

---

# Prüfmethode zur validen Bestimmung von Luftporengehalten an Fahrbahndeckenbetonen

---

Berichte der Bundesanstalt für  
Straßen- und Verkehrswesen  
Straßenbau Heft S 216

---

# Prüfmethode zur validen Bestimmung von Luftporengehalten an Fahrbahndeckenbetonen

---

von

Martina Schnellenbach-Held, Angelika Eßer, Roman Johansen

Institut für Massivbau  
Universität Duisburg Essen

---

Berichte der Bundesanstalt für  
Straßen- und Verkehrswesen  
Straßenbau Heft S 216

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. 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 BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 08.0263  
Prüfmethode zur validen Bestimmung von Luftporengehalten an Fahrbahndeckenbetonen

Fachbetreuung:  
Simon Hampel

Referat:  
Betonbauweisen

Herausgeber:  
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:  
MedienMélange:Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:  
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: [kontakt@schuenemann-verlag.de](mailto:kontakt@schuenemann-verlag.de)  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323 | ISBN 978-3-95606-844-7 | <https://doi.org/10.60850/bericht-s216>

Bergisch Gladbach, April 2025

# Kurzfassung

## Prüfmethode zur validen Bestimmung von Luftporengehalten an Fahrbahndeckenbetonen

Fahrbahndeckenbetone sind frei bewitterte Verkehrsflächen und werden der Expositionsklasse XF4 „Frostangriff mit Taumittel“ zugeordnet. Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit wird ein hoher Frost-Tausalz-Widerstand gefordert. Dazu werden luftporenbildende Zusatzmittel eingesetzt. Zur frühzeitigen Qualitätskontrolle werden die Luftgehalte auf der Baustelle mit Luftgehaltsprüfgeräten am Frischbeton geprüft. Dazu muss ihre Messgüte sichergestellt sein. Auf Basis von theoretischen und praktischen Studien wurde die Konzeption einer Prüfmethode erarbeitet, die eine Beurteilung der Messgüte der unterschiedlichen LP-Gehaltsprüfer ermöglicht. Dazu wurden im Zuge gerätetechnischer Vergleichsuntersuchungen die Luftporengehalte an zuvor festgelegten Betonrezepturen mit ausgewählten national und international genormten Luftporengehaltsprüfern sowie nicht-genormten Alternativen nach einem einheitlichen Prüfregime bestimmt. Vorgeschaltet waren die Konzepterstellung für die Bewertung der Messgüte von Luftgehaltsprüfern, die Erarbeitung eines einheitlichen Prüfregimes, die Festlegung von Grundrezepturen (jeweils ein Ober- und ein Unterbeton) und deren betontechnologischen Variationen. Bei den Laboruntersuchungen erfolgte zur parallelen Datenauswertung und Präzisionsbestimmung einzelner Luftgehaltsprüfer die Erfassung maßgeblicher Frischbetonkennwerte. An ausgewählten Rezepturen wurden zusätzlich Luftporenkennwerte am Festbeton ermittelt und ebenfalls extern mit dem Ziel kontrolliert, eine Übertragbarkeit von Luftporengehalts-Messergebnissen am Frischbeton auf den Luftporengehalt im Festbeton valide einschätzen zu können. Die Erfassung ausgewählter Festigkeitskennwerte ermöglichte weiterhin die Reflexion zu den in der Baupraxis eingesetzten Ober- und Unterbetonen.

Die konventionell mit dem Druckausgleichsverfahren ermittelten Luftporengehalte wurden durch die Art der Prüfausführung, z. B. die Verdichtungsart und -intensität, die Anzahl der verdichteten Betonlagen und die Fertigkeit des Laboranten, beeinflusst. Zudem spielten die Mischtechnik und die Temperatur sowie die Behandlung des Frischbetons beim Transport und Einbau eine maßgebende Rolle.

Bei den Ergebnissen der Vergleichsuntersuchungen zeigte sich, dass die betontechnologischen Kennwerte, wie Zementgehalt, Größtkorn, anzustrebender LP-Gehalt und w/z-Wert zum Teil eine erhebliche Auswirkung auf die Qualität der Messwertbildung besaßen. Ein gerätetechnischer Vergleich bei der praxisüblichen konventionellen Prüftechnik verschiedener Hersteller ergab, dass trotz gleicher Nutzungsdauer und Kalibrierungsrate bei baugleichen Modellen individuelle Unterschiede in der Messwertgüte festgestellt wurden.

Alternative Prüftechnik wie das HYDRO\_5, die auf dem Wassersäulenprüfverfahren und einem Arbeitsdruck von 2 bar basiert und das Super Air Meter (1 bar Arbeitsdruck) erwiesen sich in der Regel als hinreichend präzise.

## Abstract

### Test method for the valid determination of air void contents in road surface concretes

Road surface concretes are freely weathered traffic surfaces and are assigned to exposure class XF4 "Frost attack with de-icing agent". To ensure durability, a high resistance to frost and de-icing salt is required. Airentaining additives are used for this purpose. For early quality control, the air content is tested on fresh concrete at the construction site using air content testers. For this purpose, their measurement quality must be ensured. Based on theoretical and practical studies, a test method was developed that enables the measurement quality of the various air content testers to be assessed. For this purpose, air void contents were determined on previously defined concrete mix designs with selected, nationally and internationally standardized air void content testers as well as non-standardized alternatives according to a uniform test regime in the course of comparative equipment tests. This was preceded by the development of a concept for the evaluation of the measurement quality of air entrainment testers, the development of a uniform testing regime, the design of basic mixtures (one top and one bottom concrete each) and their concrete technology variations. During the laboratory tests, relevant fresh concrete parameters were recorded for parallel data evaluation and precision determination of individual air content testers. In addition, air entrainment parameters were determined on hardened concrete using selected mix designs and also checked externally with the aim of being able to validly assess the transferability of air entrainment measurement results on fresh concrete to the air entrainment content in hardened concrete. The recording of selected strength parameters also made it possible to reflect on the top and bottom concretes used in construction practice.

The air void contents determined conventionally by the pressure equalization method was influenced by the type of test execution, e.g. the type and intensity of compaction, the number of compacted concrete layers and the skill of the laboratory technician. In addition, the mixing technique, the temperature and the handling of the fresh concrete during transportation and installation also played a decisive role.

The results of the comparative tests showed that the concrete technology parameters, such as cement content, maximum aggregate size, target LP content and w/c ratio, had a considerable effect on the quality of the measured values in some cases. A technical comparison of conventional testing equipment from different manufacturers showed that, despite the same service life and calibration rate, individual differences in the quality of the measured values were found for identical models.

Alternative testing techniques such as the HYDRO\_5 which is based on the water column test method and a working pressure of 2 bar, and the Super Air Meter (1 bar working pressure) generally proved to be sufficiently precise.

## Summary

### Test method for the valid determination of air void contents in road surface concretes

## 1 Introduction

The performance and availability of road infrastructure are crucial for the functioning and continuous mobility, which is fundamental to a successful economy. To meet these requirements, road construction methods need to exhibit a long service life with as few restrictions as possible on availability and, at the same time, durable service properties. As the forecasted volume of traffic continues to increase steadily and the resulting higher mechanical loads from overhead traffic must be safely absorbed and dissipated, sufficient resistance to additional environmental impacts must also be ensured at the same time. [1, 2] Concrete road surfaces are particularly suitable for road construction due to their long service life and low maintenance intensity. To ensure the required quality, standards and regulations must be implemented for dimensioning, construction, concrete technology, curing and maintenance during the production and service life. Normative principles for road concrete are contained, for example, in DIN EN 206-1 [3], DIN 1045-2 [4], TL Beton-StB 07 [5] and ZTV Beton-StB 07 [6] and other relevant regulations.

To prevent damage due to freeze-thaw attacks, the concrete must have a sufficient air void content. This is usually achieved by artificially introducing air voids by adding air-entraining agents during production. The type and quantity of the artificially introduced air voids depend on the admixtures used and interact with the other raw materials used in the concrete. An optimum must be found between the now increased total porosity of the concrete to increase the freeze-thaw resistance while maintaining the required strength properties of the road concrete. The decisive characteristic values are the compressive strength and the splitting tensile strength of the hardened concrete.

In practice, the air content in fresh concrete is usually determined using the conventional air meter through the pressure equalization method [7]. However, the question arises as to what extent this total air void content determined on fresh concrete under certain boundary conditions correlates with the characteristic values determined on hardened concrete using microscopy analysis [8]. For the freeze-thaw resistance, the characteristic values micropore content A300 and distance factor between the air voids are of particular importance. It is also known that the air contents determined with the air meter are subject to strong fluctuations due to factors influencing the test technology used, the test procedure, the prevailing climatic conditions and the skill of the test personnel. It was therefore of particular importance in this FE project to first identify the factors influencing the LP content determination and to develop a precise and reproducible test regime for the air content determination in fresh concrete in order to ensure the evaluation of the measurement quality of the subsequent comparison tests. The practical suitability of common air content testing devices and the comparability of their results obtained under different conditions were also investigated. International and alternative test methods were also used. Two test methods were used to determine not only the total air void content, but also the air void size distribution in the fresh concrete. These were compared with the results of the air void count on the hardened concrete.

The overall result of the FE project aimed to contribute to the improvement of quality monitoring in roadway concrete production in the course of initial and control tests through the findings of systematic laboratory tests on the measurement quality of conventional, international and alternative test methods for

determining the LP content of fresh concrete. Corresponding recommendations for practice and / or regulations can be derived from this.

## 2 Methods

A total of four work phases (WPs) with differentiated objectives were carried out in this FE project.

AP1: Compilation of gathered experiences and formulation of an evaluation concept for quality determination of measurements, alongwith the procurement of necessary testing equipment and raw materials.

Two standardized road concrete mix designs that are commonly used in practice were selected as initial formulations: a top concrete formulation for exposed aggregate concrete (D = 8 mm) and a bottom concrete formulation (D = 22 mm) . The selection of nationally standardized and alternative air content testers used in the FE project is listed in Tab. 1.

Tab. 1: National, international or alternative air void test devices used and their internal report designation

Air entrainment analyzer	Designation	Standard	Quantity	Volume in [l]
1	2	3	4	5
Nationally standardized air content tester (ACT)	Nat. stand. ACT of the manufacturer "A" Designation: LP_A_5L/8L_1/2	DIN EN 12350-7	2	5
		ASTM C231 Typ B	2	8
	Nat. stand. ACT of the manufacturer "B" Designation: LP_B_5L/8L_1/2	DIN EN 12350-7	2	5
		ASTM C231 Typ B	2	8
	Nat. stand. ACT of the manufacturer "C" Designation: LP_C_5L/8L_1	DIN EN 12350-7	1	5
		ASTM C231 Typ B	1	8
Internationally standardized or alternative air content testers	Super Air Meter Designation: SAM_7L	ASTM C231 / C231M Typ B	1	7
	Air Void Analyzer system Designation: AVA-3000	Calculation according to ASTM C457	1	-
	„Hydro_5“ - Cube Designation: HY5_W_3,4L	(not standardized)	1	3,375
	„Hydro_5“ - Air void tester Designation: HY5_T_6L	DIN EN 12350-7 ASTM C 231 Typ A	1	6,1

AP2: Experiments to determine the testing regime and tactile tests for setting up the test matrix for comparative device tests.

In these investigations, various test parameters were varied in order to determine their influence on the formation of measured values. These included:

- Sample condition before filling the test device (uncompacted or pre-compacted)
- Type of compaction (vibrating table or internal vibrator)
- Number of compaction layers (2, 3 and 4 layers)
- Compaction intensity (3000 rpm, 4500 rpm and 6000 rpm)
- Compaction time (30 s, 45 s and 60 s)
- Filling process of the water into the test device (slow and controlled or uncontrolled)
- Temperature (10 °C, 20 °C, 30 °C and 40 °C)

Tab. 2: Overview of the preliminary studies on the testing regime

Preliminary studies into the testing regime	Fresh concrete tests	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2	HY5_T_6L	HY5_W_3,4L
Test time	1	2	3	4	5
From 10 min and 60 min after mixing fresh concrete	Raw density	X	X	X	X
	Consistency				
	Air void content				
	Fresh concrete temperature				

The required fresh concrete parameters were determined at two points in time after the fresh concrete had been produced. An overview of the preliminary tests carried out and the testing equipment used can be found in Tab. 2.

AP3: Comparative tests with national, international and alternative air entrainment testers to determine the air entrainment content including hardened concrete testing.

The technical comparative tests were carried out by varying the air pore content and w/c ratio for both basic mix designs in accordance with the test regime defined in the preliminary tests. The splitting tensile strength, compressive strength and air void characteristics of the hardened concrete by means of mi-croscopy analysis were determined as supporting tests. For selected formulations, the air void characteristics were also recorded by another independent external testing laboratory. In Tab. 3, columns 2 to 5 show the test program with nationally standardized air entrainment testers and columns 6 and 7 show the test program with the alternative air entrainment testers.

Tab. 3: Work program for the equipment-related comparative tests with quantity calculation of the fresh concrete and number of test specimens per concrete mix design

Work program of the comparative studies	Specimen type	Nationally standardized test methods			Internationally standardized or alternative test methods	
		LP-5L 3 Devices	LP_8L 3 Devices	LP_5L/8L 4 Devices	Devices Nr. 1 to 3	Devices Nr. 4 to 5
Fresh concrete tests		Fresh concrete volume				
1	2	3	4	5	6	7
Raw density	Fresh concrete from 10 min after mixing	23 l	27 l	32 l	23 l	27 l
Consistency						
Air void content	Fresh concrete from 60 min after mixing	23 l	28 l	33 l	23 l	28 l
Fresh concrete temperature						
Splitting tensile strength	Cylinders 100 x 200 [mm] after 28 d	-	6 cylinders 10 l	-	-	6 cylinders 10 l
Compressive strength	Cubes a = 150 [mm] after 28 d	3 cubes	-		3 cubes	-
		10,5 l			10,5 l	
Air void characteristics	Cubes a = 150 [mm] after 7 d	2 cubes			2 cubes	
		7,75 l			7,75 l	
Total	[-]	Charge 1: 65 l	Charge 2: 65 l	Charge 3: 65 l	Charge 1: 65 l	Charge 2: 65 l

AP4: Final analysis and evaluation of the entire database.

Based on the preliminary investigations, the key factors influencing the formation of measured values were worked out and fundamentally described. The evaluation of the data obtained from the main tests made it possible to assess the performance of the respective measurement principle and the general measurement quality of the different test methods.

### 3 Results

The comparison of the results of the extensive preliminary investigations from WP 2 on the test regime made it possible to analyze the influence of the variation parameters under consideration on the formation of air voids in the fresh concrete as well as to gain initial insights into the influence on the measuring accuracy of the test equipment used. A total of seven variation parameters were investigated using 29 concrete batches of the basic top-layer concrete mix design. The fresh concrete parameters (temperature, bulk density, air void content and degree of compaction) were recorded at two test times ( $t > 10$  and 60 min). The scatter of the measured data from different test batches was used as an assessment criterion for the influence of the variation parameters of the test regime. The measuring accuracy of the test equipment used was evaluated in the preliminary investigations on the basis of the difference between the respective expected target value of the fresh concrete bulk density and the air void content, calculated by means of material space calculation, and the actual measured characteristic values.

A graphical representation of all the measurement data recorded for the preliminary tests at the first test time can be found in Fig. 1, left. It can be seen that by varying the parameters of the test regime with a constant concrete mix design, the measured air void contents in the fresh concrete lie in a range between 3.5 and 8.5% by volume and, taking into account the fresh concrete bulk density, predominantly in a range between 2.190 and 2.315 kg/dm<sup>3</sup>. This corresponds to a distribution of the majority of the results within a value range of 5 % by volume or 125 kg/m<sup>3</sup>. One result is recognizable as a clear outlier (marked with a circle).

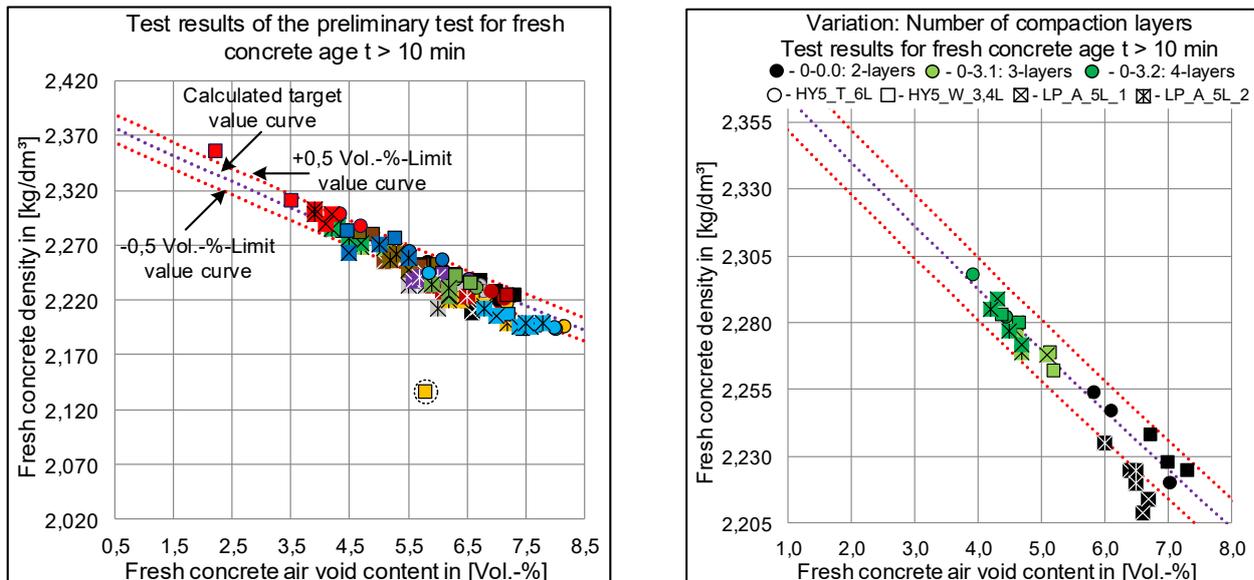


Fig. 1: Overview of all test results at test time  $t > 10$  min (left), determined fresh concrete bulk densities and fresh concrete air void contents; variation "compaction layers" ( $t > 10$  min) (right)

An example of the measured value representation for the influencing parameter "number of compaction layers" of the test regime is shown in Fig. 1, right. The influence of the number of compaction layers on the formation of fresh concrete air voids and bulk density can be clearly seen from the measured values shown. A lower fresh concrete air void content was measured as the number of compaction layers in-creased. The decrease in the scatter of the measured values is also noticeable. If the fresh concrete was compacted in three layers, the measured values were between 4.5 and 5.2 % by volume. The scatter is approximately halved compared to the measured values of the reference test series 0-0.0.

In order to be able to evaluate the measurement quality of the fresh concrete air void content on LP testing devices under different concrete technology conditions, comparative tests were carried out in WP 3 with ten nationally standardized LP testing devices, two internationally standardized and two alternative testing devices. As an example, the bar column chart in Fig. 2 shows the results of the comparative tests at the first test time between the conventional testing devices on three top concretes with an average target LP content of 3.5 to 6.5 vol.-% and three different w/c values. The LP content is underestimated in the majority of LP measurements. A reduction in the measured value deviation can be observed in most cases due to the increase in the w/c ratio. The highest deviations are predominantly found in the stiffer fresh concretes. Seven of the eleven test devices examined show a measured value deviation above the specified limit value of  $\pm 0.50\%$  by volume.

In WP3, microscopy studies were carried out on the hardened concrete as supporting tests. A comparison of the calculated target air pore content of the fresh concrete and the determined hardened concrete parameters on the corresponding cube samples is shown in Fig. 3. A clear gradation of the measured values depending on the target air content (N-low: up to 3.5 vol.-%; M-medium: 3.5 to 6.5 vol.-%; H-high: over 6.5 vol.-%) can be seen. The measured values determined in laboratories from the microscopy analysis are in most cases slightly lower than the corresponding target values of the hardened concrete. The average

deviation of the measured values of 0.36% by volume determined in the IfM laboratory is low. The test specimens of the three concrete types with a medium air content were also examined in an external laboratory. On average, the difference in the measurement results between the two laboratories was 0.67% by volume.

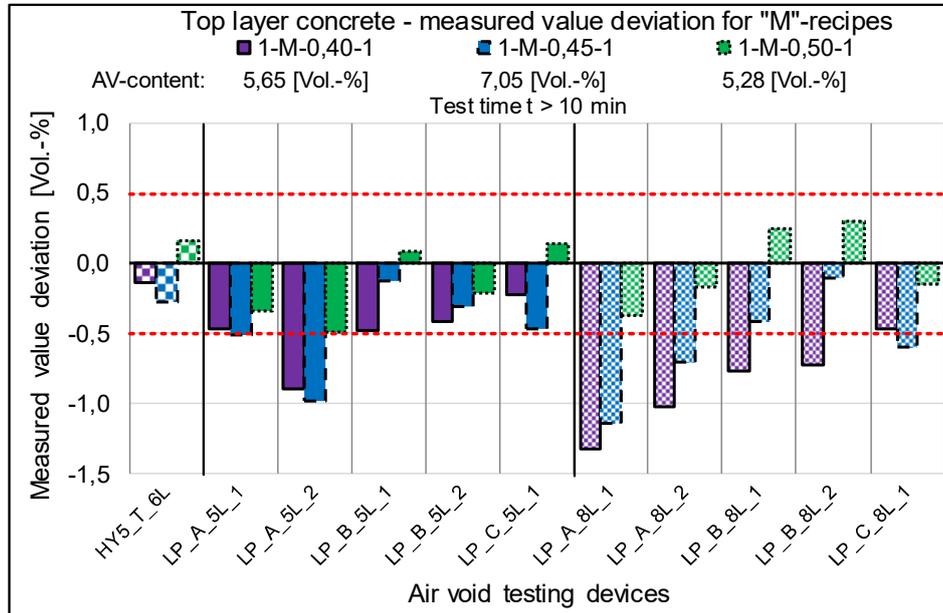


Fig. 2: Comparative study: conventional test devices; recipes: 1-M-1; test time t > 10 min

In the final WP4, the measurement quality of the individual testing techniques was evaluated on the basis of the tests and the generated database for top and bottom concretes. The evaluation criterion was the distribution and the recorded measured value deviations within a total of four defined scattering ranges. An example of the distribution of the measured value deviations (in %) of the respective test device used, determined on top concretes, can be seen in Figure 4.

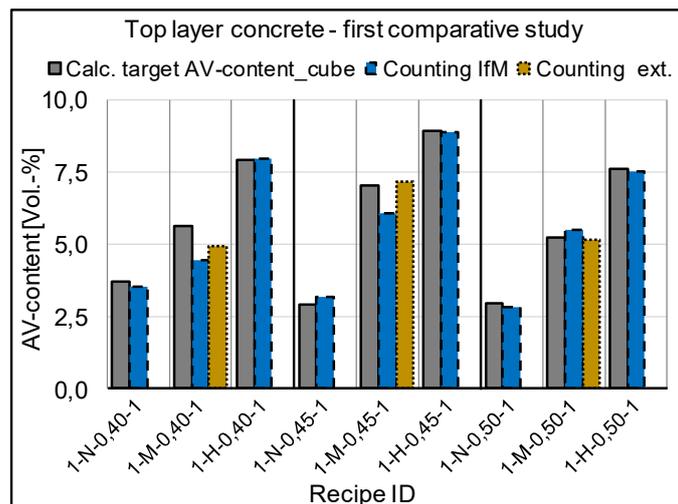


Fig. 3: Results of the determination of the air void characteristics on hardened concrete

When looking at the outer two result blocks, there are clear differences in the measured value deviation rates of individual alternative test methods. The HY5\_T\_6L shows high precision under the HY5 test method. Although SAM\_7L shows measured value deviations in each of the four scattering ranges, almost 80 % are in the low or acceptable range. Among the small devices, only LP\_B\_5L\_1 exhibited a rate of approx. 50 % of low measured value deviations. Around 60 % of the measured value deviations of the

LP\_A devices are in the first two scattering ranges, but low deviations were only observed in 20 % of the measurements. The devices with a larger capacity tend to have higher measured value deviations.

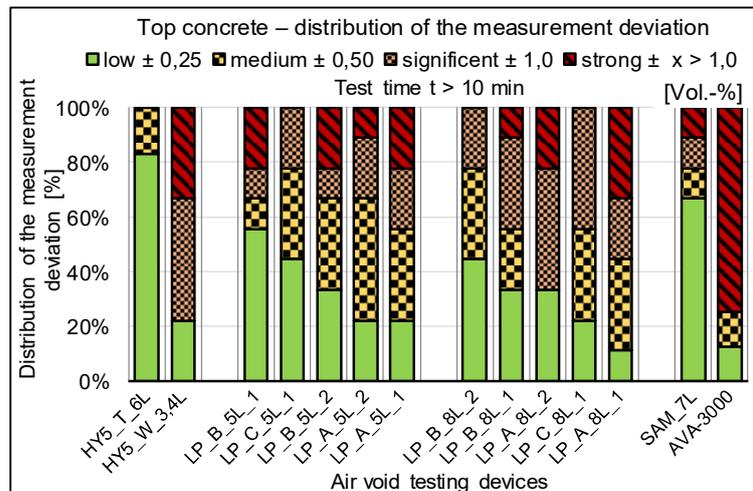


Fig. 4: Distribution of measured value deviations determined on top concretes at the first test time

## 4 Conclusions, summary and outlook

The following findings can be summarized from the preliminary tests:

- Pre-compaction as a result of a 3 m drop height reduced the fresh concrete LP content by approx. 1 vol.-%.
- The different compaction methods have a considerable influence on the LP content. Compaction with an internal vibrator at approx. 12000 rpm usually showed slightly lower LP contents compared to compaction on the 2-motor stationary laboratory vibrating table at 4500 rpm.
- Compaction with three or four concrete layers compared to two layers on the laboratory vibrating table led to a reduction in the LP content of up to 2 vol.-% at the test time of  $t > 10$  min after the end of mixing and to a significant reduction in the measured value deviations.
- Increasing the compaction intensity from 4500 to 6000 rpm reduced the total air void content by an average of up to 1.2 vol.-%. A reduction in the measured value deviations of 0.35 to 0.70 vol.-% was observed when using conventional testing technology.
- The adjustment of the compaction time from 45 s per layer to 30 or 60 s proved to have largely no effect at the first test time. At the second test time, the longer compaction time led to a reduction in the fresh concrete air void content of approx. 1 vol.-%.
- Varying the amount of water added to fill or displace the air cushion using the conventional test method had hardly any effect on the fresh concrete air void content and the accuracy of the measured values, provided the test procedure was followed consistently.
- At an ambient and fresh concrete temperature of 10 °C compared to 20 °C, the determined air void content increased by up to 1 vol.-% at the first test time of  $t > 10$  min. At a fresh concrete temperature of 30 °C or 40 °C, reductions in the fresh concrete air void content of more than 2.0 vol.-% were usually recorded at both test times.

The main tests showed lower measured value deviations with regard to the concrete mix design:

- Top concretes with a high cement paste content and smaller maximum particle size compared to bottom concretes.
- Concretes with a low LP content.

- Plastic and soft bottom concretes with a medium and high w/c ratio, but only with a fresh concrete air void content above 6.5% by volume.

A technical comparison of the testing technology revealed:

- Conventional LP pots from the same manufacturer, but with different capacity volumes (5 and 8 liters), showed different measured values. For top concretes, larger LP pots were able to achieve better measurement accuracy. In contrast, the smaller LP pots measured more accurately when measuring bottom concretes.
- The tests with conventional LP pots from different manufacturers showed that, despite the same service life and calibration for identical models, individual differences in the quality of the measured values were observed. Around 75% of all measurements on various road concretes showed negligible deviations in the measured values.
- In most cases, the Super Air Meter was able to determine the total air void content in the fresh concrete with high measurement quality, but was not able to estimate the spacing factor in the hardened concrete with sufficient accuracy.
- With the AVA-3000 testing technology and the HYDRO\_5 porosimeter, it is planned to determine the air void size distribution in the fresh concrete by recording the micro-air void content A300 in addition to the total air void content. Due to the high stiffness of the fresh concretes, the AVA-3000 testing technology was not suitable for determining the characteristic values of road concrete mix designs. The investigations with the HYDRO\_5 porosimeter showed that the detection of the air void distribution at both test times on the fresh concrete mostly did not correlate with that on the hardened concrete.
- The microscopy analysis of identical hardened concrete specimens at two independent test sites revealed that the method only showed limited repeatability of the results.

Based on the findings obtained, the following conclusion and outlook can be formulated:

- The current standardization shows deficits in the description of the test procedure for air void detection on fresh concrete. As a result, a standardized, detailed test regime should be defined, taking into account significant influencing factors.
- In view of the complexity of the factors influencing the measurement of the air content, only trained and qualified personnel should carry out the tests.

There is still a clear need for research into the:

- Optimization of the test regimes,
- Further development and, if necessary, digitalization of the testing technology for recording the LP content of fresh concrete,
- Further development and, if necessary, digitalization of the testing technology for recording the hardened concrete air void characteristics,
- Evaluation of the influence of new types of air-entrained concretes with environmentally friendly concrete components on the detection of air voids in fresh concrete.

## Bibliography

- [1] BECKER, C.; WIELAND, M. (2017): Fahrbahnoberflächen - Entwicklungen im Betonstraßenbau. In: Beton- und Stahlbetonbau Spezial, S. 54 – 62.
- [2] FORSCHUNG FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV); Arbeitsgruppe „Betonbauweisen“: Merkblatt für bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen aus Beton, FGSV 823 (R2), FGSV Verlag, Köln, 2009.
- [3] DIN EN 206-1:2017-01: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016, Beuth, Berlin, 2017.
- [4] DIN 1045-2:2008-08 (2008) Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Beuth, Berlin, 2008.
- [5] TL Beton-StB 07 - Technische Lieferbedingung für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. FGSV 891, 2007.
- [6] ZTV Beton-StB 07 - Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. FGSV 899, 2007.
- [7] DIN EN 12350-7, 2009-08: Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren; Deutsche Fassung EN 12350-7:2009.
- [8] 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.

---

# Inhalt

---

Abkürzungen	17
<b>1 Einleitung</b>	<b>22</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>24</b>
2.1 Allgemeine Anforderungen an Straßenbeton und Regelwerke	24
2.2 Grundlagen zum Frost-Tausalz-Widerstand	24
2.2.1 Schäden unter Frost- und Frost-Tau-Einwirkungen	24
2.2.2 Porensystem und Porenwasser	25
2.2.3 Transport- und Schädigungsmechanismen	26
2.3 Luftporengehalt im Beton	29
2.3.1 Allgemeines	29
2.3.2 Luftporenbildner und ihre Wirkungsweise	29
2.3.3 Messmethoden – Luftporengehalt im Frischbeton	31
2.3.4 Messmethoden – Luftporengehalt am Festbeton	39
<b>3 Arbeitsprogramm</b>	<b>41</b>
3.1 Allgemeines	41
3.1.1 Arbeitsphase 1	42
3.1.2 Arbeitsphase 2	45
3.1.3 Arbeitsphase 3	48
3.1.4 Arbeitsphase 4	50
<b>4 Ausgangsstoffe, Rezepturen und Herstellung der Betone</b>	<b>51</b>
4.1 Ausgangsstoffe	51
4.1.1 Zement	51
4.1.2 Gesteinskörnungen	51
4.1.3 Luftporenbildner und Fließmittel	52

4.2	Betonrezepturen	53
4.3	Herstellung, Lagerung und Vorbereitung der Betonprobekörper	54
4.3.1	Allgemeines	54
4.3.2	Arbeitsphase 2	55
4.3.3	Arbeitsphase 3	55
<b>5</b>	<b>Untersuchungsmethoden</b>	<b>57</b>
5.1	Frischbetonprüfungen	57
5.2	Druckfestigkeitsermittlung	57
5.3	Spaltzugfestigkeitsermittlung	57
5.4	Ermittlung der Luftporenkennwerte am Festbeton	58
<b>6</b>	<b>Untersuchungsergebnisse der Versuche zur Bestimmung des Prüfregimes</b>	<b>59</b>
6.1	Allgemeines	59
6.2	Rechnerische Grundlagen	59
6.2.1	Frischbeton-Rohdichte – Ist- und Soll-Werte	59
6.2.2	Frischbeton-Luftporengehalt – Ist- und Soll-Werte	60
6.2.3	Rechnerischer Wassergehalt – Ist- und Soll-Werte	63
6.2.4	Rechenabfolge am Beispiel der Versuchsreihe 0-0.0 zum ersten Prüfzeitpunkt von $t > 10$ min	63
6.3	Übersicht der Gesamtergebnisse zum Einfluss des Prüfregimes	66
6.3.1	Allgemein	66
6.3.2	Häufigkeitsverteilung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Werten der FB-Rohdichte	68
6.3.3	Häufigkeitsverteilung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Werten des FB-Luftporengehaltes	70
6.3.4	Häufigkeitsverteilung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Werten des rechnerischen Wassergehaltes	72
6.4	Einfluss der Prüfregimevariation auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit	74
6.4.1	Allgemeines	74
6.4.2	Einfluss der Probenentnahmeart auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit	74
6.4.3	Einfluss der Verdichtungsart auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit	77
6.4.4	Einfluss der Anzahl der Verdichtungslagen auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit	80

6.4.5	Einfluss der Verdichtungsintensität auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit _____	83
6.4.6	Einfluss der Verdichtungsdauer auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit _____	86
6.4.7	Einfluss des Einfüllprozesses des Wassers auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit _____	89
6.4.8	Einfluss der Frischbeton-Temperatur auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit _____	91
6.4.9	Zusammenfassung _____	95
<b>7</b>	<b>Ergebnisse der Tastversuche zum Aufstellen der Versuchsmatrix _____</b>	<b>98</b>
<b>8</b>	<b>Hauptuntersuchungen der Arbeitsphase 3 – Vergleichsuntersuchungen zur Messgütebestimmung der LP-Prüfgeräte _____</b>	<b>101</b>
8.1	Allgemeines _____	101
8.2	Ergebnisse – Frischbetonkennwerte _____	102
8.3	Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung mit national genormten LP-Prüfgeräten _____	103
8.3.1	Allgemein _____	103
8.3.2	Ergebnisse an Oberbetonen (D = 8 mm) _____	104
8.3.3	Ergebnisse an Unterbetonen (D = 22 mm) _____	111
8.3.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse _____	118
8.4	Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung mit international genormten bzw. alternativen LPPrüfgeräten _____	120
8.4.1	Allgemein _____	120
8.4.2	Ergebnisse an Oberbetonen (D = 8 mm) _____	120
8.4.3	Ergebnisse an Untertonen (D = 22 mm) _____	126
8.4.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse _____	130
8.5	Ergebnisse der Ermittlung der Luftporenkennwerte am Festbeton _____	131
8.5.1	Allgemein _____	131
8.5.2	Vergleich der Ergebnisse des Gesamtluftporengehaltes ermittelt durch zwei unabhängige Labore _____	132
8.5.3	Luftporenkennwerte – Mikro-Luftporengehalt A300 und Abstandsfaktor L im Vergleich _____	134
8.5.4	Ergebnisvergleich der Luftporengrößenverteilung _____	141
8.5.5	Zusammenfassung – Erkenntnisse zu Luftporenkennwerten am Festbeton _____	147

8.6	Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen im Probenalter von 28 Tagen _____	149
8.6.1	Allgemein _____	149
8.6.2	Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsuntersuchung _____	150
8.6.3	Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchung _____	155
8.6.4	Zusammenfassung - Erkenntnisse zu Festigkeitsuntersuchungen _____	159
8.7	Messgütebewertung der verwendeten konventionellen und alternativen Prüfverfahren anhand der gesamten Datenbasis der Vergleichsuntersuchungen _____	160
8.7.1	Allgemeines _____	160
8.7.2	Spannweite der Streuung von ermittelten Messwertabweichungen der verwendeten Prüftechnik _____	161
8.7.3	Beurteilung der Messgüte der verwendeten Prüftechnik anhand der Verteilung der Messwertabweichungen innerhalb der Streubereiche _____	164
8.7.4	Messgütevergleich ausgewählter Prüftechnik sowie Beurteilung der Einflussfaktoren auf die Messqualität der LP-Messung aus der Vergleichsuntersuchung _____	168
8.7.5	Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse aus den Hauptuntersuchungen _____	169

## 9 Zusammenfassung, Empfehlung und Ausblick \_\_173

Literatur \_\_\_\_\_183

Normen und Regelwerke \_\_\_\_\_186

Tabellen \_\_\_\_\_187

Bilder \_\_\_\_\_189

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

## Abkürzungen

Ø	Durchmesser
$A_{c,ist}$	gemessener Ist-Wert des Frischbetonluftporengehalts
$A_{c,soll}$	rechnerischer Soll-Wert des Frischbetonluftporengehalts
$A_{300}$	Mikroluftporengehalt von Luftporen der Größe < 300 µm
ACI	American Concrete Institute
AKR-Performanceprüfung	Prüfungen zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion
AP	Arbeitspaket
ASTM	American society for testing and materials
AVA bzw. AVA-3000	Air Void Analyser
$B_m$	Frischbetonmasse
$B_v$	Frischbetonvolumen
$C_{100}$	Anteil gebrochener Körner der verwendeten Gesteinskörnung
CDF-Test	Capillary suction of de-icing solution and freeze thaw test
CDF-Prüfverfahren	Prüfverfahren zur Ermittlung des Frost-Tausalz-Widerstandes
CEM I	Portlandzement
C-S-H	Calcium-Silikat-Hydrat
D	Größtkorn
DIN	Deutsches Institut für Normung
EI-S	AKR-Widerstand der Gesteinskörnung
E-Modul	Elastizitätsmodul
EW	Einzelwert
$f_{1,5}$	Feinanteile der Gesteinskörnung
$f_{c,cube}$	Einzelwert der Druckfestigkeit, ermittelt an Würfelproben
$f_{cm,cube}$	Mittelwert der Druckfestigkeit, ermittelt an Würfelproben
$f_{ct,sp}$	gemessener Einzelwert der Spaltzugfestigkeit
$f_{ctm,sp}$	Mittelwert der Spaltzugfestigkeit ermittelt aus mehreren gemessenen Einzelwerten
$f_{ctk,sp}$	charakteristischer Wert der Spaltzugfestigkeit
FB-Luftporengehalt	Frischbetonluftporengehalt
FB-Kenndaten	Frischbetonkenndaten
FB-Proben	Frischbetonproben
FB-Rohdichte	Frischbetonrohichte
FB-Temperatur	Frischbetontemperatur
FE-Vorhaben	Forschungsvorhaben
G	Korrekturfaktor zur Reduzierung des LP-Gehaltes gemäß DIN EN 12350-7
$G_1$	Masse des HY5-Prüfgerätes inkl. Frischbetonprobe

G <sub>2</sub>	Masse des HY5-Prüfgerätes inkl. Frischbetonprobe und drucklos zugeführtem entlüfteten Wasser
G <sub>3</sub>	Masse des HY5-Prüfgerätes inkl. unter Druck gesetzte Frischbetonprobe mit zugeführtem entlüftetem Wasser
G <sub>kor</sub>	Korrekturwert der Deformierung des Prüfbehälters unter Druck
gem.	gemessenen
ggf.	gegebenenfalls
GK	Gesteinskörnung
HY5-Serie	alternative Prüfgeräte des Typs HY5
HY5_T_6L	HYDRO_5 - Topf mit Fassungsvermögen von 6 Litern
HY5_W_3,4L	HYDRO_5 – Würfel mit Fassungsvermögen von 3,4 Litern
HY5_Porosimeter	Zusatzmesseinheit zur Bestimmung der Luftporenverteilung im Frischbeton
i.d.R.	in der Regel
IfM	Institut für Massivbau der Universität Duisburg - Essen
k	Toleranzwert zur Auswertung der statistischen Sicherheit
L Abstandsfaktor	größter idealisierter Abstand eines Zementsteins und Luftpore
LP	Luftporen
LP_A_5L/8L_1/2	konventionelle Luftporentöpfe des Herstellers A mit Fassungsvermögen von 5 bzw. 8 Litern und laufender Nummer 1 bzw. 2
LP_B_5L/8L_1/2	konventionelle Luftporentöpfe des Herstellers B mit Fassungsvermögen von 5 bzw. 8 Litern und laufender Nummer 1 bzw. 2
LP_C_5L/8L_1	konventionelle Luftporentöpfe des Herstellers C mit Fassungsvermögen von 5 bzw. 8 Litern
LP-Beton	Luftporenbeton
LP-Bildner	Luftporenbildner
LP-Dosierung	Dosierung des Luftporenbildners
LP-Erhöhung	Erhöhung des Luftporengehaltes im Frischbeton
LP-Gehalt	Luftporengehalt
LP-Gehaltsprüfer	Luftporengehaltsprüfer siehe auch LP-Prüfgeräte
LP-Gerät	Luftporenmessgerät
LP-Kennwerte	Luftporenkennwerte
LP-Messbildung	Messwertbildung während der Ermittlung des Luftporengehaltes
LP-Messverfahren	Luftporenmessverfahren
LP-Topf	konventioneller Luftporentopf
LP-Verhalten	Entwicklungsverhalten der Luftporen im Frischbeton
LP-Wert	Luftporenwerte
LP-Zugabemenge	Zugabemenge des Luftporenbildners
Rezeptur-ID	Kennzeichnung der Rezeptur
M <sub>1</sub>	Masse des leeren LP-Prüfgerätes
M <sub>2</sub>	Masse des LP-Prüfgerätes, das vollständig mit Wasser gefüllt ist

$M_3$	Masse des LP-Prüfgerätes mit der abgestrichenen Frischbetonprobe und Restluft in dem Prüfbehälter
$M_4$	Masse des LP-Prüfgerätes mit der abgestrichenen Frischbetonprobe und Wasser in dem Prüfbehälter
$M_x$	Masse des jeweiligen Bestandteils des Frischbetons
$M_{\text{Fest}}$	Masse aller Feststoffanteile des Frischbetons
$M_{\text{Sättigung}}$	Masse des Zugabewassers zur Sättigung der Gesteinskörnung
$M_{\text{Zugabewasser}}$	Masse des Zugabewassers zur Hydratation
$M_{\text{Zusatzmittel}}$	Masse der zugegebenen Zusatzmittel
$M_{\Delta\text{Wasser}}$	eingepresste Wassermenge in den Prüfbehälter unter Wasserprüfdruck
$MW$	Mittelwert
$n$	Anzahl der Probekörper
$N$	Anzahl der gemessenen Luftporen im Festbeton
$p_1$	eingeleiteter Prüfüberdruck in der Druckkammer im konventionellen LP-Topf
$p_2$	Prüfüberdruck nach dem Öffnen des Zwischenventils im konventionellen LP-Topf
$p_{\text{prüf}}$	angesetzter Prüfwasserüberdruck
$P$	statistische Sicherheit
$PSV_{53}$	Polierwiderstand der Gesteinskörnung
rechn.	rechnerisch
$SAM_{7L}$	Super Air Meter mit Fassungsvermögen von 7 Litern
$Sl_{15}$	Kornform der Gesteinskörnung
$StC$	Spaltzugfestigkeitsklasse der Straßenbetone
$SZ_{18}$	Schlagzertrümmerungswert der Gesteinskörnung
$t$	Prüfzeitpunkt
TL Beton-StB	Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton
TL Gestein-STB	Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau
TP B-StB	Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen
TP Beton-StB	Technische Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton
u. a.	unter anderem
$V_x$	Volumen des jeweiligen Bestandteils des Frischbetons
$V_1$	Volumen der Druckkammer des konventionellen LP-Topfes
$V_2$	Volumen der Luftporen im Frischbeton des gefüllten LP-Topfes
$V_{HY5}$	zur Verfügung stehende Gesamtvolumen in dem eingeschlossenen Prüfbehälter
$V_{\text{Luft}}$	Luftporengehalt in der Frischbetonprobe

$V_{\text{Fest}}$	Volumen aller Feststoffanteile des Frischbetons
vgl.	vergleiche
w/z-Wert	Wasserzementwert
ZTV	Zusätzliche technische Vertragsbedingungen
ZTV Beton-StB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton
$\rho_{\text{Ist}}$	gemessener Ist- Wert der Frischbetonrohichte der untersuchten Frischbetonprobe
$\rho_{\text{Soll}}$	rechnerischer Soll-Wert der Frischbetonrohichte unter Berücksichtigung des gemessenen Luftporengehaltes mittels des jeweiligen LP-Prüfgeräts
$\Delta \text{WG}_{\text{Ist}}$	gemessener Ist-Wert des rechnerischen Wassergehalts
$\Delta \text{WG}_{\text{Soll}}$	rechnerischer Soll-Wert des rechnerischen Wassergehalts

## Maßeinheiten

$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius	(Temperatur)
l	Liter	(Volumen der Flüssigkeiten und Gase)
$\text{l}/\text{m}^3$	Liter pro Kubikmeter	(Volumen der Flüssigkeiten und Gase)
$\text{dm}/\text{m}^3$	Dezimeter pro Kubikmeter	(Volumen der Feststoffe)
Vol.-%	Volumenprozent	(Volumenanteil des Luftporengehaltes)
s	Sekunden	(Zeiteinheit)
min	Minuten	(Zeiteinheit)
d	Tage	(Zeiteinheit)
nm	Nanometer	(Längeneinheit)
$\mu\text{m}$	Mikrometer	(Längeneinheit)
mm	Millimeter	(Längeneinheit)
cm	Zentimeter	(Längeneinheit)
m	Meter	(Längeneinheit)
bar	Bar	(Druckeinheit)
psi	Pound-force per square inch	(Druckeinheit)
kg	Kilogramm	(Gewichtseinheit)
$\text{kg}/\text{dm}^3$	Kilogramm pro Kubikdezimeter	(Einheit der Dichte)
$\text{kg}/\text{m}^3$	Kilogramm pro Kubikmeter	(Einheit der Dichte)
Hz	Herz	(Einheit der Frequenz)
U/min	Umdrehungen pro Minute	(Einheit der Winkelgeschwindigkeit)
M.-%	Massenprozent	(Mengenanteil)
M.-% von Z.	Massenprozent von Zement	(Mengenanteil)
$\text{N}/\text{mm}^2$	Newton pro Millimeter	(Einheit des Drucks / der Spannung)

kN	Kilonewton	(Krafteinheit)
MPa	Megapascal	(Einheit des Drucks / der Spannung)
cm <sup>2</sup> /g	Quadratcentimeter pro Gramm	(Spezifische Oberflächeneinheit nach BLAINE)

# 1 Einleitung

Die Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit der Straßeninfrastruktur sind wesentlich für eine funktionierende und kontinuierliche Mobilität, die eine der Grundlagen für eine erfolgreiche Wirtschaft darstellt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind Straßenbauweisen erforderlich, die lange Nutzungszeiten mit möglichst geringen Einschränkungen bezüglich ihrer Verfügbarkeit bei gleichzeitig dauerhaften Gebrauchseigenschaften aufweisen. Während das Verkehrsaufkommen entsprechend der Prognosen weiterhin stetig zunimmt und somit die daraus resultierenden höheren mechanischen Lasten aus dem überrollenden Verkehr sicher aufgenommen und abgeleitet werden müssen, ist im selben Zuge auch ein ausreichender Widerstand gegenüber den zusätzlichen Einwirkungen aus der Umwelt zu gewährleisten. [2, N24] Fahrbahndecken aus Beton sind aufgrund ihrer langen Nutzungsdauer und geringen Wartungsintensität besonders für den Straßenbau geeignet. Um die erforderliche Qualität sicherzustellen, müssen Normen und Regelwerke für Dimensionierung, Konstruktion, Betontechnologie, Nachbehandlung und Wartung während des Herstellungs- und Nutzungszeitraums umgesetzt werden. Normative Grundlagen für Straßenbeton sind beispielsweise in DIN EN 206-1 [N5], DIN 1045-2 [N10], TL Beton-StB 07 [N21] und ZTV Beton-StB 07 [N23] und weiteren einschlägigen Regelwerken enthalten.

Um Schäden aufgrund von Frost-Tausalz-Angriffen zu vermeiden, muss der Beton einen ausreichenden Luftporengehalt aufweisen. Dieser wird üblicherweise durch künstlich eingeführte Luftporen mittels Zugabe von Luftporenbildnern während der Herstellung erreicht. Art und Menge der künstlich eingeführten Luftporen hängen von den eingesetzten Zusatzmitteln ab und stehen in Wechselwirkung zu den restlich verwendeten Ausgangsstoffen des Betons. Es muss ein Optimum zwischen der nun erhöhten Gesamtporosität des Betons zur Erhöhung des Frost-Tausalz-Widerstands und der Einhaltung der geforderten Festigkeitseigenschaften des Straßenbetons gefunden werden. Als maßgebende Kennwerte gelten die Druck- und die Spaltzugfestigkeit des Festbetons.

In der Praxis wird der Luftgehalt im Frischbeton üblicherweise mittels des konventionellen LP-Topfes mittels Druckausgleichsverfahren [N15] bestimmt. Jedoch stellt sich die Frage, inwiefern dieser am Frischbeton unter bestimmten Randbedingungen ermittelte Gesamtluftporengehalt mit den am Festbeton mithilfe der Mikroskopie-Analyse [N6] ermittelten Kennwerten korreliert. Für den Frost-Tausalz-Widerstand sind die Kennwerte Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$  und der Abstandsfaktor  $L$  zwischen den Luftporen von besonderer Bedeutung. Zudem ist bekannt, dass die mit dem LP-Topf ermittelten Luftgehalte aufgrund von Einflussfaktoren der eingesetzten Prüftechnik, der Prüfdurchführung, der vorherrschenden klimatischen Umgebungsbedingungen und der Fertigkeit des Prüfpersonals starken Schwankungen unterliegen. Daher war es in diesem FE-Projekt von besonderer Bedeutung, zunächst ein präzises und reproduzierbares Prüfregime für den Luftgehalt im Frischbeton zu entwickeln, um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse der anschließenden Vergleichsuntersuchungen sicherzustellen. Des Weiteren wurde die Praxistauglichkeit gängiger Luftgehaltsprüfgeräte und die Vergleichbarkeit ihrer Ergebnisse unter verschiedenen Bedingungen untersucht. Des Weiteren kamen ebenfalls international genormte bzw. alternative Prüfverfahren zum Einsatz.

## Zielsetzung

Der Luftporengehalt im Festbeton wirkt sich maßgeblich auf die Festigkeiten und den Frost-Tau-Widerstand mit und ohne Taumittel aus. Unter der Annahme, dass der LP-Gehalt im Frischbeton mit dem LP-Gehalt im Festbeton korreliert, muss die LP-Gehaltsbestimmung am Frischbeton sehr präzise und reproduzierbar sein. Um das beurteilen zu können, wurden im Rahmen dieses FE-Vorhabens folgende Ziele definiert:

- Identifikation der Einflussfaktoren auf die LP-Gehaltsbestimmung
- Erarbeitung eines Prüfregimes für die Vergleichsuntersuchungen
- Bewertung der Messgüte der LP-Prüftechnik in Vergleichsuntersuchungen

Das Prüfregime zur Erfassung der Luftporen am Frischbeton und die unter verschiedenen Randbedingungen gewonnenen Erkenntnisse sollen zur Steigerung der Messgenauigkeit im Zuge von Erst- und Kontrollprüfungen sowie zur Verbesserung der Qualitätsüberwachung bei der Fahrbahnbetonherstellung beitragen. Daraus sollen entsprechende Empfehlungen für die Praxis und / oder Regelwerke abgeleitet werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen somit zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit der Betonstraßen dienen, die Verfügbarkeit der Infrastruktur erhöhen und die Instandhaltungskosten reduzieren.

### **Vorgehen**

Nach einer umfassenden Literaturrecherche und praktischen Studien wird ein Prüfregime zur präzisen Bestimmung des tatsächlichen Frischbeton-Luftporengehaltes konzipiert. Nach diesem festgelegten Prüfregime werden anschließend national und international genormte Luftporengehaltsprüfer, aber auch nicht genormte Alternativen gerätetechnischen Vergleichsuntersuchungen unterzogen. Die Prüfungen werden an einem Ober- und einem Unterbeton durchgeführt. Die Betonrezepturen wurden auf der Grundlage praxisüblicher Rezepturen sowie eigener Erfahrungen aus früheren Forschungsvorhaben gewählt. Die Parameterwahl zur Berücksichtigung von Einflüssen aus Probenvorbereitung und Durchführung zur Bestimmung des Prüfregimes sowie die betontechnologischen Parameter wurden im Rahmen von Voruntersuchungen erarbeitet. In späteren Arbeitsphasen wurden an ausgewählten Rezepturen LP-Kennwerte am Festbeton, die Spaltzugfestigkeit sowie Druckfestigkeit ermittelt.

Das prinzipielle Vorgehen innerhalb des Arbeitsplans umfasst sieben Arbeitspakete, vgl. Kapitel 3.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Allgemeine Anforderungen an Straßenbeton und Regelwerke

Zur Gewährleistung der Leistungsfähigkeit und der Qualität müssen Normen und Regelwerke zur Dimensionierung und Konstruktion, Betontechnologie, Fertigung, Nachbehandlung und Wartung berücksichtigt und umgesetzt werden. Die Grundlage für den Straßenbeton bilden die DIN EN 206-1 [N5] mit der DIN 1045-2 [N10], verbunden mit der TL Beton-StB 07 [N21] und der ZTV Beton-StB 07 [N23]. Die Anforderung an die Ausgangsstoffe sind in den einschlägigen Regelwerken enthalten. So gilt für Zement die DIN EN 197-1 [N4], für Gesteinskörnungen die TL Gestein-STB [N22], für das Zugabewasser die DIN EN 1008 [N9], für Betonzusatzmittel die DIN EN 934-2 [N8] sowie DIN 1045-2 [N10] und für die Betonzusatzstoffe gelten verschiedene Normen entsprechend ihrer Art, vgl. [N5]. Die Eignung einer Betonzusammensetzung für einen vorgesehenen Verwendungszweck wird in einer Erstprüfung vor Baubeginn sichergestellt. Eigenüberwachungsprüfungen durch den Auftragnehmer und Kontrollprüfungen durch den Auftraggeber sichern die Güte der Einbaugemische und der Betonfahrbahnherstellung während der Ausführung nach TP Beton-StB [N19] bzw. TP B-StB [N20].

Zur Erzielung eines ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstandes sind für Straßenbetone die erforderlichen LP-Gehalte des Frischbetons in der TL Beton-StB [N21] bzw. ZTV Beton-StB [N23] in Abhängigkeit des Größtkorns (D) zwischen 5,5 Vol.-% (D = 8 mm) und 4,0 Vol.-% (D = 32 bzw. 22 mm) gestaffelt. Bei der kombinierten Anwendung von LP-Bildern und verflüssigenden Zusatzmitteln werden wegen zu erwartender Wechselwirkungen und möglicher Unverträglichkeiten, z. B. beim Einsatz bestimmter Fließmittel mit entschäumender Wirkung um 1 Vol.-% höhere LP-Gehalte gefordert.

Gemäß TL Beton-STB 07 [N21] muss bei der Erstprüfung am Festbeton ein Mikro-Luftporengehalt  $A_{300} \geq 1,8$  Vol.-% mit einem Abstandsfaktor  $L \leq 0,20$  mm nachgewiesen werden. Im Rahmen von Kontrollprüfungen werden am Bauwerk geringfügig niedrigere Anforderungen gestellt.

### 2.2 Grundlagen zum Frost-Tausalz-Widerstand

#### 2.2.1 Schäden unter Frost- und Frost-Tau-Einwirkungen

POWERS [42] hat Mitte der 40er Jahre die Schadensmechanismen unter Frost-Beanspruchungen untersucht und damals zwei Schädigungsarten, die äußere Schädigung und die innere Schädigung, unterschieden.

Äußere Schädigungen sind oberflächennah und zeigen sich in Form von abgesandeten Flächen, lokalen klein- bis großflächigen Abplatzungen des Zementsteins und Absprengungen frostbeständiger Gesteinskörnungen (Pop-outs) aus dem Zementstein. Je nach Schädigungsgrad entscheidet sich, ob es sich um ästhetische Mängel handelt oder ob fortschreitend die Schäden zur Einschränkung oder zum Verlust der Gebrauchstauglichkeit führen. Insbesondere bei Verkehrsflächen stellen äußere Schäden eine potentielle Unfallgefahr dar.

Bei der inneren Schädigung ist das Betongefüge infolge von Mikrorissen zerstört. Sie zeigen sich zu Beginn meist in der Kontaktzone Zementstein-Gesteinskörnung. Mit zunehmender Zerstörung erfassen sie den Bauteilquerschnitt und lockern das Betongefüge. Die Risse können sich bis zur Bauteiloberfläche entwickeln. Das hat Auswirkungen auf Betonfestigkeitseigenschaften, auf den E-Modul und auf die Dauerhaftigkeit und beeinflusst letztendlich die Tragsicherheit der Verkehrsfläche.

Abhängig von Feuchtigkeitsgehalt und Anzahl der Frost-Tau-Vorgänge, wirkt sich die Zunahme der Geschwindigkeit bei Abkühlung und die Dauer der Einwirkung tiefer Temperaturen, aber auch Beaufschlagungen durch Taumittel schadensverstärkend aus [1, 22].

## 2.2.2 Porensystem und Porenwasser

Beim Frostangriff hängen die Schädigungs- und Feuchtetransportmechanismen im Beton sehr stark vom komplexen Porensystem und dessen Eigenschaften ab. Die Porenradienverteilung umfasst Größenordnungen von wenigen Nanometern bis zu einigen Millimetern. Eine scharfe Klassifizierung ist nicht möglich, daher liegt in der Literatur keine einheitliche Einteilung vor. Entsprechend ihrer Entstehung können die Poren im Beton in Verdichtungsporen, Mikro-Luftporen, Kapillarporen und Gelporen eingeteilt werden. Bild 2-1 gibt einen Größenvergleich der Feststoffe und der Poren im Beton [48].

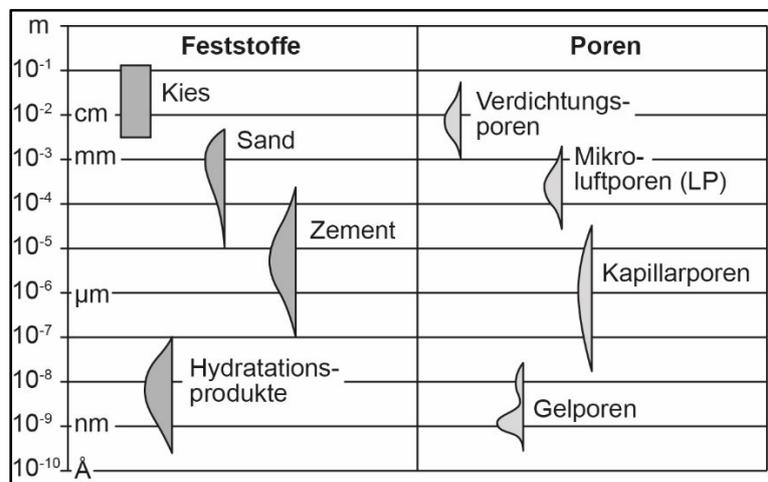


Bild 2-1: Größenvergleich von Feststoffen und Poren im Beton nach [48]

Verdichtungsporen entstehen bei der Betonherstellung. Sie liegen meist im Größenbereich zwischen 1 mm und mehreren Millimetern und sind mit bloßem Auge sichtbar. Trotz intensiver Verdichtung sind sie in Abhängigkeit von der Konsistenz nicht vollständig zu eliminieren, was sich besonders bei steifen Konsistenzen zeigt. Die Mikro-Luftporen werden durch LP-Mittel künstlich erzeugt und haben Porendurchmesser von 0.01 mm bis 1 mm.

Tab. 2-1: Einteilung der Porengröße nach Setzer [49] aus [12]

Porenklasse	$r_h$	Art des Porenwassers	Charakteristika
1	2	3	4
Grobporen	> 1 mm	leer	nur bei drückendem Wasser befüllbar
Makrokapillarporen	30 µm bis 1 mm	makroskopisches Wasser	geringe Steighöhe
Mesokapillarporen	1 µm bis 30 µm	makroskopisches Wasser	beachtenswerte Steighöhe in wenigen Tagen
Mikrokapillarporen	30 nm bis 1 µm	makroskopisches Wasser	extremer Kapillardruck, erhöhte innere Reibung
Mesogelporen	1 nm bis 30 nm	vorstrukturiertes Wasser	Kondensation bei $\phi > 50\%$
Mikrogelporen	< 1 nm	strukturiertes Oberflächenwasser	stark gestört

Die Kapillarporen entstehen durch das weder chemisch noch physikalisch gebundene Überschusswasser im Beton in Abhängigkeit vom w/z-Wert. Sie treten in einer Größenordnung von 10 nm bis 100 µm auf. Bei der Hydratation von Zement mit Wasser bildet sich in Abhängigkeit von Zeit und Wasserangebot eine Umhüllung aus Zementgel um einen sich stetig verkleinernden noch unhydratisierten Zementkern. Die Zwickel

zwischen den aneinanderstoßenden Zementgelumhüllungen bilden die Kapillarporen. Der Kapillarporenraum reduziert sich mit fortschreitender Hydratation, solange noch Anmachwasser zur Verfügung steht. Während dieses Prozesses gelangt das Wasser durch Diffusion ungehindert durch das Zementgel zum Zementkern. Über den Kapillarporenraum finden praktisch alle Transportmechanismen statt. Bei besonderen Anforderungen an die Dichtheit und die Dauerhaftigkeit eines Betons gilt es, den Kapillarporenraum zu minimieren.

Die Gelporen sind die kleinsten Poren im Zementstein und meist kleiner als 10 nm. Dies sind die Zwischenräume zwischen den sich entwickelnden C-S-H-Phasen im Zementgel während der Hydratation von Wasser und Zement [60].

Später empfiehlt SETZER eine Poreneinteilung (vgl. Tab. 2-1) unter Bezugnahme des physikalischen Verhaltens von Porenwasser. Er definiert den hydraulischen Radius  $r_h$  als Verhältnis von Porenvolumen zur Porenoberfläche. Unter der vereinfachten Annahme von zylindrischen Poren berechnet sich der hydraulische Radius zu [12, 48]:

$$r_h = \frac{V}{A} = \frac{r}{2} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Physikalische und chemische Effekte verändern das Gefrierverhalten in der Porenlösung im Beton. Der Gefrierpunkt, der bei atmosphärischem Druck auf Meereshöhe bei 0 °C liegt, erniedrigt sich im Porenwasser infolge von sich darin gelösten Stoffen, hohen Drücken und der Wirkung von Oberflächenkräften. Die Alkalität der Porenlösung im Beton erniedrigt z. B. den Gefrierpunkt um ca. 1,3 bis 3 K [21]. Wirkungsvoller sind allerdings Taumittel, abhängig von dessen Art und Konzentration. So kann eine NaCl-Lösung eine Gefrierpunktniedrigung bis zu -21 °C bewirken, eine CaCl<sub>2</sub>-Lösung bis zu -39,5 °C [3]. Bei Gelporen und Mikrokapillarporen ( $r_h < 100$  nm) sind Oberflächenkräfte in vergleichbarer Weise für die Reduzierung des Gefrierpunktes verantwortlich, da die innere Oberfläche eine Reduzierung des chemischen Potentials des Porenwassers verursacht. In Tab. 2-2 sind die Gefrierpunkte des Porenwassers in Abhängigkeit von der Porenklasse zusammengefasst. Daraus kann für das Frostverhalten von Beton abgeleitet werden, dass bis -20 °C nur 40 % des Porenwassers gefriert. [3, 12]

Tab. 2-2: Gefrierpunkt des Porenwassers in den entsprechenden Porenklassen [49, 56], modifiziert [12]

Porenklasse	Gefrierpunkt des Porenwassers
1	2
Makrokapillarporen	gefrierbar bis -20 °C
Mesokapillarporen	gefrierbar bis -20 °C
Mikrokapillarporen	gefrierbar bis -20 °C
Mesogelporen	Gefrierphasenübergänge bei -24 °C, -31 °C und -39 °C
Mikrogelporen	Gefrierphasenübergänge bei -90 °C

Ergänzend sei auch noch auf Unterkühlungseffekte hingewiesen, bei denen aufgrund verzögerter Phasenübergänge zwischen Gefrieren und Auftauen noch keine Eisbildung trotz Wassersättigung stattfindet. Bei Beton sind Unterkühlungseffekte bis -4 °C aufgrund einer ausreichenden Verteilung von Grobporen möglich. [1, 3, 21]

### 2.2.3 Transport- und Schädigungsmechanismen

Bei den Schädigungen infolge von Frost-Tau-Wechseln mit oder ohne Taumittel werden physikalische und chemische sowie makroskopische und mikroskopische Mechanismen unterschieden [26, 39]. Einen Überblick über Schadensmechanismen infolge Frostbeanspruchung gibt Tab. 2-3.

Bei den makroskopischen Modellen verursachen unterschiedliche Temperatursausdehnungskoeffizienten der Betonbestandteile untereinander und gegenüber dem Eis in den Poren kritische Zugspannungen im Beton. Wasser dehnt sich beim Gefrieren um 9 Vol.-% aus, Zementstein hat gegenüber Eis einen bis zu 5-fach niedrigeren Temperatursausdehnungskoeffizienten [41]. Der gleichzeitige Einsatz von Taumitteln verstärkt die Oberflächenschäden. So kann ein Temperatursturz (Temperaturgradient) innerhalb der oberen Millimeter durch Auftauen einer Eisschicht auf der Oberfläche durch aufgestreutes Tausalz zu Schäden führen. Der Schädigungsgrad wird beeinflusst durch den Konzentrationsgradienten, die Wasseraufnahmefähigkeit, die Eindringtiefe, den Sättigungsgrad und die chemische Aggressivität des Taumittels [26, 39, 44]. Hervorzuheben ist zudem das schichtenweise Gefrieren aufgrund eines Chloridgradienten, der den Gefrierpunkt des Porenwassers senkt. Schichten, in denen die Gefrierpunktabenkung größer ist als die Gefriertemperatur, bleiben ungefroren. Ein späteres Gefrieren der mittleren Schicht bei weiterer Abkühlung kann zum Abplatzen der Oberflächenschicht führen, vgl. Bild 2-2 [4].

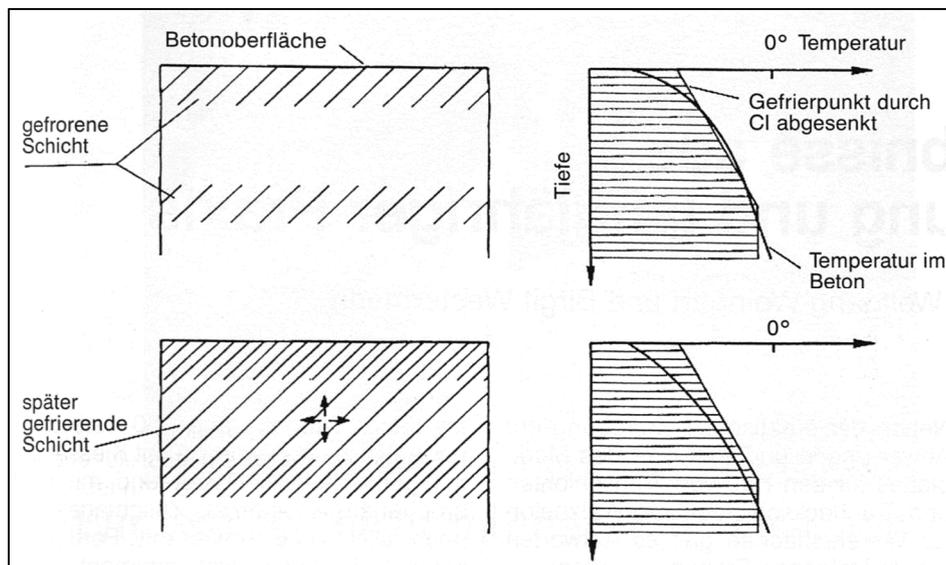


Bild 2-2: Schichtenweises Gefrieren von Beton infolge von Tausalz [4]

Tab. 2-3: Schadensmechanismen infolge Frostbeanspruchung nach [39]

Schädigungsmechanismen	Schadensursache / Modell
1	2
Makroskopische Modelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterschiedliche Temperatursausdehnungskoeffizienten von Zement, Gesteinskörnung und Eis (PODVALNY [41])</li> <li>• Temperatursturz (HARNIK et al [26])</li> <li>• Konzentrationsunterschiede bei Tausalzeinsatz – Schichtenweises Gefrieren (SNYDER [57], BLÜMEL und SPRINGENSCHMIDT [4])</li> <li>• Temperaturgradient infolge Tausalze (HARNIK [26], RÖSLI [44])</li> </ul>
Semi-makroskopische Modelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volumenausdehnung infolge Eisbildung</li> <li>• Unterkühlung und damit verbundene spontane Ausdehnung (ERBAYDAR [17])</li> </ul>
Mikroskopische Modelle und Transportmechanismen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Behinderung der Expansion (Cosed container-Modell) (FAGERLUND [19])</li> <li>• Hydraulischer Druck (POWERS [42])</li> <li>• Kapillarer Effekt (POWERS und HELMUTH [43])</li> <li>• Osmotischer Druck (POWERS und HELMUTH [43])</li> <li>• Oberflächeneffekte an gekrümmten Phasengrenzflächen (EVERET und HAYNES [18])</li> <li>• Wassertransport durch Potentialunterschiede und daraus resultierende Schwindspannungen (LITVAN [32])</li> <li>• Thermodynamisches Modell (SETZER [47])</li> </ul>
Makro- und mikroskopische Transportmechanismen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mikroeislinienmodell und künstliche Sättigung SETZER [50] – [51]</li> </ul>
Chemische Modelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ettringitbildung (STARK und LUDWIG [59])</li> </ul>

Die Vielschichtigkeit der Schadens- und Transportphänomene zeigt sich insbesondere bei der Zusammenstellung der mikroskopischen Modelle. Es ist anzunehmen, dass sich die Phänomene grundsätzlich in ihrer Wirkung überlagern. Mitte der 1940er Jahre erforschte POWERS [42], dass nur ein Teil des Wassers in den Poren unter dem Gefrierpunkt gefriert und dass durch diese Volumenexpansion des gefrierenden Wassers hydraulische Drücke auf ungefrorene Bereiche erzeugt werden. Schon damals wurden Luftporen künstlich eingeführt. Nur bei ausreichendem Ausweichraum in genügend kleinem Abstand würde sich ein Innendruck unterhalb der Betonzugfestigkeit einstellen. In [19] wurde auf dieser Basis ein kritischer Sättigungsgrad eingeführt, ab dem ein Beton ohne Luftporen zerstört wird. Daraus resultieren die Überlegungen zum Mikro-Porenraum  $r \leq 300 \mu\text{m}$  und Festlegungen zum Abstandsfaktor, vgl. DIN EN 480-11 [N6].

Bei weiteren Untersuchungen [43] wurde entdeckt, dass aufgrund eines thermodynamischen Ungleichgewichts Wasser aus kleinen Poren in größere Poren mit schon enthaltenen Eiskristallen oder eisbedeckten Oberflächen migriert, um das Ungleichgewicht zu kompensieren. Dieses Phänomen wird als kapillarer Effekt bezeichnet. Die Erweiterung des Modells zur Berücksichtigung des osmotischen Drucks berücksichtigt gelöste Salze in der Porenlösung. Die Wassermigration von kleinen Poren zum Eis der großen Poren wird in [18] auf Oberflächeneffekte (Grenzflächenspannungen) an gekrümmten Phasengrenzflächen zwischen Wasser und Eis zurückgeführt. In [32] werden Potenzialunterschiede für diesen Wassertransport verantwortlich gemacht. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass alle Modelle eine Wasserverteilung von Gelporen und Mikrokapillaren hin zu Kapillar- und Grobporen zugrunde legen.

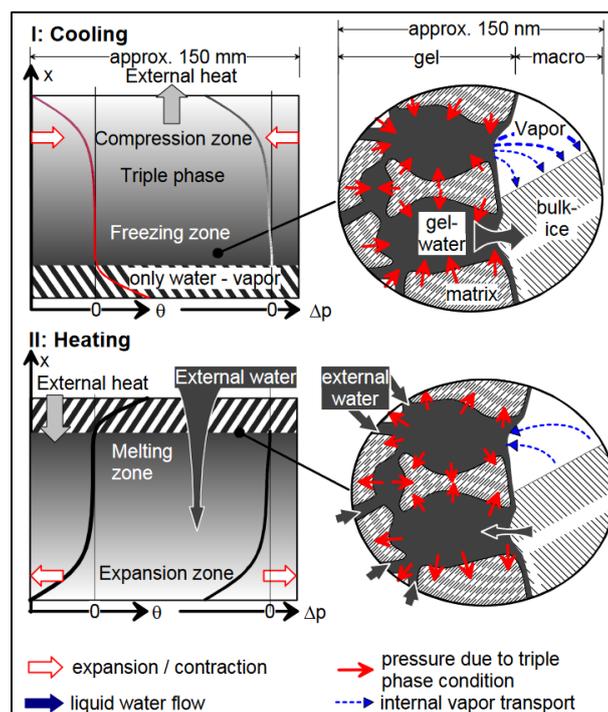


Bild 2-3: Mikroeislinnen-Modell, Vergleich zwischen makroskopischer (links) und submikroskopischer (rechts) Skala [52]

SETZER [49, 52] hat erkannt, dass es noch einen Transportmechanismus geben muss, der unter Frost-Tau-Einwirkung erst aktiv wird. Sein Mikroeislinnen-Modell beschreibt den Pumpeffekt, der zum Frostsaugen führt (vgl. Bild 2-3). Bei Temperaturabsenkung kommt es zum Gefrieren des makroskopischen Wassers, während das Gelporenwasser gemäß der Radius-Gefrierpunktbeziehung (bis ca.  $-40^\circ\text{C}$ ) [3] nicht gefroren ist. Das Modell basiert auf der Annahme, dass im nanoporösen Zementstein aufgrund der Oberflächenwechselwirkungen unter dem Tripelpunkt ungefrorenes Wasser, Wasserdampf und Eis in Koexistenz vorliegen. Es liegt ein Druckunterschied zwischen Wasser und Eis vor. Durch den hydraulischen Unterdruck wird das Zementgel zusammengezogen und das Gelporenwasser herausgedrückt, es lagert sich an

den bestehenden Eislinsen in den größeren Poren an. Makroskopisch betrachtet, tritt ein Frostschwinden ein. Während des Auftauens expandiert die Zementgelmatrix und versucht in einem sehr langsamen Prozess Wasser vom Eis innerhalb der größeren Poren zurückzusaugen (Frostsaugen), weshalb parallel externes Wasser angesaugt wird. Das führt zu einer Erhöhung des Sättigungsgrades im Porengefüge. Somit nimmt bei jedem Frost-Tauwechsel der Sättigungsgrad zu. Beim Erreichen des kritischen Sättigungsgrades kommt es durch die 9-Vol.-%-Ausdehnung des Eises zur Mikrorissbildung und zunehmend zur Zerstörung des Betons. [1, 3, 39, 49, 52]

Neben den physikalischen Prozessen können sich nach [59] durch Phasenumwandlungen bei niedrigen Temperaturen Ettringite bilden. Tausalze begünstigen den Prozess. Durch die Ettringitbildung können Poren, die zur Unterbrechung des kapillaren Porenraums dienen, gefüllt werden, was die Wasseraufnahme verstärkt. Das erhöht den Feuchtegehalt des Betons und reduziert den Ausdehnungsraum bei tiefen Temperaturen. Für LP-Betone, wie sie z. B. im Straßenbeton eingesetzt werden, scheint dieser Effekt eher untergeordnet zu sein [39].

Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass der Frost- und Frost-Tausalzwiderstand des Betons aufgrund seiner Porenstruktur, des Gefrierverhaltens der Porenlösung unter Berücksichtigung des kritischen Sättigungsgrades und der hygri-schen Transportphänomene abgeleitet werden kann. Die Grundlagenforschung zu den physikalisch-chemischen Prozessen bildeten die Basis zur Entwicklung von praxisnahen Prüfverfahren zur Beurteilung des Frost-Tau-Widerstandes mit dem CIF-Verfahren (Capillary suction, Internal damage and Freeze-thaw test) und des für Straßenbeton relevanten CDF-Verfahren (Capillary suction of De-Icing solution and Freeze-thaw test), das Taumittel berücksichtigt. [1, 3, 39, 52, 53]

## **2.3 Luftporengehalt im Beton**

### **2.3.1 Allgemeines**

Straßenbeton ist im Winter neben Frost-Tau-Wechseln auch starken Tausalz-Beaufschlagungen ausgesetzt und muss als Luftporenbeton (LP-Beton) hergestellt werden. Aus diesem Grund werden LP-Bildner beigemischt, die im Frischbeton künstlich viele kleine gleichmäßig verteilte kugelförmige Mikro-Luftporen bilden. Wirkungsvoll sind diejenigen mit einem Durchmesser  $\leq 300 \mu\text{m}$  und einem geringen Abstand zueinander.

Mit den LP-Gehalts-Prüfungen am Frisch- und Festbeton wird der Frost-Tausalz-Widerstand nur indirekt nachgewiesen. Mit dem CDF-Test liegt ein direktes Nachweisverfahren vor, bei dem am Festbeton nach Frost-Tausalz-Wechseln der Frost-Tausalz-Widerstand gegen Abwitterung der Betonoberfläche und innere Schädigungen, angezeigt durch den relativen E-Modul mittels Ultraschallmessungen, ermittelt werden. Allerdings erfolgt die vollständige Aufnahme der Versuchsergebnisse an Laborproben erst nach sieben Wochen. Das CDF-Prüfverfahren wird in der TP B-StB [N20] beschrieben in Anlehnung an DIN CEN/TS 12390-9 [N17].

Ein Vergleich zwischen den zugehörigen Frisch- und Festbetonroh-dichten kann weitere Anhaltswerte zum Luftgehalt im Beton liefern.

### **2.3.2 Luftporenbildner und ihre Wirkungsweise**

Luftporenbildner werden aus Seifen von natürlichen Harzen (Wurzelharze) und zunehmend aus synthetischen nichtionischen oder ionischen Tensiden hergestellt. Sie sind grenzflächenaktiv, indem sie die Grenzflächenspannung zwischen zwei Phasen reduzieren. Durch Ausrichtung des hydrophoben Molekülteils zur Luft und des hydrophilen Teils zum Wasser bilden sie einen Film an deren Grenzfläche, an den sich die

durch den Mischprozess gebildeten Luftbläschen anlagern. Sie nehmen dadurch eine kugelförmige Struktur an und werden stabilisiert [10]. Anforderungen an die verschiedenen Luftporenbildner werden in DIN EN 934-2 [N8] geregelt.

Der geforderte Mindestluftgehalt wird vom Verhältnis des Zementleimes zum Größtkorn definiert, vgl. auch [N21, N23, N26]. Die Luftporenbildung, der Porengehalt und die Porenstabilität sind von einer Vielzahl von Einflüssen abhängig. Dazu zählen:

- die Betonzusammensetzung (Einfluss der Ausgangsstoffe)
- das Mischen (Energie, Dauer, Mischerart)
- der Zugabezeitpunkt, die Reihenfolge der Zusatzmitteldosierung und deren Wechselwirkung
- die Konsistenz
- die Temperatur
- die Verdichtungsart und -dauer
- der Kontakt mit anderen Stoffen (z. B. mit Trennmittel als Mischerschutz)
- die Art des Betoneinbaus
- die Art des Transports (offenes Fahrzeug, Fahrzeug mit Rührwerk, Trommeldrehzahl, Fahrtzeit, Zustand). [6, 13, N26]

Eine Wichtung der Einflussgrößen ohne Berücksichtigung verschiedener Zementarten und dessen Einfluss auf den LP-Gehalt gibt Tab. 2-4.

Tab. 2-4: Wichtige Einflussgrößen auf den LP-Gehalt im Frischbeton [60]

Einflussgröße	Wirkung	
1	2	
feine Gesteinskörnung	< 0,125 mm	Hemmt LP-Bildung
	> 0,125 < 1,0 mm	Fördert LP-Bildung
	> 1,0 mm	Hemmt LP-Bildung
grobe Gesteinskörnung	Rundes Korn fördert LP-Bildung. Brechsand erschwert die LP-Bildung.	
Zusatzstoffe	Puzzolanische oder latent-hydraulische Stoffe können die LP-Bildung hemmen.	
Zusatzmittel	Zusätzlicher Einsatz anderer Zusatzmittel kann die LP-Bildung fördern. Maßgeblich wird durch Wirkstoffart und Zugabemenge des verwendeten LP-Bildners die LP-Bildung beeinflusst.	
Konsistenz	Weichplastische Konsistenz fördert LP-Bildung.	
Mischzeit (abhängig vom Mischer.)	kurz	Keine LP-Bildung möglich
	mittel	Optimale LP-Bildung
	lang	Zerstörung Luftporen
Mischintensität (abhängig vom Mischer und Füllungsgrad)	Höhere Mischintensität fördert LP-Bildung.	
Verdichtungszeit	Übermäßiges Verdichten reduziert den LP-Gehalt (betrifft in erster Linie die unteren Bereiche des Betons).	
Verdichtungsart	Innenrüttler führen zu stärkerer Porenzerstörung als Schalungsrüttler und Rütteltische.	
Transportzeit	Mit zunehmender Transportzeit sinkt in Abhängigkeit vom LP-Mittel der LP-Gehalt.	
Temperatur	Höhere Frischbetontemperaturen hemmen LP-Bildung.	

In der Praxis traten bei der Verwendung von synthetischen Luftporenbildnern wiederholt stark erhöhte Luftporengehalte im Festbeton auf. Als Ursache kann infolge einer zu kurzen Mischdauer ohne LP-Aktivierung auch eine nachträgliche Überdosierung in Frage kommen, um die geforderten LP-Werte noch zu erreichen. Die Einleitung von weiterer Mischenergie kann dann zu unerwünscht hohen LP-Gehalten führen. Wie der

Beton in einem derartigen Fall während der Bauausführung reagiert, kann im Zuge der Erstprüfung mit einer Zusatzprüfung ermittelt werden, indem die LP-Zugabemenge verdoppelt wird, und der LP-Gehalt nach einer kurzen Mischdauer von 30 s sowie nach einer langen Mischdauer von 6 min geprüft wird. Erhöht sich der LP-Gehalt bei doppelter Zugabemenge und langer Mischdauer wesentlich, so besteht auch bei der Bauausführung die Gefahr einer unerwünschten LP-Erhöhung bei Nachdosierung [14].

EICKSCHEN und MÜLLER lieferten weiterhin grundlegende Erkenntnisse über die kombinierte Anwendung von LP-Bildnern und Fließmittel unter Einbeziehung baupraktischer Bedingungen im Rahmen einer „erweiterten Erstprüfung“. Zusammenhänge zwischen Mischzeit, Wirkstoffbasis und Zugabemenge des LP-Bildners auch auf das Nachaktivierungspotenzial werden bei LP-Betonen ohne Fließmittel und in Kombination untersucht [16].

Obleich luftporenbildende Zusatzmittel zur Erhöhung des Frost-Tausalz-Widerstandes zur Herstellung von Betonautobahnen eingesetzt und allgemein anerkannte Schwellenwerte hinsichtlich der LP-Gehalte im Frischbeton (Zielluftgehalte von ca. 5 bis 7 Vol.-%) und des Abstandsfaktors im Festbeton eingehalten wurden, befanden sich in den USA über ein Drittel der Straßen in einem schlechten bis mäßigen Zustand. Außerdem existierten widerstandsfähige Betonstraßen, die diese Schwellenwerte nicht bedienten. Das veranlasste TANESI und MEININGER [62] zu neuen Untersuchungen, auch mit Betonrezepturen mit niedrigen LP-Gehalten (2,4 Vol.-%). Die Ergebnisse zeigten, dass diese Schwellenwerte nicht immer auf synthetische Zusatzmittel anwendbar sind. LP-Gehalte  $\geq 3,5$  Vol.-% zeigten eine zufriedenstellende Frost-Tau-Widerstandsfähigkeit. Hinsichtlich der verwendeten w/z-Werte 0,40, 0,45, 0,50 konnte kein Trend herausgearbeitet werden.

Um die sehr komplexen Zusammenhänge zu erfassen und Fehlentwicklungen frühzeitig zu vermeiden, empfiehlt das „Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton“ [N26] neben der Durchführung der regelgerechten Erst- und Kontrollprüfung, aufgrund der Erkenntnisse [14, 16], erweiterte Prüfungen im Rahmen der Erstprüfung am Frischbeton durchzuführen. Zur Berücksichtigung möglicher Veränderungen von Betontemperatur, Mischzeit, Fehldosierung, Verdichtungszeit und Veränderung des LP-Gehaltes über die Zeit nach Herstellung sollten ergänzende Prüfungen am Frischbeton durchgeführt werden, die entsprechende Variationen beinhalten. In Frage kommen eine erhöhte Zugabemenge des LP-Bildners, eine verlängerte Misch- oder Verdichtungszeit sowie eine erhöhte Betontemperatur von 30 °C.

Eine erhöhte Gesamtporosität wirkt sich festigkeitsmindernd auf den Festbeton aus. Es muss also ein Optimum zwischen gezielter Einleitung und Verteilung von Mikro-Luftporen unter Einhaltung der Mindestluftporengehalte ohne z. B. luftporenerstörende Wechselwirkungen mit anderen verflüssigenden Zusatzmitteln oder einer unplanmäßigen Nachaktivierung des LP-Bildners für die Fahrbahndeckenbetone herausgearbeitet werden, um die für Verkehrsflächen mit den Expositionsklassen XF4 mit und ohne XM2 gemäß TP B-StB [N20] definierten Straßenbetonklassen StC 30/37 – 3,0 bis StC 50/60 – 5,0 gezielt herstellen zu können. Neben den charakteristischen Mindestdruckfestigkeiten an Zylindern und Würfeln hat die Spaltzugfestigkeit als Eingangsgröße für die Dimensionierung der Fahrbahnbetondecke einen besonderen Stellenwert. [40, N25]

### **2.3.3 Messmethoden – Luftporengehalt im Frischbeton**

#### **National genormte Luftgehaltsprüfer (LP-Gehaltsprüfer)**

Die Prüfung des LP-Gehaltes wird im Rahmen von Frischbetonprüfungen gemäß DIN EN 12350-7 [N15] durchgeführt. Neben den maßgeblich interessierenden Mikro-Luftporen werden auch Verdichtungs- bzw. Makro-Luftporen  $> 300 \mu\text{m}$  erfasst werden. Beide hier genormten Prüfverfahren lassen sich auf die 1940er Jahre zurückverfolgen und basieren auf dem Boyle-Mariotte-Gesetz. Das Wassersäulenverfahren, das dem Verfahren nach ASTM C231 Typ A [N2] entspricht, lässt sich auf Entwicklungen von KLEIN [30] zurückführen. MENZEL [36] führte Studien zur Weiterentwicklung und Verbesserung der Praktikabilität durch.

Das Druckausgleichsverfahren entspricht dem Verfahren nach ASTM C231 Typ B [N2] und basiert auf den Arbeiten von TREMPER [63]. Das Druckausgleichsverfahren ist das nationale Standard-Prüfverfahren zur Bestimmung des LP-Gehaltes im Frischbeton.

In Deutschland hat sich das Druckausgleichsverfahren als nationales Standard-Prüfverfahren zur Bestimmung des LP-Gehaltes im Frischbeton etabliert. Bei dem Druckausgleichsverfahren wird ein bekanntes Luftvolumen (6) unter definiertem Druck mit einem unbekanntem Luftvolumen eines eingefüllten verdichteten Betons in einem luftdicht verschlossenen Druckbehälter (Bild 2-4) ausgeglichen. Die rechnerischen Grundlagen sind Kapitel 6.2.2 zu entnehmen. Der Hohlraum zwischen Deckel und Betonoberfläche wird zuvor blasenfrei mit Wasser gefüllt. Über eine Pumpe (3) wird Luft in die Luftkammer (4) gepumpt und ein definierter Druck aufgebaut. Nach Öffnung des Hauptluftventils (4) findet ein Druckausgleich zwischen der Luftkammer und dem gefüllten Druckbehälter statt. Der resultierende Druck wird über das angeschlossene Manometer (5) gemessen, dessen Skaleneinteilung auf den prozentualen Luftgehalt der Betonprobe kalibriert ist. Für den Fall, dass offenporige Gesteinskörnungen verwendet werden, bei denen ein Teil der Luft in zugänglichen Poren entweicht, ist der abgelesene Luftgehalt um den Korrekturfaktor G zu reduzieren. Die Bestimmung des Korrekturfaktors G ist in Anhang B der DIN EN 12350-7 [N15] geregelt.

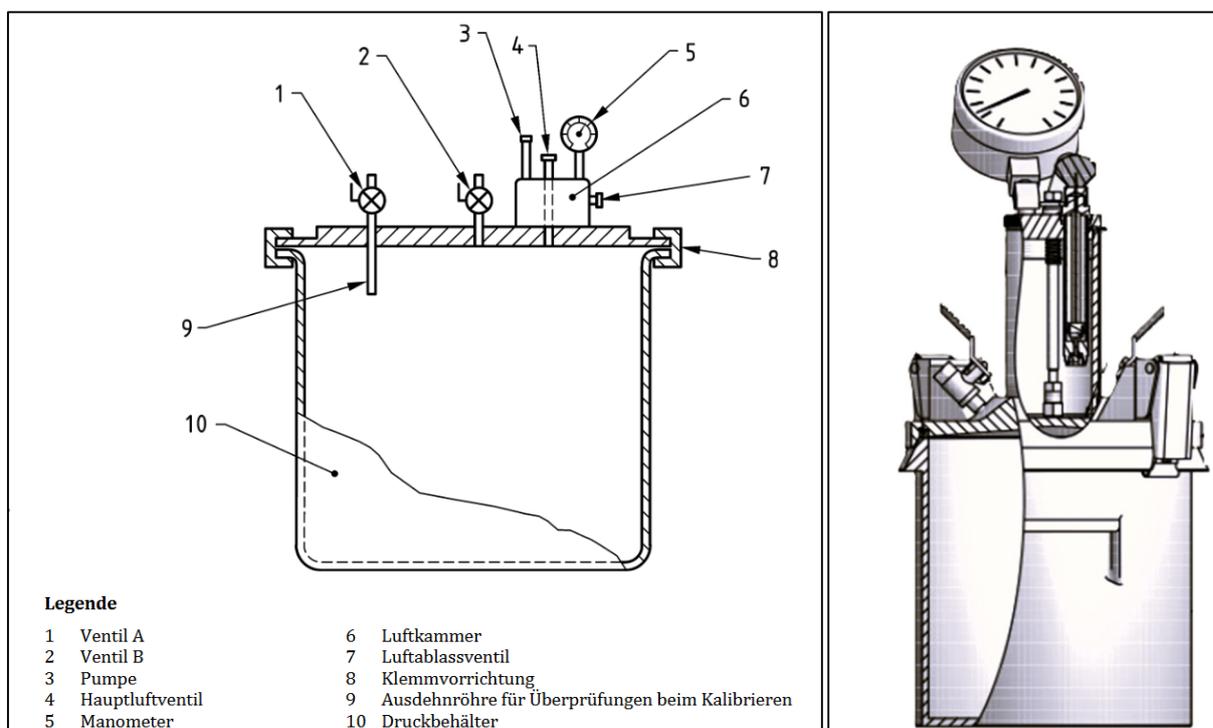


Bild 2-4: Prüfgerät für das Druckausgleichsverfahren [N15] (links), Super Air Meter (SAM) [29] (rechts)

Die Bezeichnungen, Druckausgleichs- bzw. Wassersäulenverfahren, vermitteln den Anschein, dass es sich um sehr unterschiedliche Messmethoden handeln würde, dabei wirkt bei beiden Verfahren eine Wassersäule auf die Poren ein und es findet jeweils ein Druckausgleich statt. Die Unterscheidung ergibt sich durch eine konstante Druckbelastung beim Wassersäulenmessgerät bzw. ASTM-Messgerät C231 Type A [N2] im Vergleich zu einer abfallenden Druckbelastung bei der Druckausgleichs- bzw. ASTM-Messung C231 Type B [N2]. Zum Wassersäulenverfahren liegen Zuverlässigkeitsdaten [N2] vor, bei Luftgehaltsprüfern zum Druckausgleichsverfahren nicht [N15].

Verschiedene Hersteller vertreiben die Druckausgleichsmessgeräte in verschiedenen Ausführungen, meist als 8-Liter- oder 5-Liter-Töpfe. In der Praxis treten immer wieder Diskrepanzen oder widersprüchliche Messergebnisse auf, was zu einer gewissen Verunsicherung führt [6, 7]. So ist es empfehlenswert, parallel zur

LP-Gehaltsmessung die Frischbeton-Rohdichte im LP-Topf zu bestimmen. Abweichungen bei den Frischbeton-Rohdichten können u. a. auf einen möglichen fehlerhaften LP-Gehalt hinweisen [38, N26].

Für fehlerhafte Messwerte können:

- eine mangelhafte Wartung der Ventile und der Druckkammer
- eine fehlende Robustheit bei der Konstruktion
- eine fehlende Kalibrierung
- die Missachtung einer möglichen Temperaturdifferenz zwischen Druckkammer und Betonprobe
- Luftblasen unter dem Deckel
- ein zu niedriger Prüfdruck bei großem Betonvolumen gerade bei steifem Beton
- eine unzureichende Verdichtung oder auch eine Missachtung des Korrekturfaktors für die Gesteinskörnung

verantwortlich sein. Die Luftgehaltsprüfer sollen aus einem geeigneten Material (z. B. Edelstahl) gefertigt sein, um Reaktionen zwischen Behälterwandungen und Beton zu vermeiden [7, 11]. Bei Leichtbeton mit porigen Gesteinskörnungen können diese Verfahren nicht angewendet werden, weil in die Kornporen eingedrücktes Wasser zum Druckverlust führt und den gemessenen LP-Gehalt unzulässig erhöht. Hier muss das Verfahren nach ASTM C 173/C173M [N1] angewendet werden. Eine Beurteilung der Messgenauigkeit und der Vergleichbarkeit der gemessenen Werte können nur systematische Untersuchungen unter gleichen Bedingungen liefern.

#### **International genormte Luftgehaltsprüfer (LP-Gehaltsprüfer)**

Der amerikanische Super Air Meter (SAM) ist nach ASTM C231 / C231M Type B [63, N2] genormt. Der SAM ist im Aufbau den national genormten Luftgehaltsprüfern ähnlich, vgl. Bild 2-4. Das gilt auch für den grundsätzlichen Prüfablauf zur Bestimmung des LP-Gehalts.

Auch in den USA zeigten sich in der Vergangenheit immer wieder widersprüchliche Beobachtungen und große Prüfstreuungen bei der Bestimmung des LP-Gehaltes unter Einsatz von SAM, aber auch widersprüchliche Ergebnisse beim Vergleich zwischen den LP-Werten der Frisch- und Festbetonprüfungen. Es gab Fälle, bei denen die LP-Gehalte des Frischbetons im Vergleich zum Festbeton höher waren oder umgekehrt. [27, 28, 37, 38]. HOVER [27] betrachtete die Problematik ganzheitlich. Zur Einhaltung der Prüfpräzision empfahl er vorab eine Kontrolle der Prüftechnik und eine sorgfältige Wahl der Ausgangsstoffe inkl. Prüfung der Frostbeständigkeit. Er riet zudem zu Vorversuchen zur Charakterisierung des Luftgehalts und zur Prüfung der Stabilität der Luftporen, damit die Verarbeitung des LP-Betons auf der Baustelle keine gravierenden negativen Auswirkungen ausüben könne. Er vermutete auch Einflüsse der Mischtechnik auf die Einwicklung der Luftporen und empfahl Tests mit Labor- wie auch Feldversuchen mit denselben Ausgangsstoffen durchzuführen und zu vergleichen. Nur so könnten Einflüsse durch Mischtechnik und Verarbeitung in Verbindung mit chemischen und mineralischen Beimischungen aufgedeckt werden. Bei nachfolgenden Feldversuchen von HOVER und PHARES [28] wurde festgestellt, dass die Schwankungen des LP-Gehaltes von LKW zu LKW häufig größer ausfielen als innerhalb einer LKW-Ladung, somit musste die Handhabung (Pumpen, Fördern, Rutschen und freier Fall aus dem Betonkübel) eine Rolle spielen. Bei der mikroskopischen Untersuchung am Festbeton zeigten sich im Pumpbeton verbliebene kleinere Luftporen im Vergleich zum gelieferten Beton. Der LP-Abstandsfaktor wurde hierbei nicht wesentlich verändert. Die Frost-Tau-Untersuchungen ließen den größten Frost-Tau-Widerstand bei der Probe mit dem größten Luftgehaltsverlust erkennen. Ein Luftverlust muss also nicht zwangsläufig zur Reduzierung des Frost-Tau-Widerstandes führen, solange es sich um ein Entweichen von großen Luftporen handelt.

NAGI und WHITING [37] führten ein umfassendes Forschungsprogramm anhand von Labor- und Feldversuchen durch, um Diskrepanzen zwischen den gemessenen LP-Gehalten des Betons im frischen und erhärteten Zustand zu bewerten. Dabei wurden die Auswirkungen aufgrund der Art der Luftporenbildenden

Zusatzmittel, des Alkaligehalts des Zementes, der Temperatur und des Nachtempern sowie der Nachbehandlung untersucht. Das Ergebnis der Literaturstudie bezüglich möglicher Diskrepanzen zwischen den gemessenen LP-Gehalten beim Frisch- und Festbeton zeigt Tab. 2-5. Die meisten Forscher haben eine Abnahme des LP-Gehalts beim Festbeton beobachtet. Es besteht aber auch offensichtlich Einigkeit darüber, dass das Vorhandensein kleiner Luftporen zu einem höheren LP-Gehalt im Festbeton führen kann, da die Luftgehaltsprüfer beim Frischbeton aufgrund der Druckbegrenzung die kleineren Luftporen nicht erfassen oder nach dem Druckabfall kleine Luftporen zu größeren verschmelzen.

Untersuchungen von OZYILDIRIM [38] zum LP-Gehalt unter Anwendung des Wassersäulenverfahrens (Type A) im Vergleich zum Druckausgleichsverfahren (Type B) zeigten meist vergleichbare Ergebnisse mit einer geringen Tendenz zu höheren LP-Werten bei Anwendung des Wassersäulenverfahrens. Letztere standen in guter Übereinstimmung mit der mikroskopischen Auswertung an den Festbetonen. Weiterhin wurde herausgearbeitet, dass eine nachträgliche Wasserzugabe zum Frischbeton zur Erhöhung des LP-Gehaltes führen kann und die Rohdichte der Betone mit dem Luftgehalt gut korrelierte.

Tab. 2-5: Mögliche Ursachen für die Diskrepanzen zwischen den gemessenen LP-Gehalten beim Frisch- und Festbeton [37]

Variation	Typ	Auswirkung
1	2	3
Poreneigenschaften	Luftporenstabilität	Die Auflösung der kleinen Luftblasen führt zur Bildung größerer Luftblasen und erhöht somit den Luftporengehalt größerer Luftporen (nach der Herstellung des Frischbetons).
	Größe der Luftporen	Kleine Poren (kleiner als 0,050 mm) sind weniger komprimierbar als größere Poren. Daher wird das Druckmessgerät einen niedrigeren Wert als den „realen“ Luftporengehalt anzeigen.
	Luftporenmenge	Diskrepanzen zwischen dem Luftgehalt, der durch die Druckmethode und die mikroskopische Methode (ASTM C457 [N3]) gemessen wird, nehmen mit zunehmendem Luftgehalt zu.
	Lufteinschlüsse	Mit der Zunahme der Lufteinschlüsse vergrößert sich die Differenz des Luftporengehaltes zwischen Frisch- und Festbeton.
Baupraxis	Verdichtung	Der Luftporengehalt nimmt bei längerer Vibration ab.
	Transport durch „Pumpen“	Das Pumpen „bergab“ reduziert den Druck und verringert den Luftporengehalt.
	Nachbehandlung	Verringerung des Luftporengehaltes in der Frischbetonoberfläche durch übermäßige Nachbehandlung.
Messtechnik	Messmethode	Die Ergebnisse der Hochdruckmethode weisen eine bessere Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Luftdruckmethode als die der mikroskopischen Methode (ASTM C457 [N3]) auf.
	Erfahrungsgrad des Bedieners	Der Erfahrungsgrad des Bedieners hat einen Einfluss auf die Messung des Luftporengehaltes, insbesondere bei der mikroskopischen Methode (ASTM C457 [N3]).
Zusammensetzung	Silicastaub	Bei der Verwendung von Silicastaub entstehen kleine Luftblasen, welche die Genauigkeit des Luftdruckmessers beeinträchtigen.
	Luftporenbildner	Einige Luftporenbildner verursachen die Bildung relativ kleiner Luftporen, die mit der Druckmethode nicht gemessen werden können.

LEY et al [34] griffen bei ihrer Forschung erneut den Gedanken auf, dass das Luftporensystem eine Schlüsselrolle für den Frost-Tau-Widerstand spielen und mit konventionellen Luftgehaltsprüfern jedoch nur der Gesamtluftgehalt ermittelt werden könnte. Daraus folgerten sie einen Bedarf, eine Prüfmethode für den Frischbeton zu konzipieren, bei der auch Größe und Verteilung der Luftporen angezeigt würden. Demzufolge modifizierten sie das konventionelle Prüfverfahren mit dem Super Air Meter (SAM) gemäß ASTM C231 [N2], indem nun zwei Abfolgen mit jeweils 3 Druckstufen von 14,5, 30 und 45 psi (100 kPa, ca. 200 kPa und ca. 300 kPa) Druck auf den Beton ausübten. Die Verformungsunterschiede zwischen der ersten und zweiten Druckstufenabfolge wurde zur Berechnung der SAM-Number verwendet mit der Annahme, dass diese mit dem durchschnittlichen Abstand zwischen den Luftporen im Beton korrelieren würde, vgl. Bild 2-5.

Das modifizierte SAM-Prüfverfahren, findet in der Arbeitsphase 3 Anwendung. Der SAM-Luftgehaltsprüfer ist mit einem digitalen Manometer ausgestattet, das den Prüfablauf, die anzusetzende Prüfdruckhöhe nach

Einpumpen und Justieren der Luft anzeigt und die Reihenfolge regelt. Anstelle einer einmaligen Druckbeaufschlagung erfolgt bei der Prüfung eine Doppelbestimmung mit drei verschiedenen Prüfdrücken. Bei der ersten Druckbeaufschlagung wird bei einem Prüfdruck von einem bar (100 kPa, Bild 2-5) ein Druckausgleich zwischen Druckkammer und dem mit Beton gefüllten Prüfbehälter eingeleitet und der LP-Gehalt des Frischbetons gemäß [N1] auf dem digitalen Manometer angezeigt. Es folgen in der ersten Abfolge weitere Druckerhöhungen (ca. 200 kPa, ca. 300 kPa) mit jeweiligem Druckausgleich zum Niveau der Vorstufe. Über die Differenz der sich einstellenden Drücke (P1, P2, Bild 2-5) nach einem Druckausgleich unter den höchsten Druckbelastungen (ca. 300 kPa) wird eine dimensionslose SAM-Number von dem Manometer ausgegeben. Diese Zahl kann als korrelierende Abschätzung des Abstandsfaktors L herangezogen werden, der sonst an Festbetonproben durch Mikroskopie-Analyse händisch ermittelt wird.

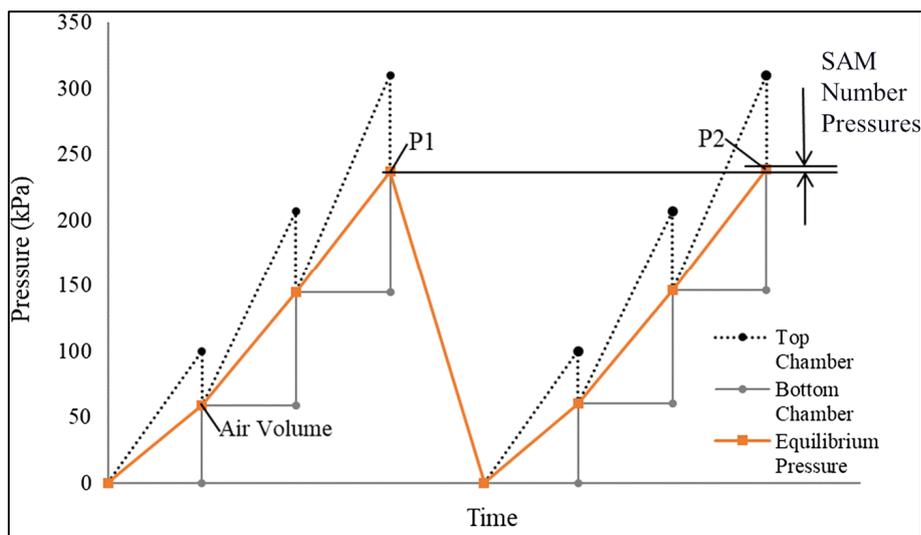


Bild 2-5: Eine grafische Darstellung der Drücke in der oberen und unteren Kammer des SAM [34]

Eine Validierung des modifizierten SAM-Prüfverfahrens, auch als sequentielle Luftmethode bekannt, wurde von DABROWSKI et al. [23] im Labor und bei Feldversuchen vorgenommen. Vergleiche am Festbeton erfolgten mikroskopisch an polierten Betonoberflächen. Als wichtige Erkenntnis bestätigten die Forscher, dass mit abnehmender SAM-Number der Mikro-Luftporengehalt linear zunimmt. Sie bestätigten die Einhaltung der SAM-Number von  $\leq 0,40$  als Kriterium für einen Mikro-Luftporengehalt von  $\geq 1,5$  Vol.-% als zutreffend für 90 % der untersuchten Betone. Wobei sich der Zusammenhang zwischen den Luftporen im Frisch- und Festbeton um so genauer einstellte, je höher der LP-Gehalt ( $> 4$  Vol.-%) war. Allerdings zeigten sich bei Betonen mit geringer Verarbeitbarkeit Unterschiede in Abhängigkeit von der Verdichtungsmethode. Bei einer Feldstudie mit Betoneinbau mit Gleitschalungsfertigern bestätigte sich ebenso die lineare Beziehung zwischen der SAM-Number und dem Gehalt an Mikroporen. Betonproben mit einer SAM-Number zwischen 0,19 und 0,33 zeigten eine zufriedenstellende Frost-Tausalz-Beständigkeit.

HALL und LEY et al [24] verglichen ebenfalls in einer umfangreichen Studie mit verschiedenen Zusatzmitteln, Gesteinskörnungen, Geräten und Baustoffprüfern die Ergebnisse der sequentiellen Luftmethode am Frischbeton mit den Ergebnissen am Festbeton. Sie werteten die Ergebnisse von 257 Labor- und 231 Feldversuchen aus. Dabei dokumentierten sie, dass die Erkenntnis über den Gesamtluftgehalt wenig über die Qualität des Luftporensystems aussagt. Sie zeigten, dass 25 % der Betone aus Feldversuchen einen Abstandsfaktor  $> 0,2$  mm aufwiesen, also von der allgemein anerkannten ACI-Empfehlung abwichen, trotz Einhaltung des empfohlenen Gesamtluftgehaltes zwischen 3,75 Vol.-% und 7,75 Vol.-% im Frischbeton, vgl. Bild 2-6. Bei 257 Laborbetonen korrelierte die SAM-Number von 0,20 mit einem Abstandsfaktor  $\leq 0,2$  mm bei 85 % der untersuchten Betone, bei den Vergleichen der 231 Betone aus Feldversuchen traf

das zu 70 % zu (Bild 2-7). Eine gute Korrelation wurde meist bei Betonen mit plastischer Konsistenz bestätigt.

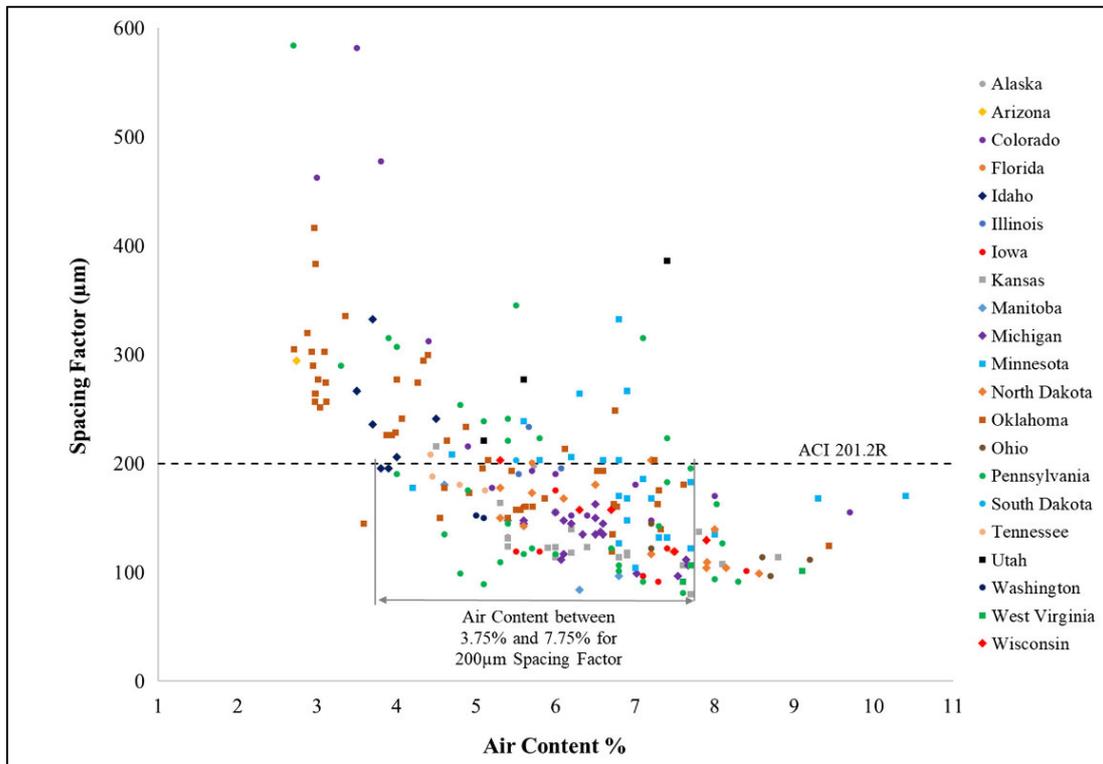


Bild 2-6: Luftgehalt im Frischbeton im Vergleich zum Abstandsfaktor im Festbeton anhand von 231 Betonen aus Feldversuchen [24]

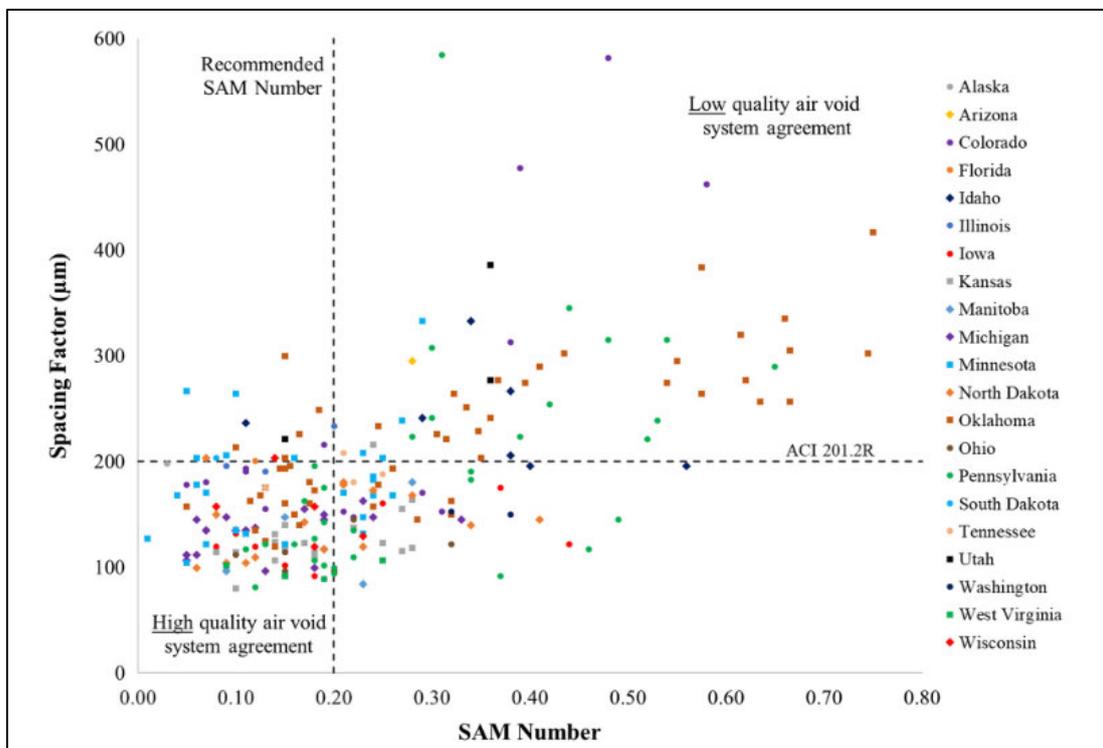


Bild 2-7: SAM-Number beim Frischbeton im Vergleich zum Abstandsfaktor beim Festbeton. Die Ergebnisse zeigen 70 % Übereinstimmung [24]

Zur Steigerung der Vorhersagegenauigkeit über die Qualität von Betonmischungen hinsichtlich des geforderten Frost-Tau-Widerstandes führten HALL BECKER und LEY et al 2021 [25] das sogenannte Effizienzdiagramm ein. Ein Tool, das hilft, unter Verwendung der Ergebnisse der sequentiellen Luftmethode (SAM) Einflüsse infolge von unterschiedlichen Betonbestandteilen, Bauverfahren und der Umgebung auf das Volumen und den Abstand der Luftporen in Beziehung zu setzen. Die Luftporeneffizienz ist definiert als Luftporenabstand für ein gegebenes Luftvolumen. Viele kleine Luftporen in Bezug auf einen gegebenen Luftgehalt sind effizienter als wenige größere Poren. Ein Porensystem mit geringer Effizienz benötigt ein höheres Luftvolumen, um den gewünschten Luftporenabstand zu erreichen.

TANESI et al. [61] testete 64 Betone mit steifer Konsistenz (Setzmaße < ca. 75 mm), geeignet für den Straßenbau. Sie hoben die einfache Bedienbarkeit und den meist vertrauten Umgang der Baustoffprüfer mit dem relativ kostengünstigen SAM-Gerät hervor. Sie mutmaßten prinzipiell, dass auch bei steifen Betonen mit der sequentiellen Luftmethode Betonmischungen mit hohem Abstandsfaktor zu identifizieren seien. Sie fanden aber keine numerische Korrelation zwischen der SAM-Number und dem Abstandsfaktor. Für die untersuchten speziellen Rezepturen mit den spezifischen Materialien konnte jedoch eine gute Korrelation zwischen Frischbetonluftgehalt und Abstandsfaktor hergeleitet werden, sofern ein LP-Gehalt von 4 Vol.-% vorlag. Insgesamt stellten sie eine gute Korrelation zwischen Frischbeton-LP-Gehalt, gravimetrischem Luftgehalt und dem Luftgehalt im erhärteten Beton fest.

Mitte der 1980er Jahre entwickelte Dansk Beton Teknik den Air Void Analyzer (AVA) [9], um schon in der Frischbetonphase auf die Qualität des Luftporensystems schließen zu können. Das dänische Prüfverfahren nutzt das Gesetz von Stokes zur Messung der Luftporengrößenverteilung, indem Luftblasen beim Aufstieg durch eine Flüssigkeitssäule in Abhängigkeit von der Zeit erfasst werden. Als Ergebnisse können der LP-Gehalt, der Abstandsfaktor und die spezifische Oberfläche innerhalb von ca. 30 Minuten ermittelt werden [55]. Es handelt sich um ein relativ teures und empfindliches Gerät, das von gut geschultem Personal bedient werden muss. Die Prüfstreuungen können bei demselben Anwender auf demselben Gerät die Prüfergebnisse zur spezifischen Oberfläche um bis zu 43 % abweichen. Die Akzeptanz als Prüfmethode für steifere Straßenbetone ist eher gering einzuschätzen [33].

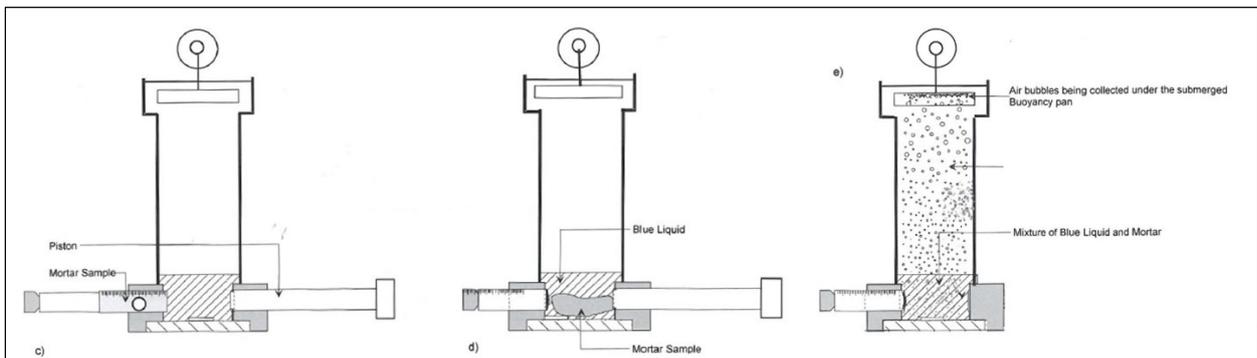


Bild 2-8: Air Void Analyzer (AVA-3000) – Bestimmung der Luftporenkennwerte am Frischbeton – Befüllen mit Mörtelprobe und Darstellung des Messprinzips durch Wägung der aufsteigenden Luftporen [N27]

Prüfungen mit dem AVA-Gerät wurden in der Arbeitsphase 3 durchgeführt. Das Funktionsprinzip des dänischen Air Void Analyzers basiert auf einer Wägung der aufsteigenden Luftporen innerhalb einer definierten Zeitspanne mithilfe einer hochpräzisen Waage aus einer Mörtelprobe mit einem LP-Gehalt zwischen 3,5 und 10 Vol.-%. Durch externe Vibration wird aus einem verdichteten Frischbeton eine Mörtelprobe mit einem Volumen von ca. 20 cm<sup>3</sup> mit Hilfe eines aufgesetzten Drahtkorbes mit einer Maschenweite von 6 mm gewonnen. Gesteinskörnungen > 6 mm werden so separiert. Eine Steigsäule wird mit vortemperiertem Wasser und einer definierten Menge an Glycerin bis zu einer festgelegten Füllhöhe gefüllt. Oberhalb der Steigsäule ist eine Auffangglocke an die Waage angeschlossen. Sie misst den Auftrieb, den die Poren auf die Auffangglocke ausüben. Anschließend wird die Mörtelprobe unten in die Steigsäule in das Glycerin

injiziert. Die Probe wird mit dem Glycerin 30 s lang mithilfe eines Magnetrührstabes vermischt, wodurch die Freisetzung und der Aufstieg der im Mörtel eingeschlossenen Luftporen in der Steigsäule ausgelöst werden (Bild 2-8). Mit der entsprechenden Software werden die Massen der aufgestiegenen Luftporen innerhalb von maximal 25 min erfasst. Dabei werden die größeren Luftporen aufgrund ihrer Oberflächengröße und somit deutlich schnelleren Aufstiegsgeschwindigkeit zuerst erfasst, gefolgt von den kleineren, leichteren Luftporen. Basierend auf diesem Prinzip werden die Luftporen nach Größe sortiert erfasst. Die Ergebnisse werden in der Software berechnet und in Form von mehreren Grafiken dargestellt. Zusätzlich werden auf Basis der Versuchsergebnisse die spezifische Oberfläche der Luftporen, der Gesamtluftporengehalt in der Mörtelprobe, der Abstandsfaktor sowie der Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$  ermittelt.

Für die korrekte Nutzung der Software sind folgende Parameter des zu untersuchenden Betons anhand der Mischungszusammensetzung erforderlich [N27]:

- Volumenanteil des Mörtels < 6 mm in [%] (Gesamtvolumen abzüglich Gesteinsvolumen > 6 mm und erwarteter LP-Gehalt)
- Volumenanteil der Paste in [%] (Zement, Wasser, Zusatzmittel und Zusatzstoffe)
- Volumenanteil der Luft in [%] (erwarteter Wert)
- Volumen der Mörtelprobe (i.d.R. 20 cm<sup>3</sup>)

### HYDRO\_5-Luftgehaltsprüfer

Bei der HYDRO\_5-Serie handelt es sich um in Deutschland entwickelte universale alternative Prüfgeräte, bei welchen die Luftporengehaltsbestimmung in Anlehnung an „ASTM C231 Typ A“ [N1], also nach dem Prinzip der Wassersäule erfolgt. Die Entwicklung wurde vor mehr als 25 Jahren mit ersten Prototypen eingeleitet [5], mit dem Ziel, eine einfache Messmethode zur Qualitätssicherung des Betons, vor allem zur Überprüfung des tatsächlichen Wassergehalts zu konzipieren. Von großem Vorteil zeigte sich die Möglichkeit, die Ist-Rohdichte in einem geschlossenen Behälter bekannten Volumens sehr exakt zu bestimmen. Dazu sind grammgenaue Waagen erforderlich. Zur Weiterentwicklung der HYDRO\_5-Serie wurden die Ursachen für fehlerhafte Messwerte analysiert [6] und Detailverbesserungen an den Geräten und der Prüfmethodik erarbeitet [7].

Die verschiedenen Typen der HYDRO\_5-Serie unterscheiden sich vor allem durch Volumeninhalt, Form und Material des jeweiligen Prüfbehälters für die Frischbetonprobe. In der Arbeitsphase 3 wurden der HYDRO\_5-Edelstahl-Topf mit 6 Liter Füllvolumen (HYDRO\_5\_T\_6L) und die aus Kunststoffplatten hergestellte HYDRO\_5-Würfelschalung (HYDRO\_5\_W\_3,4L) mit einer Kantenlänge von 150 mm und 3,4 Liter Füllvolumen eingesetzt (Bild 2-9). Die Anforderungen der Norm DIN EN 12350-7 [N15] in Bezug auf Behältermaterial, Volumina und Abmessungen sind nur für den HYDRO\_5\_T\_6L erfüllt.



Bild 2-9: HYDRO\_5\_T\_6L (links), HYDRO\_5\_W\_3,4L (rechts)

Zur Bestimmung des Luftporengehaltes wird der Frischbeton so eingefüllt und verdichtet, dass ein Abstand bis zu ca. 5 mm zum Behälterrand verbleibt. Der Luftraum zwischen dem Deckel unter dem Spannrahmen und dem Frischbeton wird drucklos mit Wasser ausgefüllt und vollständig entlüftet. Der Deckel des HYDRO\_5\_T\_6L besteht aus klarsichtigem Acrylglas, damit verbliebene Luftblasen unter dem Deckel sichtbar sind. Sie können über die Entlüftungsnut und das Entlüftungsventil durch Anwinkeln des Prüfgeräts entfernt werden. Anschließend erfolgt das kontinuierliche Einpressen des zusätzlichen Wassers auf 2 bar Überdruck. Somit wird dem geschlossenen System keine weitere Luft zugegeben, welche die Messwerte beeinflussen könnte. Bei allen Zwischenschritten werden Wägungen vorgenommen (vgl. Kapitel 6.2.2). Durch den entstandenen hydraulischen Druck erfolgt das Zusammendrücken der in der Frischbetonprobe enthaltenen Luft. Nach der Druckbeaufschlagung erfolgt eine Entkoppelung und Wägung des verschlossenen Behälters. Der Beton steht weiterhin unter 2 bar Überdruck. Nach dem Boyle-Mariotte'schen Gesetz wird der Luftporengehalt der Probe aus dem Volumen des eingedrückten Wassers berechnet. Vorversuche zeigten, dass neben der Bestimmung der Frischbeton-Rohdichte und des Luftporengehalts im Anschluss auch der rechnerische Wassergehalt mithilfe des Boyle-Mariotte'schen Gesetzes sowie der Stoffraumrechnung ermittelt werden kann, vgl. Kapitel 6.2.3.

Es ist zu beachten, dass die Beanspruchung von 2 bar Prüfdruck eine individuelle Ausdehnung des Prüfbehälters hervorruft, abhängig von dessen Material und Volumen. Diese Ausdehnung muss bei der Durchführung von Luftgehaltsmessungen im Frischbeton durch einen geeigneten Korrekturwert berücksichtigt werden. Die Bestimmung dieses Korrekturwertes erfolgt durch die Kalibrierung der Prüftechnik, wobei die Prüfwägungen nicht mit Frischbeton als Probe, sondern mit einem vollständig mit Wasser gefüllten Prüfbehälter durchgeführt werden. Durch die Beanspruchung des Prüfbehälters mit einem Prüfdruck von 2 bar wird zusätzliches Wasser in den Behälter eingepresst, was den Korrekturwert darstellt und als Ausdehnungsvolumen des Behälters bei der Luftporenbestimmung am Frischbeton in die Berechnungen einfließt.

Zusätzlich kann die Luftporenverteilung im Frischbeton mithilfe eines Zusatzmoduls, dem HYDRO\_5-Pososimeter, am HYDRO\_5\_T\_6L erfasst werden. Dabei wird die Handpumpe des HYDRO\_5\_T\_6L durch eine digital gesteuerte Pumpe mit einem Drucksensor ersetzt. Diese Pumpe presst kontinuierlich definierte Wassermengen in den Prüfbehälter und führt dabei Hubvorgänge durch. Sobald der Prüfdruck 2 bar erreicht wird die Messung abgeschlossen. Dabei werden die Anzahl der Pumpenhübe sowie der entstandene Druck im Prüfbehälter von der Messsonde digital erfasst. Die erfassten Messdaten werden anschließend in einem entsprechenden Excel-Tool weiterverarbeitet. Als Ergebnis wird ein Diagramm erzeugt, in dem der gemessene Prüfdruck und der zugehörige gemessene Luftporengehalt als Summendiagramm gegenübergestellt werden. Anhand dieser Daten können laut Erfinder [N28] Luftporenkennwerte wie der Gesamtluftporengehalt, die Porengrößenverteilung und der Gehalt an Mikro-Luftporen  $A_{300}$  an einer verdichteten Frischbetonprobe erfasst werden.

#### **2.3.4 Messmethoden – Luftporengehalt am Festbeton**

Genauere Angaben über das Luftporengefüge in einer Festbetonprobe kann mit dem mikroskopischen Messlinien-Verfahren gemäß DIN EN 480-11 [N6] erzielt werden. Durch Auszählen der Luftporen werden der Gesamtluftporengehalt und rechnerische Grundlagen für die Luftporenkennwerte bestimmt. Ermittelt werden die Porenverteilung, der Gehalt an Mikro-Luftporen  $A_{300}$  und der Abstandsfaktor  $L$  in mm. Der Mikro-Luftporen-Kennwert  $A_{300}$  gibt den Gehalt an Luftporen mit annähernd kugeligen Luftporen bis zu einem Durchmesser von 300  $\mu\text{m}$  in Vol-% an. Der rechnerische Abstandsfaktor ist ein gemittelter Wert zwischen einem Punkt im Zementstein und der Peripherie der nächstgelegenen Pore am Festbeton, vgl. Bild 2-10. Auch die Quecksilberdruckporosimetrie ist eine bekannte Methode zur Bestimmung der Porosität und der Porengrößenverteilung in Betonen. Quecksilber ist eine nicht benetzende Flüssigkeit und wird unter an-

steigendem Druck in Poren mit kleiner werdenden Durchmessern gedrückt. Das aufgenommene Quecksilbervolumen je Druckstufe wird erfasst, der Porenradius kann nach der Gleichung von Washburn ermittelt werden.

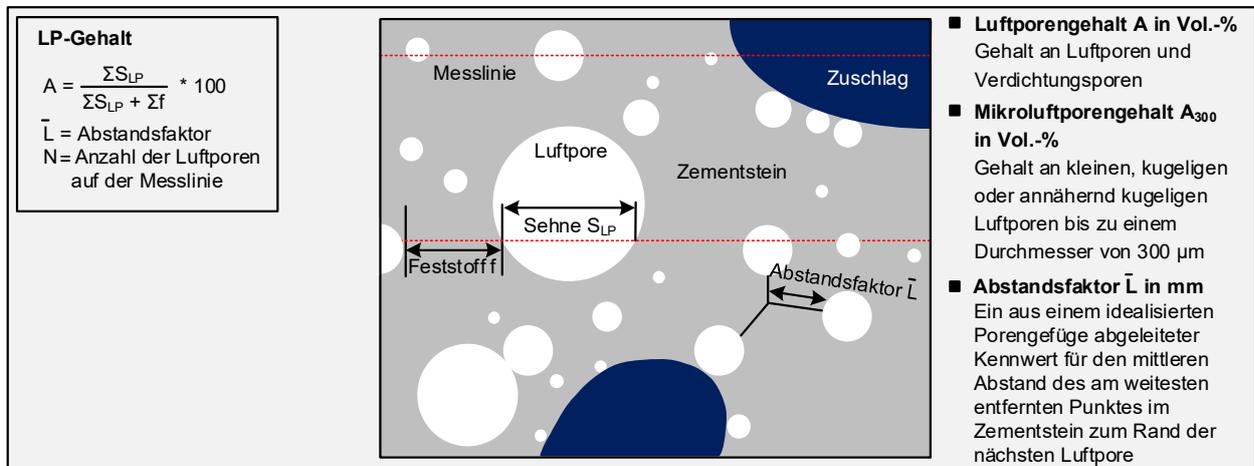


Bild 2-10: Definition der Luftporenkennwerte [10, 45]

Die einseitige Wasserstoff-Kernspinresonanz-Messmethode wird erst seit einigen Jahren zur Charakterisierung von Baustoffeigenschaften erprobt. Sie ermöglicht Messungen von z. B. einer Betonoberfläche bis zu einer Tiefe von 25 mm. In [46] wird anhand dieser Methode eine zeitliche Entwicklung der Porosität infolge Auslaugung von Portlandit in einer Tiefe von 0,6 mm bestimmt.

## 3 Arbeitsprogramm

### 3.1 Allgemeines

Um ein Prüfverfahren zur präzisen Bestimmung des tatsächlichen Frischbeton-Luftporengehaltes mit anschließender gerätetechnischer Vergleichsuntersuchung zu konzipieren, wurde ein Arbeitsplan mit sieben Arbeitspaketen (AP), aufgeteilt in vier Arbeitsphasen, die nachfolgend beschrieben werden, ausgearbeitet. Das prinzipielle Vorgehen ist Bild 3-1 zu entnehmen.

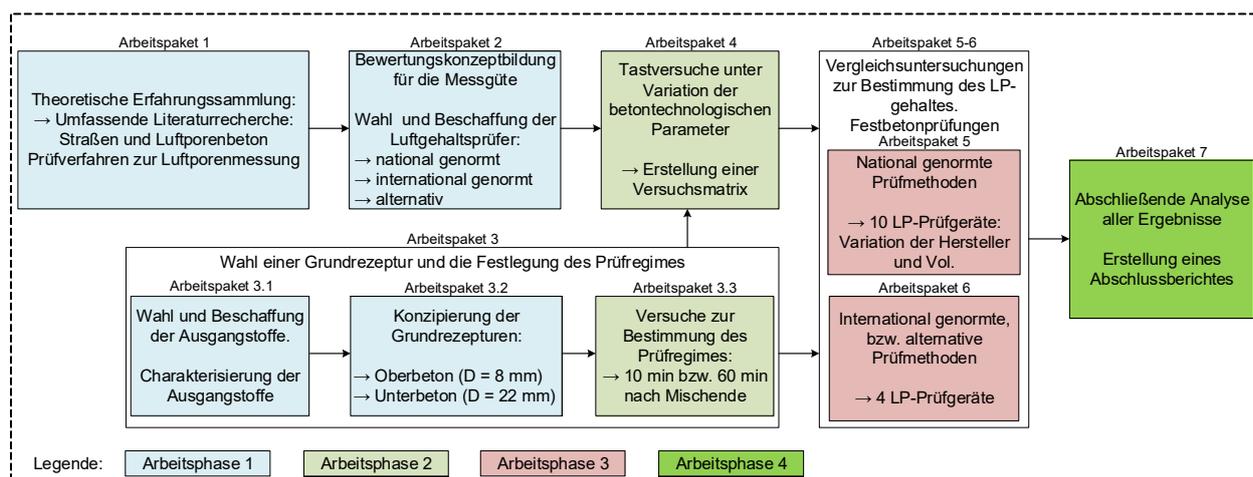


Bild 3-1: Prinzipielles Vorgehen innerhalb des Arbeitsprogramms

Es wurde gemäß dem aktuellen Stand der Technik und der praktisch gewonnenen Erfahrungen ein Verfahren für die möglichst präzise Ermittlung des tatsächlichen Luftporengehaltes im Frischbeton ausgearbeitet und ein Bewertungsschema der Messgenauigkeit der Luftgehaltsprüfer entwickelt. In Vorversuchen fand mithilfe eines einheitlichen und zeitabhängiges Prüfregimes ein gerätetechnischer Vergleich an genormten bzw. alternativen Luftgehaltsprüfern statt.

Um die Güte der gemessenen Luftporengehalte der unterschiedlichen Luftgehaltsprüfer zu quantifizieren, wurden Untersuchungen durchgeführt, in denen die Einflüsse der Messwertbildung detektiert und bewertet wurden. Die Luftporenmessungen erfolgten an zwei Zeitpunkten, jeweils ab 10 min und 60 min nach Mischende. Dabei wurden folgende Einflüsse aus Prüfvorbereitung und Durchführung untersucht:

- Variation der Probenahme (unverdichtetes oder vorverdichtetes Material)
- Variation der Verdichtungsart (Innenrüttler oder Rütteltisch, Verdichtungsenergie und -zeit)
- Variation des Frischbeton-Befüllungsprozesses (in einer oder mehreren Lagen)
- Variation des Einfüllprozesses des Wassers in die Prüfvorrichtung (ohne oder mit Einbringung zusätzlicher Luftblasen ins System)
- Variation der Umgebungsbedingungen (Messungen bei Lufttemperaturen von 10 °C, 20 °C, 30 °C bzw. 40 °C)
- Variation der zeitlichen Betätigung des messwertbildenden Auslösers (sofort, nach 60 s, 120 s, etc.)  
→ Probematerial kontinuierlich unter Druck
- Variation der zeitlichen Betätigung des messwertbildenden Auslösers, Wiederholungsmessungen am identischen Probematerial (mind. drei Messungen)  
→ Probematerial im Wechsel unter Druck oder drucklos

Als Ergebnis wurde auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse eine einheitliche Prüfroutine für weiterführende Vergleichsuntersuchungen ausgearbeitet.

In den ersten Arbeitspaketen erfolgte die Konzeption von Grundrezepturen eines Ober- und eines Unterbetons sowie einer darauf aufbauenden Versuchsmatrix unter Variation definierter betontechnologischer Parameter für die Vergleichsuntersuchungen. Dabei wurden folgende Parameter in Betracht gezogen:

- Variation des Luftporengehalts in mindestens 2,0 Vol.-% Abständen
- Variation von w/z-Werten soweit die Verarbeitbarkeit und Stabilität des Betons gegeben war

Unter Anwendung der ausgearbeiteten Prüfroutine sowie des Versuchsprogramms erfolgte ein gerätetechnischer Vergleich unterschiedlicher Luftgehaltsprüfer. Dabei wurde die Messgüte der national und international genormten bzw. der alternativen Prüfvorrichtungen möglichst objektiv bewertet und festgehalten (siehe Kapitel 3.1.1).

Ergänzend wurden LP-Kennwerte am Festbeton an ausgewählten Betonrezepturen bestimmt und die Korrelation mit den LP-Gehaltswerten der Frischbetonprüfung überprüft. Diese LP-Kennwertbestimmung am Festbeton wurde durch eine unabhängige weitere Laboreinrichtung überprüft. Des Weiteren wurden für diese Rezepturen die Spaltzugfestigkeit und die Druckfestigkeit ermittelt.

Inhaltlich wurde das Arbeitsprogramm in vier Arbeitsphasen unterteilt:

- Arbeitsphase 1:  
Zusammenstellung der Erfahrungssammlung, Bildung eines Bewertungskonzeptes sowie Beschaffung nötiger Prüftechnik und Ausgangsstoffe
- Arbeitsphase 2:  
Versuche zur Bestimmung des Prüfregimes und Tastversuche zum Aufspannen der Versuchsmatrix für gerätetechnische Vergleichsuntersuchungen
- Arbeitsphase 3:  
Vergleichsuntersuchungen mit nationalen und alternativen LP-Gehaltsprüfern zur Bestimmung des LP-Gehaltes inkl. Festbetonprüfung
- Arbeitsphase 4:  
Finale Analyse und Auswertung der gesamten erstellten Datenbasis

### **3.1.1 Arbeitsphase 1**

In der Arbeitsphase 1 wurden die Arbeitspakete 1, 2, 3.1 und 3.2 bearbeitet, um die Zusammenstellung der Erfahrungssammlung, Bildung eines Bewertungskonzeptes sowie Beschaffung nötiger Prüftechnik und Ausgangsstoffe zu gewährleisten.

Im ersten Arbeitspaket erfolgte als Grundlagenforschung eine vertiefte Literaturstudie zum Themengebiet der Straßenbetone bzw. des Luftporenbetons. Das Phänomen der Luftporenbildung im Betonwerkstoff wurde dabei auf der makroskopischen, auf der mesoskopischen und auch auf der mikroskopischen Ebene untersucht. Hierbei wurden folgende prozessbedingte Einflüsse auf die LP-Bildung bzw. das LP-Verhalten der Straßenbetone behandelt:

- ausführungs- und gerätetechnische Einflüsse während der Prüfung des Luftporengehaltes
- Mischtechnik- und Witterungseinflüsse während der Herstellung der luftporenhaltigen Straßenbetone unter Labor- bzw. Praxisbedingungen
- transportbedingte Einflüsse während des Transportvorganges der Betone zur Baustelle

Hierzu wurden verschiedene national und international genormte Prüfverfahren am Frisch- und Festbeton und das jeweilige Messprinzip durchleuchtet und detailliert dargestellt. Zusätzlich sollte eine gründliche Literaturrecherche aufzeigen, ob sich eventuell potenzielle Wechselbeziehungen zwischen den gemessenen Frischbeton- und Festbetonluftporengehalten eines Betons, in Abhängigkeit von dem anzuwendenden

Prüfverfahren, detektieren lassen. Des Weiteren wurde das Ausmaß des Einflusses der betontechnologischen Eigenschaften auf die Messwertbildung des LP-Gehaltes bewertet und dargestellt.

Die Verfahrenskonzeptionalisierung zur Bewertung der Messgüte der LP-Gehaltsprüfer fand auf Basis der gewonnenen Erfahrungssammlung statt. Dabei sollte die Qualität der Messwerte mit einfachen und nachvollziehbaren Methoden wie durch:

- kontinuierliches Kalibrieren der LP-Prüfer nach entsprechender Anleitung
- Messung der Rohdichten der Betonbestandteile
- Messung der Frischbeton-Rohdichte
- Rückrechnung des Wassergehaltes im Frischbeton
- Rückrechnung der Soll-FB-Rohdichte

beurteilt werden.



Bild 3-2: Auswahl national genormter LP-Prüfgeräte

Die für die Untersuchungen geplanten national und international genormten bzw. alternativen LP-Prüfgeräte wurden überwiegend im Neuzustand beschafft. Dabei wurden die Vorgaben berücksichtigt, dass

- von den in Deutschland standardmäßig verwendeten LP-Töpfen in den meisten Fällen zwei baugleiche Prüfgeräte unterschiedlicher Hersteller und Volumina zum Einsatz kommen sollen
- von den alternativen Prüfgeräten (national, international bzw. mit oder ohne Normung) jeweils ein Prüfgerät zum Einsatz kommen soll

Tab. 3-1: Verwendete nationale bzw. alternative LP-Prüfgeräte und dessen berichtinterne Bezeichnung

LP-Gehaltsprüfer	Bezeichnung	Norm	Anzahl	Volumen in [l]
1	2	3	4	5
National genormte Luftgehaltsprüfer	LP-Topf des Herstellers "A" Bezeichnung: LP_A_5L/8L_1/2	DIN EN 12350-7 [N15]	2	5
		ASTM C231 Typ B [N2]	2	8
	LP-Topf des Herstellers "B" Bezeichnung: LP_B_5L/8L_1/2	DIN EN 12350-7 [N15]	2	5
		ASTM C231 Typ B [N2]	2	8
	LP-Topf des Herstellers "C" Bezeichnung: LP_C_5L/8L_1	DIN EN 12350-7 [N15]	1	5
		ASTM C231 Typ B [N2]	1	8
International genormte bzw. alternative Luftgehaltsprüfer	Super Air Meter Bezeichnung: SAM_7L	ASTM C231 / C231M Typ B [N2]	1	7
	AVA-Messgerät Bezeichnung: AVA-3000	Berechnung in Anlehnung an ASTM C457 [N3]	1	-
	HYDRO_5 Würfel Bezeichnung: HYDRO_5_W_3,4L	(nicht genormt)	1	3,375
	HYDRO_5-Topf Bezeichnung: HYDRO_5_T_6L	DIN EN 12350-7 [N15]	1	6,1
ASTM C231 Typ A [N2]				

Die für die Untersuchungen gewählten LP-Prüfgeräte sowie deren Anzahl und Volumen sind der Tab. 3-1 zu entnehmen. Bild 3-2 zeigt eine Auswahl handelsüblicher national genormter LP-Prüfgeräte. Im Forschungsvorhaben eingesetzte internationale bzw. alternative LP-Prüfgeräte zeigt Bild 3-3.

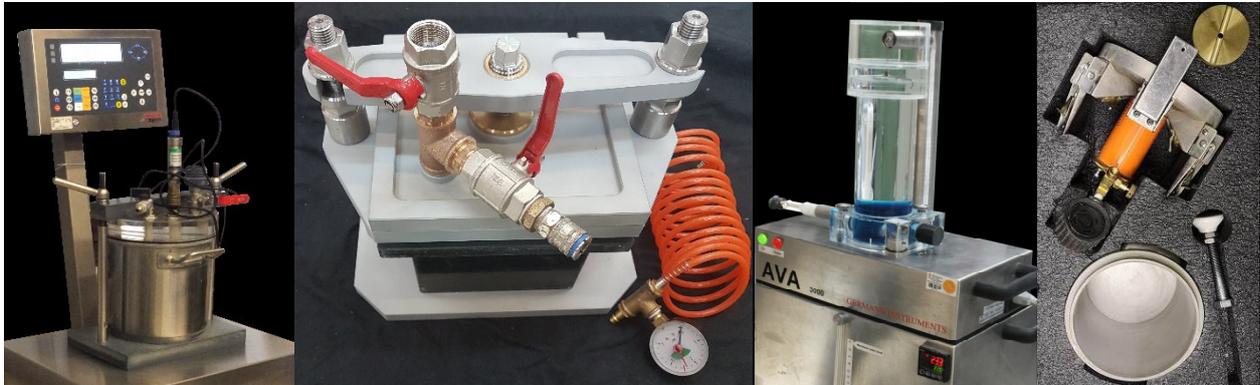


Bild 3-3: Alternative Prüfgeräte; HYDRO\_5\_W\_3,4L und HYDRO\_5\_T\_6L (links); AVA-3000 und SAM\_6L (rechts)

Des Weiteren wurden in der Arbeitsphase 1 die für die zu konzipierenden Grundrezepturen erforderlichen Ausgangsstoffe gewählt, beschafft und charakterisiert. Es handelte sich dabei um Ausgangsstoffe, welche den straßenspezifischen Regelwerken laut Herstellerangaben entsprechen. Bei der Charakterisierung der Ausgangsstoffe erfolgte die Ermittlung der Korngrößenverteilung beim Zement und der Gesteinskörnung, die Rohdichtebestimmung aller Ausgangsstoffe in kontinuierlichen Zeitabständen sowie die Wasseraufnahme der groben bzw. feinen Gesteinskörnung.

Tab. 3-2: Arbeitsphase 1 – Überblick über die Betonzusammensetzung der Grundrezepturen für Oberbeton als Waschbeton und Unterbeton

Eigenschaften der Grundrezepturen		Prüfserie	
		Oberbeton D = 8 mm	Unterbeton D = 22 mm
1	2	3	4
Zementart	CEM I	42,5 N	42,5 N
Zementmenge	-	420 kg/m <sup>3</sup>	340 kg/m <sup>3</sup>
Gesteinskörnung grob	Vulkanite	Rhyolith - Splitt	Rhyolith - Splitt
Gesteinskörnung fein	Sand	0/2 mm	0/2 mm
Größtkorn	-	8 mm	22 mm
Sieblinie	Art	A	A/B
	Abfolge	stetig	stetig
w/z-Wert	-	0,43	0,43
Luftporengehalt	-	5,0 - 6,0 Vol. %	4,0 - 5,0 Vol. %
Zusatzmittel	Luftporenbildner	reines Tensid	
	Fließmittel	Polycarboxylatether (PCE)	

Basierend auf den Anforderungen des Forschungsvorhabens wurden folgende betontechnologische Eigenschaften für die Grundrezepturen berücksichtigt:

- der Oberbeton soll für die Waschbetonoberflächentextur konzipiert werden (D = 8 mm)
- die Unterbetonrezeptur ist so zusammengesetzt, dass diese als Oberbeton mit maximalem Größtkorn von D = 22 mm und für eine „Grinding/Grooving“-Textur eingesetzt werden kann
- die Rezepturen werden mit ofengetrockneter gebrochener Gesteinskörnung erstellt
- ein identischer w/z Wert wird bei beiden Rezepturen eingehalten
- Wahl der Zementart: CEM I 42,5 N

- Unterbeton: ein Zementgehalt von mind. 340 kg/m<sup>3</sup>
- Oberbeton: ein Zementgehalt von mind. 420 kg/m<sup>3</sup>
- die Konsistenzklasse der Grundfrischbetone soll der Konsistenzklasse C1 entsprechen

Einen Überblick über die Betonzusammensetzung beider Grundrezepturen gibt Tab. 3-2.

Die Grundrezeptur des Oberbetons in Waschbetonbauweise diente zuerst der Festlegung eines einheitlichen Prüfregimes für nachfolgende gerätetechnische Vergleichsuntersuchungen. Im Rahmen der Voruntersuchung wurden hierbei mögliche Einflussfaktoren auf die LP-Messwertbildung detektiert und quantitativ beschrieben.

### 3.1.2 Arbeitsphase 2

In der Arbeitsphase 2 wurden die Arbeitspakete 3.3 und 4 bearbeitet, um das Prüfregime zu bestimmen und die Versuchsmatrix für nachgeschaltete gerätetechnische Vergleichsuntersuchungen in der folgenden Arbeitsphase 3 aufzustellen.

Um die Vergleichsuntersuchungen zur Messgütebestimmung der LP-Prüfgeräte in Arbeitsphase 3 unter gleichen Untersuchungsbedingungen an verschiedenen Betonrezepturen zu gewährleisten, wurden in der Arbeitsphase 2 Vorversuche zur Bestimmung des endgültigen Prüfregimes mit der Grundrezeptur mit künstlich eingeführten Luftporen durchgeführt. Hierbei wurden sowohl das in Deutschland standardmäßig angewandte Druckausgleichsverfahren als auch das Wassersäulenverfahren zur Anwendung gebracht. Dabei wurden die Prüfausführung bzw. die einzelnen Schritte der LP-Messung der genannten Verfahren in der Literaturstudie beleuchtet und der mögliche Einfluss auf die Messgüte bewertet. Hierzu lag auf der Frischbeton-Rohdichte als Kontrollwert bzw. zur Kalibrierung ein besonderes Augenmerk.

