeitsphasen 2 und 3 wurden durch die Anregung des Betreuerkreises des Forschungsvorhabens weitere Untersuchungen an sogenannten Praxismischungen durchgeführt mit der Zielsetzung, die Praxisrelevanz des FE-Vorhabens durch Vergleich von Kennwerten von im eigenen Labor

und im Rahmen der Erstprüfung hergestellten Betonproben zu prüfen. Es wurden Straßenbetonrezepturen ausgewiesener Autobahnabschnitte untersucht. Hierfür sind überwiegend die Rückstellmaterialien aus hergestellten Betonfahrbahndeckenabschnitten der Bundesautobahnen zur Anwendung gekommen. Diese erfüllten demnach alle normativen Anforderungen an die Bestandteile für Straßenbetone. Die hergestellten Würfelproben wurden dabei auf zwei unterschiedliche Arten gelagert. Neben Lagerungsart A wurde eine weitere genormte Lagerungsart nach nationalem Anhang der DIN EN 12390-2 [N17], als Lagerungsart D bezeichnet, gewählt:

- Lagerungsart D (1 d Schalung, 6 d Wasserlagerung, weiter bis zur 28 d-Prüfung unter Normklima 20/65).

Zusätzlich wurde in Absprache mit der BAST eine spezielle Teststreckenrezeptur (ohne ein LP-Zusatzmittel) ins Programm aufgenommen. Dieser Beton war zuvor probeweise an einer Teststrecke eingebaut worden.

In den Tabellen 3-6 und 3-8 sind das Arbeitsprogramm und die Auflistung der hierfür verwendeten Rückstellmaterialien aus den Autobahnabschnitten BAB A und BAB B, sowie die verwendeten Materialien für die Teststreckenrezeptur der Zusatzuntersuchungen aufgeführt.

Zusatzuntersuchung [AP 2-3]	Art und Anzahl der Probekörper je Betonrezeptur	
	Lagerungsart A	Lagerungsart D
1	2	3
Spaltzugfestigkeit	Zylinder 100 x 200 [mm]	
28 d	15	-
56 d	6	-
Summe	21	-
Druckfestigkeit	Würfel 150 x 150 [mm]	
28 d	3	3
56 d	3	-
Summe	6	3
CDF - Prüfung		Würfel 150 x 150 [mm]
28 d	-	5
Luftporenauszählung		Würfel 150 x 150 [mm]
7 d	-	2

Tab. 3-6: Arbeitsprogramm der Zusatzuntersuchungen mit Praxisrezepturen

Prüfungsart [AP 3]	Art und Anzahl der Probekörper je Betonrezeptur
1	2
Spaltzugfestigkeit	Zylinder 100 x 200 [mm]
28 d	6
Druckfestigkeit	Würfel 150 x 150 [mm]
28 d	3
CDF - Prüfung	Würfel 150 x 150 [mm]
28 d	3 bzw. 5
Luftporenauszählung	Würfel 150 x 150 [mm]
7 d	2

Tab. 3-7: Arbeitsprogramm je Betonrezeptur in der Arbeitsphase 3

Materialien:	BAB A	BAB B	Teststrecke T
1	2	3	4
Sand	C	D	A
Gesteinskörnung:			
Unterbeton	Kies/ Rund (0/32 mm)	Splitt/Rhyolith (0/32 mm)	Kies/gebrochen (0/16 mm)
Oberbeton (D>8)	Splitt/Rhyolith (0/22 mm)	Splitt/Rhyolith (0/22 mm)	Kies/gebrochen (0/16 mm)
Waschbeton	Splitt/Rhyolith (0/8 mm)	Splitt/Rhyolith (0/8 mm)*	Kies/gebrochen (0/8 mm)
Zement:	CEM I 42,5 N (sd)	CEM I 42,5 (st)	CEM I 42,5 (st)

*Eigene Ergänzung zur Berücksichtigung von Waschbeton

Tab. 3-8: Von der BAST zur Verfügung gestellte Materialien aus Rückstellproben von BAB A und BAB B für Zusatzuntersuchungen an Praxismischungen

3.2.4 Arbeitsphase 3

Um den Einfluss der einzelnen Ausgangsstoffe auf die Dauerhaftigkeit zielsicher festlegen zu können, wurde der Widerstand ausgewählter Betonzusammensetzungen gegen Frost-Taumittel-Beanspruchung mithilfe des an der Universität Duisburg-Essen am Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften entwickelten CDF-Tests an Würfelhälften im Alter von 28 Tagen geprüft. Bei den konzipierten Betonzusammensetzungen mit Waschbetonbauweise erfolgte die Untersuchung abweichend von der TP B-StB [N7] an den Waschbetonoberflächen, um realitätsgetreue Untersuchungsergebnisse zu erhalten.

Des Weiteren erfolgte die Bestimmung der Luftporenkennwerte mittels Auszählverfahren nach DIN EN 480-11 [N8] an geschliffenen Probeflächen im Alter von sieben Tagen. Die Betonrezepturauswahl in den Arbeitsphasen 2 und 3 ist identisch.

Das Arbeitsprogramm sowie die Anzahl der herzustellenden Probekörper je Laborbetonrezeptur sind Tabelle 3-7 zu entnehmen.

3.3 Überblick – Versuchsprogramm

Einen Überblick über das Versuchsprogramm gibt Tabelle 3-9.

Versuch		Frischbetonprüfungen				Festbetonprüfungen							CDF-Prüfung						
		Verdichtungsmaß c	Luftporengehalt A _c	Spaltzugversuch	Druckversuch	Biegezugversuch	LP-Kennwerte am Festbeton	Oberflächen-Rauhheit	je Re-zeptur		je Prüfserie	je Re-zeptur		je Prüfserie					
D/L bzw. B/H/L Maße in [mm]				100/50	150/150/150	150/150/700	100/40/150	150/150/150						110/70/150					
Probekörper		A _c [Vol.%, c [-], D [kg/m ³]		f _{c,sp} in [N/mm ²]	f _{c,cubes} in [N/mm ²]	f _{c,t1} in [N/mm ²]	A ₃₀₀ [E], L in [mm]	MPD in [mm]	S _{in} in [g/m ²]										
Arbeitsphasen	Messergebnisse	Lageart	Anzahl Rezipienten	Anzahl der Einzelprüfungen															
				je Re-zeptur	je Prüfserie	je Re-zeptur	je Prüfserie	je Re-zeptur	je Prüfserie	je Re-zeptur	je Prüfserie	je Re-zeptur	je Prüfserie	je Re-zeptur	je Prüfserie				
AP 1 28, 56 d	Waschbeton	A	21	1 je Prüffahrt	21 [0 d]	252	12	1344	6	438									
					6 [28 d]	3 [28 d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]
					6 [56 d]	3 [56 d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]
					6 [91 d]	3 [91 d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]
AP 2 28, 56, 91 d	Oberb. (D>8)	A	26	1 je Prüffahrt	26 [0 d]	546	11	1001	11	1001									
					5 [28 d]	3 [28 d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	
					6 [56 d]	3 [56 d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]
					6 [91 d]	3 [91 d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]
Zwischenphase 28, 56 d	Unterbeton	A	15	1 je Prüffahrt	15 [0d]	405	15	1001	15	1001									
					5 [28 d]	3 [28 d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	
					6 [56 d]	3 [56 d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	
					6 [91 d]	3 [91 d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	
AP 3 >28 d	Waschbeton	A	73	1 je Prüffahrt	73 [0 d]	1477	37	1477	15	615	9	369							
					15 [28d]	3 [28 d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	
					6 [56 d]	3 [56 d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	
					6 [91 d]	3 [91 d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	
Zwischenphase 28, 56 d	Praxisbetone	A	7	1 je Prüffahrt	7 [0d]	147	15	1477	15	615	9	369							
					15 [28d]	3 [28 d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	
					6 [56 d]	3 [56 d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	
					6 [91 d]	3 [91 d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	
AP 3 >28 d	Waschbeton	A	15	1 je Prüffahrt	15 [0d]	90	6	246	3	123									
					6 [28 d]	3 [28 d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]		
					6 [56 d]	3 [56 d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]		
					6 [91 d]	3 [91 d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]		
Zwischenphase 28, 56 d	Praxisbetone	A	7	1 je Prüffahrt	7 [0d]	147	15	1477	15	615	9	369							
					15 [28d]	3 [28 d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]	3 [28d]		
					6 [56 d]	3 [56 d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]	3 [56d]		
					6 [91 d]	3 [91 d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]	3 [91d]		

Legende:
 Lagerungsart A: Probenlagerung bis zum Prüfzeitpunkt unter Wasser
 Lagerungsart B: Probenlagerung nach dem Ausschalen 13 d unter Wasser und anschließend bis zur Prüfung im Normklima (20/65)
 Lagerungsart C: Probenlagerung bis zum Prüfzeitpunkt in Normklima (20/65)

Tab. 3-9: Gesamtübersicht über das Versuchsprogramm

4 Ausgangsstoffe, Rezepturen und Herstellung der Betone

4.1 Ausgangsstoffe

4.1.1 Zemente

Für die Laboruntersuchungen wurden bis zu sieben Zemente verwendet, welche in der Praxis zur Fahrbahndeckenherstellung bisher zum Einsatz kamen. Dabei handelte es sich um Zemente mit unterschiedlichem Hüttensandgehalt und unterschiedlicher Normfestigkeitsklasse. Der Hüttensandgehalt variierte dabei zwischen 0 und 40 %. Die Zemente und ausgewählte Kennwerte laut Herstellerangaben sind in Tabelle 4-1 dargestellt. Alle Zemente erfüllen die Anforderungen gemäß TL Beton-StB 07 [N5] für die Herstellung von Fahrbahndecken.

4.1.2 Gesteinskörnungen

Die Auswahl der Gesteinskörnung erfolgte nach den Anforderungen gemäß TL Beton-StB 07 [N5] und TL Gestein StB [N6] für die jeweilige Fahrbahndeckenbetonart. Dabei war es erstrebenswert, mehrere zugelassene Gesteinsgruppen in die Untersuchung aufzunehmen. Für die Untersuchungen wurden Kiese, Plutonite, Vulkanite und Metamorphe verwendet. Insgesamt wurden bis zu acht unterschiedliche Gesteine zur Herstellung eines Straßenbetons eingesetzt. Bei den meisten Gesteinskörnungen handelte es sich um gebrochenes Gestein, welches laut Herstellerangaben einer AKR-Performanceprüfung zur AKR-Einstufung unterzogen und anschließend für die Fahrbahnbetonbauweise als geeignet eingestuft worden war. Eine Ausnahme bildete der Gneis aus dem Werk 4, welcher in der Untersuchung die Metamorph-Gesteinsgruppe repräsentierte. Laut Hersteller wurde die

AKR-Performanceprüfung bei dem genannten Gestein nicht durchgeführt.

Des Weiteren wurde gebrochener Kies bei den Untersuchungen eingesetzt, welcher nach Alkali-Richtlinie bzw. ARS 12/2006 [N9] als potenziell alkaliempfindlich gilt. Die vorliegende Gesteinskörnung wurde jedoch zu Forschungszwecken zur Überprüfung der Verwendbarkeit als Straßenbeton schon in einer Teststrecke eingesetzt, wobei nach mehreren Einsatzjahren keine nennenswerten AKR-Schäden detektiert wurden. Somit bestehen aktuell Überlegungen, dass der vorliegende gebrochene Kies ebenfalls für die Herstellung der Fahrbahndecken unter Beachtung einiger Voraussetzungen eingesetzt werden darf [5].

Für die Laboruntersuchungen wurde die Kornverteilung der verwendeten Lieferkörnungen aller Gesteinskornarten nach DIN EN 933-1 [N10] bestimmt (s. Tabelle 4-5). Ebenfalls tabellarisch dargestellt sind weitere ausgewählte Eigenschaften der Gesteinskörnung in Tabelle 4-2 bis Tabelle 4-4.

Gesteinskörnung zur Verwendung für Waschbeton

Als grobe Ausgangsgesteinskörnung bei den Rezepturen der Fahrbahndeckenbetone für die Waschbetonbauweise wurde der gebrochene Rhyolith-Edelsplitt mit den Korngruppen 2/5 mm und 5/8 mm verwendet. Das Korngemisch wurde insgesamt aus drei Körnungsgruppen gebildet, wobei Oberrheinsand als feine Gesteinskörnung 0/2 mm (folgend z. B. Korngruppe 0/2) aus dem Werk 2 eingesetzt wurde.

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	[cm ² /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

Legende: K.A. - keine Angaben vom Hersteller erhalten

Tab. 4-1: Eigenschaften der Zemente lt. Herstellerangaben

Weitere Eigenschaften der Gesteinskörnung nach TL Beton-StB 07		Werk 1							Werk 2					
		0/2	2/5	2/8	5/8	8/16	16/22	16/32	0/2	0/2	2/8	8/16	16/22	16/32
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Kornrohddichte	[kg/dm ³]	2,63	2,67	2,68	2,67	2,66	2,65	2,66	2,63	2,64	2,57	2,6	2,61	2,61
Feinanteile	Kategorie	f ₃	f ₁	f ₁	f ₁	f ₁	f ₁	f ₁	f ₃	f ₃	f ₁	f ₁	f ₁	f ₁
Anteil gebrochener Körner	Kategorie	n.b	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	-	-	-	-	-	-
Polierwiderstand	Kategorie	n.b	PSV ₅₉	PSV ₅₉	PSV ₅₉	PSV ₅₉	PSV ₅₉	PSV ₅₉	-	-	-	-	-	-
Schlagzertrümmerungswert	Kategorie	n.b	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	-	-	-	-	-	-
Kornform SI	Kategorie	n.b	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅	-	-	Sl ₅₀	Sl ₅₀	Sl ₅₀	Sl ₅₀
AKR-Widerstand	Kategorie	EI-S	EI-S	EI-S	EI-S	EI-S	EI-S	EI-S	EI	EI	EI	EI	EI	EI
Frost-Tausalz-Widerstand	[M.-%]	n.b	<5	<5	<5	<5	<5	<5	-	-	-	-	-	-
Wasseraufnahme	[M.-%]	0,7	1,5	1,6	1,3	1,3	1,1	0,8	0,6	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5

Tab. 4-2: Ausgewählte Eigenschaften der Gesteinskörnungen (1)

Weitere Eigenschaften der Gesteinskörnung nach TL Beton-StB 07		Werk 3				Werk 4			Werk 5				Werk 6	
		2/5	5/8	8/11	11/16	2/5	5/16	16/32	2/8	8/16	16/22	16/32	2/5	5/8
1	2	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Kornrohddichte	[kg/dm ³]	2,65	2,65	2,65	2,65	2,72	2,72	2,72	2,96	2,96	2,96	2,96	2,99	2,99
Feinanteile	Kategorie	f ₂	f ₁	f ₁	f ₁	f ₂	f ₁	f ₁	f ₁	f ₁	f ₁	f ₁	f ₁	f ₁
Anteil gebrochener Körner	Kategorie	C _{95/1}	C _{95/1}	C _{95/1}	C _{95/1}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}
Polierwiderstand	Kategorie	PSV ₅₄	PSV ₅₄	PSV ₅₄	PSV ₅₄	-	-	-	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₄₈	PSV ₄₈
Schlagzertrümmerungswert	Kategorie	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₂₆	SZ ₂₆	SZ ₂₆	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈
Kornform SI	Kategorie	Sl ₂₀	Sl ₂₀	Sl ₂₀	Sl ₂₀	Sl ₅₀	Sl ₅₀	Sl ₅₀	Sl ₂₀	Sl ₂₀	Sl ₂₀	Sl ₂₀	Sl ₁₅	Sl ₁₅
AKR-Widerstand	Kategorie	EIII	EIII	EIII	EIII	n.b	n.b	n.b	EI	EI	EI	EI	EI	EI
Frost-Tausalz-Widerstand	[M.-%]	<5	<5	<5	<5	-	-	-	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Wasseraufnahme	[M.-%]	<1	<1	<1	<1	<0,5	<0,5	<0,5	-	-	0,3	-	<1	<1

Tab. 4-3: Ausgewählte Eigenschaften der Gesteinskörnungen (2)

Weitere Eigenschaften der Gesteinskörnung nach TL Beton-StB 07		Werk 6		Werk 7					Werk 8					
		8/11	11/16	2/5	5/8	2/8	8/16	16/22	2/5	5/8	2/8	8/16	16/22	16/32
1	2	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Kornrohddichte	[kg/dm ³]	2,99	2,99	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87	2,87
Feinanteile	Kategorie	f ₁	f ₁	f ₂	f ₁	f ₁	f ₁	f ₁	f ₂	f ₁	f ₁	f ₁	f ₁	f ₁
Anteil gebrochener Körner	Kategorie	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}
Polierwiderstand	Kategorie	PSV ₄₈	PSV ₄₈	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀
Schlagzertrümmerungswert	Kategorie	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈
Kornform SI	Kategorie	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅	Sl ₁₅
AKR-Widerstand	Kategorie	EI	EI	EI	EI	EI	EI	EI	EI	EI	EI	EI	EI	EI
Frost-Tausalz-Widerstand	[M.-%]	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Wasseraufnahme	[M.-%]	<1	<1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	≤0,5	≤0,5	≤0,5	≤0,5	≤0,5	≤0,5

Tab. 4-4: Ausgewählte Eigenschaften der Gesteinskörnungen (3)

Gesteinskörnung zur Verwendung für Oberbeton (D>8)

Oberreinsand 0/2 in Kombination mit dem Rhyolith-Edelsplitt in den Korngruppen 2/8, 8/16 und 16/22 stellten als Ausgangsgesteinskörnung die vier Gesteinskornfraktionen der Oberbetone (D>8) in der Untersuchung dar. Für Oberbetone (D>8) wird in der Regel das 22 mm Größtkorn verwendet.

Gesteinskörnung zur Verwendung für Unterbeton

Anders als bei den oben beschriebenen Betonrezepturen kam bei den Straßenbetonen für die Unterbetonbauweise der ungebrochene Kies mit den drei Grobkorngruppen 2/8, 8/16, 16/32 des Werks 2 als Ausgangsgestein zum Einsatz. Als feine Gesteinskörnung kam ebenfalls der Oberreinsand aus dem Werk 2 mit dem Größtkorn von 2 mm zur Anwendung.

Gesteinsart	Werk	Korngruppe	Kategorie	Siebdurchgang in M.-% (nach Selbstbestimmung)														
				0,125	0,25	0,5	1	2	2,8	4	5,6	8	11,2	16	22,4	31,5	45	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Rhyolith - Edelbrechsand	1	0/2	G _r 85	7	14	29	52	89	99	100								
Rhyolith - Splitt		2/5	G _c 90/10	0	0	1	2	9	19	42	90	100	100					
		2/8	G _c 85/20	0	0	0	0	1	5	20	63	96	100	100				
		5/8	G _c 90/15	0	0	0	0	0	0	1	11	86	100	100				
		8/16	G _c 85/20	0	0	0	0	0	0	-	1	1	7	48	95	100	100	
		16/22	G _c 90/15	0	0	0	0	0	0	-	0	-	0	0	20	90	100	100
16/32	G _c 85/20	0	0	0	0	1	-	2	-	3	5	13	63	98	100			
Oberrheinsand a	2	0/2	G _r 85	2	18	51	75	93	99	100								
Oberrheinsand b		0/2	G _r 85	0	6	34	69	93	99	100								
Kies rund		2/8	G _c 85/20	0	0	-	0	1	-	22	-	90	-	100	100			
		8/16	G _c 85/20	0	0	-	0	0	-	0	-	5	-	91	100	100		
		16/22	G _c 90/15	0	-	0	-	-	0	0	-	0	-	9	93	100	100	
		16/32	G _c 85/20	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-	7	67	97	100	
Kies gebrochen	2/5	G _c 90/10	0	0	0	0	1	15	50	94	100	100						
	5/8	G _c 90/15	0	0	0	0	0	0	0	8	87	100	100					
	8/11	G _c 90/15	0	0	0	0	0	0	0	0	13	93	100	100				
	11/16	G _c 90/15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	95	100	100			
Gneis - Splitt	2/5	G _c 90/10	1	2	2	3	10	42	76	100	100	100						
	5/16	G _c 90/15	0	-	1	1	1	-	8	3	15	63	95	100	100			
	16/32	G _c 85/20	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	5	37	96	100		
Basalt - Splitt SI₂₀	2/5	G _c 90/10	0	0	0	0	5	23	59	98	100	100						
	5/8	G _c 90/15	0	0	0	0	0	1	2	16	93	100	100					
	8/11	G _c 90/15	0	0	0	0	0	0	0	1	17	90	100	100				
	11/16	G _c 90/15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	11	92	100	100	100		
Basalt - Splitt SI₁₅	2/8	G _c 85/20	0	0	0	0	1	4	21	52	86	100	100					
	8/16	G _c 85/20	0	0	0	0	0	0	0	1	3	21	90	100	100			
	16/22	G _c 90/15	0	0	0	1	1	1	1	1	2	3	15	90	100	100		
	16/32	G _c 85/20	0	0	0	0	1	1	1	1	2	3	9	55	98	100		
Diabas	2/5	G _c 90/10	1	1	1	1	2	9	43	98	100	100						
	2/8	G _c 85/20	0	0	0	0	1	10	34	68	97	100	100					
	5/8	G _c 90/15	0	0	0	0	0	0	0	9	89	100	100					
	8/16	G _c 85/20	0	0	0	1	1	1	1	1	4	37	97	100	100			
	16/22	G _c 90/15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	94	100	100		
Gabbro	2/5	G _c 90/10	2	2	2	2	8	29	60	97	100	100						
	2/8	G _c 85/20	1	1	1	1	3	13	37	87	99	100	100					
	5/8	G _c 90/15	0	0	1	1	1	1	1	8	86	100	100					
	8/16	G _c 85/20	0	0	0	0	0	0	0	0	1	13	94	100	100			
	16/22	G _c 90/15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	80	100	100		
	16/32	G _c 85/20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	18	87	100		

Tab. 4-5: Korngrößenverteilung der verwendeten Gesteinskörnung

4.1.3 Luftporenbildner, Betonverflüssiger, Fließmittel und Schwindreduzierer

Um die erforderliche Konsistenz und den Frischbetonluftporengehalt zu erreichen, wurden alle Fahrbahndeckenrezepturen unter Zugabe von Luftporenbildnern und Betonverflüssigern/Fließmitteln hergestellt.

Die Zusatzmittel, der Luftporenbildner, das universelle Fließmittel und der Betonverflüssiger wurden von einem Hersteller bezogen. Abweichend davon wurde bei der Teststreckenrezeptur (Praxisrezeptur 4-2.3) auf die Zugabe eines Luftporenbildners verzichtet, als Zusatzmittel wurden ein Fließmittel auf modifizierter Polycarboxylatether-Basis und ein Schwindreduzierer verwendet.

Zur Herstellung der Waschbetonoberflächen wurde ein Verzögerungsmittel und ein Nachbehandlungsmittel als Paraffindispersion eingesetzt. Weitere Angaben zu den verwendeten Zusatzmitteln sind in Tabelle 4-6 enthalten.

Zusatzmittel	Art	Dosierempfehlung
1	2	3
Luftporenbildner	Synthetisches Luftporenbildnerkonzentrat nach DIN EN 934-2:T5	0,02 - 0,3 M.%
Betonverflüssiger	Betonverflüssiger auf Acrylat-Copolymer-Basis nach DIN EN 934-2:T10	0,2 - 2,5 M.%
Fließmittel	Universelles Fließmittel auf Polycarboxylatether-Basis nach DIN EN 934-2: T 11.1/11.2	0,2 - 2,0 M.%
	Fließmittel auf modifizierter Polycarboxylatether-Basis	Absprache mit dem Hersteller
Schwindreduzierer	Keine Angaben von dem Hersteller	15 kg auf 1 cbm Beton
Oberflächenverzögerer	Betonnachbehandlungsmittel als Paraffindispersion nach TL NBM-StB 09, Typ AH	ca. 250 g/m ²
Verdunstungsschutz	Wässrige Paraffindispersion nach TL NBM-StB 09, Typ VM	ca. 250 g/m ²

Tab. 4-6: Betonzusatzmittel

4.2 Betonrezepturen

4.2.1 Arbeitsphase 1

Als Ausgangsmischung für jede Prüfserie (Fahrbahndeckenbetonart) diente eine Betonrezeptur eines bereits hergestellten Autobahnabschnittes oder einer Teststrecke, vgl. Tabelle 3-1. Als Ausgangszement wurde der typische Zement CEM I 42,5 N für die Herstellung von Straßenbetonen verwendet. In der ersten Untersuchungsreihe wurden aufgrund der hohen Anzahl von Variationsparametern insgesamt 73 Mischungszusammensetzungen konzipiert und hergestellt. Die Anzahl der einzelnen Variationsparameter aller Betonrezepturen kann der Tabelle 3-3 entnommen werden.

Zu den zu untersuchenden Variationsparametern zählten die Zementart (CEM I 42,5 N/R, CEM II/A-S 42,5 R, CEM II/B-S 42,5 N/R; CEM III/A 42,5 N) und der Zementgehalt. Des Weiteren wurden die grobe Gesteinskörnung (Plutonit, Kies, Vulkanite) und der feine Sand bzw. Edelbrechsand variiert. Zusätzlich erfolgte die Herstellung von Ober- bzw. Unterbetonen mit unterschiedlichem Größtkorn (8 mm, 16 mm, 22 mm, 32 mm). Unter Betrachtung der Packungsdichte als Parameter wurden die Sieblinien A, AB sowie die Zusammensetzung der Kornfraktionen (stetig (s), mit Ausfallkörnung (a)) betrachtet. Der w/z-Wert (0,40, 0,43, 0,45) sowie der Frischbe-

tonluftporengehalt wurden ebenfalls variiert. Ergänzt wurden die Variationszusammensetzungen mit dem Ersatz des Betonverflüssigers durch ein universelles Fließmittel.

Die Frischbetonkonsistenz wurde nicht variiert, sie sollte aufgrund der Herstellung der Fahrbahndecken mit dem Gleitschalungsfertiger ca. einer Konsistenzklasse C1 entsprechen. Laut Erfahrungsberichten aus der Praxis werden Waschbetone im unteren Bereich der Konsistenzklasse C1 mit Verdichtungsmaßen von 1,26 – 1,30 hergestellt. Ober- und Unterbetone dagegen werden mit Verdichtungsmaßen zwischen 1,35 – 1,40 etwas steifer eingestellt. Im Forschungsvorhaben wurde das Zielverdichtungsmaß zwischen 1,27 und 1,40 angestrebt. Bei einzelnen Betonen stellten sich hier in der Arbeitsphase 1 bedingt durch die Variation der Ausgangsstoffe teilweise vom Zielverdichtungsmaß abweichende Konsistenzen ein, die in den fortlaufenden Arbeitsphasen durch Zudosierung von Zusatzmitteln angepasst wurden.

Aufgrund der Vielzahl betrachteter Variationsparameter wurden bei den Mischungszusammensetzungen die Dosierung des Luftporenbildners und Fließmittels stets angepasst, um die gewünschten Frischbetonparameter erreichen zu können. Für den Fall, dass die Frischbetonluftporengehalte einiger Fahrbahndeckenrezepturen stark von der Spanne der gewünschten LP-Gehalte abweichen sollten, wurde pro Fahrbahndeckenbetonart die Ausgangszusammensetzung mit drei stark unterschiedlichen Frischbetonluftporengehalten hergestellt. Somit konnte die Abweichung des Luftporengehaltes und der damit verbundene Einfluss auf die Festigkeitswerte später bei der Auswertung der Einflüsse der zu betrachtenden Variationsparameter berücksichtigt werden.

Eine Aufstellung der verwendeten Betonrezepturen inklusive der ermittelten Frischbetonkennwerte (Frischbetonrohddichte, Verdichtungsmaß, LP-Gehalt) ist dem Anhang I, Tabelle I – 1 bis I – 3 zu entnehmen.

Waschbeton

Die Betonzusammensetzung für die Ausgangsrezeptur Waschbeton zeigt Tabelle 4-7. Diese bildete die Ausgangsmischung für die weiteren Waschbetonrezepturen mit den jeweiligen Variationsparametern. Die Sieblinie zu der Ausgangszusammensetzung ist in Bild 4-1 dargestellt.

Für Waschbetone wurden insgesamt 21 Betonrezepturen mit Variationsparametern aufgestellt. So wurde z. B. entsprechend den Anforderungen gemäß [N5] das Größtkorn bei 8 mm konstant gehalten und nicht parametrisiert. Der Zementgehalt wurde insgesamt drei Mal variiert (420 kg/m³, 450 kg/m³, 480 kg/m³). Als Zielluftporengehalt des Frischbetons wurden 4,0 bis 5,0 Vol.-% angestrebt.

Ausgangstoffe	kg/m ³	Vol.% / *M.-%
1	2	3
Zement (CEM I 42,5 N)	420	
Zugabewasser	168	
Feine Gesteinskörnung 0/2 (2)	516	30
Grobe Gesteinskörnung 2/5 (1)	520	30
Grobe Gesteinskörnung 5/8 (1)	691	40
Fließmittel in M.-% v. Zem.	1,58	*0,38
Luftporenbildner in M.-% v. Zem.	0,28	*0,07

Tab. 4-7: Ausgangsrezeptur Waschbeton

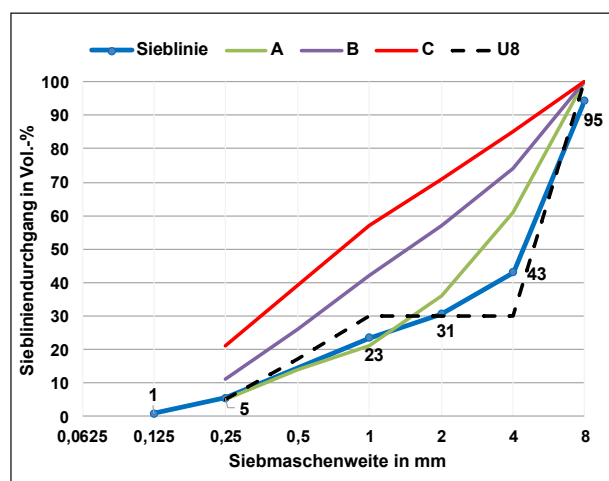


Bild 4-1: Sieblinie Ausgangswaschbeton

Oberbeton (D>8)

Die in Tabelle 4-8 dargestellte Betonzusammensetzung bildete die Ausgangsmischung für die weiteren Oberbetonrezepturen (D>8) mit den jeweiligen Variationsparametern. Die Sieblinie zu der Ausgangsmischung ist in Bild 4-2 dargestellt.

Für die Oberbetone (D>8) wurden insgesamt 26 Betonrezepturen geprüft. Zusätzlich zu den bereits sechs genannten Zementen wurde ein Zement CEM II/B-S 32,5 mit untersucht. Der Zementgehalt wurde insgesamt zwei Mal variiert (340 kg/m³, 360 kg/m³). Des Weiteren wurde zusätzlich das Methamorph als Variationsparameter der groben Gesteinskörnung eingesetzt. Unter Betrachtung der Packungsdichte als Parameter wurde die Sieblinie B ebenfalls betrachtet. Der Zielluftporengehalt dieser Oberbetonrezepturen lag zwischen 5,0 bis 6,0 Vol.-%.

Ausgangstoffe	kg/m ³	Vol.% / *M.-%
1	2	3
Zement (CEM I 42,5 N)	340	
Zugabewasser	146	
Feine Gesteinskörnung 0/2 (2)	519	28
Grobe Gesteinskörnung 2/8 (1)	318	17
Grobe Gesteinskörnung 8/16 (1)	503,5	27
Grobe Gesteinskörnung 16/22 (1)	523,5	28
Fließmittel in M.-% v. Zem.	0,95	*0,28
Luftporenbildner in M.-% v. Zem.	0,21	*0,06

Tab. 4-8: Ausgangsrezeptur Oberbeton

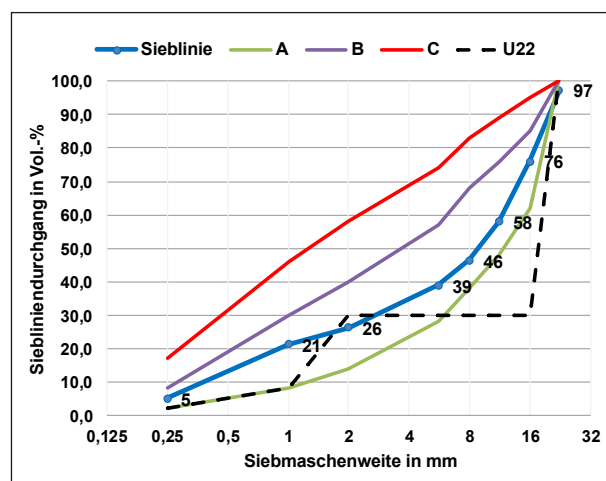


Bild 4-2: Sieblinie Ausgangsoberbeton

Ausgangsstoffe	kg/m ³	Vol.% / *M.-%
1	2	3
Zement (CEM I 42,5 N)	340	
Zugabewasser	146	
Feine Gesteinskörnung 0/2 (2)	512	28
Grobe Gesteinskörnung 2/8 (2)	458	25
Grobe Gesteinskörnung 8/16 (2)	347	19
Grobe Gesteinskörnung 16/32 (2)	515	28
Fließmittel in M.-% v. Zem.	1,02	*0,30
Luftporenbildner in M.-% v. Zem.	0,34	*0,10

Tab. 4-9: Ausgangsrezeptur Unterbeton

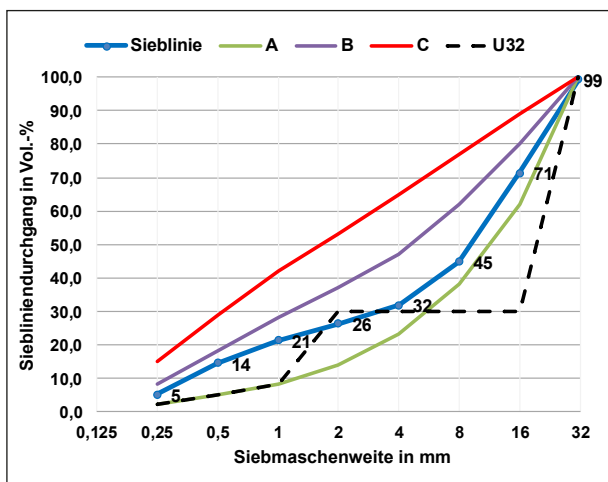


Bild 4-3: Sieblinie Ausgangsunterbeton

Unterbeton

Die in Tabelle 4-9 dargestellte Betonzusammensetzung bildete die Ausgangsmischung für die weiteren Unterbetonrezepturen mit jeweiligen Variationsparametern. Die Sieblinie zu der Ausgangszusammensetzung ist im Bild 4-3 dargestellt.

Für die Unterbetonbauweise erfolgte die Herstellung der Probekörper von 26 Betonrezepturen. Die Variation der Parameter erfolgte wie bei den Oberbetonen auf identische Weise. Der Zielluftporengehalt der Unterbetonrezepturen lag zwischen 4,0 bis 5,0 Vol.-%.

4.2.2 Arbeitsphasen 2 und 3

Für die Arbeitsphasen 2 und 3 wurden, unter der Berücksichtigung der Ergebnisse aus der ersten Arbeitsphase, 41 weiter zu betrachtende Mischungszusammensetzungen ausgewählt und hergestellt. Die Anzahl der einzelnen Variationsparameter aller

Ausgangsstoffe	kg/m ³	Vol.% / *M.-%
1	2	3
Zement (CEM I 42,5 N)	350	
Zugabewasser	133	
Feine Gesteinskörnung 0/2 (2)	480	25
Grobe Gesteinskörnung 2/5 (3)	432	22
Grobe Gesteinskörnung 5/8 (3)	215	11
Grobe Gesteinskörnung 8/11 (3)	310	16
Grobe Gesteinskörnung 11/16 (3)	499	26
Fließmittel in M.-% v. Zem.	1,70	*0,49
Schwindreduzierer in M.-% v. Zem.	12,00	*3,43

Tab. 4-10: Teststreckenrezeptur 4-2.3 (Teststreckenbeton)

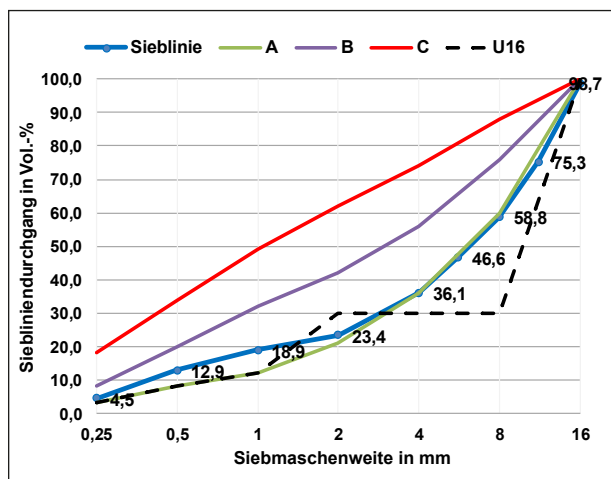


Bild 4-4: Sieblinie der Rezeptur 4-2.3 (Teststreckenbeton)

Betonrezepturen der Arbeitsphasen 2 und 3 kann Tabelle 3-4 entnommen werden.

Die Frischbetonkonsistenz wurde wie in der Arbeitsphase 1 beibehalten. Die Dosierung von Luftporenbildner und Fließmittel wurde unter der Berücksichtigung der Erfahrungswerte bei den ausgewählten Betonzusammensetzungen angepasst, um die gewünschten Frischbetonparameter zielsicherer erreichen zu können. In den Arbeitsphasen 2 und 3 wurden die Luftporengehalte in der Spanne zwischen 4,0 und 6,0 Vol.-% angestrebt. Somit ergaben sich je Prüferie zwei Ausgangsmischungen mit stark unterschiedlichen Frischbetonluftporengehalten.

Des Weiteren wurden in der Zwischenphase der Arbeitsphasen 2 und 3 auf Wunsch des Betreuerkreises als Zusatzuntersuchung sechs Praxisrezepturen und eine Teststreckenrezeptur in das Forschungsvorhaben aufgenommen. Bei den sechs Praxisrezepturen handelt es sich um einen Wasch-, zwei Ober- und zwei Unterbetone, die bei dem Neu-

bau der zwei Bundesautobahnabschnitte A und B in den vergangenen Jahren zum Einsatz kamen. Eine weitere Waschbetonrezeptur wurde auf Basis der ersten Praxisrezeptur aus BAB A, jedoch mit dem Grob- und Feinkorn aus Bundesautobahn BAB B konzipiert. Die Sieblinien und die Zusammensetzung der Praxismischungen entsprachen denjenigen aus Bild 4-1 bis Bild 4-3 und Tabelle 4-7 bis Tabelle 4-9. Die hierfür eingesetzten Materialien und das Untersuchungsprogramm der Praxisrezepturen sind den Tabelle 3-8 und Tabelle 3-6 zu entnehmen.

Eine zusätzliche Teststreckenrezeptur, Rezeptur-ID 4-2.3, wurde ebenfalls in das Prüfprogramm aufgenommen. Dabei handelt es sich um eine Betonrezeptur des Oberbetones ($D > 8$) einer Teststrecke, welche mit einem w/z-Wert von 0,38 und differenzierten Zusatzmitteln ohne Luftporenbildner hergestellt wurde. Die abweichenden Materialeigenschaften sind tabellarisch in Anhang III in Tabelle III – 1 zusammengefasst. Die Betonzusammensetzung sowie die Sieblinie sind in der Tabelle 4-10 bzw. Bild 4-4 dargestellt.

Eine Aufstellung der verwendeten Betonzusammensetzungen der Arbeitsphase 2 ist dem Anhang II, Tabelle II – 1 bis II – 3 und der Arbeitsphase 3 dem Anhang III, Tabelle III – 7 bis III – 9 zu entnehmen.

4.3 Herstellung, Lagerung und Vorbereitung der Betonprobekörper

4.3.1 Allgemeines

Vor der Herstellung jeder Mischung wurden die feine und grobe Gesteinskörnung getrocknet. Somit entfiel die Berücksichtigung der Eigenfeuchtigkeit der Gesteinskörnung bei der Mischungsberechnung für die Wasserzugabe. Für die Betonherstellung wurde ein Intensivmischer mit Sternwirbler mit einem maximal zugelassenen Fassungsvermögen von 150 l verwendet. Das Mischregime ist Tabelle 4-11 zu entnehmen. Zur Herstellung der zylindrischen und würfelförmigen Probekörper wurde der Beton in drei Lagen in die entsprechende Schalung gefüllt und jeweils auf dem Rütteltisch verdichtet.

Innerhalb der ersten zehn Minuten nach der Zementzugabe zu der vorgemästen Gesteinskörnung erfolgten die Frischbetonuntersuchungen, d. h. die Ermittlung der Rohdichte, des Luftporengehaltes

Vorgang	Zeitpunkt	Mischzeit
1	2	3
Vornässen der Gesteinskörnung mit 1/3 des Zugabewassers	0 s	120 s
Zugabe von Zement	120 s	30 s
Zugabe des Luftporenbildners verdünnt in 1/3 des Zugabewassers bei laufendem Mischer	150 s	30 s
Zugabe des Fließmittels/Betonverflüssigers verdünnt in letzten 1/3 des Zugabewassers bei laufendem Mischer	180 s	≥90 s

Tab. 4-11: Mischregime

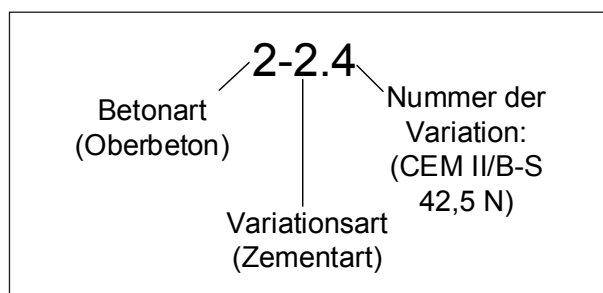


Bild 4-5: Zusammensetzung der Rezeptur-ID

und der Konsistenz mittels Verdichtungsmaßmessung.

Einen Tag nach der Herstellung wurden die Proben ausgeschalt und mit einer Rezeptur-ID gekennzeichnet. Die Rezeptur-ID der Laborbetone besteht aus einer Abfolge von drei Kennzahlen und kennzeichnet eine konkrete Rezeptur in diesem Forschungsvorhaben. Ein Beispiel für eine generierte Rezeptur-ID und deren Bedeutung ist in Bild 4-5 dargestellt. Die erste Ziffer vor dem Bindestrich steht für die Fahrbahndeckenbetonart (Prüfserie). Die zweite Ziffer steht für die jeweilige Variationskategorie. Insgesamt werden neun Variationskategorien betrachtet. Somit variiert die zweite Ziffer von 0 bis 8, wobei z. B. die Ziffer 2 für die Variation der Zementart steht. Die letzte Ziffer der Rezeptur-ID gibt die Nummer der konkreten Variation des Ausgangsstoffes vor. Ein Überblick über die Untersuchungsvariationen und Zuweisung der zugehörigen Rezeptur-ID gibt Tabelle 4-13.

4.3.2 Arbeitsphase 1

Bei der Arbeitsphase 1 wurden pro Mischungszusammensetzung dreizehn Zylinder mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit und

Untersuchungsvariationen/ Rezeptur-ID		Waschbeton 1-X.X	Oberbeton (D>8) 2-X.X	Unterbeton 3-X.X
1	2	3	4	5
Luftporengehalt X-0.X	4,0 - 5,0 Vol. %		X-0.1	
	5,0 - 6,0 Vol. %		X-0.2	
	> 6,0 Vol. %		X-0.3	
w/z-Wert X-1.X	0,40	1-0.1	X-1.1	
	0,43	1-1.2	X-0.1	
	0,45		X-X.3	
Zementart X-2.X	CEM I 42,5 N		X-0.1	
	CEM I 42,5 R		X-2.1	
	CEM II/A-S 42,5 R		X-2.2	
	CEM II/B-S 32,5 N	-	X-2.3	
	CEM II/B-S 42,5 N		X-2.4	
	CEM II/B-S 42,5 R		X-2.5	
	CEM III/A 42,5 N		X-2.6	
Zementmenge X-3.X	340 kg/m ³	-	X-0.1	
	360 kg/m ³	-	X-3.1	
	420 kg/m ³	1-0.1	-	
	450 kg/m ³	1-3.2	-	
	480 kg/m ³	1-3.3	-	
Gesteinskörnung fein X-4.X	Sand A		X-0.1	
	Sand B		X-4.1	
	Brechsand- Rhyolith		X-4.2	
Gesteinskörnung grob X-5.X	Rhyolith - Splitt		X-0.1	
	Kies rund		-	3-0.1
	Gabbro - Splitt		X-5.1	
	Kies gebrochen		X-5.2	
	Basalt (2) - Splitt	1-5.3		
	Basalt (1) - Splitt	-	X-5.4	
	Diabas - Splitt		X-5.5	
	Gneis - Splitt	-	X-5.6	
	Kies rund	-	2-5.7	-
Rhyolith - Splitt		-	3-5.8	

Ausgangsparameter **fett** hinterlegt

Tab. 4-12: Überblick – Rezepturkennzeichnung (Rezeptur-ID) (1)

sechs Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 150 mm zur Bestimmung der Druckfestigkeit hergestellt. Ein Zylinder aus der jeweiligen Fahrbahnbetonmischung diente als Rückstellprobe. Die Probekörper wurden bis zum Zeitpunkt der Prüfung unter Wasser gelagert (Lagerungsart A). Eine komplette Übersicht der betrachteten Betone, deren Zusammensetzungen und der zugehörigen Rezeptur-ID kann Anhang I, Tabelle I – 1 bis Tabelle I – 3 entnommen werden.

Frühestens nach 14 Tagen Wasserlagerung wurden die Prüfkörper für die Spaltzuguntersuchung vorbereitet. Dazu wurden die hergestellten 12 Zylinder-

probekörper aus dem Lagerungsbecken entnommen und zeitnah gesägt und geschliffen, um die erwünschten Zylinderscheiben zu erhalten. Bild 4-6 stellt schematisch die Prozedur der Aufbereitung und Kennzeichnung der Probekörper bzw. Prüfkörper dar. Somit wurden je Zylinder zwei Sägeschnitte vorgenommen, wobei ein Mittelstück, eine Oberscheibe und eine Unterscheibe hergestellt wurden. Anschließend erfolgte, abweichend von den Anforderungen (50 ± 5 mm) der TP B-StB [N7], das Schleifen der Kreisflächen der unteren Zylinderscheibe auf das gewünschte Maß der Zylinderscheibenhöhe von 50 ± 2 mm. Die Flächen des Mit-

Untersuchungsvariationen/ Rezeptur-ID		Waschbeton 1-X.X	Oberbeton (D>8) 2-X.X	Unterbeton 3-X.X
1	2	3	4	5
Größtkorn X-6.X	8 mm	1-0.1	X-6.1	
	16 mm	-	X-6.2	
	22 mm	-	2-0.1	3-6.3
	32 mm	-	2-6.4	3-0.1
Sieblinienart und -abfolge der Kornfraktion X-7.X	A	1-0.1	X-7.3	
	AB (3)	1-7.2	X-0.1	
	B	-	X-7.4	
	unstetig	1-7.1	X-7.5	
Zusatzmittel X-8.X	Luftporenbildner wäss. Tensidlösung	X-0.1		
	Fließmittel - Polycarboxylatether	X-8.1		
	Betonverflüssiger- Acrylat	X-0.1		

Ausgangsparameter **fett** hinterlegt

Tab. 4-13: Überblick – Rezepturkennzeichnung (Rezeptur-ID) (2)

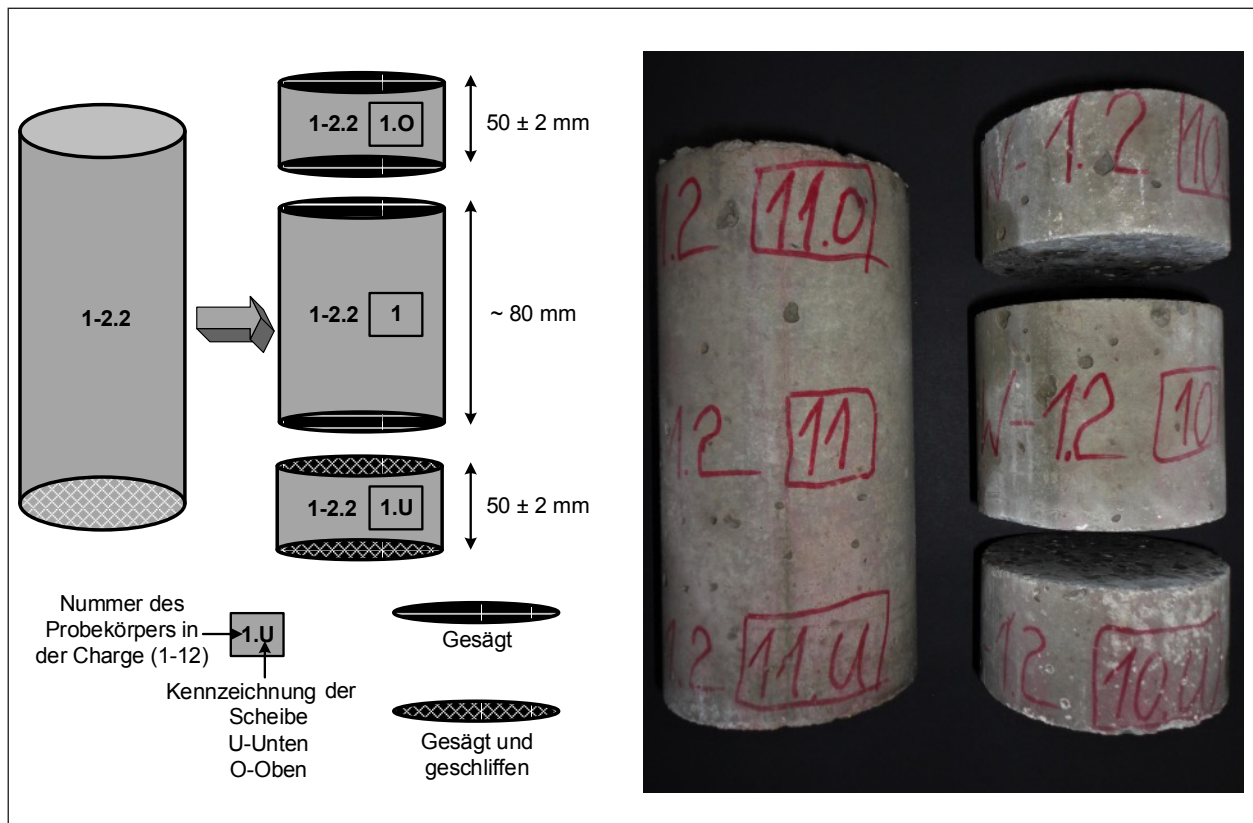


Bild 4-6: Schema der Aufbereitung der Zylinder (links); vorbereitete Prüfkörper aus einem Zylinder (rechts)

telstücks und der oberen Scheibe wurden nicht geschliffen. Die Prüfkörper erhielten eine entsprechende Kennzeichnung, welche das spätere Sortieren bei der Zusammenstellung der Prüfkörpercharge für die jeweilige Prüfung erleichterte. Anschlie-

ßend wurden die einzelnen Prüfkörper in die Wasserbecken sortiert und bis zum Prüfzeitraum gelagert. Die Betonwürfel lagerten bis zur Druckfestigkeitsprüfung ohne weitere Vorbehandlung im Wasser.

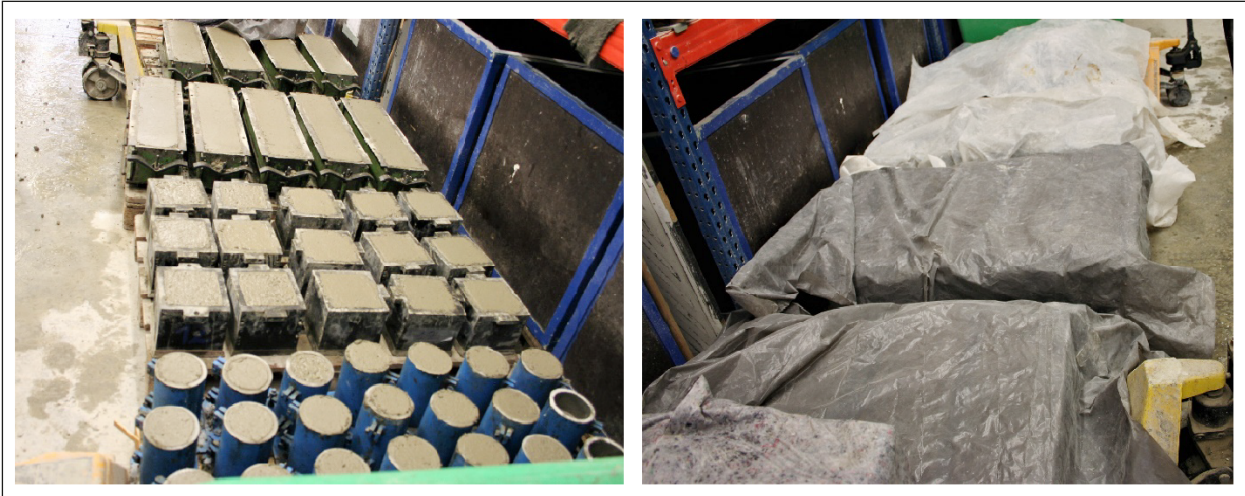


Bild 4-7: Mit Frischbeton einer Betonrezeptur gefüllte Schalungen (links); Lagerung der frisch hergestellten Probekörper bis zum Ausschaltzeitpunkt (rechts)

4.3.3 Arbeitsphase 2

Aufgrund des ausgeweiteten Untersuchungsprogramms über den Prüfzeitraum von 91 Tagen, zusätzlicher Biegezugprüfungen an 70 cm langen Biegebalken und Berücksichtigung des Einflusses der Lagerungsbedingungen auf die 28 d-Spaltzug- und 28 d-Druckfestigkeit, wurde die Frischbetonmenge je Betonrezeptur in der Arbeitsphase 2 auf ca. 255 l erhöht. Eine Herstellung dieser Frischbetonmenge war durch einen einzelnen Mischprozess im vorhandenen Intensivmischer mit einem maximal zugelassenen Fassungsvermögen von 150 l nicht gegeben, was zur Herstellung der erforderlichen Frischbetonmenge in drei nacheinander folgenden Betonmischvorgängen führte. Im ersten Mischvorgang wurden 95 l, im zweiten 70 l und im dritten 90 l Frischbeton hergestellt und in die entsprechenden Schalungskörper verteilt.

Nach dem ersten Mischvorgang erfolgte das Befüllen der ersten sechs Biegebalkenschalungen mit anschließendem Verdichten mittels Innenrüttler. Mit dem Frischbeton aus dem zweiten Mischvorgang wurden weitere drei Biegebalken sowie erste sechs Würfel hergestellt. Die abschließend hergestellte 90 l Frischbetonmenge wurde in weitere neun Würfelschalungen und 37 Zylinderschalungen verteilt und verdichtet. Die Würfel- und Zylinderprobekörper wurden auf dem Rütteltisch jeweils in drei Lagen verdichtet.

Somit wurden bei der Arbeitsphase 2 pro Mischungszusammensetzung 37 Zylinder (200x100 [mm]), 15 Würfel (150x150x150 [mm]) und neun Biegebalken (700x150x150 [mm]) hergestellt und

24 Stunden mit Folie abgedeckt in der Versuchshalle gelagert. Der Umfang der an einem Betoniertag hergestellten Probekörper ist Bild 4-7 zu entnehmen. Nach einem Tag wurden die Probekörper ausgeschalt, gekennzeichnet und unterschiedlich gelagert.

Die Untersuchungen in der Arbeitsphase 2 sollten ermöglichen, unter anderem die Auswirkungen infolge Austrocknung auf die Spaltzug- und Druckfestigkeit im Vergleich zu im Wasser gelagerten Proben gemäß TP B-StB [N7] zu analysieren. Hierzu wurden je Mischungszusammensetzung je drei Würfel- und fünf Zylinderprobekörper abweichend auch ohne Wasserbehandlung ausschließlich im Normklima 20/65 oder nur 13 Tage unter Wasser mit anschließender Normklimalagerung 20/65 (Lagerungsart B) bis zur 28 d-Prüfung gelagert. Damit ergaben sich folgende Lagerungsbedingungen:

- Lagerungsart A: neun Würfel und 27 Zylinder wurden gemäß TP B-StB [N7] unmittelbar bis zum Prüfzeitpunkt von 28, 56 und 91 Tagen in Wasser gelagert (siehe Bild 4-8),
- Lagerungsart B: drei Würfel und fünf Zylinder wurden nach dem Ausschalen 13 d unter Wasser gelagert und anschließend bis zur 28 d-Prüfung 14 Tage im Normklima 20/65,
- Lagerungsart C: drei Würfel und fünf Zylinder lagerten nach dem Ausschalen bis zur 28 d-Prüfung in Normklima 20/65.

Die Untersuchungen zur Festigkeitsentwicklung bis zu 91 Tagen erfolgten allein an wassergelagerten bzw. vor Austrocknung geschützten Betonproben.