Die Tab. 3-3 gibt einen Überblick über die Art der Frischbetonprüfungen, die gewählten Prüfzeitpunkte der durchgeführten Vorversuche und die hierfür eingesetzte Prüftechnik. Es wurden zwei baugleiche LP-Prüfgeräte „LP\_A\_5L\_1 bzw. 2“ und zwei weitere, alternative Prüfgeräte der HYDRO\_5-Serie zur Messwertqualitätsuntersuchung eingesetzt. Bei den HYDRO\_5-Prüfgeräten handelte es sich um ein Modell HYDRO\_5\_T\_6L und einen HYDRO\_5\_W\_3,4L. Alle LP-Messungen und relevante Frischbetonprüfungen nach DIN EN 12350 wurden sowohl 10 als auch 60 min nach dem Mischende der Betoncharge durchgeführt. Die Luftporenmessung mit konventionellen Prüfgeräten erfolgte hierbei auf zwei Arten. Bei dem ersten LP-Topf erfolgte die messwertbildende Betätigung sofort und anschließend nach 60, 120, 240 und 600 s. Die Betonprobe wurde kontinuierlich unter Druck gelassen, um den Einfluss auf die Wiederholungsgenauigkeit der Messergebnisse unter den genannten Prüfbedingungen am identischen Probenmaterial zu untersuchen.

Tab. 3-3: Übersicht der Voruntersuchungen zum Prüfregime

Voruntersuchungen zum Prüfregime	Frischbetonprüfungen	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2	HY5_T_6L	HY5_W_3,4L
Prüfzeitpunkt	1	2	3	4	5
Ab 10 min und 60 min. nach Mischende	Rohdichte	X	X	X	X
	Konsistenz				
	Luftporengehalt				
	Frischbeton-Temperatur				

In einem weiteren LP-Topf wurde ebenfalls die messwertbildende Betätigung sofort und anschließend in den genannten Zeitabständen durchgeführt. Die Betonprobe wurde jedoch zwischen den Zeitintervallen

drucklos gesetzt, um ebenfalls den Einfluss auf die Wiederholbarkeit der Messergebnisse unter den angepassten Prüfbedingungen am identischen Probenmaterial zu untersuchen.

Um den Einfluss auf die Messwertbildung infolge des Prüfregimes aufzuzeigen, wurden Prüfregimevariationen gewählt, welche sich jeweils in einem Variationsparameter von dem jeweiligen Referenzregime (Regelfall) unterscheiden. Hierbei relevante Einflussparameter und die somit geplante Untersuchungsanzahl, die in den Vorversuchen betrachtet wurden, sind dem Untersuchungsprogramm (s. Tab. 3-4) zu entnehmen. Damit ergaben sich aufgrund der Doppelbestimmung der Messwerte mindestens 26 Betonchargen zur Durchführung der Vorversuche zur Bestimmung des Prüfregimes. Variiert wurden folgende Prüfregimeparameter:

- Probenzustand vor dem Befüllen der Prüftechnik
- Verdichtungsart
- Verdichtungsablauf
- Einfüllprozess des Wassers in die Prüftechnik
- Temperatur

### **Variation des Probenzustandes**

Zur Frischbetonprüfung nach DIN EN 12350 ist die Verwendung eines unverdichteten, vorgemischten Frischbetons erforderlich. Es ist von Interesse, den Einfluss einer vorverdichteten Frischbetonprobe auf die Messwertbildung bei der Prüfregimeanpassung zu untersuchen. Hierfür erfolgte das Vorverdichten des Frischbetons unmittelbar nach der Herstellung mittels eines freien Falles aus definierter Höhe (2 bis 3 m). Hiermit sollte die Entnahme einer Probe für Frischbeton-Untersuchungen direkt aus einem Lastfahrzeug auf der Baustelle simuliert werden.

### **Variation der Verdichtungsart**

Für die Voruntersuchungen wurden die Frischbetone bei einer Variationsart anstatt mittels eines 2-motorigen Hochfrequenzrütteltisches mit einem Innenrüttler verdichtet. Die Verdichtung erfolgte somit mit einer Schwingungsintensität von 200 Hz bzw. 12000 U/min in zwei Lagen, wobei jeweils 45 s gerüttelt wurde.

### **Variation des Verdichtungsablaufes**

In Anlehnung an die Praxis wurde für den Regelfall eine Verdichtung der Proben für die Rohdichte- und Luftporengehaltsbestimmung in zwei Lagen an einem 2-motorigen Hochfrequenzrütteltisch mit einer Schwingungsintensität von ca. 4500 U/min (75 Hz) bestimmt. Die Dauer des jeweiligen Verdichtungsprozesses je Lage sollte mittels Vorversuche so angepasst werden, dass die Proben verschiedener Volumina und Prüfbehälterarten eine vergleichbare Verdichtung erfahren. Als Referenz sollte die Frischbeton-Rohdichte einer Probe gelten, welche in einer Stahlwürfelschalung mit Kantenlängen von 15 cm in zwei Lagen 45 s lang mit einer Verdichtungsintensität von 4500 U/min (75 Hz) auf einem Rütteltisch verdichtet wurde.

Als Variation wurde die Anzahl der Lagen von zwei auf drei und vier Lagen erhöht. Darüber hinaus wurde die Verdichtungsintensität von 4500 U/min (75 Hz) jeweils auf 6000 (100 Hz) und 3000 U/min (50 Hz) als Variation des Prüfregimes angesetzt. Des Weiteren wurde die Verdichtungszeit von 45 s auf 30 s und 60 s je Lage des Frischbetons im Prüfbehälter variiert.

### **Variation des Einfüllprozesses des Wassers in die Prüftechnik**

Laut Herstellerangaben der konventionellen Luftporengehaltsprüfer ist das Einfüllen des erforderlichen Wassers in das Prüfgerät für die Prüfung luftblasenfrei durchzuführen, da ansonsten zusätzliche Luftblasen

in die Prüfbehälter mit der Betonprobe zugeführt werden, die den Messwert der Prüfung beeinflussen würden. Es ist jedoch bekannt, dass es in der Praxis aufgrund der relativ kurzen Zeitabstände zwischen der Herstellung des Frischbetons und der Luftporengehaltsprüfung zum raschen Befüllen der Prüfgeräte mit Wasser unter Druck vorkommt. Um den Einfluss der zusätzlich eingeführten Luftblasen durch das unkontrollierte Einpressen des Wassers auf die Messwertbildung zu untersuchen, wurde der Einfüllprozess des Wassers bei den Voruntersuchungen variiert.

### Variation der Temperatur

Frischbetonluftporenmessungen finden in der Praxis unter unterschiedlichen Witterungsbedingungen und Frischbeton-Temperaturen statt. Um den Einfluss der Temperatur auf die Messwertbildung zu untersuchen, wurden die Betonausgangsstoffe, die Prüfgeräte, das bei der Luftporenprüfung verwendete Einfüllwasser sowie der hergestellte Frischbeton in einem Klimaraum auf festgelegte Umgebungslufttemperaturen vortemperiert. Die Variation der Umgebungstemperatur erfolgte von 10 auf 20, 30 und 40 °C.

Tab. 3-4: Untersuchungsprogramm der Voruntersuchung zur Bestimmung des Prüfregimes

Untersuchungsvariationen		Variation / Rezepturbezeichnung		Zusatzinformationen
1	2	3	4	5
Probenzustand	Frischbeton	Unverdichtet	0-0.0 Regelfall	-
		Verdichtet	0-1.1	freier Fall ab 3 m Höhe
Verdichtungsart		mit Rütteltisch (2-motorig)	0-0.0 Regelfall	mit 4500 U/min
		mit Innenrüttler	0-2.1	mit 12000 U/min
Verdichtungsablauf		in 2 Lagen	0-0.0 Regelfall	45 s mit 4500 U/min
		in 3 Lagen	0-3.1	
		in 4 Lagen	0-3.2	
		mit 4500 U/min [75 Hz]	0-0.0 Regelfall	45 s mit 2 Lagen
		mit 3000 U/min [50 Hz]	0-4.1	
		mit 6000 U/min [100 Hz]	0-4.2	
	45 s verdichten	0-0.0 Regelfall	mit 4500 U/min; 2 Lagen	
	30 s verdichten	0-5.1		
60 s verdichten	0-5.2			
Einfüllprozess des Wassers	LP-Prüftechnik	langsam	0-0.0 Regelfall	ohne Luftzufuhr
		mit Druck	0-6.1	Luftblaseneintrag möglich
Umgebungs- und Materialtemperatur	Ausgangsstoffe und LP-Prüftechnik	10°C	0-7.1	Material + Prüfgeräte in Klimakammer bzw. Klimaraum vortemperiert.
		20°C	0-0.0 Regelfall	
		30°C	0-7.2	
		40°C	0-7.3	
LP-Gehaltsprüfer		Prüfzeitpunkt: ab 10 min und 60 min nach Mischende		
LP_A_5L_1	Probe konstant unter Druck	Prüfung nach: 0 s; 60 s; 120 s; 240 s; 600 s.		
LP_A_5L_2	Probe periodisch unter Druck	Prüfung nach: 0 s; 60 s; 120 s; 240 s; 600 s.		
HY5_T_6L	Wassersäule	Einzelne Referenzmessung sofort zum festgelegten Zeitpunkt		
HY5_W_3,4L				
Untersuchungen am Frischbeton		Anzahl der hergestellten Frischbetone zur Prüfregimebestimmung		
Voruntersuchungen zum Prüfregime	Rohdichte	Anzahl der Variationen: 13 Doppelwertbestimmung → ca. 26 Betonagen		
	Konsistenz			
	Luftporengehalt			
	FB-Temperatur			

## Tastversuche und Aufbau der Versuchsmatrix

Im nächsten Schritt in der Arbeitsphase 2 erfolgten Tastversuche unter Variation der Zugabemenge der Zusatzmittel bei beiden definierten Grundrezepturen (Ober- und Unterbeton). Dabei wurde das Ziel verfolgt, die in der Praxis teilweise stark schwankenden Parameter bzgl. der Zugabemenge der Zusatzmittel und damit der Konsistenz, des Luftporengehaltes sowie des w/z-Wertes zu berücksichtigen und deren Einfluss auf Messwertqualität der LP-Gehaltsprüfer zu quantifizieren. Hierbei wurden drei Luftporengehalte der Untersuchungsbetone angestrebt, die einen Unterschied von mindestens 2,0 Vol.-% zueinander aufweisen. Dabei wurde besonders die Konsistenz der hergestellten Frischbetone beachtet. Das passende Mischregime wurde auf Basis der Literaturrecherche und den Regelwerken erstellt, wobei potentielle Einflüsse aus der Reihenfolge und dem Zeitpunkt der Zusatzmittelzugabe mit dem Zugabewasser und der Drehzahl der Mischwerkzeuge auf die Luftporenbildung berücksichtigt wurden.

Anhand der Tastversuche wurde je Betonsorte mit fünf verschiedenen w/z-Werten und drei verschiedenen Zugabemengen des gewählten Luftporenbildners unter ggf. erforderlicher Zugabe eines geeigneten Fließmittels die Versuchsmatrix festgelegt. Somit ergaben sich für die Versuchsreihe 15 Betonzusammensetzungen je Grundrezeptur. Zur zusätzlichen Messwertüberwachung wurde der alternative HYDRO\_5\_T\_6L aufgrund des höheren Prüfdruckes von 2 bar bei den Tastversuchen als Vergleichsmessung zum Einsatz gebracht. Die größtmögliche Versuchsmatrix ist Tab. 3-5 zu entnehmen. Die Definition der Rezeptur-ID, die in Tab. 3-5 eingeführt und folgend verwendet wurde, ist dem Kapitel 4.3.1 bzw. dem Anhang zu entnehmen.

Tab. 3-5: Versuchsmatrix zur Vergleichsuntersuchung

Versuchsmatrix zu Vergleichsuntersuchungen mit national und international genormten bzw. alternativen LP-Prüfern. Mischungsbezeichnungen in Abhängigkeit vom eingestellten Luftporengehalt und w/z-Wert						
w/z-Wert	Frischbeton-Luftporengehalt					
	Niedrig: bis 3,5 Vol.-% [X-N-X]		Mittel: ab 3,5 Vol.-% bis 6,5 Vol.-% [X-M-X]		Hoch: ab 6,5 Vol.-% [X-H-X]	
	Oberbeton [1-X-X]	Unterbeton [2-X-X]	Oberbeton [1-X-X]	Unterbeton [2-X-X]	Oberbeton [1-X-X]	Unterbeton [2-X-X]
1	2	3	4	5	6	7
0,38 [X-X-0,38]	1-N-0,38	2-N-0,38	1-M-0,38	2-M-0,38	1-H-0,38	2-H-0,38
0,40 [X-X-0,40]	1-N-0,40	2-N-0,40	1-M-0,40	2-M-0,40	1-H-0,40	2-H-0,40
0,43 [X-X-0,43]	1-N-0,43	2-N-0,43	1-M-0,43	2-M-0,43	1-H-0,43	2-H-0,43
0,45 [X-X-0,45]	1-N-0,45	2-N-0,45	1-M-0,45	2-M-0,45	1-H-0,45	2-H-0,45
0,50 [X-X-0,50]	1-N-0,50	2-N-0,50	1-M-0,50	2-M-0,50	1-H-0,50	2-H-0,50

### 3.1.3 Arbeitsphase 3

In der Arbeitsphase 3 erfolgte die Bearbeitung der Arbeitspakete 5 und 6. Hierbei wurden zuerst die gerätetechnischen Vergleichsuntersuchungen mit national genormten Prüfmethode zur Bestimmung des Luftporengehaltes mit dem in Arbeitsphase 2 abgestimmten Prüfregime durch Abarbeiten der festgelegten Versuchsmatrix durchgeführt. Pro genormtem Luftporengehaltsprüfer wurden zur Ergebnisgegenüberstellung jeweils zwei baugleiche Modelle eingesetzt, um Präzision und Wiederholbarkeit der Messergebnisse zu überprüfen. Es wurden bis zu drei national genormte LP-Gehaltsprüfer gleichen Volumens pro Betoncharge einer Rezeptur gleichzeitig untersucht. Hergestellt wurden die Betonchargen mithilfe eines 100 l Intensivmischers. Bei allen Betonrezepturen erfolgte über die LP-Bestimmung hinaus die Ermittlung weiterer Frischbetonkennwerte nach DIN EN 12350. Dabei wurden besonders die Konsistenz und die Frischbeton-Rohdichte der hergestellten Frischbetone beachtet. Für ausgewählte Betonrezepturen erfolgten weiterführende Festigkeitsuntersuchungen sowie Luftporenauszählungen am Festbeton nach TP B-StB 17 [N20].

Dafür wurden folgende Prüfungen eingeplant:

- Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen an drei Würfelprobekörpern
- Spaltzugfestigkeit im Alter von 28 Tagen an sechs Zylinderunterscheiben
- Festbetonluftporenauszählung ab dem Probenalter von 7 Tagen an den aus 2 Würfeln herausgesägten Probekörpern

Für ausgewählte Rezepturen wurden Luftporenkennwerte am Festbeton zusätzlich an einer weiteren unabhängigen, externen Laboreinrichtung untersucht. Tab. 3-6, Spalten 2 bis 5 zeigen das Versuchsprogramm für die Vergleichsuntersuchungen mit national genormten Prüfmethoden zur Bestimmung des Luftporengehaltes am Frischbeton.

Im nächsten Schritt erfolgten die gerätetechnischen Vergleichsuntersuchungen mit abgestimmten, außerhalb der DIN EN genormten bzw. alternativen Luftgehaltsprüfern anhand der dafür vorgesehenen Prüfanleitung bzw. internationalen Norm. Zusätzlich erfolgte im Sinne des messwertqualitativen Vergleiches der Einsatz eines national genormten LP-Topfes. Hierbei wurden die gleichen Betonrezepturen eingesetzt sowie die identischen Frisch- und Festbetonuntersuchungen durchgeführt wie bei der national genormten Luftporenmesstechnik. Von jedem alternativen LP-Prüfgerät kam hierbei jeweils nur ein Modell zum Einsatz. Dabei wurden ebenfalls bis zu drei LP-Gehaltsprüfer pro Betoncharge einer Rezeptur gleichzeitig untersucht. Die Anzahl der Probekörper sowie damit verbundene Betonmengen pro Betonzusammensetzung sind Tab. 3-6, Spalten 6 und 7 zu entnehmen.

Tab. 3-6: Arbeitsprogramm für die gerätetechnischen Vergleichsuntersuchungen mit Mengenkalkulation des Frischbetons und Probekörperanzahl je Betonrezeptur

Arbeitsprogramm der Vergleichsuntersuchungen	Probekörperart	National genormte Prüfmethoden			International genormte bzw. alternative Prüfmethoden	
		LP-5L 3 Topfe	LP_8L 3 Töpfe	LP_5L/8L 4 Töpfe	LP-Prüfgerät Nr. 1 bis 3	LP-Prüfgerät Nr. 4 bis 5
Frischbetonprüfung		Frischbetonmenge				
1	2	3	4	5	6	7
Rohdichte	Frischbeton ab 10 min nach Mischende	23 l	27 l	32 l	23 l	27 l
Konsistenz (nur bei t > 10 min)		Frischbeton ab 60 min nach Mischende	23 l	28 l	33 l	23 l
Luftporengehalt	-		6 Zylinder 10 l	-	-	6 Zylinder 10 l
Frischbeton-Temperatur						
Summe	-	46 l	55 l	65 l	46 l	55 l
Spaltzugfestigkeit	Zylinder 100 x 200 [mm] nach 28 d	-	6 Zylinder 10 l	-	-	6 Zylinder 10 l
Summe		-	10 l	-	-	10 l
Druckfestigkeit	Würfel a = 150 [mm] nach 28 d	3 Würfel	-	-	3 Würfel	-
		10,5 l			10,5 l	
Summe		10,5 l			10,5 l	
LP-Kennwerte	Würfel a = 150 [mm] nach 7 d	2 Würfel	-	-	2 Würfel	-
		7,75 l			7,75 l	
Summe		Charge 1: 65 l	Charge 2: 65 l	Charge 3: 65 l	Charge 1: 65 l	Charge 2: 65 l

#### **3.1.4 Arbeitsphase 4**

In der Arbeitsphase 4 erfolgte die abschließende Analyse der Daten und Formulierung des Abschlussberichtes. Dieser enthält alle analysierten und ausgewerteten Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zu der konzipierten Prüfmethode zur validen Bestimmung von Luftporengehalten an den im Forschungsvorhaben untersuchten Fahrbahndeckenbetonen. Anhand dieser Daten kann die Leistungsfähigkeit des jeweiligen Messprinzips bzw. die generelle Messgüte der einzelnen Prüfmethode bewertet werden. Des Weiteren wurden die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Messwertbildung detektiert und grundlegend beschrieben. Ebenfalls wurden darauf aufbauend Maßnahmen und Empfehlungen für die Praxis zu einer ganzheitlichen Betrachtung des kompletten Prüfprozesses und dessen Optimierungspotential zur Steigerung der Messgenauigkeit formuliert.

## 4 Ausgangsstoffe, Rezepturen und Herstellung der Betone

### 4.1 Ausgangsstoffe

#### 4.1.1 Zement

Für die Laboruntersuchungen wurde eine Zementart verwendet, welche in der Praxis bei der Fahrbahndeckenherstellung in der Regel zum Einsatz kommt. Dabei handelt es sich um einen Zement CEM I 42,5 N (tb). Ausgewählte Kennwerte des Zementes laut Herstellerangaben sind in Tab. 4-1 dargestellt. Der Zement erfüllt die Anforderungen gemäß TL Beton-StB 07 [N21] für die Herstellung von Fahrbahndecken.

Tab. 4-1: Eigenschaften des Zementes

Eigenschaften des Zementes		CEM I 42,5 N
1	2	3
Rohdichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]	3,175
Spezifische Oberfläche nach BLAINE	[cm <sup>2</sup> /g]	2965
Na <sub>2</sub> O-Äquivalent	[M.-%]	0,70
Hüttensandgehalt	[M.-%]	0,0
Wasseranspruch	[%]	28,5
Zementdruckfestigkeit [28 d]	[MPa]	58,8

#### 4.1.2 Gesteinskörnungen

Die Auswahl der Gesteinskörnung erfolgte nach den Anforderungen gemäß TL Beton-StB 07 [N21] und TL Gestein StB [N22] für die jeweilige Fahrbahndeckenbetonsorte. Für die Untersuchungen wurde ein Vulkanit verwendet. Insgesamt wurden fünf unterschiedliche Fraktionen eines Rhyoliths zur Herstellung der Straßenbetone eingesetzt. Bei der Gesteinskörnung 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 ist.

Tab. 4-2: Korngrößenverteilung der verwendeten Gesteinskörnung

Kornart	Werk	Korngruppe	Kategorie	Siebdurchgang in M.-%														
				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	
Sand	1	0/2	G <sub>F</sub> 85	1	14	58	88	99	100	100								
Rhyolith - Splitt	2	2/5	G <sub>C</sub> 90/10	0	0	0	1	10	26	54	90	100	100					
		2/8	G <sub>C</sub> 85/20	0	0	0	0	1	4	17	42	90	100	100				
		5/8	G <sub>C</sub> 90/15	0	0	0	0	0	0	0	1	14	86	100	100			
		8/16	G <sub>C</sub> 85/20		0	0	0	0	0	0	0	4	40	85	100	100		
		16/22	G <sub>C</sub> 90/15			0	0	0	0	0	0	0	0	8	90	100	100	

Für die Laboruntersuchungen wurden die Korngrößenverteilung und die Rohdichte der verwendeten Lieferkörnungen aller Gesteinskornarten nach DIN EN 933-1 [N7] bestimmt (s. Tab. 4-2). Die Ermittlung der Rohdichte jeder Fraktion erfolgte nach DIN EN 1097-7 [N11] als Kontrollmessung in kontinuierlichen Zeit-

abständen, um die Frischbeton-Rohdichte der herzustellenden Straßenbetone präzise errechnen zu können. Ebenfalls tabellarisch dargestellt sind weitere ausgewählte Eigenschaften der Gesteinskörnung in Tab. 4-3.

### Gesteinskörnung zur Verwendung für Oberbeton in Waschbetonbauweise

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 Sand als feine Gesteinskörnung 0/2 mm (folgend z. B. Korngruppe 0/2) aus dem Werk 1 eingesetzt wurde.

Tab. 4-3: Ausgewählte Eigenschaften der Gesteinskörnungen

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
1	2	3	4	5	6	7	8
Kornrohichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]	2,64	2,67	2,69	2,68	2,67	2,67
Feinanteile	Kategorie	f <sub>3</sub>	f <sub>1,5</sub>				
Anteil gebrochener Körner	Kategorie	n. b	C <sub>100/0</sub>				
Polierwiderstand	Kategorie	n. b	PSV <sub>53</sub>				
Schlagzertrümmerungswert	Kategorie	n. b	SZ <sub>18</sub>				
Kornform SI	Kategorie	n. b	SI <sub>15</sub>				
AKR-Widerstand	Kategorie	EI	EI-S	EI-S	EI-S	EI-S	EI-S
Frost-Tausalz-Widerstand	[M.-%]	n. b	<5	<5	<5	<5	<5
Wasseraufnahme	[M.-%]	0,21	1,5	1,6	1,3	1,3	1,1

### Gesteinskörnung zur Verwendung für Unterbeton

Vier Gesteinskornfraktionen, Sand 0/2 in Kombination mit dem Rhyolith-Edelsplitt in den Korngruppen 2/8, 8/16 und 16/22 bilden die Ausgangsgesteinskörnung der Unterbetone in der Untersuchung. Für Unterbetone, welche ebenfalls als Oberbetone (D > 8 mm) einsetzbar sind, wurde ein 22 mm Größtkorn verwendet.

#### 4.1.3 Luftporenbildner und Fließmittel

Um für die Aufstellung der Versuchsmatrix zur gerätetechnischen Vergleichsuntersuchung die erforderliche Konsistenz und den erforderlichen Frischbeton-Luftporengehalt zu erreichen, wurden die Fahrbahndeckenrezepturen vorwiegend unter Zugabe von Luftporenbildnern und Fließmitteln hergestellt. Die Zusatzmittel, der Luftporenbildner und das Fließmittel auf Polycarboxylatether-Basis wurden von einem Hersteller bezogen und sind praxiserprobt. Weitere Angaben zu den verwendeten Zusatzmitteln sind in Tab. 4-4 enthalten.

Tab. 4-4: Betonzusatzmittel

Zusatzmittel	Art	Dosierempfehlung
1	2	3
Luftporenbildner	Luftporenbildnerkonzentrat auf reiner Tensid-Basis nach DIN EN 934-2	0,02 - 0,8 M.% vom Zementgehalt
Fließmittel	Fließmittel auf Polycarboxylatether-Basis (PCE) nach DIN EN 934-2	0,2 - 4,0 M.% vom Zementgehalt

## 4.2 Betonrezepturen

Als Grundrezeptur für jede Prüferie (Fahrbahndeckenbetonsorte) diente die Betonrezeptur eines bereits hergestellten Autobahnabschnittes, vgl. Tab. 3-2. Bei der gerätetechnischen Vergleichsuntersuchung wurden aufgrund der hohen Anzahl von Variationsparametern des Luftporengehaltes und w/z-Wertes insgesamt 30 Mischungszusammensetzungen konzipiert und hergestellt. Für die betrachteten Betonrezepturen wurde die ofentrockene Rohdichte der Gesteinskörnung für die Stoffraumrechnung herangezogen. Als Wasseraufnahmeparameter jeder Gesteinsfraktion wurde der jeweilige 60-min-Wert in der Stoffraumrechnung berücksichtigt, somit beide Prüfzeitpunkte ( $t > 10$  min und  $t > 60$  min) der Frischbetonuntersuchungen erfasst wurden. Zudem war dann die Gesamtwasseraufnahme der verwendeten Gesteinskörnungen i. d. R. zu 90 % abgeschlossen. Die Anzahl der einzelnen Variationsparameter aller Betonrezepturen kann Tab. 4-7 entnommen werden.

Zu den zu untersuchenden Variationsparametern zählten der w/z-Wert (0,38 bis 0,50) und der Frischbeton-Luftporengehalt (drei stark unterschiedliche Frischbeton-Luftporengehalte).

Die Frischbeton-Rohdichte wurde kontinuierlich gemessen und die Verdichtungsarbeit wurde entsprechend angepasst, so dass sich bei allen Prüfgeräten zur Bestimmung des Luftporengehaltes eine annähernd gleiche Frischbeton-Rohdichte einstellte. Die Frischbeton-Konsistenz sollte hierbei aufgrund der Herstellung der Fahrbahndecken mit dem Gleitschalungsfertiger einer Konsistenzklasse C1 entsprechen. Im Forschungsvorhaben wurde das Verdichtungsmaß durch Zugabe der Zusatzmittel auch außerhalb der C1 Kategorie angestrebt. Aufgrund der Vielzahl betrachteter Variationsparameter wurden bei den Mischungszusammensetzungen die Dosierung des Luftporenbildners und Fließmittels entsprechend der festzulegenden Versuchsmatrix für die Hauptversuche angepasst.

### Oberbeton (D = 8 mm) als Waschbeton

Die Betonzusammensetzung für die Grundrezeptur Oberbeton (D = 8 mm) zeigt Tab. 4-5. Diese bildete die Grundmischung für die weiteren Oberbetonrezepturen als Waschbeton mit den jeweiligen Variationsparametern. Die Sieblinie zu der Grundzusammensetzung ist in Bild 4-1 links dargestellt. Für Oberbetone wurden insgesamt 15 Betonrezepturen mit Variationsparametern aufgestellt.

Tab. 4-5: Grundrezepturen

Ausgangsstoffe	Oberbeton (D = 8 mm)		Unterbeton (D = 22 mm)	
	kg/m <sup>3</sup>	Vol.-% / *M.-%	kg/m <sup>3</sup>	Vol.-% / *M.-%
1	2	3	4	5
Zement (CEM I 42,5 N)	420	-	340	-
Zugabewasser	180,6	-	146	-
Feine Gesteinskörnung 0/2	515	30	512	28
Grobe Gesteinskörnung 2/5	507	30	-	-
Grobe Gesteinskörnung 5/8	667	40	-	-
Grobe Gesteinskörnung 2/8	-	-	312	17
Grobe Gesteinskörnung 8/16	-	-	495	27
Grobe Gesteinskörnung 16/22)	-	-	514	28
Fließmittel: in M.-% v. Z.	-	*0,20-2,00	-	*0,20-2,00
Luftporenbildner: in M.-% v. Z.	-	*0,05-0,80	-	*0,05-0,80

## Unterbeton

Die in Tab. 4-5 dargestellte Betonzusammensetzung bildet die Ausgangsmischung für die weiteren Unterbetonrezepturen mit jeweiligen Variationsparametern. Die Sieblinie zu der Ausgangszusammensetzung ist im Bild 4-1 rechts dargestellt.

Mit den Unterbetonrezepturen erfolgten die gerätetechnischen Vergleichsuntersuchungen insgesamt an 15 Betonrezepturen. Die Variation der Parameter erfolgte wie bei den Oberbetonen auf identische Weise.

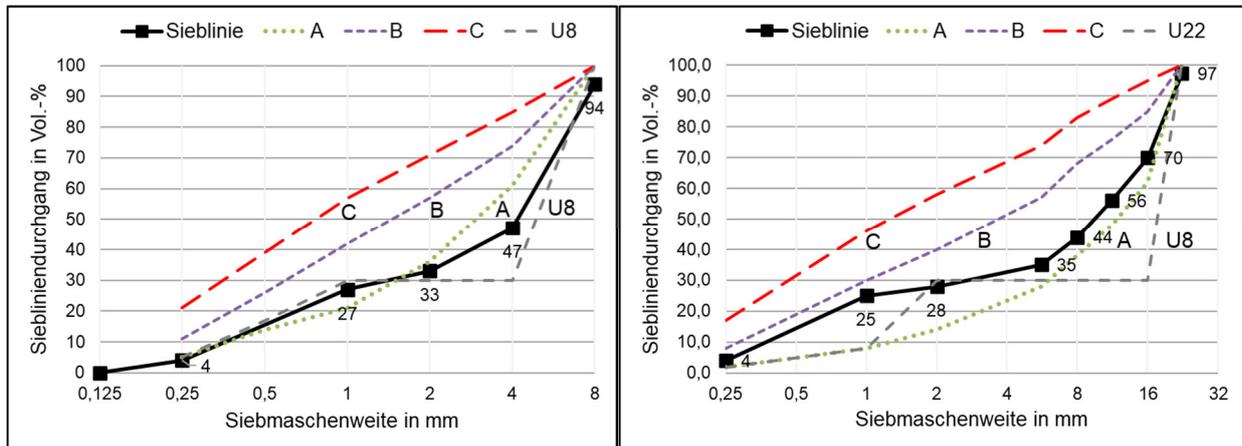


Bild 4-1: rechts: Sieblinie Grundrezeptur Oberbeton (D = 8 mm); links: Sieblinie Grundrezeptur Unterbeton (D = 22 mm)

## 4.3 Herstellung, Lagerung und Vorbereitung der Betonprobekörper

### 4.3.1 Allgemeines

Vor der Herstellung jeder Mischung wurden die feine und grobe Gesteinskörnung ofengetrocknet. Somit erfolgte die Normierung der Eigenfeuchte der Gesteinskörnung. Die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung wurde bei der Mischungsberechnung für die Wasserzugabe berücksichtigt. Für die Betonherstellung wurde ein Intensivmischer mit Sternwirbler mit einem maximal zugelassenen Fassungsvermögen von 100 l verwendet. Für die Untersuchungen zum Aufspannen der Versuchsmatrix in Arbeitsphase 2 wurde ein Konus-Labormischer mit einem maximal zugelassenen Fassungsvermögen von 30 l eingesetzt. Das Mischregime ist Tab. 4-6 zu entnehmen. Zur Herstellung der zylindrischen und würfelförmigen Probekörper wurde der Beton in zwei Lagen in die entsprechende Schalung gefüllt und jeweils auf dem Rütteltisch verdichtet.

Tab. 4-6: Mischregime

Vorgang	Zeitpunkt in [s]	Mischzeit in [s]
1	2	3
Vornässen der Gesteinskörnung mit erstem Drittel des Zugabewassers	0	120
Saugpause 8 min	120	0
Zugabe von Zement	600	30
Zugabe des Luftporenbildners verdünnt in zweitem Drittel des Zugabewassers bei laufendem Mischer	630	30
Zugabe des Fließmittels/Betonverflüssigers verdünnt in letztem Drittel des Zugabewassers bei laufendem Mischer	660	90

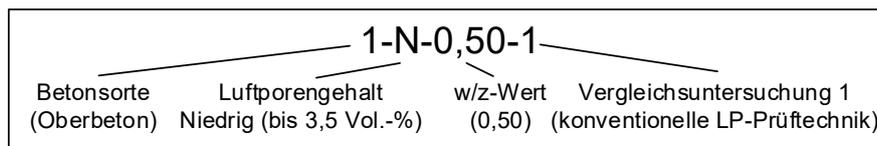


Bild 4-2: Zusammensetzung der Rezeptur-ID

Ab den ersten 10 min nach Mischende erfolgten die Frischbeton-Untersuchungen, d. h. die Ermittlung der Frischbeton-Rohdichte, der Frischbeton-Temperatur und der Konsistenz mittels Verdichtungsmaßmessung. Die Bestimmung des Frischbeton-Luftporengehaltes erfolgte ebenfalls ab 10 min nach Mischende. Eine zweite Frischbeton-Untersuchung aller genannten Parameter wurde ab 60 min nach Mischende durchgeführt.

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 vier Kenndaten und kennzeichnet eine konkrete, in diesem Forschungsvorhaben eingesetzte Rezeptur. Ein Beispiel für eine generierte Rezeptur-ID und deren Bedeutung ist in Bild 4-2 dargestellt. Die erste Ziffer vor dem Bindestrich steht für die Fahrbahndeckenbetonsorte (Prüfserie). Der Buchstabe an der zweiten Stelle steht für die Variation des Luftporengehaltes in der Rezeptur. Insgesamt wurden beim Frischbeton-Luftporengehalt drei stark voneinander zu unterscheidenden Variationen betrachtet. Die dritte Ziffer der Rezeptur-ID gibt die Variation des w/z-Wertes vor. Die letzte Ziffer gibt an, ob die Rezeptur beim Aufspannen der Versuchsmatrix (0), zur Vergleichsuntersuchung mit der konventionellen LP-Prüftechnik (1) oder zur Vergleichsuntersuchung mit der alternativen LP-Prüftechnik (2) angewendet wurde. Einen Überblick über die Untersuchungsvariationen der Vergleichsuntersuchungen und Zuweisung der zugehörigen Rezeptur-ID gibt Tab. 4-7.

Tab. 4-7: Überblick – Rezepturkennzeichnung der Vergleichsuntersuchungen (Rezeptur-ID)

Versuchsmatrix zu Vergleichsuntersuchungen mit national und international genormten bzw. alternativen LP-Prüfern. Mischungsbezeichnungen in Abhängigkeit vom eingestellten Luftporengehalt und w/z-Wert						
w/z-Wert	Niedrig: bis 3,5 Vol.-% [X-N-X-0]		Mittel: ab 3,5 Vol.-% bis 6,5 Vol.-% [X-M-X-0]		Hoch: ab 6,5 Vol.-% [X-H-X-0]	
1	2	3	4	5	6	7
[-]	Oberbeton [1-X-X-0]	Unterbeton [2-X-X-0]	Oberbeton [1-X-X-0]	Unterbeton [2-X-X-0]	Oberbeton [1-X-X-0]	Unterbeton [2-X-X-0]
0,40 [X-X-0,40-0]	1-N-0,40-0	2-N-0,40-0	1-M-0,40-0	2-M-0,40-0	1-H-0,40-0	2-H-0,40-0
0,45 [X-X-0,45-0]	1-N-0,45-0	2-N-0,45-0	1-M-0,45-0	2-M-0,45-0	1-H-0,45-0	2-H-0,45-0
0,50 [X-X-0,50-0]	1-N-0,50-0	2-N-0,50-0	1-M-0,50-0	2-M-0,50-0	1-H-0,50-0	2-H-0,50-0

### 4.3.2 Arbeitsphase 2

In Arbeitsphase 2 wurden die Untersuchungen zur Festlegung des Prüfregimes sowie Vorversuche zum Aufspannen der Versuchsmatrix durchgeführt. Hierbei wurden hauptsächlich die Frischbeton-Untersuchungen durchgeführt. Lediglich zur Festbetonrohddichte erfolgte die Herstellung eines Betonwürfels mit Kantenlänge von 15 cm je Mischung. Dieser wurde nach dem Ausschalen sechs Tage unter Wasser und anschließend 21 Tage bis zum Probenalter von 28 Tagen unter Normklima 20/65 gelagert.

### 4.3.3 Arbeitsphase 3

Aufgrund der hohen Anzahl der beteiligten LP-Prüfgeräte bei der gerätetechnischen Vergleichsuntersuchung waren zur Herstellung der erforderlichen Frischbetonmenge mindestens drei nacheinander folgende Betonmischvorgänge nötig. Nach dem ersten Mischvorgang erfolgte die Frischbeton-Untersuchung mit den ersten drei national genormten LP-Töpfen (5 Liter) und die Herstellung der Würfelprobekörper zur Druckfestigkeitsermittlung und Luftporenauszählung. Bei der zweiten Charge erfolgte die Untersuchung weiterer

LP-Töpfe mit einem 8-Liter-Fassungsvermögen und die Herstellung der Spaltzugprobekörper. Bei der dritten Charge erfolgten ausschließlich die Frischbeton-Untersuchungen mit übrigen national genormten LP-Prüfgeräten (5 und 8 Liter). Somit wurde eine gleichbleibende herzustellende Frischbetonmenge von 65 l je Betoniercharge gewährleistet. Bei der gerätetechnischen Untersuchung der alternativen Prüfmethode erfolgte bei den beiden Chargen eine gleiche Aufteilung des Frischbetons zur Ermittlung der Frischbetonkennwerte und Herstellung der gleichen Menge und Art der Festbetonprobekörper.

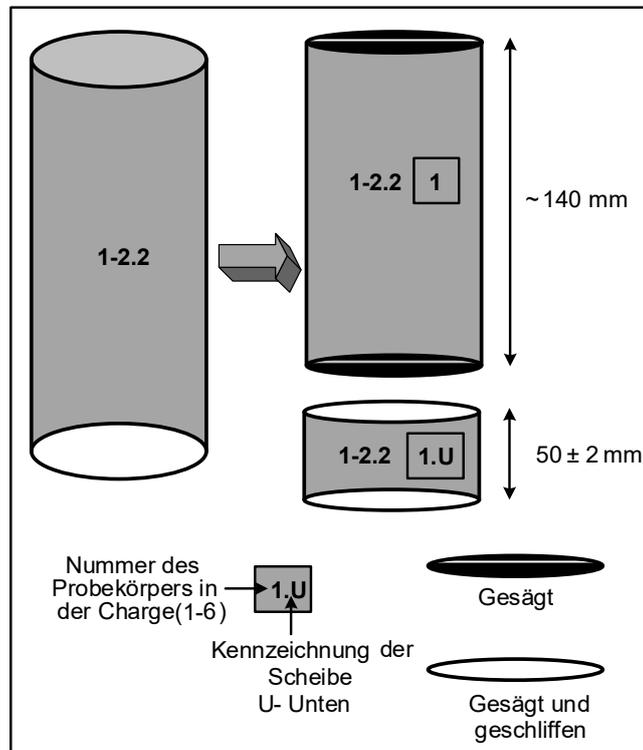


Bild 4-3: Spaltzugfestigkeitsprüfkörper - Schema der Aufbereitung

In Arbeitsphase 3 wurden pro Mischungszusammensetzung sechs Zylinder mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit und fünf Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 150 mm zur Bestimmung der Druckfestigkeit und der Luftporenkennwerte am Festbeton hergestellt. Die Zylinder wurden gemäß TP-B StB [N19] bis zum Prüfzeitpunkt unter Wasser gelagert. Die Würfel wurden 6 Tage nach dem Ausschalen unter Wasser und anschließend unter Normklima 20/65 bis zur Prüfung gelagert.

Beim Probenalter der Zylinder von 7 Tagen wurden die Prüfkörper für die Spaltzuguntersuchung vorbereitet. Dazu wurden die hergestellten Zylinderprobekörper gesägt und geschliffen, um die gewünschten Zylinderscheiben zu erhalten. Bild 4-3 stellt schematisch die Prozedur der Aufbereitung und Kennzeichnung der Probekörper bzw. Prüfkörper dar. Somit wurde je Zylinder ein Sägeschnitt vorgenommen, wobei eine Unterscheibe hergestellt wurde. Anschließend erfolgte, abweichend von den Anforderungen ( $50 \pm 5$  mm) der TP B-StB [N20], das Schleifen der Kreisflächen der unteren Zylinderscheibe auf das gewünschte Maß der Zylinderscheibenhöhe von  $50 \pm 2$  mm. Die Flächen des Oberstückes wurden nicht geschliffen. Die Prüfkörper erhielten eine entsprechende Kennzeichnung, welche das spätere Sortieren bei der Zusammenstellung der Prüfkörpercharge für die jeweilige Prüfung erleichterte. Anschließend wurden die einzelnen Prüfkörper in die Wasserbecken sortiert und bis zum Prüfzeitraum gelagert.

Zwei Würfel wurden zur Ermittlung der Luftporenkennwerte im Alter von sieben Tagen nach [N23] bzw. [N6] weiterverarbeitet. Aus der Würfelmittle 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.

## 5 Untersuchungsmethoden

### 5.1 Frischbetonprüfungen

#### Allgemeines

Die Ermittlung des Luftporengehaltes erfolgte ab 10 min und nach 60 min nach Mischende am Frischbeton. Als Prüfmethode wurde das Druckausgleichsverfahren und Wassersäulenverfahren an 5- und 8-Liter LP-Töpfen, an dem HYDRO\_5-Topf nach DIN EN 12350-7 [N15], sowie an HYDRO\_5-Würfel angewendet. Des Weiteren kam alternative bzw. internationale Prüftechnik zur Luftporenbestimmung am Frischbeton zum Einsatz.

Die Frischbeton-Rohdichte wurde nach DIN EN 12350-6 [N14] im Zuge der LP-Gehaltsprüfung erfasst und erfolgte somit auch ab 10 min und nach 60 min nach Mischende.

Die Konsistenz wurde parallel mittels Verdichtungsmaß bei steifen Betonen entsprechend DIN EN 12350-4 [N12] bzw. mittels Ausbreitmaß bei weichen Betonen nach DIN 12350-5 [N13] innerhalb der ersten 10 min nach Mischende bestimmt.

Die Frischbeton-Temperatur wurde innerhalb der ersten 10 min und nach 60 min nach Mischende gemessen.

Mittels des HYDRO\_5\_T\_6L und eines vom gleichen Hersteller mitentwickelten Porosimeters bestand die Möglichkeit, eine Messung der Luftporenkennwerte wie:

- Gesamtporenanteil im Frischbeton
- Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$
- Anzahl der gemessenen Luftporen N
- Porenverteilung

durchzuführen.

### 5.2 Druckfestigkeitsermittlung

Die Druckfestigkeit aller Betone der Arbeitsphase 3 wurde im Alter von 28 Tagen jeweils an drei Würfeln mit 150 mm Kantenlänge gemäß DIN EN 12390-3 [N16] an einer servo-hydraulischen Universalprüfmaschine mit einem maximalen Lastbereich bis 3000 kN ermittelt.

### 5.3 Spaltzugfestigkeitsermittlung

Die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit erfolgte gemäß TP B-StB Teil 3.1.05 [N20]. Für die Untersuchung wurde eine 300 kN-Druck-Biegeprüfmaschine vom Typ DB-300-S der Kalibrierungsklasse 1 und eine Prüfvorrichtung nach den Anforderungen der TP B-StB Teil 3.1.05 [N20] eingesetzt. Die Maschine lässt sich sensitiv regeln, sodass eine Vorbelastung von 0,4 kN auf den Prüfkörper sicher und konstant aufgebracht werden kann.

In der Arbeitsphase 3 erfolgte die Spaltzugprüfung an sechs Unterscheiben der jeweiligen Betonrezeptur, welche bis zum Prüfalter von 28 Tagen unter Wasser gelagert wurden.

## 5.4 Ermittlung der Luftporenkennwerte am Festbeton

Die Ermittlung der Luftporenkennwerte am Festbeton erfolgte anhand zweier Prüfkörper je Rezeptur in der Arbeitsphase 3. Der Ablauf der Probenvorbereitung und die Versuchsdurchführung erfolgte nach [N6] bzw. TP B-StB 3.1.08 [N20]. 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 Gesamtstrecke von mindestens 2.400 mm zusammengefasst. Bei der Auswertung wurden folgende Kennwerte festgehalten:

- Gesamtporenanteil im Festbeton
- Abstandsfaktor L
- Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$
- Anzahl der gemessenen Luftporen N
- Porenverteilung

Bei den ausgewählten Betonrezepturen erfolgte die Ermittlung der Luftporenkennwerte an denselben Prüfkörpern zu Kontrollzwecken bei einem weiteren Labor.

## 6 Untersuchungsergebnisse der Versuche zur Bestimmung des Prüfregimes

### 6.1 Allgemeines

In der Arbeitsphase 2 wurde das Prüfregime des Frischbeton-Luftporengehaltes an einer Grundrezeptur (Oberbeton D = 8 mm) variiert. Hierbei wurden insgesamt sieben Variationsarten betrachtet. Die Variationsparameter können Tab. 3-4 entnommen werden. Insgesamt wurde die Grundrezeptur 29-mal im Intensivmischer hergestellt und anschließend die Frischbetonkennwerte zu zwei festgelegten Zeitpunkten bestimmt. Die Frischbetonmenge je Betonmischung wurde auf 65 l dimensioniert. Als Frischbetonkennwerte wurden die Frischbeton-Temperatur ( $t > 10$  und  $t > 60$  min), die Frischbeton-Rohdichte ( $t > 10$  und  $t > 60$  min), das Verdichtungsmaß ( $t > 10$ ) und der LP-Gehalt ( $t > 10$  und  $t > 60$  min) nach der Zementzugabe bestimmt.

Die gewonnenen und ausgewerteten Ergebnisse der ausgewählten Frischbetonkennwerte sind in Form von Diagrammen, zugehörigen Erläuterungstexten und in tabellarischer Form nachfolgend ausführlich zusammengefasst. Zuerst werden zur Übersicht die Gesamtergebnisse der Untersuchungen in mehreren Diagrammen dargestellt und kommentiert. Anschließend erfolgen die Auswertungen der Ergebnisse je Variationsparameter in Abhängigkeit von den jeweiligen zu untersuchenden Variationsparametern in der folgenden Reihenfolge:

- Probenzustand (unverdichtet bzw. vorverdichtet)
- Verdichtungsart (Rütteltisch bzw. Innenrüttler)
- Anzahl der Verdichtungslagen (2, 3 und 4 Lagen)
- Verdichtungsintensität (3000 U/min, 4500 U/min und 6000 U/min)
- Verdichtungsdauer (30 s, 45 s und 60 s)
- Einfüllprozess des Wassers in LP-Topf (langsam und kontrolliert bzw. unkontrolliert)
- Frischbeton-Temperatur (10 °C, 20 °C, 30 °C und 40 °C)

Je Variation erfolgten mindestens zwei Betonagen. Bei Betonagen, deren Referenzrohdsichten beider Chargen, ermittelt in Stahlwürfelschalungen, stark untereinander abwichen, wurde eine dritte Ergänzungsbetonage durchgeführt. Bei den gewonnenen Ergebnissen konnten sowohl der Einfluss des Prüfregimes auf die Luftporenbildung im Frischbeton als auch erste Erkenntnisse über den Einfluss auf die Messwertbildung der Prüfgeräte gesammelt werden. Die erforderlichen rechnerischen Grundlagen zur Auswertung der Ergebnisse sind Kapitel 6.2 zu entnehmen.

### 6.2 Rechnerische Grundlagen

#### 6.2.1 Frischbeton-Rohdichte – Ist- und Soll-Werte

Die Ist- und Soll-Werte des Frischbetons dienen zur Ermittlung des Einflusses des Prüfregimes auf die Luftporenbildung und die Messwertbildung des Luftporengehaltes im Frischbeton.

Die Berechnung der Ist- Frischbeton-Rohdsichten bei diversen Luftporenprüfgeräten erfolgte in Anlehnung an DIN EN 12350-6 [N14] im Zuge der LP-Gehaltsprüfung. Bei den konventionellen und alternativen LP-Töpfen wurde bei diesen Untersuchungen der jeweilige LP-Topf als Pycnometer zur exakten Rohdichtebestimmung verwendet. Dazu musste das LP-Prüfgerät in vier verschiedenen Füllzuständen gewogen werden, um alle Massen und Volumina zu erfassen. Dazu gehören zunächst das Leergewicht des kompletten Gerätes ( $M_1$ ) und zur Volumenbestimmung des Prüfgerätes ( $M_2 - M_1$ ) die Masse des vollständig mit Wasser gefüllten LP-Prüfgerätes ( $M_2$ ) im zusammengebauten Zustand. Eine weitere Wiegung ( $M_3$ ) zur Ermittlung

des eingefüllten Frischbetongewichts ( $M_3 - M_1$ ) wurde nach dem Befüllen und Verdichten der Frischbetonprobe bis zum Behälterrand und der anschließenden Positionierung des Deckels des jeweiligen LP-Prüfgerätes durchgeführt. Vor der vierten Wiegung wurde noch das Volumen zwischen der Frischbetonoberfläche und der Deckelinnenwandung des Prüfbehälters im geschlossenen System mit Wasser gefüllt und die Masse ( $M_4$ ) bestimmt, um zur genauen Berechnung des Frischbetonvolumens das Wasservolumen des Zwischenraumes ( $M_4 - M_3$ ) abziehen zu können. Somit ergibt sich die Formel zur Ermittlung des Ist-Wertes der Frischbeton-Rohdichte wie folgt:

$$\rho_{ist} = \frac{(M_3 - M_1)}{((M_2 - M_1) - (M_4 - M_3))} \quad (\text{Gl. 6.1})$$

mit

$\rho_{ist}$ :	gemessener Ist- Wert der Frischbeton-Rohdichte der untersuchten Frischbetonprobe	[kg/m <sup>3</sup> ]
$M_1$ :	Masse des leeren LP-Prüfgerätes	[g]
$M_2$ :	Masse des LP-Prüfgerätes, das vollständig mit Wasser gefüllt ist	[g]
$M_3$ :	Masse des LP-Prüfgerätes mit der abgestrichenen Frischbetonprobe und Restluft in dem Prüfbehälter	[g]
$M_4$ :	Masse des LP-Prüfgerätes mit der abgestrichenen Frischbetonprobe und Wasser in dem Prüfbehälter	[g]

Die Ermittlung des rechnerischen Soll-Wertes der Frischbeton-Rohdichte erfolgt durch Addition der einzelnen Massenanteile der Ausgangsstoffe gemäß der Stoffraumrechnung für 1 m<sup>3</sup> Beton unter Berücksichtigung des gemessenen Ist-Wertes des Frischbeton-Luftporengehaltes, vgl. Gl. 6.2

$$\rho_{soll} = \frac{(M_{Zement} + M_{Gestein} + M_{Wasser}) [kg]}{1 [m^3]} \quad (\text{Gl. 6.2})$$

mit

$\rho_{soll}$ :	rechnerischer Soll-Wert der Frischbeton-Rohdichte unter Berücksichtigung des gemessenen Luftporengehaltes mittels des jeweiligen LP-Prüfgerätes	[kg/m <sup>3</sup> ]
$M_x$ :	Masse des jeweiligen Bestandteils des Frischbetons	[kg]
$1 [m^3] = V_{Zement} + V_{Gestein} + V_{Wasser} + A_{c,ist} * 10$		
$A_{c,ist}$ :	gemessener Ist-Wert des Frischbeton-Luftporengehaltes	[Vol.-%]
$V_x$ :	Volumen des jeweiligen Bestandteiles des Frischbetons	[m <sup>3</sup> ]

Die Differenz zwischen dem rechnerischen Soll- und gemessenen Ist-Wert der Frischbeton-Rohdichte wurde in der Ergebnisauswertung als Messwert des Einflusses des gewählten Prüfregimes auf die Messwertgüte der LP-Prüfgeräte verwendet. Ermittelte Ist- und rechnerische Soll-Werte der Frischbeton-Rohdichte sowie deren Differenz können dem Anhang Tab. I - 10 bis Tab I - 13 entnommen werden.

## 6.2.2 Frischbeton-Luftporengehalt – Ist- und Soll-Werte

### Konventionelle Luftgehaltsprüfer (LP-Topf)

Die Ermittlung der Ist-Werte der Frischbeton-Luftporengehalte mittels konventioneller LP-Töpfe erfolgte ab 10 min und nach 60 min nach Mischende am Frischbeton nach DIN EN 12350-7 [N15] bzw.

ASTM C231 Typ B [N2] mithilfe des Druckausgleichsverfahrens, vgl. Kapitel 2.3.3. Gesucht ist das unbekannte Luftporenvolumen ( $V_2$ ) im Beton im luftdicht verschlossenen Druckbehälter. Der Deckel enthält eine Druckkammer mit bekanntem Luftvolumen ( $V_1$ ) unter bekannt eingeleitetem Druck ( $p_1$ ) und angeschlossenem Manometer. Das Manometer misst den resultierenden Druck (Ausgleichsdruck) ( $p_2$ ) nach dem Öffnen des Zwischenventils zwischen der Druckkammer und dem Druckbehälter bezogen auf das Gesamtvolumen der Luftporen ( $V_2$ ) im Beton und das Luftvolumen der Druckkammer ( $V_1$ ). Die Ableseskala des Manometers ist auf den prozentualen LP-Gehalt der Betonprobe kalibriert. Der Zwischenraum zwischen der Betonoberfläche und dem Behälterdeckel wird mit Wasser gefüllt. Über den sich nun einstellenden Druck ( $p_2$ ) kann der Frischbeton-Luftporengehalt nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte bestimmt werden. Das Gesetz besagt, dass bei isothermen Zustandsänderungen das Volumen ( $V$ ) einer eingeschlossenen Gasmenge umgekehrt proportional zum Druck ( $p$ ) ist, und somit das Produkt  $p \cdot V = \text{konstant}$  bleibt. Es gilt:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot (V_1 + V_2) \quad (\text{Gl. 6.3})$$

nach Öffnung des Zwischenventils stellt sich der resultierende Druck  $p_2$  ein:

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{V_1}{(V_1 + V_2)} \quad (\text{Gl. 6.4})$$

und der Luftporengehalt im Beton  $V_2$ :

$$V_2 = (p_1 - p_2) \cdot \frac{V_1}{p_2} \quad (\text{Gl. 6.5})$$

Die Messung der Luftporenwerte erfolgte 5-mal in definierten Zeitabständen (s. Tab. 3-4) durch das Betätigen des Prüfknopfes und durch die Übergabe des Prüfdruckes aus der Druckkammer in den Prüfbehälter des jeweiligen LP-Topfes. In einem weiteren LP-Topf (LP\_A\_5L\_2) wurde ebenfalls die messwertbildende Betätigung sofort und anschließend in den genannten Zeitabständen durchgeführt. Die Betonprobe wurde jedoch zwischen den Zeitintervallen drucklos gesetzt. Somit wurde der Einfluss der Wiederholmessungen am identischen Probenmaterial und deren Einfluss auf die Messgüte untersucht.

### **HYDRO\_5-Prüfgeräte**

Die Ermittlung der Ist-Werte der Frischbeton-Luftporengehalte mit HYDRO\_5-Prüfgeräten verläuft in Anlehnung an das Wassersäulenverfahren der DIN EN 12350-7 [N15] bzw. ASTM C231 Typ A [N2]. Hierbei wird der LP-Gehalt über eine unter einem Überdruck von 2 bar eingepresste Wassermenge ermittelt. Die Rückrechnung des Luftporengehaltes in der Frischbetonprobe erfolgt aus mehreren Kontrollwiegungen der Prüfgeräte nach definiertem Prüfablauf. Wie bei den konventionellen LP-Töpfen wird der Frischbeton in dem zugehörigen Prüfbehälter des HYDRO\_5-Gerätes nach einem festgelegten Prüfregime gefüllt und verdichtet. Anschließend erfolgt die erste Wiegung des kompletten Gerätes mit der Frischbetonprobe ( $G_1$ ). Im Anschluss werden die restlichen Freiräume des Prüfbehälters über das Einlassventil mit Wasser aufgefüllt und gleichzeitig durch vorsichtiges Schwenken soweit wie möglich entlüftet. Danach erfolgt die zweite Wiegung ( $G_2$ ). Im nächsten Schritt wird ein Wasserüberdruck von 2 bar in dem Prüfbehälter kontinuierlich aufgebaut und die Frischbetonprobe unabhängig von der eingestellten Konsistenz für 10 min unter möglichst konstantem Druck gehalten. Nach definierten Zeitabständen innerhalb der 10 min wird der Wasserdruckstand in dem Prüfbehälter kontrolliert und bei Bedarf auf den Soll-Wert von 2 bar nachgeregelt. Bei weicheren Frischbetonen wird der konstante Druck von 2 bar schneller erreicht als bei den Frischbetonen mit steifer Konsistenz. Um den Prüfablauf jedoch vergleichbar bzw. konstant zu halten, erfolgt die dritte Wiegung ( $G_3$ ) des Gerätes unabhängig von der Konsistenz exakt nach Ablauf von 10 min, wobei die Frischbetonprobe weiterhin dem Wasserdruck von 2 bar ausgesetzt ist. Anhand der oben beschriebenen Messungen der Masse des Prüfgerätes in verschiedenen Prüfzuständen kann mithilfe des Gesetzes von Boyle-Mariotte [7] die Berechnung des Luftporengehaltes durchgeführt werden.

Wird das Gesetz von Boyle-Mariotte (Gl. 6.3) in der vorliegenden Fragestellung angewendet und entsprechend umgestellt, kann der Luftporengehalt in der Frischbetonprobe durch folgende Beziehung abgeleitet werden:

$$V_{Luft} = M_{\Delta Wasser} + \left( \frac{M_{\Delta Wasser}}{p_2 - p_1} \right) \quad (\text{Gl. 6.6})$$

mit

$$V_{\Delta Wasser} = M_{\Delta Wasser}$$

$V_{Luft}$ : Luftporengehalt in der Frischbetonprobe [dm<sup>3</sup>]

$M_{\Delta Wasser}$ : eingepresste Wassermenge in den Prüfbehälter unter Wasserprüfdruck [g]

$p_2 - p_1 = p_{prüf}$ : der angesetzte Prüfwasserüberdruck [bar]

Somit entspricht die 1,5-fache Wassermenge, welche unter einem Wasserüberdruck von 2 bar in den Prüfbehälter eingedrückt wird, dem Luftporenvolumen in der Betonprobe unter Normaldruck. Für die abschließende Berechnung des Ist-Luftporengehaltes in der geprüften Frischbetonprobe wird das berechnete Luftporenvolumen ins Verhältnis zu dem Volumen der Betonprobe in dem Prüfbehälter gesetzt, vgl. Gl. 6.7.

$$A_{c,ist} = (G_3 - G_2 - G_{kor}) + \left( \frac{G_3 - G_2 - G_{kor}}{p_{prüf}} * \frac{100}{V_{HY5} - (G_2 - G_1)} \right) \quad (\text{Gl. 6.7})$$

mit

$A_{c,ist}$ : gemessener Ist-Wert des Frischbeton-Luftporengehaltes [Vol.-%]

$G_3 - G_2$ : Gewicht des durch Überdruck eingepresstes zusätzliches Wasser in den Prüfbehälter [g]

$G_{kor}$ : Korrekturwert der Deformierung des Prüfbehälters unter Druck [ml]

$p_{prüf}$ : der angesetzte Prüfwasserüberdruck [bar]

$V_{HY5}$ : zur Verfügung stehendes Gesamtvolumen in dem eingeschlossenen Prüfbehälter [ml]

$G_2 - G_1$ : Volumen des Zugabewassers drucklos (Normaldruck) in dem Prüfbehälter [ml]

Der rechnerische Soll-Wert des Frischbeton-Luftporengehaltes wurde mit Hilfe der Ist- und rechnerischen Soll-Werte der Frischbeton-Rohdichte nach Gl. 6.8 berechnet:

$$A_{c,soll} = A_{c,ist} + \left( 100 * \left( \frac{\rho_{soll}}{\rho_{ist}} \right) - 100 \right) \quad (\text{Gl. 6.8})$$

mit

$A_{c,soll}$ : rechnerischer Soll-Wert des Frischbeton-Luftporengehaltes [Vol.-%]

$A_{c,ist}$ : gemessener Ist-Wert des Frischbeton-Luftporengehaltes [Vol.-%]

$\rho_{soll}$ : berechneter Soll-Wert der Frischbeton-Rohdichte [kg/dm<sup>3</sup>]

$\rho_{ist}$ : gemessener Ist-Wert der Frischbeton-Rohdichte der untersuchten Frischbetonprobe [kg/dm<sup>3</sup>]

Die Differenz zwischen dem rechnerischen Soll- und dem gemessenen Ist-Wert des Frischbeton-Luftporengehaltes wurde in der Ergebnisdarstellung zur Bewertung des Einflusses des jeweiligen Prüfregimes auf die Messwertgüte des angewendeten LP-Prüfgerätes herangezogen.

Die ermittelten Ist-Werte der Frischbeton-Luftporengehalte, sortiert nach der Prüfregime-Variation und dem jeweils eingesetzten Prüfgerät, sind den Tab. I - 14 bis Tab I - 17 des Anhangs zu entnehmen.

Die ermittelte Differenz des Frischbeton-Luftporengehaltes zwischen den gemessenen Ist- und rechnerischen Soll-Werten, sortiert nach der Prüfregime-Variation und dem eingesetzten Prüfgerät, kann dem Anhang Tab. I - 18 bis Tab. I - 21 entnommen werden.

### 6.2.3 Rechnerischer Wassergehalt – Ist- und Soll-Werte

Als weiterer Indikator der Messqualität sowie zur Feststellung des Einflusses des Prüfregimes auf die Messwertbildung kann der rechnerische Wassergehalt herangezogen werden. Im Folgenden wird der Berechnungsansatz aus der Stoffraumrechnung für den Ist-Wert des rechnerischen Wassergehaltes zum Zeitpunkt der Frischbetonluftporenmessung dargestellt.

$$\Delta WG_{Ist} = \frac{(\rho_{Ist} * (V_{Fest} + A_{c,Ist}) - M_{Fest})}{(1 - \rho_{Ist})} \quad (\text{Gl. 6.9})$$

mit

$\Delta WG_{Ist}$ :	gemessener Ist-Wert des rechnerischen Wassergehaltes	[l/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{Ist}$ :	gemessener Ist-Wert der Frischbeton-Rohdichte der untersuchten Frischbetonprobe	[kg/dm <sup>3</sup> ]
$V_{Fest}$ :	Volumen aller Feststoffanteile des Frischbetons	[dm <sup>3</sup> ]
$A_{c,Ist}$ :	gemessener Ist-Wert des Frischbeton-Luftporengehaltes	[dm <sup>3</sup> ]
$M_{Fest}$ :	Masse aller Feststoffanteile des Frischbetons	[kg]

Der rechnerische Soll-Wert kann aus der Stoffraumrechnung abgeleitet werden, indem alle im Frischbetongemisch zugegebene Flüssigkeiten aufsummiert werden.

$$\Delta WG_{Soll} = M_{Zugabewasser} + M_{Sättigung} + M_{Zusatzmittel} \quad (\text{Gl. 6.10})$$

mit

$\Delta WG_{Soll}$ :	rechnerischer Soll-Wert des rechnerischen Wassergehaltes	[l/m <sup>3</sup> ]
$M_{Zugabewasser}$ :	Masse des Zugabewassers zur Hydratation	[kg]
$M_{Sättigung}$ :	Masse des Zugabewassers zur Sättigung der Gesteinskörnung	[kg]
$M_{Zusatzmittel}$ :	Masse der zugegebenen Zusatzmittel	[kg]

Die Differenz zwischen dem rechnerischen Soll- und dem gemessenen Ist-Wert des rechnerischen Wassergehaltes kann zur Bewertung des Einflusses des jeweiligen Prüfregimes auf die Messwertgüte der LP-Prüfgeräte herangezogen werden.

Die auf oben beschriebener Berechnungsgrundlage ermittelten Ergebnisse in der Voruntersuchung zum Prüfregime sind dem Anhang Tab. I – 22 bis Tab. I – 25 zu entnehmen.

### 6.2.4 Rechenabfolge am Beispiel der Versuchsreihe 0-0.0 zum ersten Prüfzeitpunkt von t > 10 min

Um den Berechnungsprozess zur Ermittlung der Ergebnisse bei Verwendung der HYDRO\_5-Prüftechnik zu veranschaulichen, wird eine Beispielrechnung für die Bestimmung der Ist- und Soll-Werte der Rohdichte des Frischbetons, des Luftporengehaltes sowie des berechneten Wassergehaltes durchgeführt. Die Berechnung erfolgt anhand der Ergebnisse des HYDRO\_5\_T\_6L. Die Berechnungsschritte und Abläufe für die HYDRO\_5\_W\_3,4L sind analog zu den hier vorgestellten Berechnungsschritten vorzunehmen.

## Kalibrierung

Für die Durchführung der Frischbeton-Kennwertermittlung mit dem HYDRO\_5\_T\_6L ist zunächst eine Kalibrierung der Prüftechnik erforderlich. Dabei werden drei Konstanten ermittelt, die für die folgenden Kennwert-Bestimmungen benötigt werden:

- das Leergewicht der Prüftechnik
- das Volumen des Prüfbehälters
- der Korrekturwert für die Ausdehnung des Prüfbehälters unter einem Prüfdruck von 2 bar

Zunächst wird der HYDRO\_5\_T\_6L komplett montiert, einschließlich der Spannvorrichtung, des Edelstahltopfes, des Deckels und des Manometers. Die Masse wird durch gleichzeitiges Wiegen aller Komponenten ermittelt ( $M_1$ ).

Anschließend wird die Prüftechnik vollständig mit Wasser gefüllt, ohne dass Luftporen in das Medium gelangen. Hierzu wird der Deckel des Topfes entfernt und der Edelstahltopf vorsichtig etwa bis unter den Rand mit Leitungswasser gefüllt. Danach wird der Deckel aufgesetzt und verschraubt. Das Einfüllventil wird geöffnet, und Wasser wird eingefüllt, bis aus dem Auslaufventil ein luftblasenfreier Wasserstrahl austritt. Dann wird das Auslaufventil geschlossen und überschüssiges Wasser aus dem geschlossenen Einfüllventil entfernt. Die Prüftechnik wird erneut gewogen ( $M_2$ ).

Im letzten Schritt wird die Prüftechnik mithilfe der Handpumpe unter Druck gesetzt. Die Handpumpe wird an das Auslaufventil angeschlossen, und das Ventil wird geöffnet. Durch gleichmäßiges Pumpen mit der Handpumpe wird der Topf mit Wasser auf einen Druck von 2 bar gebracht. Dann wird das Auslaufventil geschlossen und eine Stoppuhr wird gestartet. Der Druck wird 10 Minuten lang aufrechterhalten, wobei der Druck bei Bedarf mit der Handpumpe nachgeregelt wird. Nach Ablauf der Wartezeit sollte sich der Druck stabilisiert haben. Die Handpumpe wird dann entkoppelt, und der Topf wird gewogen ( $M_3$ ).

Tab. 6-1: Ergebnisse der Kalibrierung des HYDRO\_5\_T\_6L vor den Voruntersuchungen zum Prüfregime

Kalibrieren des HYDRO_5_T_6L					
Erläuterung	Rechenschritte	Prüfung 1	Prüfung 2	Prüfung 3	Mittelwert
[-]	[-]	[g bzw. cm <sup>3</sup> ]			
1	2	3	4	5	6
Leergewicht (Prüfbehälter + Prüfaufsatz)	$M_1 = M_{HY5}$	9375	9374	9375	9375
Wasser gefüllt - drucklos	$M_2$	15754	15750	15753	15752
Wasser gefüllt - unter Druck von 2 bar	$M_3$	15790	15787	15793	15790
Dehnung der Prüftechnik	$M_3 - M_2 = G_{kor}$	36	37	40	38
Prüfvolumen (Prüfbehälter + Prüfaufsatz)	$M_2 - M_1 = V_{HY5}$	6379	6376	6378	6378

Der Kalibrierungsvorgang wird dreimal wiederholt. Anschließend werden die Ergebnisse der Wiegen verwendet, um den Mittelwert der ermittelten Konstanten zu bilden. Tab. 6-1 zeigt die Ergebnisse der Wiegen für die drei Kalibrierungsprüfungen. Die drei Konstanten, die aus dem Mittelwert der einzelnen Prüfungen ermittelt wurden, sind grün hervorgehoben. Die Dehnung des Prüfbehälters ergibt sich aus der Differenz der Wiegeergebnisse von  $W_3$  und  $W_2$  und das Volumen aus der Differenz der Wiegeergebnisse von  $W_2$  und  $W_1$ . Somit beträgt das Leergewicht ( $M_{HY5}$ ) der Prüftechnik 9375 g, die Dehnung ( $G_{kor}$ ) des Prüfbehälters 38 cm<sup>3</sup> und das Volumen ( $V_{HY5}$ ) des Prüfbehälters 6378 cm<sup>3</sup>.

## Ermittlung der Ist-FB-Kennwerte

Die Ermittlung der Ist-FB-Kennwerte erfordert neben den Konstanten der verwendeten Prüftechnik, die sich aus der Kalibrierung ergeben, zwei weitere Konstante aus der Stoffraumrechnung der verwendeten Rezeptur: das Volumen der Feststoffe und deren Masse. Diese ergeben sich aus zwei Rechnungen wie folgt:

$$M_{Fest} = 420 (Z) + 505 (GK 0/2) + 497 (GK 2/5) + 655 (GK 5/8) = 2077 \text{ kg} \quad (\text{Gl. 6.11})$$

$$V_{Fest} = 132,3 (Z) + 189,2 (GK 0/2) + 187,5 (GK 2/5) + 248,5 (GK 5/8) = 757,5 \text{ l} \quad (\text{Gl. 6.12})$$

Bei den Laborversuchen zum ersten Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min mit der HYDRO\_5\_T\_6L wurden drei Wie- gungen mit dem verdichteten Frischbeton durchgeführt:

$$G_1 - \text{HYDRO}_5\_T\_6L \text{ mit verdichteter FB-Probe befüllt} = 22219 \text{ g}$$

$$G_2 - \text{HYDRO}_5\_T\_6L \text{ mit verdichteter FB-Probe und Wasser ohne Druck befüllt} = 22881 \text{ g}$$

$$G_3 - \text{HYDRO}_5\_T\_6L \text{ mit verdichteter FB-Probe und Wasser unter 2 bar Druck befüllt} = 23152 \text{ g}$$

Des Weiteren wird das Volumen und die Masse der Frischbetonprobe im Prüfbehälter ermittelt. Um die FB- Probenmasse ( $B_M$ ) zu bestimmen, wird von der Masse der Prüftechnik inklusive Probe ( $G_1$ ) das Leerge- wicht ( $M_{HY5}$ ) der Prüftechnik abgezogen:

$$B_M = G_1 - M_{HY5} = 22219 - 9375 = 12844 \text{ g} \quad (\text{Gl. 6.13})$$

Um das FB-Proben-Volumen ( $B_V$ ) zu ermitteln, wird von dem ausgeliterten Volumen der Prüftechnik ( $V_{HY5}$ ) die Differenz der Masse der Prüftechnik inklusive Probe ( $G_1$ ) und der Masse der Prüftechnik inklusive Probe und Wasser ohne Druck ( $G_2$ ) abgezogen:

$$B_V = V_{HY5} - (G_1 - G_2) = 6378 - (22881 - 22219) = 5716 \text{ cm}^3 \quad (\text{Gl. 6.14})$$

Mit diesen Ergebnissen wird die exakte Ist-FB-Rohdichte ( $\rho_{ist}$ ) in Anlehnung an Gl. 6.1 wie folgt ermittelt. Die FB-Probenmasse ( $B_M$ ) wird ins Verhältnis zu ihrem FB-Proben-Volumen ( $B_V$ ) gesetzt:

$$\rho_{ist} = \frac{B_M}{B_V} = \frac{12844}{5716} = 2,247 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \text{ bzw. } \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \quad (\text{Gl. 6.15})$$

Um den Ist-FB-Luftporengehalt gemäß Gl. 6.7 zu berechnen, werden die drei folgenden Rechenschritte durchgeführt. Zuerst wird das unter Druck eingepresste Wasser ( $M_{\Delta Wasser}$ ) in ml unter Berücksichtigung der Dehnung des Prüfbehälters ( $G_{kor}$ ) ermittelt:

$$M_{\Delta Wasser} = G_3 - G_2 - G_{kor} = 23152 - 22881 - 38 = 233 \text{ ml} \quad (\text{Gl. 6.16})$$

Anhand von Gl. 6 wird das Volumen des Frischbeton-Luftporengehalts ( $V_{Luft}$ ) ermittelt:

$$V_{Luft} = M_{\Delta Wasser} + \left( \frac{M_{\Delta Wasser}}{p_{prüf}} \right) = 233 + \left( \frac{233}{2} \right) = 350 \text{ ml} \quad (\text{Gl. 6.17})$$

Abschließend wird der Ist-FB-Luftporengehalt ( $A_{c,ist}$ ) der geprüften FB-Probe bestimmt:

$$A_{c,ist} = V_{Luft} * \frac{100}{B_V} = 350 * \frac{100}{5716} = 6,11 \text{ Vol. -\%} \quad (\text{Gl. 6.18})$$

Als letzter Ist-FB-Kennwert wird der rechnerische Wassergehalt ( $\Delta WG_{ist}$ ) gemäß Gl. 6.9 ermittelt:

$$\Delta WG_{ist} = \frac{(\rho_{ist} * (V_{Fest} + A_{c,ist} * 10) - M_{Fest})}{(1 - \rho_{ist})} = \frac{(2,247 * (757,5 + 6,1 * 10) - 2077)}{(1 - 2,247)} = 191 \frac{\text{l}}{\text{m}^3} \quad (\text{Gl. 6.19})$$

### Ermittlung der Soll-FB-Kennwerte sowie der Messwertabweichungen

Die Bestimmung der Soll-Werte der Rohdichte, des Luftporengehaltes und des rechnerischen Wasserge- halts erfolgt unter Verwendung der oben beschriebenen Gleichungen (Gl. 6.2, Gl. 6.8 und Gl. 6.10).