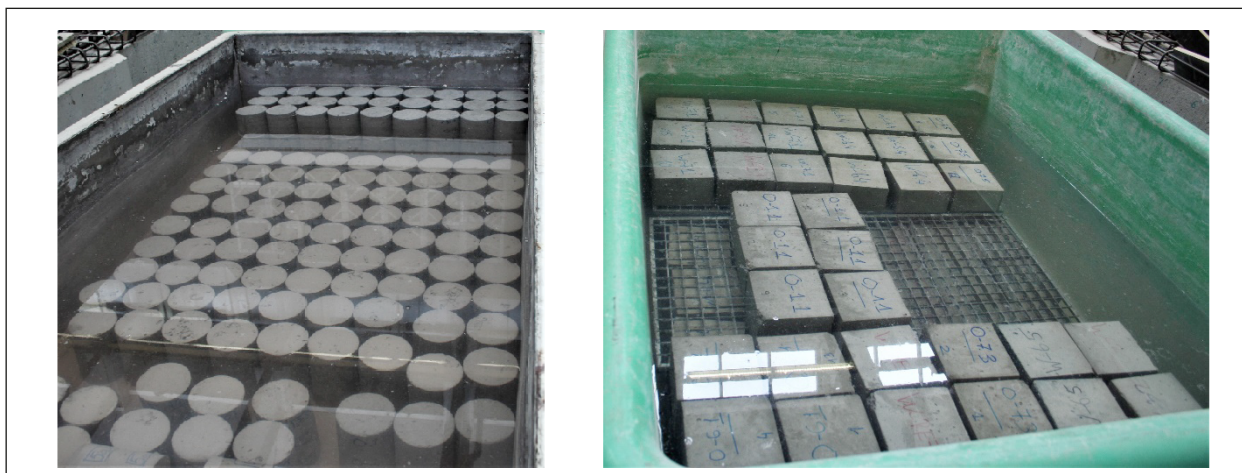


Bild 4-8: Wasserlagerung der Probekörper; unbehandelte Zylinder (links); auf Rosten gelagerte Würfel (rechts)



Bild 4-9: Messungen der Ausbürsttiefe mit dem ELAtextur-Messgerät (links); nachbehandelte Waschbetonoberflächen der Würfelprobekörper (rechts)

Die Biegebalken wurden aufgrund der Abmessungen und der hohen Anzahl abweichend von der Lagerung nach TP B-StB [N7] 14 Tage nach der Herstellung unter Wasser gelagert. Anschließend wurden diese mit wassergesättigtem Tuch und Folie umwickelt bis zum Prüfzeitpunkt im Normklima 20/65 hochkant platziert gelagert.

Frühestens nach 14 Tagen Wasserlagerung wurden die Zylinderprobekörper für die Spaltzuguntersuchung auf identische Weise wie in Arbeitsphase 1 vorbereitet. Anschließend wurden die Prüfkörperteile weiterhin gemäß den geplanten Lagerungsarten sortiert und bis zum Prüfzeitraum gelagert.

4.3.4 Arbeitsphase 3

In Arbeitsphase 3 wurden pro Mischzusammensetzung jeweils sechs Zylinder zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit, drei Würfel zur Bestimmung der Druckfestigkeit, zwei Würfel für die Festbetonluftporauszählung und drei bis fünf Würfel für die Frost-Tausalz-Untersuchung (CDF-Prüfung) hergestellt. Die jeweilige 50 I-Mischung wurde in einer Charge im Intensivmischer mit Sternwibler nach dem Mischregime gemäß Tabelle 4-11 vermengt. Der Beton der acht bis zehn Würfel wurde in drei Lagen in die Schalungen eingefüllt und zusätzlich während der Verdichtungsarbeit auf dem Rütteltisch mit ei-

nem Holzstamper verdichtet, um die Rohdichte und die Festigkeit der Würfelprobekörper zu erzielen. Die Weiterverarbeitung der Würfelproben in die Prüfkörper zur CDF-Prüfung der Ober- und Unterbetone erfolgte nach TP B-StB [N7].

Die CDF-Prüfung der Waschbetone sollte an gebürsteten Waschbetonoberflächen und nicht normgemäß an Teflonschalflächen durchgeführt werden. Hierzu erfolgte nach dem Verdichten der vorgesehenen Würfel das Aufsprühen des Oberflächenverzögerers auf die Oberfläche des Frischbetons. Ca. 8 bis 11 Stunden nach dem Herstellen und Absprühen der Würfel wurde die weich gebliebene Oberflächenzementschicht in einer speziellen Vorrichtung ausgebürstet. Anschließend erfolgte eine Kontrollmessung der Ausbürsttiefe der Waschbetonoberfläche mittels des von der BAST zur Verfügung gestellten ELAtextur-Messgerätes. Die Ausbürsttiefe lag hierbei normkonform zwischen 0,6 und 1,1 mm. Nach der Messung wurde ein Verdunstungsschutz auf die frisch hergestellten Waschbetonoberflächen aufgetragen. Anschließend erfolgte die Lagerung der Probekörper unter Folie bis zum Ausschalzeitpunkt.

Die Probekörper für die Begleituntersuchungen (Spaltzugfestigkeit, Druckfestigkeit) wurden bis zum Prüfzeitpunkt nach Lagerungsart A gelagert.

Fünf bis sieben Würfel wurden im Alter von 7 Tagen aus dem Wasserbecken entnommen. Zwei dieser Würfel wurden in Prüfkörper zur Ermittlung der Luftporenkennwerte nach [N7] bzw. [N8] weiterverarbeitet. Aus der Würfelmitte wurde jeweils eine Betonscheibe herausgesägt und eine Schnittkante des Prüfkörpers in mehreren Schleifprozessen zur

Luftporenauszählung am Mikroskop glatt aufpoliert. Anschließend wurde die jeweilige Rezeptur-ID auf die Prüfkörper aufgebracht und diese unter Normklima 20/65 bis zum Prüfzeitpunkt gelagert, welcher dann zeitnah folgte.

Die Aufbereitung der übrigen drei bis fünf Würfel in die Prüfkörper zur CDF-Prüfung wurde ebenfalls nach TP B-StB [N7] durchgeführt. Hierzu wurden die Würfel normkonform zersägt, so dass die an Teflonschalung betonierten Seitenflächen des Würfels der Ober- und Unterbetone, bzw. die gebürstete Einfüllseite des Würfels der Waschbetone die Prüffläche der CDF-Prüfkörper darstellte. Beispiele der entstandenen Prüfflächen sind dem Bild 4-10 zu entnehmen. Nach weiteren zwei Wochen Lagerung unter Normklima 20/65 erfolgte das Grundieren und am folgenden Tag das Abdichten der Seitenflächen mit einer Butylkautschukbeschichtungsbahn. Nach dem Abdichten wurde die Normklimalagerung 20/65 bis zum Prüfkörperalter von 28 Tagen fortgesetzt.

4.3.5 Zwischenphase 2-3

Um den Herstellungsablauf der Probekörper möglichst praxisüblich durchzuführen, wurde die zur Verfügung gestellte Gesteinskörnung zuerst im Ofen getrocknet und anschließend 24 Stunden vor der Betonage mit einem Drittel des Zugabewassers luftdicht gelagert, um die komplette Wassersättigung der Gesteinskörnung bis zum Betonagezeitpunkt zu gewährleisten. Die Wasserzugabemenge wurde hierfür entsprechend angepasst. Am Tag der Betonage erfolgte dann das Mischen der Bestandteile mit dem identischen Mischregime, mit einer Abweichung, bei der die Gesteinskörnung im Mi-

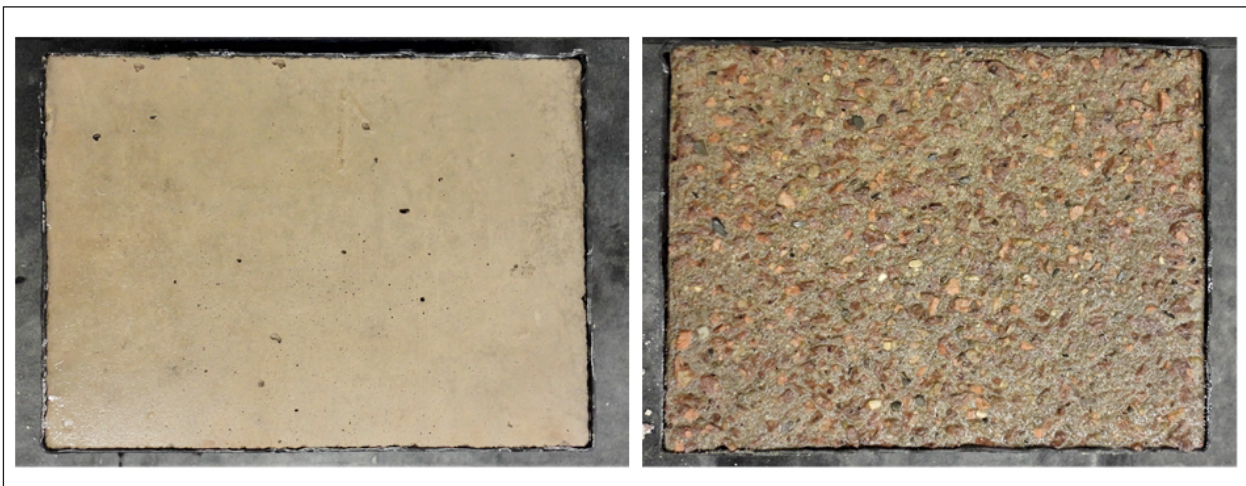


Bild 4-10: Prüfflächen der Prüfkörper für die CDF-Prüfung; an Teflonschalung anbetonierte Prüffläche (Ober- und Unterbetone) (links); Waschbetonoberfläche (Waschbetone) (rechts)

scher die ersten zwei Minuten bereits nass zugegeben und zusammenvermischt wurde und hierbei kein weiteres Wasser zur Gesteinskörnung zugegeben wurde. Das Herstellen von 95 l Frischbeton erfolgte im Intensivmischer mit Sternwirbler in einer Charge. Zusätzlich zu den üblichen Frischbetonprüfungen wurde mittels Darrversuch nach DIN EN 1048-1 [N12] der w/z-Wert bestimmt und mit dem Sollwert verglichen. Bei der Zwischenphase wurden je Praxisrezeptur fünfzehn Zylinder zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit, neun Betonwürfel zur Bestimmung der Druckfestigkeit, zwei Würfel zur Ermittlung der Luftporenkennwerte und drei bis fünf Würfel zur Frost-Tausalz-Untersuchung nach TP B-StB [N7] hergestellt.

Die Untersuchungen der Druckfestigkeiten im Probenalter von 28 Tagen sollten eine Aussage über den Einfluss der Lagerungsarten A und D auf die Festigkeitsentwicklung ermöglichen. Hierzu wurden drei Würfel nach der Lagerungsart A und weitere drei Würfel nach der in der Praxis üblichen Art entsprechend der [N17] NA.2 nach dem Ausschalen für sechs Tage wassergelagert und bis zur Prüfung dem Normklima 20/65 (Lagerungsart D) ausgesetzt (s. a. Kapitel 3.2.3).

Die Ermittlung der 56 Tage-Druckfestigkeiten der Praxisbetone erfolgte an drei Würfeln, die bis zum Prüfzeitpunkt unter Wasser gelagert wurden.

Die Herstellung, Vorbereitung und Lagerung der Prüfkörper zur Luftporenkennwertermittlung und Frost-Tausalz-Untersuchung ist identisch mit denen aus der Arbeitsphase 3.

5 Untersuchungsmethoden

5.1 Frischbetonprüfungen

Die Ermittlung des Luftporengehaltes erfolgte innerhalb der ersten 10 Minuten nach der Zementzugabe in den Intensivmischer beim Betonagevorgang. Als Prüfmethode wurde das Druckausgleichsverfahren am 8-Liter LP-Topf nach DIN EN 12350-7 [N15] angewendet.

Die Frischbetonrohichte wurde nach DIN EN 12350-6 [N14] im Zuge der LP-Gehaltsprüfung erfasst und erfolgte somit auch innerhalb der ersten 10 Minuten nach der Zementzugabe.

Die Konsistenz wurde parallel mittels Verdichtungsmaß entsprechend DIN EN 12350-4 [N11] innerhalb

der ersten 10 Minuten nach der Zementzugabe bestimmt.

Bei Praxismischungen wurde der w/z-Wert mittels Darrversuch nach DIN 1048-1 [N12] direkt im Anschluss an die Herstellung des Frischbetons überprüft.

Bei den Frischbetonprüfungen handelte es sich um reine Begleitprüfungen mit Einzelwertbestimmungen.

5.2 Druckfestigkeitsermittlung

Die Druckfestigkeit aller Betone in der Arbeitsphase 1 wurde im Alter von 28 und 56 Tagen jeweils an drei Würfeln mit 150 mm Kantenlänge gemäß DIN EN 12390-3 [N18] an einer servo-hydraulischen Universalprüfmaschine mit einem maximalen Lastbereich bis 3.000 kN ermittelt.

In der Arbeitsphase 2 wurde die 28 Tage-Druckfestigkeit aller Betone anhand von neun Würfeln (3 A/3 B/3 C) ermittelt. Im Alter von 56 und 91 Tagen wurde die Druckfestigkeit an jeweils drei wassergelagerten Würfeln untersucht.

Die Druckfestigkeiten aller Betone in Arbeitsphase 3 wurden im Alter von 28 Tagen als Begleitprüfungen an jeweils drei nach Lagerungsart A gelagerten Würfeln ermittelt.

In der Zwischenphase erfolgte die Druckfestigkeitsermittlung der Praxisbetone im Alter von 28 Tagen jeweils an sechs Würfeln (3 A/3 D). Im Alter von 56 Tagen wurden drei nach der Lagerung A gelagerten Würfel der Druckfestigkeitsprüfung unterzogen.

5.3 Spaltzugfestigkeitsermittlung

Die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit erfolgte in allen Arbeitsphasen gemäß TP B-StB Teil 3.1.05 [N7]. Für die Untersuchung wurde eine 300 kN-Druck-Biegeprüfmaschine vom Typ DB-300-S der Kalibrierungsklasse 1 eingesetzt (s. Bild 5-1, links) und eine Prüfvorrichtung nach den Anforderungen der TP B-StB Teil 3.1.05 [N7] angefertigt. (s. Bild 5-1, rechts). Die Maschine lässt sich sensitiv regeln, sodass eine Vorbelastung von 0,4 kN auf den Prüfkörper sicher und konstant aufgebracht werden kann.

Die Prüfvorrichtung verfügt über eine in Lastrichtung bewegliche Prüfkörperzentrierung in Form von

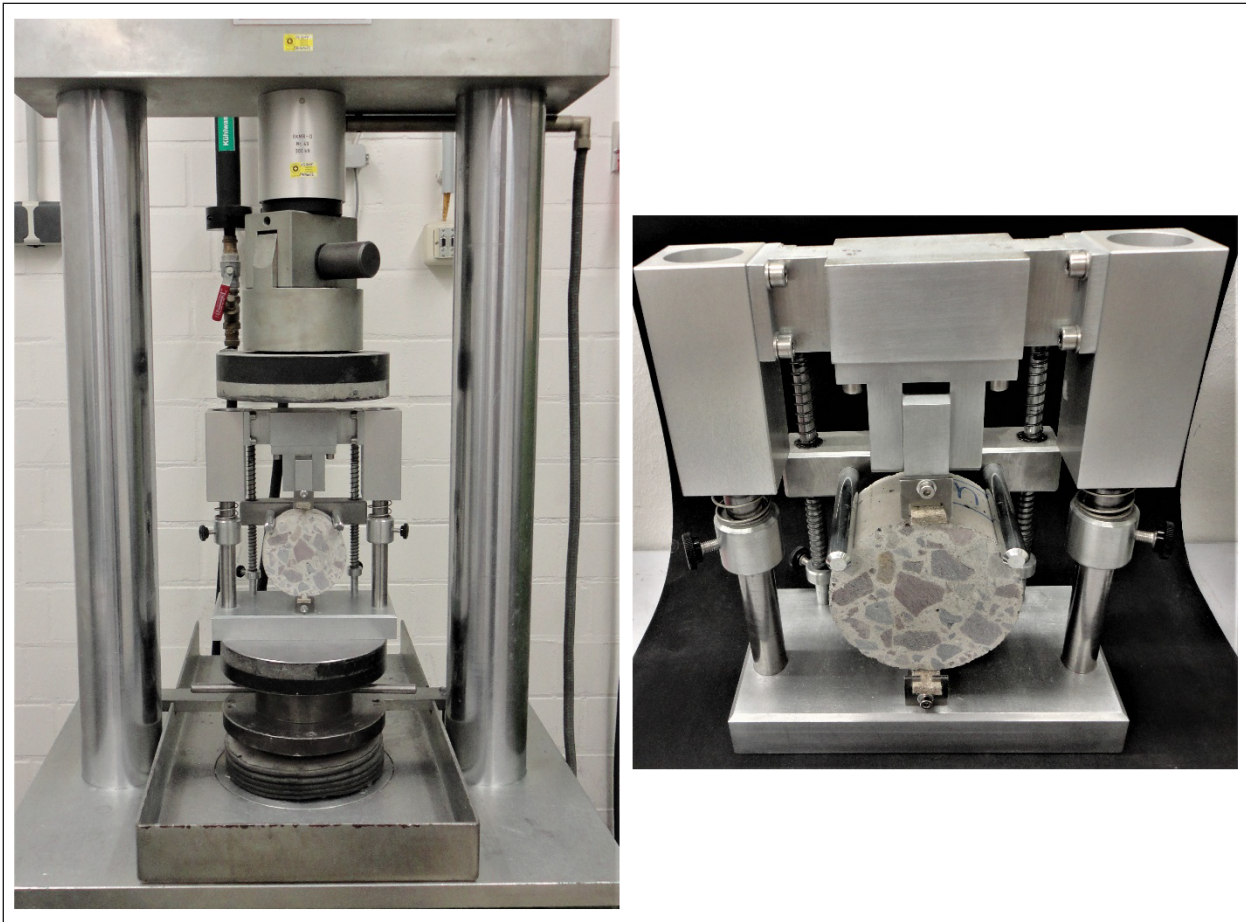


Bild 5-1: 300 kN-Druck-Biegeprüfmaschine Typ DB-300-S (links); Spaltzugvorrichtung mit zentriertem Prüfkörper (rechts)



Bild 5-2: 300 kN-Druck-Biegeprüfmaschine Typ DB-300-S umgerüstet für den Biegezugversuch

zwei Stahlstiften. Nach dem Aufbringen der Vorlast auf den Prüfkörper kann die Zentriervorrichtung in vertikaler Richtung verschoben und fixiert werden. Somit wird ein negativer Einfluss der Zentriervorrichtung auf die Ergebnisse der Spaltzugprüfung bei weiterer Belastung bis zum Erreichen der Bruchlast vermieden. Die Beweglichkeit der oberen Lasteinleitungsschiene ist durch eine gelenkige Lagerung gegeben. Die Leichtgängigkeit der Lasteinleitungsschiene ist durch die Kugellagerung und die eingebauten Federn an den Führungsstangen gewährleistet. Die Federsteifigkeit der Führungsfedern wurde angepasst, so dass eine vernachlässigbar geringe Federkraft beim Erstbelasten der Zylinderscheibe entsteht. Aufgrund des konstant gehaltenen Prüfaufbaus kann der geringfügige Einfluss der Federkraft auf die Spaltzugfestigkeitsergebnisse vernachlässigt werden.

In der Arbeitsphase 1 erfolgte die Spaltzugprüfung an sechs Unterscheiben der jeweiligen Betonrezeptur, sie waren bis zum Prüfalter von 28 und 56 Tagen unter Wasser gelagert (Lagerungsart A).

In der Arbeitsphase 2 wurden im Alter von 28 Tagen jeweils fünf Unterscheiben nach der Lagerungsart B und C zur Erfassung des Austrocknungseinflusses bedingt durch die verschiedenen Lagerungsszenarien der Prüfkörper auf die Spaltzugfestigkeit hin untersucht. Um eine ausführliche statistische Untersuchung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit aller in der Arbeitsphase 2 zu betrachtenden Betone durchzuführen, wurden im Alter von 28 Tagen zusätzlich 15 Unterscheiben nach der Lagerungsart A geprüft. Des Weiteren wurde die Spaltzugfestigkeitsentwicklung anhand der Untersuchungen an jeweils sechs Unterscheiben nach der Lagerungsart A im Alter von 56 und 91 Tagen bei allen ausgewählten Betonen betrachtet.

In der Arbeitsphase 3 erfolgte die Spaltzugfestigkeitsuntersuchung als Begleitprüfung ausschließlich an sechs wassergelagerten A-Unterscheiben im Alter von 28 Tagen.

Bei der Zwischenphase 2-3 wurde die Spaltzugfestigkeit der Praxisbetone im Alter von 28 Tagen anhand von zwölf und im Alter von 56 Tagen anhand von sechs Unterscheiben erfasst. Alle Prüfkörper lagerten bis zum Prüfzeitpunkt nach der Lagerungsart A unter Wasser. Die Prüfung der Spaltzugfestigkeit erfolgte auf die gleiche Weise wie bei den anderen Arbeitsphasen nach TP B StB Teil 3.1.05 [N7].

5.4 Biegezugfestigkeitsermittlung

Die Biegezugfestigkeit aller ausgewählten Betone der Arbeitsphase 2 wurde im Alter von 28, 56 und 91 Tagen jeweils an drei Balken (700x150x150 [mm]) mit 2-Punkt-Last-Eintragung gemäß DIN EN 12390-5 [N19] ermittelt. Hierzu wurde die 300 kN Biegeprüfmaschine (s. Bild 5-2), welche in Arbeitsphase 1 ausschließlich für die Spaltzugfestigkeitsuntersuchung eingesetzt wurde, für jeden Prüftermin umgerüstet und verwendet.

5.5 Spaltzugprüfung – Bruchflächenanalyse

Die Bruchflächen der Spaltzugprüfkörper wurden nach der Spaltzugprüfung optisch beurteilt und fotografisch erfasst. Im Zuge der Bruchflächenanalyse wurden die Bruchart und die Oberflächencharakteristiken bestimmt (vgl. Bild 2-3). Des Weiteren wur-

de untersucht, inwiefern der Bruch durch die Gesteinskörnung verläuft, oder ob sich einzelne Gesteinskörner herausschälen.

5.6 Ermittlung der Luftporenkennwerte am Festbeton

Die Ermittlung der Luftporenkennwerte am Festbeton erfolgte ausschließlich anhand zweier Prüfkörper je Rezeptur in der Arbeitsphase 3 und je Praxismischung aus der Zwischenphase 2-3. Der Ablauf der Probenvorbereitung und die Versuchsdurchführung erfolgte nach DIN EN 480-11 [N8] bzw. TP B-StB 3.1.08 [N7]. Hierzu wurden die Luftporen an zwei normkonform geschliffenen Betonprobenoberflächen mittels Mikroskopie entlang der aufgetragenen Messstreckenlinien ausgezählt. Hierbei wurde je Betonprüfkörper eine Messstrecke von mindestens 1.200 mm analysiert und bei der Auswertung zu einer Gesamtmessstrecke von mindestens 2.400 mm zusammengefasst. Bei der Auswertung erfolgte die Ermittlung folgender Kennwerte:

- Gesamtporenanteil im Festbeton,
- Abstandsfaktor L,
- Mikroluftporengehalt A_{300} ,
- Anzahl der gemessenen Luftporen N,
- Porendurchmesser der Mittelwertklasse.

5.7 CDF-Prüfung

Der Frost-Tausalz-Widerstand wurde an präparierten Würfelhälften nach TP B-StB 3.1.07 [N7] geprüft. Entsprechend der Frosttruhenkapazität konnten in einem Prüfungszyklus gleichzeitig 15 Prüfkörper, fünf je Betonrezeptur, somit drei Betonrezepturen untersucht werden. Die hierfür vorbereiteten und abgedichteten Prüfkörper wurden im Alter von 28 Tagen in ein Vorlagerungsbecken zur Sättigung des Porenraumes mit 3%iger NaCl-Lösung für sieben Tage eingelagert. In kontinuierlichen Zeitabständen erfolgte eine Kontrollwägung der Prüfkörper. Nach Ablauf der Vorsättigung erfolgte eine Messung der Masse der Prüfkörper und die Nullmessung mittels Ultraschall zur Bestimmung des rel. dynamischen E-Moduls. Im nächsten Schritt erfolgte das Einlagern der Prüfkörper in die Frosttru-



Bild 5-3: CDF-Prüfung: Vorsättigung der Prüfkörper (links); zur Frost-Tausalz-Belastung in die Truhe eingelagerte Proben (rechts)

he, in der sie während der nächsten 14 Tage den 28 Frost-Zyklen ausgesetzt wurden. Nach 4, 6, 14 und 28 Frost-Tausalz-Zyklen erfolgte die Wägung zur Ermittlung der Feuchtigkeitsaufnahme, Abwittungsmessung, Ultraschallmessung sowie die optische Zustandsaufnahme der Prüfflächen der einzelnen Prüfkörper.

6 Untersuchungsergebnisse – Arbeitsphase 1

6.1 Allgemeines

In der Arbeitsphase 1 wurden für 73 Betonrezepturen (Anhang I, Tabelle I – 1 bis Tabelle I – 3) umfangreiche Spaltzug- und Druckfestigkeitsuntersuchungen durchgeführt und begleitend Frischbetonkennwerte ermittelt.

Als Frischbetonkennwerte wurden die Frischbetonrohichte, das Verdichtungsmaß und der LP-Gehalt innerhalb der ersten 10 Minuten nach der Zementzugabe bestimmt. Diese Einzelwerte können verknüpft mit den Betonrezepturen dem Anhang I Tabelle I – 1 bis Tabelle I – 3 entnommen werden. Zur besseren Interpretationsmöglichkeit der Ergebnisse sind sie ebenfalls in den Übersichtstabellen der Spaltzug- und Druckfestigkeitswerte im Anhang I enthalten.

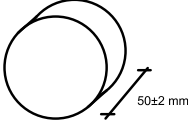
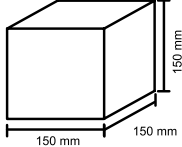
Die im Zeitraum von zwölf Monaten gewonnenen und ausgewerteten Ergebnisse der Spaltzug- und Druckfestigkeitsprüfungen sind in Form von Grafiken, zugehörigen Erläuterungstexten und in tabellarischer Form im Anhang I ab Tabelle I – 4 bis Tabel-

le I – 55 ausführlich zusammengefasst. Nachfolgend werden zur Übersicht ausschließlich Gesamtergebnisse der Untersuchungen in mehreren Balkendiagrammen dargestellt und kommentiert.

Die Auswertungen erfolgten jeweils in der Reihenfolge: Waschbeton (1-x.x), Oberbeton (D>8) (2-x.x) und Unterbeton (3-x.x) in Abhängigkeit von den jeweiligen zu untersuchenden Variationsparametern (vgl. Rezepturkennzeichnung Tabelle 4-12 und Tabelle 4-13):

- Luftporengehalt,
- w/z-Wert
- Zementart,
- Zementgehalt (Zementmenge),
- Sandart,
- Gesteinskörnungsart > 2 mm,
- Größtkorn,
- Sieblinie,
- Zusatzmittel.

Im Anhang I sind die Einzelwerte (EW bzw. $f_{ct,sp}$), Mittelwerte (MW bzw. $f_{ctm,sp}$) und die Standardabweichung (s) der Spaltzugfestigkeit für jeweils sechs Prüfkörper nach 28 Tagen und 56 Tagen enthalten. Zusätzlich wurde zu jeder Betonrezeptur die charakteristische Spaltzugfestigkeit ($f_{ctk,sp}$) berechnet. Die Berechnung erfolgte abweichend von der Anforderung der TP B-StB [N7] an sechs Einzelproben und nicht wie gefordert an 15 Einzelproben. Für die Berechnung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit wurde als Sicherheitsmaß der Toleranzwert $k = 2,950$ für das 5 %-Quantil bei einer statistischen

Prüfung	Spaltzugfestigkeit	Druckfestigkeit
1	2	3
Probekörperabmessung	Zylinderscheibe D = 100 mm / L = 50±2 mm	Würfel Kantenlängen a = b = c = 150 mm
Probekörper		
Einzelwert [N/mm²]	$f_{ct,sp} = x_i = \frac{2 * F}{\pi * L * D}$	$f_{c,cube} = x_i = \frac{F}{a * b}$
Anzahl der Probekörper	n = 6	n = 3
Mittelwert [N/mm²]	$f_{ctm,sp} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	$f_{cm,cube} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
Standardabweichung	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
Charakteristische Spaltzugfestigkeit [N/mm²]	$f_{ctk,sp} = f_{ctm,sp} - k * s$ k = 2,950: Toleranzwert für n = 6	-

Tab. 6-1: Überblick – Auswertung der Festigkeitsuntersuchungen; Arbeitsphase 1

Sicherheit von P = 90 % für eine Prüfkörperanzahl n = 6 eingesetzt. Die Rechengrundlagen sind in Tabelle 6-1 zusammenfassend dargestellt.

Die Druckfestigkeit wurde an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge (cube) ermittelt. Einzelwerte (EW bzw. $f_{c,cube}$) und Mittelwerte der Druckfestigkeit (MW bzw. $f_{cm,cube}$) der jeweiligen Betonzusammensetzungen sind nach den Variationsparametern sortiert dem Anhang I zu entnehmen. Die Bestimmung der Mittelwerte aus drei Einzelwerten erfolgte mit und ohne (Klammerwert) Berücksichtigung möglicher Ausreißer bei den Einzelwerten der jeweiligen Betonrezeptur. Als Ausreißer wurden Werte außerhalb des Bereichs $\bar{x} \pm s$ definiert.

Die Festbetonrohdecken sind jeweils als Mittelwert aller Einzelwerte der jeweiligen Mischungszusammensetzung und betrachteten Spaltzugprüfung bzw. der Druckfestigkeitsuntersuchungen zusammengefasst worden. Zur weiteren Übersichtlichkeit sind jeder Ergebnistabelle diese konstanten Parameter tabellarisch beigefügt.

Eine grafische Zusammenstellung der ermittelten Spaltzugfestigkeiten und Würfelruckfestigkeiten

sind in Bild 6-1 bis Bild 6-6 enthalten. Die dargestellten Diagramme zeigen für die untersuchten Betone die Mittelwerte der Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen ($f_{ctm,sp,28d}$) und 56 Tagen ($f_{ctm,sp,56d}$). Bei den dargestellten Druckfestigkeiten handelt es sich um die Mittelwerte von drei Werten der Würfelruckfestigkeiten nach 28 Tagen ($f_{cm,cube,28d}$) und 56 Tagen ($f_{cm,cube,56d}$) unter Eliminierung von Ausreißern. Alle Prüfkörper lagerten bis zur Prüfung unter Wasser. In Anhang I, Bild I – 1 bis Bild I – 22 sind die entsprechenden Variationen des jeweiligen Parameters sowie konstant gehaltene Parameter den Legenden zwischen den Diagrammen zu entnehmen.

Pro Prüfsérie wurden drei Ausgangsbetone mit unterschiedlichen LP-Gehalten hergestellt. Es werden die Kategorien LP-Gehalt 4 – 5 Vol.-%, 5 – 6 Vol.-% und > 6 Vol.-% unterschieden. Um bei der Auswertung der Ergebnisse in Abhängigkeit von den diversen Variationsparametern den Einfluss des LP-Gehaltes zu berücksichtigen, wurden die Ergebnisse der verschiedenen Rezepturen der Fahrbahndeckenbetonarten in Abhängigkeit von den LP-Kategorien zusammengefasst und mit der entsprechenden Ausgangsrezeptur verglichen.

6.2 Ergebnisse der Festigkeitsentwicklung bis zum Probenalter von 56 Tagen

6.2.1 Allgemeines

In den folgenden sechs Balkendiagrammen (Bild 6-1 bis Bild 6-6) sind die Ergebnisse der Spaltzug- und Druckfestigkeiten aller in Arbeitsphase 1 untersuchten Betonrezepturen nach 28 und 56 Tagen aufgeführt (vgl. Rezeptur-ID Tabelle 4-13).

Die schwarzgepunkteten, innenliegenden Balken stellen die Ergebnisse der 28 d-Festigkeitsuntersuchungen dar. Die dunklen, voll ausgefüllten äußeren Balken bilden die Ergebnisse der 56 d-Festigkeitsuntersuchungen der untersuchten Betone ab. Links im Inneren der Balken jeder Grafik sind die festgestellten Mittelwerte der jeweiligen 28 d-Festigkeit je Betonrezeptur angegeben. Rechts am Rand der Balkengrafiken sind die Mittelwerte der jeweiligen 56 d-Festigkeit dargestellt. Die Ergebnisse sind gemäß des erreichten Frischbetonluftporengehalts in die jeweilige LP-Gehaltsgruppe sortiert aufgelistet. Bei den Mischungen, welche aufgrund der Herstellungskomplikationen oder stark unterschrittener Festigkeiten im Vergleich mit der jeweiligen Ausgangsmischung für weitere Untersuchungen in den Arbeitsphasen 2 und 3 ausgeschlossen wurden, sind die Festigkeitskennwerte grau hervorgehoben. Bei der Auswahl der Rezepturen spielte das Erreichen der geforderten Normfestigkeiten aufgrund der hier vorliegenden wissenschaftlichen Fragestellungen eine untergeordnete Rolle.

In den Grafiken in Bild 6-1 und Bild 6-2 sind die Festigkeitsergebnisse der Waschbetone, in drei LP-Gehaltskategorien aufgeteilt, dargestellt. Die Mittelwerte der Spaltzugfestigkeiten der Waschbetone liegen in einer Größenordnung von 4,42 bis 5,86 N/mm². Die Druckfestigkeiten liegen in einer Größenordnung von 36,5 bis 59,3 N/mm². Elf Mischungen der Waschbetone wurden nach Analyse der Ergebnisse für weitere Untersuchungen ausgewählt.

Die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen der Oberbetone (D>8) sind Bild 6-3 und Bild 6-4 zu entnehmen. Die 56 d-Spaltzugfestigkeiten der betrachteten 26 Oberbetone (D>8) liegen zwischen 3,68 und 5,62 N/mm². Die 56 d-Druckfestigkeiten liegen in einer Größenordnung von ca. 21 bis 55,3 N/mm². Das grundsätzlich niedrigere Druckfestigkeitsniveau im Vergleich zu den Erfahrungen aus der

Praxis lässt sich u. a. durch die 56-tägige Wasserlagerung bis zur Prüfung begründen, was anhand der späteren Zusatzuntersuchungen nachgewiesen werden konnte.

Die Lagerungsart A der Probekörper beeinflusste die Druckfestigkeit der Probekörper erheblich, sie war im Vergleich zu der Druckfestigkeit der Probekörper, welche nach der praxisüblichen Lagerungsart D gelagert wurden, geringer. Des Weiteren spielt die Verdichtungsqualität jedes Probekörpers eine wichtige Rolle. Die gleichen Erfahrungen wurden in diesem Forschungsvorhaben bei den betrachteten Unterbetonmischungen gemacht. Für weitere Untersuchungen in den folgenden Arbeitsphasen wurden hierfür 16 Oberbetone (D>8) ausgewählt.

In Bild 6-5 und Bild 6-6 sind die Ergebnisse der 28 d/56 d-Festigkeitsuntersuchung der Unterbetone aus Arbeitsphase I dargestellt. Die 56 d-Spaltzugfestigkeiten der Unterbetone liegen demnach in einer Größenordnung zwischen 3,18 und 4,77 N/mm² und die 56 d-Druckfestigkeiten zwischen 25,2 und 55,0 N/mm². Des Weiteren erfolgt eine kurze Bewertung der tendenziellen Entwicklung der Festigkeiten unter Berücksichtigung der einzelnen Variationskategorien. Eine ausführliche Gegenüberstellung der Ergebnisse nach den einzelnen Variationskategorien je Fahrbahndeckenbetonart in grafischer und tabellarischer Form sind dem Anhang I, Bild I – 1 bis Bild I – 22 zu entnehmen.

6.2.2 Variationsparameter Luftporengehalt

Der Luftporengehalt des Frischbetons wurde mit der Zugabe von Luftporenbildnern beim Mischen der Bestandteile der jeweiligen Betonrezeptur reguliert. Die Größenordnung der eingeführten künstlichen Luftporen wurde in der Regel durch den Austausch der Ausgangsstoffe mit beeinflusst und war somit schwer abschätzbar. Um den Einfluss des Frischbetonluftporengehaltes zu untersuchen, wurde die Ausgangsrezeptur der jeweiligen Bauweise mit drei verschiedenen Luftporengehalten betoniert. Diese wurden anschließend den vorab definierten drei Luftporengehaltskategorien zugeordnet. Somit konnte bei der Auswertung variierender Festigkeitsergebnisse der Einflussfaktor des Luftporengehaltes durch die Zuordnung der betrachteten Betone zu der entsprechenden Luftporengehaltskategorie berücksichtigt werden, vgl. die Zuordnungen zum LP-Gehalt in Bild 6-1 bis Bild 6-6.

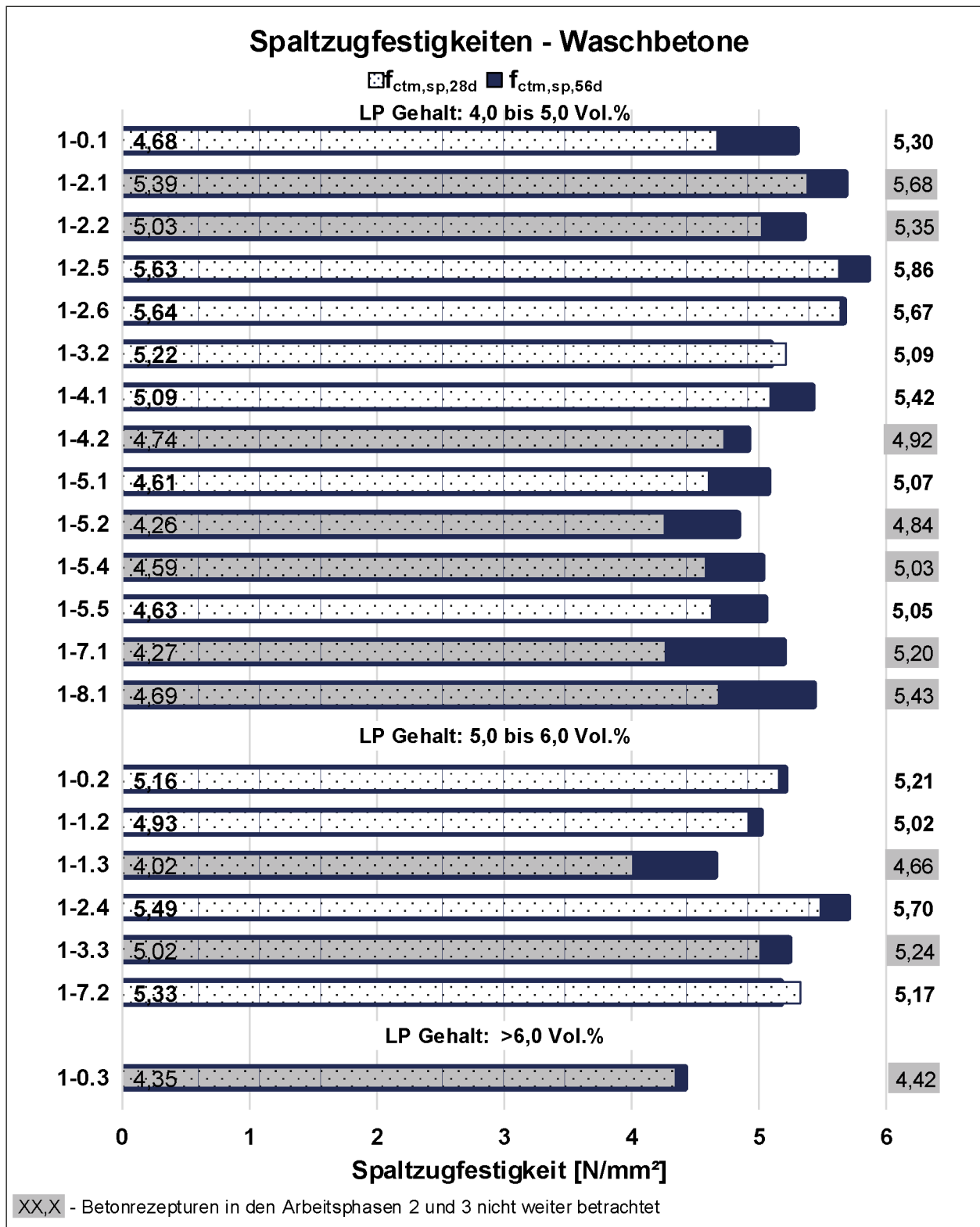


Bild 6-1: AP1 – Gesamtergebnisse der Spaltzugfestigkeiten der Waschbetone

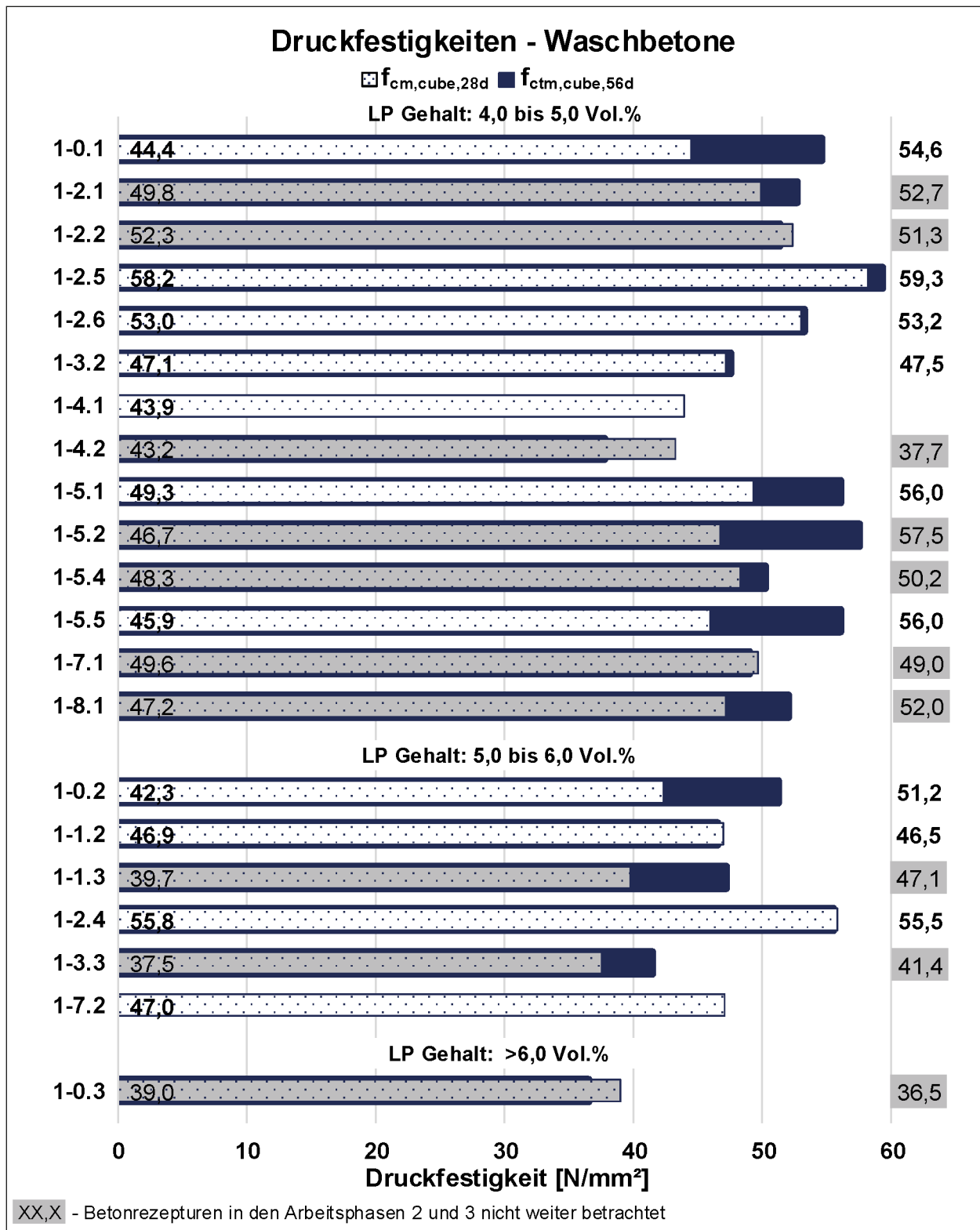


Bild 6-2: AP1 – Gesamtergebnisse der Druckfestigkeiten der Waschbetone

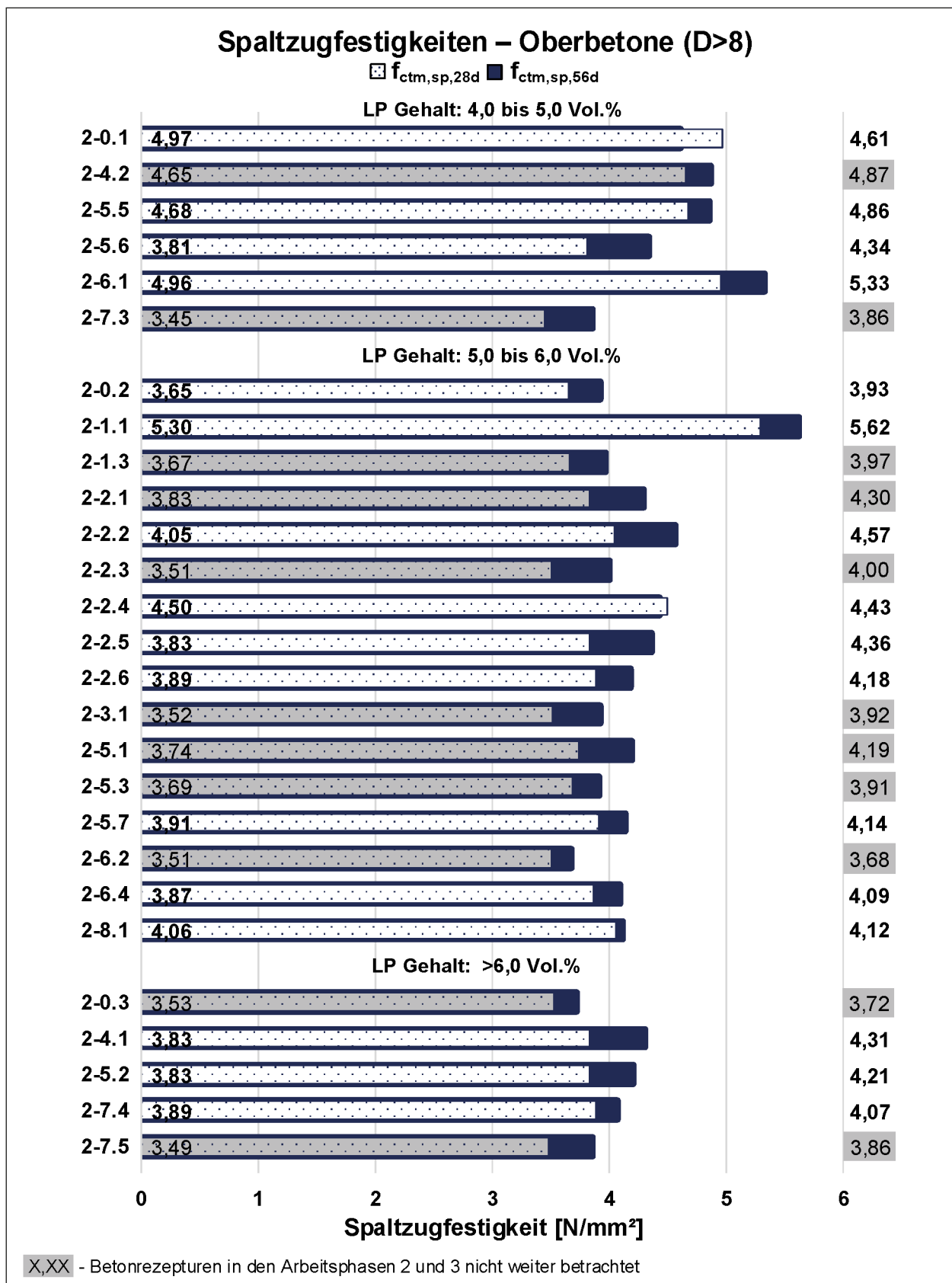


Bild 6-3: AP1 – Gesamtergebnisse der Spaltzugfestigkeiten der Oberbetone (D>8)

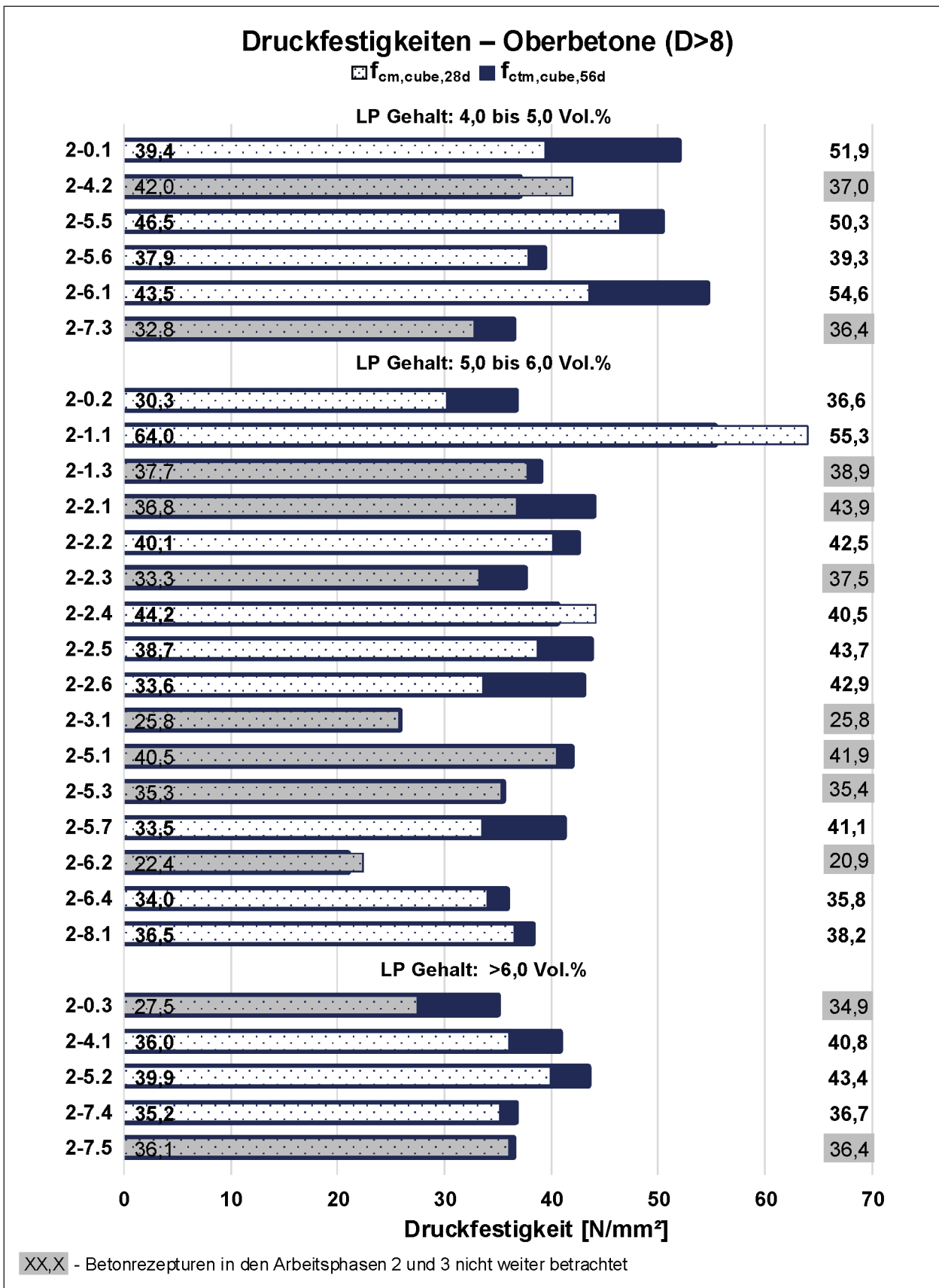


Bild 6-4: AP1 – Gesamtergebnisse der Druckfestigkeiten der Oberbetone (D>8)

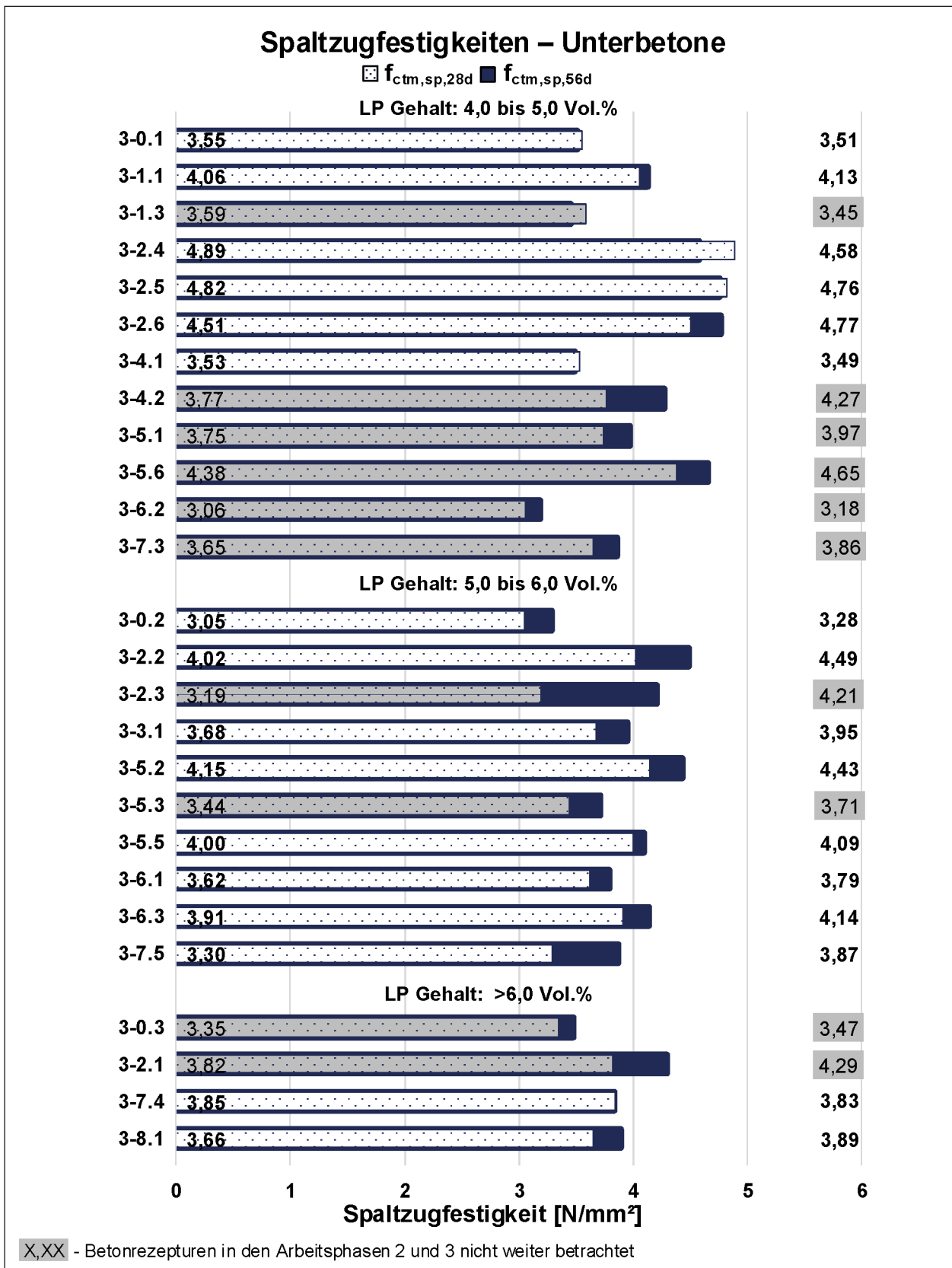


Bild 6-5: AP1 – Gesamtergebnisse der Spaltzugfestigkeiten der Unterbetone

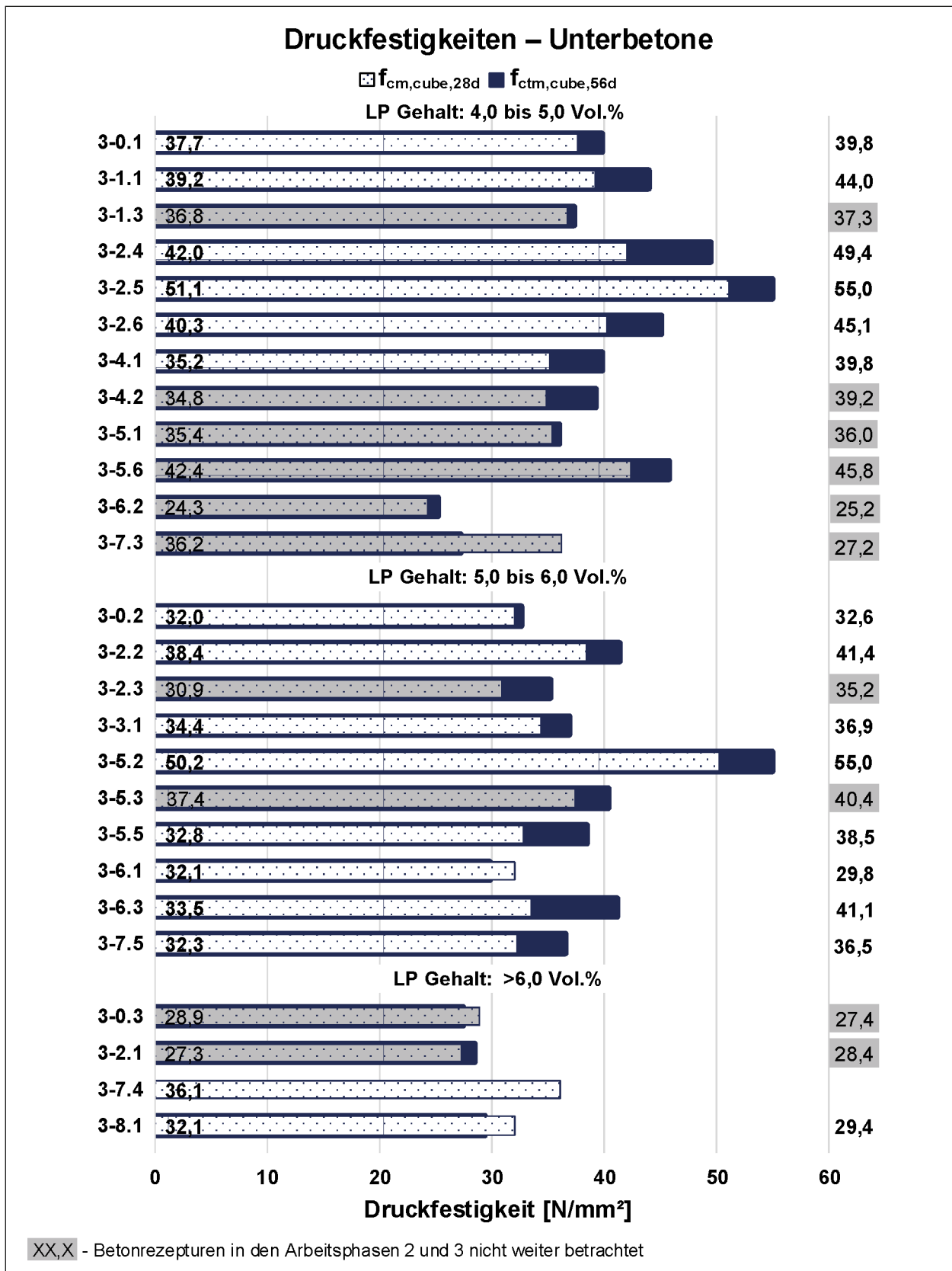


Bild 6-6: AP1 – Gesamtergebnisse der Druckfestigkeiten der Unterbetone

Daher wurden im vorliegenden Vergleich neun Ausgangsbetone, die der Variationskategorie 0 (Rezeptur-ID: x-0.x, vgl. Tabelle 4-13) zugeordnet sind, betrachtet. Zusammenfassend können folgende generelle Tendenzen festgestellt werden: Übersteigt der Luftporengehalt den Schwellenwert von 6,0 Vol.-%, so ist in den meisten Fällen eine deutliche Festigkeitsminderung sowohl bei der Spaltzugfestigkeit als auch bei den Druckfestigkeiten (z. B. Rezeptur 2-0.3 bzw. 3-0.3) zu verzeichnen. Ausnahmen bilden die Betone der Unterbetonbauweise. Unabhängig von dem Luftporengehalt bleiben die Spaltzugfestigkeiten aller Unterbetonrezepturen verhältnismäßig einheitlich. Lediglich die Würfel-druckfestigkeiten weisen eine Festigkeitsabminderung von etwa 10 % mit steigendem Luftporengehalt auf.