Die Soll-FB-Rohdichte wird demnach für das vorgestellte Beispiel wie folgt ermittelt (siehe Gl. 6.2):

$$\rho_{soll} = \frac{(M_{Zement} + M_{Gestein} + M_{Wasser})}{V_{Zement} + V_{Gestein} + V_{Wasser} + A_{c,ist} * 10} = \frac{420 + 1657 + 193}{132,28 + 625,17 + 193 + 6,11 * 10} = 2,245 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \quad (\text{Gl. 6.20})$$

Der Soll-FB-Luftporengehalt wird aus dem Verhältnis der Ist- und Soll-FB-Rohdichten wie folgt bestimmt (siehe Gl. 6.8):

$$A_{c,soll} = A_{c,ist} + \left(100 * \left(\frac{\rho_{soll}}{\rho_{ist}}\right) - 100\right) = 6,11 + \left(100 * \left(\frac{2,245}{2,247}\right) - 100\right) = 6,02 \text{ Vol. -\%} \quad (\text{Gl. 6.21})$$

Zuletzt wird der rechn. Soll-Wassergehalt anhand der Daten aus der Stoffraumrechnung der betrachteten Betonrezeptur ermittelt (siehe Gl. 6.10):

$$\Delta WG_{soll} = M_{Zugabewasser} + M_{Sättigung} + M_{Zusatzmittel} = 180,6 + 10,6 + 1,37 = 193 \frac{l}{m^3} \quad (\text{Gl. 6.22})$$

Die zugehörigen Messwertabweichungen können entsprechend aus den Differenzen der Ist- und Soll-Werte wie folgt ermittelt werden:

Anhand der FB-Rohdichten:

$$\Delta \rho = (\rho_{soll} - \rho_{ist}) * 1000 = 2,245 - 2,247 * 1000 = -2 \frac{kg}{m^3} \quad (\text{Gl. 6.23})$$

Anhand der FB-Luftporengehalte:

$$\Delta A_c = (A_{c,soll} - A_{c,ist}) = 6,02 - 6,11 = -0,09 \text{ Vol. -\%} \quad (\text{Gl. 6.24})$$

bzw. in Anlehnung an die Gl. 6.8:

$$\Delta A_c = \left(100 * \left(\frac{\rho_{soll}}{\rho_{ist}}\right) - 100\right) = \left(100 * \left(\frac{2,245}{2,247}\right) - 100\right) = -0,09 \text{ Vol. -\%} \quad (\text{Gl. 6.25})$$

Zuletzt besteht die Möglichkeit, die Messwertabweichung aus den ermittelten rechnerischen Wassergehalten zu bestimmen:

$$\Delta WG = (\Delta WG_{soll} - \Delta WG_{ist}) = 193 - 191 = 2 \frac{l}{m^3} \quad (\text{Gl. 6.26})$$

Für die folgenden Diskussionen zur Messgüte der einzelnen verwendeten Prüftechniken wird die Messwertabweichung auf Basis der gemessenen Differenzen zwischen Ist- und Soll-FB-Luftporengehalten weiterhin betrachtet. Dies ist dadurch begründet, dass die im Forschungsvorhaben angewendeten Prüfgeräte zur Ermittlung des FB-Luftporengehaltes die Ergebnisse der Luftporenbestimmung am Frischbeton in Vol.-% wiedergeben. Somit liegt es nahe, dass die jeweilige Messwertabweichung zur Übersichtlichkeit einheitlich in Vol.-% dargestellt und diskutiert wird.

## 6.3 Übersicht der Gesamtergebnisse zum Einfluss des Prüfregimes

### 6.3.1 Allgemein

In den folgenden acht Diagrammen (Bild 6-1 bis Bild 6-8) sind die Ergebnisse der relevanten Frischbetonmessungen aus dem Arbeitspaket 3.3 nach vier verschiedenen Ansätzen ausgewertet und dargestellt. Die Diagramme aus Bild 6-1 und Bild 6-2 geben zunächst eine Übersicht ohne Differenzierung der unterschiedlichen Einflüsse auf das Prüfregime.

Die unterschiedlich markierten Punkte stehen für die in den Voruntersuchungen ermittelten Ist-Werte der Frischbeton-Rohdichte (FB-Rohdichte) und dem Frischbeton-Luftporengehalt (FB-Luftporengehalt) einer Messreihe mit dem jeweils ausgewählten LP-Prüfgerät. Die Erläuterung der farblichen Kennzeichnung sowie Form der Datenpunkte ist der Legende im Bild 6-1 und Bild 6-2 zu entnehmen. Wenige deutliche Ausreißer sind bei den durchgeführten Untersuchungen gekennzeichnet. Zudem ist in den Diagrammen in Bild 6-1 und Bild 6-2 die aus der Stoffraumrechnung ermittelte rechnerische Soll-Wert-Kurve in violetter

Farbe eingezeichnet. In roter Farbe wurden zusätzlich zwei „Grenzwert“-Kurven eingefügt, sie markieren einen Toleranzbereich von  $\pm 0,5$  Vol.-% Abweichung vom rechnerischen Soll-Wert.

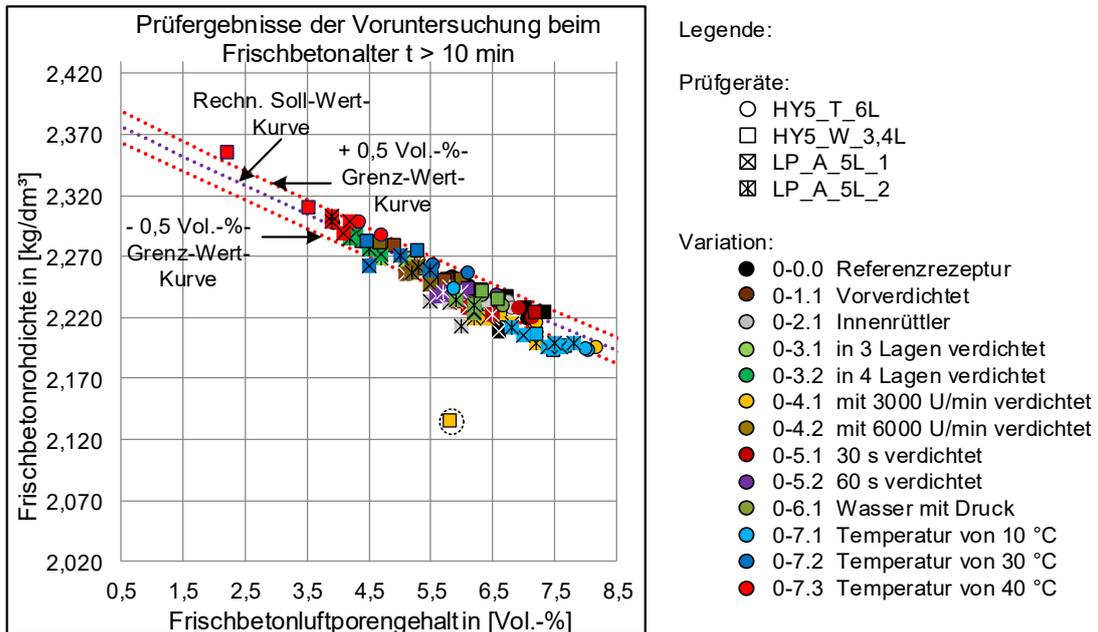


Bild 6-1: Übersicht aller Prüfergebnisse zum Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min

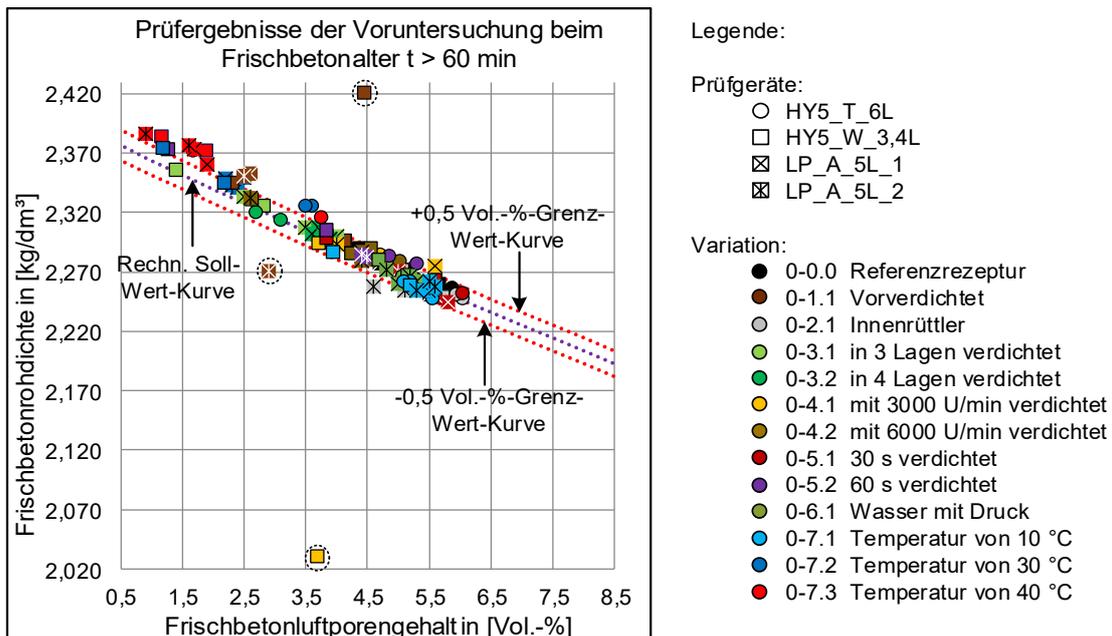


Bild 6-2: Übersicht aller Prüfergebnisse zum Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min

Bei den ermittelten Ergebnissen zum Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min (Bild 6-1) liegen die Messwerte bezogen auf die x-Achse überwiegend in einem Bereich zwischen 3,5 und 8,5 Vol.-% und unter Betrachtung der FB-Rohdichte überwiegend in einem Bereich zwischen 2,190 und 2,315 kg/dm<sup>3</sup>. Das entspricht einer Verteilung der überwiegenden Anzahl der Ergebnisse innerhalb einer Wertespanne von 5 Vol.-% bzw. 125 kg/m<sup>3</sup>. Eines der Ergebnisse ist als deutlicher Ausreißer (mit einem Kreis gekennzeichnet) zu erkennen.

Zum zweiten Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min ist eine deutliche Verschiebung aller Prüfergebnisse entlang der Soll-Wert-Kurve hin zu niedrigeren LP-Gehalten zwischen 0,5 und 6,0 Vol.-% (siehe Bild 6-2) erkennbar.

Unter anderem durch den Hydratationsprozess wurden auch höhere Frischbeton-Rohdichten gemessen. Der Wertebereich (ausgenommen Ausreißer) liegt hierbei zwischen 2,240 und 2,390 kg/dm<sup>3</sup>. Die Verteilung der Ergebnisse ist bezogen auf den gemessenen FB-Luftporengehalt um 0,5 Vol.-% auf einen Wertebereich von insgesamt 5,5 Vol.-% gestiegen.

### 6.3.2 Häufigkeitsverteilung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Werten der FB-Rohdichte

Als ein Beurteilungskriterium für die Messgüte der angewendeten Prüftechnik kann die Differenz zwischen den rechnerischen Soll- und gemessenen Ist-Werten der FB-Rohdichte herangezogen werden. Es erfolgt die Auswertung und Darstellung der Häufigkeit eines Auftretens der beschriebenen Differenz aus den Ergebnissen der Voruntersuchung zum Prüfregime zu zwei verschiedenen Prüfzeitpunkten und in Form zweier Diagramme im Bild 6-3 bzw. Bild 6-4.

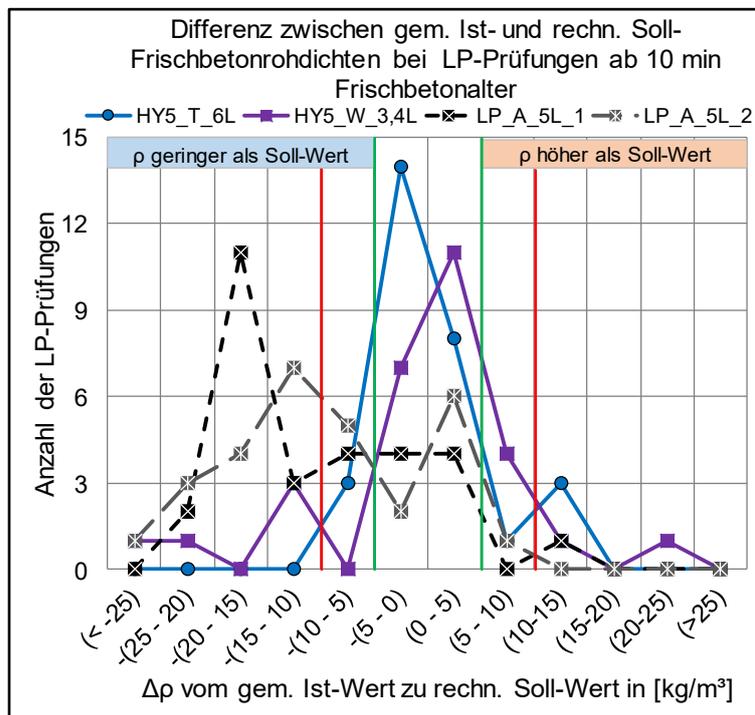


Bild 6-3: Häufigkeitsverteilung der FB-Rohdichtendifferenzen (Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min)

Tab. 6-2: Häufigkeitsverteilung der FB-Rohdichtendifferenzen in % (Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min)

Abweichung vom rechn. Soll-Wert	HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]			
1	2	3	4	5
ab ± (0 bis 5)	75,9	62,1	27,6	27,6
ab ± (5 bis 10)	13,8	13,8	13,8	20,7
über ± 10	10,3	24,1	58,6	51,7

In Bild 6-3 ist die Häufigkeit der Prüfergebnisse dargestellt, deren Abweichung in 5-kg/m<sup>3</sup>-Schritten von dem errechneten Soll-Wert aus der Stoffraumrechnung zugeordnet ist. Jede dargestellte Ergebnis-Linie stellt hierbei ein angewendetes LP-Prüfgerät dar. Die durchgezogenen Linien geben die Häufigkeitsverteilung der ermittelten Ergebnisse mit HYDRO\_5-Prüftechnik und die gestrichelten Linien die ermittelten Ergebnisse der konventionell eingesetzten LP-Töpfe wieder. Zusätzlich wurden zwei Bereiche definiert, welche in dem Diagramm mit grünen und roten vertikalen Linien abgegrenzt sind. Der Bereich zwischen den

grünen Linien stellt einen Wertebereich dar, in dem die ermittelten Ergebnisse der Rohdichte maximal 5 kg/m<sup>3</sup> von dem rechnerischen Soll-Wert abweichen. Der rot abgegrenzte Bereich beinhaltet alle Ergebnisse, die maximal 10 kg/m<sup>3</sup> von dem Soll-Wert der FB-Rohdichte aus der Stoffraumrechnung abweichen.

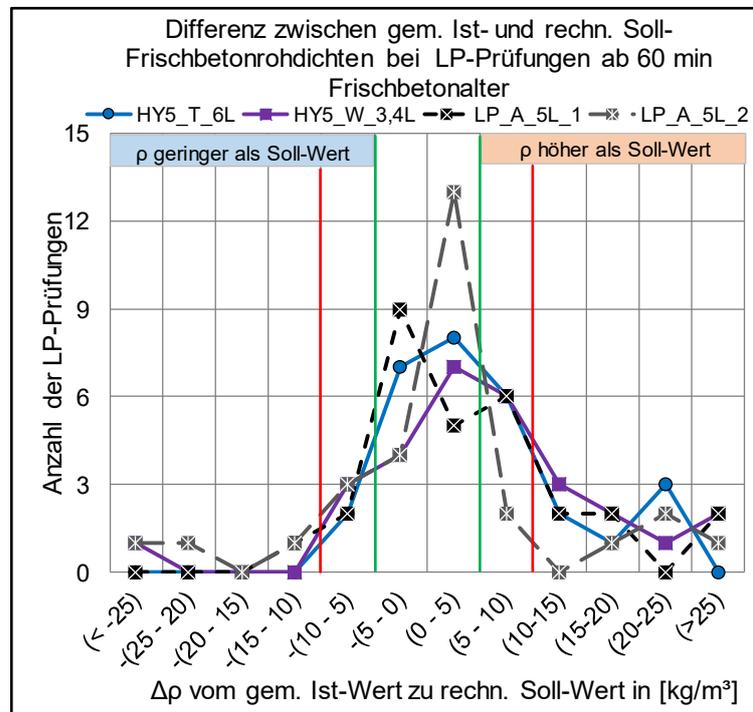


Bild 6-4: Häufigkeitsverteilung der FB-Rohdichtendifferenzen (Prüfzeitpunkt t > 60 min)

In Tab. 6-2 sind die Ergebnishäufigkeiten in Abhängigkeit von der ermittelten Differenz und dem angewendeten LP-Prüfgerät für die Frischbeton-Rohdichtebestimmung prozentual auf die Gesamtzahl der Prüfergebnisse bezogen, angegeben. Demnach ist zu erkennen, dass bei den HYDRO\_5-Prüfgeräten in über 75 % der Fälle die gemessenen Ist-Werte eine Abweichung unter 10 kg/m<sup>3</sup> aufweisen. Ca. 24 % der Ergebnisse bei den HYDRO\_5\_W\_3,4L und 10 % bei HYDRO\_5\_T\_6L weisen eine deutliche Abweichung von über 10 kg/m<sup>3</sup> zwischen der gemessenen FB-Rohdichte und dem rechnerischen Soll-Wert auf. Bei den konventionellen LP-Töpfen LP\_A\_5L liegt die Häufigkeit bei über 50 % aller Werte. Aus dem Diagramm in Bild 6-3 geht hervor, dass bei der Bestimmung der FB-Rohdichte mit konventionellen LP-Töpfen diese geringer ausfällt als der rechnerische Soll-Wert, der unter Beachtung des gemessenen Frischbeton-Luftporengehaltes laut Stoffraumrechnung vorliegen sollte.

Tab. 6-3: Häufigkeitsverteilung der FB-Rohdichtendifferenzen in % (Prüfzeitpunkt t > 60 min)

Abweichung vom rechn. Soll-Wert	HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
[kg/m³]	[%]			
1	2	3	4	5
ab ± (0 bis 5)	51,7	37,9	48,3	58,6
ab ± (5 bis 10)	27,6	31,0	27,6	17,2
über ± 10	20,7	31,0	24,1	24,1

Die Ergebnisse der Häufigkeitsverteilung der Differenz zwischen den rechnerischen Soll- und gemessenen Ist-Werten der FB-Rohdichte zum zweiten Prüfzeitpunkt von t > 60 min sind in Bild 6-4 und Tab. 6-3 zusammengefasst. Es ist eine vergleichbare Häufigkeitsverteilung zwischen den verwendeten Prüfgeräten zu erkennen. Mit einer Häufigkeit zwischen 70 % und 80 % wurden Differenzen von unter 10 kg/m<sup>3</sup> bei allen LP-Prüfgeräten ermittelt. Deutliche Einbußen bei der Genauigkeit der FB-Rohdichtenbestimmung zeigten

sich demnach bei dem HYDRO\_5\_W\_3,4L. Über 30 % aller gemessenen Ist- FB-Rohdichten weichen demnach um mehr als 10 kg/m<sup>3</sup> von dem rechnerischen Soll-Wert ab. Die konventionellen LP-Töpfe scheinen bei der Verwendung eines über 60 min alten Frischbetons eine genauere FB-Rohdichte zu messen als bei 10 min altem Frischbeton. Da die Ermittlung der Soll-Werte der Frischbetondichte auf Basis des gemessenen LP-Gehalts erfolgt, sind die Ergebnisse eng mit dem gemessenen LP-Gehalt im Frischbeton verknüpft. Die geringere Abweichung der LP-Gehalte könnte auf die fortschreitende Hydratation und somit auf den Reifegrad des Frischbetons, die Frischbetontemperatur sowie verschiedene weitere Verdichtungseffekte im Frischbeton zurückzuführen sein.

### 6.3.3 Häufigkeitsverteilung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Werten des FB-Luftporengehaltes

Als ein weiteres Beurteilungskriterium für die Messgüte der Luftporenprüfgeräte kann die Differenz zwischen den rechnerischen Soll- und gemessenen Ist-Werten des FB-Luftporengehaltes herangezogen werden. In den folgenden zwei Diagrammen (Bild 6-5 bis Bild 6-6) und Tabellen (Tab. 6-4 und Tab. 6-5) sind die Häufigkeitsverteilungen der Differenzen zwischen den rechnerischen Soll- und gemessenen Ist-Werten der Frischbeton-Luftporengehalte aller bei der Voruntersuchung betrachteten Messungen zum Zeitpunkt  $t > 10$  min und  $t > 60$  min aufgeführt.

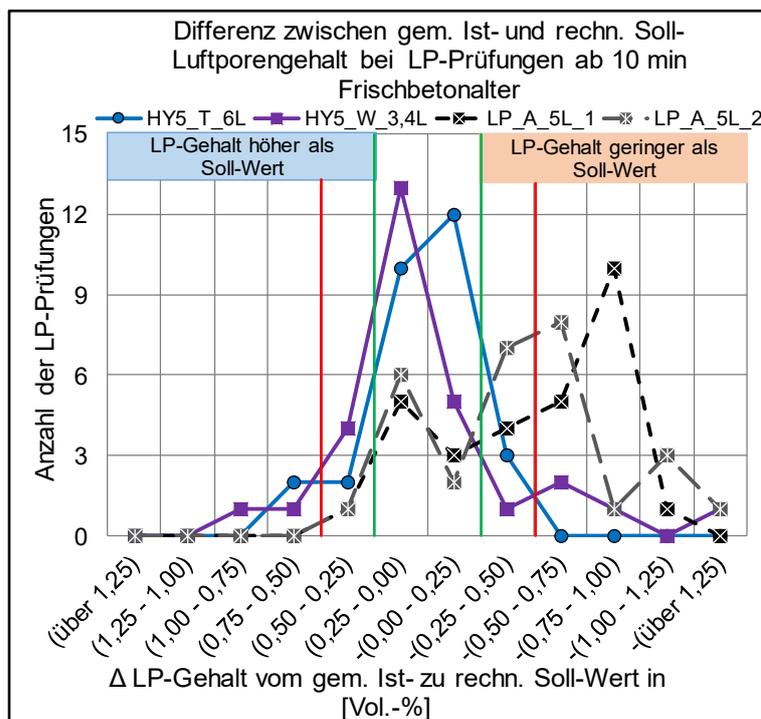


Bild 6-5: Häufigkeitsverteilung der FB-Luftporengelddifferenzen (Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min)

Tab. 6-4: Häufigkeitsverteilung der FB-Luftporengelddifferenzen in % (Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min)

Abweichung vom rechn. Soll-Wert	HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
[Vol.-%]	[%]			
1	2	3	4	5
ab ± (0,00 bis 0,25)	75,9	62,1	27,6	27,6
ab ± (0,25 bis 0,50)	17,2	17,2	17,2	27,6
über ± 0,50	6,9	20,7	55,2	44,8

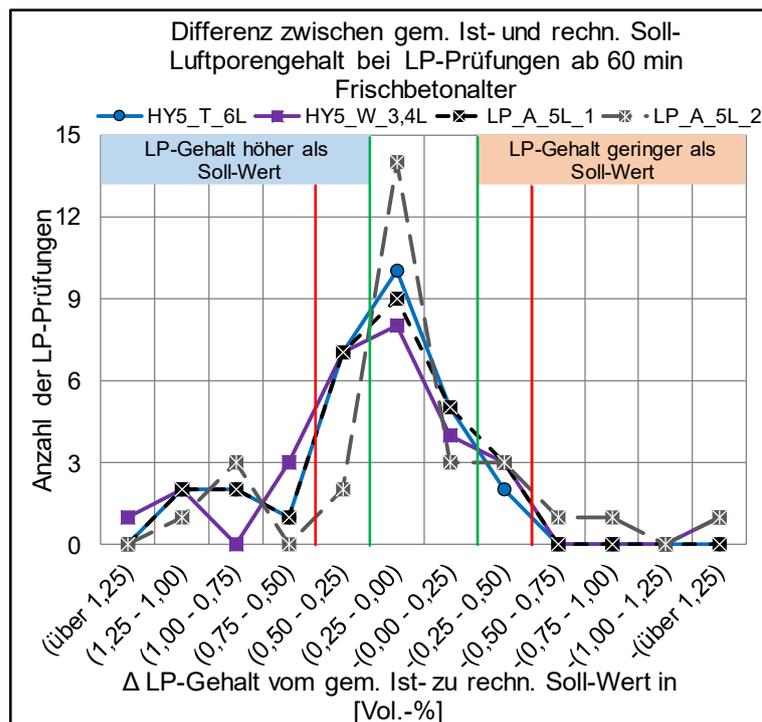


Bild 6-6: Häufigkeitsverteilung der FB-Luftporegehaltendifferenzen (Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min)

Die Häufigkeiten sind in 0,25 Vol.-% Schritte aufgeteilt. Als vernachlässigbare Abweichung wurde im vorliegenden Vergleich ein Grenzwert von 0,25 Vol.-% angesetzt (grüner Bereich). Bei einer Annahme, dass ein zu messender Soll-Luftporegehalt 5,0 Vol.-% betragen würde, entspricht der oben aufgeführte Grenzwert einer Abweichung von 5 % vom Soll-Wert. Als zweiten Grenzwert, mit den roten Vertikallinien in dem Diagramm markiert, wurde eine Abweichung des FB-Luftporegehaltes von 0,5 Vol.-% von dem Soll-Wert gekennzeichnet.

Tab. 6-5: Häufigkeitsverteilung der FB-Luftporegehaltendifferenzen in % (Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min)

Abweichung vom rechn. Soll-Wert	HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
[Vol.-%]	[%]			
1	2	3	4	5
ab $\pm$ (0,00 bis 0,25)	51,7	41,4	48,3	58,6
ab $\pm$ (0,25 bis 0,50)	31,0	34,5	34,5	17,2
über $\pm$ 0,50	17,2	24,1	17,2	24,1

Anhand des Diagrammes in Bild 6-5 und Daten aus Tab. 6-4 besteht eine Ähnlichkeit der Häufigkeitsverteilung der FB-Luftporegehaltendifferenzen und der bereits gezeigten Häufigkeitsverteilung der FB-Rohdichtendifferenzen zum Prüfzeitpunkt von  $t > 10$  min. Etwas präzisere gemessene Ist-Werte sind hierbei bei den HYDRO\_5-Prüftechnik zu verzeichnen. Starke Abweichungen von über 0,5 Vol.-% sind im Falle des HYDRO\_5\_T\_6L bei ca. 7 % aller Messergebnisse zum Prüfzeitpunkt von  $t > 10$  min festgestellt worden. Bei dem HYDRO\_5\_W\_3,4L weist jeder fünfte gemessene Ist-Messwert des FB-Luftporegehaltes eine Abweichung zum rechnerischen Soll-Wert von über 0,5 Vol.-% auf. Bei den konventionellen LP-Töpfen beträgt die Abweichung jedes zweiten Messwertes über 0,5 Vol.-%. Aus dem Diagramm in Bild 6-5 geht hervor, dass die konventionellen LP-Töpfe den gemessenen FB-Luftporegehalt in ca. 50 % der Fälle deutlich unterschätzen.

Die Häufigkeitsverteilung der Differenz zwischen den rechnerischen Soll- und gemessenen Ist-Werten des FB-Luftporengehaltes zum zweiten Prüfzeitpunkt von  $t > 60$  min sind im Bild 6-6 und Tab. 6-5 zusammengefasst. Anhand des Diagrammes ist eine Überlagerung der Verteilungslinien aller verwendeten Prüfgeräte zu erkennen. Der Großteil der gemessenen Ist-Messwerte von bis zu 0,5 Vol.-% liegt bei 75 % bis 83 %. Die konventionellen LP-Töpfe zeigen bei dem späteren Prüfzeitpunkt häufiger einen FB-Luftporengehalt mit sehr geringer Abweichung vom rechnerischen Soll-Wert im Vergleich zu dem Prüfzeitpunkt von  $t > 10$  min. Als Ursache für die vorliegende Entwicklung der Messwerte könnte die fortschreitende Hydratation des Frischbetons, verschiedene Verdichtungseffekte, die zunehmende Reifung sowie mögliche Temperaturänderungen im Frischbeton bis zum zweiten Prüfzeitpunkt angenommen werden. Es scheint, dass die Luftporen während der fortschreitenden Hydratation und somit der sich ändernden Festigkeitseigenschaften des Frischbetons durch den geringeren Prüfdruck der konventionellen Prüftechnik in ausreichender Anzahl im Zementleim erfasst werden. Die Luftporenstruktur scheint im späteren Prüfalter des Frischbetons stabiler und somit einfacher erfassbar zu sein.

### 6.3.4 Häufigkeitsverteilung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Werten des rechnerischen Wassergehaltes

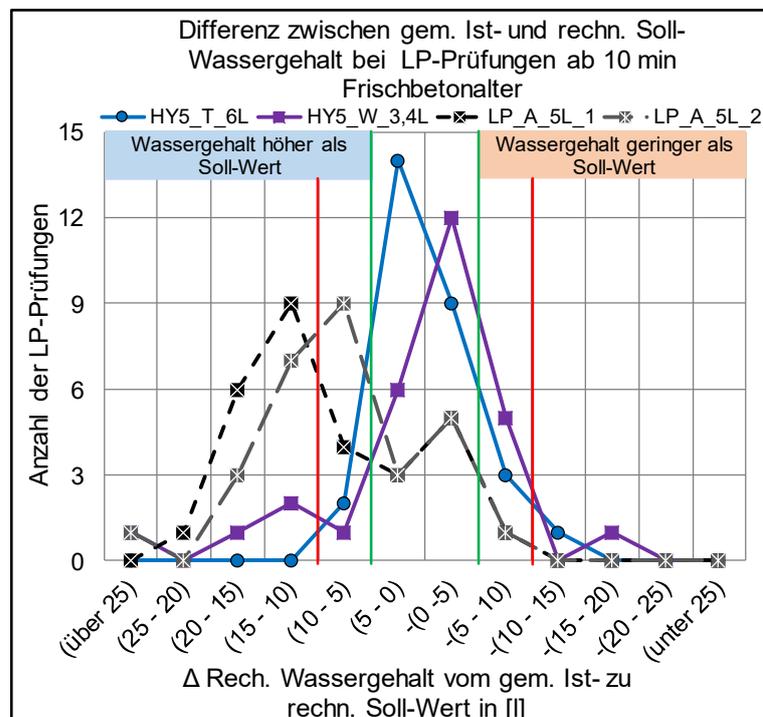


Bild 6-7: Häufigkeitsverteilung der FB-Wassergehaltdifferenzen (Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min)

Tab. 6-6: Häufigkeitsverteilung der FB-Wassergehaltdifferenzen in % (Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min)

Abweichung vom rechn. Soll-Wert	HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
[l]	[%]			
1	2	3	4	5
ab $\pm$ (0 bis 5)	79,3	62,1	27,6	27,6
ab $\pm$ (5 bis 10)	17,2	20,7	17,2	34,5
über $\pm$ 10	3,4	17,2	55,2	37,9

Als ein drittes Beurteilungskriterium für die Messgüte kann die Differenz zwischen dem rechnerischen Soll- und dem gemessenen Ist-Wert des rechnerischen Wassergehaltes im Frischbeton betrachtet werden. Die hierzu ausgewerteten Daten sind in Form von zwei Diagrammen in Bild 6-7 bzw. Bild 6-8 und den dazugehörigen Tabellen Tab. 6-6 bzw. Tab. 6-7 dargestellt. Die Häufigkeiten der Differenzen sind in 5-Liter-Schritten abgestuft. Als erster Grenzwert wurde in dem vorliegenden Vergleich eine Abweichung des rechnerischen Wassergehaltes vom rechnerischen Soll-Wert von 5 l angesetzt (grüner Bereich). Der zweite Grenzwert, der mit roten vertikalen Linien im Diagramm gekennzeichnet ist, entspricht einer Abweichung von 10 l.

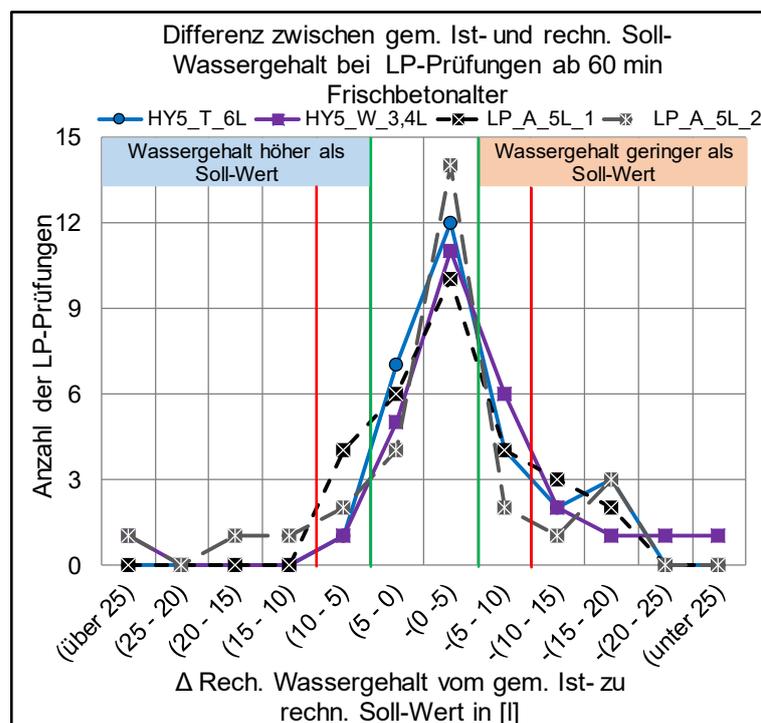


Bild 6-8: Häufigkeitsverteilung der FB-Wassergehaltdifferenzen (Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min)

Die dargestellten Ergebnisse der Voruntersuchungen zum Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min zeigen dem vorliegenden Beurteilungskriterium nach einer geringfügig höheren Genauigkeit der gemessenen Werte bei den HYDRO\_5- Prüfgeräten. Demnach liegen die Differenzen des rechnerischen Wassergehaltes innerhalb des roten Bereichs bei ca. 83 % (HYDRO\_5\_W\_3,4L) und 96 % (HYDRO\_5\_T\_6L). Drei Messungen mit HYDRO\_5\_W\_3,4L wiesen einen mehr als 10 l höheren rechnerischen Wassergehalt auf als der rechnerische Soll-Wert. Die Daten aus dem Einsatz der konventionellen LP-Töpfe gaben zwischen 38 % und 55 % aller Prüfergebnisse einen über den 10 l Grenzwert höheren rechnerischen Wassergehalt als der rechnerische Soll-Wert an.

Tab. 6-7: Häufigkeitsverteilung der FB-Wassergehaltdifferenzen in % (Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min)

Abweichung vom rechn. Soll-Wert	HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
[l]	[%]			
1	2	3	4	5
ab $\pm$ (0 bis 5)	65,5	55,2	55,2	62,1
ab $\pm$ (5 bis 10)	17,2	24,1	27,6	13,8
über $\pm$ 10	17,2	20,7	17,2	24,1

Zum Prüfzeitpunkt von  $t > 60$  min ist eine Überlagerung der Häufigkeitslinien in Bild 6-8 zu erkennen. Zwischen 76 % und 83 % aller Messwerte wiesen bei allen Prüfgeräten eine Abweichung des rechnerischen

Wassergehalts vom rechnerischen Soll-Wert unter 10 l auf. Über 50 % der Messwerte wiesen eine Abweichung von unter 5 l auf. Bei dem höheren Frischbetonalter wurde somit mit den Prüfgeräten bei ca. jeder fünften Messung ein über 10 l geringerer rechnerischer Wassergehalt festgehalten.

## **6.4 Einfluss der Prüfreimevariation auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit**

### **6.4.1 Allgemeines**

Um zu identifizieren, bei welcher Prüfreimevariation starke Messwertabweichungen bei den Prüfgeräten auftreten und wie stark der Prüfverlauf den resultierenden Luftporengehalt im Frischbeton beeinflusst, wurden in den folgenden Kapiteln die Messergebnisse der Frischbeton-Untersuchungen nach der Prüfreimevariation sortiert, in Form von Diagrammen dargestellt und diskutiert. Die zugehörigen Tabellen geben die Spannweiten der Abweichungen der betrachteten Kennwerte zu dem zugehörigen rechnerischen Soll-Wert an. Zur optischen Einordnung der gemessenen Messwertabweichungen in drei Kategorien wurden die Daten der Tabelle farblich wie folgt hervorgehoben:

- dunkelgrün markiert sind Messwertabweichungen im Streubereich von  $\pm 0,25$  Vol.-% bzw.  $5 \text{ kg/m}^3$  vom Soll-Wert
- hellgrün hinterlegt sind Messwertabweichungen im Streubereich von bis zu  $\pm 0,50$  Vol.-% bzw.  $10 \text{ kg/m}^3$
- gelb hinterlegt sind Messwertabweichungen im Streubereich über  $\pm 1,0$  Vol.-% bzw. über  $10 \text{ kg/m}^3$

### **6.4.2 Einfluss der Probenentnahmeart auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit**

Die Probeentnahme unter Labor- bzw. Praxisbedingungen nach dem Herstellen des Frischbetons kann deutliche Unterschiede in dessen Ablauf aufweisen. Um den Einfluss der Probeentnahme auf die Luftporenbildung im Frischbeton sowie die anschließende Messwertbildung beim Bestimmen der Frischbetoneigenschaften zu identifizieren, wurden zwei Probeentnahmeverfahren untersucht.

Beim ersten Verfahren wurde die Frischbetonprobe nach dem Mischen für beide Prüfzeitpunkte im Mischer belassen. Zum Zeitpunkt der Verdichtung wurde die benötigte Menge an Frischbeton direkt aus dem Mischer entnommen und in einer gleichbleibenden Abfolge gleichmäßig in jedes Prüfgefäß gefüllt. Der Rest des Frischbetons blieb im Mischer bis zum zweiten Prüfzeitpunkt von  $t > 60 \text{ min}$ .

Beim zweiten Verfahren wurde versucht, die in der Praxis auf den Baustellen beobachtete Entnahme des Frischbetons aus dem Muldenkipper durch Ausschaufeln zu simulieren. Hierzu erfolgte zuerst das Umfüllen des Frischbetons aus dem Mischer in einen Mörtelkübel. Anschließend wurde der Frischbeton auf ca. 3 m Höhe angehoben und das Ausschaufeln der Probe aus dem Muldenkipper in einen darunter stehenden Transportbehälter simuliert. Hierbei erfolgte ein „ungewolltes“ Vorverdichten des Frischbetons, bedingt durch den Freifall und anschließenden Aufprall der Probe in den Transportbehälter. Im Anschluss erfolgte das Weitertransportieren der bereits vorverdichteten Frischbetonprobe und das Umfüllen in die Prüfbehälter auf dem Rütteltisch. Verdichtet wurde bei den beiden Verfahren mit identischer Intensität und in zwei Lagen. Je Variation erfolgten drei Betonagen und anschließende Frischbetonprüfungen zu zwei Prüfzeitpunkten mit vier LP-Prüfgeräten. Insgesamt wurden somit zwölf Datenwerte pro Prüfzeitpunkt und Variation erzeugt, die in nachfolgenden zwei Diagrammen in Bild 6-9 und Bild 6-10 dargestellt sind.

Die Tabellen Tab. 6-8 und Tab. 6-9 geben die Spannweiten der Abweichungen der gemessenen Ist-Frischbetondaten von dem jeweiligen rechnerisch bestimmten Soll-Wert an. Zur Übersicht wurden mehrere Kurven in dem Diagramm eingetragen, um die Differenz der gemessenen Ist-Werte von dem rechnerischen Soll-Wert optisch aufzuzeigen (violette Kurve). Weitere Hilfskurven (rot) grenzen den Bereich um die Soll-Wert-Kurve ab und visualisieren die Grenzwerte der Abweichungen von der Soll-Wert-Kurve des FB-Luftporengehaltes von 0,5 Vol.-%.

### Versuchsergebnisse zum Prüfzeitpunkt von $t > 10$ min

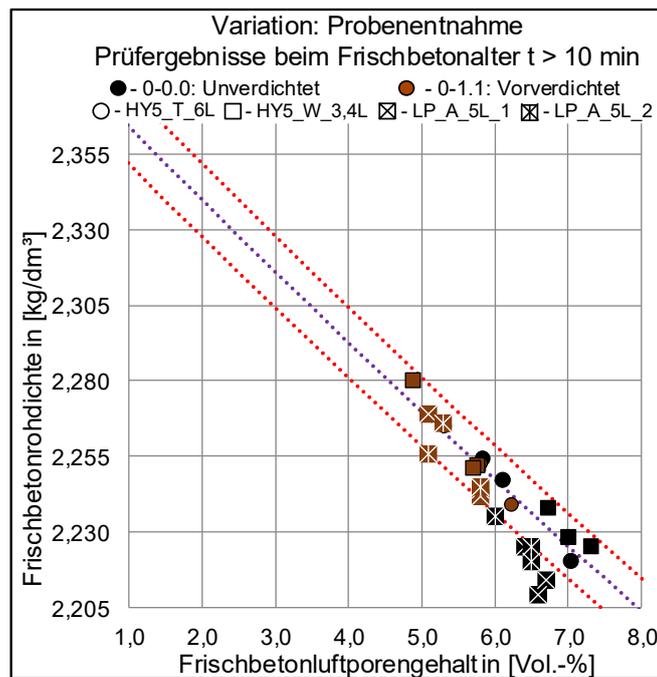


Bild 6-9: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Probeentnahme“ ( $t > 10$  min)

Die Ermittlung der FB-Rohdichten sowie der FB-Luftporengehalte erfolgte mit zwei konventionellen LP-Töpfen und zwei HYDRO\_5-Prüfgeräten. In Bild 6-9 sind die Daten der Versuchsreihe ohne Vorverdichtung 0-0.0 (schwarze Datenpunkte) und die Messwerte der Versuchsreihe 0-1.1 mit vorverdichtetem Beton wiedergegeben.

Tab. 6-8: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Probeentnahme“ ( $t > 10$  min)

Versuchsreihe	Variation: Probenentnahme Probenalter $t > 10$ min		HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
	1	2	3	4	5	6
0-0.0	Abweichung vom rechn. Soll-Wert	$\rho$ in [kg/m <sup>3</sup> ]	2 - 4	3 - 7	13 - 25	11 - 16
0-1.1			1 - 4	0 - 8	2 - 10	3 - 11
0-0.0		LP-Gehalt in [Vol.-%]	0,09 - 0,13	0,13 - 0,31	0,58 - 1,13	0,49 - 0,72
0-1.1			0,04 - 0,13	0,00 - 0,35	0,09 - 0,45	0,13 - 0,49

Die Daten dieser Prüfvariation weisen einen FB-Luftporengehalt zwischen 5,8 und 7,5 Vol.-% auf. Die gemessenen FB-Rohdichten verteilen sich im Streubereich von ca.  $\pm 50$  kg/m<sup>3</sup>. Die Versuche an den bereits vorverdichteten Frischbetonproben (0-1.1) zeigen deutlich geringere FB-Luftporengehalte und höhere Rohdichten auf. Die FB-Luftporengehalte wurden hierbei zwischen ca. 4,9 und 6,2 Vol.-% gemessen und streuen somit etwas geringer als bei der Referenzversuchsreihe 0-0.0. Die Streuung der FB-Rohdichte ist hingegen nahezu konstant geblieben. Die Ergebnisse zeigen, dass durch den praxisnahen Entnahmepro-

zess die Frischbetonproben ungewollt vorverdichtet werden, was zu Verlusten des Frischbeton-Luftporengehaltes von bis zu 1 Vol.-% führen kann. Die beobachteten Ergebnisse lassen sich möglicherweise durch das Vorhandensein von Makroluftporen im unverdichteten Frischbeton erklären, welche in einem bereits vorverdichteten Frischbeton nach dem Freifall möglicherweise aufgrund der Aufprallenergie bereits ausgetrieben wurden.

In Bild 6-9 ist zu sehen, dass die unter verschiedenen Entnahmeszenarien der Frischbetonproben mittels HYDRO\_5-Prüfgeräten gemessenen Frischbetonkennwerte kaum von den rechnerischen Soll-Werten abweichen. Beide Prüfgeräte wiesen bei allen Untersuchungen Messwertabweichungen unterhalb der festgelegten Grenzwerte auf. Rechnerisch ermittelte Differenzen zwischen gemessenen Ist- und rechnerisch ermittelten Soll-Werten sind Tab. 6-8 zu entnehmen.

Die konventionellen Töpfe zeigen hingegen deutlich stärkere Abweichungen. Bei der Versuchsreihe 0-0.0 liegen alle Messwerte außerhalb des rot abgegrenzten Bereiches. Im Schnitt wurden die FB-Luftporengehalte um ca. 0,7 Vol.-% unterschätzt. Bei der Versuchsreihe 0-1.1 mit bereits vorverdichteten Proben liegen die Ergebnisse in dem rot markierten Toleranzbereich mit maximaler Kennwertedifferenz vom rechnerischen Soll-Wert von 0,49 Vol.-% bzw. 11 kg/m<sup>3</sup>. Anhand der vorliegenden Daten scheint die Vorverdichtung der Probe einen erkennbaren Einfluss auf die Messwertbildung bei den konventionellen LP-Töpfen zu erzeugen. Es ist möglich, dass die Makroporen nach dem Freifall durch den Aufprall des Frischbetons in den Transportbehälter ausgetrieben wurden und somit bei der nachfolgenden Luftporenmessung am ersten Prüfzeitpunkt nicht mehr vorhanden sind.

### V Versuchsergebnisse zum Prüfzeitpunkt von t > 60 min

Zum zweiten Prüfzeitpunkt von t > 60 min erfolgte eine wiederholte Messung der Frischbetonkenndaten.

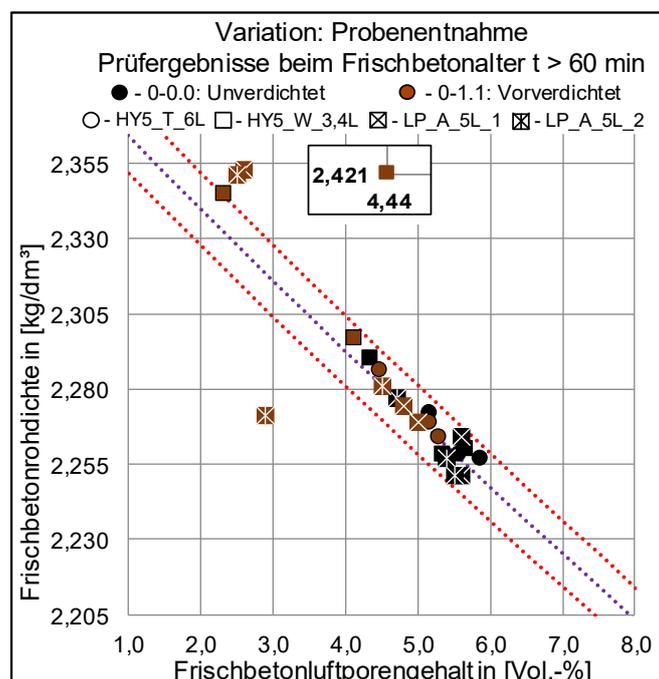


Bild 6-10: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Probeentnahme“ (t > 60 min)

Die Verdichtung der Proben auf einem Rütteltisch erfolgte in zwei Lagen zum Probenalter von 60 min. Die Ergebnisse beider Versuchsreihen sind in grafischer und tabellarischer Form in dem Bild 6-10 und Tab. 6-9 zu entnehmen.

Hierbei ist zu erkennen, dass bei der Referenzversuchsreihe 0-0.0 alle Messwerte innerhalb des Toleranzbereiches vorzufinden sind. Laut Daten aus Tab. 6-9 liegen die maximalen Differenzen zum rechnerischen

Soll-Wert bei bis zu 0,31 Vol. %. Des Weiteren liegt der gemessene FB-Luftporengehalt zum zweiten Prüfzeitpunkt zwischen 4,2 und 5,9 Vol.-%. Hauptsächlich durch die fortgeschrittene Hydratation sind erwartungsgemäß ebenfalls höhere FB-Rohdichten zu verzeichnen.

Tab. 6-9: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Probeentnahme“ (t > 60 min)

Versuchsreihe	Variation: Probenentnahme Probenalter t > 60 min		HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
1	2	3	4	5	6	7
0-0.0	Abweichung vom rechn. Soll-Wert	ρ in [kg/m <sup>3</sup> ]	1 - 7	4 - 5	4 - 8	1 - 7
0-1.1			1 - 4	7 - 13 (139)	0 - 1 (28)	0 - 47
0-0.0		LP-Gehalt in [Vol.-%]	0,04 - 0,31	0,18 - 0,22	0,18 - 0,35	0,04 - 0,31
0-1.1			0,04 - 0,17	0,30 - 0,55 (5,74)	0,00 - 0,04 (1,19)	0,00 - 2,07

Die Ergebnisse zum zweiten Prüfzeitpunkt der zweiten Versuchsreihe 0-1.1 zeigen starke Streuungen und somit auch starke Abweichungen der Messdaten vom rechnerischen Soll-Wert. Ein Teil der Daten liegt in dem FB-Luftporengehaltsbereich von 4,0 bis 5,2 Vol.-%. Ein weiterer Teil der Daten weist deutlich höhere FB-Rohdichten auf und liegt mit den LP-Gehalten in einem Bereich von 2,1 bis 3,0 Vol.-%. Eine unerwartete Erfassung der Messdaten ist bei der Messung mit dem HYDRO\_5\_W\_3,4L zu erkennen. Bei einer sehr hohen gemessenen FB-Rohdichte war ein um ca. 5,5 Vol.-% höherer FB-Luftporengehalt zu verzeichnen. Die starken Differenzen der Messdaten sind durch Klammern in Tab. 6-9 gekennzeichnet. Bei dem Einsatz der konventionellen LP-Töpfe zum zweiten Prüfzeitpunkt bei der vorverdichteten Frischbetonprobe (0-1.1) zeigen die Hälfte der Messwerte deutliche Abweichungen zum rechnerischen Soll-Wert außerhalb des Toleranzbereiches. Anhand der dargestellten Messergebnisse ist festzuhalten, dass das ungewollte Vorverdichten der Frischbetonprobe durch den Entnahmeprozess bei der Messung der Frischbetonkenndaten zum späterem Prüfzeitpunkt eine große Streuung bei ca. 40 % der Messwerte erzeugt, die zum Teil sehr starke gemessene Ist-Wertabweichungen von dem erwarteten rechnerischen Soll-Wert aufweisen.

#### 6.4.3 Einfluss der Verdichtungsart auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit

Die Verdichtung der Frischbetonprobe zur Ermittlung der FB-Kenndaten ist normativ mit einem geeigneten Rütteltisch oder einem Innenrüttler möglich. In der Praxis kommt es ebenfalls vor, dass zur Verdichtung der Frischbetonprobe im konventionellen LP-Topf ein Innenrüttler zum Einsatz kommt. Um den Einfluss der Verdichtungsart auf die Luftporenbildung im Frischbeton sowie die anschließende Messwertbildung bei der Bestimmung der Frischbetoneigenschaften zu ermitteln, wurden beide Verdichtungsarten angewendet. Bei der Referenzversuchsreihe 0-0.0 wurde der Frischbeton in dem jeweiligen Prüfgefäß auf dem Rütteltisch mit einer Verdichtungsintensität von 4500 U/min (75 Hz) in zwei Lagen für 45 s je Lage verdichtet. Bei der Versuchsreihe 0-2.1 erfolgten zwei Betonagen. Zu zwei Prüfzeitpunkten wurden die Frischbetonproben in dem jeweiligem Prüfgefäß mittels Innenrüttler für ca. 10 s je Lage mit einer Verdichtungsintensität von 12000 U/min (200 Hz) verdichtet.

Die in den beiden Versuchsreihen ermittelte Messwerte sind in Bild 6-11 und Bild 6-12 dargestellt. Die zugehörigen Messwertabweichungen zum rechnerischen Soll-Wert sind tabellarisch in Tab. 6-10 und Tab. 6-11 angegeben.

#### Versuchsergebnisse zum Prüfzeitpunkt von t > 10 min

Verglichen werden die gemessenen FB-Kennwerte aus zwei Versuchsreihen 0-0.0 (Rütteltisch) und 0-2.1 (Innenrüttler). Die Messwerte der Versuchsreihe 0-2.1 weisen nur sehr geringfügige Unterschiede zu den Daten aus 0-0.0 auf. Es ist ein geringfügiger Rückgang des FB-Luftporengehaltes von im Schnitt ca. 0,4 Vol.-% bei den Messwerten nach der Verdichtung der Proben mit dem Innenrüttler im Vergleich zu

den Werten der Referenzversuchsreihe 0-0.0 zu verzeichnen. Somit ist ein deutlicher Einfluss der Verdichtungsart zum Prüfzeitpunkt von  $t > 10$  min anhand der vorliegenden Daten nicht bestätigt. Die vorliegenden Messdaten, die im Bild 6-11 als Diagramm abgebildet sind, zeigen jedoch, dass die konventionellen LP-Töpfe zum Prüfzeitpunkt von  $t > 10$  min unabhängig von dem eingesetzten Verdichtungsverfahren den FB-Luftporengehalt in 75 % der Fälle als bedeutend zu niedrig ( $\Delta$  bis zu  $34 \text{ kg/m}^3$  bzw.  $1,54 \text{ Vol.-%}$ ) einschätzen (siehe Tab. 6-10).

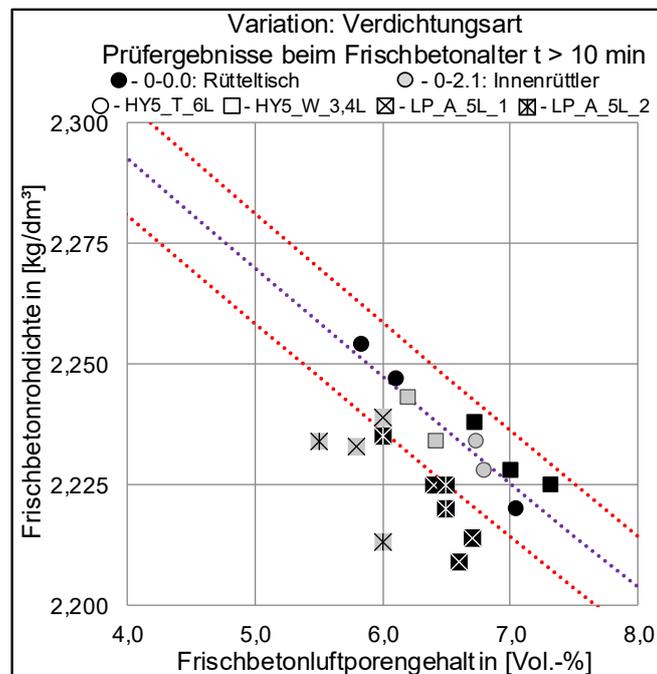


Bild 6-11: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungsart“ ( $t > 10$  min)

Werden die Abweichungen der gemessenen Ist-Werte von dem erwarteten rechnerischen Soll-Wert betrachtet, so sind deutliche Unterschiede bei den Messwerten beider Versuchsreihen beim Einsatz des LP\_A\_5L\_2 zu erkennen (siehe Tab. 6-10). Bei der Verdichtung des Frischbetons mit dem Innenrüttler wurden bei dem genannten konventionellen LP\_A\_5L\_2 Abweichungen der gemessenen Ist-Werte des FB-Luftporengehaltes von ca.  $1,0$  bis  $1,5 \text{ Vol.-%}$  festgestellt. Die Ergebnisse der Referenzversuchsreihe 0-0.0 wichen hingegen im Bereich von ca.  $0,50$  bis  $0,75 \text{ Vol.-%}$  ab. Werden die Messwerte des eingesetzten LP\_A\_5L\_1 betrachtet, so sind die Messwertabweichungen hier umgekehrt - bei der Versuchsreihe 0-0.0 etwas größer als bei der Versuchsreihe 0-2.1. Demnach ist der Einfluss der Verdichtungsart zum Prüfzeitpunkt von  $t > 10$  min anhand der vorliegenden Messdaten nicht eindeutig zu erkennen.

Tab. 6-10: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Verdichtungsart“ ( $t > 10$  min)

Versuchsreihe	Variation: Verdichtungsart Probenalter $t > 10$ min		HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
1	2	3	4	5	6	7
0-0.0	Abweichung vom rechn. Soll-Wert	$\rho$ in $[\text{kg/m}^3]$	2 - 4	3 - 7	13 - 25	11 - 16
0-2.1			1 - 3	0 - 4	8 - 19	24 - 34
0-0.0		LP-Gehalt in $[\text{Vol.-%}]$	0,09 - 0,13	0,13 - 0,31	0,58 - 1,13	0,49 - 0,72
0-2.1			0,04 - 0,13	0,00 - 0,18	0,36 - 0,85	1,07 - 1,54

## Versuchsergebnisse zum Prüfzeitpunkt von $t > 60$ min

Das Diagramm in Bild 6-12 zeigt die ermittelten Messwerte der betrachteten Versuchsreihen 0-0.0 und 0-2.1 zum Prüfzeitpunkt von  $t > 60$  min.

Es ist ein deutlicher Rückgang der Streuung der Messwerte zu erkennen. Im Mittel liegen die FB-Luftporengehalte bei den betrachteten Versuchsreihen auf identischem Niveau von ca. 5,35 Vol.-%. Die Streuung der FB-Rohdichte bei den mit dem Innenrüttler verdichteten Proben ist hingegen etwas geringer als bei der Referenzversuchsreihe 0-0.0. Somit ist zum Prüfzeitpunkt von  $t > 60$  min zu erkennen, dass die Messwerte der Versuchsreihe 0-2.1 geringfügig weniger streuen und in dem Messwertstrebereich der Referenzversuchsreihe 0-0.0 liegen.

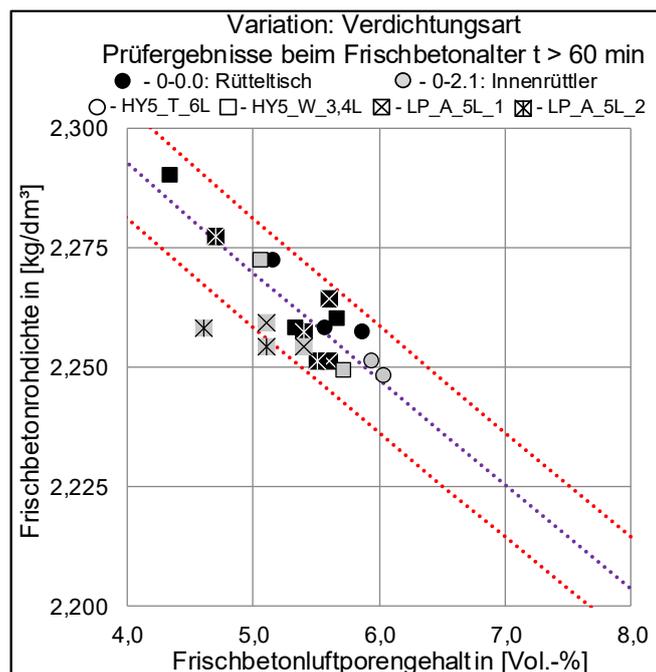


Bild 6-12: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungsart“ ( $t > 60$  min)

Die überwiegende Anzahl der Messwerte liegt in dem angegebenen Toleranzbereich. Im Vergleich zu der Referenzversuchsreihe 0-0.0 wird in den meisten Fällen bei der Verdichtung der Frischbetonproben mit Innenrüttler zum Prüfzeitpunkt von  $t > 60$  min der FB-Luftporengehalt geringfügig unterschätzt. Eine Ausnahme ist bei der Versuchsreihe 0-2.1 bei dem Einsatz des konventionellen LP\_A\_5L\_2 zu erkennen. Bei dem genannten Prüfgerät betrug die Messwertabweichung des FB-Luftporengehaltes vom rechnerischen Soll-Wert zwischen 0,58 und 0,93 Vol.-%. Ein deutlicher Einfluss der verwendeten Verdichtungsverfahren auf die Messwertqualität ist hiermit nicht zu erkennen.

Tab. 6-11: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Verdichtungsart“ ( $t > 60$  min)

Versuchsreihe	Variation: Verdichtungsart Probenalter $t > 60$ min		HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
1	2	3	4	5	6	7
0-0.0	Abweichung vom rechn. Soll-Wert	$\rho$ in [kg/m <sup>3</sup> ]	1 - 7	4 - 5	4 - 8	1 - 7
0-2.1			2 - 3	4	7 - 8	13 - 21
0-0.0		LP-Gehalt in [Vol.-%]	0,04 - 0,31	0,18 - 0,22	0,18 - 0,35	0,04 - 0,31
0-2.1			0,09 - 0,13	0,18	0,31 - 0,35	0,58 - 0,93

#### 6.4.4 Einfluss der Anzahl der Verdichtungslagen auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit

Laut Regelwerk [N15] soll die Verdichtung des Frischbetons in dem Prüfgefäß zur Luftporenbestimmung in einer oder mehreren Lagen erfolgen. Eine genaue Anzahl der Lagen ist somit nicht explizit definiert. Um den Einfluss der gewählten Anzahl der Verdichtungslagen auf die Luftporenbildung im Frischbeton sowie die anschließende Messwertbildung bei der Bestimmung der Frischbetoneigenschaften zu identifizieren, wurde der Frischbeton bei drei Versuchsreihen mit verschiedener Anzahl der Lagen verdichtet. Bei der Versuchsreihe 0-0.0 erfolgte die Verdichtung in zwei Lagen. Bei der Versuchsreihe 0-3.1 bzw. 0-3.2 erfolgte die Verdichtung der Frischbetonproben bei jeweils zwei Betonagen in drei bzw. vier Lagen.

In allen betrachteten Versuchsreihen erfolgte die Verdichtungsarbeit auf einem Rütteltisch mit einer Verdichtungsintensität von 4500 U/min (75 Hz) und einer Dauer von 45 s je Lage. Die ermittelten Messwerte sind dem Bild 6-13 und Bild 6-14 zu entnehmen. Tab. 6-12 und Tab. 6-13 geben die errechneten zugehörigen Messwertabweichungen zum rechnerischen Soll-Wert an.

#### Versuchsergebnisse zum Prüfzeitpunkt von $t > 10$ min

Anhand der abgebildeten Messwerte in Bild 6-13 ist deutlich der Einfluss der Anzahl der Verdichtungslagen auf die Frischbetonluftporenbildung und FB-Rohdichte zu erkennen. Durch die steigende Anzahl der Verdichtungslagen wurde ein deutlich geringerer FB-Luftporengehalt gemessen. Der Rückgang der Streuung der Messwerte ist ebenfalls feststellbar.

Wurde der Frischbeton in drei Lagen verdichtet, so liegen die Messwerte zwischen 4,5 und 5,2 Vol.-%. Der Streubereich ist etwa halb so groß im Vergleich zu den Messwerten der Referenzversuchsreihe 0-0.0. Im Schnitt wurde mit verschiedenen Prüfgeräten ein FB-Luftporengehalt von ca. 4,8 Vol.-% festgestellt. Die Streuung der FB-Rohdichte ist ebenfalls gering.

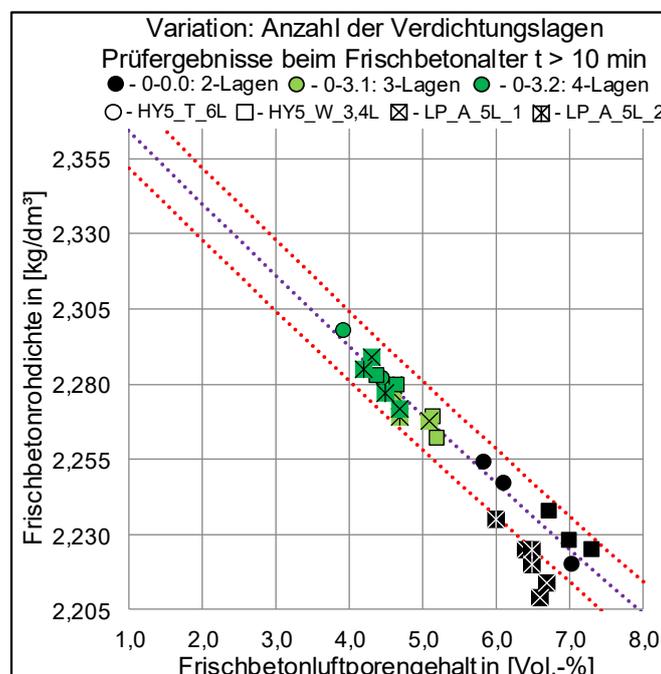


Bild 6-13: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungslagen“ ( $t > 10$  min)

Die Verdichtung in vier Lagen erzeugte im Vergleich zur Versuchsreihe 0-3.1 nur einen geringfügigen Rückgang des FB-Luftporengehaltes. Im Schnitt wurde ein FB-Luftporengehalt von ca. 4,4 Vol.-% gemessen.

Die Messwerte der Referenzversuchsreihe 0-0.0 lagen hierbei bei ca. 6,6 Vol.-%. Die Streuung der Messwerte des FB-Luftporengehaltes liegt zwischen 3,9 und 4,7 Vol.-%. Durch die Anordnung von mehr als zwei Lagen während des Verdichtungsprozesses ist ein deutlicher Einfluss auf den FB-Luftporengehalt zum Prüfzeitpunkt von  $t > 10$  min feststellbar.

Tab. 6-12: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Verdichtungslagen“ ( $t > 10$  min)

Versuchsreihe	Variation: Anzahl der Verdichtungslagen Probenalter $t > 10$ min		HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
1	2	3	4	5	6	7
0-0.0	Abweichung vom rechn. Soll-Wert	$\rho$ in [kg/m <sup>3</sup> ]	2 - 4	3 - 7	13 - 25	11 - 16
0-3.1			0 - 2	3	1 - 2	1 - 7
0-3.2			0 - 4	1 - 3	3 - 4	3 - 4
0-0.0		LP-Gehalt in [Vol.-%]	0,09 - 0,13	0,13 - 0,31	0,58 - 1,13	0,49 - 0,72
0-3.1			0,00 - 0,09	0,13	0,04 - 0,09	0,04 - 0,31
0-3.2			0,00 - 0,17	0,04 - 0,13	0,13 - 0,18	0,13 - 0,18

Wird die Abweichung der gemessenen Ist-Werte vom rechnerischen Soll-Wert der FB-Kennwerten als Messwertgenauigkeit betrachtet, so zeigt die Tab. 6-12, dass bei steigender Anzahl der Verdichtungslagen alle verwendeten Prüfgeräte präzisere Ergebnisse liefern. Ab einer Verdichtung der Frischbetonprobe in drei Lagen liegen alle Messwerte innerhalb der Toleranzgrenzen von 0,5 Vol.-%. Beim Verdichten in vier Lagen betrug die maximale Differenz 0,18 Vol.-% bzw. 4 kg/m<sup>3</sup>. Zu vermuten ist, dass durch das Verdichten mit einer höheren Anzahl von Lagen eine Überverdichtung auftrat, wodurch möglicherweise ein Teil der vorhandenen Luftporen in der Frischbetonmatrix entwichen ist. Zudem könnte die Verwendung einer größeren Anzahl dünnerer Verdichtungslagen dazu geführt haben, dass die Luftporen während der intensiven Verdichtung in die darüberliegenden Schichten des Frischbetons im Prüfbehälter wanderten. Dort könnten sie größtenteils von der konventionellen Prüftechnik erfasst worden sein, obwohl ein niedrigerer Prüfdruck angewendet wurde.

### Versuchsergebnisse zum Prüfzeitpunkt von $t > 60$ min

Die Messwerte aller Versuchsreihen, die zum zweiten Prüfzeitpunkt erfasst wurden, liegen stark verstreut, aber innerhalb des Toleranzbereiches in einem Streubereich des FB-Luftporengehaltes zwischen 1,4 und 5,8 Vol.-% (siehe Bild 6-14). Die stärksten Streuungen sind bei der Versuchsreihe 0-3.1 zu verzeichnen. Die Messwerte aus dem HYDRO\_5\_W\_3,4L weisen eine deutlich höhere FB-Rohdichte und somit einen viel geringeren FB-Luftporengehalt auf als die überwiegende Anzahl der gewonnenen Messwerte mit den anderen verwendeten Prüfgeräten. Eine Messung mit dem LP\_A\_5L\_1 ergab ebenfalls eine deutlich höhere FB-Rohdichte von über 2330 kg/m<sup>3</sup> und somit einen geringen FB-Luftporengehalt von ca. 2,5 Vol.-%.

Zum zweiten Prüfzeitpunkt wurde bei den Frischbetonproben, die in vier Lagen verdichtet wurden, um 1 Vol.-% geringere FB-Luftporengehalte als beim ersten Prüfzeitpunkt festgestellt. Drei der gewonnenen Messwerte mit der HYDRO\_5-Prüftechnik zeigen FB-Luftporengehalte von 2,5 bis 3,2 Vol.-%, was darauf hindeutet, dass während des Verdichtungsprozesses die Frischbetone sehr stark verdichtet wurden. Der Einfluss der Anzahl der Verdichtungslagen auf den Frischbeton-Luftporengehalt ist zum zweiten Prüfzeitpunkt hiermit ebenfalls deutlich festzustellen. Die Ergebnisse des späteren Prüfzeitpunkts könnten daher darauf hindeuten, dass es aufgrund der Verwendung mehrerer Verdichtungslagen zu einer Überverdichtung gekommen ist oder dass die Luftporen in die nächsthöheren Frischbetonschichten aufgetrieben wurden und von der konventionellen Prüftechnik, trotz geringeren Prüfdrucks, aufgrund der günstigen Porenlage mit einem höheren Anteil erfasst wurden.

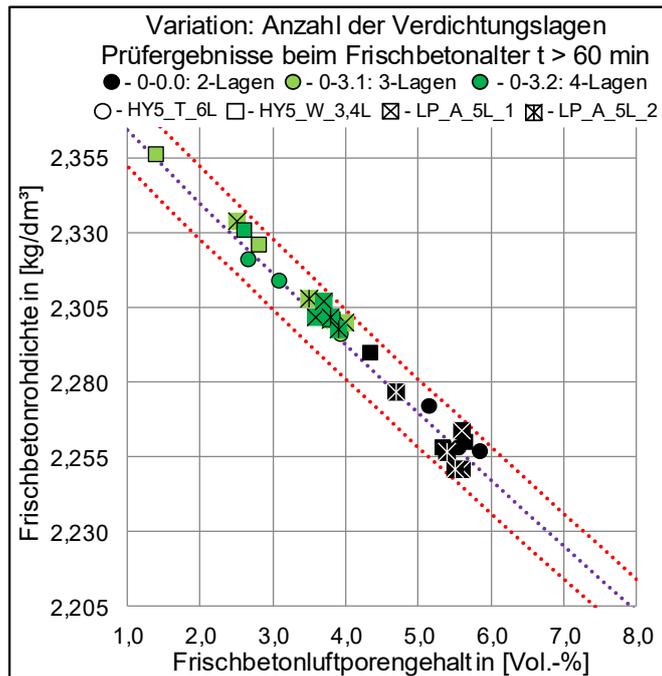


Bild 6-14: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengelalte; Variation „Verdichtungslagen“ ( $t > 60$  min)

Tab. 6-13 gibt die rechnerisch ermittelten Differenzen zwischen den gemessenen Ist- und rechnerisch ermittelten Soll-Werten der betrachteten Frischbetonkenndaten wieder. Im Vergleich mit den Daten aus Tab. 6-12 ist zu erkennen, dass sich die Streuungen zum zweiten Prüfzeitpunkt innerhalb des gewählten Toleranzbereiches befinden, jedoch bei der überwiegenden Anzahl der Prüfgeräte geringfügig gestiegen sind. Eine Ausnahme ist bei den Messwerten zu verzeichnen, welche mit den konventionellen LP-Töpfen bei der Referenzversuchsreihe 0-0.0 gewonnen wurden. Hierbei sind die Streuungen von ca. 0,50 bis 1,10 Vol.-% auf ca. 0,05 bis 0,30 Vol.-% deutlich zurückgegangen.

Tab. 6-13: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Verdichtungslagen“ ( $t > 60$  min)

Versuchsreihe	Variation: Anzahl der Verdichtungslagen Probenalter $t > 60$ min		HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
1	2	3	4	5	6	7
0-0.0	Abweichung vom rechn. Soll-Wert	$\rho$ in [kg/m <sup>3</sup> ]	1 - 7	4 - 5	4 - 8	1 - 7
0-3.1			0 - 2	2 - 6	6 - 7	4
0-3.2			0 - 3	5 - 6	0 - 7	3 - 5
0-0.0		LP-Gehalt in [Vol.-%]	0,04 - 0,31	0,18 - 0,22	0,18 - 0,35	0,04 - 0,31
0-3.1			0,00 - 0,09	0,08 - 0,26	0,26 - 0,30	0,17
0-3.2			0,00 - 0,13	0,22 - 0,26	0,00 - 0,30	0,13 - 0,22

Anhand der Daten aus Tab. 6-13 ist keine deutliche Reduktion der Differenzen mit steigender Anzahl der Lagen beim Verdichtungsprozess zum zweiten Prüfzeitpunkt zu verzeichnen. Somit kann festgehalten werden, dass ein späteres Verdichten der Frischbetonproben mit mehr als zwei Lagen bei der Untersuchung der Frischbetonkenndaten wohl auf den LP-Gehalt, aber keinen deutlich erkennbaren Effekt auf die Messwertgenauigkeit (Streuung der Daten) aufweist.