Ausgehend von den vorliegenden Erkenntnissen wurde versucht, in der Arbeitsphase 2 durch das Dosieren des Luftporenbildners den Luftporengehalt aller Betonrezepturen unter dem Schwellenwert von 6,0 Vol.-% zu halten. Somit wurden die Rezepturen 1-0.3, 2-0.3 und 3-0.3 in den nachfolgenden Arbeitsphasen nicht berücksichtigt.

6.2.3 Variationsparameter w/z-Wert

Bei der vorliegenden Untersuchung wurde der w/z-Wert bei allen Betonarten in drei Stufen zwischen 0,40 und 0,45 variiert. Die an dieser Stelle betrachteten Rezepturen, die zu der Variationskategorie 1 (Rezeptur-ID: x-1.x, vgl. Tabelle 4-13) zugehören, wurden mit der jeweiligen Ausgangsmischung (Rezeptur-ID: x-0.x) je Luftporengehaltskategorie verglichen.

Erwartungsgemäß erhöhen sich die Festigkeiten mit kleiner werdendem w/z-Wert. Bei den Waschbetonen liegen die Spaltzugfestigkeiten trotz Variation der w/z-Werte von 0,4 auf 0,43 relativ nah beieinander. Das zeigte sich auch bei den Ober- und Unterbetonen bei der w/z-Wert-Variation zwischen 0,43 und 0,45. Diese Tendenz kann man für die Ober- und Unterbetone auch bei deren Druckfestigkeiten beobachten.

Der Oberbeton 2-1.1 mit einem w/z-Wert von 0,40 hat deutlich höhere Festigkeiten im Vergleich zu den anderen Oberbetonen mit den w/z-Werten von 0,43 und 0,45 erlangt. Gleichzeitig ist sein LP-Gehalt mit 3,4 Vol.-% auch niedriger als bei den Betonen 2-0.2 und 2-1.3, die einen LP-Gehalt von 5,5

und 5,7 Vol.-% aufweisen. Diese Einflüsse überlagern sich hier.

Bei den Rezepturen 2-0.1 und 2-1.1 ergab sich mit $c = 1,45$ bzw. $1,47$ eine sehr hohe Steifigkeit im Übergangsbereich zwischen den Verdichtungsklassen C1 und C0. Somit stellten sich mit zunehmender Befüllung der Schalungen Schwierigkeiten bei der Verdichtung ein. Das führte zu größeren Streuungen der Einzelwerte insbesondere bei den Druckfestigkeiten (2-0.1 bzw. 2-1.1), aber auch bei den Spaltzugfestigkeiten (2-0.1).

Ausgehend von den Überlegungen, für alle drei Straßenbetonarten möglichst ausreichende Festigkeiten zu erlangen, wurden in den nachfolgenden Arbeitsphasen des Forschungsvorhabens keine weiteren Rezepturen mit einem w/z-Wert von 0,45 untersucht.

6.2.4 Variationsparameter Zementart

Zur Quantifizierung des Einflusses unterschiedlicher Zemente (Tabelle 4-1) auf die Festigkeitsentwicklung der Straßenbetone wurden die Zemente CEM I, CEM II/A-S, CEM II/B-S und CEM III/A mit den Festigkeitsklassen 32,5 R, 42,5 N und 42,5 R eingesetzt (vgl. Tabelle 4-13).

Bei den Waschbetonen liegen die 56 d-Spaltzugfestigkeiten mit $f_{ctm,sp,56d} > 5 \text{ N/mm}^2$ bei der Verwendung von sechs verschiedenen Zementen (ohne CEM II/B-S 32,5 R) auf einem sehr hohen Niveau. Die zu vergleichenden Waschbetone weisen alle einen w/z-Wert von 0,40 und einen Zementgehalt von 420 kg/m^3 auf. Die Festigkeiten der Betone, hergestellt mit den Zementarten CEM I 42,5 R und CEM II/A-S 42,5 R, liegen geringfügig niedriger, die auf Basis der Rezeptur mit dem Zement CEM II/B-S 42,5 R geringfügig höher im Vergleich zu den Festigkeiten der Betone, die mit den Zementen CEM I 42,5 N, CEM II/B-S 42,5 N und CEM III/A 42,5 N hergestellt worden sind.

Bei den Rezepturen der Ober- und Unterbetone werden die Festigkeiten in Abhängigkeit von sieben verschiedenen Zementen verglichen (Tabelle 4-13). Die zu vergleichenden Rezepturen weisen alle einen w/z-Wert von 0,43 und einen Zementgehalt von 340 kg/m^3 auf. Bei den Oberbetonen liegen mit Ausnahme der Ausgangsmischung (2-0.2) die 56 d-Spaltzugfestigkeiten bei $f_{ctm,sp,56d} > 4 \text{ N/mm}^2$. Bei den Unterbetonen liegen die 56 d-Spaltzugfestig-

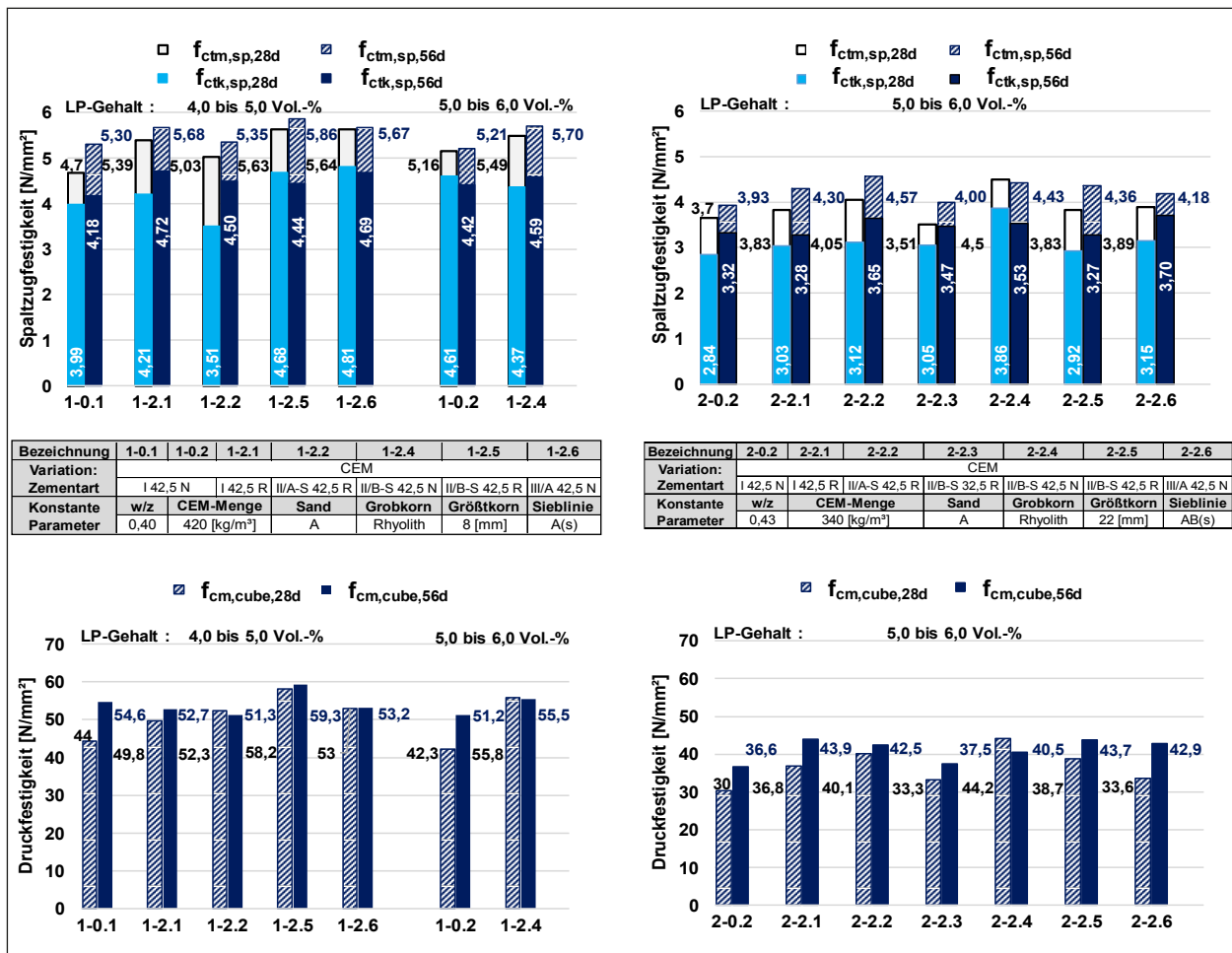


Bild 6-7: Festigkeitsentwicklung – Zementart: Waschbetone (links); Oberbetone (D>8) (rechts)

keiten bei $f_{ctm,sp,56d} > 3 \text{ N/mm}^2$. Die jeweilige Ausgangsmischung zeigt bei beiden Betonarten die geringste Festigkeit.

Grundsätzlich sind höhere Festigkeiten bei den Zementen mit steigenden Hüttensandgehalten im Vergleich zu den verwendeten Portlandzementen zu beobachten. Ein Einfluss der Zementfestigkeitsklasse ist erkennbar. So zeigt die Verwendung eines CEM II/B-S 32,5 R vergleichsweise niedrigere Spaltzug- und Druckfestigkeiten beim Oberbeton (Rezeptur 2-2.3) und relativ niedrige Druckfestigkeiten ($f_{cm,cube,56d} = 35 \text{ N/mm}^2$) beim Unterbeton (Rezeptur 3-2.3), besonders wenn sich gleichzeitig hohe Luftporengehalte im Beton einstellen. Diese niedrigen Druckfestigkeiten in Kombination mit hohen Luftporengehalten zeigen sich auch bei der Rezeptur 3-2.1, bei welcher ein CEM I 42,5 R verwendet wurde. Diese Beobachtungen führten zum Ausschluss des Zementes CEM II/B-S 32,5 R mit der niedrigsten Festigkeitsklasse und des Portlandzementes CEM I 42,5 R für die Arbeitsphase 2.

6.2.5 Variationsparameter Zementmenge

In Bild 6-1 bis Bild 6-6 sind die betrachteten Rezepturen unter der Rezeptur-ID x-3.x, vgl. Tabelle 4-13, wiederzufinden.

Bei den Waschbetonrezepturen ergibt die Erhöhung des Zementgehaltes von 420 kg/m^3 auf 450 kg/m^3 und 480 kg/m^3 keine signifikante Änderung der Spaltzugfestigkeiten. Die Druckfestigkeiten reduzieren sich nach 56 Tagen bei Betonen mit einer Zementmenge von 480 kg/m^3 .

Ein vergleichbares Verhalten stellt sich bei den Oberbetonen ein: Die Spaltzugfestigkeiten weisen mit der Erhöhung des Zementgehaltes von 340 kg/m^3 auf 360 kg/m^3 keine signifikanten Unterschiede auf. Bei den Druckfestigkeiten kann das Niveau der Ausgangsrezeptur jedoch nicht erreicht werden.

Die Untersuchungen an Unterbetonen zeigen sowohl bei den Spaltzugfestigkeiten, als auch bei

den Druckfestigkeiten, deutliche Festigkeitssteigerungen durch Erhöhung der Zementmenge um 20 kg/m^3 .

Die Rezeptur 2-3.1 wies einen hohen Luftporengehalt von 5,9 Vol.-% auf, was zu geringen Druckfestigkeiten führte.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse durch die Variation des Zementgehaltes wurde die Waschbetonrezeptur 1-3.3 mit einem Zementgehalt von 480 kg/m^3 in Arbeitsphase 2 nicht weiter untersucht.

6.2.6 Variationsparameter Sandart

Bei der Variation der Sandart A und B (Rezeptur-ID x-4.x, vgl. Tabelle 4-13) zeigt sich kein vergleichbar eindeutiger Einfluss einer Sandart auf die Spaltzug- und Druckfestigkeitsentwicklung aller drei Prüfserien.

Jedoch führt die Verwendung von Brechsand zu sehr steifen und äußerst schlecht zu verarbeitenden Konsistenzen (z. B. Rezeptur 1-4.2 bzw. 2-4.2), sodass sich aufgrund der streuenden Festbetonrohndichten geringe Druckfestigkeiten einstellen.

Bei den Waschbetonen kann bei der Rezeptur mit dem mehlkornärmeren Sand B eine etwas höhere Spaltzugfestigkeit im Vergleich zu den Werten der Betone mit der Sand A-Rezeptur festgestellt werden. Bei der Verwendung von Brechsand wird beim Waschbeton der geringste Wert erzielt. Die 28 d-Druckfestigkeiten der betrachteten Betone liegen auf einem vergleichbaren Niveau. Nach 56 Tagen weist der Brechsand Beton im Gegensatz zum Ausgangsbeton (Sand A) keine höhere Festigkeit aus.

Bei den Oberbetonen ($D > 8$) reduziert sich die Spaltzugfestigkeit durch den Austausch von Sand A durch Brechsand geringfügig. Bei der Druckfestigkeit ist bei der Brechsandrezeptur nach 28 Tagen keine Festigkeitssteigerung zu beobachten. Vergleicht man die Festigkeiten der Betone mit den Sanden A oder B bei hohen LP-Gehalten, so weist der mit Sand B hergestellte Oberbeton ($D > 8$) höhere Spaltzug- und Druckfestigkeiten aus.

Bei den Unterbetonen werden die höchsten Spaltzugfestigkeiten bei der Verwendung von Brechsand erreicht (Rezeptur 3-4.2). Der Austausch von Sand A gegen einen mehlkornärmeren Sand B zeigt keine Auswirkung auf die Festigkeit. Die Druckfestigkeiten liegen bei allen Rezepturen auf einem vergleichbaren Niveau.

Der Brechsand wurde aufgrund der erschwerten Betonherstellung in Bezug auf das Einstellen planmäßiger Frischbetonkennwerte sowie der teilweise unstenen Festigkeitsentwicklungen, die sich unabhängig bei allen Prüfserien einstellten, zur weiteren Verwendung in den Arbeitsphasen 2 und 3 ausgeschlossen.

6.2.7 Variationsparameter Gesteinskörnung

Um den Einfluss der Gesteinskörnungsart zu quantifizieren wurden bis zu sieben Gesteinskornarten mit diversen Eigenschaften bei der Untersuchung eingesetzt. Die Rezeptur-IDs der hier betrachteten Mischungen tragen die Variationsnummer x-5.x (vgl. Tabelle 4-13). Da sich die Gesteinskornarten durch die vorliegenden maximal lieferbaren Größtkörner unterschieden, wurden die Ergebnisse im Anhang I in Bild I – 14 bis Bild I – 16 bei der Auswertung nach dem Größtkorn sortiert und in unterschiedlichen Grafiken dargestellt. Die Betonrezepturen 2-5.7, 2-6.2 und 3-5.8 können aufgrund ihrer Zusammensetzung sowohl für einen Ober- als auch für einen Unterbeton eingesetzt werden.

Die Spaltzugfestigkeiten der betrachteten Waschbetone liegen mit $f_{\text{ctm,sp,56d}} = 4,84 - 5,30 \text{ N/mm}^2$ auf einem hohen Niveau. Die Ausgangsrezeptur mit Rhyolith-Splitt zeigt im Vergleich mit $f_{\text{ctm,sp,56d}} = 5,30 \text{ N/mm}^2$ die größte Spaltzugfestigkeit. Die Verwendung von gebrochenem Kies bei der Rezeptur 1-5.2 weist die geringste Spaltzugfestigkeit mit $4,84 \text{ N/mm}^2$ auf. Das entspricht einer Reduzierung um ca. 9 % im Vergleich zur Spaltzugfestigkeit von ca. $5,30 \text{ N/mm}^2$ der Rezeptur 1-0.1. Bei den Druckfestigkeiten zeigt der Basaltbeton den niedrigsten 56 d-Mittelwert. Er ist um 8 % niedriger im Vergleich zu dem des Ausgangsbetons 1-0.1.

Bei Betrachtung der Oberbetone ($D > 8$) mit dem Größtkorn von 22 mm weist die Festigkeitsentwicklung eine ähnliche Tendenz im Vergleich zu den Waschbetonen auf. Es liegt nur eine geringfügige Spannweite zwischen den ermittelten Spaltzugfestigkeiten bei den betrachteten Betonen vor, wobei die Rezeptur mit dem runden Kies unerwartet hohe Festigkeiten aufweist.

Wird ein Oberbeton mit einem Größtkorn von 16 mm konzipiert, so ist laut der vorliegenden Ergebnisse der gebrochene Kies als Grobkorn besonders geeignet. Obwohl bei diesem Beton ein hoher Luftporengehalt gemessen wurde, sind im Vergleich

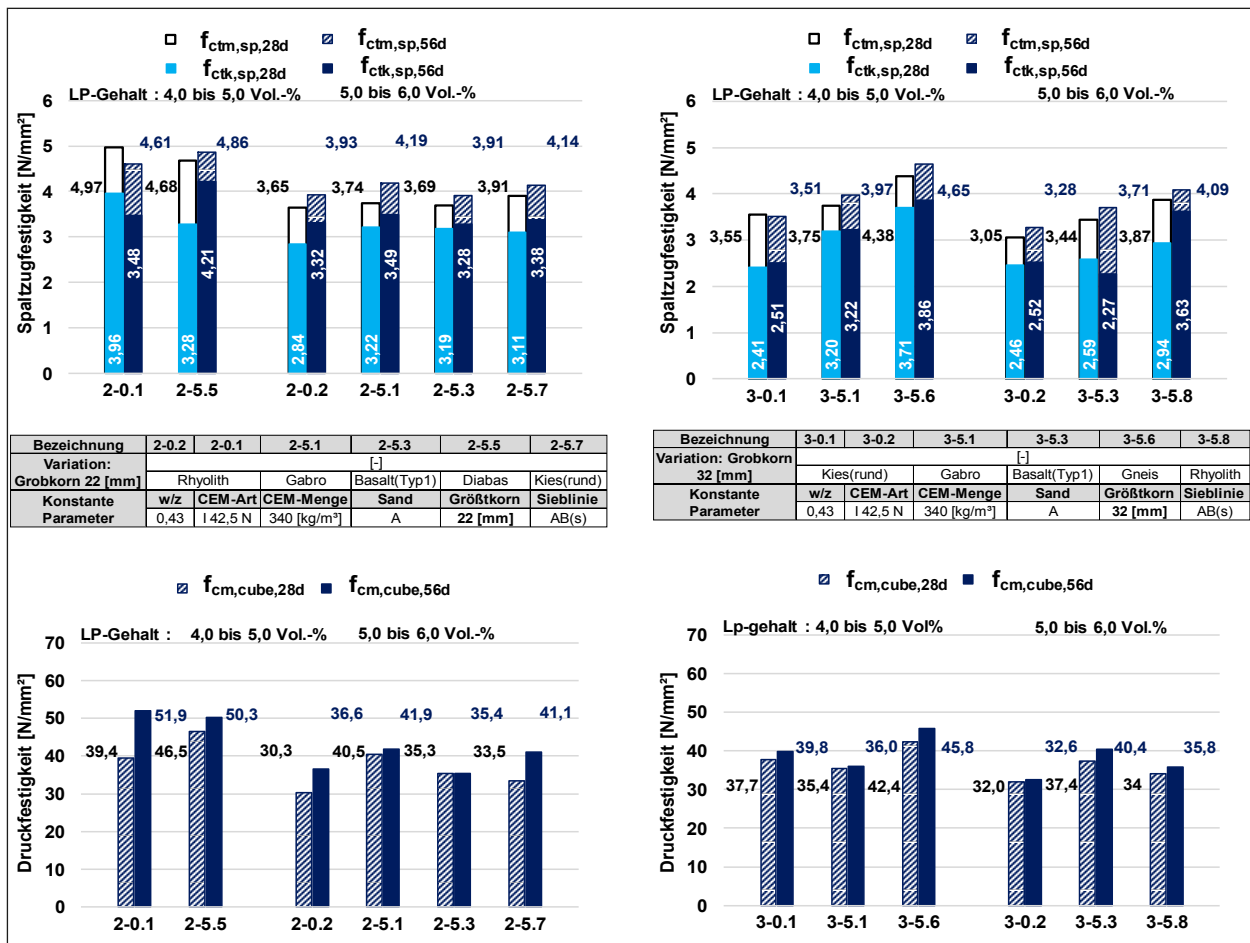


Bild 6-8: Festigkeitsentwicklung – Gesteinsart; Oberbetone (D>8), Größtkorn 22 mm (links); Unterbetone Größtkorn 32 mm (rechts)

zur Ausgangsrezeptur bedeutend höhere Festigkeiten ermittelt worden.

Durch den Einsatz gebrochener Gesteinskörner zeigt sich bei den Unterbetonen die größte Festigkeitssteigerung. Dabei ist die Rezeptur mit dem eingesetzten Gneis und Rhyolith im Hinblick auf eine Dimensionierung der Unterbetone mit 32 mm Größtkorn unter Betrachtung der erreichten Festigkeiten geeignet, in den Arbeitsphasen 2 und 3 weiterhin untersucht zu werden. Betone mit Einsatz von gebrochenem Kies mit 16 mm Größtkorn zeigten ebenso vergleichsweise hohe Festigkeiten. Diabasbeton hatte höhere Festigkeiten im Vergleich zum Beton der Ausgangsrezeptur mit Rhyolith-Splitt und wurde infolgedessen ins fortführende Versuchsprogramm aufgenommen.

Für die Arbeitsphase 2 wurden die verwendeten Gesteinskornarten auf Basis der ermittelten Festigkeiten eingegrenzt. Bei dem Waschbeton wurden außer dem Ausgangsgestein Rhyolith auch Gabbro und Diabas weiterhin untersucht, die Gesteinskornarten Basalt und gebrochener Kies werden ausge-

schlossen. Bei den Oberbetonen (D>8) wurden Untersuchungen mit gebrochenem Kies, Diabas, Gneis und Rhyolith weiterverfolgt. Die groben Gesteinskörnungen Gabbro, runder Kies und Basalt wurden aus dem weiteren Untersuchungsprogramm herausgenommen. Aufgrund der guten Festigkeitsentwicklung wurden die Unterbetone in der Arbeitsphase 2 mit gebrochenem Kies, Diabas und Rhyolith weiterhin untersucht, außerdem verblieben die Rezepturen mit rundem Kieskorn als Ausgangsgrobkorn in der Untersuchungsreihe.

6.2.8 Variationsparameter Größtkorn

Um den Einfluss des Größtkorns bei den Straßenbaubetonen zu quantifizieren, wurden bei den Ober- und Unterbetonen das Größtkorn zwischen 8 und 32 mm variiert. Die vorliegenden Rezepturen wurden der Variationskategorie 6 (Rezeptur-ID: x-6.x, vgl. Tabelle 4-13) zugeordnet. Für Waschbetone ist das Größtkorn auf 8 mm festgelegt, aus diesem Grund erfolgen keine weiteren Variationen. Grafische Darstellungen der Ergebnisse Spaltzug- und

Druckfestigkeiten sind Anhang I, Bild I – 17 und Bild I – 18 zu entnehmen.

Zusammenfassend können folgende generelle Tendenzen festgestellt werden: Bei den Oberbetonen ($D > 8$) zeigen die Betone mit 8 und 32 mm Größtkorn höhere Spaltzugfestigkeiten und vergleichbare Druckfestigkeiten im Vergleich zu der Ausgangsrezeptur mit 22 mm Größtkorn. Besonders deutlich zeigt sich dies bei der Spaltzugfestigkeit an der Rezeptur 2-6.1 mit einem 8 mm Größtkorn. Die niedrigsten Druckfestigkeiten beobachtet man bei der Rezeptur 2-6.2 mit einem 16 mm gebrochenem Rhyolith und 3-6.1 mit 8 mm rundem Kies als Größtkorn. Beide Mischungen weisen die geringsten Festbetonrohndichten innerhalb der Größtkornvariation auf.

Bei den Unterbetonen stellt sich eine vergleichbare Tendenz ein: Die Rezeptur 3-6.2 mit einem 16 mm Größtkorn weist die niedrigsten Festigkeiten auf. Festigkeitssteigernd erweist sich der Austausch einer 32 mm GK-Gesteinskörnung gegen eine 22 oder 8 mm GK-Gesteinskörnung.

Anhand der vorliegenden Untersuchungsergebnisse wurden in der Arbeitsphase 2 die Ober- und Unterbetonrezepturen mit einem 8, 22 und 32 mm Größtkorn weiterhin untersucht.

6.2.9 Variationsparameter Sieblinie

Alle betrachteten modifizierten Rezepturen zur Untersuchung unterschiedlicher Kornabstufungen (Sieblinie) auf die Betonfestigkeiten weisen in der Rezeptur-ID an der zweiten Stelle die Ziffer 7 (vgl. Tabelle 4-13) auf. Grafische Darstellungen der Ergebnisse der Spaltzug- und Druckfestigkeiten sind in Anhang I, Bild I – 19 und Bild I – 20 enthalten.

Bei den Waschbetonen ist ein Einfluss der verschiedenen Sieblinien auf die ermittelten Spaltzugfestigkeiten kaum zu registrieren. Die Druckfestigkeiten der Betone mit der grobkörnigeren stetigen Sieblinie A(s) zeigen höhere Werte und ein Nacherhärtungspotenzial.

Bei den Ober- und Unterbetonen wird eine deutliche Festigkeitsminderung durch den Austausch der stetigen Kornabstufung im Bereich AB(s) mit einer mehlkornärmeren Sieblinie A(s) festgestellt (siehe Rezepturen 2-7.3 und 3-7.3).

Die Rezepturen der Oberbetone mit der feinkörnigeren Sieblinie B(s) und der Sieblinie AB(a) mit

Ausfallkörnung weisen geringfügige Festigkeitssteigerungen auf.

Bei den Unterbetonen bewirkt der Austausch der stetig abgestuften Sieblinie AB(s) mit den Sieblinien A(s), B(s) und AB(a) eine geringfügige Erhöhung der Spaltzugfestigkeiten.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurden in der Arbeitsphase 2 die Sieblinie AB(s) bei allen drei Prüfserien, die Sieblinie B(s) bei den Ober- und Unterbetonen und Sieblinie AB(a) mit Ausfallkörnung bei den Unterbetonen weiterhin untersucht.

6.2.10 Variationsparameter Zusatzmittel

Die vorliegenden Rezepturen der Variationskategorie Zusatzmittel weisen die Rezeptur-ID: x-8.x (vgl. Tabelle 4-13) auf. Grafische Darstellungen der Ergebnisse der Spaltzug- und Druckfestigkeiten sind Anhang I, Bild I – 21 und Bild I – 22 zu entnehmen.

Ausgehend von den vorliegenden Untersuchungsergebnissen ist zur Herstellung der Straßenbetone das verwendete Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether ohne Hinnahme von Festigkeitseinbußen gleichermaßen wie der Betonverflüssiger auf Acrylatbasis einsetzbar.

Bei den fortlaufenden Untersuchungen wurde für Waschbetone der Einsatz des Fließmittels auf Polycarboxylatetherbasis nicht weiterverfolgt. Für Ober- und Unterbetone wurden der Betonverflüssiger auf Acrylatbasis und das Fließmittel auf Polycarboxylatether-Basis weiterhin in die Arbeitsphase 2 eingebunden.

6.3 Bruchflächenanalyse

Nach der Spaltzugprüfung wurden die Bruchflächen zur Beurteilung der Bruchart der gespaltenen Zylinderscheiben fotografisch erfasst. Anhand der erstellten Fotoaufnahmen wurde eine Bruchflächenanalyse durchgeführt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tabelle 6-2 enthalten. Eine ausführliche Analyse ist für jede Rezeptur der Wasch-Ober- und Unterbetone dem Anhang I zu entnehmen, siehe Tabelle I – 56 bis Tabelle I – 61. Die Anzahl der Prüfkörper umfasste 876 untere Zylinderscheiben. Im ersten Schritt wurde die Risserschei-nungsart (vgl. Bild 2-3) der Prüfkörper nach der Spaltzugprüfung ausgewertet. Unterschieden wurde zwischen einem Druck-, Zug- oder Schubbruch. Lies sich die Bruchart nicht eindeutig zuordnen, so

wurde dies als Mischbruch gewertet. In einem weiteren Schritt wurde die Bruchflächenanalyse vorgenommen. Dabei wurden die Charakteristiken der Bruchflächen optisch untersucht. Es wurde grob beurteilt, mit welchem Prozentsatz der Prüffläche ein Grenzflächenbruch um die Gesteinsfläche festzustellen war, oder ob die Brüche durch die Gesteinskörnungen verliefen. Je Mischungszusammensetzung wurden die Bruchflächen von sechs Zylinderscheiben je Prüfaller (28 d, 56 d) untersucht.

Bei der Auswertung der Aufnahmen von Waschbetonunterscheiden nach beiden Prüfzeiträumen ist meistens ein Schubbruch an den Prüfkörpern festzustellen. Die Schubbruchquote liegt bei 96,8 %

(28 d) und 98,4 % (56 d). Bei 0,8 % der Prüfkörper je Prüfzeitraum ist ein Druckbruch zu erkennen. Der Zugbruch wird an 1,6 % (28 d) und an 0,8 % (56 d) der beobachtet. Eine Zuordnung des Bruchbildes ist an 0,8 % aller 28 d-Waschbetonprüfkörper nicht eindeutig gegeben. Bei der optischen Begutachtung der Bruchflächen weisen die Waschbetonprüfkörper überwiegend einen Bruch durch die Gesteinskörnung auf. Bei der Prüfung nach 28 Tagen wird bei 38,1 % der Waschbetone der Grenzflächenbruch beobachtet. Bei der Prüfung nach 56 Tagen sinkt der Anteil um etwa 15 % auf 23,8 %. Beispielhaft sind Bruchflächen der Waschbetone mit unterschiedlichen Bruchflächencharakteristiken in Bild 6-9 zu sehen.

Probenkenndaten			Brucherscheinungsbildarten				Bruchflächenanalyse	
Betonbauweise	Probenalter	Probenanzahl	Druckbruch (D)	Zugbruch (Z)	Schubbruch (S)	Mischbruch	Grenzflächenbruch	Bruch durch die Gesteinskörnung
	[d]		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Waschbeton	28	126	0,8	1,6	96,8	0,8	38,1	61,9
	56	126	0,8	0,8	98,4	0,0	23,8	76,2
Oberbeton (D>8)	28	156	10,9	8,3	78,8	1,9	30,8	69,2
	56	156	9,6	8,3	78,2	3,8	50,0	50,0
Unterbeton	28	156	5,8	14,7	59,0	20,5	76,9	23,1
	56	156	5,1	12,8	61,5	20,5	67,3	32,7

Tab. 6-2: Ergebnisse der Bruchflächenanalyse – Zusammenfassung

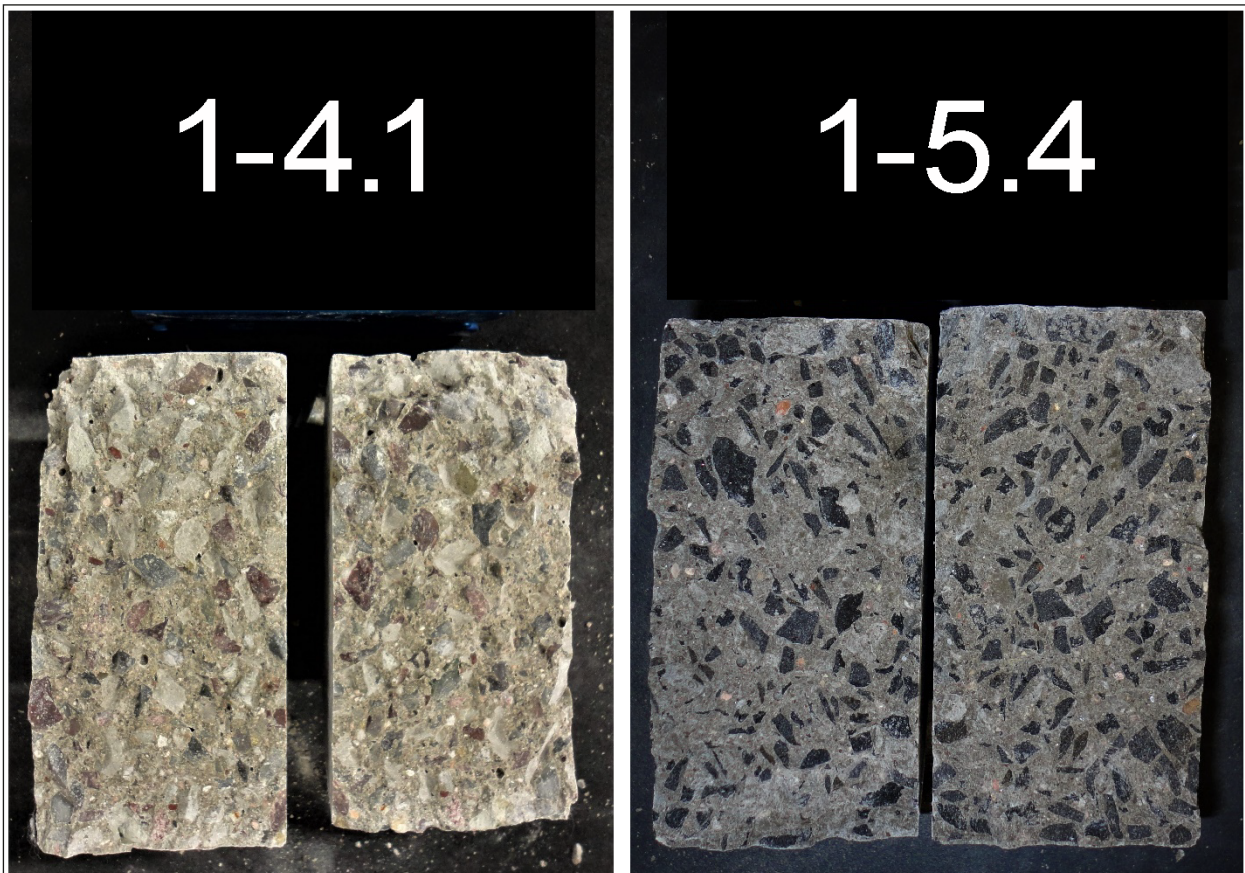


Bild 6-9: Aufnahmen der Waschbetonbruchflächen; überwiegend herausgelöste Gesteinskörnung (links); überwiegend gebrochene Gesteinskörnung (rechts)

Für Oberbetone ($D > 8$) wurde die Spaltzugfestigkeitsprüfung an 156 Oberbetonunterscheiben im Probenalter von 28 und 56 Tagen ermittelt. 78,8 % (28 d) bzw. 78,2 (56 d) der entstandenen Bruchbilder der Spaltzugunterscheiben sind als Schubbrüche kategorisiert. Der Zugbruch wird jeweils bei 8,3 % der Prüfkörper pro Prüfzeitraum festgestellt. Ein Druckbruch als Bruchbild ist mit 10,9 % (28 d) und 9,6 % (56 d) vertreten. Als Mischbruch wird der Bruchverlauf an 1,9 % der Prüfkörper bei der 28 d-Prüfung und an 3,8 % der Prüfkörper bei der 56 d-Prüfung festgestellt. Eine optische Begutachtung der Bruchflächen zeigt zum Prüfzeitpunkt von 28 Tagen etwa 30 % herausgelöste Gesteinskörnung. Bei den übrigen 70 % der gebrochenen Oberbetonspaltzugscheiben ist jeweils ein Bruch durch die Gesteinskörnung zu erkennen.

Im Prüfalter von 56 Tagen ist bei der Hälfte der Oberbetonspaltzugprüfkörper an den Bruchflächen überwiegend ein deutlicher Bruch durch die Gesteinskörnung zu sehen.

Bei den vorliegenden Prüfkörpern der Unterbetone ist ebenfalls der Schubbruch die am häufigsten auf-

getretene Bruchart. Die Schubbruchquote liegt bei 59,0 % (28 d) und 61,5 % (56 d). Weitere 20,5 % der Prüfkörper weisen kein eindeutiges Bruchbild auf und werden als Mischbrüche kategorisiert. Ein Zugbruch wird bei 14,7 % aller Unterbetonunterscheiben bei der 28 d-Spaltzugprüfung erkannt. Bei der 56 d-Untersuchung sinkt der Anteil des Zugbruchs auf 12,8 %. Ein Druckbruch tritt bei 5,8 % (28 d) und bei 5,1 % (56 d) der Unterbetonunterscheiben auf. Bei der Bruchflächenanalyse ist eine deutliche Tendenz zum Grenzflächenbruch zu erkennen. Ein überwiegender Bruch der Gesteinskörnung wird im ersten Prüfzeitraum an 23,1 % aller Bruchoberflächen erkannt. Bei der Untersuchung im zweiten Prüfzeitraum erhöht sich der genannte Anteil um etwa 10 % und liegt somit bei 32,7 %. Beispielhaft sind die Bruchflächen der Unterbetone mit unterschiedlichen Bruchflächencharakteristiken in Bild 6-10 dargestellt.

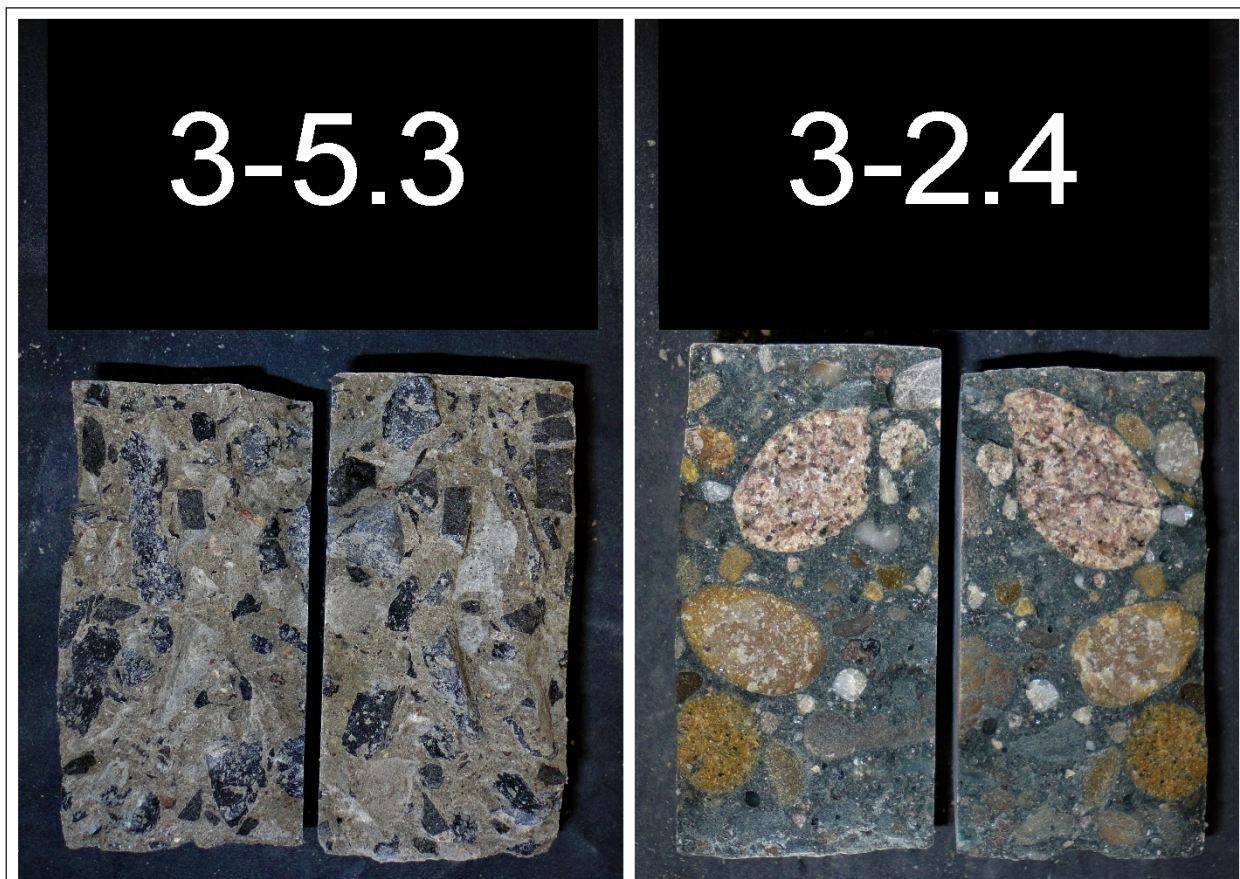


Bild 6-10: Aufnahmen der Unterbetonbruchflächen; überwiegend herausgelöste Gesteinskörnung (links); überwiegend gebrochene Gesteinskörnung (rechts)

7 Untersuchungsergebnisse – Arbeitsphase 2

7.1 Allgemeines

In der Arbeitsphase 2 wurden insgesamt 41 Betone (Anhang II Tabelle II- 1 bis II – 3) hergestellt, Frischbetonkennwerte festgehalten (Anhang II Tabelle II – 4 bis II – 6) und bis zum Probenalter von 91 Tagen Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeitsuntersuchungen durchgeführt.

Zur besseren Interpretationsmöglichkeit der Ergebnisse sind die Frischbetonkennwerte ebenfalls in den Übersichtstabellen der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeitswerte im Anhang II enthalten. In den meisten Fällen werden bei den Biegezug- und Druckfestigkeitsergebnissen zwei Einträge zum jeweiligen Frischbetonkennwert angegeben, welche herstellungsbedingt entstanden sind.

Die Ergebnisse der Biegezug-, Spaltzug- und Druckfestigkeitsprüfungen der Arbeitsphase 2 sind im Anhang II und nachfolgend bei ausgewählten Ergebnissen in grafischer Form zusammengefasst. Die Auswertungen erfolgen in identischer Parameterabfolge wie in der Arbeitsphase 1. Im Anhang II sind für die Spaltzugfestigkeit die Einzelwerte (EW bzw. $f_{ct,sp}$), Mittelwerte (MW bzw. $f_{ctm,sp}$) und die Standardabweichung (s) für 15 bzw. fünf (drei in Einzelfällen) Prüfkörper nach 28 Tagen und jeweils sechs Prüfkörper nach 56 und 91 Tagen unter Berücksichtigung von Ausreißern enthalten. Bei sechs Oberbetonrezepturen wurde die Spaltzugfestigkeitsuntersuchung aufgrund des Lockdowns im Kontext der Corona-Pandemie im Probenalter von 28 Tagen ausgesetzt und erst nach 56 Tagen geprüft. Somit ergab sich hier eine abweichende Prüfkörperanzahl (statt sechs Prüfkörper 21 Prüfkörper). Zusätzlich wurde zu jeder Betonrezeptur die charakteristische Spaltzugfestigkeit ($f_{ctk,sp}$) berechnet. Die Berechnung erfolgte gemäß Anforderung der TP B-StB [N7] an 15 (21*) Einzelprüfkörpern im Alter von 28 (56*) Tagen. Für die Berechnung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit bei den durchgehend wassergelagerten Prüfkörpern im Alter von 28 Tagen wurde als Sicherheitsmaß der Toleranzwert $k = 2,291$ für das 5 %-Quantil bei einer statistischen Sicherheit von $P = 90 \%$ für eine Prüfkörperanzahl $n = 15$ eingesetzt. Für die Ermittlungen der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an weiteren Spaltzugprüfkörpern mit abweichender Lagerungsart oder höherem Prüfkörperalter wurde der Tole-

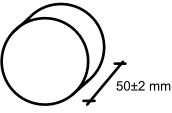
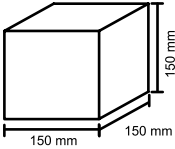
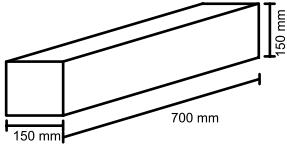
ranzwert $k = 2,950$ für eine Prüfkörperanzahl $n = 6$ verwendet. Für die sechs Oberbetonrezepturen mit 21 Einzelprüfkörpern im Alter von 56 Tagen wurde entsprechend der Toleranzwert von $k = 2,166$ für die Ermittlung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit eingesetzt. Die für die Arbeitsphase 2 relevanten Rechengrundlagen sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst.

Die Druckfestigkeit (f_c) wurde an Würfeln (cube) analog zu Arbeitsphase 1 ermittelt. Einzelwerte (EW bzw. $f_{c,cube}$) und Mittelwerte (MW bzw. $f_{cm,cube}$) der ermittelten Druckfestigkeiten der Betone sind nach den Variationsparametern sortiert dem Anhang II zu entnehmen. Die Bestimmung der Mittelwerte aus drei Einzelwerten erfolgte mit und ohne (Klammerwert) Berücksichtigung möglicher Ausreißer bei den Einzelwerten der jeweiligen Betonrezeptur. Als Ausreißer wurden Werte außerhalb des Bereichs $\bar{x} \pm s$ definiert.

Die Biegezugfestigkeit ($f_{ct,fl}$) wurde an je drei Balken nach 28, 56 und 91 Tagen über die 2-Punkt-Last-Eintragung ermittelt. Einzelwerte (EW bzw. $f_{c,fl}$) und Mittelwerte (MW bzw. $f_{cm,fl}$) der ermittelten Biegezugfestigkeiten der Betone sind sortiert dem Anhang II zu entnehmen. Bei der Bestimmung der Mittelwerte wurden die möglichen Ausreißer in gleicher Weise definiert und wie bei der Ergebnisauswertung der Druckfestigkeiten, in den Ergebnistabellen angegeben.

Die Festbetonrohddichten wurden jeweils als Mittelwert aller Einzelwerte der jeweiligen Mischungszusammensetzung und betrachteten Biegezug-, Spaltzug- bzw. der Druckfestigkeitsuntersuchungen zusammengefasst. Zur weiteren Übersichtlichkeit sind jeder Ergebnistabelle die konstanten Parameter tabellarisch beigefügt.

Eine grafische Zusammenstellung der Ergebnisse beginnt mit der zusammengefassten Darstellung der erreichten Festigkeitswerte unter differenzierten Lagerungsarten A, B und C. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse nach Untersuchungsparameter sortiert ist dem Anhang II zu entnehmen. Dabei handelt es sich um Mittelwerte der Spaltzug- und Druckfestigkeiten im Probenalter von 28 Tagen, sowie um die charakteristischen Werte der Spaltzugfestigkeit zum 28-Tagen-Prüfzeitpunkt ($f_{ctk,sp,28d}$). Die erreichten charakteristischen Spaltzugfestigkeiten zu den späteren Prüfzeitpunkten sind den Ergebnistabellen im Anhang II Tabelle II – 7 bis II – 86 zu entnehmen.

Prüfung	Spaltzugfestigkeit	Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit
1	2	3	4
Probekörper- abmessung	Zylinderscheibe D = 100 mm L = 50±2 mm	Würfel Kantenlängen a=b=c=150 mm	Biegebalken L = 700 mm a=b=150 mm
Probekörper			
Einzelwert [N/mm²]	$f_{ct,sp} = x_i = \frac{2 * F}{\pi * L * D}$	$f_{c,cube} = x_i = \frac{F}{a * b}$	$f_{ct,fl} = x_i = \frac{F * l}{a * b^2}$
Anzahl der Probekörper	n = 15/5/21* (28/56*d); n = 6 (56;91d)	n = 3	n = 3
Mittelwert [N/mm²]	$f_{ctm,sp} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	$f_{cm,cube} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	$f_{cm,fl} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
Standard- abweichung	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$		
Charakteris- tische Spaltzug- festigkeit [N/mm²]	$f_{ctk,sp} = f_{ctm,sp} - k * s$ k = 2,950: Toleranzwert für n=5 bzw. 6 k = 2,291: Toleranzwert für n=15 k = 2,166: Toleranzwert für n=21	-	-
* Bei sechs Mischungszusammensetzungen wurde die 28 Tage-Prüfung der Spaltzugfestigkeit lockdownbedingt auf die 56 Tage-Prüfungstermine verschoben, was zur Anpassung der Probekörperanzahl von 6 auf 21 Proben führte.			

Tab. 7-1: Überblick – Auswertung der Festigkeitsuntersuchungen; Arbeitsphase 2

Anschließend erfolgt eine Darstellung der zeitlichen Festigkeitsentwicklung der untersuchten Betone unter kontinuierlicher Wasserlagerung bis zum jeweiligen Prüfzeitpunkt. Die Diagramme in Bild 7-5 bis Bild 7-13 (bzw. weitere Bilder in dem Anhang II) zeigen Festigkeitsentwicklungen der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeit nach 28, 56 und 91 Tagen. Bei den dargestellten Biegezug- und Druckfestigkeiten handelt es sich um die Mittelwerte errechnet aus drei Einzelwerten unter Eliminierung von Ausreißern. Den Legenden in den Bildern sind die entsprechenden Parametervariationen, die ermittelten Frisch- bzw. Festbetonrohddichten sowie konstant gehaltene Parameter zu entnehmen.

Pro Prüferie wurden zwei Ausgangsbetone mit unterschiedlichen LP-Gehalten hergestellt. In der vor-

liegenden Arbeitsphase 2 wurden die Kategorien LP-Gehalt 4 – 5 Vol.-% und 5 – 6 Vol.-% unterschieden. Um den Einfluss des LP-Gehaltes bei der Auswertung der Ergebnisse in Abhängigkeit von den diversen Variationsparametern zu berücksichtigen, wurden die Ergebnisse der verschiedenen Rezepturen der Prüferien in Abhängigkeit von den LP-Kategorien zusammengefasst und mit der entsprechenden Ausgangsrezeptur verglichen.

7.2 Charakteristische Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen

7.2.1 Allgemeines

Um die charakteristische Spaltzugfestigkeit gemäß TP B-StB [N7] zu ermitteln, wurden für die 28 d-Spaltzugprüfung 15 Unterscheiben aus wassergelagerten Zylindern (\varnothing 100 mm) einer Betoncharge pro Betonrezeptur hergestellt und geprüft. Die somit gewonnenen Einzelwerte wurden einer statistischen Untersuchung unterzogen. Angewandt wurde der Ausreißertest nach Grubs und die Überprüfung der Normalverteilung mithilfe des Anderson-Darling-Tests. Die 28 d-Spaltzugergebnisse aller Wasch- und Unterbetone wiesen eine Normalverteilung auf. Bei den Oberbetonen ($D > 8$) konnte ausschließlich bei der Rezeptur 2-6.1 keine Normalverteilung nach dem Anderson-Darling-Test festgestellt werden. Trotz dieser Erkenntnis wurden diese Ergebnisse bei der weiteren Betrachtung nicht ausgeschlossen.

Im nächsten Schritt wurden mithilfe des Ausreißertests nach Grubs [N21] die Ausreißer unter den Einzelwerten identifiziert und für die grafische Ergebnisdarstellung aus der Mittelwertbildung und der Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit ausgeschlossen. In den Ergebnistabellen im Anhang II wurden die Mittelwerte, die Standardabweichung und die ermittelte charakteristische Spaltzugfestigkeit mit und ohne (Klammerwerte) Berücksichtigung der Ausreißer angegeben.

Abschließend erfolgte die Ermittlung der charakteristischen Spaltzugfestigkeitsmittelwerte gemäß TP B-StB [N7].

7.2.2 Untersuchungsergebnisse

In Bild 7-1 bis Bild 7-3 sind die Ergebnisse der charakteristischen 28 d-Spaltzugfestigkeiten der Wasch-, Unter- und Oberbetone ($D > 8$) in Form von zwei Balkendiagrammen dargestellt. Rechts am Rand der jeweiligen Grafik sind die festgestellten Mittelwerte der 28 d-Spaltzugfestigkeit ($f_{ctm,sp,28d}$) je Betonrezeptur angegeben. In dem jeweiligen Balken links sind die errechneten charakteristische Werte ($f_{ctk,sp,28d}$) dargestellt. Die Ergebnisse der charakteristischen Spaltzugfestigkeiten sind in aufsteigender Reihenfolge sortiert. Als farblich gekennzeichnete vertikale Linien sind die drei Anforderungsgrenzen der charakteristischen Spaltzugfestigkeiten (3,0 bis 3,7 N/mm²) an die Straßenbetone

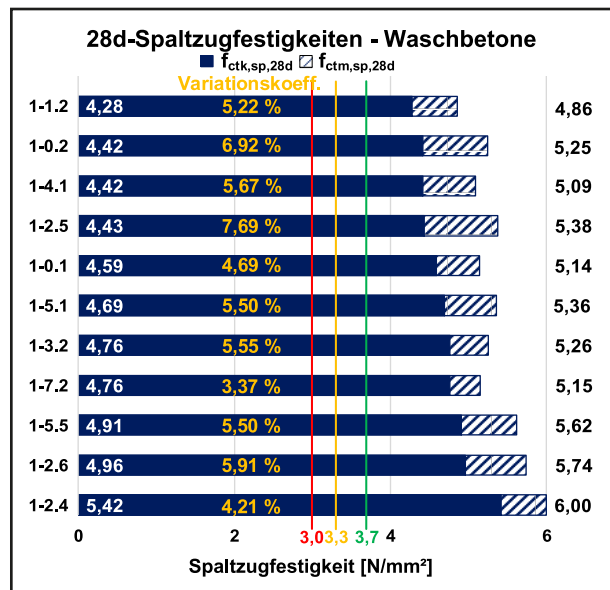


Bild 7-1: Charakteristische Spaltzugfestigkeiten der Waschbetone im Alter von 28 Tagen

in Abhängigkeit der zu erreichenden Straßenbetonklasse gemäß RDO Beton 09 [N3] angegeben. In der Mitte der Balken ist der zugehörige Variationskoeffizient der jeweiligen Mischung in % angegeben.

In Bild 7-1 sind die Spaltzugfestigkeitsergebnisse der Waschbetone dargestellt. Die charakteristischen Spaltzugfestigkeiten der Waschbetone liegen in einer Größenordnung zwischen 4,28 und 5,42 N/mm². Die Höchstwerte unter den Ergebnissen der charakteristischen Spaltzugfestigkeiten werden bei dem Waschbeton 1-5.5 (Variation: Gesteinkornart: Diabas), 1-2.6 (Variation Zementart: CEM III/A 42,5 N) und bei dem Waschbeton 1-2.4 (Variation Zementart: CEM II/B-S 42,5 N) beobachtet.

In Bild 7-2 sind die Ergebnisse der charakteristischen 28/56 d-Spaltzugfestigkeiten der Oberbetone ($D > 8$) in Form eines Balkendiagramms mit zwei sich farblich unterscheidenden Balkengruppen dargestellt. Bei den dunkelblauen Balken handelt es sich um die Ergebnisse der charakteristischen Spaltzugfestigkeit der Oberbetone ($D > 8$) im Probenalter von 28 Tagen. Die hellblauen Balken stellen die Ergebnisse der sechs Oberbetone ($D > 8$) dar, deren Spaltzugfestigkeiten aufgrund des Lockdowns im Kontext der Corona-Pandemie erst im Probenalter von 56 Tagen untersucht wurden.

Die charakteristischen Spaltzugfestigkeiten der Oberbetone ($f_{ctk,sp}$) liegen in einer Größenordnung

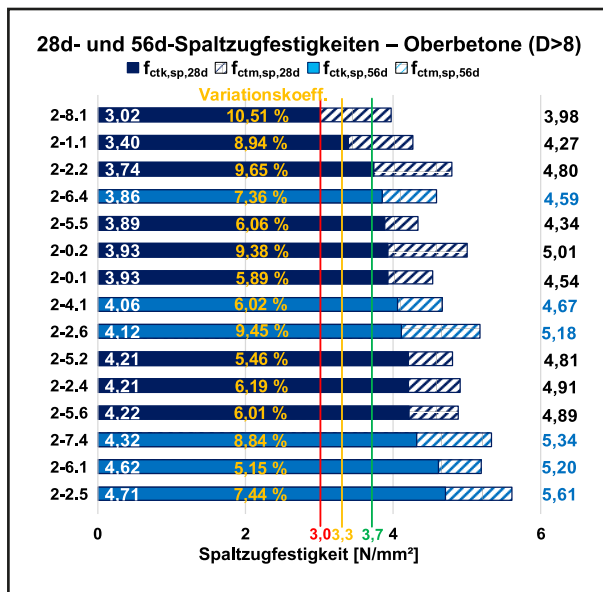


Bild 7-2: Charakteristische Spaltzugfestigkeiten der Oberbetone (D>8) im Alter von 28 (dunkelblau) und 56 (hellblau) Tagen

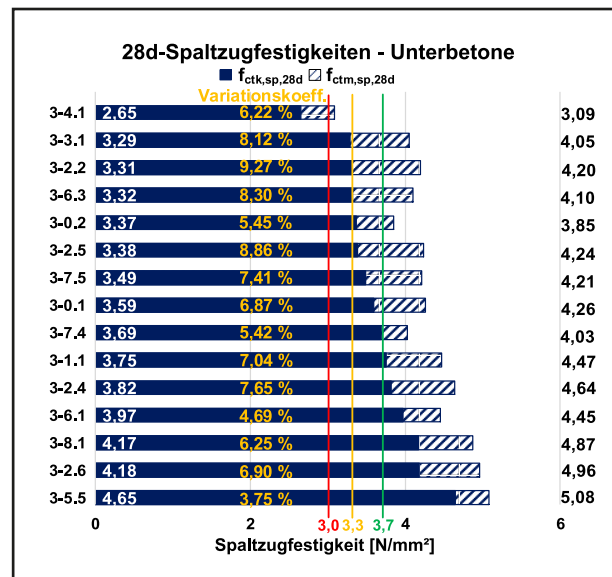


Bild 7-3: Charakteristische Spaltzugfestigkeiten der Unterbetone im Alter von 28 Tagen

zwischen 3,02 und 5,06 N/mm². Alle betrachteten Oberbetone erfüllen die Mindestanforderung der Spaltzugfestigkeitsklasse StC 3,0. Im Gegensatz zum Oberbeton 2-1.1 (Variation: w/z-Wert) mit $f_{ctk,sp,28d} = 3,40$ N/mm² erfüllt der Oberbeton 2-8.1 (Variation: Zusatzmittel) die Anforderungsgrenze der Spaltzugfestigkeitsklasse StC 3,3 nicht mehr. Dreizehn Oberbetone erfüllen die Anforderungsgrenze von 3,7 N/mm². Die Prüfkörper von sechs Oberbetonen wurden allerdings erst im Alter von 56 Tagen geprüft.

Bild 7-3 sind die charakteristischen 28 d-Spaltzugfestigkeiten der Unterbetone zu entnehmen. Diese liegen zwischen 2,65 und 4,65 N/mm². Der 3-4.1-Unterbeton (Variation: Sandart B) erfüllt demnach die Mindestanforderung der Spaltzugfestigkeitsklasse von StC 3,0 mit einem Wert von $f_{ctk,sp,28d} = 2,65$ N/mm² < 3,0 N/mm² nicht. Dreizehn weitere Unterbetone erfüllen die Anforderungsgrenze von 3,3 N/mm², weitere sechs können der Spaltzugfestigkeitsklasse von StC 3,7 zugeordnet werden.

Drei Betonrezepturen 3-8.1 (Variation: Zusatzmittel), 3-2.6 (Variation Zementart: CEM III/A 42,5 N) und 3-5.5 (Variation: Gesteinkornart: Diabas) weisen mit Festigkeitswerten von über 4,0 N/mm² die höchsten char. Spaltzugfestigkeiten bei den Unterbetonen auf.

7.3 Einfluss verschiedener Lagerungsarten der Probekörper auf die Spaltzug- und Druckfestigkeit

Um den Einfluss verschiedener Lagerungsbedingungen auf die Spaltzug- und Druckfestigkeit zu erfassen, wurden Probekörper im Alter von 28 Tagen geprüft.

Im Folgenden werden die Gesamtergebnisse als Tabellenwerte nach Festigkeitsart getrennt dargestellt und diskutiert. Eine ausführliche Diskussion der Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchung unter verschiedenen Lagerungsbedingungen in Form von Balkendiagrammen zu jedem Variationsparameter ist dem Anhang II zu entnehmen. Beispielhaft werden in Bild 7-4 die 28 d-Spaltzugfestigkeiten und Druckfestigkeiten von Unterbetonen bei Variation der Zementart dargestellt. Bei der Rezeptur 3-2.4 wurde die niedrigste Spaltzugfestigkeit mit $f_{ctm,sp,C} = 4,28 \text{ N/mm}^2$ bei Lagerungsart C und der größte Wert mit $f_{ctm,sp,B} = 5,04 \text{ N/mm}^2$ bei Lagerungsart B ermittelt. Die Werte der ständig unter Wasser gelagerten Prüfkörper lagen mit $f_{ctm,sp,C} = 4,64 \text{ N/mm}^2$ dazwischen. Diese Reihenfolge ergab sich auch bei den Druckfestigkeiten $f_{cm,cube}$. Bei drei Rezepturen ergaben sich bei den bis zur Prüfung unter Wasser gelagerten Proben die niedrigsten Spaltzugfestigkeiten.

In den Tabellen 7-2 und 7-3 sind die Ergebnisse der 28 d-Spaltzug- und Druckfestigkeiten aller 41 Labormischungen dargestellt. Die Ergebnisse der ermittelten Festigkeiten werden wie folgt gegenübergestellt. Jeder betrachtete Straßenbeton wurde auf drei verschiedene Arten gelagert, geprüft und die Ergebnisse der Untersuchungen in den Ergebnistabellen nach der Variationsart sortiert dargestellt. Jede Ergebnisgruppe ist zudem mit der entsprechenden Rezeptur-ID der jeweiligen Mischung und der Definition der Variation des betrachteten Ausgangsstoffes ausgestattet. Die Festigkeitsergebnisse der wassergelagerten Proben bis zum Prüfzeitpunkt (Lagerungsart A) werden als Vergleichswert je Betonrezeptur herangezogen und prozentual als 100 % in der Tabelle in jeweiligen Zeilen A dargestellt. Die Ergebnisse der Prüfkörper, welche nach zwei weiteren Lagerungsarten B und C gelagert und anschließend geprüft wurden, werden den Ergebnissen der wassergelagerten Prüfkörper derselben Rezeptur gegenübergestellt und als Prozentsatz zu den Ergebnissen der wassergelagerten Proben in den entsprechenden Zeilen der Tabelle

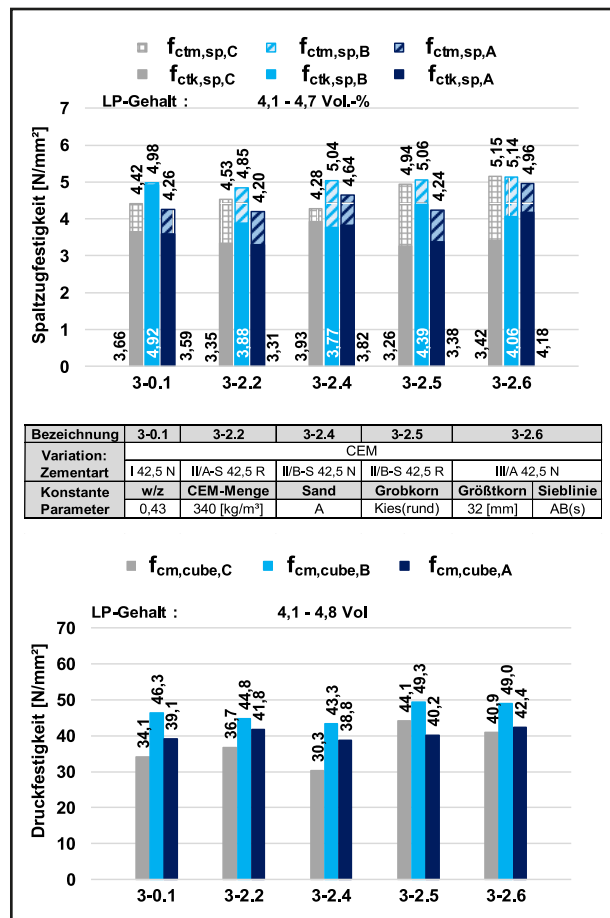


Bild 7-4: 28-Tage Spaltzugfestigkeit und Druckfestigkeit der Unterbetone (Variation Zementart) im Alter von 28 Tagen unter Lagerungsbedingungen nach Ausschalen: A (27 d Wasserlagerung), Lagerung B (13 d Wasserlagerung/14 d Normklima 20/65), Lagerung C (27 d Normklima 20/65)

abgebildet. Zur besseren Übersicht und Orientierung ist die Entwicklung der Festigkeiten durch Einsatz verschiedener Lagerungsszenarien in den Ergebnistabellen farblich differenziert dargestellt. Rot hervorgehobene Spaltzugfestigkeitsergebnisse stellen die Untersuchungsergebnisse der sechs Oberbetonmischungen dar, welche aufgrund des Lockdowns im Kontext der Corona-Pandemie erst zum Probenalter von 56 Tagen statt von 28 Tagen untersucht wurden.

Die Druckfestigkeiten wurden hingegen bei allen betrachteten Oberbetonen im Alter von 28 Tagen ermittelt.

Bei der Analyse der Gesamtergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen bei Variation der verschiedenen Lagerungsbedingungen können folgende Tendenzen festgehalten werden:

Spaltzugfestigkeit		LP-Gehalt		w/z-Wert	Zementart				Z-Menge	Sand	Kornart				Größtkorn		Sieblinie		Z-Mittel
Betonart	Lagerung	[%]		[%]	[%]				[%]	[%]	[%]				[%]		[%]		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	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					AB (s)		
	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					1-7,2		
	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	100	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

Tab. 7-2: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsuntersuchung unter Einfluss verschiedener Lagerungsszenarien

Druckfestigkeit		LP-Gehalt		w/z-Wert	Zementart				Z-Menge	Sand	Kornart				Größtkorn		Sieblinie		Z-Mittel
Betonart	Lagerung	[%]		[%]	[%]				[%]	[%]	[%]				[%]		[%]		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	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					AB (s)		
	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					1-7,2		
	C	90	91	92		87	97	88	92	95	96	97					83		
	A	100	100	100		100	100	100	100	100	100	100					100		
	B	114	104	121		106	102	107	123	118	106	113					108		
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	89	95	94	97	92	93	94		89	90	89	84	94	87	89		69	
	A	100	100	100	100	100	100	100		100	100	100	100	100	100	100		100	
	B	112	119	116	132	128	106	112		127	147	133	114	130	131	117		126	
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	87	96	89	88	78	87	96	87	80		93	84	86	86	92	87	89	
	A	100	100	100	100	100	100	100	100	100		100	100	100	100	100	100	100	
	B	118	128	112	107	112	123	116	109	116		106	114	112	107	112	122	118	

Legende: 2-0,1 - Ergebnisse der 28 d-Untersuchung; 15% HS - Hüttensandanteil; Gab 8 - Gesteinskornart; Größtkorn

Tab. 7-3: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchung unter Einfluss verschiedener Lagerungsszenarien

Bei allen elf Waschbetonen ist unter Einsatz von Lagerungsart C ein Rückgang der Festigkeiten im Vergleich zu den Ergebnissen der unter kontinuierlicher Wasserlagerung gelagerten Proben festzustellen. Die Spaltzugfestigkeiten erreichen hier zwischen ca. 80 und 97 % des jeweiligen Vergleichswerts. Im Durchschnitt wird ein Rückgang der Spaltzugfestigkeiten von 13 % beobachtet. Die stärkste Reduzierung der Spaltzugfestigkeiten wird bei Mischungen mit Sand B (1-4.1), w/z-Wert von 0,43 (1-1.2) oder mit dem CEM III/A (1-2.6) beobachtet. Die Anpassung der Lagerungsart der Proben von A auf C hatte auf die Mischung 1-5.5 (Grobkorn: Diabas) hingegen kaum einen Einfluss.

Eine ähnliche Tendenz ist auch bei den Druckfestigkeiten der Waschbetone ersichtlich. Der Einsatz der Lagerung C ruft eine Druckfestigkeitsreduzierung bis auf einen Wert von ca. 83 % hervor. Im Mittel gehen die Druckfestigkeiten der Waschbetone um ca. 8 % zurück. Der Einfluss ist damit geringer als bei

den Spaltzugprüfkörpern. Die größte Druckfestigkeitsreduzierung von 17 % wird bei Einsatz der Rezeptur 1-7.2 (Sieblinie AB(s)) beobachtet.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass im Vergleich die höchsten Festigkeiten unter Lagerungsart B ermittelt wurden. Bei den Waschbetonen werden 13 % bzw. 23 % höhere Spaltzug- und Druckfestigkeiten im Vergleich zu den Proben, die einer Lagerungsart A ausgesetzt wurden, beobachtet. Im Schnitt liegt der Festigkeitszuwachs der Waschbetone bei 6 % ($f_{ct,sp}$) bzw. 11 % ($f_{c,cube}$).

Bei den Oberbetonen (D>8) wird wie bei den Waschbetonen ein Festigkeitsverlust bei den Prüfkörpern nach der 28-Tage-Lagerung unter den Bedingungen der Lagerungsart C beobachtet. Bei den Spaltzugfestigkeiten der Oberbetone liegt die Restfestigkeit zwischen 77 und 99 % und bei den Druckfestigkeiten zwischen 69 und 95 % im Verhältnis zu den Vergleichswerten der wassergelagerten Prüfkörper.

Die Mittelwerte der Festigkeitsverluste bei der Gesamtzahl der Oberbetone liegen bei 22 % (Spaltzug) bzw. bei 10 % (Druck). Demnach reagieren die Oberbetone ($D > 8$) sensibler auf die Lagerungsbedingungen der Lagerungsart C der Prüfkörper als die Waschbetone. Die stärkste Reduzierung der Spaltzugfestigkeit wurde den vorliegenden Ergebnissen nach bei der Ausgangsrezeptur mit höherem Frischbetonluftporengehalt 2-0.2 und bei der Druckfestigkeit der Rezeptur 2-8.1 (alternativer Zusatzmittel) beobachtet.

Werden die Probekörper der Lagerungsart B bis zum Prüfzeitpunkt ausgesetzt, werden bei Oberbetonen ebenfalls deutliche Unterschiede der Festigkeitsentwicklung im Vergleich zu den wassergelagerten A-Proben beobachtet. Durch die Lagerungsart B wird die Festigkeitsentwicklung begünstigt, so dass zum Probenalter von 28 Tagen bis zu 24 % höhere Spaltzug- und bis zu 33 % höhere Druckfestigkeiten festgestellt werden können. Im Schnitt erhält man bei den Oberbetonen ($D > 8$) durch die Lagerungsart B bei den Spaltzugfestigkeiten ca. 15 % und bei den Würfeldruckfestigkeiten ca. 23 % höhere Festigkeiten.

Bei den 56 d-Untersuchungen der sechs Oberbetone ist festzustellen, dass die Prüfkörper unter Wasserlagerung annähernd die gleichen Spaltzugfestigkeiten wie die Prüfkörper unter Lagerungsart B entwickeln (101 %). In der Regel führt die Lagerungsart B zu den höchsten 28 d-Festigkeitswerten. Die Lagerungsart C führt ebenfalls im Probenalter von 56 d zu den geringsten Spaltzugfestigkeiten von rund 71 %.

Eine andere Festigkeitsentwicklung unter den Lagerungsbedingungen von C wird bei den Spaltzugfestigkeiten der Unterbetone beobachtet. Nur bei 50 % der Unterbetonmischungen werden die niedrigsten Spaltzugfestigkeiten beobachtet. Im Schnitt werden hierbei um 7 % geringere Spaltzugfestigkeiten festgestellt. Die Spaltzugprüfkörper weiterer 50 % der Unterbetonrezepturen erweisen sich als bis zu 15 % fester als die kontinuierlich wassergelagerten Prüfkörper. Betroffene Unterbetone weisen überwiegend eine Variation des angepassten Luftporengehaltes, der Zementart und der Sieblinie auf.

Die Lagerungsart B erweist sich bei den Unterbetonen ebenfalls als festigkeitsfördernd. Im Vergleich mit den wassergelagerten A-Prüfkörper werden bei den vorliegenden Prüfkörpern zwischen 4 und 32 % höhere Spaltzugfestigkeiten beobachtet. Der Mittel-

wert des Festigkeitsanstiegs durch die Wahl der Lagerungsart B statt A liegt hierbei bei 17 %. Höchstwerte werden bei den Unterbetonen mit angepasstem Größtkorn und Sieblinie beobachtet.

Die Druckfestigkeit der Unterbetone entwickelt sich hingegen unter Abhängigkeit des jeweiligen Lagerungsszenarios ähnlich wie die der Wasch- oder Oberbetone. Die Festigkeitshöchstwerte werden auch hier unter Lagerungsart B festgestellt. Es ergaben sich Steigerungen der Würfeldruckfestigkeiten von 7 bis 28 %. Im Schnitt werden um 15 % höhere Druckfestigkeiten bei den B-Würfeln beobachtet.

Die Lagerung C führt zu einer Reduktion der Druckfestigkeiten im Vergleich zu den wassergelagerten A-Probekörpern. Im Schnitt bedeutet das eine niedrigere Druckfestigkeit auf 88 %.

Zusammenfassend können folgende generelle Erkenntnisse aus der vorliegenden Festigkeitsuntersuchung unter dem Einfluss verschiedener Lagerungsbedingungen gezogen werden: Werden die Probekörper nach dem Ausschalen kontinuierlich unter Normklimabedingungen 20/65 bis zum Prüfzeitpunkt gelagert, so werden bei den betrachteten Straßenbetonen überwiegend bis zu ca. 30 % geringere Festigkeitskennwerte als bei den wassergelagerten A Proben festgestellt. Am stärksten werden die Oberbetone ($D > 8$) durch die Lagerungsart C beeinflusst, wobei der Mittelwert der Festigkeitsreduktion bei 10 % ($f_{ct,sp}$) bzw. 22 % ($f_{c,cube}$) liegt.

Wird statt kontinuierlicher Wasserlagerung die Lagerungsart B eingesetzt, wirkt sich das günstig auf das Prüfergebnis aus. Bei dem überwiegenden Anteil der untersuchten Betone wird eine deutliche Festigkeitssteigerung beobachtet. Bei Waschbetonen liegt der Festigkeitsanstieg im Schnitt bei 6 % ($f_{ct,sp}$) bzw. 11 % ($f_{c,cube}$), bei Oberbetonen bei 15 % ($f_{ct,sp}$) bzw. 23 % ($f_{c,cube}$) und bei den Unterbetonen bei 17 % ($f_{ct,sp}$) bzw. 15 % ($f_{c,cube}$).

7.4 Festigkeitsentwicklung der Probekörper bis zum Probenalter von 91 Tagen

7.4.1 Allgemeines

Der zweite Teil der Zielsetzung der Arbeitsphase 2 beinhaltet eine umfangreiche Festigkeitsuntersuchung der ausgewählten 41 Laborbetone bei kontinuierlicher Wasserlagerung der Proben bis zum

Prüfzeitpunkt. Untersucht wurden die Spaltzug-, Druck-, und Biegezugfestigkeiten der Probekörper nach 28, 56 und 91 Tagen. Anhang II enthält, nach Variationsparameter sortiert, für alle Prüfserien grafische Darstellungen und Erläuterungen zu den Ergebnissen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für alle Prüfserien je Variationsparameter zusammengefasst, die Grafiken hingegen (siehe z. B. Bild 7-5) immer nur für einen Fahrbahnbeton beispielhaft eingefügt und erläutert. Dabei wird mithilfe einer tabellari-

schen Zusammenfassung ein Festigkeitsvergleich zur Beurteilung des Einflusses des betrachteten Variationsparameters und eine Aussage über die Nacherhärtung nach 28 d getroffen, vgl. z. B. Tabelle 7-4. Beim Festigkeitsvergleich werden je Prüffart (Spaltzug-, Biegezug-, Druckfestigkeit) die Festigkeitswerte der Betone der Ausgangsrezepturen angegeben und Vergleichswerte dazu prozentual in Bezug gesetzt. Bei der Analyse der Nacherhärtung wird die Festigkeitsänderung prozentual von Prüftermin (28 d – 56 d) zu Prüftermin (56 d – 91 d) angegeben.

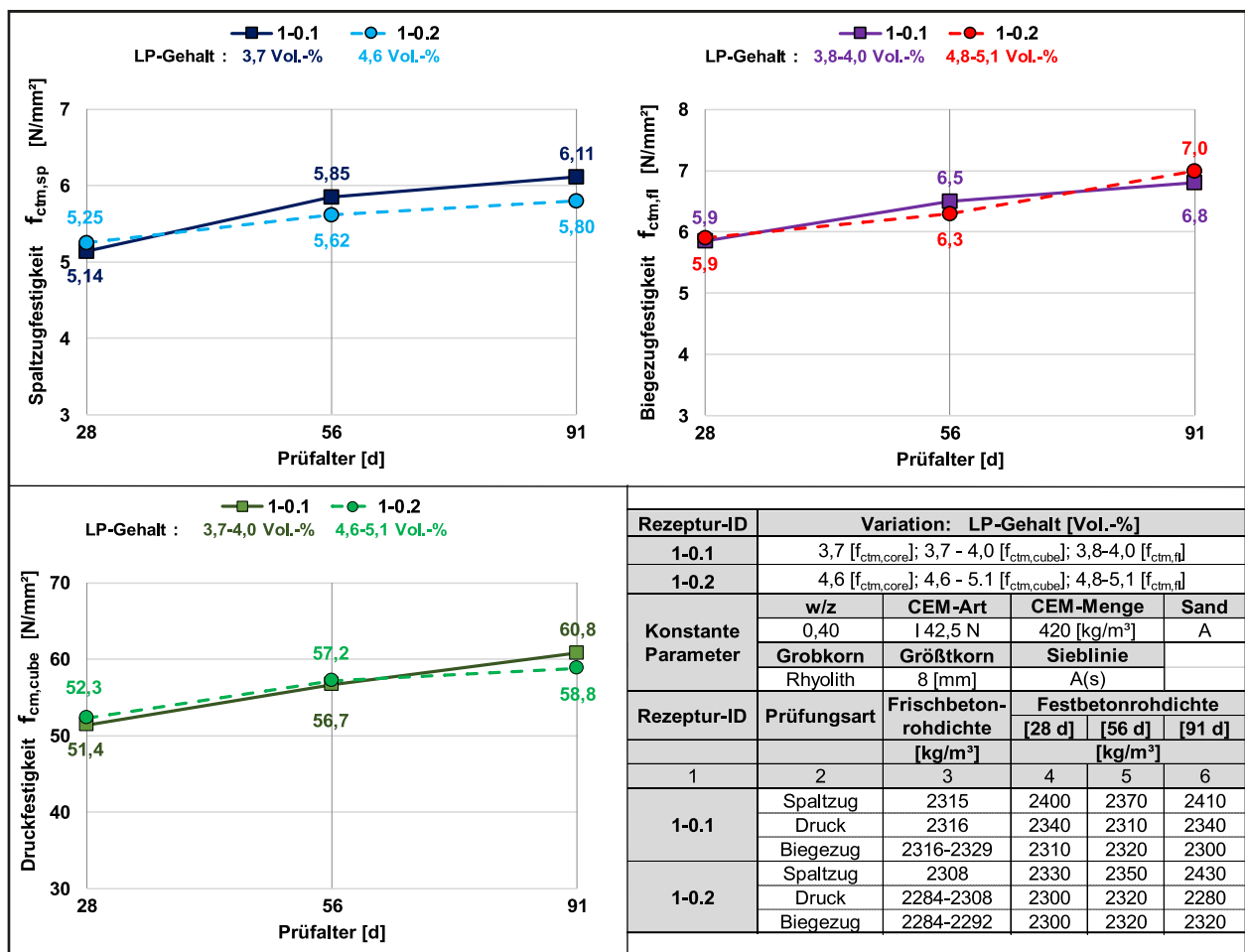


Bild 7-5: Festigkeitsentwicklung – Waschbetone, Variationsparameter Luftporengehalt

Variation	Waschbeton							Oberbeton (D>8)					Unterbeton					
	Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:	
		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Spaltzugfestigkeit	1-0.1	5,14*	5,85*	6,11*	14%	19%	2-0.1	4,54*	4,75*	5,73*	5%	26%	3-0.1	4,26*	4,56*	4,77*	7%	12%
	1-0.2	2%	-4%	-5%	7%	10%	2-0.2	10%	5%	-14%	-1%	-2%	3-0.2	-10%	-12%	-16%	4%	5%
Druckfestigkeit	1-0.1	51,4*	56,7*	60,8*	10%	18%	2-0.1	40,7*	46,4*	51,6*	14%	27%	3-0.1	39,1*	42,7*	46,0*	9%	18%
	1-0.2	2%	1%	-3%	9%	12%	2-0.2	-13%	-12%	-4%	15%	40%	3-0.2	-13%	-10%	-12%	12%	18%
Biegezugfestigkeit	1-0.1	5,9*	6,5*	6,8*	11%	16%	2-0.1	5,0*	5,6*	5,6*	12%	12%	3-0.1	3,9*	4,4*	5,2*	13%	33%
	1-0.2	1%	-3%	3%	7%	19%	2-0.2	-14%	-13%	-9%	14%	19%	3-0.2	-8%	-2%	-12%	19%	28%

* in [N/mm²]

Tab. 7-4: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Luftporengehalt

7.4.2 Variationsparameter Luftporengehalt

Abweichend von der Vorgehensweise in der Arbeitsphase 1 wurde die Ausgangsrezeptur der jeweiligen Fahrbahndeckenbetonart (Prüfserie) in der vorliegenden Untersuchungsreihe mit ausschließlich zwei verschiedenen Luftporengehalten betoniert, um diese anschließend den zwei anzustrebenden Luftporengehaltskategorien zuzuordnen. Somit konnte in den meisten Fällen der Einflussfaktor des Luftporengehalts auf die ermittelten Festigkeiten berücksichtigt werden.

Beispielhaft wird für Waschbetone die zeitliche Festigkeitsentwicklung der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeit bis zum Prüfzeitraum von 91 Tagen in Abhängigkeit vom variierenden Luftporengehalt in Bild 7-5 dargestellt. Die Grafiken für Oberbetone ($D > 8$) enthält Anhang II Bild II – 4, für Unterbetone Anhang II Bild II – 6.

Bei den Waschbetonen kann ein geringfügiger Einfluss des Luftporengehaltes auf die Spaltzugfestigkeit nach 91 Tagen festgestellt werden. Die Spaltzugfestigkeit liegt dabei um 5 % höher. Bei der Biegezug- und Druckfestigkeit stellen sich bis zu 3 % veränderte Werte ein; sie bewegen sich demzufolge im Toleranzbereich. Bei allen Waschbetonen der drei Prüfarten findet nach 28 Tagen eine Nacherhärtung bis zum Prüfalalter von 91 Tagen um ca. 10 – 19 % statt, vgl. Tabelle 7-4.

Bei den Oberbetonen ($D > 8$) (s. Anhang II, Bild II – 4) stellt sich aufgrund einer Reduzierung des Frischbetonluftporengehalts um 0,6 % eine Erhöhung der Spaltzugfestigkeit um 14 % erst bei der 91 d-Prüfung ein. Bei der Betrachtung der Druck- und Biegezugfestigkeitsentwicklung ist ein Einfluss innerhalb der gesamten Prüfperiode festzustellen, wobei mit höherem Probenalter der Einfluss der Frischbetonluftporen nachlässt. Die maximale Festigkeitssteigerung bei ca. 0,6 – 1 Vol.-% Reduzierung des LP-Gehalts liegt bei den betrachteten Oberbetonen ($D > 8$) nach 91 Tagen je Prüfart bei ca. 14 % ($f_{ctm,sp}$), 4 % ($f_{cm,cube}$), und ca. 19 % ($f_{ctm,fl}$). Bei allen Oberbetonen ($D > 8$) findet nach 28 Tagen mit Ausnahme bei der Rezeptur 2-0.2 unabhängig von der Prüfart eine Nacherhärtung bis zum Prüfalalter von 91 Tagen um ca. 12 – 40 % statt, vgl. Tabelle 7-4.

Bei den Unterbetonen (s. Anhang II, Bild II – 6) ist bei einer Reduzierung des Frischbetonluftporengehalts um ca. 0,7 – 0,9 Vol.-% bei jedem Prüfalalter (28 d, 56 d, 91 d) und bei jeder Prüfart eine Festigkeitssteigerung festzustellen. Sie liegt nach 91 Tagen

zwischen 12 % und 16 %. Bei allen Unterbetonen unabhängig von der Prüfart findet nach 28 Tagen bis zum Prüfalalter von 91 Tagen eine Nacherhärtung um ca. 5 – 33 % statt, vgl. Tabelle 7-4.

7.4.3 Variationsparameter w/z-Wert

In der Arbeitsphase 2 wurden bei allen Prüfserien zwischen den w/z-Werten 0,40 und 0,43 variiert. Somit wurde zu der jeweiligen Ausgangsmischung stets ein weiterer Beton mit abweichendem w/z-Wert hergestellt.

Beispielhaft wird für Unterbetone die zeitliche Festigkeitsentwicklung der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeit bis zum Prüfzeitraum von 91 Tagen in Abhängigkeit des variierenden w/z-Wertes in Bild 7-6 dargestellt. Die Grafiken für Waschbetone enthält Anhang II Bild II – 8, für Oberbetone ($D > 8$) Anhang II Bild II – 10.

Bei den Unterbetonen wirkt sich eine Reduzierung des w/z-Wertes von 0,43 auf 0,40 bei jedem Prüfalalter (28 d, 56 d, 91 d) und jeder Prüfart festigkeitssteigernd aus. Sie liegt nach 91 Tagen zwischen 13 % und 20 %. Die Unterbetone härten unabhängig von der Prüfart nach 28 Tagen bis zum Prüfalalter von 91 Tagen um ca. 5 – 28 % nach, vgl. Tabelle 7-5.

Bei den Waschbetonen (s. Anhang II, Bild II – 8) führt eine Reduzierung des w/z-Wertes von 0,43 auf 0,40 bei der Spaltzugfestigkeit nach 91 d zu keiner Festigkeitssteigerung. Bei der Biegezug- und Druckfestigkeit stellen sich bis zu 14 % höhere Werte ein. Die Waschbetone härten unabhängig von der Prüfart nach 28 Tagen bis zum Prüfalalter von 91 Tagen um ca. 10 – 69 % nach, vgl. Tabelle 7-5.

Bei den Oberbetonen ($D > 8$) (s. Anhang II, Bild II – 10) stellt sich aufgrund einer Reduzierung des w/z-Wertes von 0,43 auf 0,40 atypisch keine Erhöhung der Spaltzugfestigkeit und der Druckfestigkeit ein. Bei der Biegezugfestigkeitsentwicklung ist nach 91 Tagen eine Festigkeitssteigerung um 6 % festzustellen. Bei den Oberbetonen findet unabhängig von der Prüfart nach 28 Tagen mit Ausnahme bei der Rezeptur 2-0.2 eine Nacherhärtung bis zum Prüfalalter von 91 Tagen um ca. 13 – 46 % statt, vgl. Tabelle 7-5.

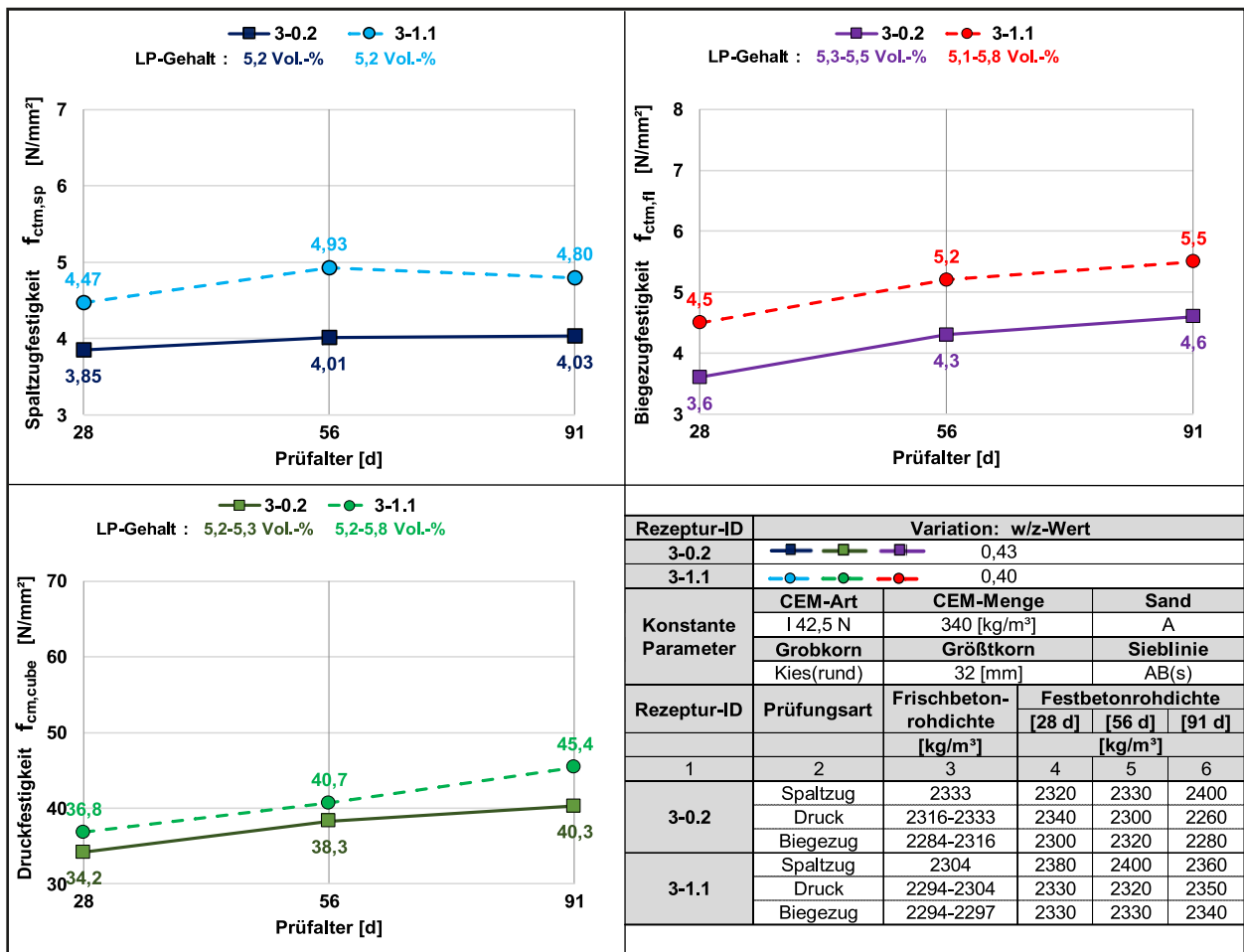


Bild 7-6: Festigkeitsentwicklung – Unterbetone, Variationsparameter Wasserzementwert

Variation	Waschbeton						Oberbeton (D>8)						Unterbeton					
	Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:	
		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Spaltzugfestigkeit	1-1.2	4,86*	5,62*	5,88*	16%	21%	2-0.2	5,01*	4,97*	4,90*	-1%	-2%	3-0.2	3,85*	4,01*	4,03*	4%	5%
	1-0.2	8%	0%	-1%	7%	10%	2-1.1	-15%	-3%	-1%	13%	13%	3-1.1	16%	23%	19%	10%	7%
Druckfestigkeit	1-1.2	42,6*	45,7*	51,8*	7%	22%	2-0.2	35,4*	40,8*	49,4*	15%	40%	3-0.2	34,2*	38,3*	40,3*	12%	18%
	1-0.2	23%	25%	14%	9%	12%	2-1.1	-2%	1%	-4%	19%	37%	3-1.1	8%	6%	13%	11%	23%
Biegezugfestigkeit	1-1.2	3,9*	4,8*	6,6*	23%	69%	2-0.2	4,3*	4,9*	5,1*	14%	19%	3-0.2	3,6*	4,3*	4,6*	19%	28%
	1-0.2	51%	31%	6%	7%	19%	2-1.1	-14%	0%	6%	32%	46%	3-1.1	25%	21%	20%	16%	22%

* in [N/mm²]

Tab. 7-5: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Wasserzementwert

7.4.4 Variationsparameter Zementart

Zur weiterführenden Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Zemente auf die Festigkeitsentwicklung der Straßenbetone wurden in der Arbeitsphase 2 bis zu fünf Zemente aus der Arbeitsphase 1 weiter betrachtet. Es wurden die Zemente CEM I, CEM II/A-S, CEM II/B-S und CEM III/A mit den Festigkeitsklassen, 42,5 N und 42,5 R eingesetzt. Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über die Zement-eigenschaften. Bei den Waschbetonen kamen vier und bei den Unter- und Oberbetonen fünf verschiedene Zemente zum Einsatz.

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 7-7 dargestellt. Die Grafiken für Waschbetone enthält Anhang II Bild II – 14, für Unterbetone Anhang II Bild II – 18.

Beim Einsatz der fünf unterschiedlichen Zemente in den Oberbetonrezepturen (D>8) weisen die Betone mit CEM II/B-S 42,5 N und CEM II/B-S 42,5 R (Rezeptur 2-2.4 und 2-2.5) beim Vergleich der Festigkeiten entweder gleich hohe oder höhere Festigkeiten auf. Die Spaltzugfestigkeit stieg durch den Einsatz von CEM II/B-S 42,5 N (Rezeptur 2-2.4) um bis zu 10 %. Durch den Einsatz von CEM II/B-S 42,5 R (Rezeptur 2-2.5) wird eine Festigkeitssteigerung von bis zu 8 % bei der Druckfestigkeit beobachtet.

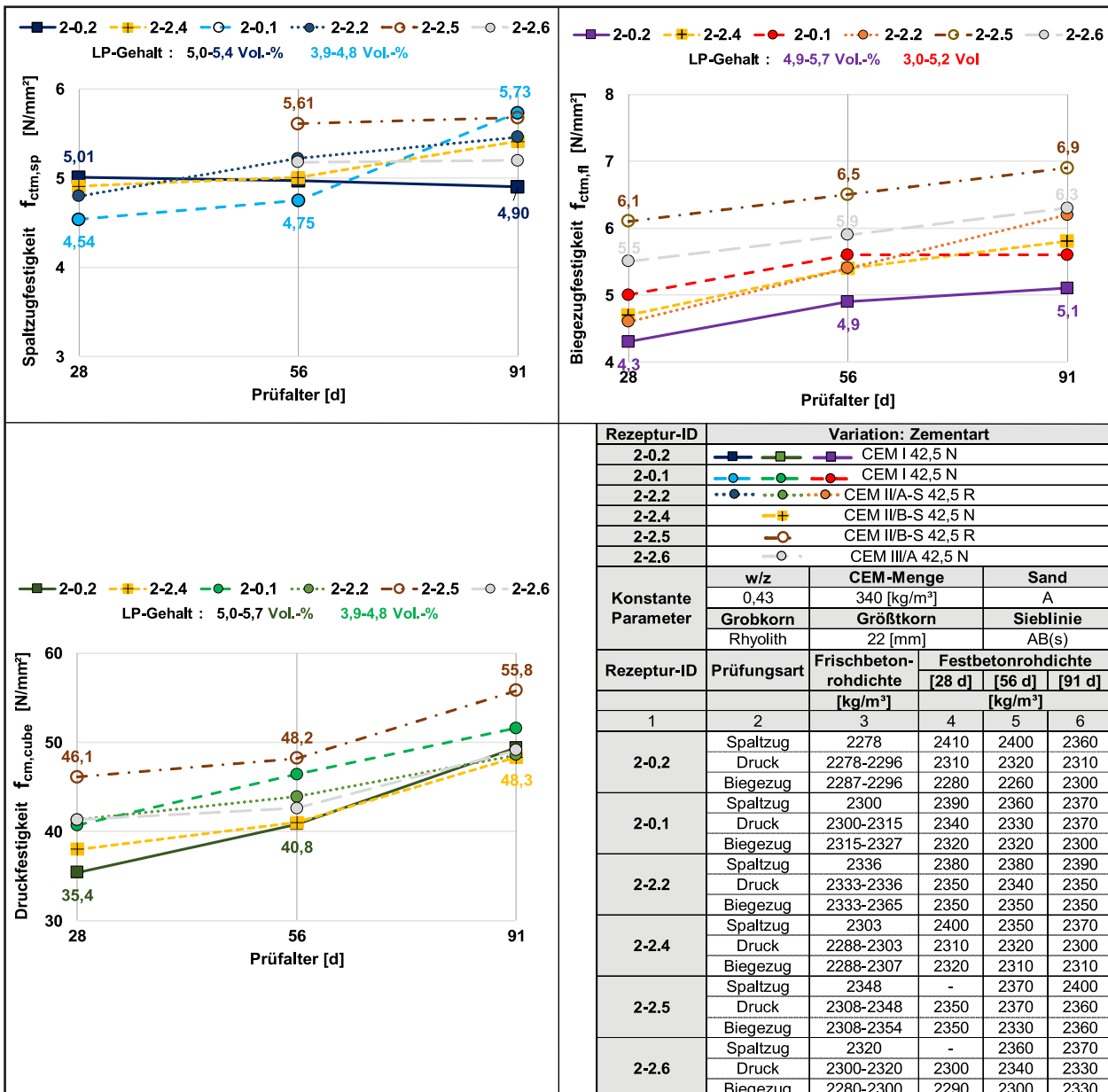


Bild 7-7: Festigkeitsentwicklung – Oberbetone (D>8), Variationsparameter Zementart

Variation	Waschbeton						Oberbeton (D>8)						Unterbeton						
	Zementart	Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:	
			28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d
Prüfart																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Spaltzugfestigkeit	1-0.1	5,14*	5,85*	6,11*	14%	19%	2-0.2	5,01*	4,97*	4,90*	-1%	-2%	3-0.1	4,26*	4,56*	4,77*	7%	12%	
	1-2.5	5%	-3%	-3%	5%	11%	2-2.4	-2%	1%	10%	2%	10%	3-2.4	9%	4%	13%	2%	16%	
	1-0.2	5,25*	5,62*	5,80*	7%	10%	2-0.1	4,54*	4,75*	5,73*	5%	26%	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	2-2.2	6%	10%	-5%	9%	14%	3-2.2	-1%	-2%	-4%	6%	10%	
	1-2.4	14%	21%	17%	14%	13%	2-2.5	-	18%	-1%	100%	-	3-2.5	0%	-6%	-4%	1%	8%	
1-2.6	9%	11%	12%	9%	13%	2-2.6	-	9%	-9%	100%	-	3-2.6	16%	12%	11%	3%	7%		
Druckfestigkeit	1-0.1	51,4*	56,7*	60,8*	10%	18%	2-0.2	35,4*	40,8*	49,4*	15%	40%	3-0.1	39,1*	42,7*	46,0*	9%	18%	
	1-2.5	9%	0%	8%	1%	17%	2-2.4	7%	0%	-2%	8%	27%	3-2.4	-1%	-3%	-2%	7%	16%	
	1-0.2	52,3*	57,2*	58,8*	9%	12%	2-0.1	40,7*	46,4*	51,6*	14%	27%	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	2-2.2	1%	-5%	-6%	6%	18%	3-2.2	7%	2%	7%	4%	18%	
	1-2.4	8%	7%	4%	9%	9%	2-2.5	13%	4%	8%	5%	21%	3-2.5	3%	3%	6%	9%	21%	
1-2.6	-7%	-7%	3%	9%	24%	2-2.6	1%	-8%	-5%	3%	19%	3-2.6	8%	16%	11%	17%	21%		
Biegezugfestigkeit	1-0.1	5,9*	6,5*	6,8*	11%	16%	2-0.2	4,3*	4,9*	5,1*	14%	19%	3-0.1	3,9*	4,4*	5,2*	13%	33%	
	1-2.5	30%	25%	24%	7%	11%	2-2.4	9%	10%	14%	15%	23%	3-2.4	46%	55%	46%	19%	33%	
	1-0.2	5,9*	6,3*	7,0*	7%	19%	2-0.1	5,0*	5,6*	5,6*	12%	12%	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	2-2.2	-8%	-4%	11%	17%	35%	3-2.2	21%	25%	12%	17%	23%	
	1-2.4	-8%	24%	19%	44%	54%	2-2.5	22%	16%	23%	7%	13%	3-2.5	54%	48%	25%	8%	8%	
1-2.6	-8%	-5%	-10%	11%	17%	2-2.6	10%	5%	13%	7%	15%	3-2.6	54%	43%	29%	5%	12%		

* in [N/mm²]

Tab. 7-6: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Zementart

Bei der Biegezuguntersuchung zeigen die Betone mit Ausgangsrezepturen grundsätzlich die geringste Festigkeit. Die hüttensandreichsten Oberbetone 2-2.5 und 2-2.6 weisen um bis zu 23 % höhere Biegezugfestigkeiten im Vergleich zur Ausgangsrezeptur auf. Bei allen Oberbetonen (D>8) findet nach 28 Tagen unabhängig von der Prüfart mit Ausnahme bei der Rezeptur 2-0.2 eine Nacherhärtung bis zum Prüfalter von 91 Tagen um ca. 10 – 40 % statt, vgl. Tabelle 7-6.

Bei den Waschbetonen (s. Anhang II, Bild II – 14) liegen die Festigkeiten bei der Verwendung von vier verschiedenen Zementen wiederholt auf einem sehr hohen Niveau (91 d: $f_{ctm,sp} \geq 5,80$ N/mm², $f_{cm,cube} \geq 58,8$ N/mm² und $f_{ctm,fl} \geq 6,3$ N/mm²). Bei der Spaltzugfestigkeitsuntersuchung werden die höchsten Festigkeitswerte mit Zementen CEM II/B-S 42,5 N und CEM III/A 42,5 N mit hohem Hüttensandgehalt (Rezepturen 1-2.4 und 1-2.6) festgehalten. Bei den Druck- und Biegezugfestigkeitsuntersuchungen zeigt der Waschbeton 1-2.5 mit Zement CEM II/B-S 42,5 R nach 91 Tagen im Vergleich zu den Ausgangsmischungen höhere Werte ($f_{cm,cube}$: +8 %, $f_{ctm,fl}$: +24 %). Bei allen Waschbetonen findet nach 28 Tagen bei allen Prüfarten eine Nacherhärtung bis zum Prüfalter von 91 Tagen um ca. 9 – 54 % statt, vgl. Tabelle 7-6.

Bei der Festigkeitsentwicklung der Unterbetone (s. Anhang II, Bild II – 18) bis zu 91 Tagen sind wiederum grundsätzlich höhere Festigkeiten bei den

Zementen mit höheren Hüttensandgehalten im Vergleich zu den verwendeten Portlandzementen zu beobachten. Bei den Spaltzugfestigkeitsprüfungen zeigen die Unterbetone 3-2.4 (CEM II/B-S 42,5 N) und 3-2.6 (CEM III/A-42,5 N) bis zu 13 % höhere Spaltzugfestigkeiten im Vergleich zur Ausgangsmischung. Die Höchstwerte der Druckfestigkeiten sind ebenfalls bei der Rezeptur 3-2.6 zu verzeichnen. Bei der Biegezugfestigkeitsprüfung weisen alle modifizierten Unterbetone höhere Festigkeiten im Vergleich zur Ausgangsrezeptur auf. Durch den Einsatz von CEM II/B-S 42,5 N (Rezeptur 3-2.4) ist ein Biegezugmaximum von 7,6 N/mm² festzustellen. Bei allen Unterbetonen findet nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüfart eine Nacherhärtung um ca. 7 – 33 % statt, vgl. Tabelle 7-6.

7.4.5 Variationsparameter Zementmenge

In der zweiten Arbeitsphase wurde der Zementgehalt ausschließlich bei der Fahrbahndeckenbetonart Waschbeton von 420 auf 450 kg/m³ und beim Unterbeton von 340 auf 360 kg/m³ erhöht.

Beispielhaft wird für Waschbetone die zeitliche Festigkeitsentwicklung der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeit bis zum Prüfzeitraum von 91 Tagen in Abhängigkeit von der variierenden Zementmenge in Bild 7-8 dargestellt. Die Grafik für Unterbetone ist Anhang II Bild II – 22 zu entnehmen.

Bei den Waschbetonen führt eine Erhöhung der Zementmenge von 420 auf 450 kg/m³ bei der Spaltzugfestigkeit nach 91 d zu einer Festigkeitssteigerung um 6 %. Bei der Druckfestigkeit stellen sich keine höheren Werte ein. Bei der Biegezugfestigkeit wird mit 7,1 N/mm² der Vergleichswert (7,0 N/mm²) minimal überschritten. Die Waschbetone härten nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüfarm um ca. 10 – 54 % nach, vgl. Tabelle 7-7.

Bei den Unterbetonen wirkt sich eine Erhöhung der Zementmenge von 340 auf 360 kg/m³ bei jedem Prüfalter (28 d, 56 d, 91 d) und jeder Prüfarm festigkeitssteigernd aus. Sie liegt nach 91 Tagen zwischen 5 % und 11 %. Die Unterbetone härten nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüfarm um ca. 5 – 28 % nach, vgl. Tabelle 7-7.

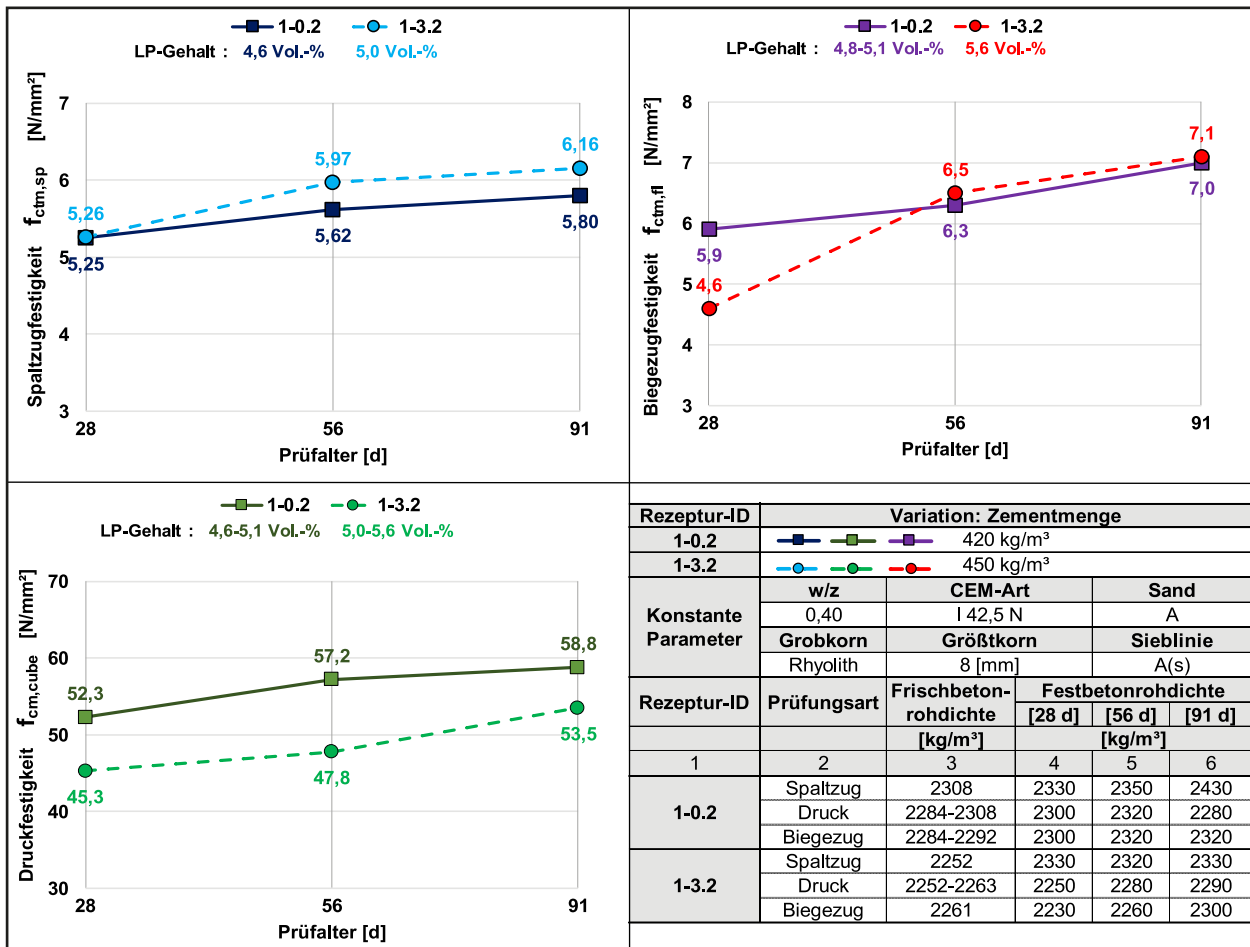


Bild 7-8: Festigkeitsentwicklung – Waschbetone, Zementmenge

Variation	Waschbeton						Oberbeton (D>8)						Unterbeton						
	Zement-menge	Rezeptur-ID	Festigkeits-vergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeits-vergleich	Nacherhärtung von 28d:	Rezeptur-ID	Festigkeits-vergleich			Nacherhärtung von 28d:				
			28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d					28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Spaltzug-festigkeit	1-0.2	5,25*	5,62*	5,8*	7%	10%	-	-	-	-	-	-	-	3-0.2	3,85*	4,01*	4,03*	4%	5%
	1-3.2	0%	6%	6%	13%	17%	-	-	-	-	-	-	-	3-3.1	5%	8%	11%	7%	11%
Druck-festigkeit	1-0.2	52,3*	57,2*	58,8*	9%	12%	-	-	-	-	-	-	-	3-0.2	34,2*	38,3*	40,3*	12%	18%
	1-3.2	-13%	-16%	-9%	6%	18%	-	-	-	-	-	-	-	3-3.1	13%	5%	5%	5%	9%
Biegezug-festigkeit	1-0.2	5,9*	6,3*	7,0*	7%	19%	-	-	-	-	-	-	-	3-0.2	3,6*	4,3*	4,6*	19%	28%
	1-3.2	-22%	3%	1%	41%	54%	-	-	-	-	-	-	-	3-3.1	25%	9%	9%	4%	11%

* in [N/mm²]

Tab. 7-7: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Zementmenge

7.4.6 Variationsparameter Sandart

Für die Parameterstudie Sandart wurden in der zweiten Untersuchungsreihe zwei verschiedene Sandarten aus Arbeitsphase 1 beibehalten – der Sand A und der mehlkornärmere Sand B.

Beispielhaft wird für Waschbetone die zeitliche Festigkeitsentwicklung der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeit bis zum Prüfzeitraum von 91 Tagen in Abhängigkeit von der variierenden Sandart in Bild 7-9 dargestellt. Die Grafiken für Oberbetone (D>8)

enthält Anhang II Bild II – 26, für Unterbetone Anhang II Bild II – 28.

Bei den Waschbetonen führt ein Austausch des Sandes A durch Sand B bei der Spaltzug- und Biegezugfestigkeit nach 91 d zu vergleichbaren Werten. Bei der Druckfestigkeit stellen sich um 7 % niedrigere Werte ein. Die Waschbetone härten nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüfarm um ca. 10 – 19 % nach, vgl. Tabelle 7-8.

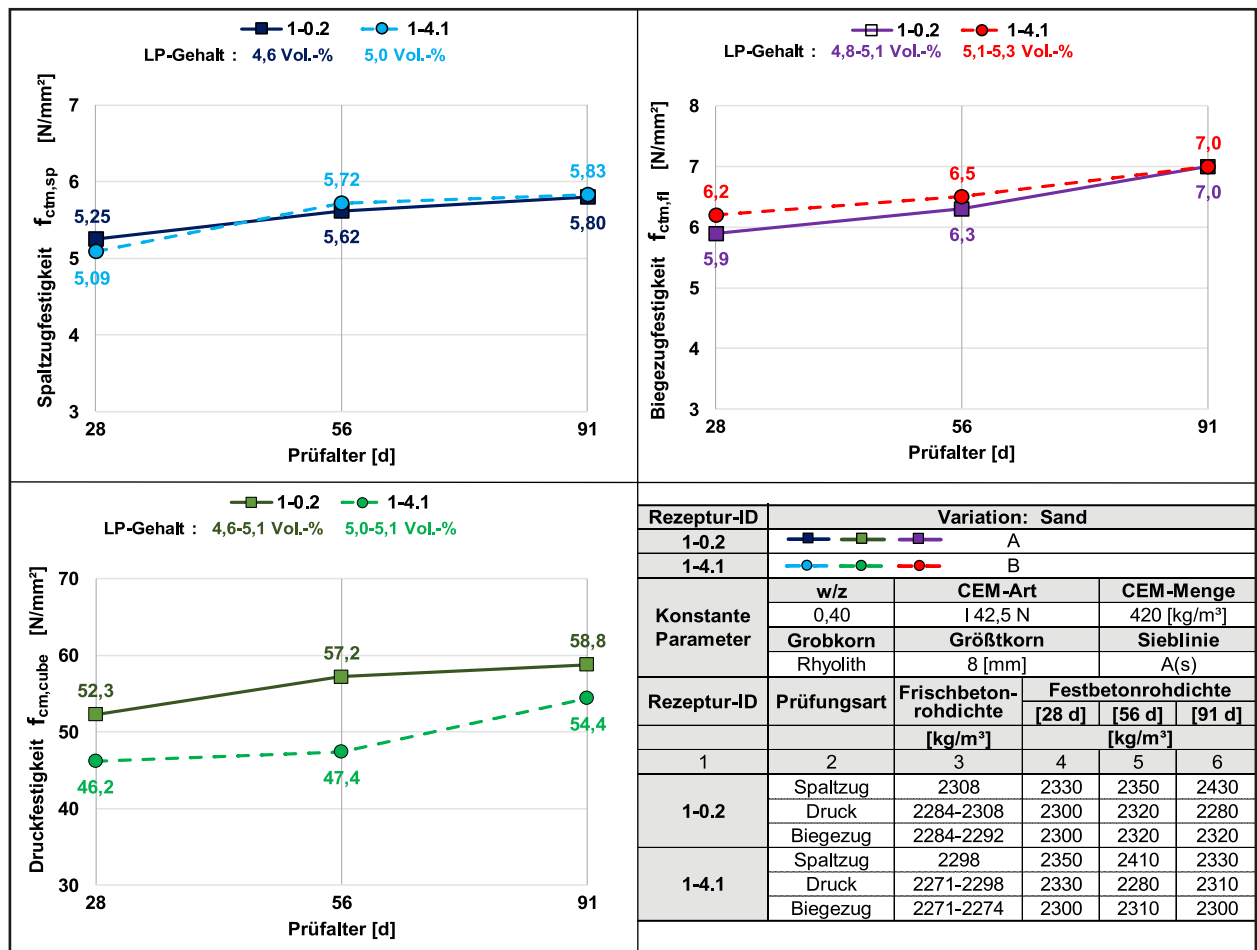


Bild 7-9: Festigkeitsentwicklung – Waschbetone, Sandart

Variation	Waschbeton							Oberbeton (D>8)					Unterbeton						
	Sandart	Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:	
			28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d
Prüfarm	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Spaltzugfestigkeit	1-0.2	5,25*	5,62*	5,80*	7%	10%	2-0.2	5,01*	4,97*	4,90*	-1%	-2%	3-0.2	3,85*	4,01*	4,03*	4%	5%	
	1-4.1	-3%	2%	1%	12%	15%	2-4.1	-	-6%	-3%	-	2%	3-4.1	-20%	-19%	-9%	5%	18%	
Druckfestigkeit	1-0.2	52,3*	57,2*	58,8*	9%	12%	2-0.2	35,4*	40,8*	49,4*	15%	40%	3-0.2	34,2*	38,3*	40,3*	12%	18%	
	1-4.1	-12%	-17%	-7%	3%	18%	2-4.1	1%	-4%	-16%	10%	17%	3-4.1	-37%	-37%	-41%	13%	12%	
Biegezugfestigkeit	1-0.2	5,9*	6,3*	7,0*	7%	19%	2-0.2	4,3*	4,9*	5,1*	14%	19%	3-0.2	3,6*	4,3*	4,6*	19%	28%	
	1-4.1	5%	3%	0%	5%	13%	2-4.1	0%	0%	6%	14%	26%	3-4.1	-3%	-9%	-11%	11%	17%	

* in [N/mm²]

Tab. 7-8: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Sandart

Bei den Oberbetonen (D>8) bewirkt ein Austausch von Sand A durch Sand B bei der Spaltzug- und Druckfestigkeit eine Reduzierung der Werte Niveau (91 d: $f_{ctm,sp}$ (-3 %), $f_{cm,cube}$ (-16 %). Bei der Biegezuguntersuchung zeigt sich eine Erhöhung um 6 %. Bei allen Oberbetonen (D>8) findet nach 28 Tagen unabhängig von der Prüfmart mit Ausnahme bei der Rezeptur 2-0.2 eine Nacherhärtung bis zum Prüfalter von 91 Tagen um ca. 2 – 40 % statt, vgl. Tabelle 7-8.