### 6.4.5 Einfluss der Verdichtungsintensität auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit

Die Verdichtung auf dem Rütteltisch ist eine der am häufigsten eingesetzte Verdichtungsart im Labor. Hierbei ist die Intensität, mit welcher die Frischbetonprobe verdichtet werden muss, normativ nicht festgehalten. In der Praxis werden verschiedene Verdichtungsgeräte eingesetzt, die unterschiedliche Verdichtungsintensitäten aufweisen können. Um den Einfluss der Verdichtungsintensität auf den FB-Luftporengehalt sowie auf die Messwertbildung zu untersuchen, wurden in der Voruntersuchung zum Prüfregime drei Versuchsreihen durchgeführt. Bei den Versuchsreihen 0-4.1 bzw. 0-4.2 erfolgten jeweils zwei Betonagen. Somit wurden zu jedem Prüfzeitpunkt insgesamt acht Messwerte der betrachteten FB-Kennwerte an vier eingesetzten LP-Prüfgeräten ermittelt.

In der Referenzversuchsreihe 0-0.0 erfolgte das Verdichten der Proben mit einer Verdichtungsintensität von 4500 U/min bzw. 75 Hz. In weiteren Versuchsreihen wurden die Frischbetonproben mit einer Intensität von 3000 U/min bzw. 50 Hz (0-4.1) und 6000 U/min bzw. 100 Hz (0-4.2) verdichtet. Die Verdichtung wurde auf einem 2-motorigen Hochfrequenzrütteltisch im Labor durchgeführt. Im Vergleich zu auf Baustellen üblich eingesetzten 1-motorigen Rütteltischen (bis ca 10000 U/min) bringt dieser bereits bei 3000 U/min eine vergleichbar hohe Verdichtungsenergie auf. Die Diagramme in Bild 6-15 und Bild 6-16 stellen die gemessenen Kennwerte zu zwei Prüfzeitpunkten als Datenpunkte sowie die aus der Stoffraumrechnung errechnete Soll-Wert-Kurve mit den festgelegten Grenzwertkurven dar. Tabellarisch zusammengefasst sind die zugehörigen Soll-Wert-Abweichungen der jeweiligen Messwerte in Tab. 6-14 bzw. Tab. 6-15 angegeben.

#### Versuchsergebnisse zum Prüfzeitpunkt von $t > 10$ min

Anhand der Messwerte in Bild 6-15 wird ersichtlich, dass die Verdichtungsintensität von 3000 U/min (gelbe Datenpunkte) geringere Rohdichten und damit höhere Luftporengehalte der Frischbetonproben zur Folge hat. Die Messwerte der FB-Luftporengehalte liegen in einem Streubereich von 5,8 bis 8,2 Vol.-%. Im Mittel wurde ein FB-Luftporengehalt von 6,8 Vol.-% festgehalten, der somit um ca. 0,4 Vol.-% höher als der Mittelwert der Referenzversuchsreihe 0-0.0 liegt. Ein Ausreißer bei der Kennwertbestimmung mit dem HYDRO\_5\_W\_3,4L ist in dem Diagramm unten zu erkennen. Mit einem FB-Luftporengehalt von 5,8 Vol.-% wurde eine deutlich geringere FB-Rohdichte von 2,135 kg/dm<sup>3</sup> festgestellt.

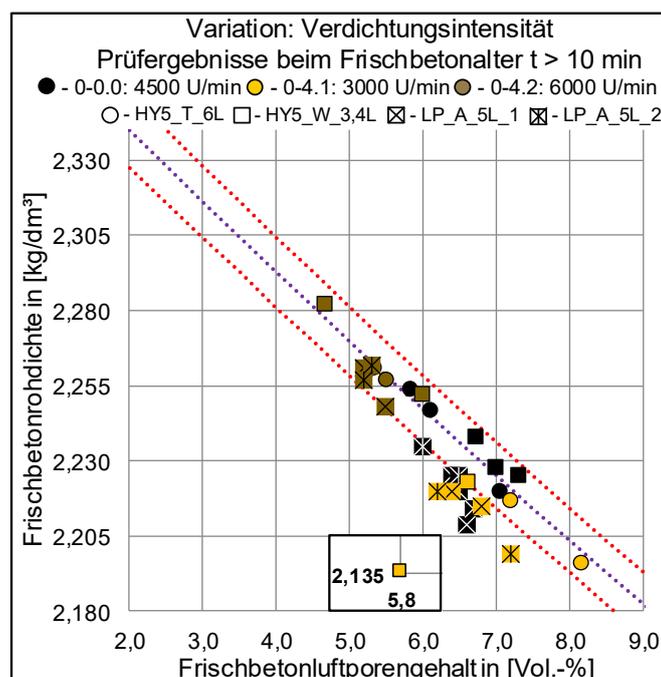


Bild 6-15: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungsintensität“ ( $t > 10$  min)

Frischbetonproben (0-4.2), die mit einer Verdichtungsintensität von 6000 U/min verdichtet wurden, zeigen hingegen deutlich geringere FB-Luftporengehalte und höhere FB-Rohdichten zum Prüfzeitpunkt von > 10 min. Hierbei wurden FB-Luftporengehalte zwischen ca. 4,7 und 6,0 Vol.-% gemessen. Damit fällt die Streuung geringer aus als bei den Werten der Referenzversuchsreihe 0-0.0. Die FB-Rohdichte liegt überwiegend in dem Messbereich zwischen 2,250 kg/dm<sup>3</sup> und 2,265 kg/dm<sup>3</sup>. Die Ergebnisse zeigen, dass es durch die höhere Intensität bei der Verdichtung der Frischbetonprobe zu höheren FB-Rohdichten und somit geringeren FB-Luftporengehalten, im Mittel bis zu 1,2 Vol.-% im Vergleich zur Versuchsreihe 0-0.0, führen kann.

Tab. 6-14: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüffregimes „Verdichtungsintensität“ (t > 10 min)

Versuchsreihe	Variation: Verdichtungsintensität Probenalter t > 10 min		HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
	2	3	4	5	6	7
0-0.0	Abweichung vom rechn. Soll-Wert	ρ in [kg/m <sup>3</sup> ]	2 - 4	3 - 7	13 - 25	11 - 16
0-4.1			4	10 (116)	14 - 18	22 - 23
0-4.2			1	5	4 - 10	1 - 8
0-0.0		LP-Gehalt in [Vol.-%]	0,09 - 0,13	0,13 - 0,31	0,58 - 1,13	0,49 - 0,72
0-4.1			0,18	0,45 (5,43)	0,63 - 0,81	1,00 - 1,04
0-4.2			0,04	0,22	0,18 - 0,44	0,04 - 0,35

Die Daten aus der Tab. 6-14 verdeutlichen, dass durch die steigende Verdichtungsintensität der Frischbetonproben die gemessenen Frischbetonkennwerte überwiegend geringere Abweichungen von den rechnerischen Soll-Werten aufweisen. Während bei der Verdichtungsintensität von 3000 U/min (0-4.1) 37,5 % der ermittelten Messwerte innerhalb des Toleranzbereiches liegen, beträgt der Anteil bei der Referenzversuchsreihe 0-0.0 insgesamt 58,3 %. Die Messwerte der Versuchsreihe 0-4,2 liegen hingegen zu 100 % innerhalb des Toleranzbereichs.

Somit kann festgehalten werden, dass eine höhere Verdichtungsintensität der Frischbetonproben mit einem 2-motorigen Hochfrequenzrütteltisch bei der FB-Kennwertbestimmung einen deutlich erkennbaren Effekt sowohl auf den FB-Luftporengehalt als auch auf die Messwertgenauigkeit ausübt. Die Intensität der Einwirkung auf die Luftporen bei steigender Verdichtungsenergie könnte für die vorliegende Entwicklung des FB-Luftporengehaltes verantwortlich sein (Überverdichtung). Eine zunehmende Verdichtungsintensität kann dazu führen, dass die Luftporen aus den unteren Schichten der frisch hergestellten Probe stärker in die obere Schicht getrieben werden. Der Rückgang des Gesamtluftporengehaltes deutet darauf hin, dass durch eine höhere Verdichtungsintensität die Bildung größerer Verdichtungsporen nahezu vollständig vermieden wird. Die aufgetriebenen Luftporen, die im Frischbeton verbleiben, werden durch den geringeren Druck der konventionellen LP-Töpfe aufgrund der günstigeren Lage in der oberen Schichtdicke mit höherer Rate erfasst. Inwieweit sich die höhere Verdichtungsintensität auf den Mikro-Luftporengehalt und dessen Abstandsfaktor auswirkt, kann anhand der Ergebnisse nicht beurteilt werden.

### Versuchsergebnisse zum Prüfzeitpunkt von t > 60 min

Das Diagramm in Bild 6-16 zeigt die ermittelten Messwerte der betrachteten Versuchsreihen 0-0.0, 0-4.1 und 0-4.2 zum Prüfzeitpunkt von t > 60 min.

Es ist ein deutlicher Anstieg der FB-Rohdichten der FB-Proben bei der Versuchsreihe 0-4.1 zu verzeichnen. Im Mittel wurden ähnliche FB-Luftporengehalte um 4,4 Vol.-% bei den Frischbetonproben, verdichtet mit einer Verdichtungsintensität von 3000 U/min (0-4.1) und 6000 U/min (0-4.2), festgehalten. Es ist zu erkennen, dass zum späteren Prüfzeitpunkt die betrachteten FB-Kennwerte der Frischbetone unter den gewählten geringsten und höchsten Verdichtungsintensitäten nach der Verdichtung einen im Mittel um ca. 1 Vol.-% geringeren FB-Luftporengehalt als bei der Referenzversuchsreihe 0-0.0 aufweisen. Somit ist

ein Einfluss der zu wählenden Verdichtungsintensität auf den Frischbeton-Luftporengehalt zum zweiten Prüfzeitpunkt ebenfalls zu erkennen.

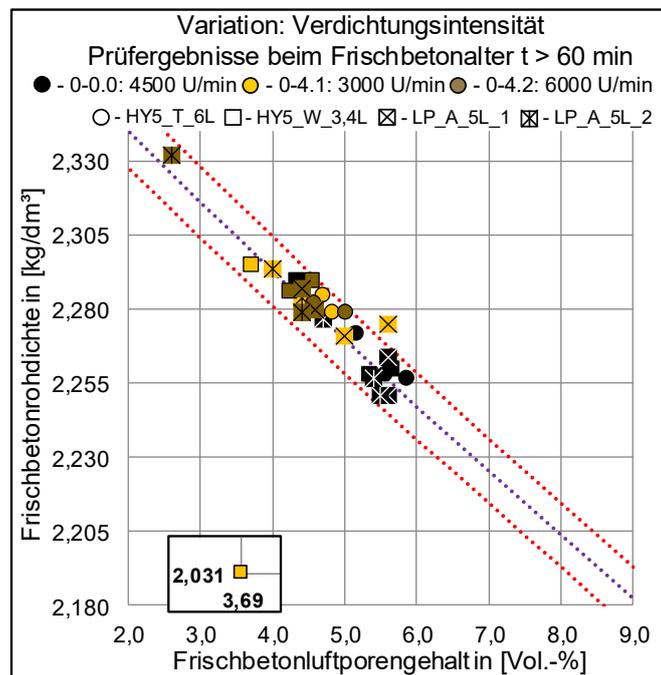


Bild 6-16: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungsintensität“ (t > 60 min)

Wird die Lage der Messwerte bezogen auf die rechnerisch ermittelte Soll-Wert-Kurve betrachtet, so ist im Vergleich mit den Messwerten zum ersten Prüfzeitpunkt ein deutlicher Rückgang der Streuung der Messwertungenauigkeiten zu erkennen. Eine Ausnahme bildet die Versuchsreihe 0-4.1 (3000 U/min), deren Messwerte, ermittelt an dem LP\_A\_5L\_1 und dem HYDRO\_5\_W\_3,4L, außerhalb des Toleranzbereichs liegen. In der Versuchsreihe 0-4.2 wurde eine Frischbetonprobe in dem LP\_A\_5L\_2 durch die gewählte Intensität so weit verdichtet, dass eine FB-Rohdichte von über 2,330 kg/dm<sup>3</sup> gemessen wurde. Der dabei festgehaltene FB-Luftporengehalt liegt hierbei in dem gewählten Toleranzbereich.

Tab. 6-15: Messwertabweichungen der Variation des Prüfregimes „Verdichtungsintensität“ (t > 60 min)

Versuchsreihe	Variation: Verdichtungsintensität Probenalter t > 60 min		HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
	2	3	4	5	6	7
0-0.0	Abweichung vom rechn. Soll-Wert	ρ in [kg/m <sup>3</sup> ]	1 - 7	4 - 5	4 - 8	1 - 7
0-4.1			6 - 9	4 (269)	1 - 19	1
0-4.2			3 - 10	1 - 10	1 - 4	4 - 7
0-0.0		LP-Gehalt in [Vol.-%]	0,04 - 0,31	0,18 - 0,22	0,18 - 0,35	0,04 - 0,31
0-4.1			0,26 - 0,39	0,17 (13,24)	0,04 - 0,84	0,04
0-4.2			0,13 - 0,44	0,04 - 0,44	0,04 - 0,17	0,18 - 0,30

Die Daten aus der Tab. 6-15 zeigen keinen deutlichen Rückgang der Messungenauigkeit bei einer höheren Verdichtungsintensität der Frischbetonproben. Die überwiegende Anzahl der untersuchten FB-Kenndaten weist ähnliche Differenzen der gemessenen Ist-Werte im Vergleich zu dem jeweiligen rechnerisch ermittelten Soll-Wert auf. Unter Berücksichtigung der verschiedenen LP-Prüftechnik, ausgenommen deutlicher Ausreißer, sind ebenfalls keine feststellbaren Unterschiede in der Messgenauigkeit bei den betrachteten Variationen des Prüfregimes zum zweiten Prüfzeitpunkt zu erkennen. Dafür verantwortlich könnte unter

anderem die fortgeschrittene Hydratation sein, welche dem Aufsteigen der Luftporen durch die gestiegene Viskosität des Zementleimes bei höheren Verdichtungsintensitäten entgegenwirkt.

#### 6.4.6 Einfluss der Verdichtungsdauer auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit

Laut Norm [N15] ist die Verdichtungsdauer des Frischbetons bei der Bestimmung der FB-Kennwerte so zu wählen, dass nach der Rüttelbehandlung die Verdichtung des Frischbetons abgeschlossen ist. Gleichzeitig ist jedoch eine zu lange Rüttelbehandlung, die zur Reduktion der künstlichen Luftporen im Frischbeton führen kann, zu vermeiden. Um den Einfluss der zu wählenden Rüttelzeit auf den FB-Luftporengehalt sowie dessen Messgenauigkeit bei Einsatz von vier verschiedenen Prüftechniken zu untersuchen, wurde der Frischbeton einer Rezeptur mit drei verschiedenen Rüttelzeiten in dem jeweiligen Prüfgefäß verdichtet. In jedem Prüfgefäß wurde so lange verdichtet, bis die FB-Rohdichte der Probe entsprach, die in einer Stahlwürfelschalung mit festgelegter Rüttelzeit vorab verdichtet worden war. Bei der Versuchsreihe 0-0.0 wurde die Rüttelzeit des Frischbetons in den verschiedenen Prüfgefäßen auf die FB-Rohdichte der Stahlwürfelprobe mit einer Verdichtungszeit von 45 s angepasst. Bei der Versuchsreihe 0-5.1 erfolgte die Anpassung der Verdichtungszeit auf die erreichte FB-Rohdichte der Stahlwürfelprobe mit einer Verdichtungszeit von 30 s. Bei der Versuchsreihe 0-5.2 wurde der Einfluss einer Verdichtungszeit von 60 s untersucht. Die Frischbeton-Untersuchungen bei den Versuchsreihen 0-5.1 und 0-5.2 erfolgten jeweils für zwei Betonchargen, bei der Versuchsreihe 0-0.0 für drei Betonchargen.

#### V Versuchsergebnisse zum Prüfzeitpunkt von $t > 10$ min

Verglichen werden die gemessenen FB-Kennwerte aus drei Versuchsreihen 0-0.0 (Verdichtungszeit 45 s), 0-5.1 (Verdichtungszeit 30 s) und 0-5.2 (Verdichtungszeit 60 s).

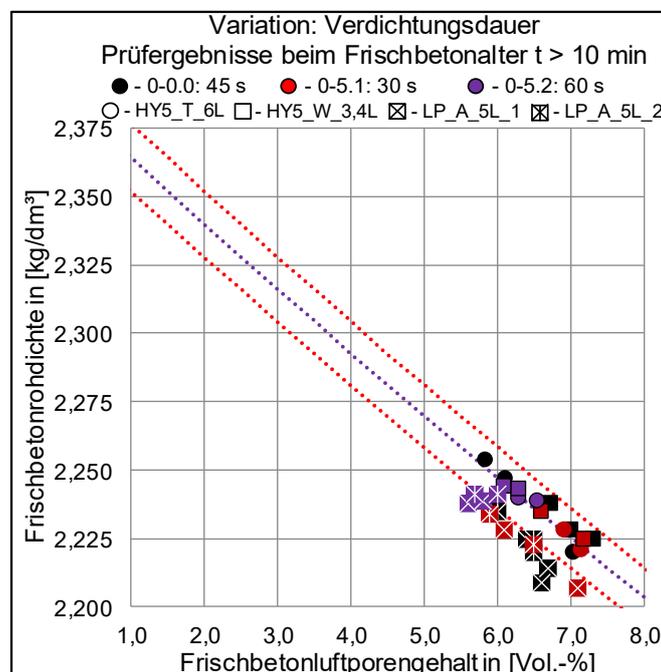


Bild 6-17: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungsdauer“ ( $t > 10$  min)

Bild 6-17 zeigt, dass bei der Wahl einer Verdichtungszeit von 30 bzw. 45 s sehr ähnliche FB-Kennwerte gemessen wurden. Die FB-Luftporengehalte der Versuchsreihe 0-5.1 liegen zwischen 5,8 und 7,3 Vol.-% und somit im Bereich der Streuung der FB-Luftporengehalte der Versuchsreihe 0-5.2. Die FB-Rohdichten der Versuchsreihe 0-5.1 liegen ebenfalls im Streubereich der Versuchsreihe 0-0.0. Somit ist

kein deutlicher Einfluss der Verdichtungszeit zwischen 30 s und 45 s zum Prüfzeitpunkt von  $t > 10$  min anhand der vorliegenden Daten zu erkennen. Bei der Betrachtung der Messdaten aus der Versuchsreihe 0-5.2 (60 s) wird ersichtlich, dass dies zu keinem starken FB-Luftporengehaltsverlust geführt hat. Die Messwerte liegen ebenfalls in dem Streubereich der Messwerte der Referenzversuchsreihe 0-0.0. Es wurden jedoch deutlich geringere Streuungen der gemessenen FB-Rohdichten bei langer Verdichtungszeit festgestellt. Die gemessenen FB-Rohdichten liegen bei der Versuchsreihe 0-5.2 in einem Bereich zwischen 2,238 und 2,244 kg/dm<sup>3</sup>. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch die Wahl einer längeren Verdichtungszeit zwar der FB-Luftporengehalt um ca. 0,5 Vol.% reduziert wird, jedoch eine gleichmäßigere Verdichtung der Frischbetonproben in den Prüfgefäßen erfolgt.

Tab. 6-16: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfredimes „Verdichtungsdauer“ ( $t > 10$  min)

Versuchsreihe	Variation: Verdichtungsdauer Probenalter $t > 10$ min		HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
1	2	3	4	5	6	7
0-0.0	Abweichung vom rechner. Soll-Wert	$\rho$ in [kg/m <sup>3</sup> ]	2 - 4	3 - 7	13 - 25	11 - 16
0-5.1			1	1 - 4	16 - 17	13 - 15
0-5.2			1 - 4	1 - 2	13 - 18	6 - 13
0-0.0		LP-Gehalt in [Vol.-%]	0,09 - 0,13	0,13 - 0,31	0,58 - 1,13	0,49 - 0,72
0-5.1			0,04 - 0,05	0,04 - 0,18	0,72 - 0,76	0,58 - 0,67
0-5.2			0,04 - 0,18	0,04 - 0,09	0,58 - 0,80	0,27 - 0,58

Die Abweichung der gemessenen Ist-Werte vom rechnerischen Soll-Wert der FB-Kennwerten als Messwertgenauigkeit ist der Tab. 6-16 zu entnehmen. Es wird ersichtlich, dass bei einer beliebig gewählten Verdichtungsdauer die HYDRO\_5-Prüfgeräte vergleichbare Messpräzisionen innerhalb des gewählten Toleranzbereichs aufweisen. Bei den konventionellen LP-Töpfen ist die Differenz zwischen den Messwerten und den rechnerischen Soll-Werten ausschließlich bei der Verdichtungsdauer von 60 s geringfügig gesunken. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Einsatz der LP-Töpfe unabhängig von der Verdichtungszeit eine Unterschätzung des FB-Luftporengehaltes von bis zu ca. 1,1 Vol.% zur Folge hatte. Somit ist festzuhalten, dass eine Wahl der Verdichtungsdauer (3 Lagen je 30 oder 45 oder 60 s) zum Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min kaum eine Auswirkung auf die Messwertbildung zeigt.

### Versuchsergebnisse zum Prüfzeitpunkt von $t > 60$ min

Die Messwerte der Versuchsreihen zum Einfluss der Verdichtungszeit auf die FB-Luftporengehalte sowie auf die Messwertgenauigkeit der eingesetzten Prüfgeräte sind dem Bild 6-18 zu entnehmen. Die rechnerisch ermittelten Messwertabweichungen zur rechnerisch ermittelten Soll-Wert-Kurve sind in Tab. 6-17 festgehalten.

Es ist zu erkennen, dass zum zweiten Prüfzeitpunkt von  $t > 60$  min die Messwerte meistens im Toleranzbereich lagen. Beim Betrachten der Messwerte mit dem HYDRO\_5\_W\_3,4L der Versuchsreihen 0-5.1 und 0-5.2 sind starke Streuungen gegenüber den mit weiteren Prüfgeräten gewonnenen Messwerten zu erkennen. Die übrigen Messwerte weisen jedoch eine ähnliche Messwertverteilung wie bei dem ersten Prüfzeitpunkt untereinander auf. So haben insgesamt die FB-Rohdichten aller Versuchsreihen u. a. aufgrund des begonnenen Hydratationsprozesses und natürlicher Entlüftung erwartungsgemäß zugenommen. Im Mittel liegt der FB-Luftporengehalt der Versuchsreihe 0-5.1 (30 s), ähnlich zum früheren Prüfzeitpunkt, in dem Messwertbereich mit dem höheren gemessenen FB-Luftporengehalt der Referenzversuchsreihe 0-0.0. Beim Verdichten der FB-Proben für 60 s werden geringere FB-Luftporengehalte von überwiegend ca. 3,8 Vol.% bis 5,3 Vol.% im Mittel, jedoch noch im Streubereich der Daten der Referenzversuchsreihe 0-0.0, festgestellt. Eine geringfügig voneinander abweichende FB-Rohdichtendifferenz der 0-5.2 Frischbetonproben ist zum zweiten Prüfzeitpunkt nicht mehr gegeben. Somit ist festzuhalten, dass eine Wahl der

Verdichtungsdauer (3 Lagen je 30 oder 45 oder 60 s) zum Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min ausschließlich bei langer Verdichtungszeit von 60 s eine erkennbare Auswirkung auf den Frischbeton-Luftporengehalt hat.

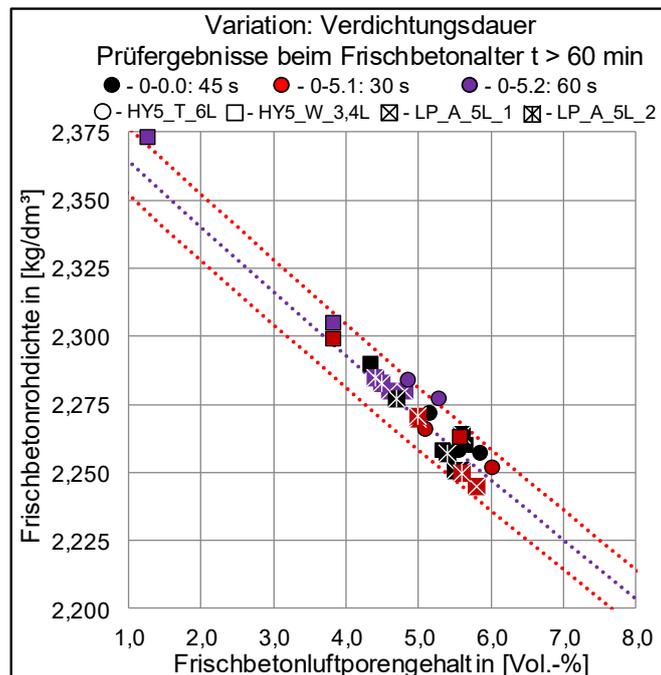


Bild 6-18: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungsdauer“ ( $t > 10$  min)

Tab. 6-17 gibt die rechnerisch ermittelten Differenzen zwischen gemessenen Ist- und rechnerischen Soll-Werten der betrachteten Frischbetonkenndaten wieder. Beim Vergleich der Daten ist zu erkennen, dass die Streuungen zum zweiten Prüfzeitpunkt bei der Versuchsreihe 0-5.1 (30 s) und 0-0.0 (45 s) beim Einsatz eines beliebigen Prüfgerätes ähnliche Messwertabweichungen innerhalb des Toleranzbereiches aufweisen. Die höchste Abweichung des FB-Luftporengehaltes beträgt hierbei 0,31 Vol.-%.

Tab. 6-17: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Verdichtungsdauer“ ( $t > 60$  min)

Versuchsreihe	Variation: Verdichtungsdauer Probenalter $t > 60$ min		HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
1	2	3	4	5	6	7
0-0.0	Abweichung vom rechn. Soll-Wert	$\rho$ in [kg/m <sup>3</sup> ]	1 - 7	4 - 5	4 - 8	1 - 7
0-5.1			1 - 6	3 - 7	0 - 7	1 - 6
0-5.2			11 - 14	9 - 16	1 - 6	2
0-0.0		LP-Gehalt in [Vol.-%]	0,04 - 0,31	0,18 - 0,22	0,18 - 0,35	0,04 - 0,31
0-5.1			0,04 - 0,27	0,13 - 0,31	0,00 - 0,31	0,04 - 0,27
0-5.2			0,48 - 0,61	0,39 - 0,67	0,04 - 0,26	0,09

Bei der Wahl einer Verdichtungszeit von 60 s ist ein deutlicher Anstieg der Messwertdifferenzen unter Einsatz der HYDRO\_5-Prüfgeräte zu verzeichnen. Die überwiegende Anzahl der Messwerte unter Einsatz der betrachteten HYDRO\_5-Prüfgeräte liegt außerhalb des Toleranzbereiches. Hierbei wurden Messwertabweichungen des FB-Luftporengehaltes von bis zu 0,67 Vol.-% festgestellt. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass ein verlängertes Rütteln der Frischbetonproben zum zweiten Prüfzeitpunkt von  $t > 60$  min sowohl zu einer stärkeren Streuung der Messwerte als auch zu höheren Ungenauigkeiten beim Einsatz der HYDRO\_5-Prüfgeräte führen kann. Zu vermuten ist, dass zum zweiten Prüfzeitpunkt eine Schaumbildung auf der Frischbetonoberfläche aufgrund des längeren Verdichtens in der HYDRO\_5-Prüftechnik entstand, die anders als bei den konventionellen LP-Töpfen während der Prüfung im Prüfbehälter

verblieb. Dies könnte zu leicht höheren LP-Messwerten im Vergleich zur gemessenen Ist-Frischbetonroh-  
dichte geführt haben und somit die höhere Messwertabweichung begünstigt haben.

#### 6.4.7 Einfluss des Einfüllprozesses des Wassers auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit

Bei den konventionellen LP-Töpfen unter Anwendung des Druckausgleichsverfahrens wird Wasser als Me-  
dium zum Ausfüllen des Zwischenraums zwischen Deckel und verdichteter Frischbetonoberkante über ein  
Einfüllventil eingefüllt. Über ein zweites geöffnetes Ventil läuft dabei überschüssiges Wasser heraus, bis  
es luftblasenfrei ist. Hierbei ist es dem Benutzer überlassen, ob das Wasser kontrolliert und langsam, ohne  
starkes Einpressen in das Prüfgerät eingefüllt wird, oder das Befüllen unter hohem, unkontrolliertem Ein-  
pressdruck erfolgt. Im zweiten Fall besteht die Gefahr, dass durch das Einpressen des Wassers zusätzliche  
Luft in das geschlossene Prüfgefäß eingebracht und somit ein vollständiges Entlüften verhindert wird. Die  
auf diese beschriebene Weise zusätzlich eingeführten Luftblasen würden den zu messenden FB-Luftpo-  
rengehalt entsprechend verfälschen. Um den Einfluss des Einfüllprozesses des Wassers auf den Frisch-  
beton-Luftporengehalt und dessen Messwertbildung zu untersuchen, wurden zwei Versuchsreihen mit der  
Messung betrachteter FB-Kennwerte durchgeführt. Bei der Referenzversuchsreihe 0-0.0 wurde das Was-  
ser kontrolliert und langsam über das Einfüllventil zugegeben, bis das Entlüften abgeschlossen war. Bei  
der Versuchsreihe 0-6.1 erfolgte ein unkontrolliertes Einpressen des Wassers über das Einfüllventil des  
LP-Topfes, bis das erste Wasser aus dem gegenüberliegenden Ventil ausgetreten war.

Die bei beiden Versuchsreihen gewonnenen FB-Kenndaten sind nach dem jeweiligen Prüfzeitpunkt unter-  
teilt in zwei Diagrammen in Bild 6-19 und Bild 6-20 dargestellt. Die dazugehörigen ermittelten Messwertab-  
weichungen von dem entsprechenden Soll-Wert sind in den Tab. 6-18 bis Tab. 6-19 angegeben.

#### Versuchsergebnisse zum Prüfzeitpunkt von $t > 10$ min

Anhand der abgebildeten Messwerte in Bild 6-19 ist kein Einfluss des Einfüllprozesses des Wassers auf  
die FB-Kennwerte zu erkennen.

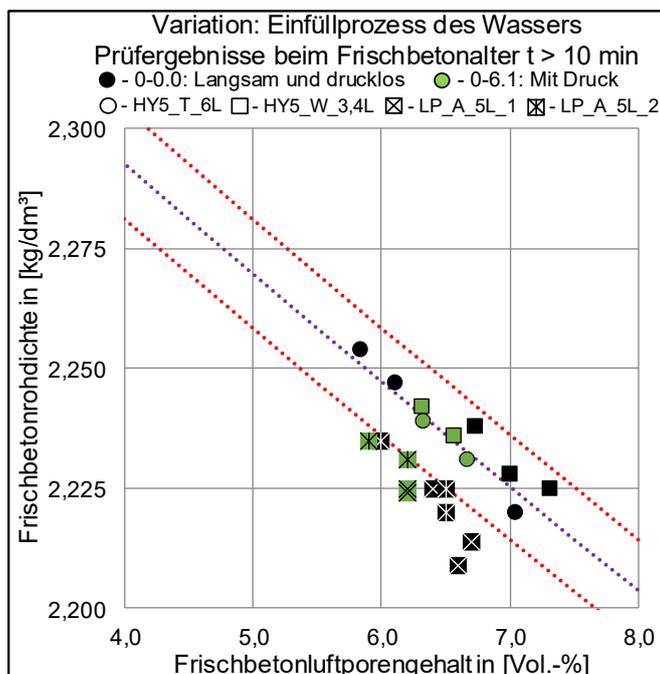


Bild 6-19: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Einfüllprozess“ ( $t > 10$  min)

Insgesamt weisen die ermittelten Kennwerte der Versuchsreihe 0-6.1 zum ersten Prüfzeitpunkt von  $t > 10$  min eine deutlich geringere Streuung als die Kennwerte der Referenzversuchsreihe 0-0.0 auf. Die gemessenen FB-Luftporengehalte der Versuchsreihe 0-6.1 liegen in einem Bereich zwischen ca. 5,9 und 6,8 Vol.-% und somit in dem Streubereich der Referenzversuchsreihe 0-0.0. Werden die gemessenen FB-Rohdichten betrachtet, so liegen die Messwerte der Versuchsreihe 0-6.1 ebenfalls im Streubereich der Referenzversuchsreihe 0-0.0. Ein deutlicher Unterschied der gemessenen Frischbetonkenndaten ist in dem vorliegenden Vergleich nicht zu beobachten.

Tab. 6-18: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Einfüllprozess“ ( $t > 10$  min)

Versuchsreihe	Variation: Einfüllprozess des Wassers Probenalter $t > 10$ min		HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
1	2	3	4	5	6	7
0-0.0	Abweichung vom rechn. Soll-Wert	$\rho$ in [kg/m <sup>3</sup> ]	2 - 4	3 - 7	13 - 25	11 - 16
0-6.1			1	1 - 2	18 - 19	12 - 14
0-0.0		LP-Gehalt in [Vol.-%]	0,09 - 0,13	0,13 - 0,31	0,58 - 1,13	0,49 - 0,72
0-6.1			0,04	0,04 - 0,09	0,81 - 0,85	0,54 - 0,63

Die Abweichung der gemessenen Ist-Werte vom rechnerischen Soll-Wert der im Vergleich betrachteten FB-Kenndaten ist tabellarisch in Tab. 6-18 zusammengefasst. Es wird ersichtlich, dass zum Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min die Variation des Einfüllprozesses, welcher ausschließlich bei den konventionellen LP-Töpfen eingesetzt wurde, kaum Einfluss auf die Messwertbildung ausübt. Die Messwerte liegen außerhalb des Toleranzbereiches mit ähnlichen Differenzen zum Soll-Wert. Es liegt eine Unterschätzung des FB-Luftporengehaltes durch den Einsatz der LP-Töpfe von ca. 0,5 bis 1,1 Vol.-% vor. Es ist zu vermuten, dass aufgrund der streng kontrollierten Einfüllmethode des Wassers unter Druck mit stets voll aufgefüllten Spritzflaschen kaum Luft eingetragen wurde. Grundsätzlich könnte es aufgrund von halbgefüllten Spritzflaschen oder unsachgemäßem Bedienen zu ungewolltem Lufteintrag ins Messmedium und somit zur Beeinflussung des Messwerts kommen.

### Versuchsergebnisse zum Prüfzeitpunkt von $t > 60$ min

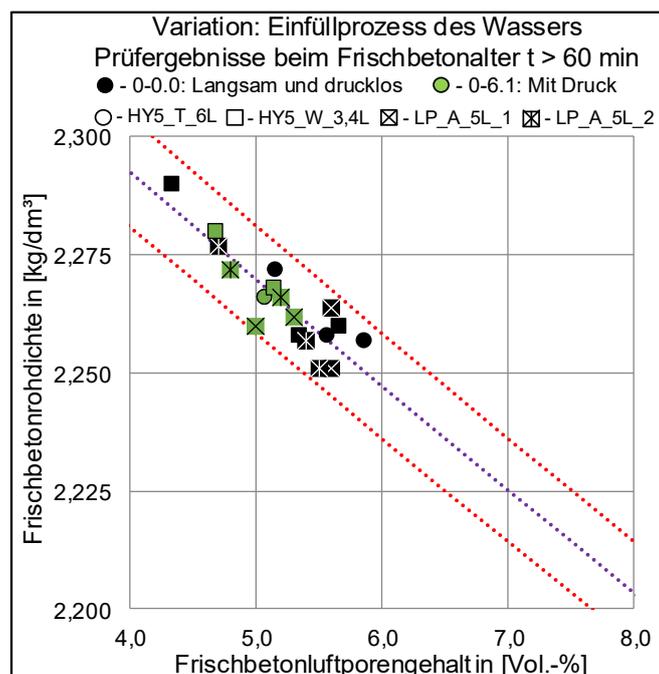


Bild 6-20: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Einfüllprozess“ ( $t > 60$  min)

Zum zweiten Prüfzeitpunkt von  $t > 60$  min ist ein ähnlicher Anstieg der FB-Rohdichten und somit eine Reduktion des FB-Luftporengehaltes bei den beiden betrachteten Versuchsreihen zu verzeichnen.

Die vorliegenden FB-Messwerte der Versuchsreihe 0-6.1 liegen zum zweiten Prüfzeitpunkt ebenfalls in dem Streubereich der Referenzversuchsreihe 0-0.0. Somit ist ein Einfluss des Einfüllprozesses des Wassers auf den Frischbeton-Luftporengehalt zum zweiten Prüfzeitpunkt ebenfalls nicht zu erkennen.

Tab. 6-19: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Einfüllprozess“ ( $t > 60$  min)

Versuchsreihe	Variation: Einfüllprozess des Wassers Probenalter $t > 60$ min		HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
1	2	3	4	5	6	7
0-0.0	Abweichung vom rechn. Soll-Wert	$\rho$ in [kg/m <sup>3</sup> ]	1 - 7	4 - 5	4 - 8	1 - 7
0-6.1			2	2 - 3	1 - 10	1 - 2
0-0.0		LP-Gehalt in [Vol.-%]	0,04 - 0,31	0,18 - 0,22	0,18 - 0,35	0,04 - 0,31
0-6.1			0,09	0,09 - 0,13	0,04 - 0,44	0,04 - 0,09

Bei der Betrachtung der Lage der Messwerte zu der Soll-Wert-Kurve liegen diese innerhalb des angegebenen Toleranzbereichs. Geringfügig genauer sind die Messwerte der Versuchsreihe 0-6.1 im Vergleich zu den Abweichungen der Referenzversuchsreihe 0-0.0 (vgl. Tab. 6-19). Die Reduktion der Messwertdifferenz bei der Versuchsreihe 0-6.1 zum jeweiligen rechnerischen Soll-Wert wird jedoch beim Einsatz aller LP-Prüfgeräte beobachtet. Da die Variation des Einfüllprozesses des Wassers ausschließlich beim Einsatz der konventionellen LP-Töpfe stattfand, war zu erwarten, dass eine Veränderung der Messwertdifferenzen ausschließlich bei den vorliegenden LP-Töpfen zu beobachten sein wird.

Durch das Auftreten der Reduktion aller Messwertdifferenzen in der Versuchsreihe 0-6.1 ist davon auszugehen, dass diese nicht von der Variation des Prüfregimes der LP-Töpfe ausgelöst wurde. Somit ist ein deutlicher Einfluss der Variation des Einfüllprozesses des Wassers auf die Messwertbildung bei den LP-Töpfen bei der Betrachtung vorliegender Messdaten nicht bestätigt. Die vorliegenden Messergebnisse könnten auf das geringe Alter und den nahezu schadenfreien Betrieb der Prüftechnik zurückzuführen sein. Ein schonender Umgang mit der Prüftechnik sowie präzises Arbeiten während des Versuchsablaufs führten dazu, dass die Einlassöffnungen der konventionellen LP-Töpfe stets sauber gehalten wurden. Das Einfüllen des Wassers erfolgte durch die sauberen Einlassöffnungen mit kontrolliertem Einpressdruck. Zudem wurde stets darauf geachtet, dass die Einfüllflasche vor jedem Versuchsablauf blasenfrei und vollständig aufgefüllt wurde, wodurch ungewollte Lufteinträge durch möglicherweise halb gefüllte Einfüllflaschen vermieden wurden. Ohne Beachtung der genannten Einfüllbedingungen könnte es zu ungewolltem Lufteintrag in das Prüfmedium kommen.

#### 6.4.8 Einfluss der Frischbeton-Temperatur auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messwertgenauigkeit

Witterungs- und jahreszeitlich bedingt ist davon auszugehen, dass in der Praxis der Frischbeton bei der Anlieferung und während des Einbaus eine unterschiedliche Frischbeton-Temperatur aufweist. Die Frischbeton-Temperatur beeinflusst die Frisch- und Festbetoneigenschaften deutlich. Um den Einfluss der Frischbeton-Temperatur explizit auf die Luftporenbildung sowie auf die anschließende Messwertbildung bei der Bestimmung der Frischbetoneigenschaften zu quantifizieren, wurde der Frischbeton in insgesamt vier Versuchsreihen auf ein definiertes FB-Temperaturniveau vortemperiert. Hierzu erfolgte das Vortemperieren der Bestandteile des Frischbetons vor dem Mischen in einem Klimaschrank. Nach dem Herstellen und Verdichten des Frischbetons in die jeweiligen Prüfgefäße erfolgte ein unmittelbares Transportieren der gefüllten Prüfgefäße und Frischbetonreste in einen vortemperierten Klimaraum. Dort erfolgten die anschlie-

ßenden Messungen der betrachteten FB-Kenndaten zu festgelegten Prüfzeitpunkten. Bei der Referenzversuchsreihe 0-0.0 erfolgten das Herstellen und Prüfen der drei Chargen des Frischbetons ohne Vortemperieren unter den Laborklimabedingungen von 20 °C. Drei Chargen der Versuchsreihe 0-7.1 wurden auf 10 °C temperiert. Jeweils zwei Frischbetonchargen der Versuchsreihen 0-7.2 und 0-7.3 wurden auf 30 °C (0-7.2) und auf 40 °C (0-7.3) temperiert. Die ermittelten Messwerte der betrachteten Frischbeton-Untersuchungen sind Bild 6-21 und Bild 6-22 zu entnehmen. Tab. 6-20 bzw. Tab. 6-21 geben die errechneten zugehörigen Messwertabweichungen der ermittelten Kenndaten zum Soll-Wert an.

### Versuchsergebnisse zum Prüfzeitpunkt von $t > 10$ min

In Bild 6-21 ist eine deutliche Abstufung der ermittelten FB-Kennwerte in Abhängigkeit der eingestellten FB-Temperatur zu beobachten. Im Vergleich werden die höchsten FB-Luftporengehalte bei den kältesten Frischbetonen der Versuchsreihe 0-7.1 überwiegend in einem Wertebereich von 6,8 Vol.-% und 8,1 Vol.-% und FB-Rohdichten von unter 2,215 kg/dm<sup>3</sup> festgestellt. Die LP-Gehalte der Referenzversuchsreihe 0-0.0 bei einer FB-Temperatur von 20 °C weisen erwartungsgemäß etwas geringere FB-Luftporengehalte zwischen 5,8 Vol.-% und 7,4 Vol.-% auf. Bei einer Temperatur des Frischbetons von ca. 30 °C zeigen die Messwerte der Versuchsreihe 0-7.2 einen weiteren Anstieg der FB-Rohdichte und dementsprechend eine erwartungsgemäße Reduzierung der FB-Luftporengehaltes.

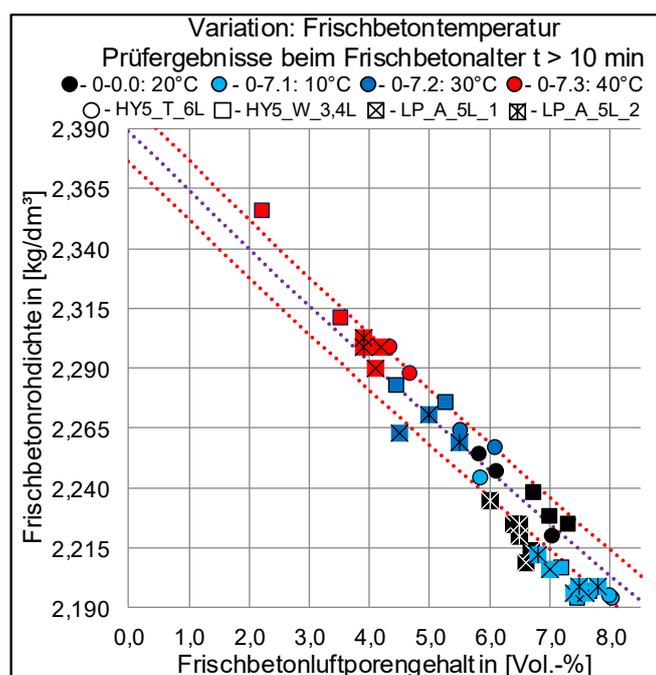


Bild 6-21: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „FB-Temperatur“ ( $t > 10$  min)

Hierbei ergaben die Messungen der FB-Luftporengehalte des wärmeren Frischbetons Werte von 4,5 Vol.-% bis 6,1 Vol.-%. Die niedrigsten LP-Messwerte wurden aufgrund der betontechnologischen Einflüsse (z. B. höherer Hydratationsgeschwindigkeit) erwartungsgemäß bei 40 °C warmen Frischbeton festgestellt. Die überwiegende Anzahl der betrachteten Messwerte liegt hierbei zwischen 3,5 Vol.-% und 4,7 Vol.-%. Anhand der eindeutigen Lage der Messwerte in Abhängigkeit von der FB-Temperatur ist hierbei ein deutlicher Einfluss auf den FB-Luftporengehalt zu erkennen.

Anhand der ausgewerteten Daten in Tab. 6-20 und der zu beobachtenden Verschiebung der Lage der Messpunkte in dem Diagramm in Bild 6-21 ist ein Einfluss der gewählten FB-Temperatur auf die Messwertgenauigkeit zu bestätigen. Bei den Auswertungen zu den Messergebnissen der LP-Gehalte bei Betonen mit einer Temperatur von ca. 10 °C wurde überwiegend eine Unterschätzung der FB-Luftporengehalte bis

ca. 1 Vol.-% festgestellt. Steigt die gewählte FB-Temperatur, so ist eine Verschiebung der Datenpunkte der HYDRO\_5-Messgeräte zu der rechnerisch bestimmten Soll-Wert-Kurve zu beobachten. Bei weiter steigender Temperatur ist eine geringfügige bis mäßige Überschätzung des FB-Luftporengehaltes beim Einsatz der HYDRO\_5-Prüftechnik festzustellen. Die überwiegende Anzahl der gewonnenen Messwerte der konventionellen LP-Töpfe weist eine höhere Präzision im Vergleich zu den Daten aus den Versuchsreihen 0-0.0 und 0-7.1 auf. Bei der Messung der FB-Kennwerte des ca. 40 °C warmen Frischbetons ist eine geringfügige bis deutliche Überschätzung der FB-Luftporengehalte bei der gesamten zum Einsatz gekommenen Prüftechnik festzustellen. Die Messwerte der konventionellen LP-Töpfe liegen hierbei im Toleranzbereich. Eine starke Abweichung der Messwerte wurde bei einer Messung mit dem HYDRO\_5\_W\_3,4L festgehalten.

Tab. 6-20: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „FB-Temperatur“ (t > 10 min)

Versuchsreihe	Variation: Frischbeton-Temperatur Probenalter t > 10 min		HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
1	2	3	4	5	6	7
0-0.0	Abweichung vom rechn. Soll-Wert	ρ in [kg/m³]	2 - 4	3 - 7	13 - 25	11 - 16
0-7.1			6 - 9	14 - 21	16 - 20	9 - 18
0-7.2			6 - 12	1 - 13	1 - 18	1
0-7.3			11 - 14	7 - 21	0 - 11	4 - 8
0-0.0		LP-Gehalt in [Vol.-%]	0,09 - 0,13	0,13 - 0,31	0,58 - 1,13	0,49 - 0,72
0-7.1			0,27 - 0,41	0,63 - 0,96	0,73 - 0,91	0,41 - 0,81
0-7.2			0,27 - 0,53	0,04 - 0,57	0,04 - 0,80	0,04
0-7.3			0,48 - 0,61	0,30 - 0,89	0,00 - 0,48	0,17 - 0,35

Zusammenfassend ist hierbei zu erkennen, dass mit steigender FB-Temperatur eine kontinuierliche Verschiebung der Messgenauigkeit aller Prüfgeräte entlang der Soll-Wert-Kurve zu beobachten ist. Das Verhalten der Prüftechnik bzw. die vorliegende Messwertbildung könnte durch den steigenden thermischen Einfluss auf die Messtechnik mit zunehmender Umgebungs- und Materialtemperatur begründet sein. Durch das Temperieren wurden die sommerlichen Temperaturen simuliert. Dabei erfolgte die Vortemperierung der Bestandteile vor der Betonage (Zement, Gesteinskörnung, Zugabewasser usw.). Zudem wurden alle Bestandteile der Prüftechnik, der hergestellte Frischbeton sowie die dazugehörigen Untersuchungsutensilien (z. B. das während der Prüfung verwendete Zugabewasser in der Prüftechnik) auf die festgelegten Temperaturgradienten vor und während der Versuchsabläufe temperiert. Die Messwertabweichungen der konventionellen Prüftechnik könnten auf die Beeinflussung der Manometeranzeige (Glycerin als Manometerflüssigkeit) durch die Temperaturveränderung zurückzuführen sein. Bei der HYDRO\_5-Prüftechnik werden bei der Berechnung der Messergebnisse sowohl die Änderung der Dichte des verwendeten Wassers während des Versuchs als auch die mögliche geringe Ausdehnung des Prüfbehälters durch Temperaturanpassung ebenfalls als potenzielle Störfaktoren außer Acht gelassen. Die Überlappung solcher Effekte der thermischen Dehnung und der Änderung der Dichte des Wassers könnte die gestiegene Messwertabweichung (deutliche Überschätzung) des Luftporengehaltes im Frischbeton erklären.

### Versuchsergebnisse zum Prüfzeitpunkt von t > 60 min

Die beim zweiten Prüfzeitpunkt gewonnenen FB-Kennwerte zeigen in Bild 6-22 eine erwartungsgemäße Reduktion der gemessenen FB-Luftporengehalte durch die vorangetriebene Hydratation bei allen betrachteten Versuchsreihen.

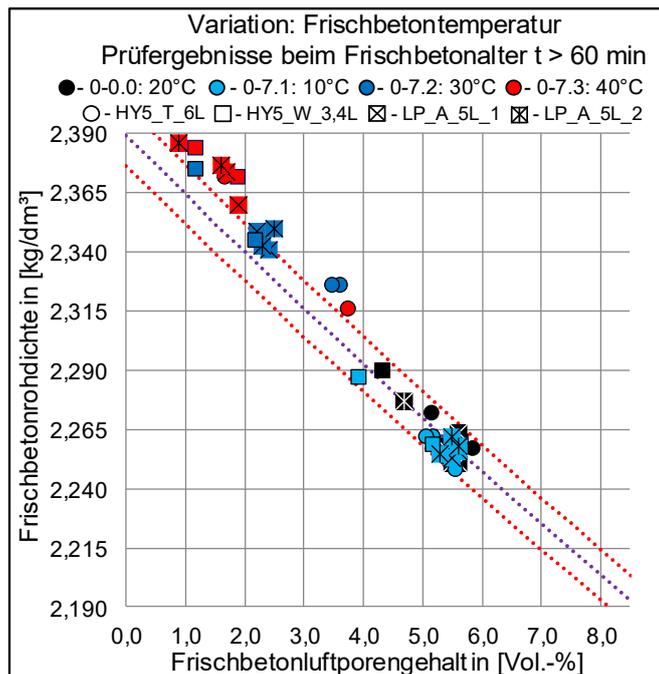


Bild 6-22: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „FB-Temperatur“ ( $t > 60$  min)

Es ist festzustellen, dass die Messdaten der Versuchsreihen 0-0.0 (20 °C) und 0-7.1 (10 °C) in einem Messwertbereich und zudem innerhalb der Toleranzgrenzen liegen. Stark zurückgegangene FB-Luftporengehalte wurden demnach zum zweiten Prüfzeitpunkt bei den Versuchsreihen 0-7.2 (30 °C) und 0-7.3 (40 °C) beobachtet. Die überwiegende Anzahl der ermittelten FB-Luftporengehalte der Versuchsreihe 0-7.3 liegen zwischen 2,2 Vol.-% und 3,6 Vol.-%. Das entspricht einer Reduktion des FB-Luftporengehaltes zwischen den zwei Prüfzeitpunkten im Schnitt von ca. 2,8 Vol.-%. Ein Verlust des FB-Luftporengehaltes im Schnitt von ca. 2,0 Vol.-% ist bei den Messwerten der Versuchsreihe 0-7.3 innerhalb der zwei Prüfzeitpunkte zu beobachten. Hierbei liegt die überwiegende Anzahl der Messwerte zwischen 0,9 und 1,9 Vol.-%.

Tab. 6-21: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „FB-Temperatur“ ( $t > 60$  min)

Versuchsreihe	Variation: Frischbeton-Temperatur Probenalter $t > 60$ min		HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2
1	2	3	4	5	6	7
0-0.0	Abweichung vom rechn. Soll-Wert	$\rho$ in [kg/m <sup>3</sup> ]	1 - 7	4 - 5	4 - 8	1 - 7
0-7.1			4 - 9	6 - 7	0 - 5	2 - 8
0-7.2			22 - 24	10 - 15	11 - 14	10 - 22
0-7.3			18 - 24	24 - 29	18 - 27	19 - 27
0-0.0		LP-Gehalt in [Vol.-%]	0,04 - 0,31	0,18 - 0,22	0,18 - 0,35	0,04 - 0,31
0-7.1			0,18 - 0,40	0,27 - 0,31	0,00 - 0,22	0,09 - 0,35
0-7.2			0,95 - 1,03	0,43 - 0,63	0,47 - 0,60	0,43 - 0,94
0-7.3			0,78 - 1,01	1,01 - 1,22	0,76 - 1,14	0,80 - 1,14

Die Messwertdifferenzen zwischen den gemessenen Ist-Werten zu der rechnerisch bestimmten Soll-Wert-Kurve zeigen laut Tab. 6-21 Veränderungen der Messwertabweichungen im Vergleich zu den Daten zum ersten Prüfzeitpunkt. Die Messungen bei den Versuchsreihen 0-0.0 (20 °C) und 0-7.1 (10 °C) liegen alle in dem festgelegten Toleranzbereich und weisen unabhängig von der gewählten Prüftechnik ähnlich geringe

Messwertabweichungen auf. Bei warmen Frischbetonen ist eine starke Überschätzung der FB-Luftporengehalte zu beobachten. Bei einer FB-Temperatur von 40 °C werden die stärksten Messwertabweichungen von bis zu 1,2 Vol.-% festgehalten.

Bei der Betrachtung der Versuchsergebnisse zum zweiten Prüfzeitpunkt ist ein starker Einfluss der FB-Temperaturen von über 20 °C auf den FB-Luftporengehalt und die Messwertgüte zu beobachten. Bei der geringeren FB-Temperatur (10 °C) sind hingegen ähnliche FB-Messwerte sowie ähnliche Abweichungen zu den rechnerischen Soll-Werten festzustellen. Die Überlagerung der rechnerisch nicht erfassten Einflüsse der Dichteveränderung des Wassers, der thermischen Dehnung der Prüfbehälter und der Einfluss auf die Manometerflüssigkeit der konventionellen LP-Töpfe, zusammen mit der weit vorangeschrittenen Hydratation der Probe aufgrund der eingestellten thermischen Einwirkung, könnten für die vorliegenden Messwertabweichungen verantwortlich sein.

Eine zusammengefasste Übersicht in tabellarischer Form der jeweiligen Einflussgröße der betrachteten Variationen des Prüfregimes auf den Frischbeton-Luftporengehalt und deren Messgüte ist dem Kapitel 6.4.9 zu entnehmen.

#### **6.4.9 Zusammenfassung**

Eine Wichtung zum Einfluss des Prüfregimes auf den FB-Luftporengehalt und dessen Messgenauigkeit in Abhängigkeit von Variationsparameter und Prüfzeitpunkt geben Tab. 6-22 und Tab. 6-23. Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit von der verwendeten Prüftechnik zur Ermittlung der FB-Kenndaten sortiert. Hierbei sind die Mittelwerte der Messergebnisse durch Einsatz der HYDRO\_5-Prüftechnik (HYDRO\_5\_T\_6L und HYDRO\_W\_3,4L) bzw. der konventionellen LP-Töpfe in der jeweiligen Versuchsreihe eingetragen. Die Ausreißer, welche zur Mittelwertbildung nicht herangezogen wurden, sind mit Klammern gekennzeichnet. Für die Wichtung der Abweichungen der einzelnen Prüfregimevariationen im Vergleich zu der Referenzversuchsreihe 0-0.0 sind die gemessenen Ist-Mittelwerte des erreichten FB-Luftporengehaltes (Spalte 4 bzw. 5) sowie die Mittelwerte der errechneten Abweichungen zum jeweiligen rechnerisch bestimmten Soll-Wert (Spalte 8 bzw. 9) angegeben. Erklärungen zur Wichtung sind der Legende der Tab. 6-22 und Tab. 6-23 zu entnehmen.

Die Vorverdichtung des Frischbetons vor dem eigentlichen Verdichtungsprozess auf dem Rütteltisch zeigt einen bedeutenden Einfluss auf die Bildung des FB-Luftporengehalts. Der FB-Luftporengehalt reduziert sich durchschnittlich um ca. 1 Vol.-%. Unter Einsatz der konventionellen LP-Töpfe wurde eine Reduktion der Messwertabweichung von 0,71 Vol.-% bei der unverdichteten Probe auf 0,31 Vol.-% bei der vorverdichteten Probe festgestellt. Zum zweiten Prüfzeitpunkt fiel der Effekt der Vorverdichtung auf die Messwertbildung des LP-Gehalts bei den konventionellen LP-Töpfen geringer aus.

Der Vergleich zwischen den verschiedenen Verdichtungsverfahren (Rütteltisch, Innenrüttler) zeigt meist geringfügig niedrigere LP-Gehalte nach der Innenrüttlerverdichtung.

Die Durchführung der Verdichtung in drei bzw. vier Lagen zu beiden Prüfzeitpunkten führt zu einer bedeutenden bis starken FB-Luftporengehaltsreduktion und begünstigt im frühen Frischbetonalter die Messwertgenauigkeit bedeutend. Es besteht die Möglichkeit, dass durch das Verdichten mit einer höheren Anzahl von Lagen eine Überverdichtung auftritt, wodurch Luftporen aus der Frischbetonmatrix entweichen könnten. Zudem könnten bei Verwendung dünnerer Verdichtungslagen Luftporen in höhere Schichten wandern und trotz niedrigerem Prüfdruck von der Prüftechnik umfassender erfasst werden.

Die Erhöhung der Verdichtungsintensität wirkte sich deutlich reduzierend auf den FB-Luftporengehalt aus. Eine geringe Optimierung der Messwertgenauigkeit beim Einsatz der LP-Töpfe ist durch die Erhöhung der Verdichtungsintensität zu beobachten. Die Intensität der Einwirkung auf die Luftporen bei steigender Verdichtungsenergie könnte für die vorliegende Entwicklung des FB-Luftporengehalts verantwortlich sein.

(Überverdichtung). Mit zunehmender Verdichtungsintensität besteht die Möglichkeit, dass Luftporen aus den unteren Schichten der frisch hergestellten Probe stärker in die obere Schicht getrieben werden. Eine höhere Verdichtungsintensität könnte die Bildung größerer Verdichtungsporen nahezu vollständig verhindern, was den Rückgang des Gesamtluftporengehalts erklärt. Die aufgetriebenen Luftporen im Frischbeton würden durch den geringeren Druck der konventionellen LP-Töpfe in der oberen Schicht mit höherer Rate erfasst. Zum zweiten Prüfzeitpunkt ist eine geringfügige (bis zu  $\Delta$  LP-Gehalt von 1,0 Vol.-%) bis bedeutende (bis zu  $\Delta$  LP-Gehalt von 2,0 Vol.-%) Wirkung bei der Anpassung der Verdichtungsintensität festzustellen.

Die Anpassung der Verdichtungszeit von 45 s je Lage auf 30 bzw. 60 s erwies sich zum ersten Prüfzeitpunkt als überwiegend einflusslos. Zum zweiten Prüfzeitpunkt erzeugte das längere Verdichten eine Reduktion des FB-Luftporengehalts um ca. 1 Vol.-%.

Tab. 6-22: Zusammenfassung - Einfluss des Prüfregimes auf FB-Luftporengehalt; Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min

ID	Prüfregimevariation		FB-Luftporengehalt; Prüfzeitpunkt: $t > 10$ min				Messwertgenauigkeit; Prüfzeitpunkt: $t > 10$ min			
			Gem. Ist-Mittelwert in [Vol.-%]		Wichtung		Abweichung in [Vol.-%]		Wichtung	
			HY5	LP_A_5L	HY5	LP_A_5L	HY5	LP_A_5L	HY5	LP_A_5L
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0-0.0	Proben- zustand	Unverdichtet	6,68	6,45	-		0,19	0,71	-	
0-1.1		Vorverdichtet	5,62	5,48	++	++	0,12	0,30	o	+
0-0.0	Verdichtungsart	mit Rütteltisch	6,68	6,45	-		0,19	0,71	-	
0-2.1		mit Innenrüttler	6,54	5,83	o	+	0,09	0,95	o	o
0-0.0	Verdichtungs- ablauf	in 2 Lagen	6,68	6,45	-		0,19	0,71	-	
0-3.1		in 3 Lagen	4,84	4,75	++	++	0,09	0,12	o	++
0-3.2		in 4 Lagen	4,36	4,43	+++	+++	0,09	0,13	o	++
0-0.0		4500 U/min [75 Hz]	6,68	6,45	-		0,19	0,71	-	
0-4.1		3000 U/min [50 Hz]	6,95 (5,80)	6,65	o	o	0,27 (5,43)	0,87	o	o
0-4.2		6000 U/min [100 Hz]	5,38	5,30	++	++	0,13	0,26	o	+
0-0.0		45 s verdichten	6,68	6,45	-		0,19	0,71	-	
0-5.1		30 s verdichten	6,97	6,40	o	o	0,08	0,69	o	o
0-5.2		60 s verdichten	6,31	5,78	o	+	0,09	0,56	o	o
0-0.0		Einfüllprozess des Wassers	langsam	6,68	6,45	-		0,19	0,71	-
0-6.1	mit Druck		6,47	6,13	o	o	0,06	0,71	o	o
0-0.0	Frischbeton- Temperatur	20°C	6,68	6,45	-		0,19	0,71	-	
0-7.1		10°C	7,38	7,35	+	+	0,55	0,73	+	o
0-7.2		30°C	5,35	5,13	++	++	0,35	0,23	o	+
0-7.3		40°C	3,70	4,03	+++	+++	0,57	0,25	+	+

Legende: Daten der Referenzversuchsreihe 0-0.0

Luftporengehalt: o – bis  $\Delta$  0,5 Vol.-% – "kaum"; + – bis  $\Delta$  1,0 Vol.-% – "gering"  
Luftporengehalt: ++ – bis  $\Delta$  2,0 Vol.-% – "bedeutend" ++ + – ab  $\Delta$  2,0 Vol.-% – "stark"  
Messwertgenauigkeit: o – bis  $\Delta$  0,25 Vol.-% – "kaum"; + – bis  $\Delta$  0,5 Vol.-% – "gering"  
Messwertgenauigkeit: ++ + – bis  $\Delta$  0,75 Vol.-% – "bedeutend" ++ + + – ab  $\Delta$  0,75 Vol.-% – "stark"

Die Variation der Wasserzugabe bei den LP-Töpfen zeigten kaum einen Einfluss auf den FB-Luftporengehalt und auf die Messwertgenauigkeit.

Bei der Frischbeton-Temperatur von 10 °C erhöhte sich zum ersten Prüfzeitpunkt der gemessene LP-Gehalt um bis zu 1 Vol. %. Zum zweiten Prüfzeitpunkt ist der Einfluss gering. Wird der Frischbeton jedoch erwärmt, so sind bedeutende bis starke Reduktionen des FB-Luftporengehalts zu beiden Prüfzeitpunkten

zu beobachten. Die Differenz zwischen den gemessenen Werten und den jeweiligen rechnerisch ermittelten Sollwerten stieg beim Einsatz der HYDRO\_5-Prüftechnik, nahm jedoch beim Einsatz der LP-Töpfe ab. Verantwortlich hierfür könnte möglicherweise der thermische Einfluss der Veränderung der Umgebungs- und Betontemperatur auf die Prüftechnik sein, welcher technisch, bzw. rechnerisch nicht berücksichtigt wird. Zum zweiten Prüfzeitpunkt verstärkte sich der Einfluss auf den FB-Luftporengehalt und die Messwertgenauigkeit durch das Erwärmen des Frischbetons.

Tab. 6-23: Zusammenfassung - Einfluss des Prüfregimes auf FB-Luftporengehalt; Prüfzeitpunkt t > 60 min

ID	Prüfregimevariation		FB-Luftporengehalt; Prüfzeitpunkt: t > 60 min				Messwertgenauigkeit; Prüfzeitpunkt: t > 60 min			
			Gem. Ist-Mittelwert in [Vol.-%]		Wichtung		Abweichung in [Vol.-%]		Wichtung	
			HY5	LP_A_5L	HY5	LP_A_5L	HY5	LP_A_5L	HY5	LP_A_5L
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0-0.0	Proben- zustand	Unverdichtet	5,32	5,37	-		0,21	0,21	-	
0-1.1		Vorverdichtet	4,27 (4,44)	4,77 (2,50)	++	+	0,24 (5,74)	0,42 (2,07)	o	o
0-0.0	Verdichtungsart	mit Rütteltisch	5,32	5,37	-		0,21	0,21	-	
0-2.1		mit Innenrüttler	5,69	5,05	o	o	0,14	0,52	o	+
0-0.0	Verdichtungs- ablauf	in 2 Lagen	5,32	5,37	-		0,21	0,21	-	
0-3.1		in 3 Lagen	2,94	3,45	+++	++	0,11	0,23	o	o
0-3.2		in 4 Lagen	3,06	3,75	+++	++	0,15	0,16	o	o
0-0.0		4500 U/min [75 Hz]	5,32	5,37	-		0,21	0,21	-	
0-4.1		3000 U/min [50 Hz]	4,42 (3,69)	4,75	++	+	0,28 (13,24)	0,24	o	o
0-4.2		6000 U/min [100 Hz]	4,60	4,00	+	++	0,26	0,17	o	o
0-0.0		45 s verdichten	5,32	5,37	-		0,21	0,21	-	
0-5.1		30 s verdichten	5,14	5,35	o	o	0,19	0,16	o	o
0-5.2		60 s verdichten	3,82	4,58	++	+	0,54	0,12	+	o
0-0.0		Einfüllprozess des Wassers	langsam	5,32	5,37	-		0,21	0,21	-
0-6.1	unter Druck		4,99	5,08	o	o	0,10	0,15	o	o
0-0.0	Frischbeton- Temperatur	20°C	5,32	5,37	-		0,21	0,21	-	
0-7.1		10°C	5,07	5,50	o	o	0,28	0,16	o	o
0-7.2		30°C	2,62	2,35	+++	+++	0,76	0,61	++	+
0-7.3		40°C	2,12	1,53	+++	+++	1,00	0,96	+++	+++

Legende: Daten der Referenzversuchsreihe 0-0.0

Luftporengehalt:	o – bis $\Delta$ 0,5 Vol.-% – "kaum";	+ – bis $\Delta$ 1,0 Vol.-% – "gering"
Luftporengehalt:	++ – bis $\Delta$ 2,0 Vol.-% – "bedeutend"	+++ – ab $\Delta$ 2,0 Vol.-% – "stark"
Messwertgenauigkeit:	o – bis $\Delta$ 0,25 Vol.-% – "kaum";	+ – bis $\Delta$ 0,5 Vol.-% – "gering"
Messwertgenauigkeit:	++ – bis $\Delta$ 0,75 Vol.-% – "bedeutend"	+++ – ab $\Delta$ 0,75 Vol.-% – "stark"

## 7 Ergebnisse der Tastversuche zum Aufstellen der Versuchsmatrix

Anhand von Tastversuchen an zwei Grundrezepturen (s. Tab. 3-2) unter Variation der Zugabemenge der Zusatzmittel erfolgte die Ermittlung der FB-Luftporengehalte mittels eines konventionellen LP\_A\_5L\_1 und eines HYDRO\_5\_T\_6L. Dabei wurde das Ziel verfolgt, die in der Praxis schwankenden Parameter bzgl. der Zugabemenge der Zusatzmittel mit Einfluss auf die Konsistenz, den Luftporengehalt und den w/z-Wert zu berücksichtigen, und in den folgenden Hauptuntersuchungen deren Einfluss auf die Messwertqualität der LP-Gehaltsprüfer zu quantifizieren. Hierbei wurde versucht, drei Luftporengehalte der Untersuchungsbetone anzustreben, die einen Unterschied von mindestens 2,0 Vol.-% zueinander aufwiesen. Das passende Mischregime sowie der Prüfablauf wurden auf Basis der Voruntersuchungen und der Literaturrecherche erstellt. Berücksichtigt wurden auch potentielle Einflüsse aus der Reihenfolge und dem Zeitpunkt der Zusatzmittelzugabe mit dem Anmachwasser, sowie der Drehzahl der Mischwerkzeuge auf die Luftporenbildung. Als Ist-Messwerte des FB-Luftporengehaltes der Tastversuche gelten hierbei die ermittelten FB-Luftporengehalte mittels des konventionellen LP-Topfes. Anhand der Tastversuche wurde je Betonsorte mit fünf verschiedenen w/z-Werten und drei verschiedenen Zugabemengen des gewählten Luftporenbildners unter ggf. erforderlicher Zugabe eines geeigneten Fließmittels die Versuchsmatrix festgelegt. Somit ergaben sich für die vorliegende Versuchsreihe 15 Betonzusammensetzungen je Grundrezeptur. In die Vergleichsuntersuchungen wurden anschließend Betonrezepturen ausschließlich mit einem w/z-Wert von 0,40, 0,45 und 0,50 herangezogen.

Die Ergebnisse der Tastversuche mit Oberbetonen sind Tab. 7-1 zu entnehmen. In den Spalten 1 bis 8 sind die Bezeichnungen der Rezepturen sowie deren grobe Zusammensetzung angegeben. Die angesetzten Mengen an Zusatzmitteln sind in den Spalten 7 bzw. 8 der Tab. 7-1 zu entnehmen. In den Vorversuchen zur Vorbereitung der Versuchsmatrix wurde aufgrund der geringeren erforderlichen FB-Probenmengen der Konus-Mischer verwendet. Die angegebenen Zugabemengen in Tabelle 7.1 und Tabelle 7.2 wurden beim Einsatz des Konus-Mischers ermittelt. Bei den Vergleichsuntersuchungen wurden aufgrund des Wechsels der Betonmischanlage die Zugabemengen der Zusatzmittel modifiziert.

Die Ergebnisse der FB-Luftporenmessung in Abhängigkeit von dem jeweiligen Prüfgerät sind in den Spalten 9 bis 10 enthalten. Hierbei wurden in Abhängigkeit von den Variationsparametern mit dem konventionellen LP-Topf FB-Luftporengehalte in einer Größenordnung von 1,8 Vol.-% bis 7,9 Vol.-% festgestellt. Ein Unterschied des FB-Luftporengehaltes von mindestens 2,0 Vol.-% untereinander wurde bei 14 der 15 Unterbetone erreicht. Den Betonrezepturen, bei denen ein Unterschied in Bezug auf den FB-Luftporengehalt von mindestens 2,0 Vol.-% nur knapp erreicht wurde, wird in den Hauptuntersuchungen eine angepasste Menge an entsprechendem Zusatzmittel zugegeben.

Die Tab. 7-2 gibt die Ergebnisse der Tastversuche mit Unterbetonen wieder. Die Ergebnisse der FB-Luftporenmessung mit dem konventionellen LP-Topf liegen in einer Größenordnung von 2,0 Vol.-% bis 12,5 Vol.-%. Ein Unterschied des FB-Luftporengehaltes von mindestens 2,0 Vol.-% untereinander wurde bei zwei der 15 Unterbetone knapp unterschritten. Bei weiteren zwei von 15 Rezepturen wurde ein FB-Luftporengehalt von über 9,0 Vol.-% festgestellt. Hierbei handelte es sich um Rezepturen mit einem w/z-Wert von über 0,43. Um bei den Hauptuntersuchungen den Unterschied des FB-Luftporengehaltes von mindestens 2,0 Vol.-% einzuhalten und den FB-Luftporengehalt auf einen Wert von unter 10 Vol.-% zu begrenzen, erfolgte ein Nachjustieren der Zugabemengen der Zusatzmittel. Die Dosierung der Zusatzmittel wurden bei den Vergleichsuntersuchungen aufgrund des Wechsels der Betonmischanlage und Anpassung der Frischbetonmenge je Betoncharge auf 65 l entsprechend modifiziert.