Bei den Unterbetonen zeigen sich durch den Austausch von Sand A durch Sand B in jedem Prüfalter (28 d, 56 d, 91 d) und bei jeder Prüfmart reduzierte Festigkeiten. Sie liegen nach 91 Tagen zwischen

-9 % und - 41 %. Auffällig sind in diesem Zusammenhang die niedrigen Festbetonrohndichten. Die Unterbetone härten nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüfmart um ca. 5 – 28 % nach, vgl. Tabelle 7-8.

7.4.7 Variationsparameter Gesteinskörnung

Um den Einfluss der Gesteinskörnungsart in der zweiten Arbeitsphase zu quantifizieren, wurden bis zu fünf Gesteinskornarten bei der Untersuchung weiterbetrachtet. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass aufgrund von Lieferungsbeschränkungen die Gesteinskörnungen

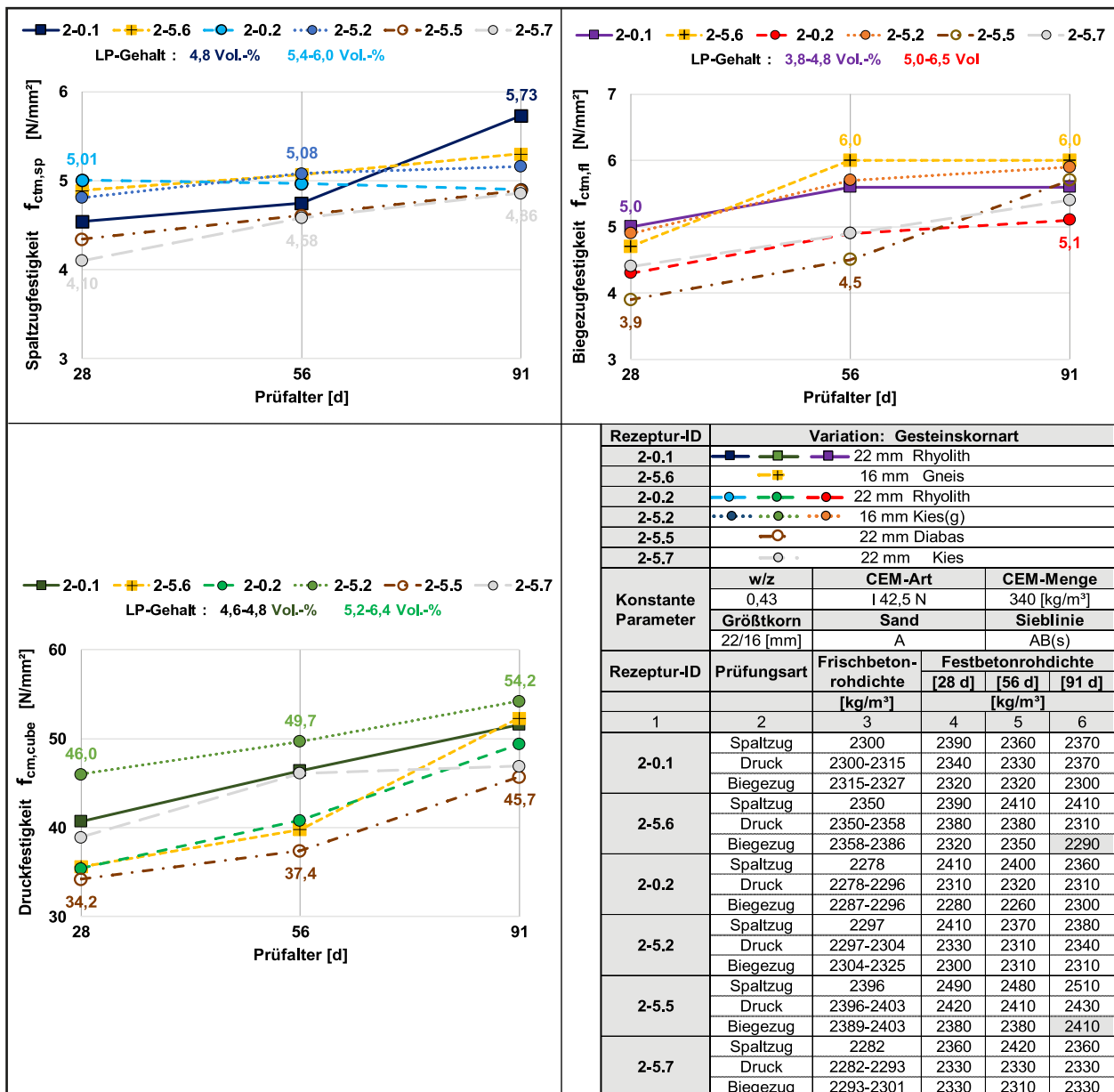


Bild 7-10: Festigkeitsentwicklung – Oberbetone, Gesteinskörnung

Gneis und gebrochener Kies mit jeweils einem Größtkorn von 16 mm anstelle von 22 mm bei den Rezepturen 2-5.6* und 2-5.2* eingebaut wurden.

Beispielhaft wird für Oberbetone die zeitliche Festigkeitsentwicklung der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeit bis zum Prüfzeitraum von 91 Tagen in Abhängigkeit der variierenden Gesteinskörnung in Bild 7-10 dargestellt. Die Grafiken für Waschbetone enthält Anhang II Bild II – 30, für Unterbetone Anhang II Bild II – 34.

Bei den Oberbetonen (D>8) stehen Rezepturen mit fünf variierenden Gesteinskörnungen mit 16 bis 2 mm Größtkorn (GK) im Vergleich. Bei der Spaltzug- und Biegezugfestigkeit nach 91 d zeigen die Betone, hergestellt mit Rhyolith ($f_{ctm,sp} = 5,73 \text{ N/mm}^2$, GK 22 mm), Gneis ($f_{ctm,sp} = 5,30 \text{ N/mm}^2$, GK 16 mm) und gebrochenem Kies ($f_{ctm,sp} = 5,16 \text{ N/mm}^2$, GK 16 mm) die höchsten Festigkeiten. Der Diabasbeton (GK 22 mm) zeigt bei der Biegezugfestigkeitsentwicklung eine beachtliche Festigkeitssteigerung vom 56 d-Wert ($f_{ctm,f,56d} = 4,5 \text{ N/mm}^2$) nach 91 Tagen auf den Wert $f_{ctm,f,91d} = 5,7 \text{ N/mm}^2$. Mit einer Ausnahme härten alle Oberbetone (D>8) nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüfarm um ca. 7 – 47 % nach, vgl. Tabelle 7-9.

Die Waschbetone sind ausschließlich mit gebrochener Gesteinskörnung mit 8 mm Größtkorn zusammengesetzt (s. Anhang II, Bild II – 30). Ein Austausch der Gesteinskörnung Rhyolith durch Gabbro

und Diabas führte nach 91 Tagen bei der Spaltzug- und Biegezugfestigkeit zu Festigkeitssteigerungen um ca. 5 – 11 %. Die Auswirkungen auf die Druckfestigkeit sind mit Erhöhungen um ca. 1 – 3 % geringer. Die Waschbetone härten nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüfarm um ca. 10 – 45 % nach, vgl. Tabelle 7-9.

Bei den Unterbetonen (s. Anhang II, Bild II – 34) führte ein Austausch von rundem Kies (Gk 32 mm) durch gebrochenen Kies, Diabas oder Rhyolith bei der Spaltzug- und Biegezugfestigkeit bis zu 91 Tagen zu Festigkeitssteigerungen um ca. 9 – 46 %, bei der Druckfestigkeit bis zu ca. 50 %. Bei allen Unterbetonen findet nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüfarm eine Nacherhärtung um ca. 5 – 46 % statt, vgl. Tabelle 7-9.

7.4.8 Variationsparameter Größtkorn

Um den Einfluss des Größtkorns bei den Fahrbahndeckenbetonarten Oberbeton (D>8) und Unterbeton in Arbeitsphase 2 zu quantifizieren, wurden Betone mit 8 mm, 16 mm, 22 mm und einem 32 mm Größtkorn untersucht. Abweichend vom Vorgehen in der Praxis wurde der Zementgehalt zur Systematisierung (Variation ausschließlich eines Parameters) konstant gehalten. Das führte teilweise zur Beeinträchtigung der optimalen Verdichtung der Betone unter Laborbedingungen.

Variation	Waschbeton						Oberbeton (D>8)						Unterbeton					
	Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:	
		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Spaltzugfestigkeit	-	-	-	-	-	-	2-0.1	4,54*	4,75*	5,73*	5%	26%	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	2-5.6	8%	7%	-8%	4%	8%	-	-	-	-	-	-
	1-0.2	5,25*	5,62*	5,80*	7%	10%	2-0.2	5,01*	4,97*	4,90*	-1%	-2%	3-0.2	3,85*	4,01*	4,03*	4%	5%
	1-5.1	2%	5%	5%	10%	14%	2-5.2	-4%	2%	5%	6%	7%	3-5.2	25%	27%	28%	6%	7%
	1-5.5	7%	10%	13%	10%	16%	2-5.5	-13%	-7%	0%	6%	13%	3-5.5	32%	38%	39%	9%	11%
Druckfestigkeit	-	-	-	-	-	-	2-0.1	40,7*	46,4*	51,6*	14%	27%	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	2-5.6	-13%	-14%	1%	12%	47%	-	-	-	-	-	-
	1-0.2	52,3*	57,2*	58,8*	9%	12%	2-0.2	35,4*	40,8*	49,4*	15%	40%	3-0.2	34,2*	38,3*	40,3*	12%	18%
	1-5.1	-8%	-11%	1%	5%	24%	2-5.2	30%	22%	10%	8%	18%	3-5.2	35%	30%	34%	8%	18%
	1-5.5	-8%	-11%	3%	5%	26%	2-5.5	-3%	-8%	-7%	9%	34%	3-5.5	22%	32%	50%	21%	46%
Biegezugfestigkeit	-	-	-	-	-	-	2-0.1	5,0*	5,6*	5,6*	12%	12%	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	2-5.6	-6%	7%	7%	28%	28%	-	-	-	-	-	-
	1-0.2	5,9*	6,3*	7,0*	7%	19%	2-0.2	4,3*	4,9*	5,1*	14%	19%	3-0.2	3,6*	4,3*	4,6*	19%	28%
	1-5.1	3%	21%	11%	25%	28%	2-5.2	14%	16%	16%	16%	20%	3-5.2	36%	33%	28%	16%	20%
	1-5.5	-14%	6%	6%	31%	45%	2-5.5	-9%	-8%	12%	15%	46%	3-5.5	58%	49%	46%	12%	18%
-	-	-	-	-	-	2-5.7	-10%	-14%	-8%	11%	23%	3-5.8	19%	7%	9%	7%	16%	

Tab. 7-9: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Gesteinskörnung

Beispielhaft wird für Unterbetone die zeitliche Festigkeitsentwicklung der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeit bis zum Prüfzeitraum von 91 Tagen in Abhängigkeit des variierenden Größtkorns in Bild 7-11 dargestellt. Die Grafik für Oberbetone (D>8) enthält Anhang II Bild II – 36.

Bei den Unterbetonen führt ein Austausch von rundem Kies mit 32 mm Größtkorn durch Gesteinskörnungen mit kleineren Größtkörnern (8 mm, 16 mm, 22 mm) bei der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeit bis zu 91 Tagen zu Festigkeitssteigerungen um ca. 15 – 41 %. Die höchsten Festigkeiten sind bei den Betonen mit einer Diabas Gesteinskörnung mit 16 mm Größtkorn und Kies mit maximal 8 mm

Größtkorn festzustellen. Bei allen Unterbetonen findet nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüffart eine Nacherhärtung um ca. 5 – 46 % statt, vgl. Tabelle 7-10. In Kombination mit rundem Kies als Grobkorn bzw. hohen Luftporengehalten bei den Rezepturen 3-0.2, 3-6.3 und 2-5.5 wurden im Prüfkörperalter von 28 Tagen geringe Druckfestigkeiten beobachtet.

Bei den Oberbetonen (D>8) (s. Anhang II, Bild II – 36) stehen Rezepturen mit Rhyolith Gesteinskörnungen bei Variation des Größtkorn von 8 mm, 22 mm (Ausgangsrezeptur) und 32 mm Größtkorn im Vergleich. Bei der Spaltzug- und Biegezugfestigkeit nach 91 d zeigt der Beton mit einem 8 mm

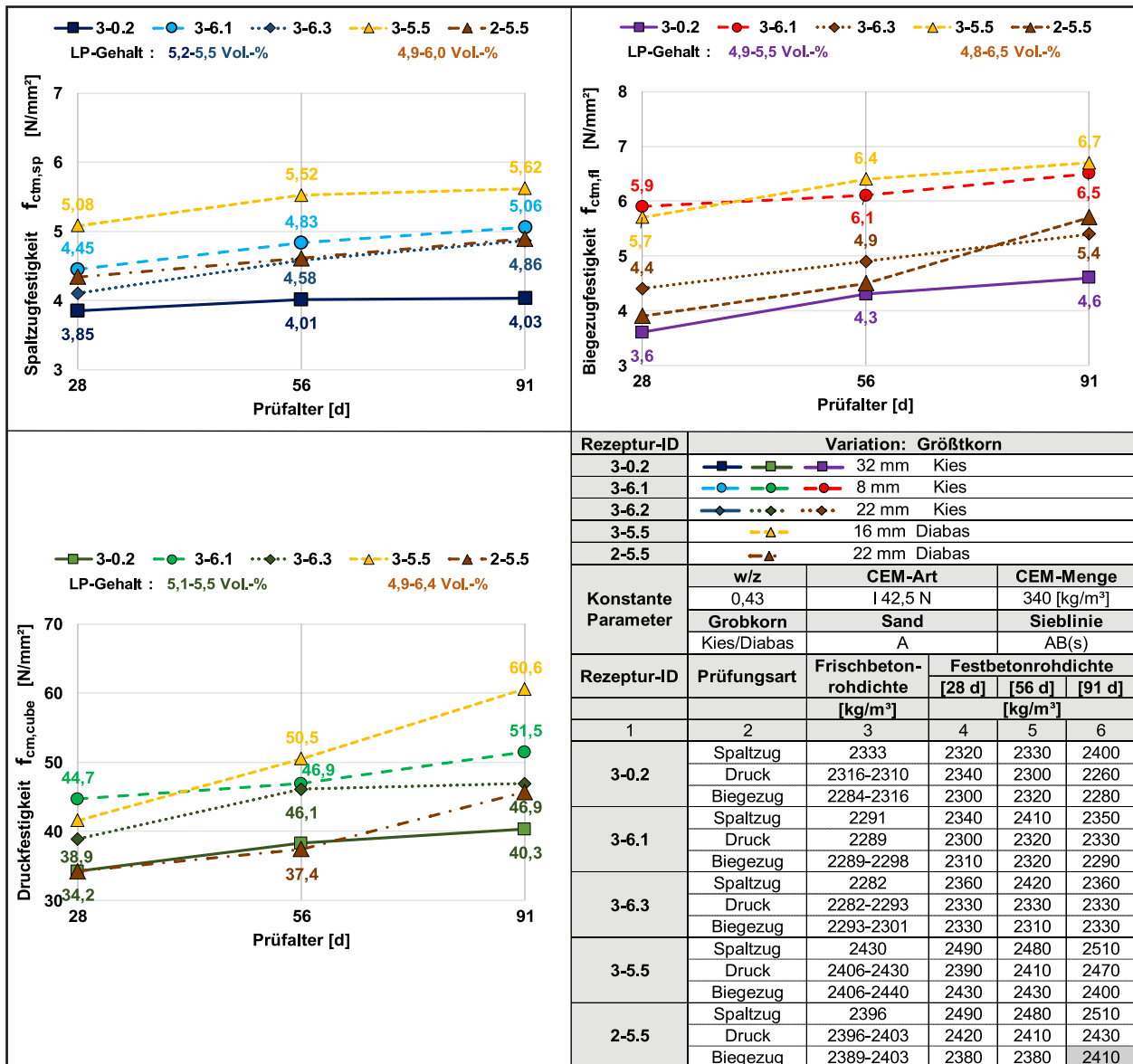


Bild 7-11: Festigkeitsentwicklung – Unterbetone, Größtkorn

Variation	Waschbeton						Oberbeton (D>8)						Unterbeton						
	Größtkorn	Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:	
			28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Spaltzugfestigkeit	-	-	-	-	-	-	2-0.2	5,01*	4,97*	4,90*	-1%	-2%	3-0.2	3,85*	4,01*	4,03*	4%	5%	
	-	-	-	-	-	-	2-6.1	-	5%	13%	-	7%	3-6.3	6%	14%	21%	12%	19%	
	-	-	-	-	-	-	2-6.4	-	-8%	0%	-	7%	3-6.1	16%	20%	26%	9%	14%	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2-5.5	4,34*	4,61*	4,89*	6%	13%	
Druckfestigkeit	-	-	-	-	-	-	2-0.2	35,4*	40,8*	49,4*	15%	40%	3-0.2	34,2*	38,3*	40,3*	12%	18%	
	-	-	-	-	-	-	2-6.1	8%	-1%	0%	5%	28%	3-6.3	14%	20%	16%	19%	21%	
	-	-	-	-	-	-	2-6.4	-5%	-11%	-19%	7%	19%	3-6.1	31%	22%	28%	5%	15%	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2-5.5	34,2*	37,4*	45,7*	9%	34%	
Biegezugfestigkeit	-	-	-	-	-	-	2-0.2	4,3*	4,9*	5,1*	14%	19%	3-0.2	3,6*	4,3*	4,6*	19%	28%	
	-	-	-	-	-	-	2-6.1	2%	-4%	14%	7%	32%	3-6.3	22%	14%	17%	11%	23%	
	-	-	-	-	-	-	2-6.4	0%	-6%	-2%	7%	16%	3-6.1	64%	42%	41%	3%	10%	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2-5.5	3,9*	4,5*	5,7*	15%	46%	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3-5.5	46%	42%	18%	12%	18%	

* in [N/mm²]

Tab. 7-10: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Größtkorn

Größtkorn die höchsten Festigkeiten. Die Werte bei Betonen mit 22 und 32 mm Größtkorn sind übereinstimmend. Nach 91 d sind die Druckfestigkeiten der Betone mit 8 mm und 22 mm gleich und höher im Vergleich zum Beton mit 32 mm Größtkorn. Alle Oberbetone (D>8) härten nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüfmart mit einer Ausnahme um ca. 7 – 40 % nach, vgl. Tabelle 7-10.

7.4.9 Variationsparameter Sieblinie

Um den Einfluss unterschiedlicher Kornabstufungen auf die Betonfestigkeiten bis zum Alter von 91 Tagen zu erfassen, wurden in Abhängigkeit der Fahrbahndeckenbetonart verschiedene Sieblinien untersucht.

Beispielhaft wird für Unterbetone die zeitliche Festigkeitsentwicklung der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeit bis zum Prüfzeitraum von 91 Tagen in Abhängigkeit von den verschiedenen Sieblinien in Bild 7-12 dargestellt. Die Grafiken für Waschbetone enthält Anhang II Bild II – 40, für Oberbetone (D>8) Anhang II Bild II – 42.

Bei den Unterbetonen werden drei Sieblinien betrachtet. Hier führt eine Variation der stetigen Sieblinie AB(s) der Ausgangsrezeptur 3-0.2 durch die stetigen Sieblinien B(s) oder durch die Ausfallkörnung AB(a) (ausgelassen Fraktion 2/8 mm) bei der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeit bis zu 91

Tagen zu Festigkeitssteigerungen um ca. 7 – 28 %. Die höchste Spaltzug- und Druckfestigkeit stellte sich bei dem Unterbeton mit Ausfallkörnung AB(a) ein. Bei allen Unterbetonen findet nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüfmart eine Nacherhärtung um ca. 5 – 28 % statt, vgl. Tabelle 7-11.

Bei den Waschbetonen (s. Anhang II, Bild II – 40) wird die Anwendung der Sieblinie A(s) (Ausgangsrezeptur) mit der der Sieblinie AB(s) verglichen. Bei der Spaltzug- und Biegezugfestigkeit nach 91 Tagen zeigen sich Festigkeitssteigerungen bei Anwendung der Sieblinie AB(s) um ca. 4 – 7 %. Die Auswirkungen auf die Druckfestigkeit liegen mit Erhöhungen um ca. 1 % im Toleranzbereich. Die Waschbetone härten nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüfmart um ca. 10 – 30 % nach, vgl. Tabelle 7-11.

Für die zu untersuchenden Oberbetone (D>8) (s. Anhang II, Bild II – 42) werden der Ausgangsbeton mit stetiger Sieblinie AB(s) und eine weitere Varianz mit stetiger Sieblinie B(s) betrachtet. Bei der Spaltzug- und Biegezug- und Druckfestigkeit ist nach 91 d kaum ein Einfluss der Sieblinienanpassung auf die Festigkeitswerte zu erkennen. Anfängliche Differenzen gleichen sich aus. Mit Ausnahme der Rezepturen 2-0.2 und 2-7.4 härten alle Oberbetone (D>8) nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüfmart um ca. 19 – 48 % nach, vgl. Tabelle 7-11.

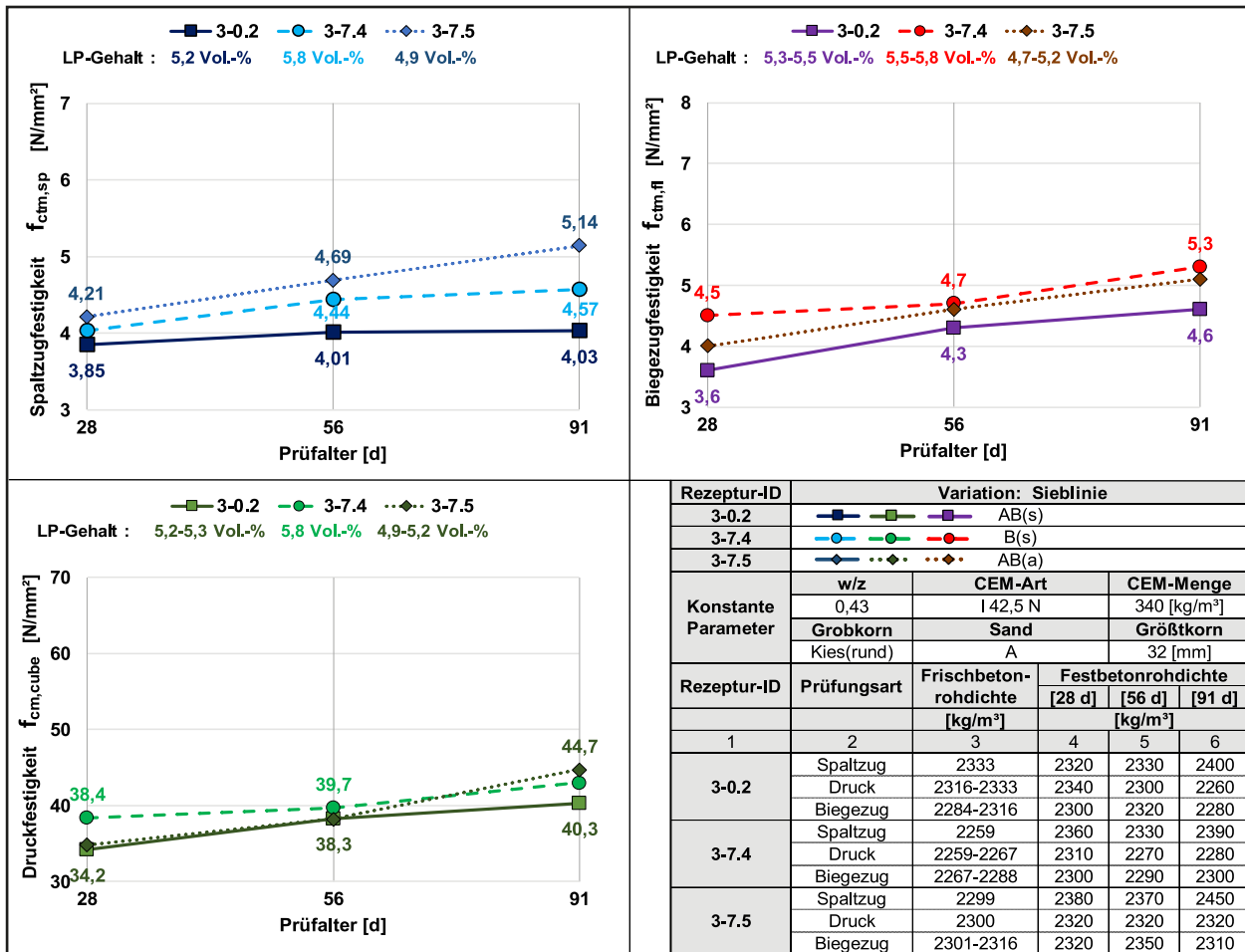


Bild 7-12: Festigkeitsentwicklung – Unterbetone, Sieblinie

Variation	Waschbeton						Oberbeton (D>8)						Unterbeton					
	Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:	
Prüfart	28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Spaltzugfestigkeit	1-0.2	5,25*	5,62*	5,80*	7%	10%	2-0.2	5,01*	4,97*	4,90*	-1%	-2%	3-0.2	3,85*	4,01*	4,03*	4%	5%
	1-7.2	-2%	-7%	7%	2%	21%	2-7.4	-	7%	2%	-	-	3-7.4	5%	11%	13%	10%	13%
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3-7.5	9%	17%	28%	11%
Druckfestigkeit	1-0.2	52,3*	57,2*	58,8*	9%	12%	2-0.2	35,4*	40,8*	49,4*	15%	40%	3-0.2	34,2*	38,3*	40,3*	12%	18%
	1-7.2	-11%	7%	1%	13%	26%	2-7.4	-2%	-2%	-2%	15%	39%	3-7.4	12%	4%	7%	3%	12%
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3-7.5	2%	0%	11%	10%	28%
Biegezugfestigkeit	1-0.2	5,9*	6,3*	7,0*	7%	19%	2-0.2	4,3*	4,9*	5,1*	14%	19%	3-0.2	3,6*	4,3*	4,6*	19%	28%
	1-7.2	-5%	3%	4%	16%	30%	2-7.4	-16%	2%	5%	39%	48%	3-7.4	25%	9%	15%	4%	18%
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3-7.5	11%	7%	11%	15%	28%

Tab. 7-11: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Sieblinie

7.4.10 Variationsparameter Zusatzmittel

In der Arbeitsphase 2 wurde der Einfluss des Betonverflüssigers auf Acrylatbasis und des Fließmittels auf Polycarboxylatetherbasis nur noch für Ober- und Unterbetone auf die Betonfestigkeiten bis zum Alter von 91 Tagen untersucht. Der stark schwankende LP-Gehalt beim Einsatz des Fließmittels auf

Polycarboxylatetherbasis im Zuge der drei Betonchargen des Unterbetons (Rezeptur 3-8.1) hat teilweise zur Überschreitung (max. 7.1 % LP-Gehalt) der gesetzten Obergrenze von 6,0 Vol.-% geführt.

Beispielhaft wird für Oberbetone (D>8) die zeitliche Festigkeitsentwicklung der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeit bis zum Prüfzeitraum von 91

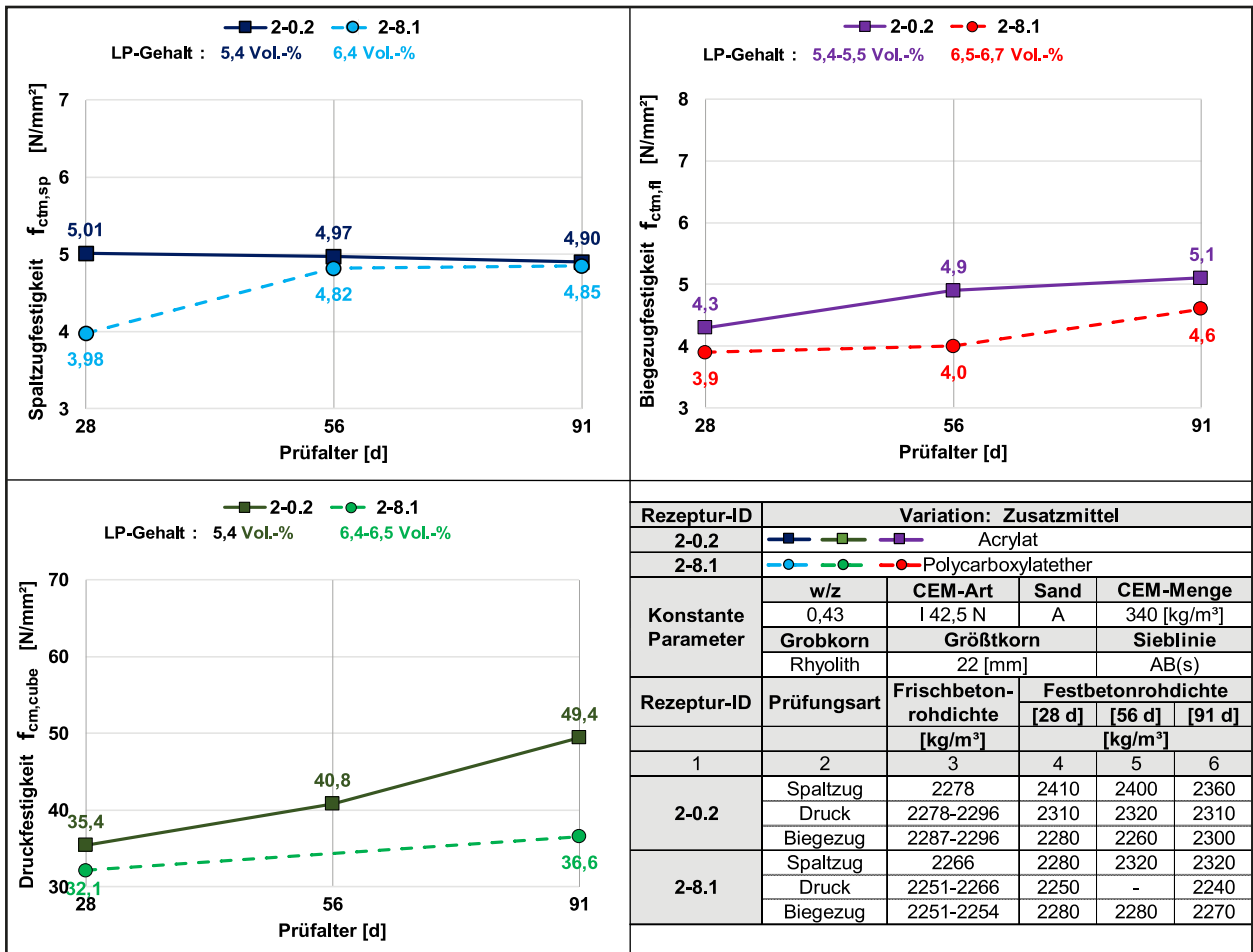


Bild 7-13: Festigkeitsentwicklung – Oberbetone, Zusatzmittel

Variation	Washbeton						Oberbeton (D>8)						Unterbeton						
	Zusatzmittel	Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:		Rezeptur-ID	Festigkeitsvergleich			Nacherhärtung von 28d:	
			28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d		28d	56d	91d	bis 56d	bis 91d
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Spaltzugfestigkeit	-	-	-	-	-	-	2-0.2	5,01*	4,97*	4,90*	-1%	-2%	3-0.1	4,26*	4,56*	4,77*	7%	12%	
	-	-	-	-	-	-	2-8.1	-21%	-3%	-1%	21%	22%	3-8.1	14%	4%	6%	-2%	4%	
Druckfestigkeit	-	-	-	-	-	-	2-0.2	35,4*	40,8*	49,4*	15%	40%	3-0.2	34,2*	38,3*	40,3*	12%	18%	
	-	-	-	-	-	-	2-8.1	-9%	-	-26%	-	14%	3-8.1	-5%	3%	10%	21%	37%	
Biegezugfestigkeit	-	-	-	-	-	-	2-0.2	4,3*	4,9*	5,1*	14%	19%	3-0.2	3,6*	4,3*	4,6*	19%	28%	
	-	-	-	-	-	-	2-8.1	-9%	-18%	-10%	3%	18%	3-8.1	11%	2%	7%	10%	23%	

* in [N/mm²]

Tab. 7-12: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Zusatzmittel

Tagen in Abhängigkeit des variierenden Größtkorns in Bild 7-13 dargestellt. Die Grafik für Unterbetone enthält Anhang II Bild II – 46.

Die Spaltzugfestigkeit nach 91 d liegt bei der Rezeptur 2-8.1 mit $f_{ctm,sp,91d} = 4,85 \text{ N/mm}^2$ um ca. 1 % niedriger im Vergleich zum Ausgangswert (Rezeptur 2-0.2) mit $f_{ctm,sp,91d} = 4,90 \text{ N/mm}^2$ und somit auf vergleichbarem Festigkeitsniveau, obgleich ein um

1 Vol.-% höherer LP-Gehalt vorliegt. Bei den Biegezug- und Druckfestigkeiten wirken sich die höheren LP-Gehalte aus: bei der Biegezugfestigkeit stellt sich ein um 10 % und bei der Druckfestigkeit ein um 26 % niedrigerer Wert ein, vgl. Tabelle 7-12. Alle Oberbetone (D>8) härteten nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüfarm mit einer Ausnahme um ca. 14 – 40 % nach, vgl. Tabelle 7-12.

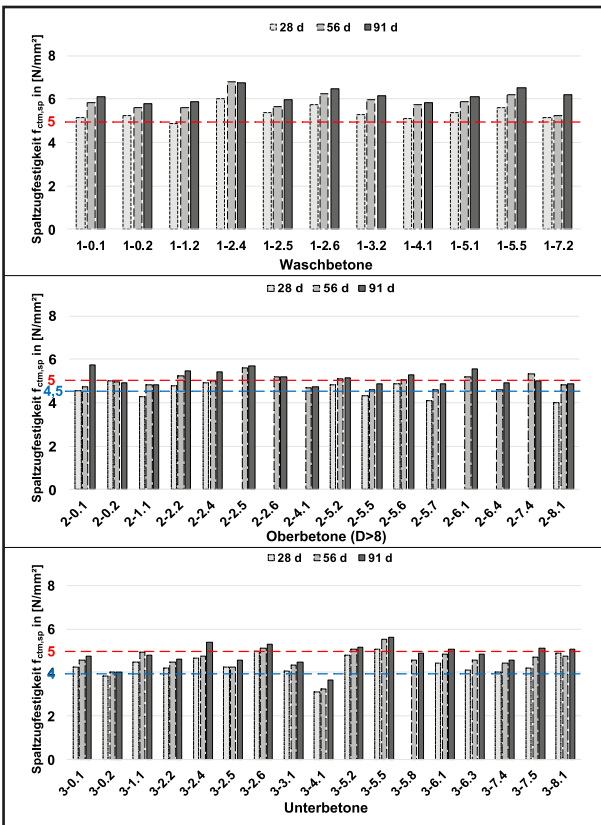


Bild 7-14: AP 2 – Überblick über die Spaltzugfestigkeitsentwicklung (28 d, 56 d, 91 d. Lagerung A)

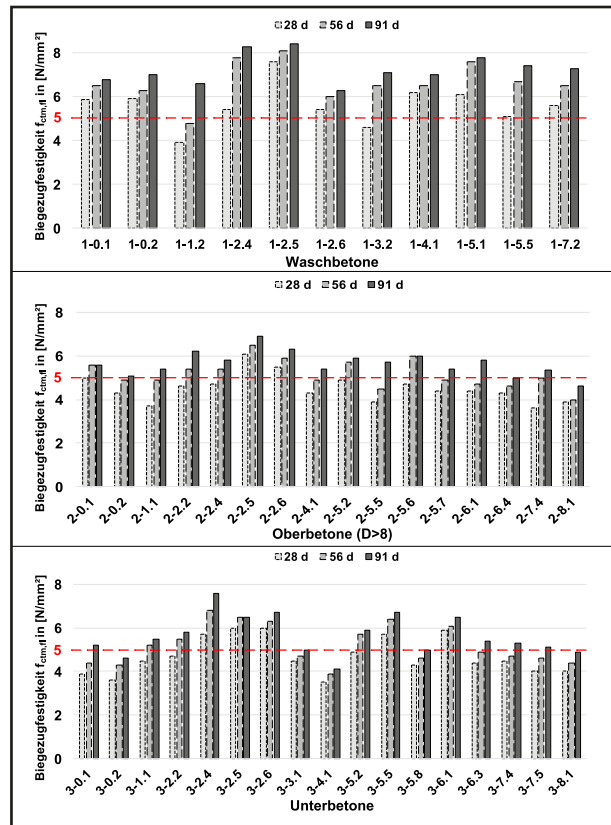


Bild 7-16: AP 2 – Überblick über Biegezugfestigkeitsentwicklung (28 d, 56 d, 91 d. Lagerung A)

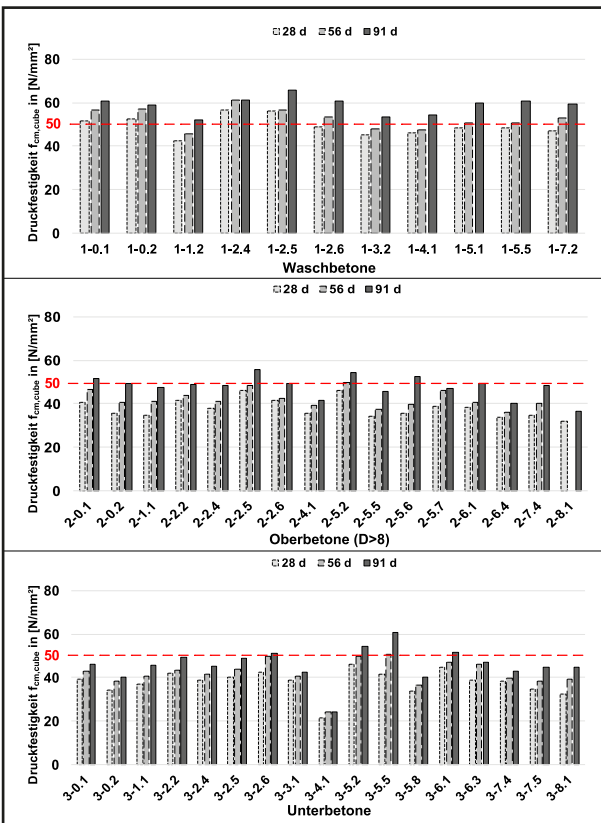


Bild 7-15: AP 2 – Überblick über Druckfestigkeitsentwicklung (28 d, 56 d, 91 d. Lagerung A)

Bei den Unterbetonen führt ein Austausch des Zusatzmittels auf Acrylatbasis durch eines auf Polycarboxylatetherbasis bei der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeit bis zu 91 Tagen zu Festigkeitssteigerungen um ca. 6 – 10 %, trotz höherer LP-Gehalte der Betonproben bei der Biegezug- und der Druckfestigkeitsprüfung. Bei allen Unterbetonen findet nach 28 Tagen bis zum Prüfalter von 91 Tagen unabhängig von der Prüffart eine Nacherhärtung um ca. 4 – 37 % statt, vgl. Tabelle 7-12.

Einen Überblick über die Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeitsentwicklung bis zum Prüfalter von 28, 56 und 91 Tagen (Lagerung A) geben Bild 7-14 bis Bild 7-16.

7.5 Bruchflächenanalyse

Die Bruchflächenanalyse der Spaltzugprüfkörper in Arbeitsphase 2 erfolgte auf identische Weise wie in Arbeitsphase 1. Nach jeder Spaltzugprüfung wurden das Bruchbild der Prüfkörper sowie die Bruchflächen fotografisch erfasst und die optische Begutachtung tabellarisch festgehalten, siehe Tabelle 7-13. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse ist dem Anhang II Tabelle II – 87 bis Tabelle II – 95 zu entnehmen. Die Anzahl der Prüfkörper umfasste 1497 untere Zylinderscheiben. Im Alter von 28 Tagen wurden je Mischzusammensetzung die Bruchflächen von insgesamt 25 (bzw. 21) Zylinderscheiben untersucht. Dazu gehörten 15 Unterscheiben, die einer Wasserlagerung A bis zum Prüfzeitpunkt unterzogen wurden und je 5 (3) Unterscheiben, die einer Lagerung B bzw. C unterzogen wurden. Im Alter von 56 und 91 Tagen (Lagerung A) wurden die Bruchflächen von sechs Zylinderscheiben je Mischungszusammensetzung untersucht.

Bei sechs Oberbetonen verschob sich lockdownbedingt die 28 d- auf die 56 d-Prüfung. Deshalb standen anstelle von 25 Prüfkörpern 31 Zylinderunterscheiben zur Verfügung: 21 Prüfkörper gemäß Lagerung A und je fünf gemäß Lagerung B bzw. C. Deshalb wird bei der 56 d-Prüfung nach Lagerungsart unterschieden.

Bei der Analyse der Brucharten sind bei den Waschbetonunterscheiben überwiegend Schubbrüche (49,1 bis 67,3 %) und Mischbrüche (33,3 bis 41,8 %) unabhängig vom Prüfalter und den Lagerungsarten festzuhalten. Reine Zugbrüche treten

mit 5,5 % (28 d, Lag. C) und 3,0 % (91 d, Lag. A) nur vereinzelt bei den Prüfkörpern auf.

Bei der Bruchflächenanalyse weisen die Waschbetonprüfkörper bis zum Probenalter von 56 d mit Ausnahme der Prüfkörper gemäß Lagerung C (0 %) stets einen Anteil von 9,1 % an herausgelösten Gesteinskörnern auf. Im Alter von 91 Tagen wird kein Grenzflächenbruch beobachtet. Der Anteil der Brüche durch die Gesteinskörnung erhöht sich mit dem Probenalter von 36,4 % (28 d) bis auf 63,6 % (91 d). Nicht nachbehandelte Prüfkörper (Lag. C) zeigen nach 28 d mit 18,2 % den geringsten Bruchanteil durch die Gesteinskörnung.

Bei der Bruchartanalyse der Oberbetone ($D > 8$) werden unabhängig vom Prüfalter und den Lagerungsbedingungen mit Ausnahme der Prüfkörper gemäß Lagerung C (ca. 34 %) meist Schubbrüche beobachtet. Der Anteil der Schubbrüche liegt zwischen ca. 43 % und 58 %, der Mischbruchanteil zwischen 40 % und 60 %. Reine Druckbrüche (< 2 %) oder Zugbrüche (i. d. R. < 4 %) treten vereinzelt auf. Der Zugbruchanteil von 6,7 % im Probenalter von 56 Tagen bei Prüfkörpern gemäß Lagerung C bildet eine Ausnahme.

Bei den Oberbetonen ($D > 8$) lösen sich im Probenalter von 28 Tagen bei den bis zur Prüfung wasser-gelagerten Prüfkörpern anteilig 30 % Gesteinskörner von der Zementsteinmatrix. Nach 91 Tagen sinkt dieser Anteil auf 6,3 %. Gleichzeitig steigt der Anteil der Brüche durch die Gesteinskörnung auf 81,3 %. Nicht nachbehandelte Prüfkörper (Lag. C) zeigen bei den nach 28 Tagen geprüften Prüfkörpern einen

Probenkenndaten			Bruchbildarten				Bruchflächenanalyse			
Betonbauweise	Probenalter	Probenanzahl	Druckbruch (D)	Zugbruch (Z)	Schubbruch (S)	Mischbruch	Grenzflächenbruch	Bruch durch die Gesteinskörnung	Mischerscheinung	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Waschbeton	28	C	55	3,6	5,5	49,1	41,8	0,0	18,2	81,8
		B	55	0,0	0,0	67,3	32,7	9,1	27,3	63,6
		A	165	0,0	0,0	63,0	37,0	9,1	36,4	54,5
	56	66	0,0	0,0	63,6	36,4	9,1	45,5	45,5	
	91	66	0,0	3,0	63,6	33,3	0,0	63,6	36,4	
Oberbeton ($D > 8$)	28	C	45	2,0	2,0	34,0	62,2	30,0	30,0	40,0
		B	45	0,0	4,0	56,0	40,0	0,0	50,0	50,0
		A	135	0,0	1,3	58,0	40,7	30,0	40,0	30,0
	56	C	30	0,0	6,7	33,3	60,0	83,3	0,0	16,7
		B	30	0,0	0,0	43,3	56,7	0,0	100,0	0,0
		A	180	1,1	2,7	53,2	43,0	3,2	58,1	38,7
		91	90	0,0	2,1	54,2	43,8	6,3	81,3	6,3
Unterbeton	28	C	65	0,0	12,3	41,5	46,2	7,7	0,0	92,3
		B	65	1,5	4,6	56,9	36,9	0,0	15,4	84,6
		A	225	0,0	6,2	52,4	41,3	0,0	6,7	93,3
	56	90	0,0	7,8	40,0	52,2	6,7	13,3	80,0	
91	90	1,1	3,3	45,6	50,0	6,7	46,7	46,7		

Tab. 7-13: AP2 – Ergebnisse der Bruchflächenanalyse – Zusammenfassung

Anteil von 30 % an herausgelöster Gesteinskörnung. Bei den nach 56 Tagen geprüften Prüfkörpern lag der Anteil bei 83,3 %. Bei den Oberbetonscheiben gemäß Lagerung B zeigte sich kein Grenzflächenbruch. Hier verliefen bei den nach 28 Tagen geprüften Prüfkörpern 50 % der Brüche durch das Gesteinskorn. Bei den nach 56 Tagen geprüften Prüfkörpern stieg der Anteil auf 100 %.

Bei den nicht nachbehandelten Prüfkörpern (Lag. C) der Unterbetone werden im Alter von 28 Tagen 12,3 % Zugbrüche, 41,5 % Schubbrüche und 46,2 % Mischbrüche beobachtet. Bei den Prüfkörpern gemäß Lagerungsart B und A liegt der Schubbruchanteil bei über 52 % und der Anteil reiner Zugbrüche ist kleiner als ca. 6 % und 1,5 %. Bei Wasserlagerung (Lag. A) bis zum Prüfzeitpunkt im Alter von 56 und 91 Tagen erhöht sich der Mischbruchanteil (> 50 %).

Bei der Bruchflächenanalyse bei den Unterbetonen sind unabhängig von den Lagerungsarten und vom Prüfalter überwiegend Brüche durch die Zementsteinmatrix (Mischerscheinung) festzustellen. Im Alter von 91 Tagen erhöht sich der Anteil der Brüche durch die Gesteinskörnungen beim 56 d Wert von 13,3 % auf 46,7 %.

7.5.1 Zusammenfassung

Bei der Bruchflächenanalyse lässt sich herausarbeiten, dass mit steigender Qualität der Lagerungsart (in Reihenfolge: C, A, B) ebenso wie bei steigendem Alter der unter Wasser gelagerten Prüfkörpern sich der Anteil der Bruchflächen mit eindeutigem Bruch durch die Gesteinskörnung erhöht. Ein Grenzflächenbruch wird eher im frühen Prüfalter und bei fehlender Nachbehandlung durch die Lagerung C begünstigt. Diese Beobachtung wurde bei allen Fahrbahndeckenbetonen gemacht.

8 Untersuchungsergebnisse – Zwischenphase 2-3

8.1 Allgemeines

Auf Anregung des Betreuerkreises wurden Zusatzuntersuchungen mit praxisüblichen Rezepturen von ausgeführten BAB-Abschnitten (BAB A, BAB B) in die Untersuchung zur Überprüfung der Vergleichbarkeit von im Labor im Rahmen dieses For-

schungsprojekts und im Rahmen der Erstprüfung ermittelten Betonkennwerte aufgenommen. Verwendet wurden die Gesteinskörnungen und Zemente aus Rückstellmaterialien der oben genannten Betonfahrbahndeckenabschnitte. Hierbei sollten jeweils drei Praxisbetone, ein Wasch-, ein Ober- und ein Unterbeton, jeweils aus dem Material eines Autobahnabschnittes nach den Vorgaben der Erstprüfungsunterlagen konzipiert, hergestellt und geprüft werden. Zu fünf der sechs Praxisbetone, ausgenommen Rezeptur 4-1.1, lagen die Erstprüfungsunterlagen vor. Die sechste Betonmischung wurde zur Vervollständigung der Versuchsreihe mithilfe laboreigener Ausgangsstoffe vom Institut für Massivbau (IfM) ergänzt. Die Zusammensetzung und die Sieblinien der Praxismischungen entsprachen denjenigen aus Bild 4-1 bis Bild 4-3 und Tabelle 4-7 bis Tabelle 4-9. Die hierfür eingesetzten Materialien und das Untersuchungsprogramm der Praxisrezepturen sind den Tabelle 3-6 und Tabelle 3-8 zu entnehmen. Des Weiteren sollte zu den geplanten sechs Praxisbetonen die Rezeptur einer bereits in Betrieb genommenen Teststrecke untersucht werden, um die erreichten Frisch- und Festbetonkennwerte als Erfahrungswerte mit aufzunehmen. Dabei handelte es sich um eine Betonrezeptur des Oberbetones (D>8) einer Teststrecke, welche mit einem w/z-Wert von 0,38 und differenzierten Zusatzmitteln ohne Luftporenbildner hergestellt wurde. Die abweichenden Materialeigenschaften sind in Anhang III in Tabelle III – 1 zusammengefasst. Es kamen ausschließlich Zusatzmittel zur Anwendung, die bei der Herstellung der Teststrecke zum Einsatz kamen. Die Praxisrezepturen erhielten eine gesonderte Rezeptur-ID zur Unterscheidung von den Laborbetonen. Die Rezeptur-ID beinhaltet ebenfalls 3 Ziffern. Die erste Ziffer (4-) kennzeichnet die Prüfserie Praxisbeton. Die zweite Ziffer unterscheidet Waschbeton (1), Oberbeton (D>8) (2) oder Unterbeton (3). Die dritte Stelle gibt die laufende Nummer des Praxisbetons in der Rezeptur-ID „4-x.(1-7)“ an.

Insgesamt wurden für die Zusatzuntersuchungen der Zwischenphase 2-3 sieben Betone hergestellt. Neben den Frischbetonkennwerten wurden Spaltzug- und Druckfestigkeiten unter den Lagerungsarten A und D (vgl. Kapitel 3.2.3) bis zum Probenalter von 28 Tagen und ihre Festigkeitsentwicklung unter Lagerungsart A bis zum Prüfalter von 56 Tagen geprüft. Zusätzlich wurden CDF-Prüfungen und Luftporenauszählungen an Festbetonprüfkörpern vorgenommen.

Um den Einfluss von Lagerungsart A (Normlagerung unter Wasser bis zum Prüfzeitpunkt) und der in der Praxis üblich gewählten Lagerung D (vgl. [N17]) auf die Druckfestigkeit zu erfassen, wurde die Druckfestigkeit zusätzlich jeweils an drei nach Lagerung D gelagerten Würfeln mit 150 mm Kantenlänge im Alter von 28 Tagen geprüft und den Festigkeitskennwerten aus den Erstprüfungsunterlagen gegenübergestellt.

Die Mischungszusammensetzungen und die Frischbetonkennwerte sind dem Anhang III, Tabelle III – 1, die 28 d- und 56 d-Festbetonkennwerte dem Anhang III Tabelle III -2 und Tabelle III -3 zu entnehmen. In den Tabellen sind Einzelwerte ($EW, f_{ct,sp}$), Mittelwerte ($MW, f_{ctm,sp}$) und die Standardabweichung (s) für 15 Prüfkörper der 28 d-Prüfung sowie für sechs Prüfkörper 56 d-Prüfung unter Berücksichtigung von Ausreißern (Tabelle III – 2) enthalten. Ein Waschbeton mit der Rezeptur 4-1.1 musste aufgrund festgestellter Herstellungsmängel (u. a. LP-Gehalt 3,2 Vol.-%) zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal betoniert werden. Aufgrund der begrenzten Materialkapazitäten und der zur Verfügung stehenden Bearbeitungsdauer für die Zusatzuntersuchungen konnte hierbei nur ein Teilprogramm bis zur 28 d-Prüfung durchgeführt werden.

Zu jeder Betonrezeptur wurde die charakteristische Spaltzugfestigkeit ($f_{ctk,sp}$) gemäß TP B-StB [N7] berechnet. Die hierfür relevanten Rechengrundlagen sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst.

Die Druckfestigkeit (f_c) wurde im Alter von 28 und 56 Tagen jeweils an drei Würfeln mit 150 mm Kantenlänge (cube) gemäß DIN EN 12390-3 [N18] ermittelt. Einzelwerte ($EW, f_{c,cube}$) und Mittelwerte der Druckfestigkeit (MW bzw. $f_{cm,cube}$) der jeweiligen Betonzusammensetzung sind nach der Lagerungsart sortiert der Tabelle III – 3 zu entnehmen. Die Bestimmung der Mittelwerte aus drei Einzelwerten erfolgte mit und ohne (Klammerwert) Berücksichtigung möglicher Ausreißer bei den Einzelwerten der jeweiligen Betonrezeptur. Als Ausreißer wurden Werte außerhalb des Bereichs $\bar{x} \pm s$ definiert. Bei der Waschbetonrezeptur 4-1.1 und der Teststreckeneroberbetonrezeptur 4-2.3 wurde die Druckfestigkeitsuntersuchung unter der Lagerungsbedingung D ausgesetzt.

Für weitere Forschungszwecke wurde auch in der Zwischenphase 2-3 der Frost-Tausalz-Widerstand der Praxisbetone anhand von fünf Prüfkörpern, hergestellt gemäß TP-B-StB [7] aus Würfeln, ermittelt.

Bei Waschbetonen galt abweichend von der Norm die gebürstete Einfüllfläche der Würfel als Prüffläche der CDF-Prüfkörper. Hierzu erfolgte eine Nachbehandlung der abgezogenen Einfüllseite der frisch hergestellten Betonwürfel mit einem Verzögerer und anschließendem Abbürsten des oberflächigen Zementsteins. Die Ausbürsttiefen bei den Waschbetonen 4-1.1 (BAB B), 4-1.1 (II) und 4-1.2 (BAB A) wurden gemessen. Als Ergebnisse aus den CDF-Untersuchungen wurden Kennwerte wie die Abwitterungsmenge, der relative dynamische E-Modul (Anhang III Tabelle III – 4) und die Feuchtigkeitsaufnahme nach 4, 6, 14 und 28 Frost-Tau-Wechseln gewonnen, s. Anhang III Tabelle III – 5.

Abschließend erfolgte die Auszählung der Festbeton-Luftporenkennwerte an jeweils zwei Festbetonprüfkörpern. Die Untersuchung diente zur Überprüfung, ob die erfolgte Zugabe des Luftporenbildners bei der Herstellung der Praxisbetone ausreichend ist, um die normativen Grenzwerte im Festbeton in Bezug auf Menge und Abstand der künstlich eingeführten Luftporen einzuhalten. Bei der Untersuchung wurden die wichtigsten Kennwerte wie der Festbetonluftporengehalt, der Mikro-Luftporengehalt A_{300} und der Abstandsfaktor L erfasst und ausgewertet, s. Anhang III Tabelle III – 6.

8.2 Vergleich der Frischbetonkennwerte der Praxisbetone

In der Tabelle 8-1 ist der Vergleich der Frischbetonkennwerte der selbst hergestellten Praxisbetone (Rezeptur-ID (4-x.x)) den Frischbetonkennwerten aus den Erstprüfungsunterlagen der Autobahnabschnitte BAB A und B gegenübergestellt, wobei letztere grau hervorgehoben sind. Die Spalten drei bis neun geben die Kenndaten der Zusammensetzung der jeweiligen Mischungen an, und die Zeilen 10 bis 15 die Frischbetonkennwerte. Erfasst wurden der w/z-Wert über den Darrversuch, die Frischbetonrohichte, das Verdichtungsmaß und der LP-Gehalt.

Jedem BAB-Beton ist ein gleichartiger Laborbeton zugewiesen. Bei den Mischungen mit der Rezeptur-ID 4-1.1 handelt es sich um einen Waschbeton mit Splitt aus BAB B, der allerdings in keinem BAB-Abschnitt verbaut worden ist. Demzufolge existieren keine Erstprüfungsunterlagen. Für den Teststreckenbeton 4-2.3 liegen ebenfalls keine Erstprüfungsunterlagen vor.

Weil die Gesteinskörnung wie praxisüblich vorgewässert wurde, erfolgte über den Darrversuch eine Kontrolle zur Einhaltung des w/z-Wertes. Sowohl bei den Erstprüfungsdaten, als auch bei den Laborbetonen sind nur geringfügige Abweichungen vom Sollwert zu erkennen, vgl. Tabelle 8-1.

Ein Vergleich der Frischbetonrohddichten zeigt Schwankungen im üblichen Toleranzbereich, Unterschiede sind meist durch die variierenden LP-Gehalte begründbar.

Die Konsistenz der Laborbetone liegt mit Werten zwischen 1,28 und 1,34 im oberen Bereich der Konsistenzklasse C1, diese sind im Vergleich zu den BAB-Betonen meist geringfügig steifer eingestellt.

Eine Gegenüberstellung zwischen den angestrebten LP-Gehalten (Soll) und den im Zuge der durchgeführten Laborprüfung (10 Minuten nach Zugabe aller Ausgangsstoffe) bzw. den der Erstprüfungsunterlagen entnommenen Werten findet sich in Tabelle 8-1 Zeilen 14 und 15. Mit Ausnahme der Rezeptur 4-1.1 variieren die LP-Gehalte im Toleranzbereich. Die Rezeptur 4-1.1 (II) wurde aufgrund dessen mit angepasster Zusatzmittelmenge wiederholt betoniert. Bei der späteren Diskussion der Festbetonergebnisse sind die Ist-LP-Gehalte zu berücksichtigen, vgl. maximale Differenz Δ LP-Gehalt = 1,7 Vol.-% zwischen den Rezepturen BAB B2 und 4.2.4.

8.3 Spaltzugfestigkeitsentwicklung der Praxisbetone

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Spaltzugfestigkeit der im eigenen Labor hergestellten Praxismischungen sind in Bild 8-1 dargestellt. Bild 8-1, links, (Balkendiagramm) zeigt die an 15 Unterscheiden ermittelten mittleren 28 d-Spaltzugfestigkeiten und die berechneten charakteristischen Spaltzugfestigkeiten. Bei der Rezeptur 4-1.4 (II) wurden aufgrund der begrenzten Materialkapazitäten nur sechs Prüfkörper hergestellt und untersucht. In der Reihenfolge Waschbetone, Oberbetone (D>8) und Unterbetone sind links im Balkendiagramm die char. Spaltzugfestigkeiten $f_{\text{ctk,sp,28d}}$ und rechts außerhalb der Ergebnisbalken die Mittelwerte der Spaltzugfestigkeiten $f_{\text{ctm,sp,28d}}$ angegeben. Die zugehörigen Variationskoeffizienten sind in der Mitte der einzelnen Balken abgebildet.

Zusammengefasst liegen die mittleren Spaltzugfestigkeiten im Wertebereich zwischen 4,18 N/mm² (Unterbeton 4-3.7) und 5,55 N/mm² (Waschbeton 4-1.1(II)). Gesondert wird der Wert $f_{\text{ctm,sp,28d}} = 5,68$ N/mm² des Teststreckenoberbetons 4.2.3 aufgrund seines niedrigen LP-Gehalts von 1 Vol.-% betrachtet. Alle Laborbetone erreichten eine charakteristische Spaltzugfestigkeit von 3,3 N/mm². Sieben der acht Mischungen haben mit $f_{\text{ctk,sp,28d}} \geq 3,7$ N/mm² die nächst höhere Straßenbetonklasse,

Rezeptur-ID	Betonart	Zement		Gesteinskörnung			Sieblinie	w/z-Wert soll	w/z-Wert ist	Frischbetonrohddichte soll	Frischbetonrohddichte ist	Verdichtungsmaßkategorie	LP-Gehalt soll	LP-Gehalt 10 Min.
		Art	Gehalt (Menge)	0/2	>2	Größtkorn								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4-1.1	Waschbeton	CEM I 42,5 N (sd)	420	C	Rhyolith B	8	A	0,40	0,41	2295	2327	1,32-C1	5,0	3,2
4-1.1(II)					Rhyolith B	8	A	0,40	0,40	2295	2310	1,28-C1	5,0	4,5
BAB-B 2	Oberbeton (D>8)		340	C	Rhyolith B	22	AB	0,43	0,42	2364	2320	1,25-C2	4,0	5,2
4-2.4					Rhyolith B	22	AB	0,43	0,43	2363	2359	1,33-C1	4,0	3,5
BAB-B 3	Unterbeton		340	C	Rhyolith B	32	AB	0,43	0,41	2361	2338	1,29-C1	4,0	5,1
4-3.6					Rhyolith B	32	AB	0,43	0,44	2360	2355	1,34-C1	4,0	3,8
BAB-A 1	Waschbeton		420	D	Rhyolith A	8	A	0,40	0,40	2288	2293	1,21-C2	4,5	5,2
4-1.2					Rhyolith A	8	A	0,40	0,42	2286	2270	1,31-C1	5,0	5,8
BAB-A 2	Oberbeton (D>8)		340	D	Rhyolith A	22	AB	0,43	0,42	2322	2322	1,26-C1	4,5	5,0
4-2.5					Rhyolith A	22	AB	0,43	0,43	2321	2323	1,34-C1	4,0	4,0
BAB-A 3	Unterbeton	340	D	Kies	32	AB	0,43	0,44	2336	2341	1,28-C1	4,0	4,9	
4-3.7								0,41	2335	2323	1,27-C1	4,0	5,0	
4-2.3	Oberbeton (D>8)	350	A	Kies (g)	16	AB	0,38	-	2433	-	1,28-C1	1,5	1,0	

Tab. 8-1: Vergleich der Frischbetonkenndaten zwischen Laborpraxisbetonen und den Daten aus der Erstprüfung

alle Waschbetone und der Oberbeton 4-2.3 und 4-2.5 den Grenzwert $f_{ctk,sp,28d} \geq 4,3$ N/mm² ausschließlich im Hinblick auf die Spaltzugfestigkeitsklassifizierung überschritten. Eine Ausnahme bildet der Unterbeton 4-3.7 mit dem eingesetzten runden Kies. Die ermittelten Variationskoeffizienten liegen hierbei alle in dem regelkonformen Bereich.

In Bild 8-1 rechts (Säulendiagramm) ist die Spaltzugfestigkeitsentwicklung der Waschbetone, Oberbetone (D>8) und der Unterbetone bis zum Prüfzeitpunkt von 56 Tagen dargestellt. Die 28 d-Spaltzugfestigkeiten sind in den Balken, die 56 d-Spaltzugfestigkeiten (ohne Rezeptur 4.1.1 (II)) jeweils über den Balken angegeben.

Tendenziell lässt sich zusammenfassen, dass die mit den Rückstellproben der BAB B hergestellten Betone etwas höhere oder vergleichbare Spaltzugfestigkeiten erreichen im Vergleich zu den mit den Rückstellproben der BAB A. Eine deutliche Nachhärtung der Spaltzugprüfkörper ist ausschließlich bei dem Oberbeton 4-2.4 ersichtlich. Der Höchstwert der Spaltzugfestigkeit $f_{ctm,sp,56d} = 5,88$ N/mm² wird bei dem Teststreckenbeton 4-2.3 festgestellt. In diesem Zusammenhang sei noch einmal auf seine Sonderrolle bezüglich seiner Zusammensetzung (z. B. w/z = 0,38, Grobkornart, Zusatzmittel, LP-Gehalt = 1,0 Vol.-%) hingewiesen.

8.4 Druckfestigkeitsentwicklung der Praxisbetone

In Bild 8-2 ist der Druckfestigkeitsvergleich zum Prüfzeitpunkt von 28 Tagen zwischen den im eigenen Labor hergestellten Praxisbetonen (Laborbetone) und den Kennwerten der BAB-Betone aus deren Erstprüfungen unter praxisüblicher Lagerungsart D dargestellt. Links befinden sich die Ergebnisse der Betone, hergestellt aus Rückstellproben aus BAB B, rechts die aus BAB A. Die grau hinterlegten Balken bilden die Druckfestigkeitskennwerte aus den Erstprüfungsunterlagen ab.

Ein Vergleich zwischen den Druckfestigkeiten der Betone aus BAB B-Rezepturen (Labor, Erstprüfung) zeigt Werte in vergleichbarer Größenordnung. Alle Betone haben den Mindestfestigkeitsgrenzwert von 44 N/mm² für die Betonfestigkeitsklasse C 30/37 überschritten.

Ein Vergleich zwischen den Druckfestigkeiten der Betone aus BAB A-Rezepturen (Labor, Erstprüfung) zeigt nur für Oberbetone (D>8) vergleichbare Festigkeiten. Bei den Waschbetonen der BAB-A1 und 4-1.2 und den Unterbetonen BAB A 3 und 4.3.7 sind Festigkeitsunterschiede von ca. 10 N/mm² festzustellen. Der Waschbeton 4.1.2 (LP-Gehalt = 5,8 Vol.-%) besitzt im Vergleich zur Rezeptur BAB A1 einen um 0,6 Vol.-% höheren LP-Gehalt. Der Unterbeton 4-3,7 mit dem runden Kies als Grobkorn und einem Luftporengehalt von 5,0 Vol.-% erreicht den Festigkeitsgrenzwert von 44 N/mm² für die Betonfestigkeitsklasse C 30/37 nicht.

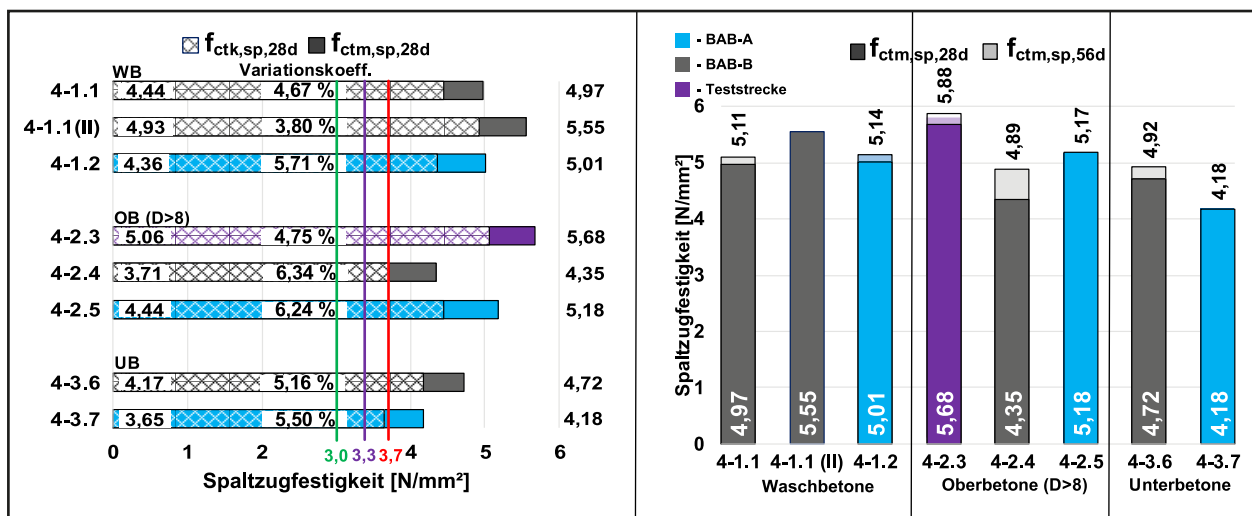


Bild 8-1: Praxismischungen; 28 d – char. Spaltzugfestigkeiten und Mittelwerte (links); Spaltzugfestigkeitsentwicklung bis zum Probenalter von 56 Tagen mit den Rückstellproben aus BAB A, BAB B und der Teststrecke (rechts)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die ermittelten Druckfestigkeiten mit einer Ausnahme die Mindestanforderungen an einen Beton C30/37 erfüllen. Die Druckfestigkeiten der im Labor hergestellten Praxisbetone mit dem Material aus BAB B sind mit den Werten aus der Erstprüfung vergleichbar. Die Druckfestigkeiten der Laborbetone mit dem Material aus BAB A sind nur teilweise mit den Werten aus der Erstprüfung vergleichbar. Festigkeitsabweichungen der Rezepturen 4-1.2 und 4-3.7 könnten durch höhere Luftporengehalte und möglicherweise abweichende Verdichtungsprozesse im Vergleich zur Praxis entstanden sein.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeit der Praxisbetone in Abhängigkeit von den Lagerungsarten sind in Bild 8-3 links dargestellt.

Geprüft wurden je drei Würfel mit 150 mm Kantenlänge. Sie waren zuvor der Lagerungsart A oder Lagerungsart D ausgesetzt. Die ermittelten Druckfestigkeiten nach Lagerungsart A ($f_{cm,cube,28d}$) sind in den Balken und die nach Lagerungsart D ($f_{cm,dry,cube,28d}$) außerhalb der jeweiligen Balken angegeben. Außerdem ist die jeweilige Druckfestigkeitsdifferenz aufgrund der verschiedenen Lagerungen vermerkt.

Die ermittelten Druckfestigkeitsdifferenzen von 6 % bis 30 % machen den Einfluss der Lagerungsart auf die Druckfestigkeit sehr deutlich, besonders bei den Oberbetonen. Die 28 d-Betondruckfestigkeiten der Rezeptur 4-2.4 liegen nach kontinuierlicher Wasserlagerung bis zur Prüfung bei 40,1 N/mm² und nach der Lagerung D bei 56,9 N/mm². Das ergibt eine Festigkeitsdifferenz von ca. 30 %. Bei der Re-

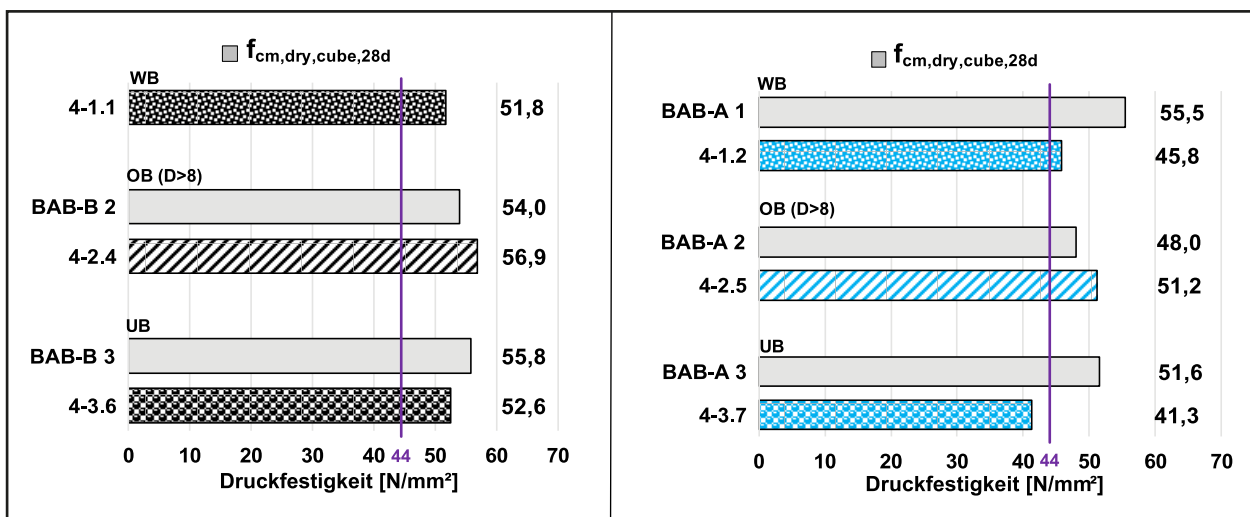


Bild 8-2: Druckfestigkeitsvergleich der Praxismischungen; mit Werten aus BAB – B (links), mit Werten aus BAB – A (rechts)

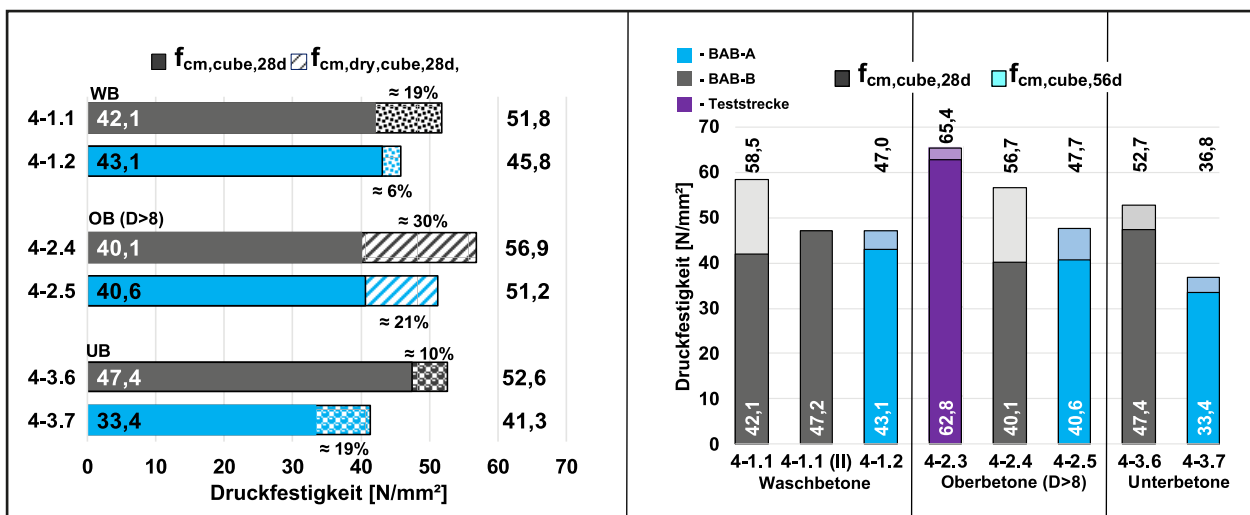


Bild 8-3: Praxismischungen; Auswirkung verschiedener Lagerungsarten auf Druckfestigkeiten (links); Druckfestigkeitsentwicklung bis zum Probenalter von 56 Tagen mit den Rückstellproben aus BAB A, BAB B und der Teststrecke (rechts)

zeptur mit Rhyolith A liegt die Differenz bei 21 %. Bei den Unterbetonen ist sie niedriger und liegt bei 10 % und 19 %. Ähnlich ist es bei den Waschbetonen, wobei der luftporenreiche Waschbeton 4-1.2 die geringste Festigkeitsdifferenz von 6 % zeigt.

In Bild 8-3, rechts, ist die Druckfestigkeitsentwicklung der Praxismischungen unter Lagerungsart A bis zum Probenalter von 56 Tagen abgebildet.

Folgende Entwicklungstendenzen sind bei den bis zum Probenalter von 56 d unter Wasser gelagerten Praxisbetonen zu erkennen: Die Betone, hergestellt aus den Rückstellproben der BAB B (graue Balken), weisen nach 28 Tagen i. d. R. vergleichbare Druckfestigkeiten im Vergleich zu den aus den Rückstellproben der BAB A (blaue Balken) hergestellten Betone auf. Sie härten im Vergleich deutlicher nach, so dass sich zum Prüfzeitpunkt von 56 Tagen deutlich höhere Druckfestigkeiten zeigen. Diese Druckfestigkeitsdifferenz kann zum Teil auf relativ hohe Luftporengehalte der BAB A Betone, aber auch auf die unterschiedliche Zementqualität zurückzuführen sein. Mit Ausnahme von Unterbeton 4-3.7 erreichten oder überschritten alle Praxismischungen zum Zeitpunkt von 56 Tagen unter kontinuierlichen Wasserlagerung eine Druckfestigkeit von $f_{cm,cube,56d} = 47 \text{ N/mm}^2$. Der Höchstwert der 56 d-Druckfestigkeit von $65,5 \text{ N/mm}^2$ wird bei dem Teststreckenbeton 4-2.3 festgestellt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Einfluss unterschiedlicher Lagerungen (A/D) bei der 28 d-Prüfung bis zu 30 % hohe Druckfestigkeitsdifferenzen hervorrufen kann. Die rechnerische Anpassung der Druckfestigkeiten von nach Lagerungsart D gelagerten zu nach Lagerung A gelagerten Würfeln nach EN 12390-2 NA [N17] verwendet mit dem Umrechnungsfaktor von 8 % eine zu geringe Festigkeitsabweichung gegenüber den vorliegenden Versuchsergebnissen.

8.5 Ergebnisse der Frost-Tausalz-Untersuchung

Als weiteres Ziel der Untersuchungen an Praxismischungen in der Zwischenphase 2-3 galt es zu überprüfen, inwiefern die betrachteten Betone die Grenzwerte bezüglich des Frost-Tausalz-Widerstandes sowie des Festbetonluftporengehalts (Kapitel 8.6) einhalten. Hierzu wurden nach TP-B StB [N7] je Betonrezeptur fünf Prüfkörper für die CDF-Untersuchung (vgl. Kapitel 5.7) und zwei Prüfkörper für die Luftporenauszählung (vgl. Kapitel 5.6) vorbereitet. Die Zusammenfassung der Ergebnisse der betrachteten Praxisbetone mit Zusatzinformationen bezüglich der gemessenen Ausbürsttiefen der Waschbetonprüfkörper sind in der Tabelle 8-2 festgehalten.

Rezeptur-ID	Betonart	Frischbeton- Luftporengehalt	Ausbürsttiefe Rautiefe (MPD)	Abwitterungsmenge nach 28 FTW	Abwitterungstiefe nach 28 FTW	Flüssigkeitsaufnahme nach 28 FTW	Feuchte nach 28 FTW	rel. Dyn. E-Modul nach 28 FTW
		[Vol.-%]	[mm]	[g/m ²]	[mm]	[M.-%]	[kg/m ²]	[%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
4-1.1	Oberbeton (D=8)	3,2	0,68	218	0,10	0,98	1,73	90
4-1.1 (II)	Oberbeton (D=8)	4,5	0,75	k.A	k.A	k.A	k.A	k.A
4-1.2	Oberbeton (D=8)	5,8	0,68	104	0,05	0,91	1,57	92
4-2.3	Oberbeton (D>8)	1,0	k.A	1325	0,54	0,66	1,10	95
4-2.4	Oberbeton (D>8)	3,5	k.A	345	0,15	1,27	2,12	93
4-2.5	Oberbeton (D>8)	4,0	k.A	108	0,05	1,26	2,00	95
4-3.6	Unterbeton	3,8	k.A	238	0,10	1,20	2,00	96
4-3.7	Unterbeton	5,0	k.A	95	0,04	1,16	1,92	93

Tab. 8-2: Zusammenfassung der CDF-Prüfungsergebnisse von Praxismischungen

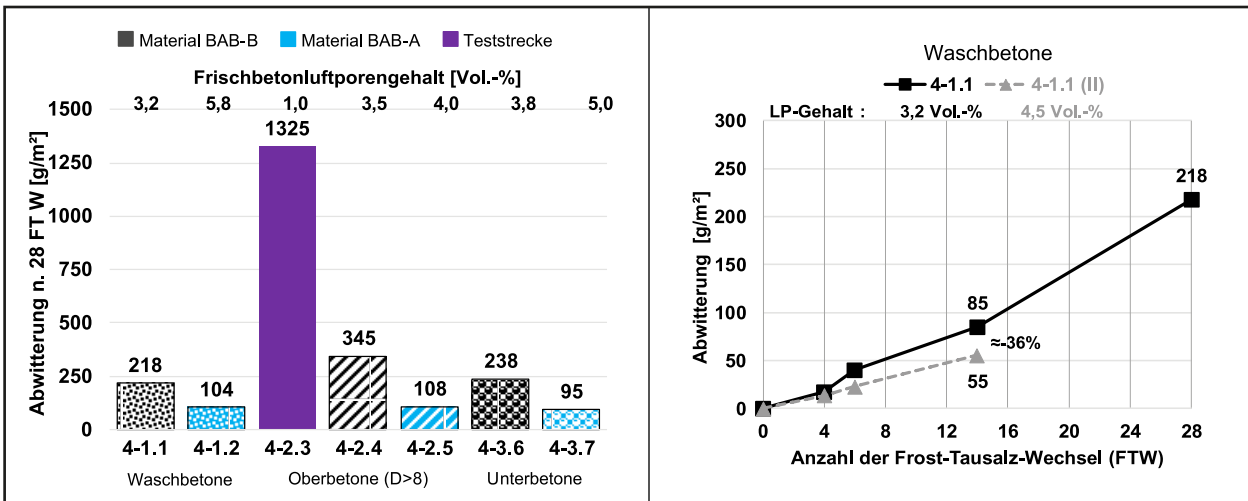


Bild 8-4: Frost-Tausalz-Widerstand der Praxismischungen

In Bild 8-4 sind die Ergebnisse der Abwitterungsmengen der Praxisbetone nach 28 Frost-Tau-Wechsel (FTW) dargestellt. Die Abwitterungsmengen aller untersuchten Praxisbetone lagen unter dem allgemein etablierten Grenzwert von 1.500 g/m² (Abnahmekriterium in [N22]). Die untersuchten Oberbetone (D>8) und die Unterbetontone haben somit die CDF-Prüfung bestanden. Diese Beurteilung anhand der Abwitterungsmengen kann für die Waschbetone nicht vorgenommen werden, da für abgeburstete Betonoberflächen mit freigelegtem Grobkorn bislang keine Festlegungen getroffen worden sind. Nach der Rangfolge gemäß der ermittelten Abwitterungsmengen wird eine maximale Abwitterung von 1.325 g/m² bei dem Teststreckenbeton 4-2.3 festgestellt. Dieser Beton ist in seiner Zusammensetzung grundlegend verschieden im Vergleich zu den anderen LP-Praxisbetonen und hat planmäßig einen niedrigen Frischbetonluftporengehalt von 1 Vol.-%. Mit einer Abwitterungsmenge zwischen 218 und 345 g/m² folgen die Praxisbetone (BAB B), deren LP-Gehalte sich ebenfalls auf einem relativ niedrigen Niveau zwischen 3,2 und 3,8 Vol.-% befinden. Geringste Abwitterungsmengen von ca. 100 g/m² sind bei den Praxisbetonen (BAB A) mit LP-Gehalten zwischen 4,0 und 5,8 Vol.-% zu verzeichnen.

Vorausgesetzt, dass sich bei den untersuchten LP-Betonen mit steigendem LP-Gehalt auch der auf die Frost-Tau-Schädigungsmechanismen dominierend wirkende Mikroluftporengehalt A₃₀₀ erhöht, kann der Einfluss des LP-Gehalts auf die Abwitterungsmenge im Folgenden zusätzlich in einem direkten Vergleich unter Beweis gestellt werden. Der Waschbeton 4-1.1(II) mit einem LP-Gehalt von 4,5 Vol.-%

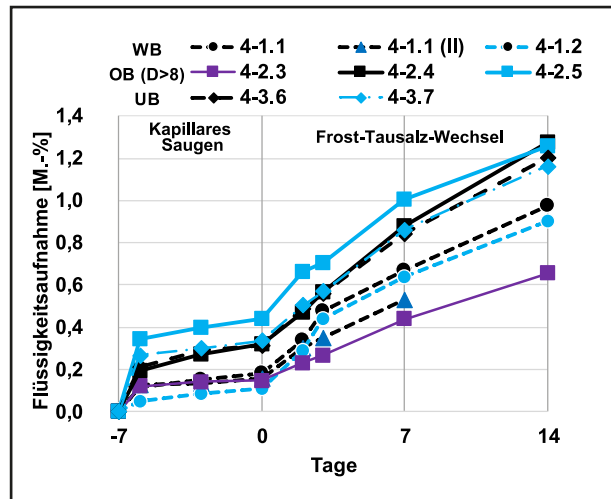


Bild 8-5: Vergleich – Flüssigkeitsaufnahme der Praxismischungen

hat nach 14 FTW eine um 36 % geringere Abwitterungsmenge im Vergleich zu dem Waschbeton 4.1.1 mit einem LP-Gehalt von 3,2 Vol.-%, vgl. Bild 8-4 rechts. Als Fazit kann hier festgehalten werden, dass mit Zunahme des LP-Gehalts sich die ermittelten Abwitterungsmengen reduzieren. Bei der Diskussion der Ergebnisse muss allerdings grundsätzlich beachtet werden, dass bei Abwitterungsmengen < 500 g/m² die Wiederhol- und Vergleichpräzision des CDF-Tests an seine Grenzen stößt [20].

Der CDF-Test impliziert standardmäßig eine Flüssigkeitsaufnahme während des kapillaren isothermen Saugens in der 7-tägigen Vorlagerung als auch durch die Mikropumpe unter der Frost-Tausalz-Belastung. Die Ergebnisse sind Bild 8-5 zu entnehmen. Alle untersuchten Betone zeigen grundsätzlich niedrige Flüssigkeitsaufnahmen. Nach Ab-

schluss der Vorlagerung ist bei den Waschbetonen und dem Teststreckenbeton die geringste Flüssigkeitsaufnahme von ca. 0,18 M.-% zu beobachten. Der Oberbeton 4-2.5 nimmt im Vergleich mit 0,44 M.-% mehr als die doppelte Menge an Prüf-flüssigkeit auf. Die weiteren Praxisrezepturen liegen mit Aufnahmemengen von ca. 0,3 M.-% dazwischen.

Die Rangfolge der Flüssigkeitsaufnahmemengen wird während der FTW im Wesentlichen beibehalten. Der Teststreckenbeton 4-2.3 nimmt nach 28 FTW nach 14 Tagen mit ca. 0,7 M.-% die niedrigste Flüssigkeitsmenge auf, gefolgt von den Waschbetonen. Der Teststreckenbeton 4-2.3 wurde bewusst ohne Zugabe eines Luftporenbildners und mit Zugabe eines Schwindreduzierers hergestellt, um einen besonders flüssigkeitsdichten Beton zu erhalten. Das zeigt sich durch die niedrige Flüssigkeitsaufnahme.

Bei den Waschbetonen wurden die Prüfflächen der CDF-Prüfkörper durch Ausbürsten der Zementsteinmatrix als Waschbetontextur mit freigelegter Gesteinskörnung ausgebildet. Die Kontaktzone zwischen Prüfflüssigkeit und Prüffläche besteht somit überwiegend aus weniger saugfähigem Grobkorn. Das spiegelt sich durch geringere Flüssigkeitsaufnahme im Vergleich zu den an Teflonscheiben anbetonierten Prüfflächen der Ober- und Unterbetone wider. Die Flüssigkeitsaufnahme der Unterbetone lag zum Abschluss der CDF-Prüfung bei ca. 1,2 M.-% und die Oberbetone bei ca. 1,3 M.-%.

8.6 Ergebnisse der Luftporenauszählung an Praxisfestbetonproben

Die Art der Porenstruktur legt die maximal aufnehmbare Flüssigkeitskapazität fest. Wird ein kritischer Sättigungsgrad überschritten, tritt eine Gefügeschädigung auf. Aus diesem Grund zählen zu den weiteren wichtigen Festbetoneigenschaften der Straßenbetone der Mikroluftporengehalt A_{300} und der rechnerisch zu ermittelnde Abstandsfaktor L der einzelnen Luftporen zu jedem Punkt des Zementsteines in der Zementmatrix. Diese und weitere Luftporenparameter wurden bei den Praxisbetonen mittels mikroskopischer Analyse ermittelt. Eine Übersicht über die Gesamtergebnisse der mikroskopischen Analyse sind dem Anhang III der Tabelle Anhang III-6 zu entnehmen. Ein Auszug der wichtigsten Untersuchungsergebnisse der Praxisbetone sind in Bild 8-6 in zwei Grafiken zusammengefasst. Links ist der ermittelte Luftporengehalt und rechts der Abstandsfaktor in Form von Balkendiagrammen dargestellt. Die gestrichelte Querlinie stellt den jeweiligen normativen Grenzwert für die betrachteten Parameter in der jeweiligen Grafik dar. Oben sind die Ergebnisse der Waschbetone, in der Mitte der Oberbetone ($D > 8$) und unten der Unterbetone aufgetragen.

Links in der Grafik ist zu erkennen, dass gemäß der Erwartung der Teststreckenbeton mit höheren Abwitterungsmengen bei der CDF-Prüfung und sehr niedrigem Luftporengehalt im Vergleich zu den anderen Prismismischungen den Grenzwert des Mikroluftporengehalts von 1,8 Vol.-% nicht halten kann. Der kritische Sättigungsgrad muss oberflächennah erreicht worden sein. Ein weiterer Praxisbeton, die

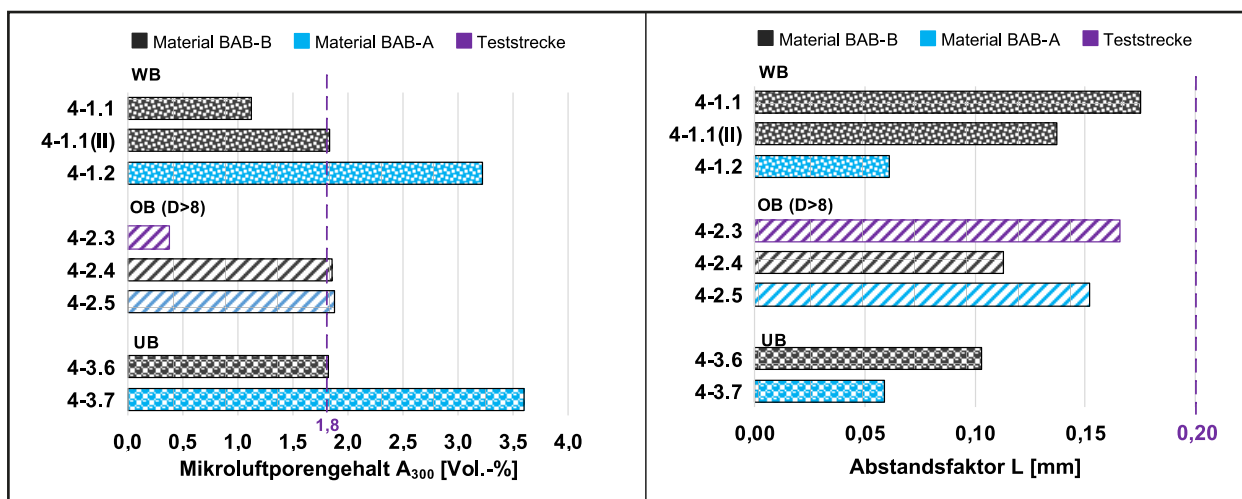


Bild 8-6: Ergebnisse der Luftporenkennwertermittlung der Prismismischungen; Mikroluftporengehalt (links); Abstandsfaktor (rechts)

erste Charge des Waschbetons 4-1.1 erreichte mit 1,1 Vol.-% ebenfalls den Grenzwert nicht. Weitere Praxisbetone mit geringerem Frischbetonluftporengehalt bis 4,0 Vol.-% überschreiten den Grenzwert nur sehr knapp. Bei den vorliegenden Praxisbetonen ist daher davon abzuraten, einen noch niedrigeren Luftporengehalt bei weiteren Betonagen anzustreben. Zwei Praxisbetone, der Waschbeton 4-1.2 und der Unterbeton 4-3.7 zeigen jedoch einen deutlich höheren Mikroluftporengehalt als der normative Grenzwert. Bei diesen Betonen kann mittels Anpassung der Zugabedosis des Luftporenbildners der Luftporengehalt gesenkt werden, was im Nachhinein positive Auswirkungen auf die Festigkeitskennwerte mit sich tragen würde.

Rechts im Bild 8-6 ist der rechnerisch ermittelte Abstandsfaktor der betrachteten Praxisbetone abgebildet. Es ist zu erkennen, dass sich die Größe des Abstandsfaktors i. d. R. antiproportional zu dem Mikroluftporengehalt verhält. Je mehr Mikroluftporen in dem Praxisbeton vorliegen, desto geringer ist der Abstandsfaktor L . Als Grenzwert des Abstandsfaktors L sind normativ 0,20 mm angegeben, die bei der Untersuchung der Betone nicht überschritten werden sollen. Anhand der Ergebnisse ist zu erkennen, dass alle Praxisbetone einen auf der sicheren Seite liegenden Abstandsfaktor L aufweisen.

8.7 Fazit zur Untersuchung der Praxisbetone

Anhand der vorgestellten Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass die im Labor hergestellten Praxisrezepturen hohe Spaltzugfestigkeitsmittelwerte und char. Spaltzugfestigkeiten aufweisen. Der überwiegende Teil der Praxisbetone konnte die char. Spaltzugfestigkeiten von 3,3 und 3,7 N/mm² im Probenalter von 28 d vorweisen.

Die Druckfestigkeiten der Laborbetone sind zum überwiegenden Teil vergleichbar mit den Werten aus der Erstprüfung, soweit die Lagerungsbedingungen der Probekörper der praxisüblichen Art entsprechen. Eine Ausnahme stellte der Unterbeton 4-3.7 dar, dessen niedrigere Druckfestigkeiten womöglich durch die hohen Luftporengehalte in Kombination mit dem verwendeten runden Kies in der Mischung zu begründen sind.

Bei der Lagerung D stellten sich bis zu 30 % höhere Druckfestigkeiten im Vergleich zur Festigkeitsent-

wicklung bei Lagerung A ein. Der Einsatz der Lagerung A bei den Druckfestigkeitsprobekörpern könnte die niedrigen Druckfestigkeiten der betroffenen Laborbetone in dem Untersuchungsspektrum des gesamten Forschungsvorhabens erklären.

Sowohl in der Frost-Tausalz-Prüfung als auch bei der mikroskopischen Analyse der Praxisbetone konnten bei dem überwiegenden Teil der Mischungen die normativen Grenzwerte hinsichtlich der betrachteten Dauerhaftigkeitseigenschaften erfüllt werden. Der Teststreckenbeton wurde zu Forschungszwecken ohne Luftporenbildner hergestellt, was zu höheren Abwitterungsmengen bei der CDF-Prüfung und dem Verfehlen des Grenzwertes bezüglich des Mikroluftporengehaltes führte. Der Waschbeton 4-1.1 erreichte ebenfalls den Grenzwert nicht. Bei der wiederholten Betonage mit einer angepassten Menge des Luftporenbildners wurde jedoch der Grenzwert eingehalten. Diese Ergebnisse belegen den Einfluss des LP-Gehalts und die Wichtigkeit einzuhaltender LP-Gehaltsmindestgrenzen zur Gewährleistung eines ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstands von Betonen.

Somit halten alle im Labor hergestellten Praxisbetone die festgelegten Grenzwerte hinsichtlich des Frost-Tausalz-Widerstandes ein.

9 Untersuchungsergebnisse – Arbeitsphase 3

In Arbeitsphase 3 wurden die 41 Laborbetone aus Arbeitsphase 2 ein weiteres Mal zur Durchführung der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen hergestellt. Ermittelt wurden der Frost-Tausalz-Widerstand und Luftporenkennwerte mittels Mikroskopie. Einen Überblick über das Versuchsprogramm gibt Tabelle 9-1.

Zum Nachweis der Gleichwertigkeit von den in den verschiedenen Arbeitsphasen hergestellten Betonen wurden die Frischbetonkennwerte erfasst, die 28 d-Spaltzugfestigkeit an sechs Unterscheiben und die 28 d-Druckfestigkeit an drei Würfeln mit 150 mm Kantenlänge geprüft. Die Prüfkörper lagerten bis zur Prüfung unter Wasser (Lagerung A). Angaben zu den Ausgangsstoffen und zur Herstellung der Betone enthält Kapitel 4.3. Die Mischungszusammensetzungen und die Frischbetonkennwerte der Waschbetone, Oberbetone ($D > 8$) und Unterbe-



tone sind dem Anhang III Tabelle III – 7 bis Tabelle III – 9 zu entnehmen. Die Ergebnisse der Spaltzugfestigkeiten, die Einzelwerte der Spaltzugfestigkeit von jeweils sechs Prüfkörpern (EW, $f_{ct,sp}$), die Mittelwerte (MW, $f_{ctm,sp}$), die Standardabweichung und charakteristische Spaltzugfestigkeit ($f_{ctk,sp}$) sind Tabelle III – 10 bis Tabelle III – 15 zu entnehmen. Die Ergebnisse der Druckfestigkeiten der drei Prüfserien enthalten Tabelle III – 16 bis Tabelle III – 21.

9.1 Gegenüberstellung der Festigkeitsentwicklung der Betone aus der Arbeitsphase 3 und Arbeitsphase 2

Die Untersuchung diente zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse der CDF-Prüfung und der mikroskopischen Analyse auf die Betone aus Arbeitsphase 2.

Beispielhaft wird der Vergleich für Oberbetone (D>8) in Tabelle 9-2 präsentiert und diskutiert. Eine Gegenüberstellung der Festigkeitsentwicklung der Wasch- und Unterbetone kann dem Anhang III Tabelle III – 22 und Tabelle III – 23 entnommen werden.

Im Wesentlichen werden der LP-Gehalt des Frischbetons und die 28 d-Spaltzug- und 28 d-Druckfestigkeit betrachtet. In Tabelle 9-2 sind die Ergebnisse der 28 d-Spaltzugfestigkeiten (links) und der 28 d-Druckfestigkeiten (rechts) der Oberbetone aus den zwei letzten Arbeitsphasen tabellarisch gegenübergestellt. In der jeweiligen Spalte 7 sind in Form von Pfeilen und deren Ausrichtung die Veränderungen der Festigkeiten beim Vergleich zwischen Arbeitsphase 2 und Arbeitsphase 3 abgebildet.

Prüfung	Frost-Tausalz-Widerstand	Luftporenkennwerten
1	2	3
Probekörperabmessung	Prisma Kantenlängen a/b/c = 150/110/70 mm	Prisma Kantenlängen a/b/c = 150/100/40 mm
Probekörper		
Anzahl der Probekörper	n = 5	n = 2
Prüfergebnisse	Abwitterungsmenge $S_{in} = \frac{m_{2,n}}{A} \cdot 10^6 [g/m^2]$	Festbetonluftporengehalt [Vol.-%]
	Flüssigkeitsaufnahme [M.-%]	Mikroluftporengehalt A ₃₀₀ [Vol.-%]
	Rel. dyn. E-Modul [%]	Abstandsfaktor L [mm]

Tab. 9-1: Überblick – Dauerhaftigkeitsuntersuchungen; Arbeitsphase 3

Rezeptur-ID	Arbeitsphase 2						Arbeitsphase 3				
	Frischbetonrohldichte	Verdichtungsmaß	LP-Gehalt	Festbetonrohldichte	Spaltzugfestigkeit nach 28 d	Veränderung der Spz. von AP2 zu AP3	Frischbetonrohldichte	Verdichtungsmaß	LP-Gehalt	Festbetonrohldichte	Spaltzugfestigkeit nach 28 d
	[kg/m³]		[Vol.-%]	[kg/m³]	[N/mm²]		[kg/m³]	[Vol.-%]	[kg/m³]	[N/mm²]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2-0-1	2300	1,37 C1	4,8	2390	4,54	↗	2351	1,37 C1	3,8	2390	4,84
2-0-2	2278	1,30 C1	5,4	2410	5,01	↘	2325	1,38 C1	5,4	2360	3,72
2-1-3	2270	1,43 C1	5,6	2310	4,27	→	2319	1,40 C1	5,2	2370	4,29
2-2-2	2336	1,43 C1	3,9	2380	4,80	↘	2292	1,37 C1	4,8	2400	4,55
2-2-4	2303	1,34 C1	5,0	2400	4,91	↘	2301	1,32 C1	4,8	2370	4,23
2-2-5	2288	1,34 C1	5,1*	2310	2,92*	↗	2294	1,29 C1	4,6	2390	4,57
2-2-6	2264	1,45 C1	5,2*	2290	3,15*	↗	2311	1,38 C1	4,2	2400	4,60
2-4-1	2266	1,37 C1	6,0*	2310	2,85*	↗	2319	1,36 C1	4,7	2380	4,59
2-5-2	2297	1,33 C1	5,8	2410	4,81	→	2283	1,28 C1	5,5	2360	4,69
2-5-5	2396	1,30 C1	6,0	2490	4,34	↗	2428	1,26 C1	5,7	2500	4,64
2-5-6	2350	1,48 C0	4,8	2390	4,89	↗	2377	1,44 C1	3,9	2420	4,84
2-5-7	2282	1,37 C1	5,5	2360	4,10	↗	2326	1,34 C1	4,5	2390	4,78
2-6-1	2246	1,33 C1	4,8*	2310	4,28*	↗	2347	1,32 C1	4,5	2330	5,11
2-6-4	2249	1,35 C1	5,8*	2270	2,94*	↗	2295	1,39 C1	5,0	2380	4,63
2-7-4	2229	1,37 C1	6,6*	2260	3,36*	↗	2295	1,30 C1	5,0	2360	4,38
2-8-1	2266	1,34 C1	6,4	2280	3,98	↗	2365	1,40 C1	4,0	2380	5,05

Rezeptur-ID	Arbeitsphase 2						Arbeitsphase 3				
	Frischbetonrohldichte	Verdichtungsmaß	LP-Gehalt	Festbetonrohldichte	Druckfestigkeit nach 28 d	Veränderung der Dr. von AP2 zu AP3	Frischbetonrohldichte	Verdichtungsmaß	LP-Gehalt	Festbetonrohldichte	Druckfestigkeit nach 28 d
	[kg/m³]		[Vol.-%]	[kg/m³]	[N/mm²]		[kg/m³]	[Vol.-%]	[kg/m³]	[N/mm²]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2-0-1	2300	1,37 C1	4,6	2340	40,7	↗	2351	1,37 C1	3,8	2370	49,3
2-0-2	2278	1,30 C1	5,4	2310	35,4	↗	2325	1,38 C1	5,4	2340	42,3
2-1-3	2270	1,43 C1	5,6	2270	34,6	↗	2319	1,40 C1	5,2	2340	42,8
2-2-2	2336	1,45 C1	4,0	2350	41,3	↗	2292	1,37 C1	4,8	2320	42,0
2-2-4	2303	1,34 C1	5,7	2310	38,0	↗	2301	1,32 C1	4,8	2340	42,3
2-2-5	2288	1,34 C1	4,6	2350	46,1	→	2294	1,29 C1	4,6	2310	48,4
2-2-6	2264	1,40 C1	4,5	2300	41,3	↗	2311	1,38 C1	4,2	2330	43,9
2-4-1	2271	1,33 C1	5,8	2290	35,6	↗	2319	1,36 C1	4,7	2330	45,2
2-5-2	2297	1,32 C1	5,7	2330	46,0	↗	2283	1,28 C1	5,5	2290	49,1
2-5-5	2396	1,30 C1	6,0	2420	34,2	↗	2428	1,26 C1	5,7	2420	41,5
2-5-6	2350	1,45 C0	4,8	2380	35,6	↗	2377	1,44 C1	3,9	2390	45,5
2-5-7	2282	1,37 C1	5,2	2330	38,9	↗	2326	1,34 C1	4,6	2330	42,0
2-6-1	2236	1,37 C1	6,0	2230	38,4	↗	2347	1,32 C1	4,5	2310	44,1
2-6-4	2284	1,33 C1	5,8	2220	33,7	↗	2295	1,39 C1	5,0	2350	42,3
2-7-4	2258	1,33 C1	6,0	2290	34,8	↗	2295	1,30 C1	5,0	2300	42,7
2-8-1	2251	1,32 C1	6,4	2250	32,1	↗	2365	1,40 C1	4,0	2360	44,9

Legende: * Aufgrund des Lockdowns liegen die Daten aus AP 2 nicht vor.
Ergänzt durch Kenndaten aus AP 1.

Tab. 9-2: Festigkeitsvergleich der Oberbetone (D>8) aus AP2 und AP 3; 28 d-Spaltzugfestigkeiten (links); 28 d-Druckfestigkeiten (rechts)

Als Einstieg wird die Zeile der Ausgangsmischung 2-0.1 detailliert betrachtet. Es ist zu erkennen, dass der Luftporengehalt in Spalte 4 (Arbeitsphase 2) im Vergleich zu Spalte 10 (Arbeitsphase 3) durch das Anpassen des Luftporenbildners bei der Betonage in Arbeitsphase 3 von ca. 4,8 auf 3,8 Vol.-% zurückgegangen ist. Wie erwartet führte dies zu einem Anstieg der Festigkeit beim Ausgangsbeton in Arbeitsphase 3. Da die Festigkeitsentwicklung unter Berücksichtigung der festgehaltenen Frischbetonkennwerte erwartungsgemäß verlaufen ist, ist die vorliegende Entwicklung in der Spalte 7 mit einem schwarzen aufsteigenden Pfeil gekennzeichnet. War die Festigkeitsentwicklung eines Betons in beiden Arbeitsphasen als konstant definiert, so ist die Pfeillage horizontal ausgerichtet. Ein Festigkeitsrückgang aufgrund deutlich gestiegenen Luftporengehalts ist mit einem nach unten gerichteten Pfeil kenntlich gemacht.

Als gleichbleibende Entwicklung der Festigkeiten einer Rezeptur in beiden Arbeitsphasen wurde eine Festigkeitsentwicklung bezeichnet, welche folgende Randbedingungen aufwies: Bei einer Differenz des Luftporengehaltes von ca. 0,5 Vol.-% bei derselben Mischung innerhalb zweier Betonagen sollte die Spaltzugfestigkeit einen maximalen Unterschied von ca. 0,15 N/mm² und die Druckfestigkeit einen von 2,0 N/mm² nicht übersteigen. In allen Fällen, in denen die Festigkeitsentwicklung der Mischungen den Erwartungen entsprach, ist in der Spalte 7 der schwarze Pfeil mit der entsprechenden Entwicklungsrichtung der Festigkeiten angegeben. Da bei dem überwiegenden Teil der Ergebnisse die Festigkeitsentwicklung der Straßenbetone wie erwartet verlief, werden ausschließlich die Ausnahmefälle näher betrachtet, in denen die Festigkeitsentwicklung nicht den Erwartungen entsprach und die daher mit einem roten Pfeil in den Ergebnistabellen gekennzeichnet sind. Bei dem Ergebnisvergleich der Oberbetone ($D > 8$) wären sowohl bei den Spaltzugfestigkeiten als auch bei den Druckfestigkeiten jeweils drei Ausnahmefälle zu diskutieren.

Zieht man für alle 44 betrachteten Betone ein Fazit aus der Gegenüberstellung, so kann man festhalten, dass bei 84 % ($f_{ct,sp}$) bzw. 89 % ($f_{c,cube}$) der Betone eine erwartungsgemäße Festigkeitsentwicklung festgestellt werden kann. Im Mittel fünf Mischungen pro Festigkeitsparameter zeigten eine unerwartete Festigkeitsentwicklung. Die möglichen Ursachen der Abweichungen konnten durch das Analysieren aller bekannten Betonkennwerte der betroffenen Laborbetone herausgearbeitet werden.

Für zwei weitere Rezepturen mit einer ungewöhnlichen Spaltzugfestigkeitsentwicklung konnte keine ausschlaggebende und durch andere Kennwerte belegte Erklärung für die Abweichung gefunden werden. Bei der Betrachtung der Gesamtergebnisse entspricht die vorliegende Fehlerquote einem akzeptablen Wert von 5 %. Auf Basis dieser Erkenntnisse kann man davon ausgehen, dass die ermittelten Dauerhaftigkeitskennwerte der untersuchten Straßenbetone aus der Arbeitsphase 3 auf alle Laborbetone gleicher Rezepturen im gesamten Forschungsvorhaben übertragbar sind.

9.2 Ergebnisse der Frost-Tausalz-Untersuchung

Als Ergebnis der CDF-Prüfung sind die Abwitterungsmenge, die Abwitterungstiefe, die Ausbürsttiefe, der dynamische E-Modul und die Flüssigkeitsaufnahme für alle Prüfserien im Anhang III Tabelle III – 24 bis III – 35 enthalten.

Die Gesamtabwitterung nach 28 FTW sowie die Flüssigkeitsaufnahme der untersuchten Waschbetonprüfkörpern als Mittelwerte aus fünf Einzelergebnissen sind in Form eines Balkendiagramms dem Bild 9-1 zu entnehmen. Rechts in der Tabelle 9-3 sind die zusammengefassten weiteren Untersuchungsergebnisse wie z. B. die gemessene Ausbürsttiefe der Waschbetonprüfflächen und der rel. dyn. E-Modul nach 28 FTW zur Übersicht dargestellt.

In der Grafik in Bild 9-1 sind je Prüfserie jeweils zwei Balkengruppen mit den Ergebnissen abgebildet. Die linke Balkengruppe gibt den Mittelwert der Abwitterung je Betonrezeptur nach 28 FTW wieder. Die X-Achse der Abwitterungsmenge ist unten in Bild 9-1 von links nach rechts verlaufend angegeben. Die schraffierten Balken rechts im Diagramm zeigen die mittlere Flüssigkeitsaufnahme in M.-% nach 28 FTW. Die zugehörige X-Achse befindet sich oben im Diagramm von rechts nach links verlaufend.

Beim Betrachten der Gesamtergebnisse lassen sich bezüglich der gemessenen Abwitterungsmengen und der Flüssigkeitsaufnahme folgende Erkenntnisse gewinnen: Bei den Waschbetonen liegt die maximale Abwitterungsmenge unter dem Wert von 350 g/m². Die höchste Abwitterung wurde beim Einsatz von CEM II/B-S 42,5 N (1-2.4), mit dem Sand B (1-4.1) und der stetigen Sieblinie AB (1-7.2)

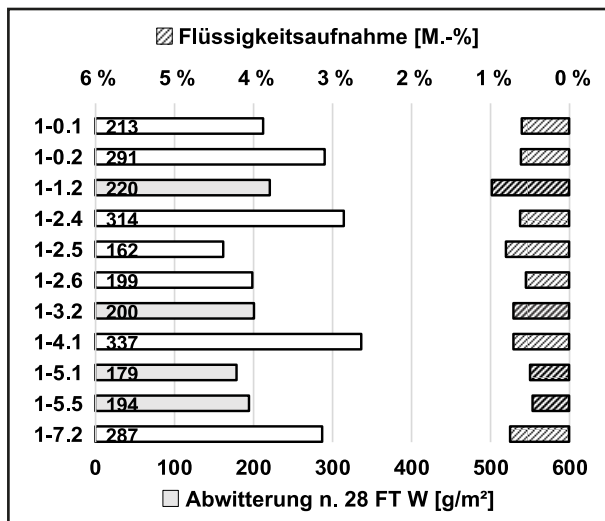


Bild 9-1: Frost-Tausalz-Widerstand der Waschbetone

gemessen. Die geringste Abwitterung wurde bei den Waschbetonen mit dem eingesetzten CEM II/B-S 42,5 R (1-2.5) und Gabbro als Grobkorn (1-5.1) festgestellt. Dementsprechend können die Waschbetone als resistent gegen den Frost-Tausalz-Angriff und als nahezu unbeschädigt eingestuft werden. Eine definierte Tendenz der Abwitterung, abhängig vom konkreten Variationsparameter oder gemessenen Luftporengehalt, ist bei den Waschbetonen nicht gegeben. Zu erklären ist das Verhalten durch die Ausbildung der besonderen, texturierten Prüffläche. Die Untersuchung wurde bei den Waschbetonen an der ausgebürsteten Oberfläche vorgenommen. Daher fehlte den Prüfkörpern an der Prüffläche die saugfähige und der Belastung während der CDF-Prüfung besonders ausgesetzte Zementsteinschicht. Ein Einfluss der Oberflächentexturierung auf die Ergebnisse ist auch an der geringen Flüssigkeitsaufnahme der Waschbetonprüfkörper zu erkennen.

In Tabelle 9-3 ist in Spalte 3 zu erkennen, dass die Ausbürsttiefe der Texturoberfläche aller Waschbetone entsprechend den normativen Grenzwerten von 0,6 bis 1,1 mm vorliegt. In der Spalte 7 ist die innere Schädigung der Prüfkörper indirekt durch den gemessenen rel. dynamischen E-Modul nach 28 FTW angegeben. Eine Reduzierung auf 93 % liegt hierbei bei dem Waschbeton mit CEM II/B-S 42,5 R (1-2.5) vor.

Bei den sechzehn Oberbetonen ($D > 8$) in Bild 9-2 sind die Ergebnisse der Abwitterung deutlich unterschiedlich ausgefallen. Der Höchstwert liegt in einer vergleichbaren Größenordnung wie bei den Wasch-

Rezeptur-ID	Frishbeton-luftporengehalt	Ausbürsttiefe Rautiefe (MPD)	Abwitterungsmenge nach 28 FTW	Flüssigkeitsaufnahme nach 28 FTW	Feuchte nach 28 FTW	Rel. dyn. E-Modul nach 28 FTW
	[Vol.-%]	[mm]	[g/m ²]	[M.-%]	[kg/m ²]	[%]
1	2	3	4	5	6	7
1-0.1	4,2	0,78	213	0,61%	1,00	96%
1-0.2	4,7	0,89	291	0,61%	0,94	97%
1-1.2	6,2	0,81	220	0,98%	1,67	94%
1-2.4	4,0	0,75	314	0,62%	1,06	95%
1-2.5	4,1	0,62	162	0,80%	1,42	93%
1-2.6	4,0	0,68	199	0,55%	1,03	95%
1-3.2	4,9	0,79	200	0,71%	1,27	97%
1-4.1	4,6	0,85	337	0,71%	1,15	97%
1-5.1	4,2	0,79	179	0,50%	0,91	96%
1-5.5	4,0	0,98	194	0,46%	0,87	95%
1-7.2	5,0	0,83	287	0,75%	1,40	95%

Tab. 9-3: CDF-Prüfungsergebnisse der Waschbetone

betonen und liegt geringfügig über dem Wert von 350 g/m², und damit weit unter der in Regelwerken angegebenen Obergrenze von 1.500 g/m². Tendenziell witterten die Betonprüfkörper mit den alternativen Zementen (2-2.x), mit dem Einsatz von Gneis (2-5.6) und rundem Kies (2-5.7) als Grobkorn mehr ab als die der Ausgangsmischungen (2-0.x). Eine günstigere Einwirkung auf die Abwitterungstendenz der Oberbetone ergibt sich demnach durch den Einsatz von Sand B (2-4.1) als Feinkorn, gebrochenem Kies (2-5.2) und Diabas (2-5.5) als Grobkorn, einer alternativen Sieblinie B(s) (2-7.4) oder durch den Einsatz von alternativem Fließmittel (2-8.1).