Tab. 7-1: Ergebnisse der Tastversuche an Oberbetonen zum Aufspannen der Versuchsmatrix

Rezeptur-ID	Zementmenge	Wassergehalt (Ausgenommen Sättigung)	Feststoffmasse	Volumenanteil der Feststoffe	Mischung	Ist-Dosierung Luftporenbildner	Ist-Dosierung Fließmittel	Prüfgerät	Luftporengehalt
[-]	[kg/m³]	[l/m³]	[kg/m³]	[dm/m³]	[-]	[M.-%] v. Z.		[-]	[Vol.-%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1-N-0,38-0	420	160	2130	777	1	0,010	0,428	HY5_T_6L	2,65
								LP_A_5L_1	2,50
1-M-0,38-0					2	0,040	0,421	HY5_T_6L	5,82
								LP_A_5L_1	5,30
1-H-0,38-0					3	0,111	0,413	HY5_T_6L	8,24
								LP_A_5L_1	7,10
1-N-0,40-0	420	168	2108	769	1	0,012	0,423	HY5_T_6L	4,44
								LP_A_5L_1	3,75
1-M-0,40-0					2	0,040	0,357	HY5_T_6L	5,32
								LP_A_5L_1	5,20
1-H-0,40-0					3	0,127	0,365	HY5_T_6L	8,24
								LP_A_5L_1	7,40
1-N-0,43-0	420	181	2077	757	1	0,008	0,374	HY5_T_6L	3,14
								LP_A_5L_1	2,95
1-M-0,43-0					2	0,016	0,374	HY5_T_6L	4,97
								LP_A_5L_1	4,90
1-H-0,43-0					3	0,039	0,374	HY5_T_6L	7,30
								LP_A_5L_1	7,00
1-N-0,45-0	420	189	2056	750	1	0,008	0,300	HY5_T_6L	3,11
								LP_A_5L_1	2,75
1-M-0,45-0					2	0,033	0,301	HY5_T_6L	6,56
								LP_A_5L_1	6,10
1-H-0,45-0					3	0,133	0,308	HY5_T_6L	11,88
								LP_A_5L_1	10,00
1-N-0,50-0	420	210	2000	728	1	0,007	0,162	HY5_T_6L	2,28
								LP_A_5L_1	2,00
1-M-0,50-0					2	0,027	0,192	HY5_T_6L	5,47
								LP_A_5L_1	5,30
1-H-0,50-0					3	0,108	0,215	HY5_T_6L	14,34
								LP_A_5L_1	13,70

Tab. 7-2: Ergebnisse der Tastversuche an Unterbetonen zum Aufspannen der Versuchsmatrix

Rezeptur-ID	Zementmenge	Wassergehalt (Ausgenommen Sättigung)	Feststoffmasse	Volumenanteil der Feststoffe	Mischung	Ist-Dosierung Luftporenbildner	Ist-Dosierung Fließmittel	Prüfgerät	Luftporengehalt		
[-]	[kg/m³]	[l/m³]	[kg/m³]	[dm/m³]	[-]	[M.-%] v. Z.		[-]	[Vol.-%]		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
2-N-0,38-0	340	129	2214	818	1	0,020	0,294	HY5_T_6L	2,90		
										LP_A_5L_1	2,20
2-M-0,38-0					2	0,117	0,216	HY5_T_6L	4,69	LP_A_5L_1	4,20
2-H-0,38-0					3	0,235	0,206	HY5_T_6L	8,12		
								LP_A_5L_1	6,50		
2-N-0,40-0	340	136	2199	812	1	0,012	0,282	HY5_T_6L	2,08		
										LP_A_5L_1	1,80
2-M-0,40-0					2	0,050	0,292	HY5_T_6L	4,65	LP_A_5L_1	4,00
2-H-0,40-0					3	0,181	0,262	HY5_T_6L	7,17		
								LP_A_5L_1	6,60		
2-N-0,43-0	340	146	2173	802	1	0,039	0,233	HY5_T_6L	3,94		
										LP_A_5L_1	3,40
2-M-0,43-0					2	0,078	0,282	HY5_T_6L	5,65	LP_A_5L_1	5,40
2-H-0,43-0					3	0,155	0,252	HY5_T_6L	8,53		
								LP_A_5L_1	7,30		
2-N-0,45-0	340	153	2156	796	1	0,014	0,216	HY5_T_6L	2,83		
										LP_A_5L_1	1,95
2-M-0,45-0					2	0,039	0,216	HY5_T_6L	5,14	LP_A_5L_1	4,90
2-H-0,45-0					3	0,118	0,206	HY5_T_6L	7,98		
								LP_A_5L_1	7,20		
2-N-0,50-0	340	170	2111	779	1	0,011	0,167	HY5_T_6L	2,94		
										LP_A_5L_1	2,40
2-M-0,50-0					2	0,041	0,163	HY5_T_6L	4,66	LP_A_5L_1	4,40
2-H-0,50-0					3	0,143	0,150	HY5_T_6L	10,02		
								LP_A_5L_1	7,90		

## 8 Hauptuntersuchungen der Arbeitsphase 3 – Vergleichsuntersuchungen zur Messgütebestimmung der LP-Prüfgeräte

### 8.1 Allgemeines

Um eine Bewertung der Messqualität des Frischbeton-Luftporengehalts an LP-Prüfgeräten unter verschiedenen betontechnologischen Bedingungen vornehmen zu können, wurden in der Arbeitsphase 3 Vergleichsuntersuchungen mit zehn national genormten LP-Prüfgeräten (Arbeitspaket 5) und mit vier alternativen Prüfgeräten (Arbeitspaket 6) jeweils für eine Grundrezeptur eines Oberbetons mit  $D = 8$  mm bzw. Unterbetons mit  $D = 22$  mm durchgeführt. Zusätzlich kam im Arbeitspaket 5 der HYDRO\_5\_T\_6L als alternatives Messgerät zum Einsatz, und im Arbeitspaket 6 wurde zur Vergleichsdatenerfassung ein konventioneller LP-Topf mit einem Fassungsvermögen von 8 l parallel verwendet. Einen Überblick und die Kennzeichnung gibt Tab. 3-1. Die Ergebnisse der Hauptuntersuchungen wurden in der Rezeptur-ID an der vierten Stelle mit der Kennziffer „1“ für die erste Vergleichsuntersuchung mit den in Deutschland genormten LP-Töpfen und mit der Kennziffer „2“ für die zweite Vergleichsuntersuchung mit alternativen Prüfmethoden gekennzeichnet. Bei den Grundrezepturen wurde der Frischbeton-Luftporengehalt und der w/z-Wert variiert. Die hierzu festgelegten Betonrezepturen sind dem Anhang, Tabellen Tab. I - 29 und Tab I - 30 zu entnehmen. Es wurden folgende Variationen der genannten betontechnologischen Parameter durchgeführt:

- Variation des Frischbeton-Luftporengehaltes:
  - N (niedrig) mit einem Zielluftporengehalt von  $< 3,5$  Vol.-%
  - M (mittel) mit einem Zielluftporengehalt zwischen 3,5 und 6,5 Vol.-%
  - H (hoch) mit einem Zielluftporengehalt von  $> 6,5$  Vol.-%
- Variation des w/z-Wertes: 0,40, 0,45 und 0,50

Die Versuchsmatrix und Kennzeichnung der Betonrezepturen für jede Arbeitsphase sind in Tab. 4-7 dargestellt. Bei den Vergleichsuntersuchungen mit den national genormten LP-Prüfgeräten wurden jeweils drei Betonchargen pro Variation und Grundrezeptur hergestellt, während bei den alternativen Prüfgeräten zwei Betonchargen pro Variation und Grundrezeptur verwendet wurden. Insgesamt wurde jede Grundrezeptur mit der jeweiligen geplanten Variation der ausgewählten Parameter etwa 45-mal im Intensivmischer hergestellt, und anschließend die Frischbetonkennwerte zu zwei festgelegten Zeitpunkten ( $t > 10$  min und  $t > 60$  min) gemessen. Die Frischbetonmenge pro Mischung wurde auf 65 l festgelegt. Als Frischbetonkennwerte wurden die Frischbeton-Temperatur, die Frischbeton-Rohdichte, das Verdichtungsmaß bzw. Ausbreitmaß und der LP-Gehalt bestimmt. Zwischen den Zeitpunkten zur Erfassung der Frischbetonkennwerte wurden die Festbetonprobekörper für begleitende Untersuchungen hergestellt. Diese umfassen Festigkeitsprüfungen (Spaltzug- und Druckfestigkeiten) im Alter von 28 d sowie die Bestimmung der Luftporenkennwerte an den Festbetonprobekörpern.

Die gewonnenen und ausgewerteten Ergebnisse der Frisch- und Festbetonkennwerte werden sowohl in Form von Diagrammen mit begleitenden Erläuterungstexten als auch in tabellarischer Darstellung präsentiert. Zunächst erfolgt eine Übersicht der Mittelwerte in tabellarischer Form. Um eine bessere Interpretation der Ergebnisse zu ermöglichen, sind die Frischbetonkennwerte sowie die zugehörigen rechnerisch ermittelten Messwertabweichungen der LP-Gehaltsbestimmung für alle Prüfgeräte in den umfassenden Übersichtstabellen im Anhang aufgeführt. Die erforderlichen rechnerischen Grundlagen zur Auswertung der Ergebnisse finden sich in Kapitel 6.2.

Als Nächstes werden die Ergebnisse der Frischbeton-Untersuchung mit den Ergebnissen aus der Luftporenauszählung am Festbeton gegenübergestellt. Des Weiteren erfolgt die Auswertung der Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen. Im Anschluss daran erfolgt eine Bewertung der Messgenauigkeit der verwendeten LP-Prüfgeräte anhand der Streuung der Messwertabweichungen über alle Variationen der Grundrezepturen hinweg. Die gewonnenen Ergebnisse ermöglichen eine Bewertung der Messgüte der einzelnen Prüfgerätevarianten.

## 8.2 Ergebnisse – Frischbetonkennwerte

Für die Oberbeton-Grundrezeptur sind die Mittelwerte der erfassten Frischbetonkennwerte für beide Prüfzeitpunkte  $t > 10$  min und  $t > 60$  min und jede Betonrezeptur in Tab. 8-1 zusammengefasst. Die tabellarische Zusammenfassung der Mittelwerte der Frischbetonkennwerte für die Unterbetone sind im Anhang, Tab. I - 32 enthalten.

In den ersten drei Spalten werden die Rezeptur-ID des jeweiligen Betons und dessen Variationen für die Parameter (w/z-Wert in Spalte 2, LP-Bereich in Spalte 3) angegeben. In den Spalten 4 und 5 sind die Mittelwerte der gemessenen Frischbeton-Temperaturen aufgeführt. Es wurden geringfügige Temperaturschwankungen festgestellt, die auf die hohen sommerlichen Temperaturen an bestimmten Versuchstagen zurückzuführen sind.

In den Spalten 6 und 7 sind die Ergebnisse der Konsistenzermittlung der verwendeten Frischbetone zu beiden Prüfzeitpunkten aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass bei plastischen und weichen Betonen (ab einem w/z-Wert von 0,45) in der Regel der Ausbreitversuch nach DIN EN 12350-5 [N13] zur Konsistenzermittlung verwendet wurde. Es ist festzuhalten, dass sich durch die Erhöhung des w/z-Wertes und des LP-Gehaltes im Beton eine weiche Konsistenz der Frischbetone bis zur Kategorie F4 zum ersten Prüfzeitpunkt eingestellt hat. Erwartungsgemäß wurde mit zunehmendem Betonalter ein Ansteifen des Frischbetons beobachtet, was zu einer Veränderung der Konsistenz und zur Einstufung in die nächst steifere Konsistenzklasse zum zweiten Prüfzeitpunkt führte.

Spalte 8 enthält die Frischbeton-Rohdichten (Soll-Werte) unter Einhaltung des angestrebten Frischbeton-Luftporengehaltes aus der Stoffraumrechnung der jeweiligen Rezeptur. Die angestrebten LP-Gehalte aus der Stoffraumrechnung sind in Tab. 8-1 in Spalte 9 aufgeführt.

Während der Hauptuntersuchungen wurde bei allen LP-Töpfen die Frischbeton-Rohdichte im geschlossenen System durch Rückwiegen ermittelt, im Folgenden mit Pyknometer-Methode bezeichnet. Der genaue Ablauf und die Berechnungsgrundlage für die Ermittlung der Frischbeton-Rohdichte sind im Kapitel 6.2.1 beschrieben. In den Spalten 10 und 11 der Tab. 8-1 sind die Ist-Mittelwerte der Frischbeton-Rohdichte für jede Rezeptur eingetragen, zusammengefasst aus den Einzelmessungen jedes Prüfgerätes zu dem jeweiligen Prüfzeitpunkt. In den letzten beiden Spalten sind die entsprechenden rechnerisch ermittelten Soll-LP-Gehalte angegeben, die sich auf Basis der Ist-Mittelwerte der Frischbeton-Rohdichte gemäß Stoffraumrechnung ergeben.

In diesem Zusammenhang ist zu erkennen, dass die errechneten Soll-LP-Gehalte in den meisten Fällen im angestrebten LP-Bereich der jeweiligen Variation (Spalte 3) liegen (grün abgebildet). Lediglich zwei Soll-LP-Gehalte der Rezepturen 1-N-0,40-2 und 1-M-0,45-1 befinden sich in einem Bereich von 0,5 bis 0,7 Vol.-% über den jeweilig angestrebten Grenzwertbereich (blau dargestellt). Bei der Rezeptur 1-H-0,40-1 wurde zum zweiten Prüfzeitpunkt ( $t > 60$  min) ein um ca. 0,3 Vol.-% geringerer Soll-LP-Gehalt festgestellt (gelb gekennzeichnet).

Tab. 8-1: Mittelwerte der Frischbetonkennwerten der Oberbetonrezepturen

Rezeptur-ID Oberbeton	w/z- Wert	Bereich des LP- Gehaltes	Frischbeton-Kennwerte				Stoffraumrechnung Soll-Werte		Ist-FB-Roh- dichte		Rech. Soll-LP- Gehalt aus Ist-FB- Rohdichte	
			Frischbetonalter zum Prüfzeitpunkt t in [min]									
			t > 10	t > 60	t > 10	t > 60	Frischbeton- Kennwerte		> 10	> 60	> 10	> 60
			Frischbeton- Temperatur (MW)		Verdichtungsmaß bzw. Ausbreitmaß (MW)		Roh- dichte	LP- Gehalt	Mittelwerte (MW)**			
[-]	[-]	[Vol.-%]	[°C]		[-]		[kg/m³]	[Vol.-%]	[kg/m³]		[Vol.-%]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1-N-0,40-1	0,40	N < 3,5	21,4	20,0	1,36 - C1	1,41 - C1	2337	3,0	2321	2347	3,65*	2,55
1-N-0,40-2			24,9	23,8	1,29 - C1	1,37 - C1			2306	2337	4,27	2,98
1-M-0,40-1		M 3,5 - 6,5	22,3	20,2	1,30 - C1	1,43 - C1	2290	5,0	2275	2305	5,65	4,31
1-M-0,40-2			24,3	22,3	1,21 - C2	1,38 - C1			2269	2297	5,91	4,67
1-H-0,40-1		H > 6,5	20,0	19,1	1,28 - C1	1,35 - C1	2245	7,0	2223	2263	8,00	6,17
1-H-0,40-2			25,3	23,5	1,23 - C2	1,34 - C1			2227	2256	7,80	6,50
1-N-0,45-1	0,45	N < 3,5	22,3	20,4	327 mm - F1	288 mm - F1	2302	3,0	2300	2321	3,10	2,21
1-N-0,45-2			24,5	22,6	377 mm - F2	333 mm - F1			2285	2315	3,72*	2,47
1-M-0,45-1		M 3,5 - 6,5	22,1	19,9	1,10 - C3	1,26 - C1	2257	5,0	2210	2242	7,05	5,63
1-M-0,45-2			24,5	23,7	365 mm - F2	305 mm - F1			2250	2284	5,27	3,78
1-H-0,45-1		H > 6,5	22,9	20,4	1,08 - C3	1,17 - C2	2212	7,0	2173	2213	8,82	6,93
1-H-0,45-2			24,9	23,6	353 mm - F2	333 mm - F1			2198	2225	7,63	6,40*
1-N-0,50-1	0,50	N < 3,5	23,0	20,9	423 mm - F3	385 mm - F2	2268	3,0	2272	2292	2,82	1,96
1-N-0,50-2			23,0	22,2	493 mm - F4	455 mm - F3			2251	2275	3,72*	2,68
1-M-0,50-1		M 3,5 - 6,5	23,5	21,8	435 mm - F3	350 mm - F2	2223	5,0	2216	2233	5,28	4,52
1-M-0,50-2			23,5	22,6	533 mm - F4	433 mm - F3			2220	2252	5,08	3,69
1-H-0,50-1		H > 6,5	21,2	20,4	407 mm - F2	363 mm - F2	2179	7,0	2167	2186	7,56	6,65
1-H-0,50-2			23,2	22,5	523 mm - F4	470 mm - F3			2149	2177	8,41	7,08

Legende: Rezeptur ID – X-X-X,XX-1 – Hauptvergleichsuntersuchung 1 – konventionelle LP-Prüftechnik

X-X-X,XX-2 – Hauptvergleichsuntersuchung 2 – alternative LP-Prüftechnik

\* – Vernachlässigbar geringfügige Abweichung des Mittelwertes von dem festgelegten Grenzwert

\*\* – Mittelwerte aus allen an der jeweiligen Hauptuntersuchung eingesetzten Geräte bei jeweiliger Rezeptur

Mittelwerte des LP-Gehaltes im Grenzbereich
Mittelwerte des LP-Gehaltes deutlich über dem Grenzbereich
Mittelwerte des LP-Gehaltes deutlich unter dem Grenzbereich

## 8.3 Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung mit national genormten LP-Prüfgeräten

### 8.3.1 Allgemein

Für diese Vergleichsuntersuchungen wurden zwei Grundrezepturen mit unterschiedlichen w/z-Werten und FB-Luftporengehalten hergestellt. Die Messungen des Frischbeton-Luftporengehaltes mit den einzelnen Prüfgeräten erfolgten an drei Chargen desselben Betons zu zwei Prüfzeitpunkten im Anschluss an die Ermittlung der Konsistenz und der Temperatur des Frischbetons möglichst zum gleichen Prüfzeitpunkt. Die

Frischbeton-Rohdichte wurde mithilfe der sogenannten Pyknometer-Methode präzise ermittelt. Es wurden insgesamt zehn national genormte LP-Töpfe und der HYDRO\_5\_T\_6L zu Vergleichszwecken verwendet. Die Gesamtergebnisse der Einzelmessungen je Prüfgerät sind im Anhang in Tabellen Tab. I - 33 bis Tab. I - 52 enthalten.

Für die folgenden Diskussionen zur Messgüte einzelner verwendeter Prüftechniken wird die Messwertabweichung auf Basis der gemessenen Differenzen zwischen Ist- und Soll-FB-Luftporengehalten betrachtet. Die Messwertabweichungen, definiert als Differenz zwischen den rechnerischen Ist- und Soll-Wassergehalten, sind ausschließlich im Anhang in den entsprechenden Tabellen nachzulesen. Dies ist dadurch begründet, dass die im Forschungsvorhaben benutzten Prüfgeräte zur Ermittlung des FB-Luftporengehaltes die Ergebnisse der Luftporenbestimmung am Frischbeton in Vol.-% wiedergeben. Somit liegt es nahe, dass die jeweilige Messwertabweichung zur Übersichtlichkeit einheitlich in Vol.-% dargestellt und diskutiert wird.

In den nachfolgenden zwölf Balkendiagrammen (Bild 8-1 bis Bild 8-12) sind die Abweichungen der Messwerte je verwendetem LP-Topf vom Soll-Mittelwert des Frischbeton-Luftporengehaltes in Vol.-%, unterteilt für den Ober- und Unterbeton je Luftporengehaltsbereich (N, M, H) und Prüfzeitpunkt (10 min, 60 min), in Abhängigkeit der w/z-Werte dargestellt. Im Diagramm links außen sind die aus der Messung mit dem HYDRO\_5\_T\_6L gewonnenen Ergebnissen dargestellt, gefolgt von den Ergebnissen der konventionellen LP-Töpfe (Hersteller A, B, C) mit den Fassungsvermögen von ca. 5 l und 8 l.

Nachfolgend sind die Ergebnisse unterstützend in tabellarischer Form (Tab. 8-2 – Tab. 8-7) abgebildet. Jede Spalte gibt die errechnete Messwertabweichung vom Soll-Wert der verwendeten Prüftechnik in Abhängigkeit von Prüfzeitpunkt und Rezeptur wieder. Die Spalten 8 und 14 geben die Spannweite der Streuung der Messwertabweichungen gleichartiger Prüfgeräte mit ähnlichem Fassungsvermögen an. Die letzten beiden Zeilen der folgenden Tabellen geben ebenfalls die Spannweiten der Streuung der Messwertabweichungen jedes Prüfgerätes an, indem die Daten aus drei Rezepturen mit einem eingestellten LP-Gehalt einer LP-Kategorie in die Wertung eingepflegt wurden. Zur optischen Analyse der Tabelle wurde die Kennzeichnung der gemessenen Messwertabweichungen in 4 Kategorien einsortiert und farblich wie folgt hervorgehoben:

- Messwertabweichungen im Streubereich von  $\pm 0,25$  Vol.-% vom Soll-Wert sind grün markiert
- gelb hinterlegt sind Messwertabweichungen im Streubereich bis zu  $\pm 0,50$  Vol.-%
- rot hinterlegt sind Messwertabweichungen im Streubereich bis zu  $\pm 1,0$  Vol.-%
- Abweichungen über 1,0 Vol.-% sind dunkelrot hervorgehoben

### 8.3.2 Ergebnisse an Oberbetonen (D = 8 mm)

#### Ergebnisse an Oberbetonen mit einem niedrigen (N) Luftporengehalt von bis ca. 3,5 Vol.-%

Das Balkendiagramm im Bild 8-1 zeigt die Messwertabweichungen der verwendeten Prüfgeräte für den Vergleich in drei verschiedenen w/z-Wert-Kategorien, die farblich unterteilt sind. Zwei horizontale gestrichelte Geraden kennzeichnen den festgelegten Grenzwert für Messwertabweichungen von  $\pm 0,5$  Vol.-%. Die Mittelwerte der Soll-Luftporengehalte zum Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min sind oben im Diagramm unter der Legende aufgeführt. Detaillierte Informationen zu den erfassten Messwerten der Vergleichsuntersuchung mit den Oberbetonen sind den Tabellen Tab. I - 33 bis Tab. I - 42 des Anhangs zu entnehmen.

In dem Diagramm ist erkennbar, dass die Anpassung des w/z-Wertes in der Rezeptur einen Einfluss auf die Messwertbildung bzw. die Messwertabweichung bei vorliegendem Vergleich darstellt. Bei steifen Betonen ( $w/z = 0,40$ ) wird der LP-Gehalt unterschätzt. HYDRO\_5\_T\_6L sowie die LP-Töpfe mit einem Fassungsvermögen von 5 l weisen Abweichungen unterhalb des Grenzwertes von - 0,5 Vol.-% auf. Zwei Töpfe

der Gruppe A mit einem Fassungsvermögen von 8 l zeigen die größten, teilweise über dem Grenzwert liegenden, Messwertabweichungen.

Bei plastischen Betonen ( $w/z = 0,45$ ) reduzieren sich die Unterschätzungen bei der LP-Messung bei allen Prüfgeräten deutlich. Keiner der Töpfe weist eine Messwertabweichung von über 0,5 Vol.-% auf.

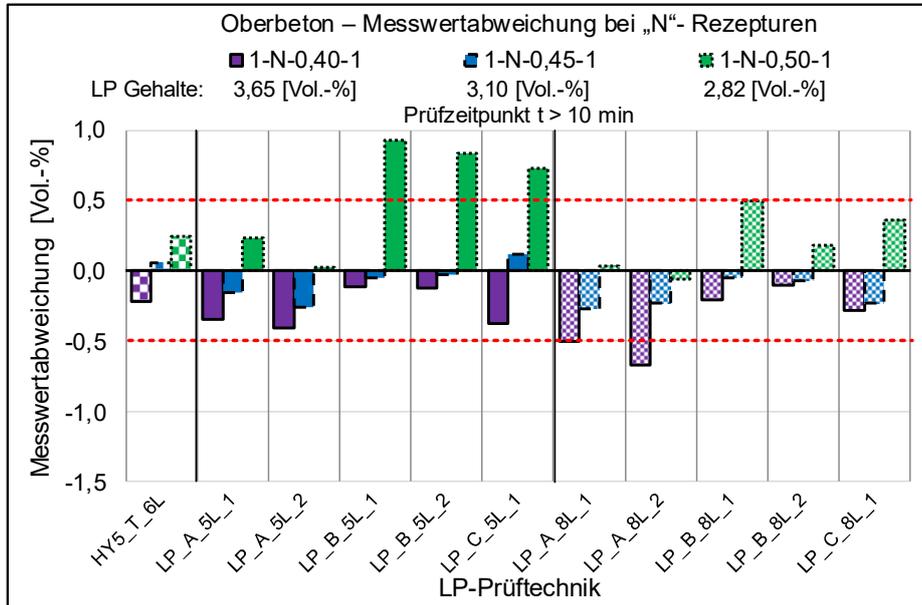


Bild 8-1: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 1-N-1; Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min

Bei weichen Betonen der LP-Gruppe "N" ( $w/z = 0,50$ ) tendieren die Prüfgeräte dazu, den LP-Gehalt zu überschätzen. Die Überschätzung der Messwerte ist besonders ausgeprägt bei den kleineren LP-Töpfen der Hersteller B und C. Im vorliegenden Vergleich wurden die geringsten Messwertabweichungen zum Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min bei dem HYDRO\_5\_T\_6L sowie bei LP\_A\_5L\_2 und LP\_B\_8L\_2 mit einem Fassungsvermögen von 5 l bzw. 8 l festgestellt.

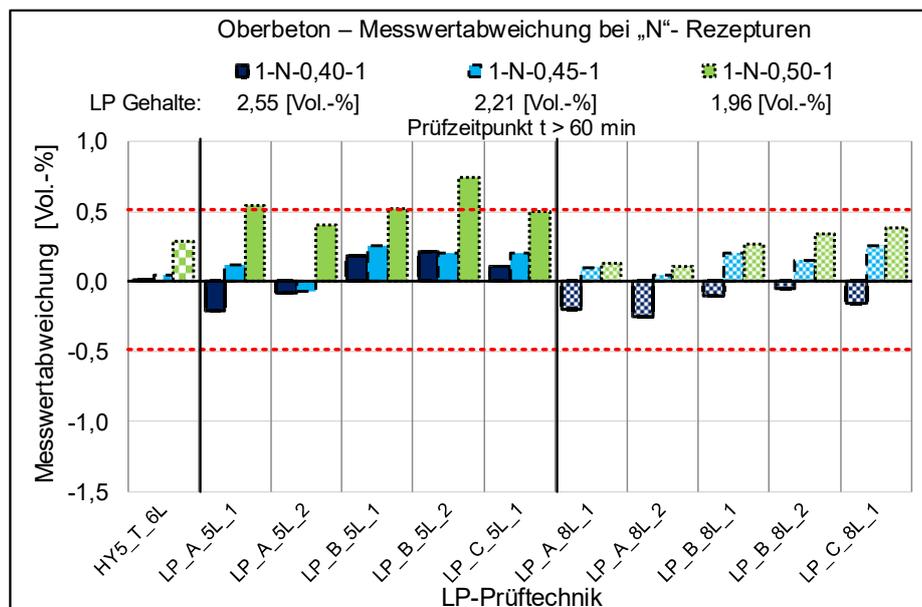


Bild 8-2: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 1-N-1; Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min

In Bild 8-2 werden die ermittelten Messwertabweichungen der konventionellen LP-Töpfe für die Rezepturen 1-N-1 zum Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min in Form eines Balkendiagramms dargestellt.

Im Vergleich zu den Messwertabweichungen zum ersten Prüfzeitpunkt scheinen die LP-Topfmessungen zu einem späteren Prüfzeitpunkt den Frischbeton-LP-Gehalt in den meisten Fällen zu überschätzen. Die Messwertabweichung, die bei den Frischbetonen mit einem w/z-Wert von 0,40 auftreten, liegen unterhalb des Grenzwerts von 0,5 Vol.-%. Die Messwerte beim Einsatz größerer LP-Töpfe hingegen unterschätzten den LP-Gehalt hierbei. Ab einem w/z-Wert von 0,45 kommt es in den meisten Fällen zu einer geringfügigen Überschätzung des LP-Gehaltes bei den betrachteten Prüfgeräten.

Die größten Überschätzungen zum späteren Zeitpunkt werden vor allem bei weichen Betonen ( $w/z = 0,50$ ) festgestellt. Eine Überschreitung des Grenzwerts von 0,5 Vol.-% wird ausschließlich bei den meisten LP-Töpfen mit einem Fassungsvermögen von 5 l beobachtet. Die absolut größten Abweichungen werden zu beiden Prüfzeitpunkten bei den LP-Töpfen mit einem Fassungsvermögen von 5 l festgestellt.

Tab. 8-2: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen; Oberbetone mit niedrigem LP-Gehalt

Prüfgerät	HY5_T_6L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2	LP_B_5L_1	LP_B_5L_2	LP_C_5L_1	Streubereich 5L	LP_A_8L_1	LP_A_8L_2	LP_B_8L_1	LP_B_8L_2	LP_C_8L_1	Streubereich 8L
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Mischung	1-N-0,40-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,22	-0,34	-0,41	-0,12	-0,12	-0,38	-0,41 -0,12	-0,50	-0,67	-0,21	-0,10	-0,28	-0,67 -0,10
t > 60 min	0,01	-0,21	-0,08	0,19	0,22	0,11	-0,21 0,22	-0,20	-0,25	-0,10	-0,05	-0,16	-0,25 -0,05
Mischung	1-N-0,45-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	0,06	-0,16	-0,26	-0,05	-0,02	0,12	-0,26 0,12	-0,27	-0,23	-0,05	-0,07	-0,23	-0,27 -0,05
t > 60 min	0,04	0,12	-0,07	0,26	0,21	0,20	-0,07 0,26	0,10	0,04	0,21	0,15	0,25	0,04 0,25
Mischung	1-N-0,50-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	0,25	0,24	0,02	0,93	0,83	0,73	0,02 0,93	0,04	-0,06	0,49	0,18	0,35	-0,06 0,49
t > 60 min	0,29	0,54	0,40	0,52	0,74	0,50	0,29 0,74	0,13	0,11	0,27	0,34	0,39	0,11 0,39
	Spannweite der Streuung [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,22 0,25	-0,41 0,24	-0,12 0,93	-0,38 0,73	-0,41 0,93	-0,67 0,04	-0,21 0,49	-0,28 0,35	-0,67 0,49				
t > 60 min	0,01 0,29	-0,21 0,54	0,19 0,74	0,11 0,50	-0,21 0,74	-0,25 0,13	-0,10 0,34	-0,16 0,39	-0,25 0,39				

Legende:

Messwertabweichung im Streubereich:	bis $\pm 0,25$ Vol.-%	bis $\pm 0,50$ Vol.-%	bis $\pm 1,0$ Vol.-%	$> 1,0$ Vol.-%
-------------------------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	----------------

Eine tabellarische Darstellung mit den errechneten Messwertabweichungen und ermittelten Streubereichen der verwendeten Prüfgeräte zeigt Tab. 8-2. Die Verwendung eines Farbschemas in den Zellen erleichtert die visuelle Interpretation der Daten. Aus der Tabelle geht hervor, dass die geringsten Messwertabweichungen bei Betonen mit einem w/z-Wert von 0,40 und 0,45 zu verzeichnen sind. Die steifen Betone weisen die geringsten Messwertabweichungen zum Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min auf. Die Streuung der Messwerte bewegt sich hierbei überwiegend im grünen Bereich von  $\pm 0,25$  Vol.-%.

Ähnliche Messwertabweichungen werden bei Betonen mit einem w/z-Wert von 0,45 festgestellt. Dabei werden zum ersten Prüfzeitpunkt ebenfalls ausschließlich geringfügige Messwertabweichungen bei der Prüftechnik beobachtet.

Die höchsten Messwertabweichungen bis zu 0,93 Vol.-% (LP\_B\_5L\_1) treten bei der Verwendung der Prüfgeräte an weichen Betonen mit niedrigem LP-Gehalt auf.

Die unteren zwei Zeilen geben die maximale Streuung der LP-Gehaltsabweichung jedes eingesetzten Prüfgerätes an. Die Daten der LP-Töpfe gleichen Herstellers und Bauart wurden zu einem gemeinsamen Mittelwert zusammengefasst. Bei allen betrachteten Prüfgeräten weisen die LP-Töpfe mit einem Fassungsvermögen von 5 l den größten Streubereich von ca. 1,3 Vol.-% auf. Anhand Spalte 14 wird ersichtlich, dass bei den vorliegenden Frischbetonen im Mittel die größeren LP-Töpfe zum Prüfzeitpunkt von  $t > 60$  min geringere Messwertabweichungen im mittleren Bereich bis  $\pm 0,50$  Vol.-% aufweisen. Zu den Töpfen mit der geringsten Messwertabweichung zählen demnach der HYDRO\_5\_T\_6L und die 8-l-Töpfe des Herstellers B bzw. C.

### **Ergebnisse an Oberbetonen mit einem mittleren (M) Luftporengehalt von ca. 3,5 bis 6,5 Vol.-%**

Das Balkendiagramm im Bild 8-3 zeigt die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen zum ersten Prüfzeitpunkt zwischen den konventionellen LP-Prüfgeräten an drei Oberbetonen mit mittlerem LP-Gehalt und drei verschiedenen w/z-Werten. Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Frischbeton-Luftporengehalt auch die ermittelten Messwertabweichungen der Prüftechnik in den meisten Fällen gestiegen sind. Beim überwiegenden Teil der LP-Topfmessungen wird der LP-Gehalt unabhängig von dem gewählten w/z-Wert unterschätzt. Meistens ist eine Reduktion der Messwertabweichung durch die Zunahme des w/z-Wertes bei den betrachteten Prüfgeräten zu beobachten. Die höchsten Abweichungen werden überwiegend bei den steiferen Frischbetonen festgestellt. Sieben der elf verwendeten LP-Prüfgeräte weisen hierbei eine Messwertabweichung über dem festgelegten Grenzwert von  $\pm 0,50$  Vol.-% auf. Messwerte der drei 5-l-Töpfe (LP\_B\_5L\_1, LP\_B\_5L\_2 und LP\_C\_5L\_1) weichen nur geringfügig vom Soll-Wert ab.

Bei den plastischen Betonen mit einem w/z-Wert von 0,45 (blaue Balken) kann überwiegend eine ähnliche bzw. zurückgegangene Messwertabweichung festgestellt werden. Messungen an etwa der Hälfte der eingesetzten LP-Töpfe weisen trotz des Rückganges immer noch Messwertabweichungen von über 0,5 Vol.-% auf.

Beim Vergleich der Messwertabweichungen der Prüfgeräte an weichen Betonen werden meistens die geringsten LP-Abweichungen festgestellt. Bei fünf von elf Vergleichsbetrachtungen mit den LP-Prüfgeräten wird eine geringfügige Überschätzung des LP-Gehaltes zum ersten Prüfzeitpunkt festgestellt.

Die Prüfgeräte LP\_B\_5L\_1, LP\_C\_5L\_1 sowie der HYDRO\_5\_T\_6L weisen im Schnitt die geringsten Messwertabweichungen auf. Deutlich größere Abweichungen von bis zu 1,3 Vol.-% werden hingegen beim Einsatz der Töpfe LP\_A\_5L\_2, LP\_A\_8L\_1 und LP\_A\_8L\_2 beobachtet.

Zum zweiten Prüfzeitpunkt werden überwiegend geringere Messwertabweichungen bei der LP-Messung an Betonrezepturen mit mittlerem LP-Gehalt bei allen Prüfgeräten festgestellt (siehe Bild 8-4).

Eine deutliche Reduktion der Abweichungen bzw. ein Übergang vom Unterschätzen zum Überschätzen des Soll-LP-Gehaltes werden bei den LP-Töpfen mit größerem Fassungsvermögen beobachtet.

Die Abweichungen, die bei den Frischbetonen mit einem w/z-Wert von 0,40 auftreten, liegen meistens nahe am Toleranzgrenzwert von  $\pm 0,50$  Vol.-%. Ab einem w/z-Wert von 0,50 wird der LP-Gehalt meistens geringfügig überschätzt. Eine Messwertabweichung über den Grenzwert wird ausschließlich bei den größeren LP-Töpfen beobachtet. Insgesamt zeigen der HYDRO\_5\_T\_6L, LP\_B\_5L\_2 und LP\_C\_8L\_1 in diesem Vergleich eine geringe Messwertabweichung.

Tab. 8-3 gibt die zuvor grafisch dargestellten Messwertabweichungen und deren Streubereiche je verwendete Prüftechnik an. Die höchsten Abweichungen treten bei den Frischbetonen mit einem w/z-Wert von 0,40 und mittlerem Luftporengehalt auf. Zum ersten Prüfzeitpunkt liegt die Abweichung bei den 5-l-Töpfen im Streubereich zwischen - 0,89 und - 0,22 Vol.-% und bei den größeren Töpfen im Streubereich zwischen - 1,32 und - 0,47 Vol.-%. Zum zweiten Prüfzeitpunkt ist eine deutliche Reduktion der Messwertabweichungen bei den 8 l-Töpfen (Streubereich - 0,52 bis - 0,23 Vol.-%) zu beobachten.

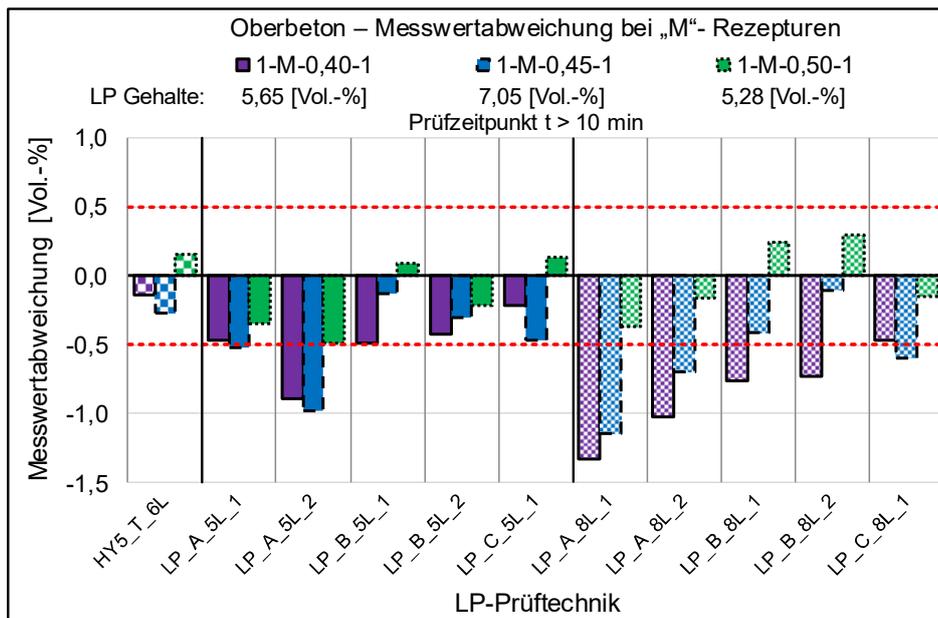


Bild 8-3: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 1-M-1; Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min

Die Messwertabweichungen beim HYDRO\_5\_T\_6L liegen im vernachlässigbaren, grün gekennzeichneten Streubereich. Unter Einsatz der Prüftechnik bei plastischen Betonen werden meistens geringere Abweichungen detektiert. Die Höchstwerte werden hierbei bei den Töpfen des Herstellers A zu beiden Prüfzeitpunkten festgestellt.

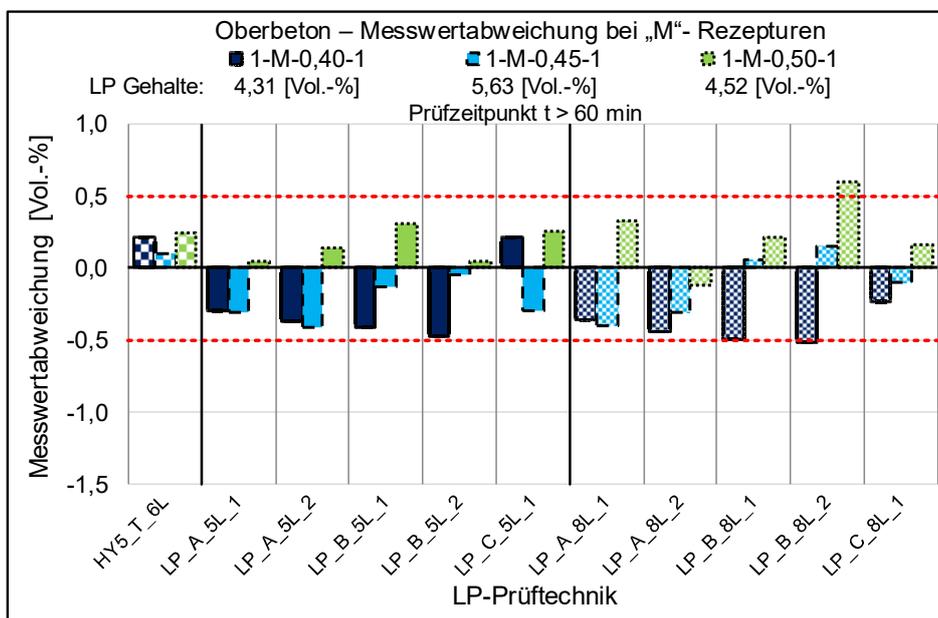


Bild 8-4: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 1-M-1; Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min

Die geringsten Abweichungen werden bei Betonen mit einem w/z-Wert von 0,50 beobachtet. Die LP-Töpfe mit kleinem Fassungsvermögen weisen laut Tab. 8-3 meistens genauere Messwerte auf. Wenn die größten Streuungen der Abweichungen über alle w/z-Werte ermittelt werden, wird ersichtlich, dass zum ersten Prüfzeitpunkt die Spannweiten der Abweichungen der 5 I-Töpfe im akzeptablen Bereich vorliegen (Ausnahme: LP\_A\_5L). Zum zweiten Prüfzeitpunkt liegen die Abweichungen bei den meisten Prüfgeräten in einem ähnlichen Streubereich innerhalb des Grenzwertes von  $\pm 0,50$  Vol.-%. Messwertabweichungen im akzeptablen Bereich unter Einsatz der Prüftechnik bei Straßenbetonen mit mittlerem

LP-Gehalt wurden beim HYDRO\_5\_T\_6L und bei den kleinen LP-Töpfen der Hersteller B und C festgestellt.

Tab. 8-3: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen; Oberbetone mit mittlerem LP-Gehalt

Prüfgerät	HY5_T_6L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2	LP_B_5L_1	LP_B_5L_2	LP_C_5L_1	Streubereich 5L	LP_A_8L_1	LP_A_8L_2	LP_B_8L_1	LP_B_8L_2	LP_C_8L_1	Streubereich 8L
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Mischung	1-M-0,40-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,14	-0,46	-0,89	-0,48	-0,42	-0,22	-0,89 -0,22	-1,32	-1,02	-0,76	-0,73	-0,47	-1,32 -0,47
t > 60 min	0,22	-0,30	-0,37	-0,41	-0,47	0,22	-0,47 0,22	-0,36	-0,45	-0,49	-0,52	-0,23	-0,52 -0,23
Mischung	1-M-0,45-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,27	-0,52	-0,98	-0,12	-0,30	-0,47	-0,98 -0,12	-1,14	-0,70	-0,41	-0,11	-0,60	-1,14 -0,11
t > 60 min	0,10	-0,31	-0,41	-0,13	-0,05	-0,30	-0,41 -0,05	-0,40	-0,31	0,06	0,15	-0,10	-0,40 0,15
Mischung	1-M-0,50-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	0,16	-0,34	-0,49	0,09	-0,22	0,13	-0,49 0,13	-0,37	-0,17	0,24	0,30	-0,15	-0,37 0,30
t > 60 min	0,25	0,05	0,14	0,30	0,05	0,26	0,05 0,30	0,33	-0,12	0,21	0,60	0,16	-0,12 0,60
	Spannweite der Streuung [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,27 0,16	-0,98 -0,34	-0,48 0,09	-0,47 0,13	-0,98 0,13	-1,32 -0,17	-0,76 0,30	-0,60 -0,15	-1,32 0,30				
t > 60 min	0,10 0,25	-0,41 0,14	-0,47 0,30	-0,30 0,26	-0,47 0,30	-0,45 0,33	-0,52 0,60	-0,23 0,16	-0,52 0,60				

Legende:

Messwertabweichung im Streubereich:	bis ± 0,25 Vol.-%	bis ± 0,50 Vol.-%	bis ± 1,0 Vol.-%	> 1,0 Vol.-%
-------------------------------------	-------------------	-------------------	------------------	--------------

### Ergebnisse an Oberbetonen mit einem hohen (H) Luftporengehalt von über ca. 6,5 Vol.-%

In den nachfolgenden Diagrammen in Bild 8-5 und Bild 8-6 werden die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung der national genormten Prüfgeräte bei ihrer Anwendung auf Betone mit hohem Luftporengehalt präsentiert und erörtert. Im Anschluss daran erfolgt die tabellarische Darstellung der Streuung der berechneten Messwertabweichungen in der Tab. 8-4.

Im Balkendiagramm im Bild 8-5 sind die Messwertabweichungen der verwendeten Prüfgeräte bei der FB-LP-Messung zum ersten Prüfzeitpunkt dargestellt. Die Mittelwerte der Soll-Luftporengehalte liegen bei den untersuchten Betonen zwischen 7,5 und 8,8 Vol.-%. Einige Balken ragen aufgrund der konstant eingestellten Y-Achsenspanne des Diagramms über den sichtbaren Bereich hinaus. Hierbei erfolgt die Angabe der Messwertabweichung als Zahlenwert am Anfang des jeweiligen Balkens.

Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass mit steigendem FB-Luftporengehalt die erzeugten Messwertabweichungen bei den meisten betrachteten LP-Töpfen ebenfalls angestiegen sind. In den meisten Fällen liegen diese deutlich unter den festgelegten Grenzwert von - 0,50 Vol.-%. Die Anpassung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,45 zeigt in diesem Fall keinen eindeutigen Einfluss auf die Messwertabweichung. Meistens wird eine ähnlich hohe Abweichung festgestellt. Das Maximum wird beim LP\_A\_8L\_1 festgestellt, der den LP-Gehalt um 1,62 Vol.-% unterschätzt hat.

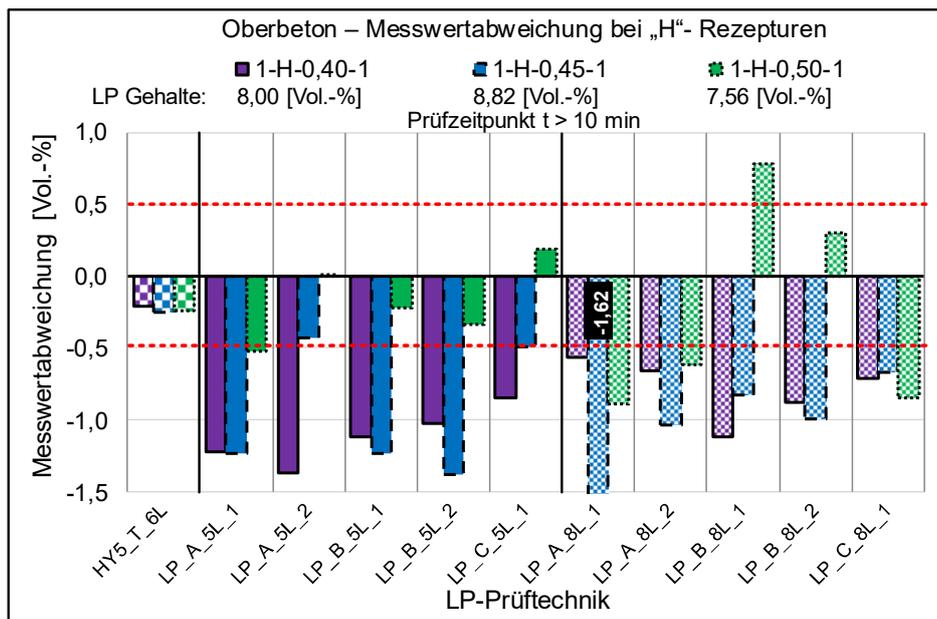


Bild 8-5: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 1-H-1; Prüfzeitpunkt t > 10 min

In einigen Fällen kommt es zu einer Überschätzung des LP-Gehaltes. Die niedrigsten Messwertabweichungen zum Prüfzeitpunkt t > 10 min werden in diesem Vergleich beim HYDRO\_5\_T\_6L, dem LP\_A\_5L\_2 und LP\_C\_5L\_1 mit einem Fassungsvermögen von 5 l festgestellt. Zum zweiten Prüfzeitpunkt werden hingegen deutlich geringere Messwertabweichungen festgehalten (siehe Bild 8-6).

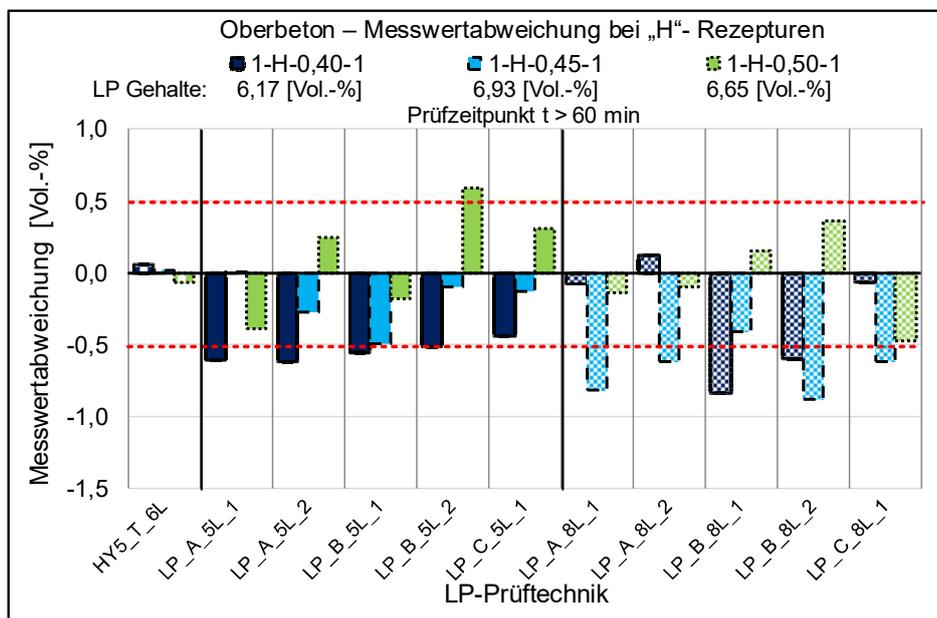


Bild 8-6: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 1-H-1; Prüfzeitpunkt t > 60 min

Die Abweichungen, die bei der Anwendung der Prüfgeräte auf Frischbeton mit einem w/z-Wert von 0,40 aufgetreten sind, liegen größtenteils am bzw. außerhalb der  $\pm 0,5$  Vol.-%-Grenzwerte. Mit zunehmendem w/z-Wert zeigen die LP-Töpfe mit einem Fassungsvermögen von 5 l eine Tendenz zur Reduzierung der Abweichung, gefolgt von einer Tendenz zur Überschätzung des LP-Gehaltes. Messwerte, ermittelt an größeren Töpfen, neigen dazu, den LP-Gehalt am stärksten zu unterschätzen, insbesondere bei der Verwendung der Geräte an Rezeptur 1-H-0,45-1. Die Mehrheit der größeren LP-Töpfe weist eine Messwertabweichung von über - 0,50 Vol.-% auf. Die größten Abweichungen bei der Messung der FB-Luftporen werden

unter Einsatz der LP-Töpfe des Herstellers B festgestellt. Messwertabweichungen innerhalb der  $\pm 0,50$  Vol.-%-Grenzwerte werden beim HYDRO\_5\_T\_6L und dem LP\_C\_5L\_1 erfasst.

Tab. 8-4 zeigt, dass bei Verwendung der konventionellen LP-Töpfe zum ersten Prüfzeitpunkt bei den steifen Betonen ( $w/z = 0,40$ ) und den plastischen Betonen ( $w/z = 0,45$ ) der LP-Gehalt bis zu 1,62 Vol.-% unterschätzt wird. Die LP-Töpfe haben in dieser Phase tendenziell ungenauere Messwerte erzielt. Erst zum zweiten Prüfzeitpunkt können präzisere Ergebnisse festgestellt werden. Die geringste durchschnittliche Messwertabweichung wird bei Betonen mit einem hohen LP-Gehalt unter Einsatz kleinerer LP-Töpfe festgestellt, insbesondere, wenn ein  $w/z$ -Wert von 0,45 eingehalten wird.

Tab. 8-4: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen; Oberbetone mit hohem LP-Gehalt

Prüfgerät	HY5_T_6L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2	LP_B_5L_1	LP_B_5L_2	LP_C_5L_1	Streubereich 5L	LP_A_8L_1	LP_A_8L_2	LP_B_8L_1	LP_B_8L_2	LP_C_8L_1	Streubereich 8L
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Mischung	1-H-0,40-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,21	-1,22	-1,37	-1,12	-1,02	-0,85	-1,37 -0,85	-0,56	-0,66	-1,12	-0,87	-0,71	-1,12 -0,56
t > 60 min	0,06	-0,61	-0,61	-0,56	-0,51	-0,45	-0,61 -0,45	-0,08	0,12	-0,84	-0,60	-0,06	-0,84 0,12
Mischung	1-H-0,45-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,25	-1,23	-0,43	-1,23	-1,38	-0,49	-1,38 -0,43	-1,62	-1,03	-0,83	-0,99	-0,67	-1,62 -0,67
t > 60 min	0,02	0,00	-0,27	-0,50	-0,09	-0,13	-0,50 0,02	-0,81	-0,61	-0,41	-0,88	-0,62	-0,88 -0,41
Mischung	1-H-0,50-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,24	-0,52	0,01	-0,21	-0,33	0,19	-0,52 0,19	-0,88	-0,62	0,78	0,30	-0,85	-0,88 0,78
t > 60 min	-0,07	-0,39	0,24	-0,18	0,59	0,30	-0,39 0,59	-0,14	-0,10	0,15	0,36	-0,48	-0,48 0,36
	Spannweite der Streuung [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,25 -0,21	-1,37 0,01	-1,38 -0,21	-0,85 -0,21	-1,38 0,19	-0,85 0,19	-1,38 0,19	-1,62 -0,56	-1,12 0,78	-0,85 -0,67	-1,62 0,78	-0,85 -0,67	-1,62 0,78
t > 60 min	-0,07 0,06	-0,61 0,24	-0,56 0,59	-0,45 0,30	-0,61 0,59	-0,81 0,12	-0,88 0,36	-0,62 -0,06	0,78 0,36	0,30 -0,06	-0,85 0,36	-0,67 -0,06	0,78 0,36

Legende:

Messwertabweichung im Streubereich:	bis $\pm 0,25$ Vol.-%	bis $\pm 0,50$ Vol.-%	bis $\pm 1,0$ Vol.-%	> 1,0 Vol.-%
-------------------------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	--------------

Bei Verwendung der Prüfgeräte bei weicheren Frischbetonen zeigen die kleineren LP-Töpfe wiederholt eine deutlich höhere Genauigkeit im Vergleich zu den verwendeten 8 l-Töpfen. Hier liegen die Messwertabweichungen in der Regel im Bereich zwischen - 0,52 und 0,59 Vol.-%. Der HYDRO\_5\_T\_6L erweist sich durchweg als präzise bei der Anwendung an Betonen mit hohem LP-Gehalt, während die konventionellen LP-Töpfe in der Regel erst zum zweiten Prüfzeitpunkt geringere Messwertabweichungen im Streubereich zwischen - 0,88 und 0,59 Vol.-% aufweisen.

### 8.3.3 Ergebnisse an Unterbetonen (D = 22 mm)

#### Ergebnisse an Unterbetonen mit einem niedrigen (N) Luftporengehalt von bis ca. 3,5 Vol.-%

Als zweite Grundrezeptur wurde ein Unterbeton mit einem Größtkorn von 22 mm zu Vergleichsuntersuchungen herangezogen. Dabei ist der LP-Gehalt und der  $w/z$ -Wert in gleicher Weise wie bei den Oberbetonen variiert worden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im Folgenden in Form von Diagrammen und Tabellen dargestellt und analysiert.

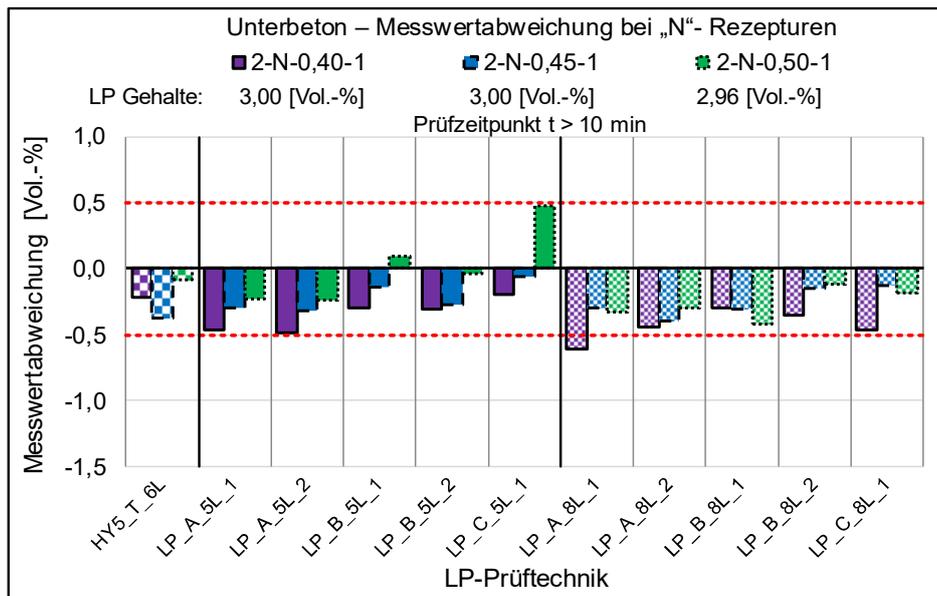


Bild 8-7: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 2-N-1; Prüfzeitpunkt t > 10 min

Im Balkendiagramm in Bild 8-7 sind die Messwertabweichungen der verwendeten Prüfgeräte bei der Bestimmung des niedrigen LP-Gehaltes in Unterbetonen dargestellt. Die durchschnittlichen Soll-Luftporengehalte zum Prüfzeitpunkt t > 10 min liegen bei dieser Untersuchung bei etwa 3,0 Vol.-%. Eine ausführliche Darstellung der erfassten Messwerte der Vergleichsuntersuchung mit den Unterbetonen sind den Tabellen Tab. I – 43 bis Tab. I – 52 im Anhang zu entnehmen.

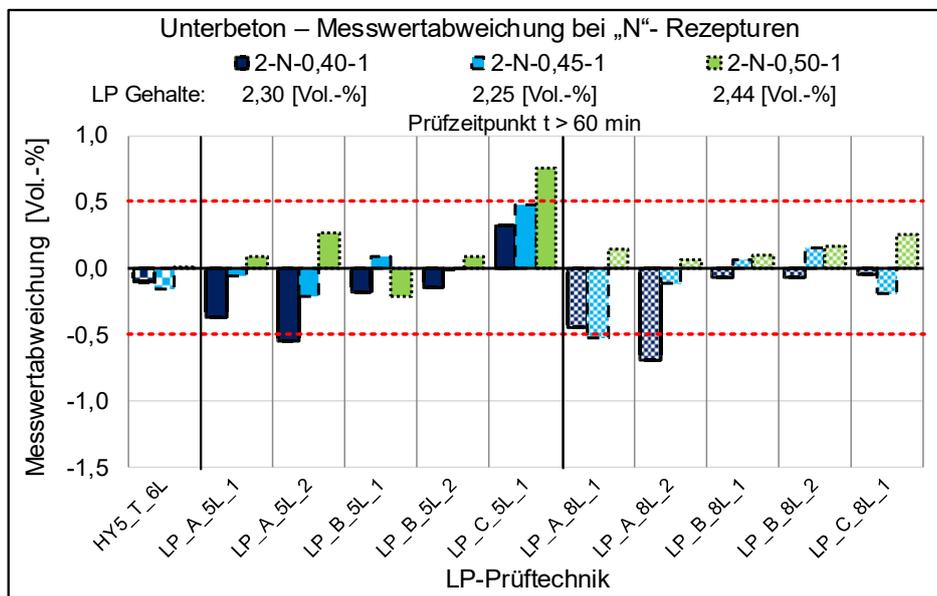


Bild 8-8: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 2-N-1; Prüfzeitpunkt t > 60 min

Es ist erkennbar, dass die Anpassung des w/z-Wertes in der Rezeptur in den meisten Fällen einen Einflussfaktor auf die Messwertbildung und die zugehörige Abweichung in diesem Vergleich darstellt. Bei steifen Betonen (w/z = 0,40) wird der LP-Gehalt tendenziell unterschätzt und bleibt meistens innerhalb der Toleranzgrenzen von ± 0,5 Vol.-%. Eine Ausnahme bildet hierbei der LP\_A\_8L\_1.

Bei plastischen Betonen (w/z = 0,45) wird überwiegend eine Reduktion der Abweichung beobachtet. Alle Messwertabweichungen liegen innerhalb des Toleranzbereiches.

Bei weichen Betonen ( $w/z = 0,50$ ) kommt es in der Regel nicht zu einer Überschätzung des LP-Gehaltes. Im vorliegenden Vergleich, in Bild 8-7 dargestellt, werden die geringsten Messwertabweichungen bei den LP-Töpfen des Herstellers B beobachtet, während die LP-Töpfe des Herstellers A im Durchschnitt die geringste Genauigkeit aufweisen.

Bild 8-8 zeigt die ermittelten Messwertabweichungen der konventionellen LP-Töpfe bei den Unterbetonen mit niedrigem LP-Gehalt zum zweiten Prüfzeitpunkt. Der Mittelwert des LP-Gehaltes liegt zu dem Zeitpunkt bei ca. 2,3 Vol.-%.

Im Vergleich zu den Messwertabweichungen zum ersten Prüfzeitpunkt scheint die Präzision der LP-Töpfe bei der Wiedergabe des FB-Luftporengehaltes zu diesem Zeitpunkt meistens zu steigen. Die Abweichungen, die bei den Frischbetonen mit einem  $w/z$ -Wert von 0,40 auftreten, liegen weiterhin meistens innerhalb der Grenzwerte von  $\pm 0,50$  Vol.-%. Messergebnisse mit LP-Töpfen des Herstellers A weisen hierbei die größten Abweichungen auf.

Tab. 8-5: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen; Unterbetone mit niedrigem LP-Gehalt

Prüfgerät	HY5_T_6L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2	LP_B_5L_1	LP_B_5L_2	LP_C_5L_1	Streubereich 5L	LP_A_8L_1	LP_A_8L_2	LP_B_8L_1	LP_B_8L_2	LP_C_8L_1	Streubereich 8L
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Mischung	2-N-0,40-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,22	-0,46	-0,49	-0,30	-0,31	-0,19	-0,49 -0,19	-0,61	-0,44	-0,30	-0,35	-0,47	-0,61 -0,30
t > 60 min	-0,10	-0,37	-0,55	-0,18	-0,15	0,32	-0,55 -0,15	-0,45	-0,69	-0,07	-0,07	-0,05	-0,69 -0,05
Mischung	2-N-0,45-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,38	-0,29	-0,32	-0,14	-0,27	-0,07	-0,32 -0,07	-0,30	-0,39	-0,31	-0,15	-0,13	-0,39 -0,13
t > 60 min	-0,16	-0,06	-0,22	0,09	0,00	0,48	-0,22 0,48	-0,53	-0,11	0,06	0,16	-0,19	-0,53 0,16
Mischung	2-N-0,50-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,08	-0,23	-0,24	0,09	-0,04	0,48	-0,24 0,48	-0,33	-0,29	-0,42	-0,11	-0,18	-0,42 -0,11
t > 60 min	0,01	0,09	0,26	-0,22	0,09	0,76	-0,22 0,76	0,14	0,07	0,09	0,16	0,26	0,07 0,26
	Spannweite der Streuung [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,38 -0,08	-0,49 -0,23	-0,31 0,09	-0,19 0,48	-0,49 0,48	-0,61 -0,30	-0,42 -0,11	-0,47 -0,13	-0,61 -0,11				
t > 60 min	-0,16 0,01	-0,55 0,26	-0,22 0,09	0,32 0,76	-0,55 0,76	-0,69 0,14	-0,07 0,16	-0,19 0,26	-0,69 0,26				

Legende:

Messwertabweichung im Streubereich:	bis $\pm 0,25$ Vol.-%	bis $\pm 0,50$ Vol.-%	bis $\pm 1,0$ Vol.-%	> 1,0 Vol.-%
-------------------------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	--------------

Beim Einsatz von Betonen mit einem  $w/z$ -Wert von 0,45 werden ebenfalls meistens vernachlässigbare Messwertabweichungen bei den Untersuchungen festgestellt. Überschätzt werden die LP-Gehalte überwiegend beim Einsatz der Prüftechnik an weichen Straßenbetonen ( $w/z = 0,50$ ). Im Schnitt werden bei den LP-Töpfen des Herstellers A und C auch zum zweiten Prüfzeitpunkt die größten Messwertabweichungen festgestellt.

Die zugehörigen Messwertabweichungen und die Streubereiche jedes Prüfgerätes sind in Tab. 8-5 aufgeführt. Dabei zeigt sich, dass bei der Verwendung der Prüfgeräte an steifen Unterbetonen mit geringem LP-Gehalt meist vernachlässigbare Messwertabweichungen bei der Ermittlung des Frischbeton-Luftporengehaltes auftreten. Die geringsten Abweichungen werden bei Anwendung der Töpfe des Herstellers B und HYDRO\_5\_T\_6L erfasst.

Für plastische Betone (w/z-Wert von 0,45) liegt der Streubereich der ermittelten Messwertabweichungen bei den 5-l-Töpfen zwischen - 0,32 und 0,48 Vol.-%. Messergebnisse mit LP-Töpfen mit einem Fassungsvermögen von 8 l weisen eine ähnliche Streuung der betrachteten Messwertabweichungen auf.

An weichen Betonen erweisen sich die LP-Töpfe meistens als ausgesprochen präzise, mit der Ausnahme der LP-Töpfe des Herstellers C. Bei allen betrachteten Prüfgeräten wird im Schnitt an allen Unterbetonen mit geringem LP-Gehalt eine überwiegend unbedeutende Messwertabweichung, grün gekennzeichnet, festgestellt. Zu den Töpfen mit der geringsten Messwertabweichung zu beiden Prüfzeitpunkten gehören der HYDRO\_5\_T\_6L und die konventionellen LP-Töpfe des Herstellers B.

### Ergebnisse an Unterbetonen mit einem mittleren (M) Luftporengehalt von ca. 3,5 bis 6,5 Vol.-%

Das Balkendiagramm im Bild 8-9 zeigt die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen zum ersten Prüfzeitpunkt zwischen den konventionellen LP-Prüfgeräten und der HYDRO5\_T\_5L an drei Unterbetonen mit mittlerem LP-Gehalt von ca. 5,2 Vol.-% unter Variation von drei w/z-Werten.

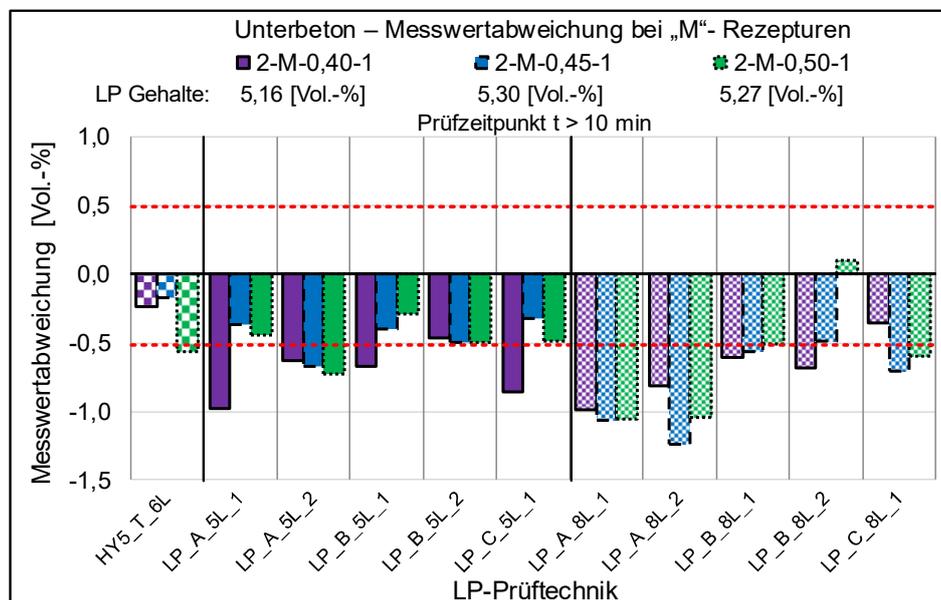


Bild 8-9: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 2-M-1; Prüfzeitpunkt t > 10 min

Es ist erkennbar, dass die Messwertabweichungen bei der Messung des Frischbeton-Luftporengehaltes mit zunehmendem Frischbeton-Luftporengehalt ansteigen. In den meisten Fällen wird der LP-Gehalt bei Verwendung konventioneller Prüfgeräte unterschätzt, unabhängig von dem eingestellten w/z-Wert. Eine Reduzierung der Messwertabweichungen ist bei einigen der eingesetzten Prüfgeräte mit steigendem w/z-Wert festzustellen. Die höchsten Abweichungen liegen geringfügig über 1 Vol.-% vom jeweiligen Soll-Wert. Beim Einsatz aller betrachteten LP-Töpfe im Vergleich wird mindestens bei einem der verwendeten Unterbetone eine Messwertabweichung über dem festgelegten Grenzwert von -0,50 Vol.-% festgestellt. Die Ergebnisse anhand der Prüfgeräte HYDRO\_5\_T\_6L, LP\_B\_5L\_2 und LP\_B\_8L\_1 weichen nur geringfügig vom Grenzwert ab.

Für plastische und weiche Betone mit einem w/z-Wert von 0,45 bzw. 0,50 (blaue und grüne Balken) werden überwiegend geringe Messwertabweichungen bei den kleineren LP-Töpfen festgestellt. LP-Töpfe mit einem Fassungsvermögen von 8 l weisen meistens eine Messwertabweichung von über 0,5 Vol.-% auf.

Zum zweiten Prüfzeitpunkt sind überwiegend geringere Abweichungen bei der LP-Messung in Betonrezepturen mit mittlerem LP-Gehalt bei allen Prüfgeräten zu beobachten (siehe Bild 8-10). In dem Diagramm ist erneut eine Abstufung der Messwertabweichung in Abhängigkeit vom gewählten w/z-Wert zu erkennen.

Die stärkste Überschätzung wird bei den Unterbetonen mit einem w/z-Wert von 0,40 beobachtet. Ein Anstieg des w/z-Wertes auf 0,45 führt zu einer Reduzierung der Messwertabweichung. Die LP-Gehalte aller betrachteten Prüfgeräte weisen dabei eine Messwertabweichung innerhalb des Toleranzbereichs auf. Bei weichen Betonen kommt es meistens zu einer geringfügigen bis mittleren Überschätzung des LP-Gehaltes, die bis zu 0,7 Vol.-% über dem Soll-Wert liegt. Bei der Messung des LP-Gehaltes in Unterbetonen mit mittlerem LP-Gehalt erweisen sich die Prüfgeräte HYDRO\_5\_T\_6L sowie die LP\_B\_5L\_2 und LP\_B\_8L\_1 als besonders präzise.

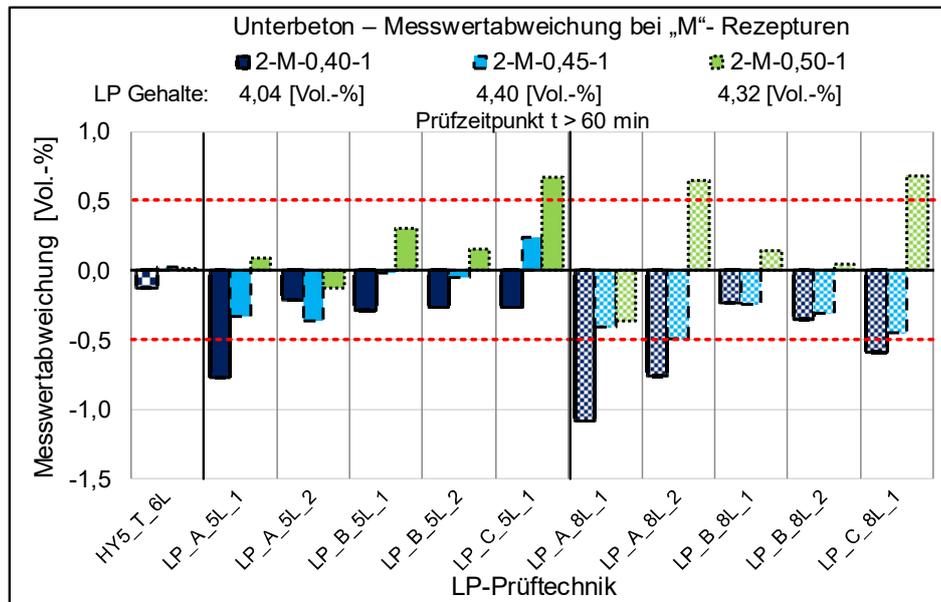


Bild 8-10: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 2-M-1; Prüfzeitpunkt t > 60 min

Tab. 8-6 stellt die zuvor grafisch dargestellten Messwertabweichungen und Streubereiche für jedes Prüfgerät dar. Die farbliche Unterteilung der Messwertabweichungen verdeutlicht, dass der mittlere LP-Gehalt der Unterbetone im Schnitt präziser von den LP-Töpfen mit einem Fassungsvermögen von 5 l und dem HYDRO\_5\_T\_6L erfasst wurde.

Die größten Abweichungen treten bei den Frischbetonen mit einem w/z-Wert von 0,40 auf. Im ersten Prüfzeitpunkt betragen die durchschnittlichen Abweichungen zwischen den konventionellen LP-Töpfen im Streubereich zwischen - 0,99 und - 0,36 Vol.-%. Zum zweiten Prüfzeitpunkt ist eine deutliche Reduktion der Abweichung überwiegend bei den 5-l-Töpfen zu beobachten. Die Messwertabweichungen bei HYDRO\_5\_T\_6L liegen hierbei im vernachlässigbaren Bereich (grün).