Bei der Flüssigkeitsaufnahme zeigen die Oberbetone ($D > 8$) Mittelwerte nach 28 FTW von ca. 0,7 bis 1,1 M.-%. Die höchste Flüssigkeitsaufnahme wurde bei den Oberbetonen mit eingesetztem rundem Kies (2-5.7) und den Zementen CEM III/A-S 42,5 R (2-2.2) bzw. CEM II/B-S 42,5 N (2-2.4) beobachtet.

Die maximale Änderung des gemessenen rel. dynamischen E-Moduls liegt bei Oberbetonen ($D > 8$) ebenfalls bei 7 % (Rezeptur 2-5.2).

Bei der CDF-Prüfung der Unterbetone konnte ein geringfügig niedrigerer Widerstand nach 28 FTW beobachtet werden. Die maximale Abwitterungsmenge liegt bei ca. 400 g/m². Eine vom Variationsparameter abhängige Tendenz des Abwitterungspotenzials der Unterbetone ist in Bild 9-3 erkennbar. Die Unterbetone mit Einsatz von alternativen Zementen (3-2.x), etwas niedrigerem w/z-Wert (3-1.1), angepasstem Größtkorn (3-6.x) und alternativem Fließmittel (3-8.1) wiesen entweder annähernd gleiche oder deutlich höhere Abwitterungsmengen auf

als die Ausgangsrezepturen. Als deutlich widerstandsfähigere Rezepturen erwiesen sich z. B. die Unterbetone mit gebrochener Gesteinskörnung (3-5.x) oder angepassten Sieblinien (3-7.x). Die Flüssigkeitsaufnahme zum 28 FTW lag zwischen 0,67 M.-% (3-2.5) und 1,42 M.-% (3-3.1). Die innere

Schädigung der Unterbetone ist im gleichen Prüfungszeitraum im Vergleich zu den Wasch- und Oberbetonen (D>8) ebenfalls geringfügig weiter vorgeschritten. Der stärkste dynamische E-Modulrückgang ist bei der Ausgangsmischung 3-0.2 mit ca. 10 % zu verzeichnen.

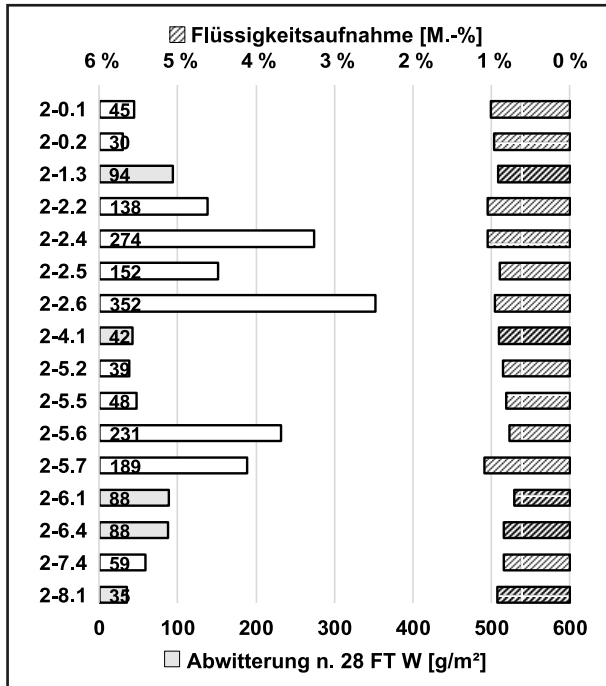


Bild 9-2: Frost-Tausalz-Widerstand der Oberbetone (D>8)

Rezeptur-ID	Frischbeton-luftporengehalt [Vol.-%]	Abwitterungsmenge nach 28 FTW [g/m²]	Flüssigkeitsaufnahme nach 28 FTW [M.-%]	Feuchte nach 28 FTW [kg/m²]	Rel. dyn. E-Modul nach 28 FTW [%]
	2	3	4	5	6
2-0.1	3,8	45	1,00%	1,64	97%
2-0.2	5,4	30	0,96%	1,52	97%
2-1.3	5,2	94	0,91%	1,55	97%
2-2.2	4,8	138	1,04%	1,71	94%
2-2.4	4,8	274	1,05%	1,73	97%
2-2.5	4,6	152	0,89%	1,46	97%
2-2.6	4,2	352	0,96%	1,58	96%
2-4.1	4,7	42	0,91%	1,52	97%
2-5.2	5,5	39	0,85%	1,36	93%
2-5.5	5,7	48	0,81%	1,34	95%
2-5.6	3,9	231	0,77%	1,31	96%
2-5.7	4,0	189	1,08%	1,78	96%
2-6.1	4,5	88	0,71%	1,17	94%
2-6.4	5,0	88	0,84%	1,38	95%
2-7.4	5,0	59	0,84%	1,11	95%
2-8.1	4,0	35	0,92%	1,49	97%

Tab. 9-4: CDF-Prüfungsergebnisse der Oberbetone (D>8)

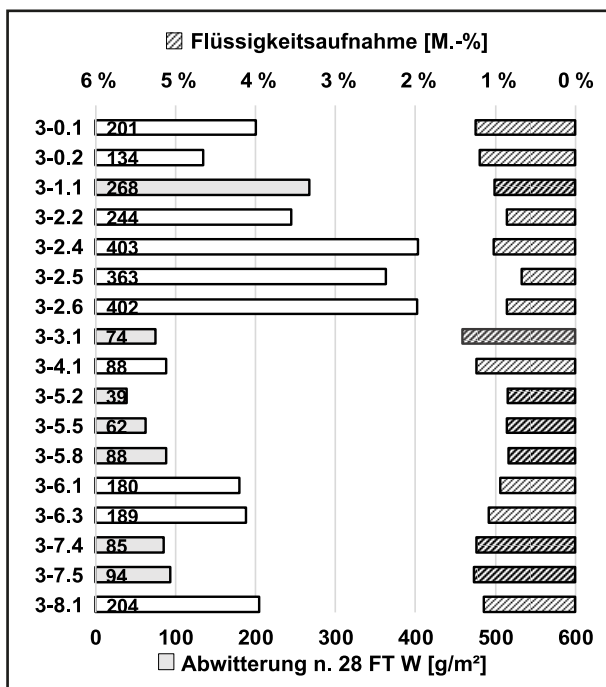


Bild 9-3: Frost-Tausalz-Widerstand der Unterbetone

Rezeptur-ID	Frischbeton-luftporengehalt [Vol.-%]	Abwitterungsmenge nach 28 FTW [g/m²]	Flüssigkeitsaufnahme nach 28 FTW [M.-%]	Feuchte nach 28 FTW [kg/m²]	Rel. dyn. E-Modul nach 28 FTW [%]
	2	3	4	5	6
3-0.1	4,8	201	1,25%	1,99	92%
3-0.2	5,6	134	1,19%	1,89	90%
3-1.1	4,7	268	1,02%	1,70	96%
3-2.2	5,1	244	0,85%	1,40	95%
3-2.4	5,0	403	1,02%	1,70	95%
3-2.5	4,3	363	0,67%	1,10	94%
3-2.6	5,1	402	0,85%	1,42	97%
3-3.1	5,0	74	1,42%	2,29	93%
3-4.1	4,8	88	1,24%	2,04	94%
3-5.2	5,5	39	0,85%	1,36	93%
3-5.5	5,5	62	0,85%	1,48	97%
3-5.8	5,0	88	0,84%	1,38	95%
3-6.1	5,9	180	0,93%	1,52	95%
3-6.3	4,6	189	1,08%	1,78	96%
3-7.4	5,2	85	1,24%	2,04	91%
3-7.5	4,6	94	1,27%	2,18	95%
3-8.1	5,2	204	1,15%	1,79	93%

Tab. 9-5: CDF-Prüfungsergebnisse der Unterbetone

9.3 Ergebnisse der mikroskopischen Analyse der Festbetonprüfkörper

Der Mikroluftporengehalt A_{300} und der Abstandsfaktor L der künstlich eingeführten Luftporen in der festen Mörtelmatrix zählen zu den wichtigsten Festbetonparametern der luftporenrreichen Straßenbetone. Anhand dieser Parameter kann eine indirekte Aussage darüber getroffen werden, wie groß die Widerstandsfähigkeit der Straßenbetone gegen Frost-Tausalz-Angriff ist. Hierzu sind normativ zwei Grenzwerte definiert. Der Mikroluftporengehalt A_{300} muss mindestens einen Wert von 1,8 Vol.-% aufweisen und der Abstandsfaktor L unter 0,2 mm liegen, damit das Kapillar-Poren-System in der Zementsteinmatrix ausreichend ausgebildet ist. Diese und weitere Luftporenparameter wurden bei den untersuchten Laborbetonen mittels mikroskopischer Analyse ermittelt, ausgewertet und in Form von Balkendiagrammen und Tabellenwerten zusammengefasst. Eine Übersicht über die Gesamtergebnisse der mikroskopischen Analyse in tabellarischer Form sind dem Anhang III nach der Straßenbetonart sortiert zu entnehmen.

Die Darstellung der Ergebnisse ist ähnlich wie bei den Ergebnissen der CDF-Prüfung aufgebaut. In dem Balkendiagramm in Bild 9-4 sind die zwei wichtigsten Parameter der einzelnen Waschbetone dargestellt. Die linken Balken bilden die Ergebnisse der Mikroluftporengehaltmessung ab, die rechten Balken geben den errechneten Abstandsfaktor L wieder. Die entsprechenden X-Achsen befinden sich unten (von links nach rechts laufend) und oben (von rechts nach links laufend). Die normativ festgeleg-

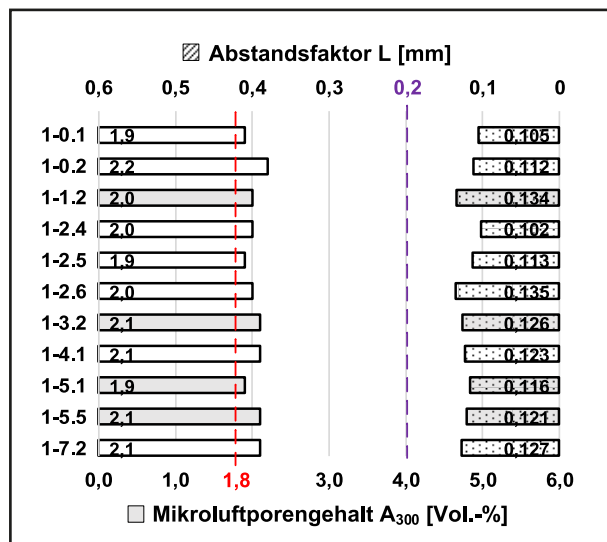


Bild 9-4: Ermittelte Luftporenkennwerte der Waschbetone

ten Grenzwerte der betrachteten Parameter sind als farblich hervorgehobene, gestrichelte Linien dargestellt. In der Tabelle 9-6 rechts sind die Gesamterkenntnisse aus der mikroskopischen Analyse der Prüfkörper zusammengefasst. In den Spalten 2 und 3 sind die gemessenen Frisch- und Festbetonluftporengehalte angegeben. Die Spalten 4 und 5 sind entsprechend links in Form eines Balkendiagramms ausgewertet dargestellt. Die Spalten 6 und 7 geben weitere Erkenntnisse über die Anzahl und die mittlere Größe der eingeführten Luftporen in den jeweiligen Prüfkörpern wieder.

Bei Waschbetonen ist aus dem Diagramm im Bild 9-5 zu erkennen, dass alle Rezepturen die gesetzten Grenzwerte erfüllen, wobei die Waschbetone der Untergrenze des Mikroluftporengehaltes von 1,8 Vol.-% sehr nah kommen. Daher ist an dieser Stelle eine Reduzierung des Frischbetonluftporengehaltes durch Anpassung der Zugabemenge des Luftporenbildners nicht mehr zu empfehlen. Keiner der Betone zeigt hier eine besonders herausragende Entwicklung. Der größte Abstandsfaktor wurde bei der Rezeptur 1-2.6 mit dem CEM III/A Zement festgestellt, der deutlich unter dem maximalen Grenzwert von 0,2 mm liegt. Zudem entsprach bei vier Waschbetonen der Festbetonluftporengehalt dem jeweiligen Frischbetonluftporengehalt. Die Anzahl der gemessenen Luftporen liegt zwischen 750 und 1.000. Der mittlere Luftporendurchmesser beträgt bei der Hälfte der Mischungen 85 bis 100 μm .

Bei den Ergebnissen der Luftporenauszählung der Oberbetone ($D > 8$) in Bild 9-5 ist hervorzuheben, dass beim überwiegenden Teil der Betone eine weit

Rezeptur-ID	Frischbetonluftporengehalt	Festbetonluftporengehalt A	Mikro-Luftporengehalt A_{300}	Abstandsfaktor L	Anzahl der gemessenen Poren N	Porendurchmesser der Mittelwertklasse
	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mm]		[μm]
	2	3	4	5	6	7
1-0.1	4,2	3,2	1,9	0,105	887	55-60
1-0.2	4,7	3,5	2,2	0,112	871	65-80
1-1.2	6,2	3,9	2,0	0,134	794	85-100
1-2.4	4,0	4,0	2,0	0,102	999	65-80
1-2.5	4,1	3,3	1,9	0,113	763	65-80
1-2.6	4,0	3,8	2,0	0,135	751	85-100
1-3.2	4,9	3,8	2,1	0,126	839	85-100
1-4.1	4,6	3,4	2,1	0,123	776	85-100
1-5.1	4,2	4,1	1,9	0,116	873	65-80
1-5.5	4,0	4,1	2,1	0,121	844	85-100
1-7.2	5,0	4,2	2,1	0,127	804	85-100

Tab. 9-6: Waschbetone – Ergebnisse der Luftporenkennwertbestimmung

über dem Grenzwert liegende Menge an Mikroluftporen festgestellt wurde. Mit dem Forschungsvorhaben konnte somit nachgewiesen werden, dass die in den Regelwerken angegebenen Grenzluftporengehalte für Straßenbetone zutreffend sind. Der maximal gemessene Abstandsfaktor und der

minimale Mikroluftporengehalt bei der Rezeptur 2-6.4 mit angepasstem Größtkorn erfüllte demnach ebenfalls die Mindestanforderungen.

Die Tabelle 9-7 zeigt, dass bei mehr als der Hälfte der Oberbetone ($D > 8$) ein auf dem gleichen Niveau

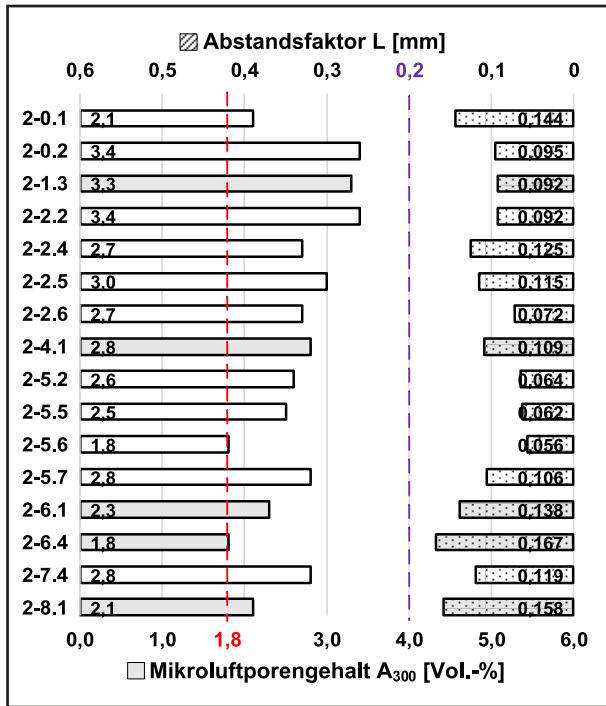


Bild 9-5: Ermittelte Luftporenkennwerte der Oberbetone (D>8)

Rezeptur-ID	Frischbetonluftporengehalt [Vol.-%]	Festbetonluftporengehalt A [Vol.-%]	Mikroluftporengehalt A ₃₀₀ [Vol.-%]	Abstandsfaktor L [mm]	Anzahl der gemessenen Poren N	Porendurchmesser der Mittelwertklasse [µm]
1	2	3	4	5	6	7
2-0.1	3,8	4,0	2,1	0,144	611	105-120
2-0.2	5,4	5,5	3,4	0,095	931	105-120
2-1.3	5,2	5,0	3,3	0,092	889	105-120
2-2.2	4,8	4,8	3,4	0,092	955	105-120
2-2.4	4,8	4,8	2,7	0,125	708	125-140
2-2.5	4,6	4,9	3,0	0,115	766	125-140
2-2.6	4,2	3,4	2,7	0,072	1243	45-50
2-4.1	4,7	4,6	2,8	0,109	808	105-120
2-5.2	5,5	4,8	2,6	0,064	1397	55-60
2-5.5	5,7	3,4	2,5	0,062	1442	45-50
2-5.6	3,9	3,1	1,8	0,056	1541	35-40
2-5.7	4,0	3,6	2,8	0,106	835	85-100
2-6.1	4,5	5,2	2,3	0,138	646	145-160
2-6.4	5,0	2,7	1,8	0,167	473	105-120
2-7.4	5,0	4,8	2,8	0,119	739	125-140
2-8.1	4,0	4,1	2,1	0,158	561	125-140

Tab. 9-7: Oberbetone (D>8) – Ergebnisse der Luftporenkennwertbestimmung

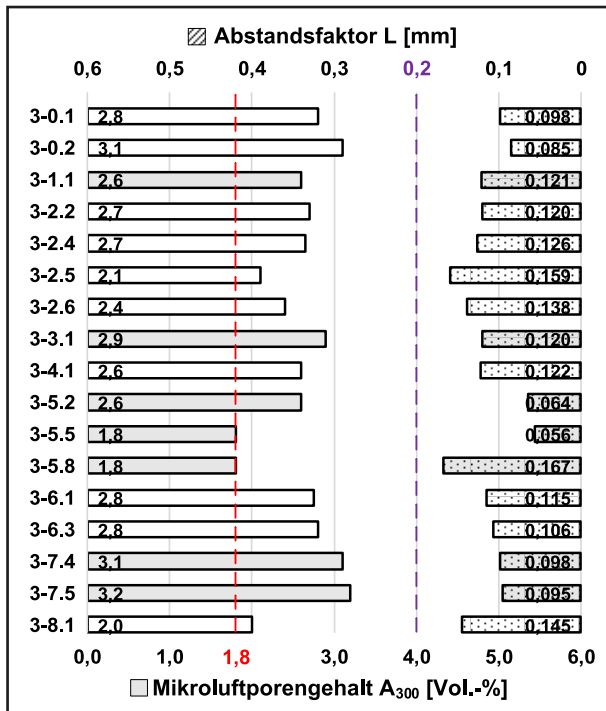


Bild 9-6: Ermittelte Luftporenkennwerte der Unterbetone

Rezeptur-ID	Frischbetonluftporengehalt [Vol.-%]	Festbetonluftporengehalt A [Vol.-%]	Mikroluftporengehalt A ₃₀₀ [Vol.-%]	Abstandsfaktor L [mm]	Anzahl der gemessenen Poren N	Porendurchmesser der Mittelwertklasse [µm]
1	2	3	4	5	6	7
3-0.1	4,8	3,7	2,8	0,098	904	85-100
3-0.2	5,6	4,1	3,1	0,085	1045	65-80
3-1.1	4,7	3,5	2,6	0,121	683	105-120
3-2.2	5,1	4,1	2,7	0,120	738	105-120
3-2.4	5,0	3,5	2,7	0,126	708	105-120
3-2.5	4,3	3,0	2,1	0,159	520	125-140
3-2.6	5,1	3,2	2,4	0,138	624	105-120
3-3.1	5,0	4,0	2,9	0,120	778	105-120
3-4.1	4,8	3,2	2,6	0,122	711	85-100
3-5.2	5,5	4,8	2,6	0,064	1397	55-60
3-5.5	5,5	3,1	1,8	0,056	1541	35-40
3-5.8	5,0	2,7	1,8	0,167	473	105-120
3-6.1	5,9	3,8	2,8	0,115	770	105-120
3-6.3	4,6	3,6	2,8	0,106	835	85-100
3-7.4	5,2	4,6	3,1	0,098	896	105-120
3-7.5	4,6	3,9	3,2	0,095	922	85-100
3-8.1	5,2	3,6	2,0	0,145	615	105-120

Tab. 9-8: Unterbetone – Ergebnisse der Luftporenkennwertbestimmung

gebliebener Luftporengehalt im Festbeton im Vergleich zum Frischbetonwert vorliegt. Die Anzahl der gemessenen Luftporen ist jedoch bei den betrachteten Laborbetonen ganz unterschiedlich ausgefallen. Die Rezeptur 2-2.6 weist ein recht niedriges Gesamtvolumen an Luftporen von 3,4 Vol.-% auf. Jedoch wurden über 1.000 sehr feine Luftporen gemessen. Ein ähnliches Porensystem weisen die Oberbetone ($D > 8$) mit alternativen Gesteinskörnern als Grobkorn (2-5.x) auf. Die Wahl des kleineren Größtkorns ohne Anpassung der Zementleimmenge führte zu deutlich größeren Luftporeneinschlüssen in einer Größenordnung von 145 bis 160 μm . Das spiegelt sich ebenfalls in der geringen Anzahl der Luftporen und in dem größeren Abstandsfaktor bei der Mischung 2-6.1 wider. Dennoch haben alle untersuchten Oberbetone die normativ ausgelegten Grenzwerte erreicht und demnach die Prüfung bestanden.

Bei der mikroskopischen Analyse der Unterbetone an Festbetonprüfkörpern ist eine ähnliche Tendenz der Luftporenart und -verteilung wie bei den Oberbetonen ($D > 8$) zu erkennen. Mit steigendem Mikroluftporengehalt sinkt im überwiegenden Teil der Fälle der Abstandsfaktor L . Der Großteil der Mischungen erreicht den festgelegten Mikroluftporengehalt mit einem sehr starken Überschuss an Mikroluftporen A_{300} . Daher ist auch bei den Unterbetonen in den meisten Fällen eine weitere Luftporengehaltreduzierung bei der Herstellung sinnvoll. Zwei Rezepturen mit eingesetztem Diabas (3-5.5) und Rhyolith (3-5.8) statt rundem Kies haben nur knapp den Grenzwert des Mikroluftporengehaltes von 1,8 Vol.-% erreicht.

Des Weiteren wurde durch das Auszählen der Luftporen festgestellt, dass bei allen Unterbetonen der Luftporengehalt im Festbeton wesentlich geringer ausfiel als am Frischbeton gemessen wurde. Die Anzahl der gemessenen Luftporen liegt überwiegend im Bereich zwischen 700 und 1.000. Die Unterbetone mit dem geringsten Abstandsfaktor weisen oft gleichzeitig eine sehr hohe Menge an sehr feinen Luftporen auf.

9.4 Fazit zu Untersuchungen der Straßenbetone aus Arbeitsphase 3

In Arbeitsphase 3 wurde der Einfluss der Betonzusammensetzung auf ausgewählte Dauerhaftigkeitskennwerte hin untersucht. Zu diesem Zweck wurden 41 Betonmischungen normkonform hergestellt, gelagert und für diverse Prüfungen zur Ermittlung der Festigkeits- und Dauerhaftigkeitskennwerte vorbereitet. Die Festigkeitsuntersuchung bis zum Probekörperalter von 28 Tagen diente als Begleitprüfung um festzustellen, ob die ausgewählten ermittelten Dauerhaftigkeitskennwerte auch auf die Betone aus Arbeitsphase 2 übertragbar sind. Durch eine Gegenüberstellung der Festigkeitskennwerte gleicher Rezepturen aus Arbeitsphase 2 und 3 konnte gezeigt werden, dass über 85 % der hier untersuchten Straßenbetone bei Betrachtung der gegebenen Frischbetonkennwerte eine erwartungsgemäße Festigkeitsentwicklung aufweisen. Bei ca. 10 % der Betone konnte die abweichende Entwicklung der Festigkeiten beurteilt und gedeutet werden. Daher ist davon auszugehen, dass die in Arbeitsphase 3 ermittelten Werte zum Frost-Tausalz-Widerstand und die Luftporenkennwerte auf die Straßenbetone aus Arbeitsphase 2 übertragbar sind.

In einem weiteren Arbeitsschritt der Arbeitsphase 3 wurden die ausgewählten Dauerhaftigkeitskennwerte der betrachteten Straßenbetone ermittelt, ausgewertet und zusammengefasst in Balkendiagrammen nach Fahrbahndeckenbetonart sortiert verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass alle Straßenbetone die normativen Anforderungen an die ausgewählten Dauerhaftigkeitskennwerte erfüllen und sich als resistent gegen den Frost-Tausalz-Angriff erweisen. Die Ober- und Unterbetone haben mit Einsatz alternativer Zemente mit Abwitterungsmengen bis zu 400 g/m^2 zwar grundsätzlich niedrige, aber dennoch höhere Abwitterungsmengen im Vergleich zu den Ausgangsmischungen (CEM I 42,4 N). Insgesamt zeigen die Unterbetone mit einem runden Kies als Grobkorn größere Abwitterungsmengen als Straßenbetone mit gebrochenem Grobkorn. Die mikroskopische Analyse der Festbetonprismen deckt auf, dass bei den meisten Oberbetonen ($D > 8$) und Unterbetonen durch das Anpassen der Zugabemenge des Luftporenbildners das Potenzial für eine zusätzliche Reduzierung des Luftporengehalts gegeben ist.

10 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse zum Einfluss der Ausgangsstoffe von Straßenbetonen auf die 28 d-Spaltzugfestigkeit

10.1 Allgemeines

Basierend auf den Ergebnissen aus dem gesamten Forschungsvorhaben erfolgte die Quantifizierung des Einflusses einzelner Ausgangsstoffe auf die 28 d-Spaltzugfestigkeit der betrachteten Straßenbetone unter Berücksichtigung des beobachteten Abwitterungspotenzials aus der CDF-Prüfung. Die hierbei gewonnenen Erfahrungswerte aus insgesamt drei abgeschlossenen Arbeitsphasen werden in Form von Grafiken und Tabellenwerten im folgenden Kapitel nach der Einflussart sortiert, präsentiert und diskutiert. Im Hauptdokument werden ausschließlich die relevantesten Einwirkungen zur Übersicht dargestellt. Ein Überblick weiterer Einflussparameter ist dem Anhang III Bild III – 1 bis Bild III – 7 und Tabelle III – 39 bis Tabelle III – 51 zu entnehmen. Auf Basis der Ergebnisse des gesamten FE-Vorhabens erfolgt als Fazit eine Wichtung aller Einflüsse der Ausgangsstoffe auf die Spaltzugfestigkeit in tabellarischer Form.

10.2 Auswertungsverfahren

Die meisten Untersuchungen der Spaltzugfestigkeit in diesem Forschungsprojekt erfolgten im Prüfkörperalter von 28 Tagen. Um die Auswirkung aller betrachteten Einflussparameter auf die Spaltzugfestigkeit zu quantifizieren, wurden die meisten erreichten Spaltzugfestigkeitsmittelwerte der Betone nach der Einflussart sortiert in den folgenden Linien- bzw. Balkendiagrammen abgebildet. Blau hervorgehobene Datenpunkte und Balken geben die Daten der Waschbetone, rote die der Oberbetone ($D > 8$) und schwarze die der Unterbetone wieder. Der Einfluss des Luftporengehaltes, des w/z -Wertes, der Zementmenge und des gewählten Größtkorns der Gesteinskörnung erfolgte in Form von Linien- bzw. Balkendiagrammen. Dabei handelt es sich ausschließlich um Einflussparameter, welche sich untereinander in nur einem Faktor unterscheiden. Auf Basis der ermittelten Spaltzugmittelwerte wurden Trendlinien der Festigkeitsentwicklung unter Einfluss des jeweiligen Variationsparameters zu jeder Straßenbetonart erzeugt. In einem nächsten Schritt wurden

die Geradengleichungen der Trendlinien ausgelesen und ausgewertet. Die errechnete Steigung der Trendlinie stellt somit eine grobe Kennzahl des Wirkungspotenzials des betrachteten Einflussparameters dar.

Des Weiteren wird das Bestimmtheitsmaß der jeweiligen Trendlinie in der Grafik angegeben. Diese gibt wieder, wie gut die Trendlinie alle Ergebnisse der dazugehörigen Spaltzugmittelwerte abbildet. Aufgrund der relativ niedrigen resultierenden Bestimmtheitsmaße lassen sich bei der Auswertung des Einflusses keine genauen Wertbildungen des Einflusses des jeweiligen Parameters vornehmen. Daher ist der jeweils errechnete Anstieg der Trendlinien im Folgenden als grober Richtwert für den theoretisch möglichen Einfluss der jeweils betrachteten Variationsparameter anzusehen. Es ist auch zu beachten, dass die Bestimmtheitsmaße statistisch sehr stark von der Anzahl der betrachteten Ergebnisse abhängig sind. Die Aussagekraft der Bestimmtheitsmaße wächst mit steigender Datenmenge in der Grafik. In diesem Forschungsprojekt wurde aufgrund des großen Spektrums an Variationsparametern eine überschaubar geringe Anzahl an Betonagen je Betonrezeptur durchgeführt. Die vorliegende Datenmenge ist bei der Bewertung der dargestellten Bestimmtheitsmaße der jeweiligen Ergebnisse zu berücksichtigen.

Die Auswertung zur Erfassung des Einflusses der Ausgangsstoffe mit Bezug auf die Ausgangsrezeptur erfolgte in Form von Balkendiagrammen. Die einzelnen Spaltzugmittelwerte der Betonrezepturen mit konkretem Ausgangsstoff wurden in einen gemeinsamen Mittelwert unter Angabe der Streuung umgerechnet. Die ermittelten Differenzen sind jeweils in tabellarischer Form neben dem entsprechenden Balkendiagramm abgebildet, z. B. Tabelle 10-6.

Als einer der wichtigsten Dauerhaftigkeitskenngrößen der Straßenbetone wurde die Abwitterungsmenge nach 28 FTW bestimmt. Die Abwitterungen der Laborbetone liegen weit unter der allgemein etablierten Obergrenze von 1.500 g/m^2 und unterschreiten alle den Wert von 500 g/m^2 . Des Weiteren wurde auf der Basis der gewonnenen Daten aus der Arbeitsphase 3 eine Gegenüberstellung des Abwitterungspotenzials der betrachteten Straßenbetone in Abhängigkeit vom Variationsparameter in tabellarischer Form dargestellt. Der Vergleich findet zwischen der einzelnen Betonrezeptur und der dazu passenden Ausgangsrezeptur mit einem äh-

lichem Luftporengehalt statt. Die Differenz der Abwitterung nach 28 FTW ist als Prozentsatz eingegeben (z. B. Tabelle 10-2).

10.3 Einflusspotenzial des Parameters „Luftporengehalt“

Der Luftporengehalt des Frischbetons wurde mit der Zugabe von Luftporenbildnern beim Mischen der Bestandteile der jeweiligen Betonrezeptur reguliert. Um den Einfluss des Frischbetonluftporengehaltes zu untersuchen, wurde die Ausgangsrezeptur der jeweiligen Betonart mehrmals mit verschiedenen Luftporengehalten in jeder Arbeitsphase betoniert. Die Datenlage zu dem vorliegenden Einflussparameter ist daher viel größer ausgefallen als bei den übrigen Einflussparametern. Das Liniendiagramm der Spaltzugfestigkeitsentwicklung unter Einfluss vom Frischbetonluftporengehalt ist links in Bild 10-1 abgebildet. Die dazugehörige Auswertung der Trendgeraden und der Vergleich der Abwitterungsmenge nach 28 FTW der betrachteten Ausgangsbetone aus Arbeitsphase 3 sind rechts in Form von zwei Tabellen (Tabelle 10-1 und Tabelle 10-2) dargestellt.

In Bild 10-1 können die ermittelten Spaltzugfestigkeiten in Abhängigkeit von den dazugehörigen gemessenen Frischbetonluftporengehalten der einzelnen Betonchargen der jeweiligen Ausgangsrezeptur abgelesen werden. Es ist eine deutliche Abstufung der Spaltzugfestigkeitsentwicklung unter Einfluss des Luftporengehaltes der einzelnen Straßenbetonarten zu erkennen. Im gesamten Luftporengehaltsspektrum weisen die Waschbetone, gefolgt von den Oberbetonen (D>8), erwartungsgemäß die Höchst-

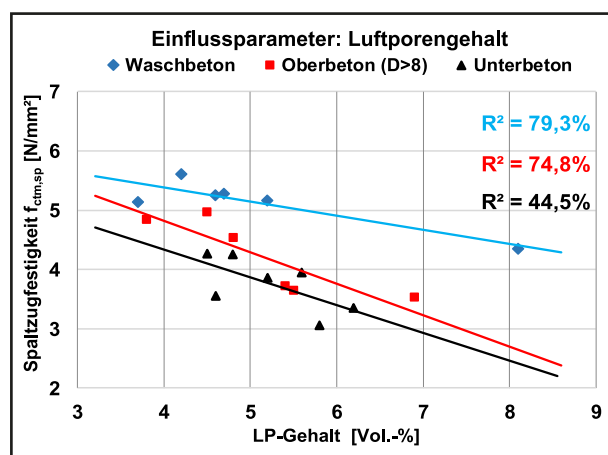


Bild 10-1: Einfluss des Luftporengehaltes auf die Spaltzugfestigkeit

werte der Spaltzugfestigkeit auf. Die Trendgerade der Unterbetone liegt etwas niedriger als die der Oberbetone (D>8). Die Bestimmtheitsmaße der Wasch- und Oberbetone liegen in einer Größenordnung von ca. 75 %, die der Unterbetone bei ca. 45 %. Oben rechts in der Tabelle sind die zugehörigen Geradengleichungen der einzelnen Trendlinien angegeben. In weiteren Zeilen der Tabelle sind mehrere Beispiele für die Auswertung der Geradengleichungen angegeben. In der letzten Zeile der Tabelle 10-1 sind die resultierenden Steigungen der Trendgeraden und somit eine grobe Einflussgröße des Luftporengehaltes auf die Spaltzugfestigkeit angegeben. Der Wert der Steigung gibt wieder, in welcher Größenordnung eine Veränderung der Spaltzugfestigkeit bei einer Anpassung des Luftporengehaltes um 1 Vol.-% vorliegt. Bei Waschbeton würden demnach beim Anstieg des Frischbetonluftporengehaltes von 1 Vol.-% um bis zu 0,24 N/mm² geringere Spaltzugfestigkeiten erwartet. Bei Oberbetonen (D>8) und Unterbetonen liegt die Einflussgröße bei ca. 0,5 N/mm².

In der Tabelle 10-2 ist der dazugehörige Vergleich der Abwitterungsmengen der betrachteten Ausgangsrezepturen unter Einfluss des Luftporengehaltes und die prozentuale Differenz zur Ausgangsrezeptur angegeben. Die Pfeillage gibt wieder, ob die Abwitterungsmenge durch das Anpassen der Einflussgröße gestiegen oder gesunken ist. Demnach wurde unerwartet durch das Ansteigen des Luftporengehaltes der Waschbetone von 4,2 auf 4,7 Vol.-% ein geringfügiger absoluter Anstieg der Abwitterungsmenge (prozentual 37 %) beobachtet. Beim Ober- und Unterbeton wurde hingegen eine

Betonart	Waschbeton	Oberbeton (D>8)	Unterbeton	
1	2	3	4	5
Geradengleichung	$y = -0,2371x + 6,3337$		$y = -0,5287x + 6,9317$	$y = -0,4692x + 6,2099$
Auswertung der Trendgeradengleichung	x [Vol.-%]	y [N/mm²]		
	4	5,39	4,82	4,33
	5	5,15	4,29	3,86
	6	4,91	3,76	3,39
7	4,67	3,23	2,93	
Steigung	0,24 [N/mm²]	0,53 [N/mm²]	0,47 [N/mm²]	

Tab. 10-1: Auswertung der Trendgeraden des Luftporengehaltseinflusses

Betonart	Waschbeton	Oberbeton (D>8)	Unterbeton			
1	2	3	4	5	6	7
Mischungs ID	1-0.1	1-0.2	2-0.1	2-0.2	3-0.1	3-0.2
LP-Gehalt [Vol.-%]	4,2	4,7	3,8	5,4	4,8	5,6
Abw. [g/m²]	213	291	45	30	201	134
Differenz der Abw.		37%		33%		33%

Tab. 10-2: Einfluss des Luftporengehaltes auf den Frost-Tausalz-Widerstand

erwartete Reduktion der Abwitterungsmenge durch den Anstieg des Luftporengehaltes um ca. 30 % festgestellt.

Des Weiteren erfolgt die Darstellung der Untersuchungsergebnisse zum Einfluss weiterer Ausgangsparameter der Straßenbetone auf deren 28 d-Spaltzugfestigkeiten auf zwei Arten.

Im ersten Fall wurden weiterhin die tatsächlich gemessenen Spaltzugmittelwerte der Betonchargen zur Darstellung des Einflusses der Ausgangsstoffe betrachtet, ohne den Einfluss des Luftporengehaltes auf die Festigkeit zu berücksichtigen.

In einer weiteren Darstellung wurde versucht, die Spaltzugmittelwerte von dem Einfluss des Luftporengehaltes rechnerisch zu bereinigen. Hierzu wurden die gleichen Spaltzugmittelwerte auf einen festgelegten Luftporengehalt normiert, indem die gesammelten Erfahrungswerte zum Einfluss des Luftporengehaltes zum Einsatz kamen. Die rechnerische Normierung der Spaltzugmittelwerte erfolgte demnach unter dem Einsatz der oben aufgezeigten Steigungen der Trendgeraden. Die Festigkeitsmittelwerte der Waschbetone wurden auf einen festgelegten Frischbetonluftporengehalt von 5,0 Vol.-%

und die Oberbetone (D>8) und Unterbetone auf einen von 4 Vol.-% normiert.

Die Darstellung des Einflusses des w/z-Wertes auf die Spaltzugfestigkeit der Straßenbetone erfolgt im Weiterem auf beide oben beschriebene Arten.

10.4 Einflusspotenzial des Parameters „w/z-Wert“

Bei den Untersuchungen des Forschungsvorhabens wurde der w/z-Wert bei allen Betonarten um bis zu drei Stufen zwischen 0,40 und 0,45 variiert.

Die Gesamterkenntnisse des Einflusses des w/z-Wertes wurde auf die zwei bereits beschriebenen Arten unten in zwei Grafiken und dazugehörigen Tabellen abgebildet. Links in Bild 10-2 sind die Ergebnisse mit den tatsächlich gemessenen Spaltzugfestigkeitsmittelwerten, rechts die mit den normierten Mittelwerten dargestellt. Die entsprechenden Auswertungstabellen sind unter der jeweiligen Grafik angegeben.

Anhand des Trendlinienverlaufs wird ersichtlich, dass durch den steigenden w/z-Wert die Spaltzug-

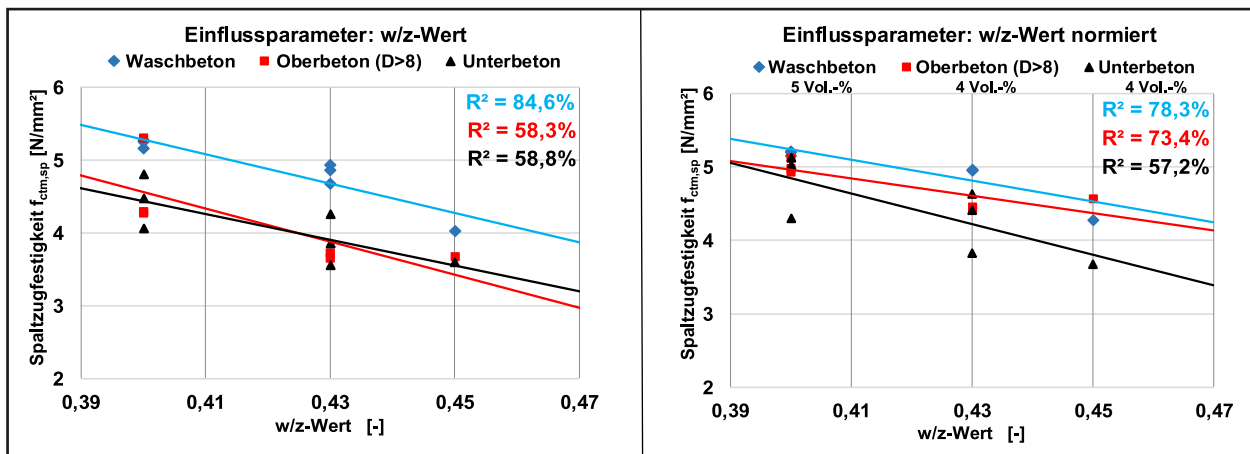


Bild 10-2: Einfluss des w/z-Wertes auf die Spaltzugfestigkeit; unbehandelte Mittelwerte (links); normierte Mittelwerte (rechts)

Betonart		Waschbeton	Oberbeton (D>8)	Unterbeton
1	2	3	4	5
Geradengleichung		y = -20,2x + 13,4	y = -22,7x + 13,7	y = -17,7x + 11,5
Auswertung der Trendgeradengleichung	x [-]	y [N/mm²]		
	0,40	5,32	4,62	4,42
	0,45	4,31	3,49	3,54
	0,50	3,30	2,35	2,65
	0,55	2,29	1,22	1,77
Steigung		1,01 [N/mm²]	1,14 [N/mm²]	0,89 [N/mm²]

Betonart		Waschbeton	Oberbeton (D>8)	Unterbeton
1	2	3	4	5
Geradengleichung		y = -14,208x + 10,926	y = -11,825x + 9,6967	y = -20,875x + 13,198
Auswertung der Trendgeradengleichung	x [-]	y [N/mm²]		
	0,40	5,24	4,97	4,85
	0,45	4,53	4,38	3,80
	0,50	3,82	3,78	2,76
	0,55	3,11	3,19	1,72
Steigung		0,71 [N/mm²]	0,59 [N/mm²]	1,04 [N/mm²]

Tab. 10-3: Auswertung der Trendgeraden des w/z-Wert-Einflusses; unbehandelt (links); normiert (rechts)

festigkeit deutlich sinkt. Ohne rechnerische Bereinigung der Daten verlaufen die Trendlinien der Oberbetone ($D>8$) und Unterbetone auf einem ähnlichen Niveau, die der Waschbetone auf einem deutlich höheren. Die jeweilige Steigung der Trendlinien entspricht einer Veränderung der mittleren Spaltzugfestigkeit bei einer Anpassung des w/z -Wertes von 0,05. Für die Waschbetone würden bei Absenkung des w/z -Wertes um 0,05 um bis zu 1 N/mm² höhere Spaltzugfestigkeiten erwartet. Die gleiche Anpassung des w/z -Wertes würde demnach, anhand der hier vorliegenden Erkenntnisse, bei den Oberbetonen ($D>8$) eine Spaltzugfestigkeitsveränderung von bis zu 1,14 N/mm² und bei den Unterbetonen eine von bis zu 0,89 N/mm² hervorrufen. Das Bestimmtheitsmaß der Oberbetontrendlinie ist von 58,3 auf 73,4 % angestiegen. Zudem ist zu beobachten, dass durch die Bereinigung der Daten der Einfluss des w/z -Wertes auf die Spaltzugfestigkeiten der Wasch- und Oberbetone ($D>8$) bedeutend geringer ausfiel. Der Einfluss auf die Spaltzugfestigkeiten der Unterbetone ist hingegen um ca. 17 % gestiegen.

Beim Einfluss des w/z -Wertes auf die Abwitterungsmenge beim Frost-Tausalz-Versuch ist ein positiver Effekt bei der Erhöhung des w/z -Wertes zu beobachten (siehe Tabelle 10-4). Bei den Waschbetonen erzeugte demnach eine Erhöhung des w/z -Wertes von 0,40 auf 0,43 eine Reduktion der Abwitterungsmenge um 24 %, bei Oberbetonen um 68 % und bei Unterbetonen um 25 %.

Betonart	Waschbeton		Oberbeton ($D>8$)		Unterbeton		
	1	2	3	4	5	6	7
Mischungs ID	1-0.2	1-1.2	2-1.3	2-0.2	3-1.1	3-0.1	
W/Z-Wert:	0,40	0,43	0,40	0,43	0,40	0,43	
LP-Gehalt [Vol.%]	4,7	6,2	5,2	5,4	4,7	4,8	
Abw. [g/m ²]	291	220	94	30	268	201	
Differenz der Abw.	24%		68%		25%		

Tab. 10-4: Einfluss des w/z -Wertes auf den Frost-Tausalz-Widerstand

10.5 Einflusspotenzial des Parameters „Zementart“

Zur Quantifizierung des Einflusses unterschiedlicher Zemente auf die Spaltzugfestigkeitsentwicklung der Straßenbetone wurden je nach Betonart bis zu sieben verschiedene Zemente bei der Untersuchung eingesetzt. Diese unterschieden sich in mehreren Eigenschaften untereinander, wie z. B. die Festigkeitsklasse oder der Hüttensandgehalt. Tabelle 10-5 gibt einen Überblick über die wichtigsten Zementeigenschaften. Es wurden die Zemente CEM I, CEM II/A-S, CEM II/B-S und CEM III/A mit den Festigkeitsklassen 32,5 R, 42,5 N und 42,5 R eingesetzt. Bei den Waschbetonen kamen sechs und bei den Oberbetonen ($D>8$) und Unterbetonen sieben verschiedene Zemente zum Einsatz. Da jeder Zement eine Reihe von Eigenschaften aufwies, welche im Einzelnen auf ihre Weise die Spaltzugfestigkeit beeinflussten, war die Darstellung des zu zeigenden Einflusses in Form der Trendlinien zwischen den einzelnen Zementarten nicht aussagekräftig.

Daher wurden die Erkenntnisse über die Spaltzugfestigkeitsentwicklung unter Einwirkung verschiedener Zementarten in Form von Balkendiagrammen dargestellt. Die Ergebnisse sind mit und ohne Normierung in zwei verschiedenen Balkendiagrammen und dazugehörigen Auswertungstabellen angegeben. Bei den grau hinterlegten Ergebnisbalken handelt es sich um Ergebnisse der Straßenbetonrezepturen, welche nach einer Betonage in Arbeitsphase 1 begründet aus den Untersuchungen in weiteren Arbeitsphasen ausgeschlossen wurden. Dazu zählen die betrachteten Betone mit dem Zement 1 und 3.

Die in den Tabellen 10-6 links und rechts angegebenen Prozentwerte stellen die Differenzen der erreichten Spaltzugfestigkeiten im Vergleich zu den Spaltzugfestigkeiten der dazugehörigen Ausgangs-

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	[cm ² /g]	3065	2935	3575	3823	4030	4314	4260
Na ₂ O-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

Tab. 10-5: Eigenschaften der verwendeten Zemente

Zementnummer/-art		Waschbeton	Oberbeton (D>8)	Unterbeton
Festigkeitsdifferenz				
1	2	3	4	5
0	CEM I 42,5 N	0 %	0 %	0 %
1	CEM I 42,5 R	4 %	-4 %	0 %
2	CEM II/A-S 42,5 R	-3 %	13 %	9 %
3	CEM II/B-S 32,5 R	-	-12 %	-16 %
4	CEM II/B-S 42,5 N	13 %	15 %	21 %
5	CEM II/B-S 42,5 R	7 %	6 %	18 %
6	CEM III/A 42,5 R	14 %	7 %	25 %

Zementnummer/-art		Waschbeton	Oberbeton (D>8)	Unterbeton
Festigkeitsdifferenz				
1	2	3	4	5
0	CEM I 42,5 N	0 %	0 %	0 %
1	CEM I 42,5 R	6 %	3 %	12 %
2	CEM II/A-S 42,5 R	-1 %	7 %	5 %
3	CEM II/B-S 32,5 R	-	-6 %	-9 %
4	CEM II/B-S 42,5 N	15 %	11 %	14 %
5	CEM II/B-S 42,5 R	6 %	0 %	10 %
6	CEM III/A 42,5 R	16 %	0 %	16 %

Tab. 10-6: Differenz der 28 d-Spaltzugfestigkeit zwischen Ausgangsbeton und Straßenbetonen mit alternativer Zementart; Festigkeitsdifferenz aus unbehandelten Mittelwerten (links); Festigkeitsdifferenz aus normiert Mittelwerten (rechts)

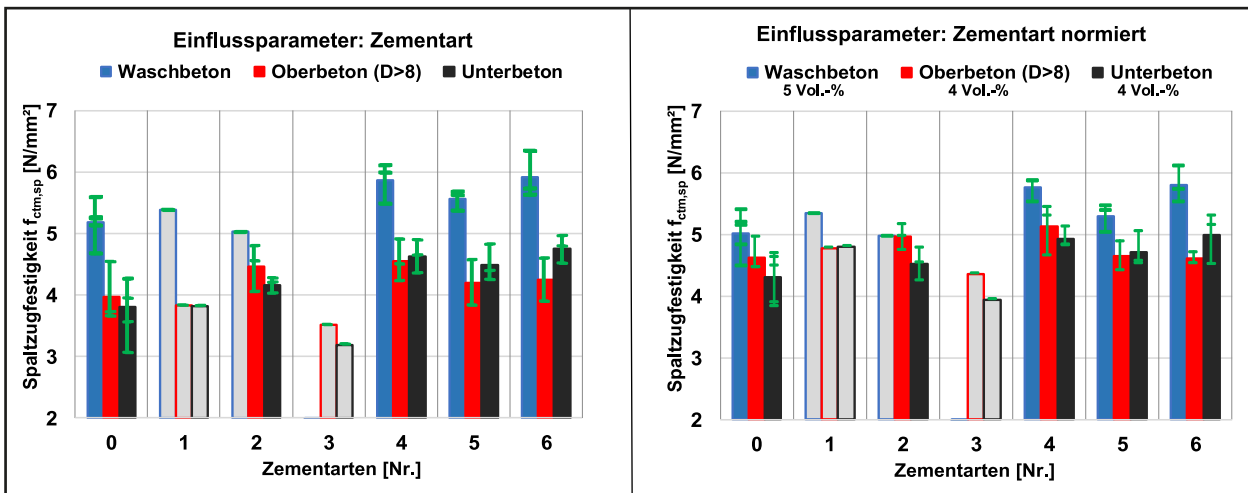


Bild 10-3: Einfluss der Zementart auf die Spaltzugfestigkeit; unbehandelte Mittelwerte (links); normierte Mittelwerte (rechts)

rezepturen dar. Da der Zement CEM I 42,5 N unter der Nummer 0 in diesem Forschungsprojekt als Ausgangszement eingesetzt wurde, beträgt die Differenz in der entsprechenden Zeile 0 %.

In Bild 10-3 ist zu erkennen, dass ohne die Normierung der Spaltzugfestigkeiten, die nach Arbeitsphase 1 aussortierten Betonrezepturen mit dem eingesetzten CEM I 42,5 R oder CEM II/B-S 32,5 R in den meisten Fällen die Spaltzugfestigkeit negativ beeinflussten.

In der jeweiligen dritten Spalte der abgebildeten Tabellen sind die Einflüsse der Zemente auf die Waschbetonspaltzugfestigkeit abgebildet. Hierbei zeigen die Zemente 4 und 6 einen positiven Einfluss. Die maximale Festigkeitssteigerung beim Einsatz von CEM III/A liegt hierbei bei 14 %. Bei Oberbetonen (D>8) (Spalte 4) zeigte der Einsatz von Zement 2 und 4 einen Spaltzugfestigkeitsanstieg von ca. 15 %. Die Festigkeiten bei den Unterbetonen beim Einsatz der Zemente 4 bis 6 weisen bis zu 25 % höhere Spaltzugfestigkeiten im Vergleich zu dem Ausgangszement CEM I 42,5 N (Zement 0) auf.

Wurden die Spaltzugmittelwerte auf festgelegte Frischbetonluftporengehalte normiert, so ist zu erkennen, dass die Streuung bei dem überwiegenden Teil der Spaltzugfestigkeiten geringer ausfiel. Durch die Anpassung der Spaltzugfestigkeitswerte hat sich zusätzlich ergeben, dass beispielsweise der nicht mehr betrachtete CEM I 42,5 R-Zement keine negative Auswirkung auf die Spaltzugfestigkeit aufwies. Bei Waschbetonen bewirkte der Einsatz der Zemente 4 und 6 ebenso höhere Spaltzugfestigkeiten. Bei Oberbetonen (D>8) sank der Einfluss des Zementes 5 und 6 hingegen auf 0 %. Bei Unterbetonen ist der positive Effekt des Zementaustausches ebenfalls etwas zurückgegangen, liegt aber im Schnitt über 10 %.

Beim Vergleich des Abwitterungspotenzials der Straßenbetone mit verschiedenen Zementarten ist in den meisten Fällen eine stärkere Abwitterung nach dem Austausch des Ausgangszementes zu beobachten (siehe Tabelle 10-7).

Bei Waschbetonen bewirkte der Austausch des Ausgangszementes durch CEM II/B-S 42,5 N eine bis zu 48 % höhere Abwitterung. Der Austausch des

Betonart	Waschbeton				Oberbeton (D>8)						Unterbeton				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Mischungs ID	1-0.1	1-2.4	1-2.5	1-2.6	2-0.2	2-2.2	2-2.4	2-2.5	2-0.1	2-2.6	3-0.1	3-2.2	3-2.4	3-2.5	3-2.6
Zementart	0	4	5	6	0	2	4	5	0	6	0	2	4	5	6
LP-Gehalt [Vol.-%]	4,2	4,0	4,1	4,0	5,4	4,8	4,8	4,6	3,8	4,2	4,8	5,1	5,0	4,3	5,1
Abw. [g/m ³]	213	314	162	199	30	138	274	152	45	352	201	244	403	363	402
Differenz der Abw.		↗	↘	↘		↗	↗	↗	↗			↗	↗	↗	↗
		48%	24%	6%		362%	816%	408%		685%		22%	101%	81%	100%

Tab. 10-7: Einfluss ausgewählter Zemente auf den Frost-Tausalz-Widerstand

Zementes von CEM I auf CEM II/B-S 42,5 R zeigte einen Widerstandszuwachs des Straßenbetons gegen Frost-Tausalz-Angriff von 24 %.

Bei den Oberbetonen (D>8) wird ein Abwitterungszuwachs um 362 bis 816 % beobachtet. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass es sich dabei um einen Abwitterungszuwachs von 30 g/m² auf 152 bzw. 274 g/m² handelt. Laut Regelwerken ist ein Beton mit einer Abwitterung unter 1.500 g/m² als unbeschädigt zu betrachten.

Bei Unterbetonen liegt der Abwitterungsanstieg durch Zementaustausch zwischen 22 % und ca. 100 %.

Eine ausführliche Diskussion und Darstellung der Quantifizierung des Einflusses weiterer im FE-Vorhaben betrachteter Einflussparameter auf die 28 d-Spaltzugfestigkeit der Straßenbetone sind dem Anhang III zu entnehmen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen deuten darauf hin, dass der Einsatz hüttensandhaltiger Zemente (max. Hüttensandgehalt von 40 M.-%) zwar die Abwitterungsmenge der Straßenbetone unter Einwirkung vom Frost-Tausalz-Angriff erhöht, diese aber unter 500 g/m² bleibt. Zudem werden höhere Festigkeiten unter Einsatz von CEM II- und CEM III-Zementen im Vergleich zum im Straßenbau konventionell eingesetzten Portlandzement CEM I beobachtet. Betrachtet man den ökologischen Aspekt, so weisen die CEM II bzw. CEM III Zemente einen geringeren CO₂-Fußabdruck als die Portlandzemente auf, was eine günstige Auswirkung auf die Reduktion der globalen CO₂-Emissionen bedeutet. Aus diesem Grund kann die Verwendung von hüttensandhaltigen Zementen für den Straßenbau empfohlen werden.

10.6 Wichtung der Einflüsse der untersuchten Parameter

Eine Wichtung zum Einfluss der Ausgangsstoffe auf die Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit der Va-

riationsparameter geben Tabelle 10-8 bis Tabelle 10-10. Bei den Werten in Spalten 6 und 7 fand eine Normierung der Spaltzugfestigkeiten auf festgelegte LP-Gehalte statt, um den Einfluss der LP-Gehalte auszuschließen. Die Festigkeitsmittelwerte der Waschbetone wurden auf einen Frischbetonluftporengehalt von 5,0 Vol.-% und die Oberbetone (D>8) und Unterbetone auf einen von 4 Vol.-% normiert, vgl. Kapitel 10.3.

Bei den Waschbetonen zählt der Austausch des Ausgangszementes CEM I durch CEM II/B-S 42,5 N und durch CEM III/A 42,5 R. laut Tabelle 10-8 zu den wirkungsvollsten Parametern, welche die Spaltzugfestigkeitsentwicklung positiv beeinflussen. Eine Erhöhung des w/z-Wertes oder z. B. der Einsatz einer Ausfallkörnung wirkte sich festigkeitsmindernd aus. Die Variation des Frischbetonluftporengehaltes erzeugte laut der Untersuchungsergebnisse nur einen geringfügigen Einfluss.

Wurden die Mittelwerte der 28 d-Spaltzugfestigkeiten auf festgelegte Frischbetonluftporengehalte normiert, so veränderte sich die Auswirkung einiger Einflussparameter ebenfalls. Diese Werte sind in Tabelle 10-8 bis Tabelle 10-10 in der Spalte 7 grau hervorgehoben. In den überwiegenden Fällen wurde der Einfluss der Variationsparameter durch den rechnerischen Normierungsvorgang reduziert. Im Fall der Waschbetone ist der Einfluss des w/z-Werts bei der Wichtung von „stark“ auf „bedeutend“ abgestuft worden.