Unter Verwendung von 5-l-Töpfen bei plastischen Betonen werden in der Regel geringere Messwertstreuungen als bei den steifen Unterbetonen festgestellt. Die höchsten Werte werden hierbei bei LP\_B\_5L\_2 zu beiden Prüfzeitpunkten ermittelt. Die Messwertabweichungen der größeren Töpfe liegen bei plastischem Unterbeton meistens über - 0,50 Vol.-%.

Überwiegend geringere Abweichungen werden bei Betonen mit einem w/z-Wert von 0,50 beobachtet. LP-Töpfe mit einem kleinen Fassungsvermögen weisen laut Tab. 8-6 zum zweiten Prüfzeitpunkt in den meisten Fällen eine Messwertabweichung von unter  $\pm 0,50$  Vol.-% auf.

Durch die Erfassung der Streuung über alle w/z-Werte wird deutlich, dass zum ersten Prüfzeitpunkt in der Regel hohe Streuungen der Abweichungen festzustellen sind. Zum zweiten Prüfzeitpunkt reduzieren sich meist die Streuungen.

Verantwortlich für die oben genannte zeitabhängige Entwicklung der Messergebnisse könnte hierbei unter anderem die Konsistenzveränderung des Frischbetons aufgrund der fortgeschrittenen Hydratation zum

zweiten Prüfzeitpunkt sein. Die geringsten Messwertstreuungen werden bei dem HYDRO\_5\_T\_6L und LP\_B\_5L festgestellt.

Tab. 8-6: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen; Unterbetone mit mittlerem LP-Gehalt

Prüfgerät	HY5_T_6L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2	LP_B_5L_1	LP_B_5L_2	LP_C_5L_1	Streubereich 5L	LP_A_8L_1	LP_A_8L_2	LP_B_8L_1	LP_B_8L_2	LP_C_8L_1	Streubereich 8L
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Mischung	2-M-0,40-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,24	-0,98	-0,63	-0,67	-0,47	-0,85	-0,98 -0,47	-0,99	-0,82	-0,61	-0,68	-0,36	-0,99 -0,36
t > 60 min	-0,12	-0,77	-0,21	-0,29	-0,27	-0,27	-0,77 -0,21	-1,08	-0,76	-0,23	-0,35	-0,58	-1,08 -0,23
Mischung	2-M-0,45-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,18	-0,37	-0,67	-0,40	-0,50	-0,32	-0,67 -0,32	-1,06	-1,23	-0,57	-0,49	-0,71	-1,23 -0,49
t > 60 min	0,03	-0,33	-0,36	-0,01	-0,05	0,24	-0,36 0,24	-0,41	-0,49	-0,25	-0,31	-0,45	-0,49 -0,25
Mischung	2-M-0,50-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,57	-0,44	-0,73	-0,29	-0,50	-0,49	-0,73 -0,29	-1,05	-1,04	-0,51	0,10	-0,59	-1,05 0,10
t > 60 min	0,02	0,09	-0,12	0,31	0,16	0,67	-0,12 0,67	-0,36	0,65	0,14	0,05	0,68	-0,36 0,68
	Spannweite der Streuung [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,57 -0,18	-0,98 -0,37	-0,67 -0,29	-0,85 -0,32	-0,98 -0,37	-1,23 -0,98	-0,68 0,10	-0,71 -0,36	-1,23 0,10				
t > 60 min	-0,12 0,03	-0,77 0,09	-0,29 0,31	-0,27 0,67	-0,77 0,67	-1,08 0,65	-0,35 0,14	-0,58 0,68	-1,08 0,68				

Legende:

Messwertabweichung im Streubereich:	bis ± 0,25 Vol.-%	bis ± 0,50 Vol.-%	bis ± 1,0 Vol.-%	> 1,0 Vol.-%
-------------------------------------	-------------------	-------------------	------------------	--------------

### Ergebnisse an Unterbetonen mit einem hohen (H) Luftporengehalt von über ca. 6,5 Vol.-%

Das Balkendiagramm im Bild 8-11 zeigt die Messwertabweichungen der verwendeten Prüfgeräte bei der Luftporenmessung an Unterbetonen mit hohem LP-Gehalt zum ersten Prüfzeitpunkt. Die Mittelwerte der Soll-Luftporengehalte liegen bei den betrachteten Betonen auf einem hohen Niveau zwischen 7,15 und 9,48 Vol.-%.

Es ist eindeutig zu erkennen, dass mit steigendem LP-Gehalt im Frischbeton auch die Messwertabweichungen entsprechend zunehmen. In den meisten Fällen werden die gemessenen Luftporengehalte deutlich unter dem gesetzten Grenzwert von -0,50 Vol.-% unterschätzt. Die Variation des w/z-Wertes und somit die Anpassung der Frischbetonkonsistenz zeigt in diesem Fall keinen eindeutigen Einfluss auf die Messwertabweichung. Die höchsten Messwertabweichungen werden bei den LP-Töpfen mit einem Fassungsvermögen von 8 l festgestellt. Der höchste Wert der Unterschätzung wird beim Einsatz des LP\_B\_8L\_2 mit 2,23 Vol.-% ermittelt. Eine starke Überschätzung des LP-Gehaltes bei Verwendung des LP\_C\_5L\_1 bei einem Unterbeton mit einem w/z-Wert von 0,45 weist als Ausreißer auf einen Bedienungsfehler hin.

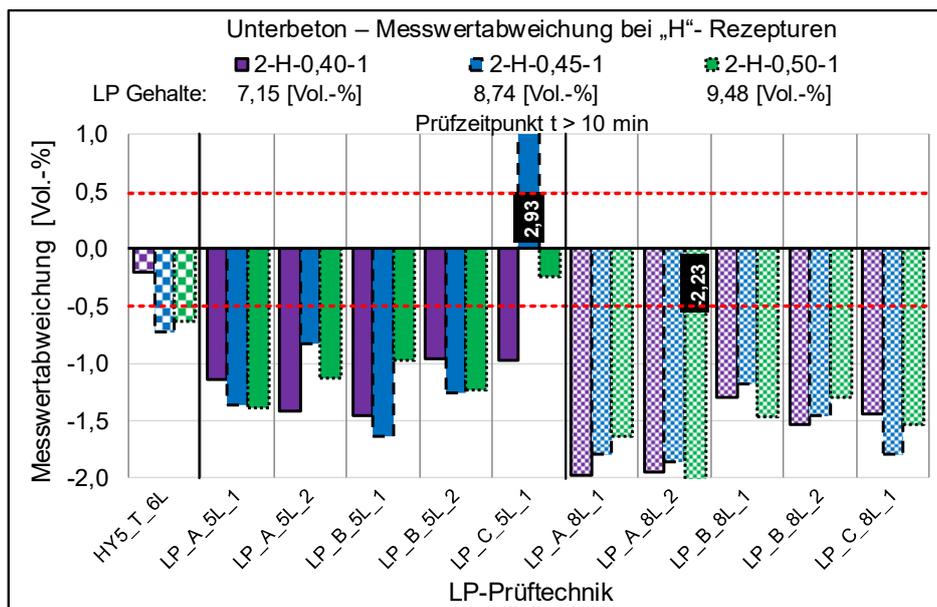


Bild 8-11: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 2-H-1; Prüfzeitpunkt t > 10 min

Die Messwertabweichungen bei Messungen mit den kleineren LP-Töpfen sind in der Regel geringer als bei ihren größeren Gegenstücken, bleiben jedoch insgesamt auf einem sehr hohen Niveau. Die niedrigsten Messwertabweichungen zum Prüfzeitpunkt t > 10 min wurden in diesem Vergleich bei dem HYDRO\_5\_T\_6L, dem LP\_A\_5L\_2 und dem LP\_B\_5L\_2 mit einem Fassungsvermögen von 5 l festgestellt.

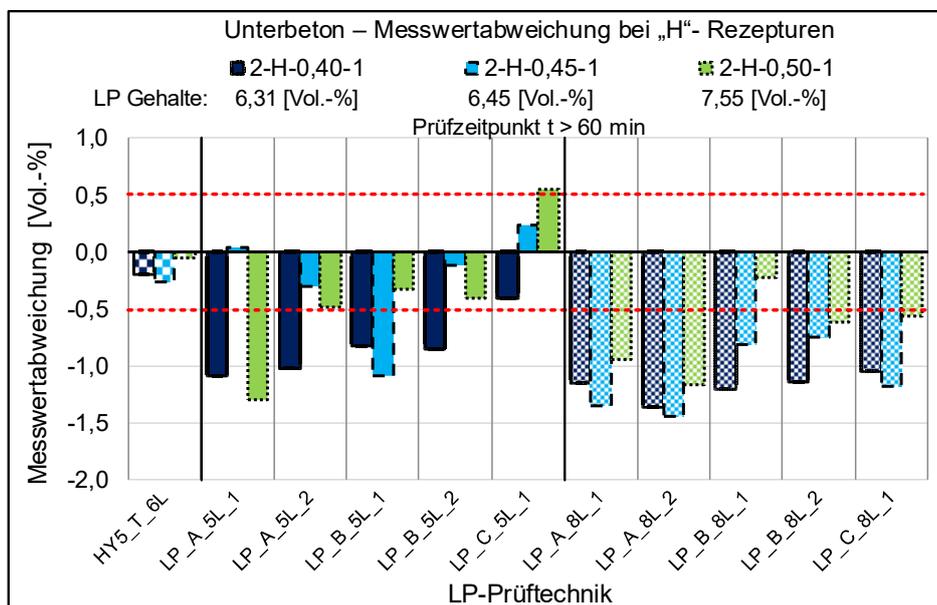


Bild 8-12: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 2-H-1; Prüfzeitpunkt t > 60 min

Zum zweiten Prüfzeitpunkt werden hingegen deutlich geringere Messwertabweichungen beobachtet (siehe Bild 8-12).

Die Abweichungen, die beim Einsatz der Prüfgeräte an weichen Frischbetonen mit einem w/z-Wert von 0,50 auftreten, liegen bei der Hälfte der Prüfgeräte im Bereich innerhalb des  $\pm 0,5$  Vol.-% Grenzbereiches. Bei größeren LP-Töpfen werden auch zum zweiten Prüfzeitpunkt höhere Messwertabweichungen im Vergleich zu kleineren LP-Töpfen festgestellt. Bei den meisten größeren LP-Töpfen wird bei Verwendung des

Unterbetons mit einem w/z-Wert von 0,40 und 0,45 eine Messwertabweichung von über - 0,50 Vol.-% beobachtet. Die stärksten Abweichungen bei der Messung des FB-Luftporengehaltes werden in den 8-I-Töpfen der Hersteller A und C festgestellt. Abweichungen im Grenzwertbereich von  $\pm 0,5$  Vol.-% werden allein beim HYDRO\_5\_T\_6L erfasst.

Tab. 8-7: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen; Unterbetone mit hohem LP-Gehalt

Prüfgerät	HY5_T_6L	LP_A_5L_1	LP_A_5L_2	LP_B_5L_1	LP_B_5L_2	LP_C_5L_1	Streubereich 5L	LP_A_8L_1	LP_A_8L_2	LP_B_8L_1	LP_B_8L_2	LP_C_8L_1	Streubereich 8L
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Mischung	2-H-0,40-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,20	-1,15	-1,42	-1,46	-0,96	-0,97	-1,46 -0,96	-1,97	-1,96	-1,29	-1,53	-1,44	-1,97 -1,29
t > 60 min	-0,20	-1,10	-1,02	-0,83	-0,85	-0,41	-1,10 -0,41	-1,15	-1,36	-1,21	-1,14	-1,06	-1,36 -1,06
Mischung	2-H-0,45-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,72	-1,36	-0,83	-1,64	-1,26	2,93	-1,64 2,93	-1,79	-1,86	-1,18	-1,45	-1,80	-1,86 -1,18
t > 60 min	-0,27	0,04	-0,30	-1,09	-0,12	0,24	-1,09 0,24	-1,35	-1,45	-0,81	-0,75	-1,18	-1,45 -0,75
Mischung	2-H-0,50-1 [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,63	-1,40	-1,12	-0,97	-1,23	-0,24	-1,40 -0,24	-1,64	-2,23	-1,47	-1,30	-1,54	-2,23 -1,30
t > 60 min	-0,05	-1,30	-0,49	-0,33	-0,40	0,56	-1,30 0,56	-0,94	-1,17	-0,22	-0,62	-0,56	-1,17 -0,22
	Spannweite der Streuung [Vol.-%]												
t > 10 min	-0,72 -0,20	-1,46 -0,83	-1,64 -0,96	-0,97 2,93	-1,64 2,93	-0,97 2,93	-1,64 2,93	-2,23 -1,64	-1,53 -1,18	-1,80 -1,44	-1,80 -1,44	-1,80 -1,18	-2,23 -1,18
t > 60 min	-0,27 -0,05	-1,30 -1,10	-1,09 -0,12	-0,41 0,56	-1,30 0,56	-0,41 0,56	-1,30 0,56	-1,45 -0,94	-1,21 -0,22	-1,18 -0,56	-1,18 -0,56	-1,18 -0,22	-1,45 -0,22

Legende:

Messwertabweichung im Streubereich:	bis $\pm 0,25$ Vol.-%	bis $\pm 0,50$ Vol.-%	bis $\pm 1,0$ Vol.-%	> 1,0 Vol.-%
-------------------------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	--------------

Aus Tab. 8-7 wird ersichtlich, dass die Ermittlung des LP-Gehaltes an Unterbetonen mit hohem Frischbeton-Luftporengehalt zu beiden Prüfzeitpunkten bei konventionellen LP-Töpfen mit deutlichen Messwertabweichungen behaftet ist. Geringere Messwertabweichungen werden hingegen bei den LP-Töpfen mit einem Fassungsvermögen von 5 l bei plastischen und weichen Unterbetonen erzielt, allerdings erst zum zweiten Prüfzeitpunkt. Im Schnitt kann der HYDRO\_5\_T\_6L als präzisere Prüftechnik beim Einsatz an den Betonen mit hohem LP-Gehalt eingestuft werden. Im Vergleich dazu zeigen Prüfgeräte mit größerem Fassungsvermögen eine geringere Präzision.

### 8.3.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die Vergleichsuntersuchungen an konventionellen Prüftechniken zeigten, dass die Prüfgeräte je nach gewählter Grundrezeptur des betrachteten Betons unterschiedliche Messwertabweichungen aufweisen. Die Geräte erzielten bei der Erfassung der Messwerte an Oberbetonen im Vergleich zu Unterbetonen geringere Abweichungen. Somit scheint die Zusammensetzung der Frischbetone einen Einfluss auf die Messwertbildung der konventionellen Prüftechnik zu haben.

Der Prüfzeitpunkt spielte hierbei ebenfalls eine entscheidende Rolle. Im Laufe der Zeit verlagerte sich die Spannweite der Messwertabweichungen in Richtung einer Überschätzung des LP-Gehaltes. Während präzise ermittelte Messwerte zum ersten Prüfzeitpunkt (z. B. mit HYDRO\_5\_T\_6L) geringfügige Abweichun-

gen mit der Tendenz zur Überschätzung bei späteren Messungen zeigten, ergab sich beim Einsatz konventioneller LP-Töpfe eher die Neigung, den LP-Gehalt zum ersten Prüfzeitpunkt deutlich zu unterschätzen.

Die beobachtete Verschiebung der Spannweite der Messwertabweichungsstreuung in Richtung der Überschätzung führte zu einer Verbesserung der Messgüte der konventionellen LP-Töpfe zum zweiten Prüfzeitpunkt. Verursacht sein könnte dies durch die Konsistenzveränderung aufgrund der fortschreitenden Hydratation im Frischbeton bis zum zweiten Prüfzeitpunkt, die offenbar die Erfassung des Luftporengehalts mit den konventionellen LP-Töpfen bei geringerem Prüfdruck begünstigt. Zudem wurde beobachtet, dass zum zweiten Prüfzeitpunkt überwiegend geringere Luftporengehalte im Frischbeton festgestellt wurden, was ebenfalls Einfluss auf die Größe der Abweichung haben könnte.

Die Anpassung des Luftporengehalts im Frischbeton führte zu einer Skalierung der Messwertabweichungen bei allen betrachteten konventionellen LP-Töpfen. Es wurde beobachtet, dass die Messwerte von Betonen mit niedrigem LP-Gehalt von der Prüftechnik mit nur geringfügigen Messwertabweichungen erfasst wurden. Bei einer Erhöhung des FB-Luftporengehalts vergrößerten sich die Messwertabweichungen. Die höchsten Messwertabweichungen wurden in der Regel bei Frischbetonen mit sehr hohem LP-Gehalt festgestellt.

Der  $w/z$ -Wert als Parameter zeigte ebenfalls einen Einfluss auf die Messgüte der Prüfgeräte. Anhand der Ergebnisse an Unterbetonen konnte beobachtet werden, dass bei steiferen Unterbetonen mit niedrigem  $w/z$ -Wert die jeweilige FB-Luftporenmessung höhere Messwertabweichungen aufwies als bei Frischunterbetonen mit höherem  $w/z$ -Wert. Diese Tendenz konnte jedoch ausschließlich bei Frischunterbetonen mit niedrigem und mittlerem FB-Luftporengehalt beobachtet werden. Die Konsistenz des Frischbetons während der Luftporenerfassung könnte eine mögliche Ursache für die beobachtete Entwicklung der Messwerte sein. Ein niedriger  $w/z$ -Wert führt zu einem steiferen Frischbeton, was möglicherweise zu unerwünschten Verdichtungseffekten wie einer inhomogenen Luftporenverteilung bzw. -struktur oder ungleichmäßigen Verdichtung führt. Insbesondere bei der konventionellen Prüftechnik mit geringem Prüfdruck könnte dies zu einer unvollständigen Erfassung der Luftporen führen.

Das Fassungsvermögen der jeweiligen Prüftechnik zeigte einen signifikanten Einfluss auf die Messgüte der Prüfgeräte. Konventionelle LP-Töpfe desselben Herstellers, aber mit unterschiedlichen Fassungsvermögen, ergaben an gleichen Betonen deutlich unterschiedliche Messwerte. Bei Messungen des FB-Luftporengehalts mit konventionellen LP-Töpfen mit größerem Fassungsvermögen zum zweiten Prüfzeitpunkt an Oberbetonen wurde eine höhere Messgüte festgestellt als bei baugleichen LP-Töpfen mit niedrigerem Fassungsvermögen. Bei Messungen an Unterbetonen hingegen wurden bei den kleineren LP-Töpfen präzisere Messwerte beobachtet als bei den größeren konventionellen LP-Prüfern. Dies könnte darauf hindeuten, dass das Fassungsvermögen der LP-Töpfe eine Rolle bei der Messgenauigkeit spielt, insbesondere in Bezug auf die Konsistenz des Frischbetons und dessen Zusammensetzung.

Die Herstellungsvariante der konventionellen LP-Töpfe kann sich ebenfalls auf die Messgenauigkeit auswirken. LP-Töpfe von Hersteller B oder C lieferten in den meisten Fällen präzisere Messergebnisse als die von Hersteller A. Es ist jedoch zu beachten, dass selbst bei baugleichen Modellen desselben Herstellers individuelle Unterschiede in der Messgenauigkeit festgestellt wurden, trotz gleicher Nutzungsdauer und Kalibrierung. Daher wird empfohlen, die Messgenauigkeit durch den Einsatz einer alternativen Prüftechnik wie dem HYDRO\_5\_T\_6L zu überprüfen. Dieses alternative Verfahren mit einer stabilen Wassersäule und doppeltem Arbeitsdruck erwies sich in den meisten Fällen als ausreichend präzise.

## 8.4 Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung mit international genormten bzw. alternativen LP-Prüfgeräten

### 8.4.1 Allgemein

In einer weiteren Phase der Untersuchung erfolgte eine qualitative Bewertung der Messqualität des Frischbeton-Luftporengehaltes unter Verwendung von alternativen LP-Prüfgeräten mit verschiedenen betontechnologischen Parametern. Die Grundrezepturen und deren Variationen blieben dabei unverändert. Die Prüfungen zur Erfassung des Luftporenvolumens wurden mit insgesamt vier alternativen Prüfgeräten sowie einem konventionellen LP-Topf mit einem Fassungsvermögen von 8 l absolviert. Die Tests wurden an zwei Chargen desselben Frischbetons zu zwei verschiedenen Prüfzeitpunkten durchgeführt. Die Gesamtergebnisse der Einzelmessungen für jedes verwendete Prüfgerät sind in den Tabellen Tab. I – 33 bis Tab. I - 52 im Anhang aufgeführt.

In den folgenden sechs Abbildungen sind die Abweichungen der gemessenen Werte vom Soll-Mittelwert des Frischbeton-Luftporengehaltes in Vol.-% aus den Untersuchungsergebnissen zu beiden Prüfzeitpunkten dargestellt. Diese Abweichungen wurden aus den Ist-Rohdichten, ermittelt in dem jeweiligen verwendeten Prüfgerät, berechnet. Die Ergebnisse sind in einzelne Diagrammen unterteilt, die dem gleichen Schema folgen wie im Kapitel 8.3, basierend auf der jeweiligen Grundrezeptur, dem Prüfzeitpunkt und dem LP-Gehaltsbereich. Im Folgenden werden diese Ergebnisse grafisch dargestellt und diskutiert.

Die Ergebnisse des HYDRO\_5\_T\_6L und HYDRO\_5\_W\_3,4L sind auf der linken Seite dargestellt, gefolgt von den Ergebnissen des verwendeten konventionellen LP-Topfes LP\_B\_8L\_2. Auf der rechten Seite der Diagramme sind die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung mit den alternativen Prüfgeräten SAM\_7L und AVA-3000 angegeben. Bei Frischbetonen mit einem w/z-Wert von 0,40 und niedrigem LP-Gehalt wurde die AVA-3000-Prüftechnik aufgrund der deutlich steifen Konsistenz des Frischbetons nicht eingesetzt. Eine ausreichende Entnahmemenge der Probe aus dem Verdichtungsgefäß für das AVA-3000-Prüfgerät war unter den genannten betontechnologischen Bedingungen nicht gegeben.

Zu jedem Diagrammpaar erfolgt eine tabellarische Darstellung der Messwertabweichungen mit den ermittelten zugehörigen Streubereichen der Prüftechnik. Die Ampel-Farbkennzeichnung der dargestellten Ergebnisse wird beibehalten, um die Interpretation der Auswirkung verschiedener Parameter auf die Messwertqualität zu erleichtern.

### 8.4.2 Ergebnisse an Oberbetonen (D = 8 mm)

#### Ergebnisse an Oberbetonen mit einem niedrigen (N) Luftporengehalt von bis ca. 3,5 Vol.-%

Die beiden Balkendiagramme in Bild 8-13 zeigen die Messwertabweichungen der verwendeten alternativen Prüfgeräte in drei verschiedenen w/z-Wert-Kategorien. Auf der linken Seite des Bildes sind die ermittelten Messwertabweichungen aus den Untersuchungen zum ersten Prüfzeitpunkt dargestellt, während auf der rechten Seite die Ergebnisse zum zweiten Prüfzeitpunkt zu erkennen sind. Die Mittelwerte der Soll-Luftporengehalte zum Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min liegen im Bereich zwischen 3,1 und 4,3 Vol.-%. Zum zweiten Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min reduzieren sich diese Werte auf einen Bereich zwischen ca. 2,4 und 3,0 Vol.-%.

In dem linken Diagramm ist erkennbar, dass die Anpassung des w/z-Wertes in der Rezeptur meistens einen Einfluss auf die Messwertbildung bzw. die Messwertabweichung in diesem Vergleich darstellt. Bei Einsatz der Geräte an steifen Betonen ( $w/z = 0,40$ ) wird der LP-Gehalt überwiegend unterschätzt. Die Abweichung beim HYDRO\_5\_T\_6L, LP\_B\_8L\_2 und SAM\_7L liegen innerhalb der Toleranzgrenzen von  $\pm 0,5$  Vol.-%. Die Alternative zum HYDRO\_5\_T\_6L, der HYDRO\_5\_W\_3,4L weist hingegen sehr starke Messwertabweichungen von über 1,5 Vol.-% auf.

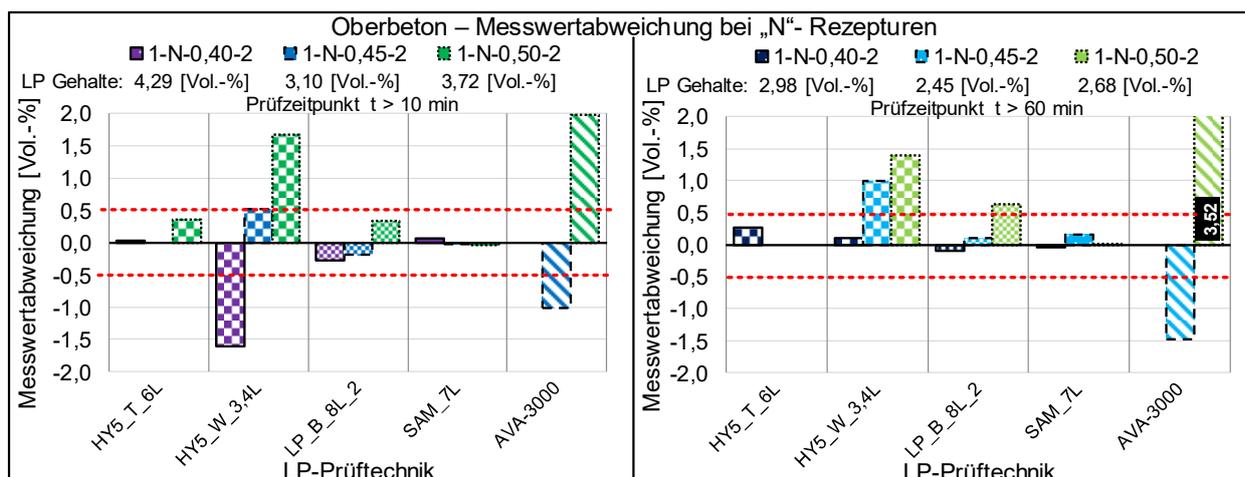


Bild 8-13: Vergleichsuntersuchung: alternative Prüfgeräte; Rezepturen: 1-N-2

Bei plastischen Betonen ( $w/z = 0,45$ ) wurde zunächst auch die AVA-3000-Prüftechnik zur Ermittlung des Frischbeton-LP-Gehaltes herangezogen. Die Messwertabweichungen reduzierten sich bei den meisten Prüfgeräten deutlich. Die Ergebnisse, die durch den Einsatz von AVA-3000 gewonnen wurden, weisen Messwertabweichungen außerhalb des Toleranzbereiches auf. Beim Einsatz des HYDRO\_5\_T\_6L wurde eine mechanische Störung während der Prüfung der Rezeptur 1-N-0,45-2 festgestellt. Aufgrund einer Undichtigkeit an der Pumpe konnte der angestrebte Prüfdruck von 2 bar nicht erreicht werden. Da der Frischbeton dadurch jedoch einer geringeren Belastung ausgesetzt wurde, war es nicht möglich, den Versuch an derselben Probe zu wiederholen. Die aufgetretenen Messwertabweichungen aufgrund der vorliegenden Störung wurden bei der Auswertung der Kennzahlen nicht weiter berücksichtigt.

Bei weichen Betonen der LP-Gruppe "N" ( $w/z = 0,50$ ) wird ebenfalls beobachtet, dass die alternativen Prüfgeräte tendenziell dazu neigen, den LP-Gehalt zu überschätzen. Vorliegende Überschätzung der Messwerte ist besonders ausgeprägt beim HYDRO\_5\_W\_3,4L und AVA-3000. Im vorliegenden Vergleich werden die geringsten Messwertabweichungen zum Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min beim Super Air Meter (SAM\_7L) festgestellt.

Im Bild 8-13 rechts sind die ermittelten Messwertabweichungen der alternativen Prüfgeräte für die Rezepturen 1-N-2 zum Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min dargestellt. Im Vergleich zu den Messwertabweichungen zum ersten Prüfzeitpunkt scheinen Messungen mit den verwendeten Prüfgeräten zu einem späteren Prüfzeitpunkt den Frischbeton-LP-Gehalt in den meisten Fällen zu überschätzen. Die festgestellten Abweichungen, die bei den Frischbetonen mit einem  $w/z$ -Wert von 0,40 auftreten, liegen größtenteils innerhalb der Grenzwerte von  $\pm 0,5$  Vol.-%. Ab einem  $w/z$ -Wert von 0,45 kommt es in den meisten Fällen zu einer Überschätzung des LP-Gehaltes bei den betrachteten Prüfgeräten. Der HYDRO\_5\_W\_3,4L sowie das AVA-3000 weisen in diesem Vergleich die größten Messwertabweichungen bei der Ermittlung des Frischbeton-LP-Gehaltes auf.

Die Messwertabweichungen und die daraus errechneten Streubereiche jedes Prüfgerätes sind in Tab. 8-8 aufgeführt. Die Abweichungen des HYDRO\_5\_T\_6L, die aufgrund einer technischen Störung auftraten, sind nicht angegeben. Aus den Daten geht hervor, dass bei der Verwendung der Prüfgeräte HYDRO\_5\_W\_3,4L sowie AVA-3000 an Oberbetonen mit geringem LP-Gehalt die Ergebnisse mit hohen Messwertabweichungen meistens über 1,0 Vol.-% zu verzeichnen sind. Die geringsten Abweichungen wurden hingegen unter Verwendung des SAM\_7L festgestellt, unabhängig vom gewählten  $w/z$ -Wert. Trotz des niedrigen Prüfdrucks des Prüfgerätes von 1 bar wurden nur unbedeutende Messwertabweichungen beobachtet. Dies könnte an dem digitalen Manometer mit integrierter Druckerfassung und präziser Prüfablauf-

steuerung des SAM\_7L liegen, das eine präzise Messwertbildung bei Oberbetonen mit geringem Luftporengehalt begünstigte. Als nächstpräzisere Prüfgeräte erweisen sich der HYDRO\_5\_T\_6 sowie der LP\_B\_8L\_2 zum ersten Prüfzeitpunkt.

Tab. 8-8: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen - alternative Prüfgeräte; Oberbetone mit niedrigem LP-Gehalt

Prüfgerät	HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_B_8L_2	SAM_7L	AVA-3000
1	2	3	4	5	6
Mischung	1-N-0,40-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	0,03	-1,61	-0,28	0,06	-
t > 60 min	0,27	0,10	-0,10	-0,04	-
Mischung	1-N-0,45-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	-	0,51	-0,18	-0,01	-1,02
t > 60 min	-	1,00	0,10	0,16	-1,47
Mischung	1-N-0,50-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	0,34	1,67	0,34	-0,04	1,98
t > 60 min	-	1,40	0,63	0,02	3,52
Mischung	Spannweite der Streuung [Vol.-%]				
t > 10 min	0,03 0,34	-1,61 1,67	-0,28 0,34	-0,04 0,06	-1,02 1,98
t > 60 min	0,27	0,10 1,40	-0,10 0,63	-0,04 0,16	-1,47 3,52

Legende:

Messwertabweichung im Streubereich:	bis $\pm 0,25$ Vol.-%	bis $\pm 0,50$ Vol.-%	bis $\pm 1,0$ Vol.-%	> 1,0 Vol.-%
-------------------------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	--------------

### Ergebnisse an Oberbetonen mit einem mittleren (M) Luftporengehalt von ca. 3,5 bis 6,5 Vol.-%

Das Balkendiagramm links im Bild 8-14 zeigt die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen zum ersten Prüfzeitpunkt zwischen den alternativen LP-Prüfgeräten an drei Oberbetonen mit mittlerem LP-Gehalt und drei verschiedenen w/z-Werten. Der Soll-Mittelwert des Frischbetons liegt in der Größenordnung zwischen 5,0 und 6,0 Vol.-%. Mit Ausnahme der AVA-3000 und des HYDRO\_5\_W\_3,4L liegen alle Messwertabweichungen der Prüfgeräte unabhängig vom eingestellten w/z-Wert der Oberbetone mit mittlerem Luftporengehalt innerhalb der Toleranzgrenzen von  $\pm 0,5$  Vol.-%. Meistens ist eine geringe Verschiebung der Messwertabweichung vom Unterschätzen zum Überschätzen durch die Zunahme des w/z-Wertes bei den betrachteten Prüfgeräten zu beobachten. Hierbei könnte unter anderem der betontechnologische Einfluss der fortschreitenden Hydratation und der damit einhergehenden Ansteifung des Frischbetons zugrunde liegen. Der genannte Einfluss ist jedoch als gering einzustufen.

Bei den plastischen Betonen mit einem w/z-Wert von 0,45 (blaue Balken) wird überwiegend ein Rückgang der Messwertabweichung bzw. eine ähnliche Abweichung der Messwerte festgestellt. Beim Vergleich der Messwertabweichungen der Prüfgeräte an weichen Betonen wird meistens eine Überschätzung des LP-Gehaltes im Beton festgestellt. LP\_B\_8L\_2 sowie der HYDRO\_5\_T\_6L weisen im Schnitt die geringsten Messwertabweichungen auf. Stärkste Messwertabweichungen beim Oberbetonen mit mittlerem LP-Gehalt von bis zu 4,1 Vol.-% werden hingegen beim HYDRO\_5\_W\_3,4L (w/z-Wert von 0,50) und beim AVA-3000 (w/z-Wert von 0,40) beobachtet.

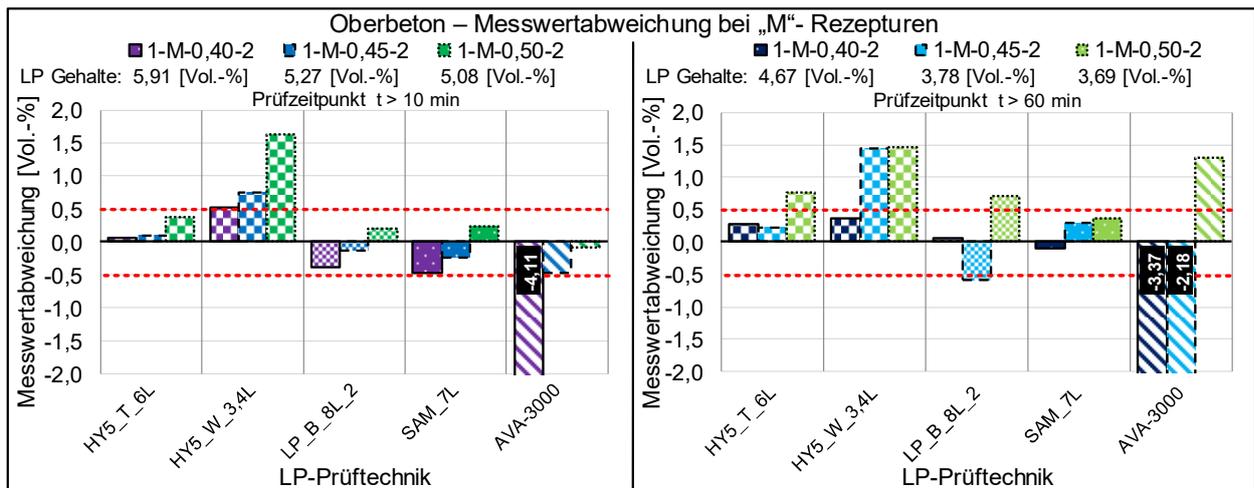


Bild 8-14: Vergleichsuntersuchung: alternative Prüfgeräte; Rezepturen: 1-M-2

Zum zweiten Prüfzeitpunkt werden überwiegend höhere Messwertabweichungen bei der LP-Messung an Betonrezepturen mit mittlerem LP-Gehalt bei den meisten alternativen Prüfgeräten festgestellt (siehe Bild 8-14 rechts). Eine Veränderung der Messwertabweichung vom Unterschätzen zum Überschätzen des Soll-Messwertes in Abhängigkeit vom angesetzten w/z-Wert und daher von der Konsistenz des Oberbetons ist zum zweiten Prüfzeitpunkt meistens nicht festzustellen. Die Abweichungen, die bei den Frischbetonen mit einem w/z-Wert von 0,40 auftreten, liegen überwiegend nahe am Grenzwert von 0,50 Vol.-%.

Tab. 8-9: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen - alternative Prüfgeräte; Oberbetone mit mittlerem LP-Gehalt

Prüfgerät	HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_B_8L_2	SAM_7L	AVA-3000
1	2	3	4	5	6
Mischung	1-M-0,40-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	0,06	0,52	-0,38	-0,46	-4,11
t > 60 min	0,29	0,36	0,06	-0,11	-3,37
Mischung	1-M-0,45-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	0,09	0,74	-0,13	-0,24	-0,47
t > 60 min	0,22	1,44	-0,59	0,30	-2,18
Mischung	1-M-0,50-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	0,38	1,64	0,20	0,24	-0,08
t > 60 min	0,76	1,46	0,71	0,36	1,31
	Spannweite der Streuung [Vol.-%]				
t > 10 min	0,06	0,52	-0,38	-0,46	-4,11
	0,38	1,64	0,20	0,24	-0,08
t > 60 min	0,22	0,36	-0,59	-0,11	-3,37
	0,76	1,46	0,71	0,36	1,31

Legende:

Messwertabweichung im Streubereich:	bis ± 0,25 Vol.-%	bis ± 0,50 Vol.-%	bis ± 1,0 Vol.-%	> 1,0 Vol.-%
-------------------------------------	-------------------	-------------------	------------------	--------------

Ab einem w/z-Wert von 0,45 wird der LP-Gehalt in der Mehrzahl der Fälle überschätzt. Eine Messwertabweichung über den Grenzwert hinaus wird beinahe bei allen Prüfgeräten beobachtet. Insgesamt zeigt der SAM\_7L eine geringe Messwertabweichung zum zweiten Prüfzeitpunkt.

Die Tab. 8-9 gibt die zuvor grafisch dargestellten Messwertabweichungen der LP-Messung für jedes Prüfgerät und die dazugehörige Streuung an. Die höchsten Abweichungen treten bei den Frischbetonen mit einem w/z-Wert von 0,45 bzw. 0,50 zum zweiten Prüfzeitpunkt auf. Bei der Betonrezeptur mit einem w/z-

Wert von 0,40 erweisen sich die alternativen Prüfgeräte als relativ präzise bei der Luftporenerfassung. Zum ersten Prüfzeitpunkt beträgt die Abweichung, ausgenommen die Ergebnisse der AVA-3000 und HYDRO\_5\_W\_3,4L, maximal 0,52 Vol.-%.

Am zweiten Prüfzeitpunkt zeigt sich in der Regel eine deutliche Reduktion der Messwertabweichung bei Einsatz der alternativen Prüftechnik am steifen Oberbeton (w/z-Wert von 0,40). Beim Einsatz der Prüfgeräte bei plastischen Betonen werden hohe Messwertabweichungen erst zum zweiten Prüfzeitpunkt bei einigen Prüfgeräten erfasst. Hierbei zeigen der SAM\_7L und der HYDRO\_5\_T\_6L hohe Präzision. Geringste Abweichungen werden bei Betonen mit einem w/z-Wert von 0,50 unter dem Einsatz der meisten Prüfgeräte zum ersten Prüfzeitpunkt beobachtet. Die höchsten Streuungen der Ergebnisse vom Soll-Wert über alle w/z-Werte gemittelt werden bei der AVA-3000 und dem HYDRO\_5\_W\_3,4L festgestellt. Zum zweiten Prüfzeitpunkt liegen die Messwertabweichungen bei den meisten Prüfgeräten in einer Größenordnung von über  $\pm 0,50$  Vol.-%.

### Ergebnisse an Oberbetonen mit einem hohen (H) Luftporengehalt von über ca. 6,5 Vol.-%

In den nachfolgenden Diagrammen in Bild 8-15 werden die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchung der international genormten bzw. alternativen Prüfgeräte bei ihrer Anwendung auf Betone mit hohem Luftporengehalt präsentiert. Im Anschluss daran erfolgt die tabellarische Darstellung der berechneten Streuung der Messwertabweichung in der Tab. 8-10.

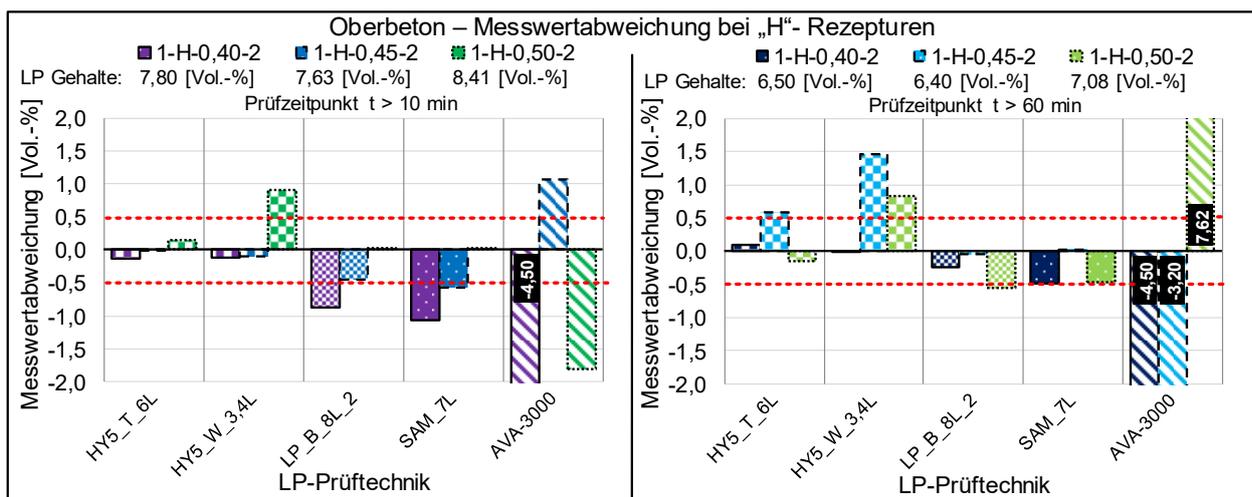


Bild 8-15: Vergleichsuntersuchung: alternative Prüfgeräte; Rezepturen: 1-H-2

Im Balkendiagramm in Bild 8-15 links sind die Abweichungen vom Soll-Wert der verwendeten Prüfgeräte bei der LP-Messung zum ersten Prüfzeitpunkt dargestellt. Die Mittelwerte der Soll-Luftporengehalte liegen bei den untersuchten Betonen zwischen 7,6 und 8,4 Vol.-%.

Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass etwa bei der Hälfte der Messwertabweichungen der betrachteten alternativen Prüfgeräte deutlich über den festgelegten Grenzwert von - 0,50 Vol.-% liegen. Die Anpassung des w/z-Wertes und somit der Konsistenz von 0,40 auf 0,45 führt bei den meisten verwendeten Prüfgeräten zu einer Reduktion der Abweichung. Eine weichere Konsistenz des Frischbetons scheint die Präzision der Luftporenerfassung unter anderem aufgrund des geringeren erforderlichen Prüfdrucks zum Komprimieren der weicheren Frischbetonprobe zu begünstigen. Eine Abstufung der Messwertabweichung in Abhängigkeit vom w/z-Wert wird bei der überwiegenden Anzahl der Prüfgeräte beobachtet.

Bei weichen Betonen (w/z = 0,50) werden bei den meisten Prüfgeräten gleichbleibende oder geringere Messwertabweichungen erfasst. In überwiegender Anzahl der Fälle kommt es zu einer Unterschätzung des

LP-Gehaltes. Die niedrigsten Messwertabweichungen zum Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min werden in diesem Vergleich beim HYDRO\_5\_T\_6L festgestellt. Die stärksten Abweichungen vom Soll-Wert werden bei der AVA-3000 festgestellt.

Zum zweiten Prüfzeitpunkt werden beim LP\_B\_8L\_2 und SAM\_7L deutlich geringere Messwertabweichungen um den Grenzwert von 0,50 Vol.-% festgestellt (siehe Bild 8-15 rechts).

Die Abweichungen vom Soll-Wert, die bei der Anwendung der Prüfgeräte auf Frischbeton mit einem w/z-Wert von 0,40 auftreten, liegen größtenteils am 0,50 Vol.-% Grenzwert bzw. unterhalb desselben. Mit zunehmendem w/z-Wert (0,45) zeigen die HYDRO\_5-Prüfgeräte eine Tendenz zur Steigerung der Abweichung und einer Tendenz zur Überschätzung des LP-Gehaltes. AVA-3000 gibt hierbei den LP-Gehalt mit den größten Soll-Wert-Abweichungen, insbesondere bei der Verwendung des Gerätes bei weichem Oberbeton. Messwertabweichungen innerhalb der  $\pm 0,50$  Vol.-% Grenzwerte werden beim Einsatz des SAM\_7L erfasst.

Tab. 8-10: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen - alternative Prüfgeräte; Oberbetone mit hohem LP-Gehalt

Prüfgerät	HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_B_8L_2	SAM_7L	AVA-3000
1	2	3	4	5	6
Mischung	1-H-0,40-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	-0,14	-0,11	-0,88	-1,07	-4,50
t > 60 min	0,10	-0,02	-0,25	-0,49	-4,50
Mischung	1-H-0,45-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	-0,01	-0,09	-0,46	-0,58	1,07
t > 60 min	0,58	1,46	-0,05	0,01	-3,20
Mischung	1-H-0,50-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	0,15	0,91	0,03	0,03	-1,81
t > 60 min	-0,16	0,83	-0,56	-0,47	7,62
	Spannweite der Streuung [Vol.-%]				
t > 10 min	-0,14 0,15	-0,11 0,91	-0,88 0,03	-1,07 0,03	-4,50 1,07
t > 60 min	-0,16 0,58	-0,02 1,46	-0,56 -0,05	-0,49 0,01	-4,50 7,62

Legende:

Messwertabweichung im Streubereich:	bis $\pm 0,25$ Vol.-%	bis $\pm 0,50$ Vol.-%	bis $\pm 1,0$ Vol.-%	> 1,0 Vol.-%
-------------------------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	--------------

Tab. 8-10 zeigt, dass bei Verwendung von drei der fünf betrachteten Prüfgeräte für Frischbeton mit hohem LP-Gehalt, unabhängig vom gewählten w/z-Wert, relativ geringfügige Messwertabweichungen festgestellt werden. Der HYDRO\_5\_W\_3,4L und die AVA-3000 scheinen bei den untersuchten Betonen nur eine geringe Messwertgenauigkeit aufzuweisen. Im Mittel liegt die maximale Streuung der Abweichungen des HYDRO\_5\_T\_6L im Bereich zwischen - 0,16 und 0,58 Vol.-%. Als nächst präziser zeigt sich der konventionelle LP\_B\_8L\_2 mit einer durchschnittlichen Messwertabweichung von etwa - 0,36 Vol.-% im Streubereich zwischen - 0,88 und 0,03 Vol.-%. Der SAM\_7L kann eine Messwertabweichung im Mittel von ca. - 0,43 Vol.-% (Streubereich zwischen - 1,07 und 0,03 Vol.-%) vorweisen.

### 8.4.3 Ergebnisse an Untertönen (D = 22 mm)

#### Ergebnisse an Unterbetonen mit einem niedrigen (N) Luftporengehalt von bis zu ca. 3,5 Vol.-%

Des Weiteren wurden Vergleichsuntersuchungen mit alternativen Prüfgeräten an Unterbetonen mit einem Größtkorn von 22 mm und identischen Variationsparametern durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im Folgenden in Form von Diagrammgruppen dargestellt und durch eine tabellarische Auswertung der Streubereiche der betrachteten Messwertabweichungen unterstützt.

Im Balkendiagrammen in Bild 8-16 sind die Messwertabweichungen der alternativen Prüfgeräte bei der Bestimmung des niedrigen LP-Gehaltes in Unterbetonen zu beiden Prüfzeitpunkten dargestellt. Die durchschnittlichen Soll-Luftporengehalte liegen bei dieser Untersuchung zum ersten Prüfzeitpunkt in einer Größenordnung von etwa 2,7 bis 4,1 Vol.-% und beim zweiten Prüfzeitpunkt zwischen 2,2 und 2,8 Vol.-%.

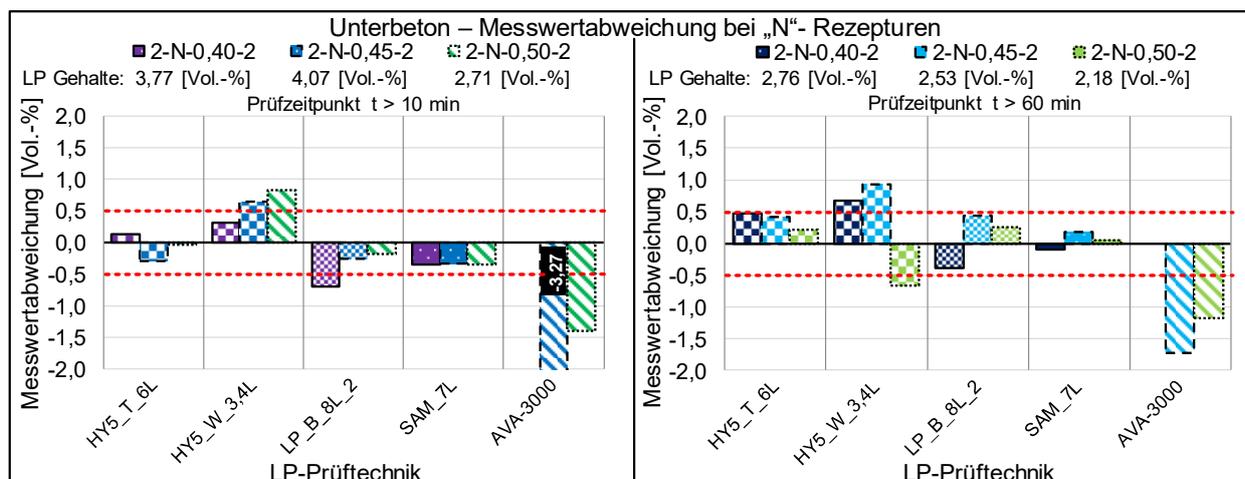


Bild 8-16: Vergleichsuntersuchung: alternative Prüfgeräte; Rezepturen: 2-N-2

Es ist erkennbar, dass die alternativen Geräte zum ersten Prüfzeitpunkt meistens dazu neigen, den LP-Gehalt zu unterschätzen. Die Ausnahme bildet der HYDRO\_5\_W\_3,4L, dessen Messergebnisse bei allen w/z-Werten des Unterbetons mit niedrigem LP-Gehalt den Gehalt an Luftporen überschätzen. Die Messwertabweichungen der Prüfgeräte HYDRO\_5\_T\_6L, LP\_B\_8L\_2 sowie SAM\_7L liegen meistens innerhalb des festgelegten Toleranzbereiches. Die Ermittlung des Luftporengehaltes im Frischbeton mit der AVA-3000 führte zu den höchsten Messwertabweichungen von bis zu 3,3 Vol.-%.

Bei Einsatz der Prüfgeräte an weichen Betonen (w/z = 0,50) kam es in der Regel zu kleineren Messwertabweichungen als bei Betonen mit geringem w/z-Wert. Im vorliegenden Vergleich in Bild 8-16 links werden die geringsten Messwertabweichungen beim HYDRO\_5\_T\_6L und dem SAM\_7L beobachtet, während die AVA-3000 für den Einsatz an den vorliegenden Frischbetonen die geringste Genauigkeit aufweist.

Bild 8-16 rechts zeigt die ermittelten Messwertabweichungen der alternativen Prüftechnik bei den Unterbetonen mit niedrigem LP-Gehalt zum zweiten Prüfzeitpunkt. Im Vergleich zu den Messwertabweichungen zum ersten Prüfzeitpunkt scheint die Messpräzision der HYDRO\_5-Prüftechnik und des LP\_B\_8L\_2 bei der Wiedergabe des FB-Luftporengehaltes zu diesem Zeitpunkt geringer zu sein. Meistens wird der aus der Rohdichte ermittelte Soll-LP-Gehalt von der eingesetzten Prüftechnik überschätzt. Die Abweichungen, die bei den Frischbetonen mit einem w/z-Wert von 0,40 auftreten, liegen weiterhin meistens am oder unter dem jeweiligen Grenzwert von  $\pm 0,50$  Vol.-%. Beim Einsatz von Betonen mit einem w/z-Wert von 0,45 werden überwiegend höhere Messwertabweichungen festgestellt. Die geringsten Messwertabweichungen treten bei den weichen Betonen (w/z: 0,50) auf. Im Schnitt werden beim Einsatz der AVA-3000 und des

HYDRO\_5\_W\_3,4L auch zum zweiten Prüfzeitpunkt die größten Messwertabweichungen festgestellt, während beim Einsatz des SAM\_7L eine hohe Genauigkeit der Messwerte beobachtet wird.

Tab. 8-11: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen - alternative Prüfgeräte; Unterbetone mit niedrigem LP-Gehalt

Prüfgerät	HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_B_8L_2	SAM_7L	AVA-3000
1	2	3	4	5	6
Mischung	2-N-0,40-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	0,12	0,32	-0,70	-0,35	-
t > 60 min	0,48	0,68	-0,38	-0,10	-
Mischung	2-N-0,45-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	-0,31	0,64	-0,26	-0,33	-3,27
t > 60 min	0,41	0,92	0,44	0,19	-1,73
Mischung	2-N-0,50-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	-0,04	0,82	-0,18	-0,35	-1,41
t > 60 min	0,22	-0,67	0,25	0,05	-1,18
	Spannweite der Streuung [Vol.-%]				
t > 10 min	-0,31 0,12	0,32 0,82	-0,70 -0,18	-0,35 -0,33	-3,27 -1,41
t > 60 min	0,22 0,48	-0,67 0,92	-0,38 0,44	-0,10 0,19	-1,73 -1,18

Legende:

Messwertabweichung im Streubereich:	bis ± 0,25 Vol.-%	bis ± 0,50 Vol.-%	bis ± 1,0 Vol.-%	> 1,0 Vol.-%
-------------------------------------	-------------------	-------------------	------------------	--------------

Die abgebildeten Messwertabweichungen der verwendeten Prüftechniken sind als Zahlenwerte in Tab. 8-11 aufgeführt. Es zeigt sich, dass die betrachteten Prüfgeräte bei Unterbetonen mit geringem LP-Gehalt überwiegend hohe Messwertabweichungen aufweisen. Besonders bei plastischen Betonen (w/z-Wert von 0,45) wird im Schnitt die geringste Messgenauigkeit festgestellt. Bei weichen Betonen zeigen der HYDRO\_5\_T\_6L (erster Prüfzeitpunkt) und SAM\_7L (zweiter Prüfzeitpunkt) die geringsten Messwertabweichungen. Der HYDRO\_5\_T\_6L zeigt geringe Messwertabweichungen zum ersten Prüfzeitpunkt, während der SAM\_7L zum zweiten Prüfzeitpunkt die geringsten Abweichungen aufweist.

### Ergebnisse an Unterbetonen mit einem mittleren (M) Luftporengehalt von ca. 3,5 bis 6,5 Vol.-%

Das Balkendiagramm im Bild 8-17 zeigt die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen zwischen international genormter und alternativer Prüftechnik an drei Unterbetonen mit mittlerem LP-Gehalt unter Variation von drei festgelegten w/z-Werten. Zum Prüfzeitpunkt von t > 10 min weisen die Hälfte der betrachteten Prüfgeräte eine Messwertabweichung innerhalb der Grenzwerte unabhängig von dem gewählten w/z-Wert der Unterbeton-Rezeptur auf. In den meisten Fällen wird der LP-Gehalt zum ersten Prüfzeitpunkt unterschätzt. Die höchsten Abweichungen vom Soll-Wert des Frischbeton-Luftporengehaltes werden unabhängig vom gewählten w/z-Wert beim Einsatz von AVA-3000 festgestellt. Der Einsatz des SAM\_7L bei der Unterbetonrezeptur mit einem w/z-Wert von 0,45 führte ebenfalls zu einer ungewöhnlich hohen Messwertabweichung, die möglicherweise auf einen Ausführungsfehler hinweist, der jedoch während der Prüfung nicht festgestellt wurde.

Zum zweiten Prüfzeitpunkt sind überwiegend höhere Abweichungen vom Soll-Wert bei der LP-Messung in Betonrezepturen mit mittlerem LP-Gehalt bei den betrachteten Prüfgeräten zu beobachten (siehe Bild 8-17 rechts). In dem Diagramm ist erneut eine Abstufung der Messwertabweichung in Abhän-

gigkeit vom gewählten w/z-Wert zu erkennen. Mit steigendem w/z-Wert ist eine Verschiebung der Messwertabweichung vom Unterschätzen zum Überschätzen zu beobachten. Die Werte aller Prüfgeräte weisen bei mindestens einem Frischbeton eine starke Abweichung außerhalb des Toleranzbereichs von  $\pm 0,50$  Vol.-% auf. Bei der Messung des LP-Gehaltes in Unterbetonen mit mittlerem LP-Gehalt zeigt sich der LP\_B\_8L\_2 als präzises Messgerät zu beiden Prüfzeitpunkten. AVA-3000 gibt stark abweichende Messwerte bei der Untersuchung aus.

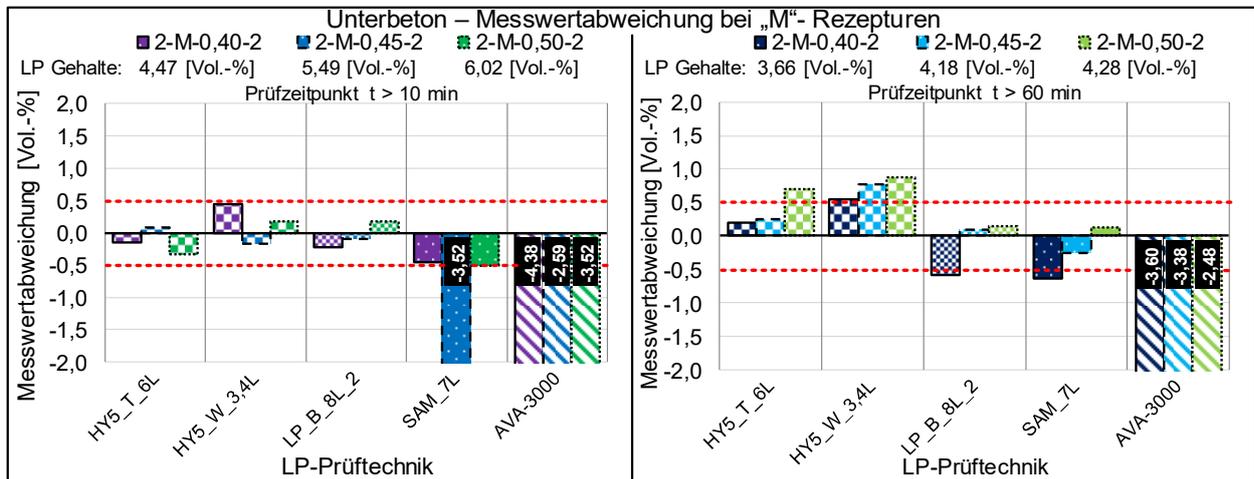


Bild 8-17: Vergleichsuntersuchung: alternative Prüfgeräte; Rezepturen: 2-M-2

Tab. 8-12: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen - alternative Prüfgeräte; Unterbetone mit mittlerem LP-Gehalt

Prüfgerät	HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_B_8L_2	SAM_7L	AVA-3000
1	2	3	4	5	6
Mischung	2-M-0,40-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	-0,14	0,45	-0,22	-0,45	-4,38
t > 60 min	0,20	0,54	-0,58	-0,64	-3,60
Mischung	2-M-0,45-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	0,08	-0,17	-0,09	-	-2,59
t > 60 min	0,25	0,76	0,09	-0,26	-3,38
Mischung	2-M-0,50-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	-0,32	0,18	0,17	-0,51	-3,52
t > 60 min	0,70	0,87	0,15	0,13	-2,48
	Spannweite der Streuung [Vol.-%]				
t > 10 min	-0,32 0,08	-0,17 0,45	-0,22 0,17	-0,51 -0,45	-4,38 -2,59
t > 60 min	0,20 0,70	0,54 0,87	-0,58 0,15	-0,64 0,13	-3,60 -2,48

Legende:

Messwertabweichung im Streubereich:	bis $\pm 0,25$ Vol.-%	bis $\pm 0,50$ Vol.-%	bis $\pm 1,0$ Vol.-%	> 1,0 Vol.-%
-------------------------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	--------------

Die farbliche Unterteilung der Messwertabweichungen in Tab. 8-12 verdeutlicht, dass der mittlere LP-Gehalt der Unterbetone im Schnitt präzise von dem LP\_B\_8L\_2 und dem HYDRO\_5\_T\_6L erfasst wird. Beim ersten Prüfzeitpunkt werden beim HYDRO\_5\_T\_6L Messwertabweichungen bis -0,32 Vol.-% festgestellt. Zum zweiten Prüfzeitpunkt liegen diese in einer Größenordnung von 0,20 bis 0,70 Vol.-%. Mit dem HYDRO\_5\_W\_3,4L kann der LP-Gehalt zum ersten Prüfzeitpunkt meistens mit einer Messwertabweichung

von  $\pm 0,50$  Vol.-% (gelber Streubereich) gemessen werden. Zum zweiten Prüfzeitpunkt werden Messwertabweichungen zwischen  $\pm 0,50$  und  $\pm 1,0$  Vol.-% (roter Streubereich) ermittelt. Der konventionelle LP\_B\_8L\_2 kann bei fünf von sechs Messungen eine präzise Messgenauigkeit vorweisen. Die Messungen mit dem SAM\_7L beinhalteten eine Abweichung überwiegend bis  $\pm 0,50$  Vol.-% (gelber Streubereich). Höchstwerte der Abweichungen werden bei der Nutzung der AVA-3000-Prüftechnik festgehalten.

Durch die Ermittlung der Streubereiche der Abweichungen über alle w/z-Werte wird deutlich, dass zum ersten Prüfzeitpunkt in der Regel geringere Messwertabweichungen festgestellt werden. Zum zweiten Prüfzeitpunkt steigt die Messwertabweichung bei den meisten Prüfgeräten an. Anscheinend spielen die Veränderungen in der Zusammensetzung und Struktur des Frischbetons im zeitlichen Ablauf zwischen zwei Prüfzeitpunkten eine Rolle bei den beobachteten Messwertabweichungen. Dies könnte unter anderem auf den fortschreitenden Hydratationsprozess im Frischbeton zurückzuführen sein. Durch chemische Reaktionen wird freies Wasser unter Bildung von CSH-Phasen chemisch gebunden, wodurch sich u. a. die Konsistenz verändert, was zu einer Erhöhung der Rohdichte im Frischbeton führt.

### Ergebnisse an Unterbetonen mit einem hohen (H) Luftporengehalt von über ca. 6,5 Vol.-%

Das Balkendiagramm im Bild 8-18 zeigt die Messwertabweichungen der verwendeten Prüfgeräte bei der Luftporenmessung an Unterbetonen mit hohem LP-Gehalt. Die Mittelwerte der Soll-Luftporengehalte liegen bei den betrachteten Betonen auf einem hohen Niveau, zwischen 7,1 und 9,5 Vol.-% beim ersten und zwischen 5,8 und 7,5 Vol.-% zum zweiten Prüfzeitpunkt.

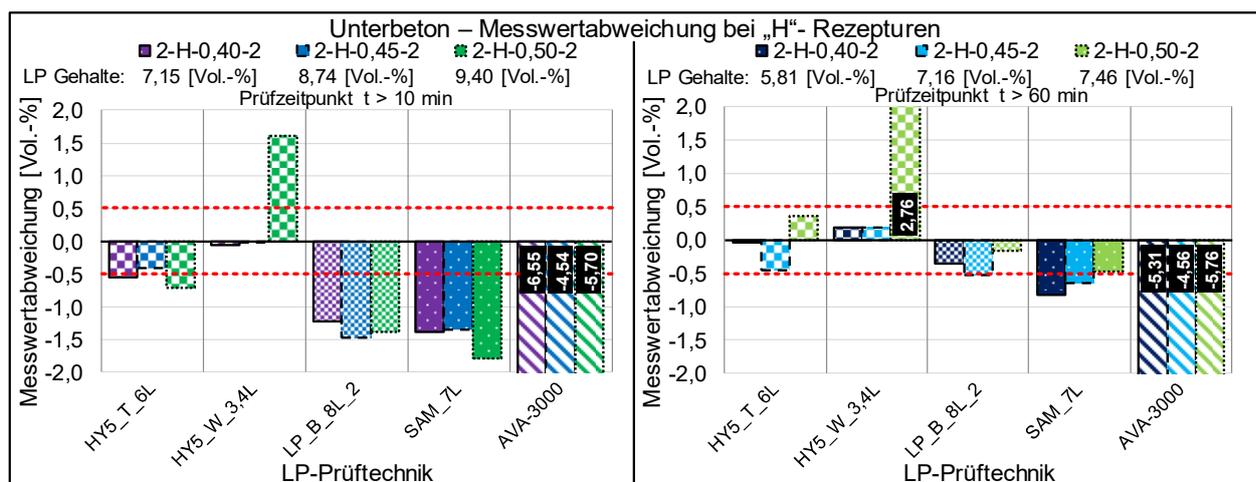


Bild 8-18: Vergleichsuntersuchung: alternative Prüfgeräte; Rezepturen: 2-H-2

Es ist erkennbar, dass mit steigendem LP-Gehalt im Frischbeton auch die Abweichungen entsprechend zunehmen. In den meisten Fällen werden zum ersten Prüfzeitpunkt die gemessenen Luftporengehalte deutlich über dem gesetzten Grenzwert von  $-0,50$  Vol.-% unterschätzt. Die Anpassung des w/z-Wertes zeigt in diesem Fall keinen eindeutigen Einfluss auf die Abweichungen. Die höchsten Abweichungen werden bei der AVA-3000 sowie bei SAM\_7L festgestellt. Eine starke Überschätzung zum ersten Prüfzeitpunkt wird beim HYDRO\_5\_W\_3,4L mit dem Unterbeton mit einem w/z-Wert von 0,50 beobachtet. Die durchschnittlich niedrigsten Messwertabweichungen zum Prüfzeitpunkt t > 10 min werden in diesem Vergleich beim HYDRO\_5\_T\_6L und HYDRO\_5\_W\_3,4L festgestellt.

Zum zweiten Prüfzeitpunkt wurden zum Teil deutlich geringere Messwertabweichungen beobachtet (siehe Bild 8-18 rechts)

Die Abweichungen vom Soll-Wert, die beim Einsatz der Prüfgeräte an plastischen Frischbetonen mit einem w/z-Wert von 0,45 auftreten, liegen meistens im Bereich oder innerhalb der  $\pm 0,5$  Vol.-% Grenzwerte.

HYDRO\_5\_W\_3,4L weist jedoch deutliche Ausreißer an Messwerten unter Einsatz von weichen Betonen mit hohem LP-Gehalt auf. Bei der AVA-3000-Prüftechnik werden auch zum zweiten Prüfzeitpunkt deutlich zu hohe Messwertabweichungen im Vergleich zu anderen alternativen Prüfgeräten festgestellt.

Tab. 8-13: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen - alternative Prüfgeräte; Unterbetone mit hohem LP-Gehalt

Prüfgerät	HY5_T_6L	HY5_W_3,4L	LP_B_8L_2	SAM_7L	AVA-3000
1	2	3	4	5	6
Mischung	2-H-0,40-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	-0,55	-0,06	-1,23	-1,38	-6,55
t > 60 min	-0,05	0,18	-0,36	-0,83	-5,31
Mischung	2-H-0,45-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	-0,41	-0,02	-1,48	-1,35	-4,54
t > 60 min	-0,47	0,19	-0,53	-0,65	-4,56
Mischung	2-H-0,50-2 [Vol.-%]				
t > 10 min	-0,71	1,60	-1,39	-1,78	-5,70
t > 60 min	0,36	2,76	-0,15	-0,48	-5,76
	Spannweite der Streuung [Vol.-%]				
t > 10 min	-0,71 -0,41	-0,06 1,60	-1,48 -1,23	-1,78 -1,35	-6,55 -4,54
t > 60 min	-0,47 0,36	0,18 2,76	-0,53 -0,15	-0,83 -0,48	-5,76 -4,56

Legende:

Messwertabweichung im Streubereich:	bis ± 0,25 Vol.-%	bis ± 0,50 Vol.-%	bis ± 1,0 Vol.-%	> 1,0 Vol.-%
-------------------------------------	-------------------	-------------------	------------------	--------------

Aus der Tab. 8-13 wird ersichtlich, dass die Ermittlung des LP-Gehaltes an Unterbetonen mit hohem Frischbeton-Luftporengehalt zu beiden Prüfzeitpunkten bei den meisten alternativen Prüfgeräten deutliche Messwertabweichungen von über 1,0 Vol.-% zeigt. Deutlich präzisere Ergebnisse werden bei dem HYDRO\_5\_T\_6L (beide Prüfzeitpunkte), dem HYDRO\_5\_W\_3,4L, allerdings ausschließlich bei Betonen mit w/z-Werten von 0,40 und 0,45, sowie bei dem LP\_B\_8L\_2 und bei SAM\_7L zum zweiten Prüfzeitpunkt erzielt.

Im Kapitel 8.7 erfolgt die Beurteilung der Messgüte der LP-Prüftechnik anhand einer zusammenfassenden Betrachtung der Streuungen der Messwertabweichungen über alle verwendeten Rezepturen in der Hauptuntersuchung. Als zusätzliches Messgütekriterium wird neben der maximalen Streuung die Verteilung der Abweichungen innerhalb des Streubereiches ebenfalls als Beurteilungsfaktor herangezogen.

#### 8.4.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die Vergleichsuntersuchungen mit alternativer Prüftechnik ergaben, dass die Messgenauigkeit der Geräte je nach Prüfzeitpunkt variiert. Im Verlauf der Zeit tendiert die alternative Prüftechnik dazu, den LP-Gehalt meist leicht zu überschätzen. Die hinreichend präzisen ermittelten Messwerte zum ersten Prüfzeitpunkt, beispielsweise mit HYDRO\_5\_T\_6L oder SAM\_7L, wiesen geringfügige Abweichungen auf und zeigten eine Tendenz zur leichten Überschätzung bei späteren Messungen.

Die Anpassung des Luftporengehalts im Beton hatte im Vergleich zur konventionellen Prüftechnik deutlich weniger Einfluss auf die Ergebnisse der Luftporenbestimmung. Es wurde beobachtet, dass die Messwerte an Betonen mit niedrigem und mittlerem LP-Gehalt von SAM\_7L bzw. HYDRO\_5\_T\_6L mit nur geringfügigen Abweichungen erfasst wurden. Die größeren Abweichungen traten in der Regel bei Frischbetonen mit sehr hohem LP-Gehalt auf. Auch der Einfluss des w/z-Wertes war bei den alternativen Prüftechniken deutlich geringer als bei der konventionellen Prüftechnik.

Das Fassungsvermögen und die Form des einzufüllenden Volumens der jeweiligen Prüftechnik hatten einen signifikanten Einfluss auf die Messgenauigkeit der Prüfgeräte. Die Ergebnisse der HYDRO\_5-Prüfgeräte verdeutlichten, dass eine geringere Probenmenge und ein rechteckiges Füllvolumen (HYDRO\_5\_W\_3,4L) trotz gleichem Arbeitsdruck der Wassersäule zu erheblichen Abweichungen führten. Die Abweichungen könnten auf Unterschiede in der Verteilung und Komprimierung des Frischbetons innerhalb der Prüftechnik zurückzuführen sein. Eine kleinere Probenmenge und ein rechteckiges Füllvolumen könnten dazu führen, dass der Frischbeton ungleichmäßig verdichtet wurde, was zu inkonsistenten Messergebnissen führte. Außerdem könnte die Form des Füllvolumens dazu führen, dass bestimmte Bereiche des Frischbetons stärker oder schwächer komprimiert wurden, was die Messgenauigkeit beeinträchtigte. Der HYDRO\_5\_T\_6L mit einem Fassungsvermögen von 6 Litern, zylindrischer Geometrie und einem rechnerisch definierten Ausdehnungsvolumen ermöglichte eine deutlich präzisere Messwerterfassung bei einem Prüfdruck von 2 bar während der Probenbeanspruchung.

Die Ergebnisse der AVA-3000-Prüftechnik wiesen größtenteils erhebliche Messwertabweichungen auf. Dies kann auf das sehr geringe Volumen und die erforderlichen weiteren schwingungsintensiven Arbeitsschritte während der Probenentnahme sowie die Anfälligkeit aufgrund ihrer Konsistenz zurückgeführt werden. Im Hinblick auf die hohe Steifigkeit des Frischbetons ist das vorliegende Verfahren nicht für die Bestimmung der Kennwerte von Straßenbetonrezepturen geeignet.

## **8.5 Ergebnisse der Ermittlung der Luftporenkennwerte am Festbeton**

### **8.5.1 Allgemein**

Die Ermittlung des LP-Gehaltes am Festbeton erfolgte durch die Mikroskopie-Analyse gemäß DIN-EN 480-11 [N6] bzw. TP B-StB 3.1.08. Anhand von zwei Probekörpern je Betonrezeptur wurde bei 36 Betonen der Festbetonluftporengehalt, der Mikro-Luftporengehalt, der Abstandsfaktor sowie die Luftporenverteilung im Beton ermittelt. Ein Drittel der Betonproben wurde zur wiederholten Mikroskopie-Analyse an ein weiteres unabhängiges Laborinstitut geschickt, um den Einfluss des Verfahrens an den gleichen Proben auf die zu ermittelnden Messwerte zu identifizieren und die zuvor erzielten Messergebnisse abzugleichen.

Im Folgenden werden zunächst der ermittelte Gesamtluftporengehalt und der dazugehörige rechnerische Soll-Wert gegenübergestellt. Der Soll-Wert wurde aus der Festbetonrohichte der jeweils hergestellten Betonwürfel ermittelt, die im Alter von 28 Tagen zu den Probekörpern für die Mikroskopie weiterverarbeitet und analysiert wurden.