Bei den Oberbetonen (D>8) erwiesen sich in Bezug auf eine Festigkeitssteigerung die Reduzierung des w/z-Wertes und der Austausch des Rhyoliths durch gebrochenen Kies (siehe Tabelle 10-9) als wirkungsvoll. Ein bedeutender positiver Einfluss wurde durch den Austausch des Ausgangszementes durch CEM II/A bzw. CEM II/B-S 42,5 N und durch die Anpassung des Luftporengehaltes erzielt, ein negativer Einfluss dagegen durch die Wahl einer alternativen stetigen Sieblinie A bzw. Sieblinie AB mit Ausfallkörnung. Es bleibt festzuhalten, dass bei dem Einsatz alternativer Zemente mit Hüttensandgehalt höhere Abwitterungsmengen bei dem Frost-Tau-

salz-Angriff beobachtet wurden. Ein geringfügiger negativer Einfluss auf die Spaltzugfestigkeitsentwicklung wurde bei den Oberbetonen (D>8) beispielsweise durch die Anpassung des Größtkorns von fein zu grob beobachtet.

Am stärksten von dem Normierungsvorgang betroffen sind die Einflüsse auf die Festigkeitseigenschaften

der Oberbetone (D>8). In den überwiegenden Fällen ist die Wirkungsstärke der jeweils betroffenen Einflussparameter durch die Normierung um eine Wichtigkeitsstufe reduziert worden. Dazu zählen der Einfluss durch die Anpassung des w/z-Wertes, der des Austausches durch bestimmte alternative Zementarten, der des Rhyoliths- durch Gabbro-Gesteins als Grobkorn und der durch den Einsatz

Variationsparameter	Ausgangsrezeptur Waschbeton	Variationschritt	Einfluss nicht normiert		Einfluss normiert	
			Wirkung (bis zu)	Wichtung	Wirkung (bis zu)	Wichtung
1	2	3	4	5	6	7
Luftporengehalt	5,0 Vol.-%	+1 Vol.-%	-0,24 N/mm ²	-		
w/z-Wert	0,40	+0,05	-1,01 N/mm ²	---	-0,71 N/mm ²	--
Zementart	CEM I 42,5 N	CEM II/A-S 42,5 R	-3%	o	-1%	o
		CEM II/B-S 42,5 N	13%	++	15%	++
		CEM II/B-S 42,5 R	7%	+	6%	+
		CEM III/A 42,5 R	14%	++	16%	++
Zementmenge	420 kg/m ³	+20 kg/m ³	-0,04 N/mm ²	o	-0,01 N/mm ²	o
Sand	A	B	1%	o	2%	o
Grobkorn (Beton 0-8)	Rhyolith	Gabbro	-2%	o	-3%	o
		Diabas	1%	o	-1%	o
Sieblinie	A	AB	5%	+	7%	+
		Ausfallkörnung	-15%	--	-16%	--
Zusatzmittel	Acrylat	Polycarb.	0%	o	1%	o

Legende: [-] Wichtung der negativen Wirkung; [Wichtung] Wichtung der Auswirkung auf die Spaltzugfestigkeit; o „kaum“ + +/- - „bedeutend“
 [+] Wichtung der positiven Wirkung; [Wichtung] Wichtung durch Normierung beeinflusst; +/- „gering“ ++ +/- -- „stark“

Tab. 10-8: Zusammenfassung – Einfluss der Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung auf die Spaltzugfestigkeit der Waschbetone

Variationsparameter	Ausgangsrezeptur Oberbeton (D>8)	Variationschritt	Einfluss nicht normiert		Einfluss normiert	
			Wirkung (bis zu)	Wichtung	Wirkung (bis zu)	Wichtung
1	2	3	4	5	6	7
Luftporengehalt	4,0 Vol.-%	+1 Vol.-%	-0,53 N/mm ²	--		
w/z-Wert	0,43	+0,05	-1,14 N/mm ²	---	-0,59 N/mm ²	--
Zementart	CEM I 42,5 N	CEM II/A-S 42,5 R	13%	++	7%	+
		CEM II/B-S 42,5 N	15%	++	11%	++
		CEM II/B-S 42,5 R	6%	+	0%	o
		CEM III/A 42,5 R	7%	+	0%	o
Zementmenge	340 kg/m ³	+20 kg/m ³	-0,14 N/mm ²	o	-0,03 N/mm ²	o
Sand	A	B	-1%	o	1%	o
Grobkorn (Beton 0-22)	Rhyolith	Diabas	5%	+	12%	+
		Kies	-2%	o	1%	o
Grobkorn (Beton 0-16)	Rhyolith	Kies (g)	22%	+++	24%	+++
		Gabbro	7%	+	4%	o
Änderung Größtkorn	22 mm	von 8 auf 16 mm	-0,28 N/mm ²		-0,15 N/mm ²	
		von 16 auf 22 mm	-0,21 N/mm ²	-	-0,11 N/mm ²	o
		von 22 auf 32 mm	-0,35 N/mm ²		-0,19 N/mm ²	
Sieblinie	AB	A	-18%	--	-30%	---
		B	-1%	o	3%	o
	stetig	Ausfallkörnung	-17%	--	-7%	-
Zusatzmittel	Acrylat	Polycarb.	0%	o	8%	+

Legende: [-] Wichtung der negativen Wirkung; [Wichtung] Wichtung der Auswirkung auf die Spaltzugfestigkeit; o „kaum“ + +/- - „bedeutend“
 [+] Wichtung der positiven Wirkung; [Wichtung] - Wichtung durch Normierung beeinflusst; +/- „gering“ ++ +/- -- „stark“

Tab. 10-9: Zusammenfassung – Einfluss der Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung auf die Spaltzugfestigkeit der Oberbetone (D>8)

von Ausfallkörnung. Als unbedeutend wird der Einfluss der Größtkornanpassung durch die Normierung eingestuft.

In den bisherigen Arbeitsphasen wurden die Unterbetone mit dem runden Kies als Ausgangsgrobkorn durch die Vielzahl der untersuchten Einflussparameter am stärksten beeinflusst (siehe Tabelle 10-10). Das ist durch die Wahl der Ausgangsrezeptur mit vergleichsweise niedrigem Festigkeitsniveau unter Lagerungsbedingungen A bedingt. Die größten Spaltzugfestigkeitsdifferenzen im Vergleich zu den Spaltzugfestigkeiten der Ausgangsrezeptur wurden demnach unter Anpassung des w/z-Wertes, unter Einsatz der meisten alternativen Zementarten und durch den Austausch von 32 mm runden Kies auf 16 mm gebrochene Splitte festgestellt. Ein deutlicher Einfluss wurde beim Anpassen des Frischbetonluftporengehaltes, beim Austausch des Sandes A durch feinkornreicheren Sand B und unter Einsatz von CEM II/B-S 42,5 R beobachtet.

Bei den Unterbetonen war durch die Normierung der Einfluss der alternativen Zementarten, der des Sandaustausches und der der Anpassung der Sieblinien betroffen. Der Einfluss der betroffenen Zemente ist ebenfalls um eine Stufe gesunken. Der Sandaustausch bewirkte ausschließlich einen geringfügigen Einfluss auf die 28 d-Spaltzugfestigkeit

ten der Unterbetone. Durch die Normierung entwickelten sich die Einflüsse des Variationsparameters „Sieblinie“ unterschiedlich stark. Die Anpassung der Sieblinie AB auf Sieblinie A wirkte nach der Normierung bedeutend negativ, und die an Feinanteilen reiche Sieblinie B deutlich positiver. Ein Einfluss der Sieblinie AB mit der Ausfallkörnung ist demnach nach der Normierung kaum vorhanden.

Tendenziell können die Variationsparameter wie folgt nach deren Einflussgröße einsortiert werden. Die Spaltzugfestigkeit der untersuchten Straßenbetone lässt sich stark durch das Anpassen des Frischbetonluftporengehaltes, das des w/z-Wertes und das einiger der eingesetzten Zementarten wie z. B. CEM II/B-S 42,5 N und CEM III/A 42,5 R beeinflussen. Das Erhöhen des Luftporengehaltes sowie des w/z-Wertes erzeugt demnach starke Spaltzugfestigkeitseinbußen. Der Einsatz von genannten alternativen Zementen begünstigt demnach die Spaltzugfestigkeitsentwicklung stark.

Bei den Oberbetonen (D>8) und bei den Unterbetonen wirkte sich zudem der Austausch des Grobkornes in mehreren Fällen deutlich positiv aus. Die Anpassung der Sieblinie der Grobkörnung ist laut der vorliegenden Untersuchungsergebnisse mit Vorsicht anzugehen. Beim Einsatz von alternativen Zusatzmitteln ist nicht mit bemerkenswerten Spaltzug-

Variationsparameter	Ausgangsrezeptur Unterbeton	Variationschritt	Einfluss nicht normiert		Einfluss normiert	
			Wirkung (bis zu)	Wichtung	Wirkung (bis zu)	Wichtung
1	2	3	4	5	6	7
Luftporengehalt	4,0 Vol. %	+1 Vol. %	-0,47 N/mm ²	--		
w/z-Wert	0,43	+0,05	-0,89 N/mm ²	---	-1,04 [N/mm ²]	---
Zementart	CEM I 42,5 N	CEM III/A-S 42,5 R	9%	+	5%	+
		CEM II/B-S 42,5 N	21%	+++	14%	++
		CEM II/B-S 42,5 R	18%	++	10%	++
		CEM III/A 42,5 R	25%	+++	16%	++
Zementmenge	340 kg/m ³	+20 kg/m ³	-0,14 N/mm ²	o	-0,11 N/mm ²	o
Sand	A	B	-12%	--	-9%	-
Grobkorn (Beton 0-32)	Kies rund	Rhyolith	14%	++	14%	++
Grobkorn (Beton 0-16)	Kies rund	Kies (g)	49%	+++	53%	+++
		Gabbro	23%	+++	20%	+++
		Diabas	49%	+++	47%	+++
Änderung Größtkorn	32 mm	von 8 auf 16 mm	-0,12 N/mm ²	o	-0,17 N/mm ²	o
		von 16 auf 22 mm	-0,09 N/mm ²		-0,13 N/mm ²	
		von 22 auf 32 mm	-0,16 N/mm ²		-0,21 N/mm ²	
Sieblinie	AB	A	0%	o	-19%	--
		B	9%	+	16%	++
	stetig	Ausfallkörnung	5%	+	-1%	o
Zusatzmittel	Acrylat	Polycarb.	8%	+	9%	+

Legende: [-] Wichtung der negativen Wirkung; [] Wichtung der Auswirkung auf die Spaltzugfestigkeit; o „kaum“ + +/ - - „bedeutend“
 [+] Wichtung der positiven Wirkung; [] - Wichtung durch Normierung beeinflusst; +/- „gering“ + + +/ - - - „stark“

Tab. 10-10: Zusammenfassung – Einfluss der Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung auf die Spaltzugfestigkeit der Unterbetone

festigkeitseinbußen zu rechnen. Der Austausch des Sandes wirkte sich nur geringfügig negativ auf die Unterbetone aus. Die Größtkornanpassung ohne gleichzeitige Anpassung des Leimgehaltes wirkte sich kaum auf die hier betrachteten Spaltzugfestigkeiten der Straßenbetone aus.

Gleichzeitig ist zu beachten, dass einige Variationsparameter zu einer gewissen Reduktion des Frost-Tausalz-Widerstandes führen können. Jedoch wurde mit den festgestellten Abwitterungsmengen von bis zu 500 g/m² bei allen betrachteten Rezepturen ein quasi unbeschädigter Zustand nach 28 FTW festgestellt. Daher ist der Einfluss der Variationsparameter auf den Frost-Tausalz-Widerstand der betrachteten Straßenbetone auf Basis der Untersuchungsergebnisse als gering einzustufen.

11 Zusammenfassung

Neben den standardisierten Vorgaben gemäß RStO [N1] erfolgt die Dimensionierung der Dicke von Straßenbetondecken mittels rechnerischer Dimensionierung des Oberbaus gemäß RDO [N3]. Dabei werden unter anderem den Straßenbetonklassen die charakteristischen Spaltzugfestigkeiten zugeordnet. Zudem ist künftig vorgesehen, die gemäß TP B-StB [N7] zu ermittelnde Spaltzugfestigkeit als maßgebendes Festigkeitskriterium in die ZTV-Beton-StB [N2] aufzunehmen. In umfangreichen, grundlegenden Untersuchungen mit aktuellen, aber auch außerhalb der Normregelungen modifizierten Mischungszusammensetzungen sollten notwendigen Kenntnisse gewonnen werden, um die Auswirkungen einzelner Ausgangsstoffe von Straßenbetonrezepturen auf die Spaltzugfestigkeit und ausgewählte Dauerhaftigkeitskennwerte zu identifizieren und zu beurteilen. Entsprechend der Zielsetzung wurde der Gesamtumfang der Untersuchungen in diesem FE-Projekt in die drei aufeinander aufbauenden Arbeitsphasen und eine vom Betreuerkreis zusätzlich angeregte Zwischenphase aufgeteilt.

1) In der ersten Arbeitsphase erfolgte die Untersuchung des Einflusses der Betonzusammensetzung auf die Spaltzugfestigkeit an 73 geplanten Betonrezepturen mit insgesamt neun Variationsparametern bis zum Alter von 56 Tagen. Auf Basis der Untersuchungen aus AP 1 wurden 41 Labormischungen für die weiteren Arbeitsphasen 2 und 3 ausgewählt.

2) In der zweiten Arbeitsphase erfolgte die Untersuchung an diesen Betonrezepturen hinsichtlich des Einflusses der Betonzusammensetzung und unterschiedlicher Lagerungsbedingungen in Bezug auf ausgewählte Festigkeitskennwerte bis zum Alter von 91 Tagen.

3) In der Zwischenphase (zwischen AP2 und AP3) wurden auf Anregung des Betreuerkreises ergänzende Untersuchungen an Praxisbetonen vorgenommen. Die Vergleichbarkeit der Festigkeitskennwerte von im IfM und im Rahmen der Erstprüfung hergestellten Betonproben der Straßenbetonrezepturen zweier Autobahnabschnitte BAB A und BAB B und einer Teststrecke wurde teilweise unter Beweis gestellt.

4) In der abschließenden Arbeitsphase 3 erfolgten detaillierte Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung des Einflusses der betrachteten Variationsparameter auf ausgewählte Dauerhaftigkeitskennwerte der betrachteten 41 Betonrezepturen.

Für die Untersuchungen wurden Betonrezepturen konzipiert, die sich von der jeweiligen Ausgangsrezeptur stets um einen Variationsparameter unterscheiden. Als Ausgangsrezepturen wurden praxisübliche Straßenbetonrezepturen mit den entsprechenden normkonformen Ausgangsstoffen gewählt. Folgende Variationsparameter wurden in dem FE-Vorhaben zur Untersuchung deren Einflusses auf die Spaltzugfestigkeit betrachtet:

- Zementart und Zementgehalt,
- Gesteinskörnung (Art, Größtkorn, Sieblinie etc.),
- w/z-Wert,
- Luftporengehalt,
- Zusatzmittel.

Die Spaltzugfestigkeit wurde an unteren Zylinderscheiben ($d = 50$ [mm], ϕ 100 [mm]) ermittelt, die zylindrischen Betonproben mit 200 [mm] Höhe entnommen wurden. Die Druckfestigkeit wurde an Würfeln mit 150 [mm] Kantenlänge geprüft, die Biegezugfestigkeit an Balken mit den Abmessungen 700 x 150 x 150 [mm].

Folgende Lagerungsarten wurden unterschieden:

- Lagerungsart A: 1 d Schalung, bis zur 28 d-, 56 d- oder 91 d-Prüfung Wasserlagerung gemäß TP B-StB [N7] (Regelfall),

- Lagerungsart B: 1 d Schalung, 13 d Wasserlagerung, weiter bis zur 28 d-Prüfung unter Normklima 20/65,
- Lagerungsart C: 1 d Schalung, bis zur 28 d-Prüfung unter Normklima 20/65,
- Lagerungsart D: 1 d Schalung, 6 d Wasserlagerung, 14 d Lagerung unter Normklima 20/65

Zu 1) – Einführende Untersuchungen zum Einfluss der Variationsparameter auf die Spaltzug- und Druckfestigkeit bis zum Probenalter von 56 Tagen.

Die Untersuchungen der Arbeitsphase 1 dienten zur Erstellung der ersten Erfahrungen in Bezug auf den Einfluss verschiedener Betonzusammensetzungen auf die Spaltzugfestigkeit. Für die Untersuchungen wurden bis zu sieben Zemente mit unterschiedlichem Hüttensandgehalt und unterschiedlicher Festigkeitsklasse eingesetzt. Darüber hinaus erfolgte die Modifikation des Zementgehaltes unter Einhaltung der Grenzwerte der TL Beton StB [N5]. Bei der Waschbetonbauweise wurde laut normativen Anforderungen der Mindestzementgehalt von 420 kg/m³ und weitere Variationen mit 450 kg/m³ und 480 kg/m³ als Parameter für die zu untersuchenden Waschbetonrezepturen festgelegt. Gemäß den Anforderungen gilt für Unter- und Oberbetone (D>8) ein Mindestzementgehalt von 340 kg/m³. Für den Oberbeton (D>8) wird der Zementgehalt gleichzeitig auf einen maximalen Wert von 360 kg/m³ begrenzt.

Des Weiteren erfolgte die Variation der verwendeten Gesteinskörnung nach Art, Größtkorn, Sieblinie und Variation der verwendeten Sande. Dabei wurden bis zu sieben Grobkornarten untersucht. Unterschiede bestanden beispielsweise in der Kornrohichte und dem Anteil gebrochener Körner. Das Größtkorn wurde ausschließlich bei Oberbeton-(D>8) und Unterbetonrezepturen variiert. Die Variation der Sieblinie erfolgte unter Einhaltung der normativen Grenzwerte und beschränkte sich daher auf die Anpassung der Sieblinie zwischen Standardsieblinien A und B. Zusätzlich wurden Rezepturen mit einer Ausfallkörnung konzipiert, wobei die Anforderung an eine Mindestanzahl an Korngruppen stets eingehalten wurde. In dem Forschungsprojekt kamen drei unterschiedlich feine Gesteinskörnungen bei Laborbetonen zum Einsatz, zwei Sande mit unterschiedlichen Feinanteilgehalten und ein Edelbrechsand mit erhöhtem Wasseranspruch.

Einer der wichtigsten betontechnologischen Parameter, der w/z-Wert, wurde von 0,40 bis zum maximal zulässigen Grenzwert von 0,45 variiert.

Aufgrund der erwartungsgemäßen Schwankung des LP-Gehaltes durch die Variation der Ausgangsstoffe wurde für jede Straßenbetonart eine Ausgangsmischung mit drei verschiedenen Frischbetonluftporengehalten hergestellt. Der Luftporengehalt der hergestellten Frischbetone wurde zwischen ca. 3,5 und 7,0 Vol.-% variiert.

Als neunte Variation wurden zwei verschiedene Zusatzmittel zur Regulierung der erforderlichen Konsistenz eingesetzt. Hierbei handelt es sich um einen Betonverflüssiger auf Acrylatbasis und ein Fließmittel auf Polycarboxylatetherbasis.

Die Untersuchungen der Spaltzug- und Druckfestigkeit und Bruchflächenanalyse der Spaltzugprüfkörper erfolgten im Probenaltern von 28 und 56 Tagen.

Auf Basis der ermittelten Frischbeton- und Festigkeitskennwerte fand ein Auswahlverfahren zur Reduktion des Rezepturumfangs von 73 auf 41 Betonrezepturen für die weiteren Arbeitsphasen des Forschungsvorhabens statt. So wurde unter anderem der Frischbetonluftporengehalt der weiter betrachteten Rezepturen auf einen maximalen Wert von 6,0 Vol.-% und der w/z-Wert auf maximal 0,43 begrenzt. Bei der Variation der Zementart wurden Betone mit den Zementen CEM II/B-S 32,5 R und CEM I 42,5 R aufgrund der niedrigen Festigkeiten aus dem weiteren Untersuchungsprogramm ausgeschlossen.

Zu 2) – Detaillierte Untersuchungen der Festigkeitsentwicklung der ausgewählten Straßenbetone bis zum Probenalter von 91 Tagen. Einfluss der Lagerungsart auf die Spaltzug- und die Druckfestigkeit.

Zur Untersuchung der Festigkeitsentwicklung wurden die Spaltzug-, Druckfestigkeits- und Biegezugfestigkeitsprüfkörper kontinuierlich vor Austrocknung geschützt gelagert und nach 28, 56 und 91 Tagen geprüft. Die Zylinder- und Würfelproben lagerten unter Wasser (Lagerungsart A), die Biegezugbalken wurden nach 28 Tagen aus dem Wasser entnommen und in Folien eingewickelt bis zum jeweiligen Prüftermin gelagert. Die Auswertung der Ergebnisse wurde getrennt nach den Prüffarten und Variationsparametern vorgenommen. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Erwartungsgemäß können höhere Festigkeiten mit geringeren Frischbetonluftporengehalten erzielt werden. Der Einfluss des LP-Gehalts wirkte sich auf die Festigkeiten der Waschbetone geringfügiger aus im Vergleich zu denen von Oberbetonen ($D > 8$) und Unterbetonen (bis zu 18 %.)

Eine Reduzierung des w/z-Wertes wirkte sich überwiegend auf die Festigkeiten bei Wasch- und Unterbetonen aus. Die Erhöhungen der Festigkeiten lagen im Alter von 91 Tagen zwischen 13 und 19 %.

Beim Einsatz der fünf Zemente in den Oberbetonrezepturen ($D > 8$) erwiesen sich die Zemente CEM II/B-S 42,5 N und R (2-2.4 und 2-2.5) als besonders festigkeitssteigernd. Eine ähnliche Tendenz ist bei den Unterbetonen zu beobachten. Der Einsatz von Zement CEM II/B-S 42,5 N anstelle von CEM I bei den Waschbetonrezepturen zeigte Festigkeitssteigerungen von bis zu 18 %. Grundsätzlich erreichten die mit CEM II oder CEM III hergestellten Betone gleiche oder höhere Festigkeiten im Vergleich zu den Betonen, die mit den verwendeten Portlandzementen hergestellt wurden.

Die Zementmenge wurde in Arbeitsphase 2 nur bei den Wasch- und den Unterbetonen variiert. Bei den Unterbetonen erhöhten sich die Spaltzug-, Druck- und Biegezugfestigkeiten mit einer Erhöhung des Zementgehaltes von 340 auf 360 kg/m² um bis zu 25 %. Bei den Waschbetonen wurde keine einheitliche Festigkeitsentwicklung bei der Anpassung der Zementmenge beobachtet. Die Spaltzugfestigkeit wurde mit der Erhöhung der Zementmenge geringfügig erhöht, gleichzeitig wurde ein deutlicher Druckfestigkeitsrückgang festgestellt. Bei den Biegebalken wurden anfangs festgestellte Biegezugfestigkeitsdifferenzen zu einem späteren Zeitpunkt vollständig abgebaut.

Durch den Einsatz der Sande A und B konnte kein deutlicher Einfluss auf die Biegezug- und Spaltzugfestigkeit der Wasch- und Oberbetone festgestellt werden. Unter Einsatz von Sand A wurden gleiche oder höhere Druckfestigkeiten beobachtet.

Der Einsatz des gebrochenen Grobkorns statt des runden Kieses bei den Unterbetonen erwies sich als besonders festigkeitssteigernd, Steigerungen bis zu 50% stellten sich ein. Bei den Oberbetonen ($D > 8$) erwies sich der gebrochene Kies als besonders festigkeitssteigernd. Bei den Waschbetonen wurden sehr hohe Festigkeitskennwerte bei Rezepturen mit eingesetztem Diabas- oder Gabbrogrobkorn festgestellt.

Bei den Oberbetonen ($D > 8$) und den Unterbetonen ist durch die Wahl des kleineren Größtkorns eine Festigkeitssteigerung erkennbar, vor allem in Bezug auf die Spaltzugfestigkeit.

Der Einfluss der Sieblinienanpassung auf die Spaltzugfestigkeit ist bei Waschbetonen erst zu einem späteren Zeitpunkt feststellbar. Die Druck- und die Biegezugfestigkeiten nähern sich den Werten der Ausgangsrezeptur zum Zeitpunkt der 91 d-Untersuchung an. Bei den Oberbetonen wird kein Einfluss der Sieblinienanpassung auf die Festigkeiten beobachtet. Bei den Unterbetonen bewirkt der Austausch der stetig abgestuften Sieblinie AB(s) durch die Sieblinien B(s) und AB(a) einen deutlicheren Festigkeitsanstieg. Es werden bis zu 27 % höhere Spaltzugfestigkeiten und bis zu 11 % höhere Druckfestigkeiten beobachtet.

Ausgehend von den Untersuchungsergebnissen der Straßenbetone mit einer Variation der Zusatzmittel ist zur Herstellung der Straßenbetone das verwendete Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether (PCE) ohne Hinnahme von Festigkeitseinbußen bei einer vorausgesetzten stabilen Einstellung des Frischbetonluftporengehaltes gleichermaßen wie der Betonverflüssiger auf Acrylatbasis einsetzbar. Da es sich beim Fahrbahndeckenbau um großflächige horizontale Betonoberflächen handelt, ist nach den Erfahrungen aus der Praxis beim Einsatz von PCE-Fließmitteln eine Absonderung, Austrocknung und Schichtbildung (Elefantenhautbildung) auf der obersten Betonschicht möglich und zu berücksichtigen.

Um den Einfluss unterschiedlicher Lagerungsarten (A, B, C) und u. a. den Effekt einer fehlenden Nachbehandlung zu untersuchen, wurden Prüfkörper unterschiedlichen Lagerungsbedingungen ausgesetzt und anschließend auf Druck- und Spaltzugfestigkeit im Probenalter von 28 Tagen untersucht.

Als Fazit der Ergebnisse wurde herausgearbeitet:

Werden die Probekörper nach dem Ausschalen kontinuierlich unter Normklimabedingungen 20/65 nach Lagerung C bis zum Prüfzeitpunkt gelagert, so werden beim überwiegenden Teil der Straßenbetone bis zu ca. 30 % geringere Festigkeitskennwerte als bei den wassergelagerten A-Prüfkörpern festgestellt. Am stärksten werden die Oberbetone ($D > 8$) durch die Lagerungsart C beeinflusst, wobei im Schnitt um 10 % (Spaltzug) bzw. um 22 % (Druck) geringere Festigkeitskennwerte beobachtet wurden.

Wird statt kontinuierlicher Wasserlagerung die Lagerungsart B eingesetzt, wirkt sich diese besonders günstig auf die Festigkeitsentwicklung aus. Bei den meisten der betrachteten Laborrezepturen wird eine deutliche Festigkeitssteigerung beobachtet. Bei den Waschbetonen liegt der Festigkeitsanstieg im Schnitt bei 6 % ($f_{ct,sp}$) bzw. 11 % ($f_{c,cube}$), bei Oberbetonen ($D>8$) bei 15 % ($f_{ct,sp}$) bzw. 23 % ($f_{c,cube}$) und bei den Unterbetonen bei 17 % ($f_{ct,sp}$) bzw. 15 % ($f_{c,cube}$).

Zu 3) – Zusatzuntersuchungen an Praxisbetonen zur Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse

Zur Vergleichbarkeit von im Labor und im Rahmen realer Erstprüfung hergestellten Betone wurden sieben Betone unter Verwendung von Rückstellproben hergestellt. Untersucht wurden die Frischbetonkennwerte, Spaltzug- und Druckfestigkeiten nach 28 und 56 Tagen unter den Lagerungsbedingungen A und D. Des Weiteren wurden CDF-Prüfungen vorgenommen und Luftporenkennwerte mithilfe mikroskopischer Analyse an den Festbetonprüfkörpern ermittelt. Um den Einfluss der Lagerungsbedingungen A (Laborlagerung unter Wasser bis zum Prüfzeitpunkt) und D (in der Praxis üblich angewendete Lagerungsart nach [N17]) auf die Druckfestigkeit zu erfassen, wurden die Laborproben geprüft und anschließend den Festigkeitskennwerten aus den Erstprüfungsunterlagen gegenübergestellt.

Anhand der Untersuchungsergebnisse der Festigkeitsentwicklung konnte gezeigt werden, dass die im Labor hergestellten Praxisrezepturen hohe Spaltzugfestigkeitsmittelwerte und charakteristische Spaltzugfestigkeiten aufwiesen. Alle Praxisbetone konnten die charakteristische Spaltzugfestigkeiten von 3,7 N/mm² im Probenalter von 28 d vorweisen. Die Druckfestigkeiten der Laborbetone sind zum überwiegenden Teil vergleichbar mit den Werten aus der Erstprüfung, soweit die Lagerungsbedingungen der Prüfkörper der praxisüblichen Art entsprachen.

Die verschiedenen Lagerungsarten der Würfelproben A und D bewirkten zudem bis zu 30 % hohe Druckfestigkeitsdifferenzen. Unter Lagerung A zeigte der überwiegende Teil der Druckfestigkeitsuntersuchungen niedrigere Festigkeiten auf.

Sowohl in der Frost-Tausalz-Prüfung als auch bei der mikroskopischen Analyse der Praxisbetone konnten bei dem überwiegenden Teil der Mischun-

gen die normativen Grenzwerte hinsichtlich der betrachteten Dauerhaftigkeitseigenschaften erfüllt werden. Der Teststreckenbeton wurde ohne Luftporenbildner hergestellt. Das hatte zu höheren Abwitterungsmengen bei der CDF-Prüfung geführt und das Erreichen des Grenzwertes bezüglich des Mikroluftporengehaltes verhindert.

Zu 4) Einfluss der Variationsparameter auf die ausgewählten Dauerhaftigkeitskennwerte

Die Untersuchungen der Arbeitsphase 3 bestanden aus einer umfassenden Frost-Tausalz-Prüfung, der Ermittlung der Luftporenkennwerte mittels Mikroskopie-Analyse und der Festigkeitsuntersuchung als Kontrollprüfungen bis zum Probenalter von 28 Tagen. Dazu wurden die 41 Laborbetone aus Arbeitsphase 2 ein weiteres Mal hergestellt, die Frischbetonkennwerte festgehalten und einer speziell für die jeweilige Prüfung vorgesehenen Lagerung beziehungsweise Weiterverarbeitung der Probekörper unterzogen.

Die Ermittlung des Frost-Tausalz-Widerstandes erfolgte an fünf aus Würfeln hergestellten Prüfkörpern je betrachteter Rezeptur. Waschbetone erhielten eine Oberflächenbehandlung zur Erzeugung einer texturierten Waschbetonoberfläche, die bei der CDF-Prüfung als Prüffläche galt. Als Prüfergebnisse der CDF-Prüfungen wurden die Abwitterungsmenge, der relative dynamische E-Modul und die Feuchtigkeitsaufnahme nach 4, 6, 14 und 28 Frost-Tau-Wechseln festgehalten. Des Weiteren wurden mittels Mikroskopie-Analyse der Festbetonluftporengehalt, der Mikro-Luftporengehalt A_{300} und der Abstandsfaktor L bestimmt.

Die Festigkeitsuntersuchung bis zum Probekörperalter von 28 Tagen diente als Begleitprüfung, um festzustellen, ob die ausgewählten ermittelten Dauerhaftigkeitskennwerte auch auf die Betone aus Arbeitsphase 2 übertragbar sind. Durch eine Gegenüberstellung der Festigkeitskennwerte der gleichen Rezepturen aus Arbeitsphase 2 und 3 konnte gezeigt werden, dass über 85 % der hier untersuchten Straßenbetone bei Betrachtung der gegebenen Frischbetonkennwerte eine erwartungsgemäße Festigkeitsentwicklung zeigten. Bei weiteren 10 % der Betone konnte die abweichende Entwicklung der Festigkeitskennwerten beurteilt und gedeutet werden. Daher war davon auszugehen, dass die in Arbeitsphase 3 ermittelten ausgewählten Dauerhaftigkeitskennwerte auf die hergestellten Laborbetone aus Arbeitsphase 2 übertragbar sind.

Die Ergebnisse der CDF-Prüfung zeigten, dass alle Laborstraßenbetone die normativen Anforderungen an die ausgewählten Dauerhaftigkeitskennwerte erfüllten und sich als resistent gegen den Frost-Tausalz-Angriff erwiesen. Dennoch zeigten die Oberbetone (D>8) und Unterbetone bei Einsatz alternativer Zemente im Vergleich zu den Ausgangsmischungen mit bis zu 400 g/m² deutlich höhere Abwitterungsmengen als die Ausgangsrezepturen. Insgesamt zeigten die Unterbetone mit einem runden Kies als Grobkorn größere Abwitterungsmengen als die Straßenbetone mit gebrochenem Grobkorn. Die mikroskopische Analyse an Festbetonprüfkörpern zeigte, dass bei den meisten Ober- und Unterbetonen der Luftporengehalt durch Anpassung der Zugabemenge des Luftporenbildners hätte reduziert werden können, um die Festigkeitsentwicklung der untersuchten Straßenbetone zu begünstigen.

Fazit

Dominierende Einflüsse auf die Spaltzugfestigkeit wirken sich wie folgt aus:

- Eine Erhöhung des LP-Gehalts reduziert die Spaltzugfestigkeit,
- eine Erhöhung des w/z-Wertes reduziert die Spaltzugfestigkeit,
- der Einsatz der Zemente CEM II/B-S 42,5 N und CEM III/A 42,5 R erhöhte die Spaltzugfestigkeit,
- bei den Oberbetonen (D>8) erhöht die Verwendung von gebrochenem Kies mit einer 16 mm-Körnung im Vergleich zur Verwendung von Rhyolith mit 22 mm Größtkorn die Spaltzugfestigkeit stark,
- bei den Unterbetonen bewirkt der Austausch von 32 mm rundem Kies durch feinere und gebrochene Splitte eine Erhöhung der Spaltzugfestigkeit.

Literatur

- [1] BECKER, C.; WIELAND, M. (2017): Fahr-
bahnoberflächen – Entwicklungen im Beton-
straßenbau. In: Beton- und Stahlbetonbau
Spezial, S. 54 – 62
- [2] BERNSTEIN, L.; ROY, J.; et al. (2007): In-
dustry, in Climate Change 2007. Migration.
Contribution of Working Group III tot he
Fourth Assessment Reportof the Intergo-
vernmental Panel on Climate Change. Hrsg.:
Metz, B.; et al., Cambrigde University Press,
Cambridge, United Kingdom and New York,
NY, USA
- [3] BONZEL, J. (1964): Über die Spaltzugfestig-
keit des Betons. In: Betontechnische Berich-
te Nr. 3, S. 59-96, Nr. 4, S. 150-157
- [4] BONZEL, J. (1966): Biegezug- und Spalt-
zugfestigkeit des Betons. Forschungsinstitut
der Zementindustrie, Düsseldorf
- [5] CHAKTAR, L.; HARTMANN, V.; et al. (2018):
Erfahrungsbericht über die Erprobungsstrecke
in Betonbauweise mit Waschbetonober-
fläche auf der BAB A 5 unter Verwendung
von gebrochenem Kies des Oberrheins (Al-
pine Moräne Edelsplitt) In: Straße und Auto-
bahn 9. S 746 – 751
- [6] FORSCHUNG FÜR STRASSEN- UND
VERKEHRSWESEN (FGSV) (2009); Ar-
beitsgruppe Betonbauweisen: Merkblatt für
bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen aus
Beton, FGSV 823 (R2), FGSV Verlag, Köln
- [7] FORSCHUNG FÜR STRASSEN- UND
VERKEHRSWESEN (FGSV) (2009); Ar-
beitsgruppe Betonbauweisen: Merkblatt für
die Herstellung von Oberflächentexturen auf
Verkehrsflächen aus Beton, FGSV 829 (R2),
FGSV Verlag, Köln
- [8] FROST, D. (2012): Analyse von Schädi-
gungsprozessen statischer und dynamischer
Spaltzugversuche unter Verwendung innova-
tiver Prüftechnik. In: Beuth Hochschule für
Technik Berlin, Bachelorarbeit, Berlin
- [9] FROCHT, M. M. (1948): Photoelasticity.
John Wiley & Sons Inc., New York
- [10] MALARICS, V. (2011): Ermittlung der Beton-
zugfestigkeit aus dem Spaltzugversuch an
zylindrischen Betonproben. In: Karlsruher
Reihe Massivbau – Baustofftechnologie –
Materialprüfung, Heft 69
- [11] MICHELL, J. H. (1900): Elementary distribu-
tions of plane stress. In: Proceedings of the
London Mathematical Society 23, S. 35-61
- [12] OESTERHELD, R.; PECK, M.; VILLARET,
S. (2018): Straßenbau heute, Band 1, Hrsg.
Informationszentrum Beton GmbH, Verlag
Bau +Technik GmbH
- [13] PESCHEL, U.; REICHART, U. (2014): Lärm-
mindernde Fahrbahnbeläge; ein Überblick
über den Stand der Technik; Hg. V. Umwelt-
bundesamt, Dessau-Roßlau
- [14] PFEIFER, L. (2010): Vorstellung der Richtli-
nien für die rechnerische Dimensionierung
von Betondecken im Oberbau von Verkehrs-
flächen. FGSV Workshop Neue Regelwerke
zur Dimensionierung des Oberbaus, Köln
- [14] PICHOTTKA, S. (2014): Spaltzugfestigkeit
als Eingangsgröße in die Bemessung von
Fahrbahndecken aus Beton. Stahnsdorf, In:
Griffig 1/2014, S. 5
- [15] RIFFEL S. (2012): Erprobung neuer, innova-
tiver Betonbauweisen und Oberflächentextu-
ren beim Bau der Erschließungsstraße in
Geseke. In: Straße und Autobahn 9, S. 598
– 605
- [16] SKARABIS, J.; GEHLEN C. (2016): Lärmop-
timiertes Grinding – Erfahrungen aus bishe-
rigen Erprobungsstrecken. In: Straße und
Autobahn 11, S. 868 – 875
- [17] SCHMERBECK, R. (2016): Anwendung der
RDO Beton im VOB-Vertrag. München, In:
Griffig 1/2016, S. 2 – 7
- [18] TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J. N. (1951):
Theory of elasticity. McGraw-Hill Book Com-
pany, New York
- [19] WEISE, F.; HÜSKEN G.; NIEDBACK-NAD.
M.; WIELAND, M. (2014): AL S-Beton – Prä-
zision des Prüfverfahrens. In: Straße und
Autobahn 10, S. 790 – 798
- [20] AUBERG, R.: Zuverlässige Prüfung des
Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von
Beton mit dem CDF- und CIF-Test. Disserta-
tion, Universität Essen, 1998

Normen und Regelwerke

- [N1] RStO 12 – Richtlinien für Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. FGSV 499, 2012
- [N2] ZTV Beton-StB 07 – Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. FGSV 899, 2007
- [N3] RDO Beton 09 – Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen. FGSV R1, 2009
- [N4] AL Sp-Beton 06 – Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Zylinderscheiben als Eingangsgröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehrsflächen. FGSV 410, 2006
- [N5] TL Beton-StB 07 – Technische Lieferbedingung für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. FGSV 891, 2007
- [N6] TL Gestein-StB 18 – Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau. FGSV 613, 2004/2018
- [N7] TP B-StB 17 – Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen. FGSV 893, 2017
- [N8] DIN EN 480-11, 2005-10: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Prüfverfahren – Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton; Deutsche Fassung EN 480-11:2005
- [N9] ARS Nr. 12/2006 Allgemeines Rundschreiben Straßenbau. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Sachgebiet 6.1 und 6.2 Straßenbaustoffe, 2006
- [N10] DIN EN 933-1, 2012-03: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:2012
- [N11] RLS 90: Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen. Der Bundesminister für Verkehr; Abteilung Straßenbau, 1990
- [N12] DIN 1048-1, 1991-06; Prüfverfahren für Beton – Teil 1: Frischbeton; Beuth Verlag, 1991
- [N13] DIN EN 12350-4, 2009-08: Prüfung von Frischbeton – Teil 4: Verdichtungsmaß; Deutsche Fassung EN 12350-4:2009
- [N14] DIN EN 12350-6, 2011-03: Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohichte; Deutsche Fassung EN 12350-6:2009
- [N15] DIN EN 12350-7, 2009-08: Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren; Deutsche Fassung EN 12350-7:2009
- [N16] TP Beton-StB 10- Technische Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. FGSV 892, 2010
- [N17] DIN EN 12390-2, 2019-10: Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung EN 12390-2:2019
- [N18] DIN EN 12390-3, 2019-10: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2019
- [N19] DIN EN 12390-5, 2019-11: Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-5:2019
- [N20] DIN EN 12390-6, 2010-09: Prüfung von Festbeton – Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-6:2009
- [N21] DIN ISO 5725-2, 2002-12: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen – Teil 2: Grundlegende Methode für die Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichspräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens
- [N22] Merkblatt: Frostprüfung von Beton (BAW-Merkblatt Frostprüfung). Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, 2004

Bilder

- Bild 2-1: Spaltzugversuch – Versuchsaufbau an zylindrischen Prüfkörpern a), diagonal b) oder anliegend c) eingebauten prismatischen Betonproben [10]
- Bild 2-2: Spannungen in einer Kreisscheibe infolge gegenüberliegender Einzellasten in Anlehnung an [9]
- Bild 2-3: Bruchmöglichkeiten bei der Spaltzugprüfung nach MITCHELL [11]
- Bild 4-1: Sieblinie Ausgangswaschbeton
- Bild 4-2: Sieblinie Ausgangsoberbeton
- Bild 4-3: Sieblinie Ausgangsunterbeton
- Bild 4-4: Sieblinie der Rezeptur 4-2.3 (Teststreckenbeton)
- Bild 4-5: Zusammensetzung der Rezeptur-ID
- Bild 4-6: Schema der Aufbereitung der Zylinder (links); vorbereitete Prüfkörper aus einem Zylinder (rechts)
- Bild 4-7: Mit Frischbeton einer Betonrezeptur gefüllte Schalungen (links); Lagerung der frisch hergestellten Probekörper bis zum Ausschalzeitpunkt (rechts)
- Bild 4-8: Wasserlagerung der Probekörper; unbehandelte Zylinder (links); auf Rosten gelagerte Würfel (rechts)
- Bild 4-9: Messungen der Ausbürsttiefe mit dem ELAtextur-Messgerät (links); nachbehandelte Waschbetonoberflächen der Würfelprobekörper (rechts)
- Bild 4-10: Prüfl. chen der Prüfk. rper für die CDF-Prüfung; an Teflonschalung anbetonierte Prüffläche (Ober- und Unterbetone) (links); Waschbetonoberfläche (Waschbetone) (rechts)
- Bild 5-1: 300 kN-Druck-Biegeprüfmaschine Typ DB-300-S (links); Spaltzugvorrichtung mit zentriertem Prüfkörper (rechts)
- Bild 5-2: 300 kN-Druck-Biegeprüfmaschine Typ DB-300-S umgerüstet für den Biegezugversuch.
- Bild 5-3: CDF-Prüfung: Vorsättigung der Prüfkörper (links); zur Frost-Tausalz-Belastung in die Truhe eingelagerte Proben (rechts)
- Bild 6-1: AP1 – Gesamtergebnisse der Spaltzugfestigkeiten der Waschbetone
- Bild 6-2: AP1 – Gesamtergebnisse der Druckfestigkeiten der Waschbetone
- Bild 6-3: AP1 – Gesamtergebnisse der Spaltzugfestigkeiten der Oberbetone (D>8)
- Bild 6-4: AP1 – Gesamtergebnisse der Druckfestigkeiten der Oberbetone (D>8)
- Bild 6-5: AP1 – Gesamtergebnisse der Spaltzugfestigkeiten der Unterbetone
- Bild 6-6: AP1 – Gesamtergebnisse der Druckfestigkeiten der Unterbetone
- Bild 6-7: Festigkeitsentwicklung – Zementart: Waschbetone (links); Oberbetone (D>8) (rechts)
- Bild 6-8: Festigkeitsentwicklung – Gesteinsart; Oberbetone (D>8), Größtkorn 22 mm (links); Unterbetone Größtkorn 32 mm (rechts)
- Bild 6-9: Aufnahmen der Waschbetonbruchflächen; überwiegend herausgelöste Gesteinskörnung (links); überwiegend gebrochene Gesteinskörnung (rechts)
- Bild 6-10: Aufnahmen der Unterbetonbruchflächen; überwiegend herausgelöste Gesteinskörnung (links); überwiegend gebrochene Gesteinskörnung (rechts)
- Bild 7-1: Charakteristische Spaltzugfestigkeiten der Waschbetone im Alter von 28 Tagen
- Bild 7-2: Charakteristische Spaltzugfestigkeiten der Oberbetone (D>8) im Alter von 28 (dunkelblau) und 56 (hellblau) Tagen
- Bild 7-3: Charakteristische Spaltzugfestigkeiten der Unterbetone im Alter von 28 Tagen
- Bild 7-4: 28-Tage Spaltzugfestigkeit und Druckfestigkeit der Unterbetone (Variation Zementart) im Alter von 28 Tagen unter Lagerungsbedingungen nach Aus-

- schalen: A (27 d Wasserlagerung), Lagerung B (13 d Wasserlagerung/ 14 d Normklima 20/65), Lagerung C (27 d Normklima 20/65)
- Bild 7-5: Festigkeitsentwicklung – Waschbetone, Variationsparameter Luftporengehalt
- Bild 7-6: Festigkeitsentwicklung – Unterbetone, Variationsparameter Wasserzementwert
- Bild 7-7: Festigkeitsentwicklung – Oberbetone ($D > 8$), Variationsparameter Zementart
- Bild 7-8: Festigkeitsentwicklung – Waschbetone, Zementmenge
- Bild 7-9: Festigkeitsentwicklung – Waschbetone, Sandart
- Bild 7-10: Festigkeitsentwicklung – Oberbetone, Gesteinskörnung
- Bild 7-11: Festigkeitsentwicklung – Unterbetone, Größtkorn
- Bild 7-12: Festigkeitsentwicklung – Unterbetone, Sieblinie
- Bild 7-13: Festigkeitsentwicklung – Oberbetone, Zusatzmittel
- Bild 7-14: AP 2 – Überblick über die Spaltzugfestigkeitsentwicklung (28 d, 56 d, 91 d Lagerung A)
- Bild 7-15: AP 2 – Überblick über Druckfestigkeitsentwicklung (28 d, 56 d, 91 d Lagerung A)
- Bild 7-16: AP 2 – Überblick über Biegezugfestigkeitsentwicklung (28 d, 56 d, 91 d Lagerung A)
- Bild 8-1: Praxismischungen; 28 d – char. Spaltzugfestigkeiten und Mittelwerte (links); Spaltzugfestigkeitsentwicklung bis zum Probenalter von 56 Tagen mit den Rückstellproben aus BAB A, BAB B und der Teststrecke (rechts)
- Bild 8-2: Druckfestigkeitsvergleich der Praxismischungen; mit Werten aus BAB – B (links); mit Werten aus BAB – A (rechts)
- Bild 8-3: Praxismischungen; Auswirkung verschiedener Lagerungsarten auf Druckfestigkeiten (links); Druckfestigkeitsentwicklung bis zum Probenalter von 56 Tagen mit den Rückstellproben aus BAB A, BAB B und der Teststrecke (rechts)
- Bild 8-4: Frost-Tausalz-Widerstand der Praxismischungen
- Bild 8-5: Vergleich – Flüssigkeitsaufnahme der Praxismischungen
- Bild 8-6: Ergebnisse der Luftporenkennwertermittlung der Praxismischungen; Mikro-
luftporengehalt (links); Abstandsfaktor (rechts)
- Bild 9-1: Frost-Tausalz-Widerstand der Waschbetone
- Bild 9-2: Frost-Tausalz-Widerstand der Oberbetone ($D > 8$)
- Bild 9-3: Frost-Tausalz-Widerstand der Unterbetone
- Bild 9-4: Ermittelte Luftporenkennwerte der Waschbetone
- Bild 9-5: Ermittelte Luftporenkennwerte der Oberbetone ($D > 8$)
- Bild 9-6: Ermittelte Luftporenkennwerte der Unterbetone
- Bild 10-1: Einfluss des Luftporengehaltes auf die Spaltzugfestigkeit
- Bild 10-2: Einfluss des w/z -Wertes auf die Spaltzugfestigkeit; unbehandelte Mittelwerte (links); normierte Mittelwerte (rechts)
- Bild 10-3: Einfluss der Zementart auf die Spaltzugfestigkeit; unbehandelte Mittelwerte (links); normierte Mittelwerte (rechts)

Tabellen

- Tab. 3-1: Überblick über die Betonzusammensetzungen der Ausgangsmischungen Waschbeton, Oberbeton ($D > 8$) und Unterbeton
- Tab. 3-2: Probekörperanzahl je Mischungszusammensetzung für die Untersuchungen der Arbeitsphase 1
- Tab. 3-3: AP 1 – Untersuchungsprogramm
- Tab. 3-4: AP 2 und AP 3 – Untersuchungsprogramm
- Tab. 3-5: AP 2 – Probekörperanzahl je Mischungszusammensetzung für die Untersuchungen
- Tab. 3-6: Arbeitsprogramm der Zusatzuntersuchungen mit Praxisrezepturen
- Tab. 3-7: Arbeitsprogramm je Betonrezeptur in der Arbeitsphase 3
- Tab. 3-8: Von der BAST zur Verfügung gestellte Materialien aus Rückstellproben von BAB A und BAB B für Zusatzuntersuchungen an Praxismischungen
- Tab. 3-9: Gesamtübersicht über das Versuchsprogramm
- Tab. 4-1: Eigenschaften der Zemente lt. Herstellerangaben
- Tab. 4-2: Ausgewählte Eigenschaften der Gesteinskörnungen (1)
- Tab. 4-3: Ausgewählte Eigenschaften der Gesteinskörnungen (2)
- Tab. 4-4: Ausgewählte Eigenschaften der Gesteinskörnungen (3)
- Tab. 4-5: Korngrößenverteilung der verwendeten Gesteinskörnung
- Tab. 4-6: Betonzusatzmittel
- Tab. 4-7: Ausgangsrezeptur Waschbeton
- Tab. 4-8: Ausgangsrezeptur Oberbeton
- Tab. 4-9: Ausgangsrezeptur Unterbeton
- Tab. 4-10: Teststreckenrezeptur 4-2.3 (Teststreckenbeton)
- Tab. 4-11: Mischregime
- Tab. 4-12: Überblick – Rezepturkennzeichnung (Rezeptur-ID) (1)
- Tab. 4-13: Überblick – Rezepturkennzeichnung (Rezeptur-ID) (2)
- Tab. 6-1: Überblick – Auswertung der Festigkeitsuntersuchungen; Arbeitsphase 1
- Tab. 6-2: Ergebnisse der Bruchflächenanalyse – Zusammenfassung
- Tab. 7-1: Überblick – Auswertung der Festigkeitsuntersuchungen; Arbeitsphase 2
- Tab. 7-2: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsuntersuchung unter Einfluss verschiedener Lagerungsszenarien
- Tab. 7-3: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchung unter Einfluss verschiedener Lagerungsszenarien
- Tab. 7-4: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Luftporengehalt
- Tab. 7-5: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Wasserzementwert
- Tab. 7-6: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Zementart
- Tab. 7-7: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Zementmenge
- Tab. 7-8: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Sandart
- Tab. 7-9: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Gesteinskörnung
- Tab. 7-10: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Größtkorn

- Tab. 7-11: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Sieblinie
- Tab. 7-12: Festigkeitsvergleich und Nacherhärtung bis zu 91 Tage – Variationsparameter Zusatzmittel
- Tab. 7-13: AP2 – Ergebnisse der Bruchflächenanalyse – Zusammenfassung
- Tab. 8-1: Vergleich der Frischbetonkenndaten zwischen Laborpraxisbetonen und den Daten aus der Erstprüfung
- Tab. 8-2: Zusammenfassung der CDF-Prüfungsergebnisse von Paxismischungen
- Tab. 9-1: Überblick – Dauerhaftigkeitsuntersuchungen; Arbeitsphase 3
- Tab. 9-2: Festigkeitsvergleich der Oberbetone ($D > 8$) aus AP2 und AP 3; 28 d-Spaltzugfestigkeiten (links); 28 d-Druckfestigkeiten (rechts)
- Tab. 9-3: CDF-Prüfungsergebnisse der Waschbetone
- Tab. 9-4: CDF-Prüfungsergebnisse der Oberbetone ($D > 8$)
- Tab. 9-5: CDF-Prüfungsergebnisse der Unterbetone
- Tab. 9-6: Waschbetone – Ergebnisse der Luftporenkennwertbestimmung
- Tab. 9-7: Oberbetone ($D > 8$) – Ergebnisse der Luftporenkennwertbestimmung
- Tab. 9-8: Unterbetone – Ergebnisse der Luftporenkennwertbestimmung
- Tab. 10-1: Auswertung der Trendgeraden des Luftporengehalt-Einflusses
- Tab. 10-2: Einfluss des Luftporengehaltes auf den Frost-Tausalz-Widerstand
- Tab. 10-3: Auswertung der Trendgeraden des w/z-Wert-Einflusses; unbehandelt (links); normiert (rechts)
- Tab. 10-4: Einfluss des w/z-Wertes auf den Frost-Tausalz-Widerstand
- Tab. 10-5: Eigenschaften der verwendeten Zemente
- Tab. 10-6: Differenz der 28 d-Spaltzugfestigkeit zwischen Ausgangsbeton und Straßenbetonen mit alternativer Zementart; Festigkeitsdifferenz aus unbehandelten Mittelwerten (links); Festigkeitsdifferenz aus normiert Mittelwerten (rechts)
- Tab. 10-7: Einfluss ausgewählter Zemente auf den Frost-Tausalz-Widerstand
- Tab. 10-8: Zusammenfassung – Einfluss der Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung auf die Spaltzugfestigkeit der Waschbetone
- Tab. 10-9: Zusammenfassung – Einfluss der Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung auf die Spaltzugfestigkeit der Oberbetone ($D > 8$)
- Tab. 10-10: Zusammenfassung – Einfluss der Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung auf die Spaltzugfestigkeit der Unterbetone

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2022

S 171: Informationssystem Straßenzustand Teil 2: Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Asphaltstraßen (SENSOR)

Bald, Böhm, Čičković, Tiemann, Hill, Peitsch, Gablovský, Muschalla, Czaja, Ulrich, Farbischewski, Huczek
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Trag-schichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO

Wellner, Leischner, Spanier € 16,50

S 173: Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise

Villaret, Beckenbauer, Riwe, Tschernack
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 174: Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

Dudenhöfer, Rückert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 175: Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton

Altreuther, Beckenbauer, Ertsey, Otto, Schubert, Kropp, Hoever
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 176: Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter

Michaelides, Koukoulidou, Birle, Heyer, Vogt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 177: Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen

Breitenbücher, Buckenhüskes, Radenberg, Twer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 178: Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton

Weise, Hüsken, Niedack-Nad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 179: Die neue Autobahnverwaltung des Bundes – das Straßenrecht der Verkehrswende

Dürner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 180: Entwicklung eines aktuellen Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung gemäß den RDO Beton

Kathmann, Hermes, Kucera, Stöver, Neumann, Lehmkuhl, Pfeifer € 14,50

2023

S 181: Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens

Hülsbömer, Weißelborg, Gogolin, Mörchen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 182: Optimierung der Anwendbarkeit der Probabilistik in der Dimensionierung und Substanzbewertung von Betonstraßen

Neumann, Liu, Blasl, Reinhardt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 183: Potenzialuntersuchung zum Einsatz von Asphalteinlagen

Mollenhauer, Wetekam, Wistuba, Büchler, Al-Qudsi, Falchetto, Kollmus, Trifunović, Schmalz, Ziegler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 184: Generelle Methodik zur Abschnittsbildung bei der Erhaltung kommunaler Straßen

Berthold, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 185: Potenzialanalyse – Prozesssichere Herstellung lärm- armer Straßen in Betonbauweise OPB – Offenporiger Beton

Freudenstein, Bollin, Eger, Klein, Kränkel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 186: Praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand feiner Gesteinskörnungen

Oeser, Schulze, Benninghoff, Renken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 187: Überprüfung der Geotextilrobustheitsklassen hinsichtlich neuer Produktentwicklungen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 188: Untersuchungen an einer CEM III-Versuchsstrecke auf der BAB A7 bei Wörnitz

Kuhnsch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 189: Optimierung der Zusammensetzung Offenporiger Asphalte zur Verbesserung des Nutzungsverhaltens

Radenberg, Breddemann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 190: Wirtschaftlichkeitsuntersuchung an Bauweisen mit Betondecke der Belastungsklasse Bk100

Ressel, Engel, Ferraro, Alber, Garrecht, Mielich, Wellner, Kamratowsky, Kraft
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 191: Vergleich der Gebrauchseigenschaften von Asphalten mit Polymermodifiziertem Bindemittel und Gummimodifizierten Bindemitteln mit unterschiedlichen Gummianteil

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher, Schindler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 192: Analyse von Auswertungs- und Bewertungsverfahren für die Anwendung des Traffic-Speed-Deflectometers auf Asphaltbefestigungen

Čičković, Bald, Middendorf

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 193: Materialsteifigkeit des Straßenbetons im Verlauf des Ermüdungsprozesses

Bolz, Wellner, Lindner, Schulze

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 194: Aspekte der Dimensionierung und Konstruktion zur Sicherstellung der Verfügbarkeit bei temporärer Nutzung von Randbereichen von Bundesfernstraßen

Wellner, Sommer, Clauß, Spanier, Villaret, Tschernack, Villaret, Gebhardt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 195: Verfahren zur Bildung und Beschreibung zustandshomogener Abschnitte und repräsentativer Kennzahlen für das Erhaltungsmanagement

Berthold, Großmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 196: Eignung konventioneller Prüfverfahren für Recycling-Baustoffe und industrielle Nebenprodukte im Erdbau

Huber, Birle, Heyer, Demond

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 197: Lösungsstudie zur Umsetzung der ASR A5.2 im Kontext mit der Herstellung von Betonfahrbahndecken

Tschernack, Gebhardt, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 198: Erprobung von Betonfertigteilen für den Neubau und die grundlegende Erneuerung auf dem duraBAST

Alte-Teigeler, Britz, Kispert, Riwe, Tschernack, Villaret, Lüdike

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 199: Identifizierung relevanter Klimaparameter und Bestimmung von Schwellenwerten zu gravitativen Massenbewegungen

Steffen, Brendel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 200: Einfluss der Betonzusammensetzung von Straßenbetonen auf die Spaltzugfestigkeit unter Berücksichtigung einer ausreichenden Dauerhaftigkeit

Schnellenbach-Held, Eßer, Johansen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.