Des Weiteren erfolgt ein grafischer Vergleich der Luftporenkennwerte, ermittelt sowohl durch die Mikroskopie-Analyse als auch durch alternative Prüftechniken. Der Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$  wurde zusätzlich zum Auszählverfahren mittels AVA-3000 und HYDRO\_5-Porosimeter ermittelt. Der Abstandsfaktor L wurde durch Mikroskopie-Analyse, den Einsatz der AVA-3000 und indirekt durch die Ermittlung der SAM-Number am SAM\_7L festgehalten.

Anschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der ermittelten SAM-Number mit dem am Festbeton festgestellten zugehörigen Abstandsfaktor L. Dabei wird die Fragestellung verfolgt, mit welcher Genauigkeit die am Frischbeton ermittelte SAM-Number den am Festbeton aufwendig ermittelten Abstandsfaktor L wiedergeben kann.

Im abschließenden Teil des vorliegenden Kapitels wird der Ergebnisvergleich der Analyse der Luftporenverteilung ausgewählter Untersuchungsbetone vorgenommen, die mit drei unterschiedlichen Prüfmethoden (Mikroskopie, HYDRO\_5-Porosimeter und AVA-3000) erfasst wurden.

## 8.5.2 Vergleich der Ergebnisse des Gesamtluftporengehaltes ermittelt durch zwei unabhängige Labore

Während der Erfassung der Frischbetonkennwerte zu zwei Prüfzeitpunkten wurden die Probekörper für weitere Festigkeitsuntersuchungen hergestellt. Die dabei je Betonrezeptur produzierten zwei Würfelproben wurden im Festbetonzustand zur Mikroskopie-Analyse weiterverarbeitet und sowohl im eigenen Labor als auch extern untersucht. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen sind nach der Grundrezeptur sortiert und in vier Balkendiagrammen zusammengefasst. Hierbei erfolgt ein Vergleich der am Festbeton ermittelten LP-Gehalte und der dazugehörigen Soll-Werte, die mit der erfassten FB-Rohdichte der oben genannten Frischbetonwürfel rechnerisch durch die Stoffraumrechnung ermittelt wurden.

Die Balkendiagramme sind wie folgt aufgebaut: Auf der x-Achse sind die Bezeichnungen der eingesetzten Betone dargestellt, wobei für jede Rezeptur zwei bzw. drei Ergebnisbalken abgebildet sind. Die grau hinterlegten Balken repräsentieren die rechnerisch ermittelten Soll-Werte, die sich aus der Frischbeton-Rohdichte der entsprechenden Würfelprobekörper ergeben. Die blau gefärbten Balken bzw. grob gestrichelten Balken zeigen die im Labor des Institutes für Massivbau ermittelten LP-Gehalte der betrachteten Straßenbetone im Festbetonzustand. Die Betone mit mittlerem (M) eingestellten Luftporengehalt wurden für weitere Mikroskopie-Analysen an ein unabhängiges externes Labor gesendet. Die extern ermittelten Ergebnisse sind als gelbe, fein gestrichelte Balken in den jeweiligen Balkendiagrammen dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse inklusive der berechneten Abweichungen vom Soll-Wert sind im Anhang in den Tabellen Tab. I - 55 bis Tab. I - 56 aufgeführt.

Bild 8-19 veranschaulicht die an Oberbetonen ermittelten Ergebnisse in zwei Balkendiagrammen. In dem Diagramm links sind die Ergebnisse der Probekörper abgebildet, die im Rahmen der Vergleichsuntersuchung der national genormten Prüftechnik hergestellt wurden. Dabei ist eine deutliche Abstufung der Messwerte in Abhängigkeit des angestrebten LP-Gehaltes (N, M bzw. H) zu erkennen. Auffällig sind die im Labor an den Festbetonproben ermittelten Messwerte aus der Mikroskopie-Analyse, die in den meisten Fällen geringfügig niedriger sind als die zugehörigen Soll-Werte aus den Rohdichten des Frischbetons. Die maximale Abweichung der Messwerte vom errechneten Soll-Wert liegt in diesem Vergleich bei etwa 1,2 Vol.-% (1-M-0,40-1). Im Durchschnitt ergab sich eine Abweichung der Messwerte, die im Labor des IfM ermittelt wurden, von 0,36 Vol.-%. Diese Abweichung kann als hinreichend gering betrachtet werden.

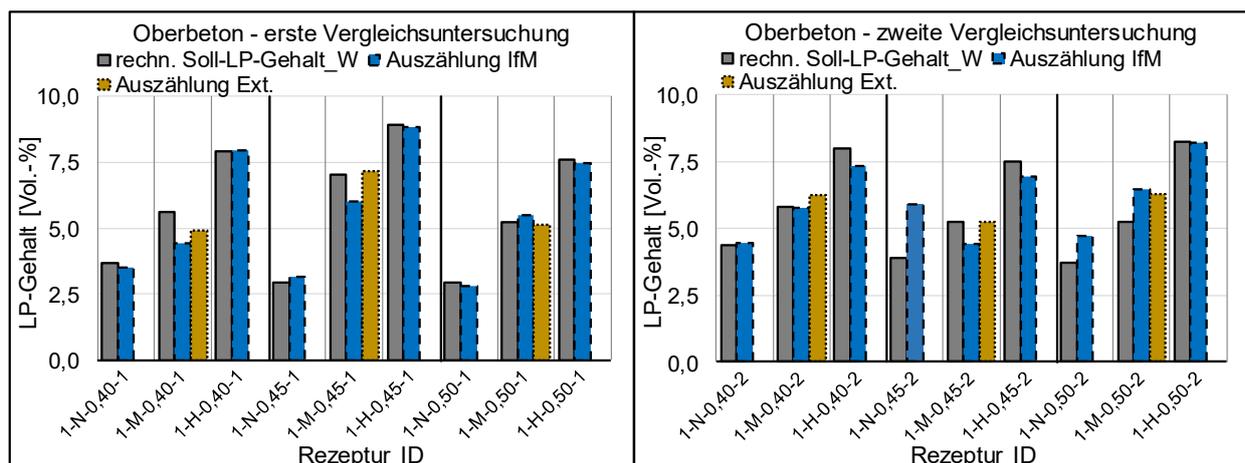


Bild 8-19: Ergebnisse der Ermittlung der Luftporenkennwerte an Oberbetonen; links: Messwerte aus Vergleichen der konventionellen Prüftechnik; rechts: Messwerte aus Vergleichen der alternativen Prüftechnik

Die Probekörper der drei Betone mit mittlerem LP-Gehalt wurden zusätzlich in einem externen Labor untersucht. Die dabei ermittelten Ergebnisse liegen größtenteils etwas über den Messwerten des IfM-Labors. Im Schnitt beträgt die Differenz der Messergebnisse zwischen den beiden Laboren 0,67 Vol.-%.

Im rechten Balkendiagramm im Bild 8-19 sind die Ergebnisse der hergestellten Probekörper der zweiten Vergleichsuntersuchung der alternativen Prüfmethode dargestellt. In dem vorliegenden Vergleich ist ebenfalls eine Abstufung der Messergebnisse nach dem angestrebten LP-Gehalt der Proben im Diagramm gegeben. Bei fünf der neun Betone werden die LP-Gehalte durch eigene Mikroskopie-Analyse geringfügig unterschätzt. Eine starke Abweichung der Messwerte, die durch das Auszählen im Labor des IfM ermittelt wurde, zeigte sich beim Beton 1-N-0,45-2. Nach zwei wiederholten Auszählungen derselben Probekörper wurden keine um etwa 2 Vol.-% höhere LP-Gehalte im Festbeton festgestellt, wie anhand der Frischbeton-Rohdichte erwartet wurde. Abgesehen von der erwähnten starken Abweichung liegt der Mittelwert der Abweichungen zwischen dem Soll-Wert und den erfassten LP-Gehalten im eigenen Labor mit 0,56 Vol.-% geringfügig höher als im linken Balkendiagramm. Die extern erfassten Ergebnisse dreier Betone weisen überwiegend etwas höhere LP-Gehalte im Festbeton auf als der rechnerisch ermittelte Soll-Wert vorgibt. Die Differenz zwischen den Messergebnissen der beiden unabhängigen Labore beträgt im Schnitt 0,52 Vol.-%.

Im Bild 8-20 sind die Ergebnisse, die an den betrachteten Unterbetonen ermittelt wurden, nach der Art der Vergleichsuntersuchung in zwei Balkendiagrammen sortiert. Beide Diagramme zeigen die erwartete Abstufung der Messergebnisse in Abhängigkeit vom angestrebten LP-Gehalt. Bei den Proben aus der ersten Vergleichsuntersuchung (Bild 8-20 links) ist bei etwa der Hälfte der Ergebnisse eine Unterschätzung des rechnerischen Soll-LP-Gehaltes durch das Auszählen im eigenen Labor zu verzeichnen. Die maximale Abweichung vom Soll-Wert liegt dabei bei etwa 1,1 Vol.-%. War ein höherer LP-Gehalt im Beton anzustreben, so ist eine ansteigende Differenz zwischen dem ermittelten LP-Gehalt im Festbeton und dem rechnerisch bestimmten Soll-Wert zu beobachten. Im Schnitt beträgt die Abweichung der eigenen Messergebnisse vom Soll-Wert bei ca. 0,60 Vol.-%.

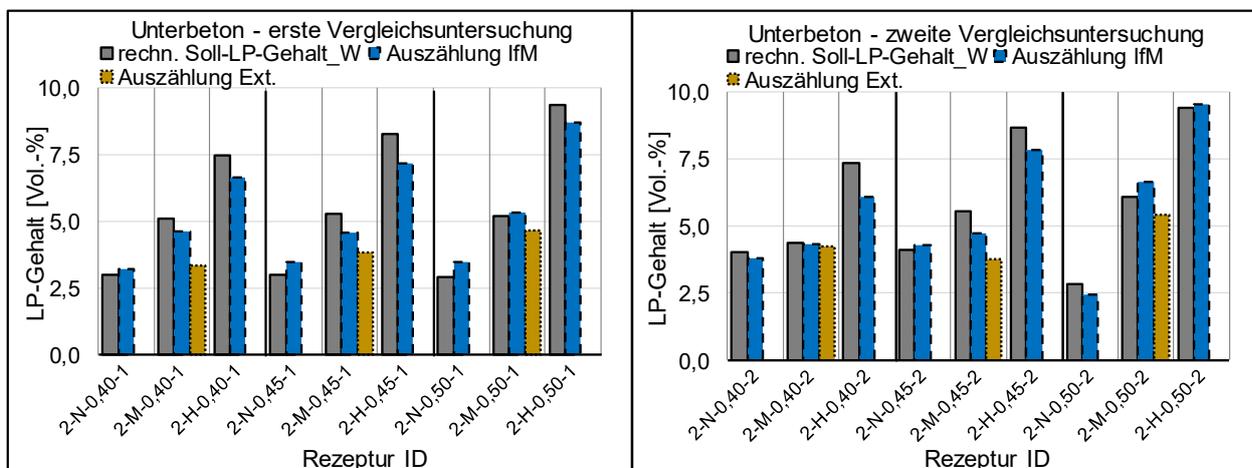


Bild 8-20: Ergebnisse der Ermittlung der Luftporenkennwerte an Unterbetonen; links: Messwerte aus Vergleichen der konventionellen Prüftechnik; rechts: Messwerte aus Vergleichen der alternativen Prüftechnik

Die Ergebnisse an den drei Straßenbetonen (M), die sich aus externen Untersuchungen ergaben, sind in diesem Vergleich gelb hervorgehoben. Alle drei Ergebnisse zeigen im Vergleich zu den Messwerten des eigenen Labors geringere Werte und weisen somit größere Abweichungen zu den zugehörigen rechnerischen Soll-Werten auf. Die durchschnittliche Abweichung der extern erfassten Messwerte vom jeweiligen rechnerischen Soll-Wert liegt bei 1,25 Vol.-%. Im Durchschnitt beträgt die Differenz der Messergebnisse zwischen den beiden Laboren etwa 0,90 Vol.-%. Bei einem mittleren Soll-Wert des Gesamtluftporengehaltes von etwa 5,2 Vol.-% für die drei betrachteten Rezepturen entspricht diese Differenz der Messwerte zwischen den unabhängigen Laborinstituten einer Abweichung von etwa 17 % vom Soll-Mittelwert.

Im rechten Diagramm ist bei sechs der neun Ergebnisgruppen eine Unterschätzung des LP-Gehaltes durch die eigene Festbetonauszählung zu verzeichnen. Die maximale Abweichung beträgt dabei 1,29 Vol.-%

(2-H-0,40-2). Ein deutlicher Anstieg der Messwertabweichung mit steigendem zu erwartenden LP-Gehalt ist anhand der vorliegenden Datenbasis nicht festzustellen. Die durchschnittliche Abweichung der Ergebnisse vom Soll-Wert ist dabei auf einen Wert von 0,49 Vol.-% geringfügig zurückgegangen. Bei der zweiten Vergleichsuntersuchung weisen die extern erfassten Ergebnisse von drei Betonen ebenfalls niedrigere Messwerte des LP-Gehaltes im Festbeton auf als der rechnerisch ermittelte Soll-Wert vorgibt. Die höchste Abweichung der extern ermittelten Ergebnisse vom rechnerischen Soll-Wert beträgt 1,78 Vol.-%. Die Differenz zwischen den Messergebnissen der beiden unabhängigen Labore liegt in diesem Fall etwas niedriger, im Durchschnitt bei 0,76 Vol.-%. Bei einem mittleren Soll-LP-Gehalt von ca. 5,3 Vol.-% würde die durchschnittliche Abweichung der Ergebnisse beider Laborinstitute zueinander etwa 14 % betragen.

### 8.5.3 Luftporenkennwerte – Mikro-Luftporengehalt $A_{300}$ und Abstandsfaktor L im Vergleich

Zu den maßgebenden Parametern, über die indirekte Aussagen über die Widerstandsfähigkeit des Straßenbetons gegen Frost-Tausalz-Angriff getroffen werden können, zählen der Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$  sowie der Abstandsfaktor L der im Beton künstlich eingeführten Luftporen. Vorliegende Parameter müssen die normativen Grenzwerte einhalten. Das Kapillarporensystem kann als widerstandsfähig gegen äußere Frosteinwirkung betrachtet werden, wenn der Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$  mindestens einen Wert von 1,8 Vol.-% aufweist und der Abstandsfaktor unter 0,20 mm liegt. In der vorliegenden Untersuchung wurden diese Luftporenparameter mithilfe verschiedener Prüftechniken zum Vergleich ermittelt. Zum einen wurden die Parameter bei der mikroskopischen Analyse in zwei Laboren bestimmt. Zum anderen erfolgte die Erfassung der Parameter durch den Einsatz des AVA-3000. Der Mikro-Luftporengehalt wurde zusätzlich mit dem HYDRO\_5-Pososimeter ermittelt. Eine indirekte Schätzung des Abstandsfaktors L wurde mithilfe des SAM\_7L durch die Erfassung des SAM-Wertes durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Anhang in Tab I – 57 bis Tab. I - 62 zusammengefasst.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in mehreren Balkendiagrammen sortiert und nach den abzubildenden Daten geordnet. Bei der Vergleichsuntersuchung der national genormten Prüftechnik wurden Probekörper für die mikroskopische Untersuchung hergestellt und analysiert. Zusätzlich erfolgte eine Untersuchung zur Luftporenverteilung mit dem HYDRO\_5-Pososimeter, wobei im Frischbeton neben der Luftporenverteilung in Abhängigkeit der Durchmesser auch die Menge der Mikro-Luftporen  $A_{300}$  erfasst wurden. Dabei wurde die Handpumpe des HYD-RO\_5\_T\_6L durch eine digital gesteuerte Pumpe mit einem Drucksensor ausgetauscht, welche vor der dritten Wiegung zum Aufbauen des Prüfdruckes zum Einsatz kam. Die Pumpe presste kontinuierlich definierte Wassermengen je Hub in den Prüfbehälter bis zum Erreichen des Prüfdruckes von 2 bar. Dabei wurde die Anzahl der Pumpenhübe sowie der entstandene Druck im Prüfbehälter von der Messsonde digital erfasst und an das Excel-Tool weitergeleitet, wo die Daten anschließend weiterverarbeitet wurden. Unter Berücksichtigung der Ausdehnung der Prüftechnik wurde das Ergebnis in Form von einem Diagramm, in dem der gemessene Prüfdruck und der zugehörige gemessene Luftporengehalt als Summendiagramm gegenübergestellt wurden, erzeugt. Anhand der vorliegenden Daten konnten die Luftporen-Kennwerte wie der Gesamtluftporengehalt, die Porengrößenverteilung und der Gehalt an Mikroluftporen  $A_{300}$  an einer verdichteten Frischbetonprobe geschätzt werden.

Im Bild 8-21 sind die Ergebnisse der Ermittlungen des Mikro-Luftporengehaltes und des Abstandsfaktors bei der Anwendung verschiedener Prüfverfahren an den betrachteten Oberbetonen abgebildet. Die Balken, die von links nach rechts verlaufen, repräsentieren die Ergebnisse der Mikroluftporengehaltsmessung. Die violetten Balken mit durchgehenden Linien zeigen die Ergebnisse der Mikroskopie-Analyse, durchgeführt im eigenen Labor. Die gelben Balken zeigen die Ergebnisse des externen Labors. Die hellgrauen Balken mit feinen gestrichelten Randlinien geben die Messwerte an, die zum ersten Prüfzeitpunkt mithilfe des HYDRO\_5-Pososimeters an dem HYDRO\_5\_T\_6L erfasst wurden. Die dunkelgrauen Balken mit grob gestrichelten Linien zeigen die Ergebnisse des HYDRO\_5-Pososimeters zum zweiten Prüfzeitpunkt an. Die

entsprechende X-Achse für den Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$  mit eingetragenen Grenzwert von 1,8 Vol.-% (rot gestrichelte vertikale Linie) befindet sich unten und verläuft von links nach rechts.

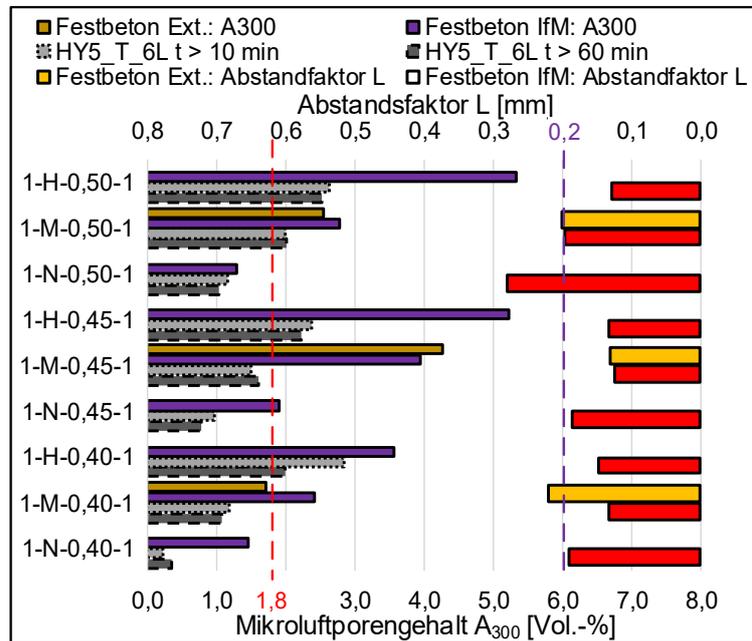


Bild 8-21: Ermittelte Luftporenkennwerte an Oberbetonen. Erste Vergleichsuntersuchung

Die roten und gelben Balken auf der rechten Seite repräsentieren den Abstandsfaktor L, der in zwei unabhängigen Untersuchungseinrichtungen ermittelt wurde. Die entsprechende X-Achse für den Abstandsfaktor L mit dem eingetragenen Grenzwert von 0,20 mm (violett gestrichelte vertikale Linie) verläuft von rechts nach links.

Beim Betrachten der Untersuchungsergebnisse zur Ermittlung des Mikro-Luftporengehaltes (linke Balkengruppe) ist eine Abstufung des Parameters in Abhängigkeit des angestrebten LP-Gehaltes im Beton erkennbar. Mindestwerte werden erwartungsgemäß bei den Straßenbetonen mit niedrigem LP-Gehalt beobachtet, während hohe Mikro-Luftporengehalte bei den Betonen mit hohem LP-Gehalt festgestellt werden. Allerdings ist eine Differenz zwischen den Ergebnissen am Festbeton und am Frischbeton zu erkennen, die sich mit steigendem LP-Gehalt und steigendem Prüfzeitpunkt im Frischbeton überwiegend vergrößert. Im Frischbetonalter werden durch das HYDRO\_5-Porosimeter deutlich geringere Mikro-Luftporengehalte festgestellt als bei der Auszählung am erhärteten Beton. Bei der überwiegenden Anzahl der Frischbetonproben sinkt der Mikro-Luftporengehalt mit steigendem Frischbetonalter. Würden die Messergebnisse des HYDRO\_5-Porosimeters herangezogen, würden ausschließlich vier der neun Oberbetone mit hohem (H) bzw. mit mittlerem (M) LP-Gehalt den Grenzwert des Mikro-Luftporengehaltes von 1,8 Vol.-% einhalten. Laut der Auszählung im eigenen Labor würden sieben von neun Betonen den Grenzwert einhalten.

Werden die Ergebnisse der Mikroskopie-Analyse aus der externen Prüfanstalt betrachtet, so sind in zwei von drei Betonen ähnliche Luftporenkennwerte festgestellt worden. Bei dem Beton 1-M-0,40-1 mit geringem w/z-Wert wurden jedoch bei der externen Auswertung geringere Mikro-Luftporengehalte und somit ein höherer Abstandsfaktor als in der eigenen Laboreinrichtung festgestellt.

Die rechte Balkengruppe stellt die Ergebnisse der Erfassung des Abstandsfaktors L bei der Mikroskopie-Analyse dar. Meistens ist mit steigendem LP-Gehalt eine Reduktion des Abstandsfaktors zu beobachten. Gemäß den Daten aus dem eigenen Labor kann ausschließlich einer der neun betrachteten Betone mit niedrigem LP-Gehalt den Grenzwert nicht einhalten. Laut der Ergebnisse der externen Laboreinrichtung würde der oben genannte Oberbeton 1-M-0,40-1 den Grenzwert des Abstandsfaktors von maximal 0,20 mm ebenfalls nicht einhalten.

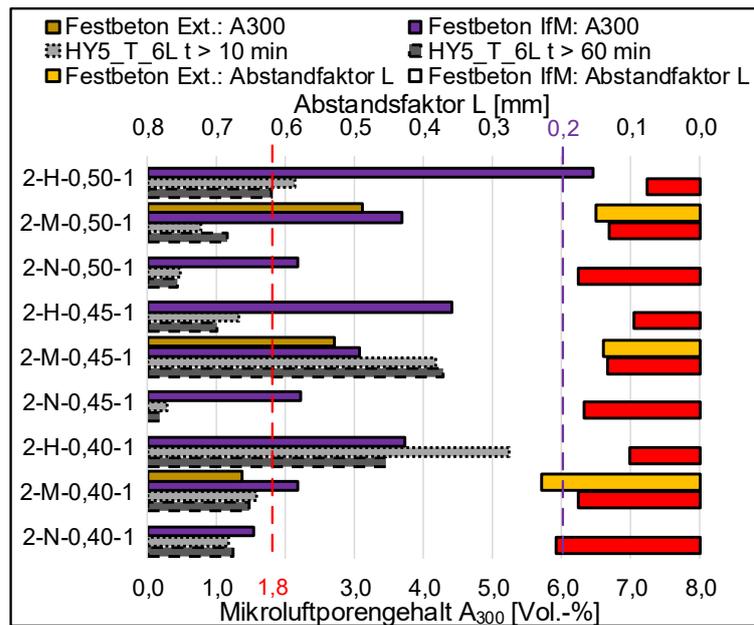


Bild 8-22: Ermittelte Luftporenkennwerte an Unterbetonen. Erste Vergleichsuntersuchung

Das Diagramm in Bild 8-22 stellt die Ergebnisse der Untersuchungen zu ausgewählten Luftporenkennwerten sowohl am Frisch- als auch am Festbeton unter Anwendung verschiedener Prüfverfahren auf die betrachteten Unterbetone dar.

Bei der Analyse der Untersuchungsergebnisse zur Bestimmung des Mikro-Luftporengehaltes (linke Balkengruppe) wird eine Abstufung des Parameters in Abhängigkeit des angestrebten LP-Gehaltes und w/z-Wertes im Beton deutlich. Je geringer der anzustrebende Luftporengehalt bzw. der angesetzte w/z-Wert im Beton ist, desto niedriger ist der beobachtete Mikro-Luftporengehalt im Beton. Es fallen jedoch Unterschiede zwischen den ermittelten Ergebnissen am Festbeton und am Frischbeton auf. In den meisten Fällen wird im Frischbeton ein geringerer Mikro-Luftporengehalt A<sub>300</sub> mit dem HYDRO\_5-Pososimeter erfasst. Lediglich zwei Unterbetone zeigen einen erhöhten Mikro-Luftporengehalt im Frischbeton im Vergleich zur späteren Analyse am Festbeton durch Mikroskopie (2-M-0,45-1 bzw. 2-H-0,40-1). Bei zwei Dritteln der Ergebnisse aus dem HYDRO\_5-Pososimeter sinkt der Mikro-Luftporengehalt mit steigendem Frischbetonalter. Wenn ausschließlich die Messergebnisse des HYDRO\_5-Pososimeters zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit der betrachteten Betone herangezogen werden, würden nur drei der neun Oberbetone mit hohem (H) oder mittlerem (M) LP-Gehalt den Grenzwert des Mikro-Luftporengehaltes von 1,8 Vol.-% einhalten. Acht von neun Betonen würden gemäß der Auszählung im eigenen Labor den Mindestwert erfüllen. Die Ergebnisse des externen Labors weisen kleinere Mikro-Luftporengehalte auf als die im eigenen Labor ermittelten. Die stärkste Differenz der Ergebnisse zwischen den beiden Laboren wird bei dem Unterbeton 2-M-0,40-1 mit einer Abweichung von 0,80 Vol.-% festgestellt.

Die rechte Balkengruppe zeigt die Ergebnisse der Erfassung des Abstandsfaktors L bei der Mikroskopie-Analyse. Gemäß den erfassten Kennzahlen des IfM wird mit steigendem LP-Gehalt eine Reduktion des Abstandsfaktors beobachtet. Dabei kann nur der Unterbeton 2-N-0,40-1 mit niedrig eingestelltem LP-Gehalt den Grenzwert von 0,20 mm nicht einhalten. Laut des externen Labors würde zusätzlich der Unterbeton 2-M-0,40-1 mit 0,23 mm den Grenzwert des Abstandsfaktors überschreiten.

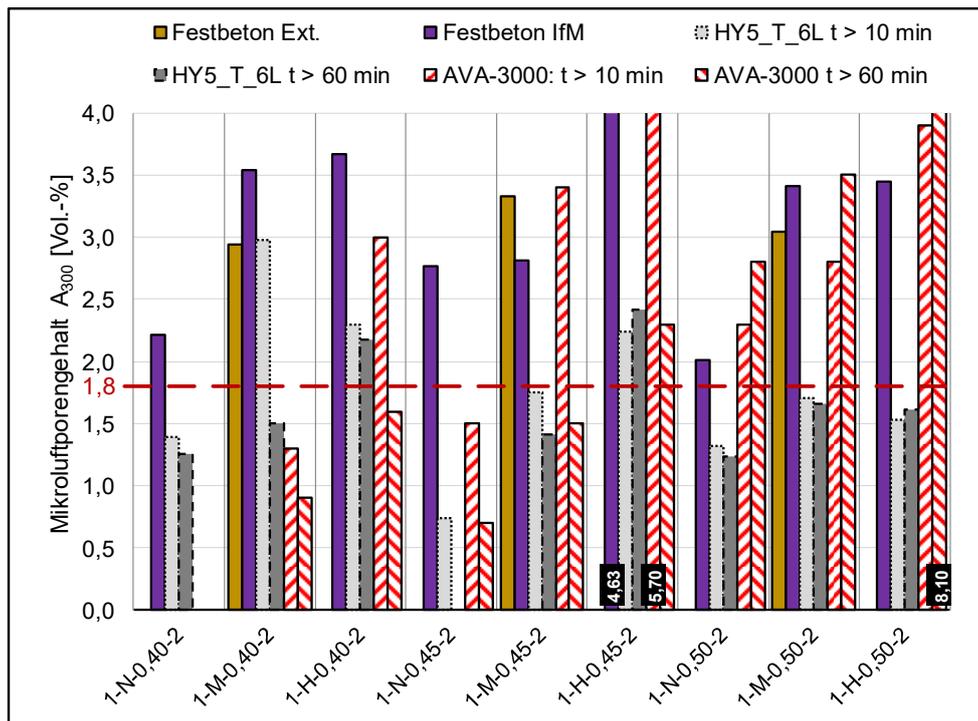


Bild 8-23: Ermittelter Mikro-Luftporengehalt an Oberbetonen. Zweite Vergleichsuntersuchung

Bei der Vergleichsuntersuchung der alternativen Prüfmethode werden neben der Mikroskopie-Analyse und den Ergebnissen des HYDRO\_5-Porosimeters zusätzlich das AVA-3000 zur Ermittlung der Luftporenkennwerte sowie bei der Verwendung des SAM\_7L zur Erfassung der SAM-Number als Alternative zur Abschätzung des Abstandsfaktors der Luftporen im Frischbeton herangezogen. Die Ergebnisse zur Bestimmung des Mikro-Luftgehaltes  $A_{300}$  und des Abstandsfaktors bzw. der SAM-Number sind in zwei separaten Balkendiagrammen dargestellt. Zunächst werden die Untersuchungsergebnisse für die Oberbetone präsentiert, gefolgt von den grafischen Darstellungen der betrachteten Straßenbetonparameter, die an den Unterbetonen gewonnen wurden.

Im Bild 8-23 sind die Untersuchungsergebnisse des Mikro-Luftporengehaltes mit insgesamt drei verschiedenen Prüfmethode abgebildet. Die Resultate der Mikroskopie-Analyse sind durch einfarbig hinterlegte und durchgehende Balken im Diagramm dargestellt. Die Ergebnisse des HYDRO\_5-Porosimeters, erfasst am HYDRO\_5\_T\_6L zu zwei verschiedenen Prüfzeitpunkten, sind in Grautönen und mit gestrichelten Linien als Balken dargestellt. Schraffierte Balken repräsentieren die erfassten Messwerte, ebenfalls zu zwei verschiedenen Prüfzeitpunkten, durch das AVA-3000. Der einzuhaltende Grenzwert von 1,8 Vol.-% für den Mikro-Luftporengehalt ist als rot gestrichelte horizontale Linie im Diagramm zu sehen. Anhand der Balken ist erkennbar, dass der Mikro-Luftporengehalt, ermittelt durch die Mikroskopie-Analyse beider Laborinstitute und das AVA-3000, mit steigendem LP-Gehalt im Beton ebenfalls ansteigt. Bei den Daten des HYDRO\_5-Porosimeters ist diese Abhängigkeit nicht eindeutig gegeben. Laut der Auszählung erfüllen alle Betone die Anforderung an einen Mikro-Luftporengehalt von mindestens 1,8 Vol.-%. Bei Verwendung der AVA-3000-Prüfeinrichtung an Betonen mit niedrigem oder mittlerem LP-Gehalt kann der geforderte Mindestwert nicht nachgewiesen werden. Weichere Betone weisen jedoch einen ähnlichen Mikro-Luftporengehalt auf wie bei der Auszählung im Festbeton. Bei der Messung mit dem HYDRO\_5-Porosimeter können ausschließlich drei Betone den Mindest-Mikro-Luftporengehalt vorweisen. Betone mit hohem w/z-Wert zeigen zu beiden Prüfzeitpunkten in der Regel zu niedrige Mikro-Luftporengehalte. In dem vorliegenden Diagramm ist ebenfalls eine Tendenz erkennbar, dass zum zweiten Prüfzeitpunkt im Frischbeton sowohl mit dem HYDRO\_5-Porosimeter als auch mit der AVA-3000 in den meisten Fällen geringfügig niedrigere Mikro-

Luftporengehalte gemessen werden. Beim Vergleich der Ergebnisse der Mikroskopie-Analyse beider Laborinstitute sind Abweichungen der Messwerte von bis zu 0,7 Vol.-% festzustellen. Es zeigt sich eine Verringerung der Differenz der Messergebnisse mit steigendem w/z-Wert im Beton.

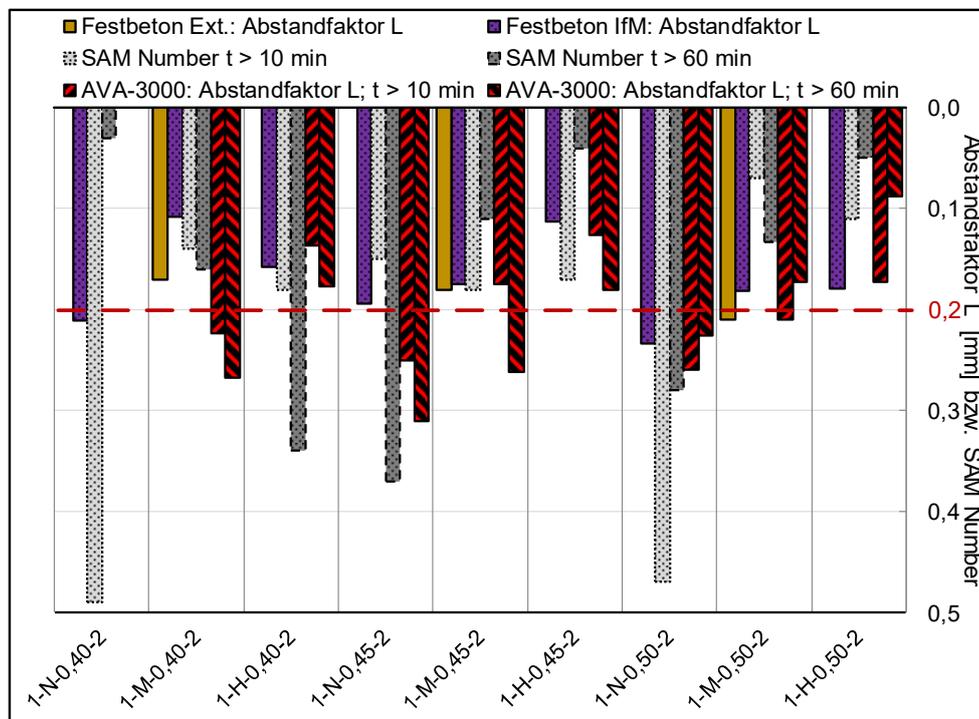


Bild 8-24: Ermittelter Abstandsfaktor und SAM-Number an Oberbetonen. Zweite Vergleichsuntersuchung

Das Balkendiagramm im Bild 8-24 zeigt die Ergebnisse zur Erfassung des Abstandsfaktors L und der SAM-Number bei der zweiten Vergleichsuntersuchung mit alternativen Prüftechniken an Oberbetonen. Der Verlauf der Balken ist von oben nach unten gewählt, und die Y-Achse ist entsprechend rechts von oben nach unten verlaufend angegeben. Die grau verlaufenden Balken repräsentieren in diesem Vergleich die erfassten SAM-Number zu zwei verschiedenen Prüfzeitpunkten.

Eine Reduktion des Abstandsfaktors aufgrund des Anstiegs des LP-Gehaltes im Beton ist anhand der Ergebnisse von zwei Prüfmethoden (Mikroskopie im Festbeton und AVA-3000) meistens erkennbar. Zwei Oberbetone mit niedrigem LP-Gehalt weisen einen zu hohen Abstandsfaktor auf. Mit der AVA-3000-Prüftechnik ermittelte Daten zeigen demnach, dass ausschließlich Oberbetone mit einem hohem LP-Gehalt den Grenzwert von 0,20 mm einhalten. Zum zweiten Prüfzeitpunkt wurden in der Regel höhere Abstandsfaktoren als zum ersten Prüfzeitpunkt festgestellt.

Bei der Betrachtung der SAM-Number als indirekte Schätzung des Abstandsfaktors ist keine klare Systematik der Daten in Abhängigkeit vom eingestellten LP-Gehalt im Frischbeton erkennbar. Lediglich beim Oberbeton 1-M-0,45-M entspricht die zum ersten Prüfzeitpunkt ermittelte SAM-Number dem am Festbeton gemessenen Abstandsfaktor.

Bei der Analyse der Ergebnisse der Mikroskopie beider Labore zeigt sich eine antiproportionale Differenz zwischen den Messwerten im Vergleich zur Differenz des Mikro-Luftporengehaltes. Wenn bei der Rezeptur 1-M-0,40-2 in der Analyse des externen Labors ein geringerer Mikro-Luftporengehalt erfasst wurde, war erwartungsgemäß ein höherer Abstandsfaktor L im Vergleich zu den selbsterfassten Daten zu erwarten. Laut der externen Analyse würde der Oberbeton 1-M-0,50-2 den Grenzwert von 0,20 mm ebenfalls überschreiten.

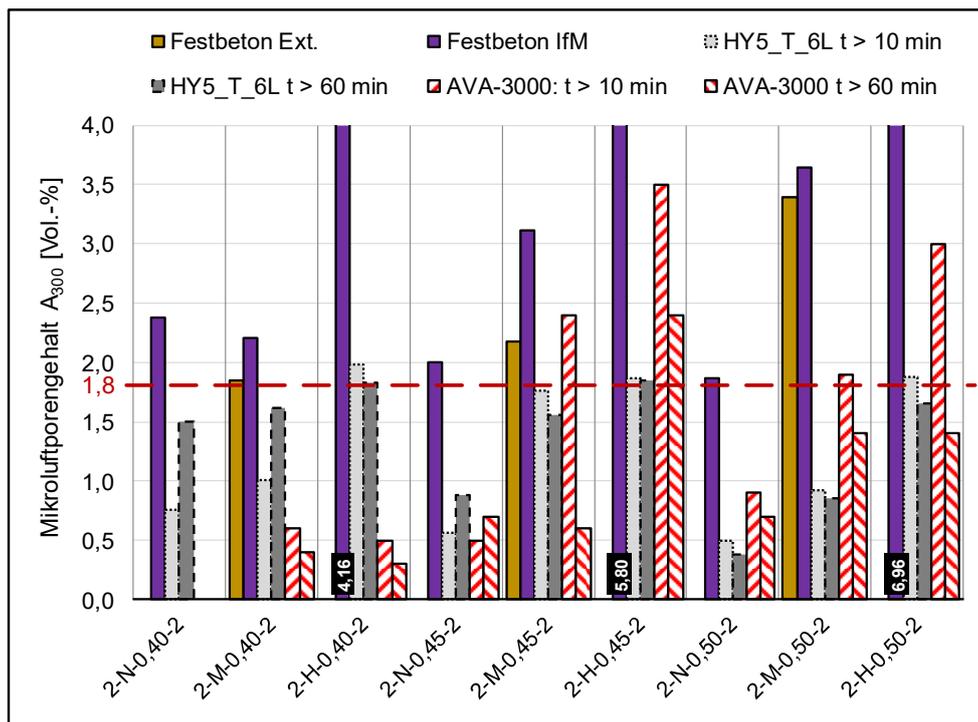


Bild 8-25: Ermittelter Mikro-Luftporengehalt an Unterbetonen. Zweite Vergleichsuntersuchung

Bild 8-25 zeigt die Untersuchungsergebnisse des an den Unterbetonen ermittelten Mikro-Luftporengehalts. Anhand des Balkenverlaufs ist zu erkennen, dass der Mikro-Luftporengehalt an Unterbetonen mit w/z-Werten von 0,45 und 0,50 mit steigendem LP-Gehalt ebenfalls ansteigt. Bei den Unterbetonen 2-N/M-0,40-2 wurden mit differenzierten Prüfmethoden ähnliche Luftporenkennwerte erfasst. Laut der Auszählung beider Labore hielten alle Unterbetone den Mindestwert des Mikro-Luftporengehalts von 1,8 Vol.-% ein.

Bei Anwendung des AVA-3000-Prüfverfahrens am Frischbeton konnte an Unterbetonen mit mittlerem oder hohem LP-Gehalt ab einem eingestellten w/z-Wert von 0,45 der Mindestwert des Mikro-Luftporengehaltes zum ersten Prüfzeitpunkt bestätigt werden. Dieser lag jedoch deutlich unter den erfassten Kennwerten am Festbeton.

Bei der Messung mit dem HYDRO\_5-Porosimeter konnten drei Betone ausschließlich zum ersten Prüfzeitpunkt den Mindest-Mikro-Luftporengehalt aufweisen. Betone mit hohem w/z-Wert zeigten zu beiden Prüfzeitpunkten laut den Ergebnissen des HYDRO\_5-Porosimeters in der Regel zu niedrige Mikro-Luftporengehalte. In dem vorliegenden Diagramm ist ebenfalls eine Tendenz erkennbar, dass zum zweiten Prüfzeitpunkt im Frischbeton mit der AVA-3000 in den meisten Fällen geringfügig niedrigere Mikro-Luftporengehalte gemessen wurden. Mit dem HYDRO\_5-Porosimeter wurde hingegen keine eindeutige Systematik der betrachteten Messwerte festgestellt. Lediglich beim Unterbeton mit einem hohen w/z-Wert von 0,50 wurden zum ersten Prüfzeitpunkt höhere Mikro-Luftporengehalte im Vergleich zum zweiten Prüfzeitpunkt gemessen. Beim Vergleich der Ergebnisse der Mikroskopie-Analyse beider Labore sind Messwertabweichungen der Messwerte von bis zu 1,0 Vol.-% festzustellen.

Die Ergebnisse der Erfassung des Abstandsfaktors L und der SAM-Number an Unterbetonen mit verschiedener Prüftechnik werden im Diagramm in Bild 8-26 dargestellt.

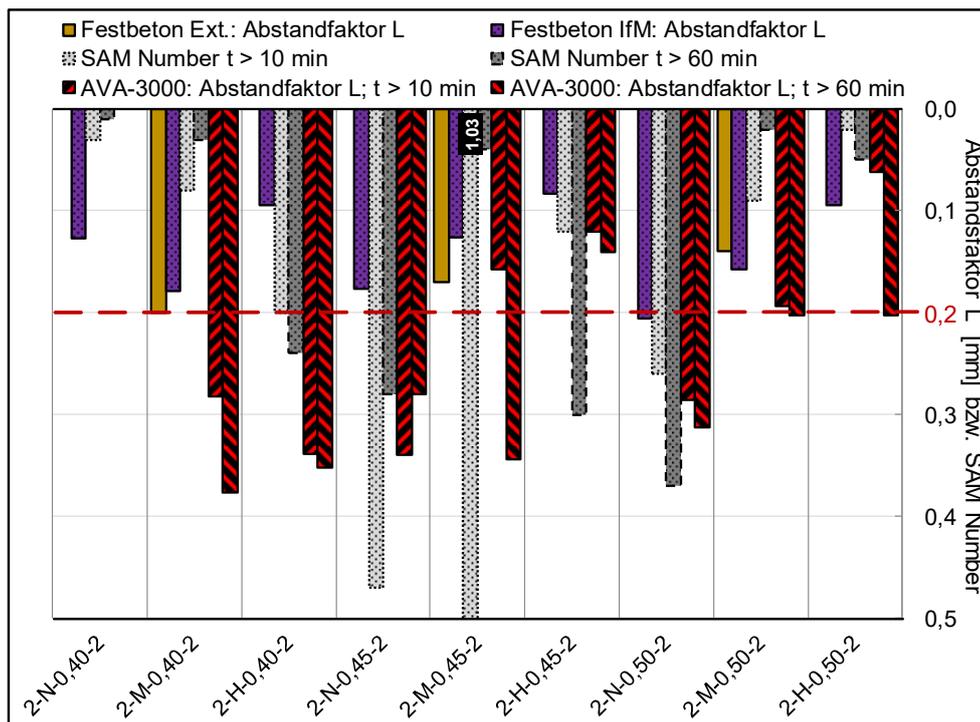


Bild 8-26: Ermittelter Abstandsfaktor und SAM Number an Unterbetonen. Zweite Vergleichsuntersuchung

Eine Reduktion des Abstandsfaktors aufgrund des Anstiegs des LP-Gehaltes an Unterbetonen mit einem w/z-Wert von 0,45 bzw. 0,50 ist anhand der Ergebnisse der Mikroskopie-Analyse des IfM und der AVA-3000 zum ersten Prüfzeitpunkt zu erkennen. Anhand der Ergebnisse der Mikroskopie-Analyse beider unabhängiger Labore würde ausschließlich der Unterbeton 2-N-0,50-2 die Obergrenze des Abstandsfaktors L geringfügig übersteigen. Nach den Ergebnissen der AVA-3000-Prüftechnik zu urteilen, weisen alle Unterbetone mindestens an einem der Prüfzeitpunkte einen zu hohen Abstandsfaktor auf. Demnach werden höhere Abstandsfaktoren zum zweiten Prüfzeitpunkt in der Regel festgestellt.

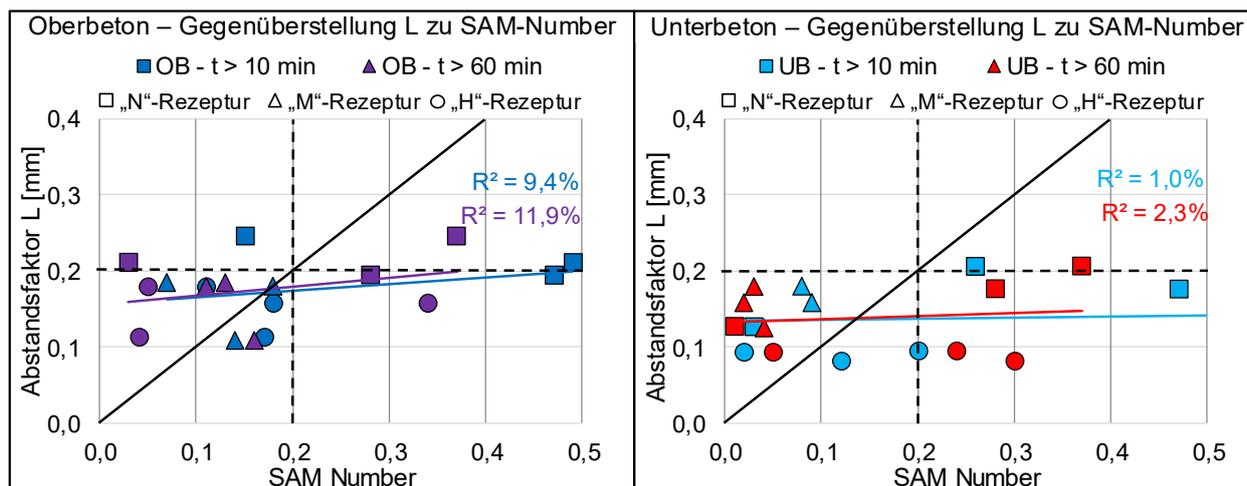


Bild 8-27: Gegenüberstellung des Abstandsfaktors L mit zugehöriger SAM-Number gleicher Betone

Beim Vergleich der SAM-Number mit den Daten aus der Mikroskopie-Analyse sind anhand der Datenaufbereitung in Bild 8-26 keine Übereinstimmungen der Kenndaten zu erkennen. Es zeigt sich keine Systematik der Messwerte der SAM-Number in Abhängigkeit der eingestellten Betonparameter.

Inwiefern der Abstandsfaktor  $L$  im Festbeton durch die SAM-Number am Frischbeton abgeschätzt werden kann, zeigt ein weiterer Vergleich beider ermittelter Parameter in Bild 8-27. Links sind die erfassten Daten an Oberbetonen und rechts an Unterbetonen abgebildet. Die Rezepturen mit unterschiedlichen LP-Gehalten sind durch die Form der Datenpunkte zu unterscheiden: Rechteckige Datenpunkte repräsentieren die Ergebnisse an Betonen mit niedrigem LP-Gehalt, dreieckige Datenpunkte die Ergebnisse an Betonen mit mittlerem LP-Gehalt und kreisförmige Datenpunkte die Ergebnisse an Betonen mit hohem LP-Gehalt. Blau hinterlegte Datenpunkte stellen die erfassten Werte der SAM-Number zum ersten Prüfzeitpunkt dar, violette Datenpunkte die Werte erfasst zum zweiten Prüfzeitpunkt. Die Geraden in entsprechender Farbe repräsentieren die Trendlinien der Datenpunkte. Die dazugehörigen Bestimmtheitsmaße sind rechts in den jeweiligen Diagrammen angegeben.

Laut der Literaturstudie wird die SAM-Number von 0,20 dem Abstandsfaktor von 0,20 mm gleichgesetzt. Die abgebildete Diagonale stellt somit die Trendlinie einer optimalen Übereinstimmung beider Parameter dar.

Die Messungen aus der vorliegenden Untersuchung widersprechen jedoch dieser Annahme. Sehr geringe Bestimmtheitsmaße, meistens unter 10 %, sowie sehr flach verlaufende Trendgeraden zeigen, dass die Übereinstimmung beider Parameter nicht gegeben ist. Die SAM-Number streut deutlich stärker als der Abstandsfaktor. Auch innerhalb der beiden Prüfzeitpunkte ist meistens keine Systematik in den Daten erkennbar. Bei den Unterbetonen liegt die Übereinstimmung der Daten im vorliegenden Vergleich unter 3 %. Zusammenfassend ist anhand vorliegender Datenlage anzunehmen, dass eine Abschätzung des Abstandsfaktors  $L$  durch den Einsatz des SAM\_7L am Frischbeton nicht gegeben ist.

#### **8.5.4 Ergebnisvergleich der Luftporengrößenverteilung**

Die Mikroskopie-Analyse am Festbeton ermöglicht nicht nur die Erfassung der Luftporenkennwerte wie Mikro-Luftporengehalt bzw. Abstandsfaktor, sondern auch die Bestimmung der Luftporengrößenverteilung im Festbeton. Als Ergebnis wird ein Summendiagramm der erfassten Luftporen erstellt, das nach deren Durchmesser sortiert ist. Anhand der ermittelten Verteilung kann beurteilt werden, in welcher Größenordnung die verschiedenen Luftporenarten im Festbeton vorliegen und ob sie trotz des festgestellten Gesamtluftporengehaltes ausreichend sind, um genügend Raum für mögliche Eisexpansionen während eines Frost-Tausalz-Angriffs zu bieten. Durch den Einsatz des AVA-3000 und des HYDRO\_5-Porosimeters an HYDRO\_5\_T\_6L können ebenfalls Summendiagramme und Luftporenverteilungen der künstlich eingeführten Luftporen im Frischbeton zu verschiedenen Prüfzeitpunkten erfasst werden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen der Luftporenverteilung mit den drei genannten Methoden an den Ober- und Unterbetonen mit mittlerem Luftporengehalt dargestellt und bewertet, da diese Frischbetonsorten baupraktisch relevante Luftporengehalte aufweisen. Bei der Gegenüberstellung der vorliegenden Messergebnisse wird das Ziel verfolgt, zu überprüfen, inwiefern die alternativen Methoden, die am Frischbeton angewendet wurden, die Luftporenverteilung im Festbeton präzise abschätzen können. Die ermittelten Ergebnisse, auf denen die folgenden Diagramme basieren, sind dem Anhang den Tabellen Tab. I - 63 bis Tab. I - 68 zu entnehmen.

Die Ergebnisse sind in drei Liniendiagrammen je Grundrezeptur aufgeteilt. Die Mikroskopie-Analyse erfolgte an zwei unabhängigen Laboren mit der Erfassung der Daten am Frischbeton zu zwei verschiedenen Prüfzeitpunkten. Es sind in jedem Liniendiagramm insgesamt sechs Kurven abgebildet. Im oberen Bereich des Diagramms ist die jeweils betrachtete Betonrezeptur vermerkt, während sich die Legende auf der rechten Seite befindet. Die violetten und gelben durchgezogenen Linien repräsentieren die Luftporenverteilung, die an derselben Festbetonprobe jedoch von verschiedenen Laboren ermittelt wurde. Die hell- und dunkel-

blau gestrichelten Linien stellen die Ergebnisse dar, die mit dem HYDRO\_5-Porosimeter zu zwei unterschiedlichen Prüfzeitpunkten ermittelt wurden. Zusätzlich sind die Daten der Luftporenverteilung (rote grob gestrichelte Kurven), gemessen mittels der AVA-3000-Prüftechnik zu zwei Prüfzeitpunkten aufgeführt.

Links von der jeweiligen Datenkurve sind die entsprechenden Gesamtluftporengehalte angegeben. In der Mitte des Diagramms ist eine rote vertikale Linie aufgetragen, die den Mikro-Luftporengehalt  $< 300 \mu\text{m}$  abgrenzt. Der jeweilige  $A_{300}$ -Messwert ist am Schnittpunkt der roten Vertikalen und der jeweiligen Kurve aufgetragen.

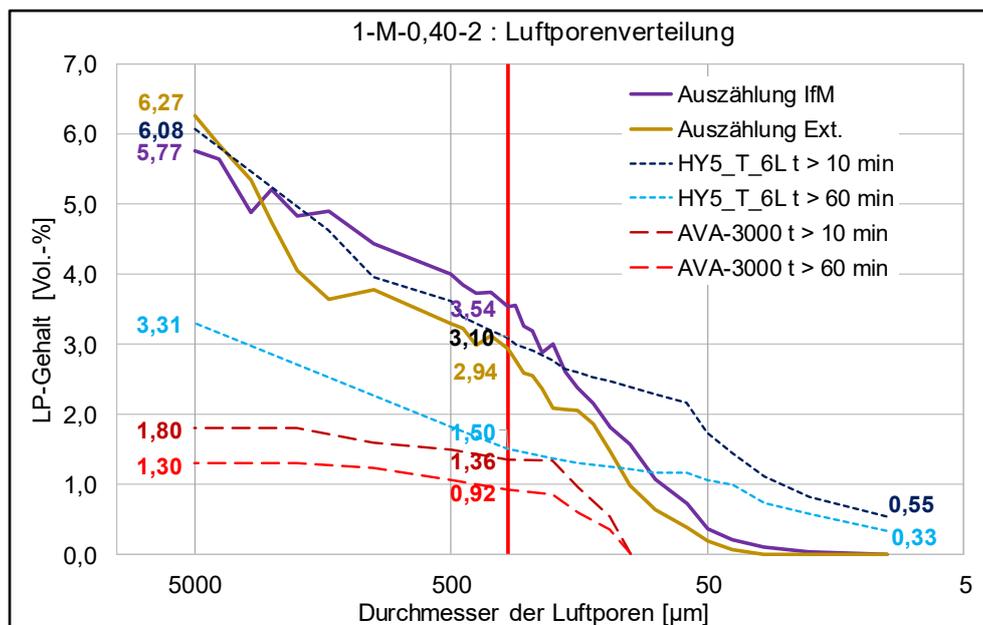


Bild 8-28: Ergebnisse der Porengrößenverteilung am Oberbeton 1-M-0,40-2

Im Diagramm in Bild 8-28 sind die Ergebnisse der Porengrößenverteilung an einem 1-M-0,40-2 Straßenbeton dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass je nach angewandter Prüftechnik unterschiedliche Verläufe zu beobachten sind. Die AVA-3000-Prüftechnik zeigt den geringsten Luftporengehalt zwischen 1 und 2 Vol.-%. Zudem erfasst die AVA-3000-Prüftechnik die Mikro-Luftporen erst ab einem Durchmesser von ca.  $100 \mu\text{m}$ . Bei einem maximal festgehaltenen Mikro-Luftporengehalt von 1,36 Vol.-% würde der vorliegende Frischbeton somit den Mindestgehalt an Mikro-Luftporen nicht erfüllen. Es ist zu berücksichtigen, dass die Prüfbetone mit einem w/z-Wert von 0,40 im Frischbetonzustand oft einen hohen Steifigkeitsgrad aufweisen, wodurch die Probeentnahme und Anwendung der AVA-3000-Prüftechnik mit erheblicher Komplexität und Anfälligkeit für Störungen verbunden ist. In der Regel werden die vorliegenden Proben im Prüfgefäß der AVA-3000-Prüftechnik erst nach mehreren Mischvorgängen ordnungsgemäß mit der Prüflösung vermischt.

Das nächste Kurvenpaar repräsentiert die Ergebnisse des HYDRO\_5-Porosimeters. Die Resultate der Untersuchung vom ersten Prüfzeitpunkt nähern sich dem Kurvenverlauf der ermittelten Verteilung im Festbeton etwa ab einem Luftporendurchmesser von  $200 \mu\text{m}$  an. Zum zweiten Prüfzeitpunkt ist eine deutliche Reduktion des LP-Gehaltes im Beton anhand der Daten des HYDRO\_5-Porosimeters zu beobachten. Besonders auffällig ist der Verlauf beider Kurven des HYDRO\_5-Porosimeters im rechten Bereich des Diagramms, der die Ergebnisse der feinsten Luftporengruppe darstellt. Laut den Ergebnissen des HYDRO\_5-Porosimeters ist im Frischbeton zu beiden Prüfzeitpunkten ein hoher Anteil an sehr kleinen Luftporen vorhanden, die jedoch bei der Mikroskopie-Analyse am Festbeton nicht mehr nachweisbar oder erfassbar sind. Gemäß den Daten des ersten Prüfzeitpunktes würde der Beton mit einem Mikro-Luftporengehalt von 3,1 Vol.-% die Grenzwertanforderungen deutlich erfüllen, zum zweiten Prüfzeitpunkt jedoch nicht mehr.

Die Mikroskopie-Analyse wurde an zwei unabhängigen Laboren durchgeführt, die Kurvenverläufe zeigen hierbei ähnliche Verläufe. Der endgültige LP-Gehalt weist ebenfalls nur geringfügige Unterschiede auf. Deutliche Unterschiede sind jedoch im Mikro-Luftporengehalt erkennbar. Der eigenen Mikroskopie-Analyse zufolge wurden etwa 40 % mehr Mikro-Luftporen mit einem Durchmesser von bis zu 80 µm erfasst als bei der externen Laboreinrichtung. Es ist anzunehmen, dass durch das Abfahren der Festbetonprobe bei der Mikroskopie-Analyse entlang minimal unterschiedlicher Messlinien die Wiederholbarkeit der Messergebnisse deutlich eingeschränkt ist.

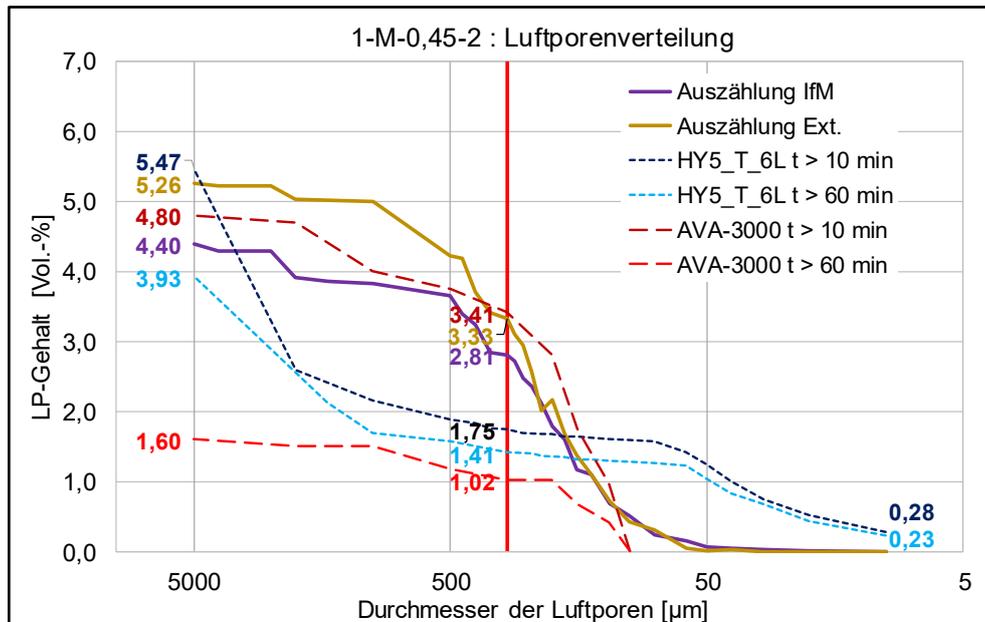


Bild 8-29: Ergebnisse der Luftporenverteilung am Oberbeton 1-M-0,45-2

Das folgende Diagramm (siehe Bild 8-29) zeigt die Luftporenverteilung des Oberbetons 1-M-0,45-2, ermittelt mit drei verschiedenen Prüfmethoden. Es ist erkennbar, dass durch die Variation des w/z-Wertes sich der Kurvenverlauf der Daten von der AVA-3000 zum ersten Prüfzeitpunkt den Daten der Mikroskopie-Analyse an den Festbetonproben angenähert hat. Die Veränderung des Wassergehaltes im Frischbeton hatte eine Konsistenzanpassung zur Folge, was die Mischbarkeit der Betonprobe beim Einsatz am AVA-3000 begünstigte. Bei der Untersuchung zu einem späteren Prüfzeitpunkt war die Mischbarkeit der zweiten, bereits angesteiften Frischbetonprobe nur bedingt möglich. Dies wirkte sich entsprechend auf die Ergebnisse der Untersuchung aus.

Die Daten, die mit dem HYDRO\_5-Pososimeter (HYDRO\_5\_T\_6L) zu beiden Prüfzeitpunkten gewonnen wurden, zeigen einen ähnlichen Kurvenverlauf. Die Kurvenverläufe weisen weiterhin einen hohen Anteil an Mikro-Luftporen auf, die erst ab einem Durchmesser von etwa 200 µm mit den Kurven der Mikroskopie-Analyse am Festbeton übereinstimmen. Im Bereich der größeren Luftporen zeigen die Daten des HYDRO\_5\_T\_6L geringere Luftporengehalte bei Porengrößen über 200 µm. Zum ersten Prüfzeitpunkt wird ein Gesamtluftporengehalt beim HYDRO\_5-Pososimeter festgestellt, der dem Gesamtwert der externen Analyse entspricht. Zum zweiten Prüfzeitpunkt nähert sich der Gesamtluftporengehalt dem Gesamtwert der eigenen Mikroskopie-Analyse an. Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen würde der untersuchte Straßenbeton ausschließlich bei Anwendung der AVA-3000-Prüftechnik zum ersten Prüfzeitpunkt und der Mikroskopie-Analyse den Mikro-Luftporengehalt von über 1,8 Vol.-% aufweisen.

Die Ergebnisse der Mikroskopie-Analyse an zwei unabhängigen Laboren zeigen einen ähnlichen Kurvenverlauf im Bereich der Mikro-Luftporen bis zu einem Durchmesser von etwa 250 µm. Bei der eigenen Untersuchung wurden im Vergleich zu den Ergebnissen des externen Labors insgesamt bis zu 0,8 Vol.-% weniger Luftporen erfasst.

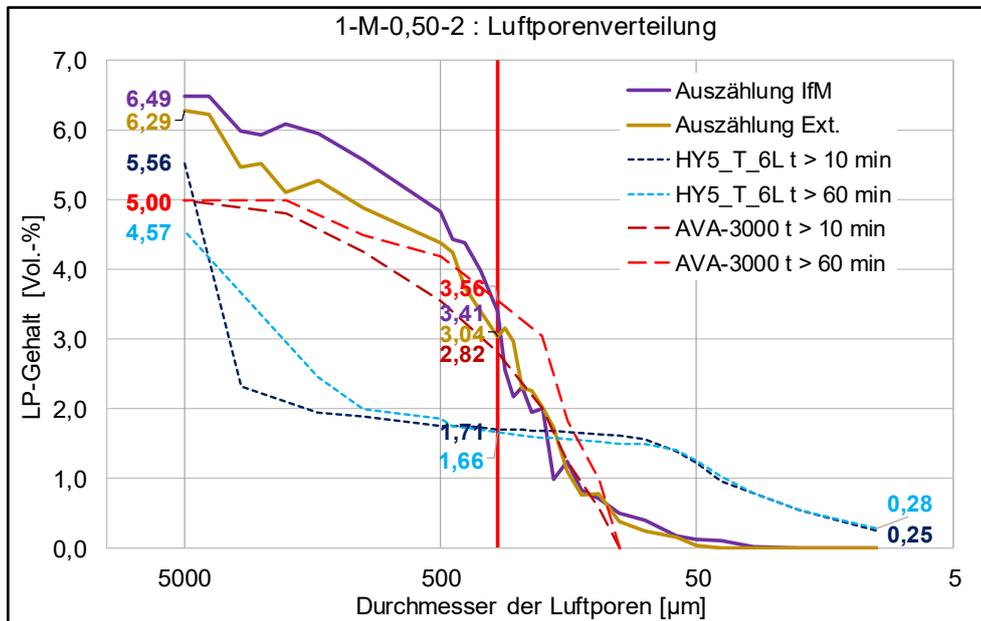


Bild 8-30: Ergebnisse der Luftporenverteilung am Oberbeton 1-M-0,50-2

Bild 8-30 zeigt die Untersuchungsergebnisse an einem Oberbeton mit einem w/z-Wert von 0,50. Eine weitere Verflüssigung des Frischbetons hat positive Auswirkungen auf die Porositätsanalyse mittels AVA-3000. Die Kurvenverläufe der AVA-3000 zeigen ähnliche Mikro-Luftporengehalte wie bei der Mikroskopie-Analyse am Festbeton. Zu beiden Prüfzeitpunkten sind ähnliche Verläufe zu beobachten.

Die Ergebnisse des HYDRO\_5-Porosimeters zeigen weiterhin deutlich höhere Mikroanteile der künstlich eingeführten Luftporen bis zu 70 µm. Dennoch verlaufen die Kurven annähernd gleich und flach. Ab einem Luftporendurchmesser von ca. 1000 µm wird laut HYDRO\_5-Porosimeter ein deutlicher und starker Anstieg des Luftporengehalts im Frischbeton beobachtet.

Die Untersuchungen am Festbeton an beiden Prüfstellen zeigen sehr ähnliche Kurvenverläufe. Extern wurden geringfügig niedrigere Mengen an Luftporen mit einem Durchmesser > 300 µm erfasst. Laut der vorliegenden Ergebnisse würde der Oberbeton 1-M-0,50-2 bei vier der sechs Untersuchungen einen ausreichenden Mikro-Luftporengehalt aufweisen.

Im Bild 8-31 sind die Ergebnisse der Luftporenverteilung eines Unterbetons 2-M-0,40-2 als Liniendiagramm dargestellt, ermittelt mittels verschiedener Prüfverfahren. Aufgrund der steifen Konsistenz des Betons (w/z-Wert = 0,40) erfasste das AVA-3000 die geringste Menge an Luftporen in der entsprechenden Probe zu beiden Prüfzeitpunkten. Der Mikro-Luftporengehalt würde bei der oben genannten Prüfmethode zum ersten Prüfzeitpunkt bei etwa 0,60 Vol.-% liegen.

Die Ergebnisse, gewonnen mittels des HYDRO\_5-Porosimeters, weisen untereinander ähnliche Kurvenverläufe auf. Auffallend ist dabei der Kurvenverlauf der Messwerterfassung zum zweiten Prüfzeitpunkt, der einen deutlich höheren Anteil an Luftporen ab einem Durchmesser von etwa 1500 µm zeigt. Die Differenz liegt hierbei zwischen 0,25 und 0,65 Vol.-%. Laut den Ergebnissen des HYDRO\_5-Porosimeters werden zudem höhere Anteile an Mikro-Luftporen mit einem Durchmesser < 140 µm zum ersten Prüfzeitpunkt beobachtet. Zum zweiten Prüfzeitpunkt überschneiden sich die Ergebniskurven der Mikroskopie-Analyse und des HYDRO\_5-Porosimeters bei einer Luftporengröße von etwa 200 bzw. 240 µm. Ein hoher Anteil an

Mikro-Luftporen < 50 µm, wie bei der Untersuchung mit dem HYDRO\_5-Porosimeter festgestellt, wird bei der Mikroskopie-Analyse nicht erfasst. Der Mindestgehalt an Mikro-Luftporen wurde demnach laut den Ergebnissen des HYDRO\_5-Porosimeters nicht eingehalten.

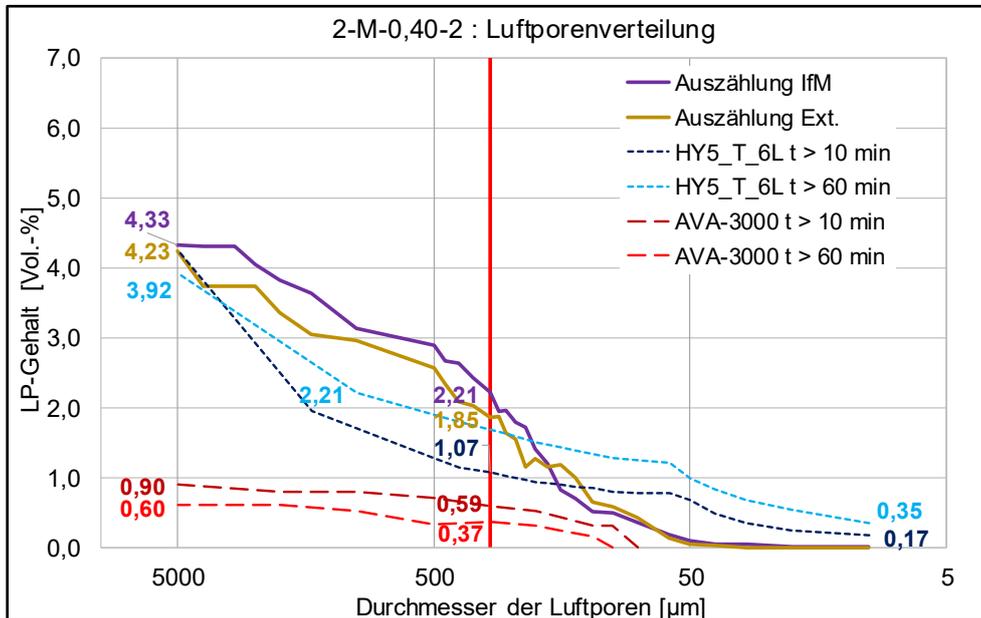


Bild 8-31: Ergebnisse der Luftporenverteilung am Unterbeton 2-M-0,40-2

Die Mikroskopie-Analyse beider Labore zeigt ebenfalls einen ähnlichen Kurvenverlauf im Vergleich untereinander. Die maximale Differenz der Versuchsergebnisse liegt hierbei bei etwa 0,60 Vol.-%. Der endgültige Luftporengehalt bei beiden Untersuchungen liegt auf einem vergleichbaren Niveau von etwa 4,3 Vol.-%.

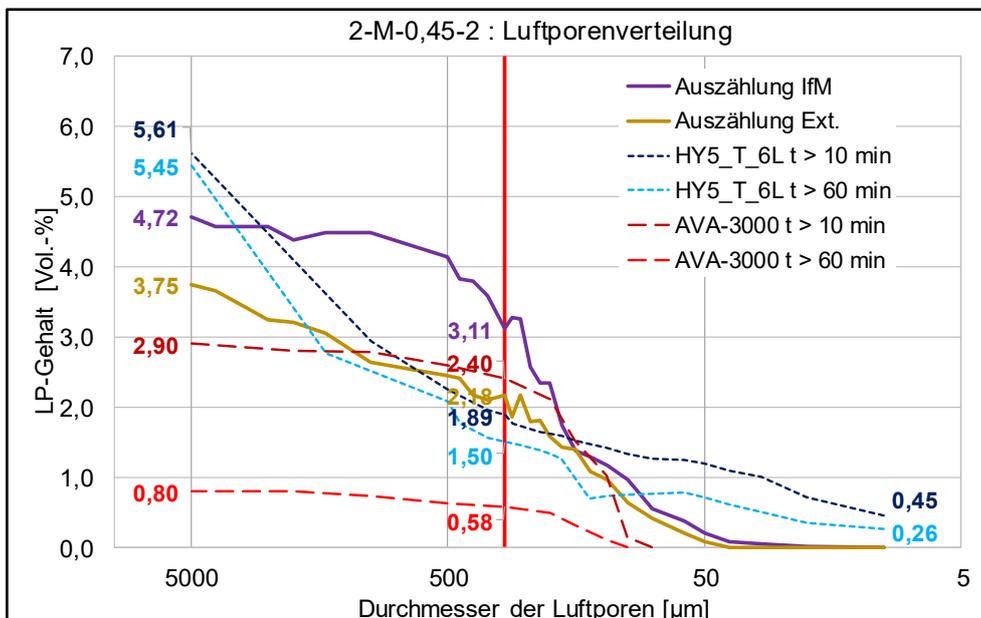


Bild 8-32: Ergebnisse der Luftporenverteilung am Unterbeton 2-M-0,45-2

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Luftporenverteilung des Unterbetons 2-M-0,45-2 sind im Bild 8-32 dargestellt. Die Veränderung der Konsistenz durch die Steigerung des w/z-Werts ist am Kurvenverlauf der

Daten der AVA-3000-Prüftechnik zum ersten Prüfzeitpunkt im Vergleich zu den Daten aus Bild 8-31 erkennbar. Hierbei wird eine ähnliche Porosität des Frischbetons festgestellt, wie diese später am Festbeton von dem externen Labor erfasst wurde. Jedoch zeigen sich deutlich unterschiedliche Gesamtluftporengehalte zwischen den Ergebnissen des externen Labors und den Ergebnissen am AVA-3000. Die Ergebnisse der Untersuchung am Frischbeton mit dem AVA-3000 zu einem späteren Prüfzeitpunkt weisen eine deutlich niedrigere Porosität auf. Dies ist jedoch auf die angesteifte Konsistenz der Frischbetonprobe zurückzuführen, was die Freisetzung der Luftporen durch den Mischprozess während der Messung verhindert.

Die Ergebniskurven, die mit dem HYDRO\_5-Pososimeter (HYDRO\_5\_T\_6L) zu beiden Prüfzeitpunkten gewonnen wurden, zeigen keine Überschneidung untereinander. Höhere Luftporengehalte werden, wie erwartet, zum ersten Prüfzeitpunkt beobachtet, wobei der Mikro-Luftporengehalt ebenfalls zu diesem Prüfzeitpunkt eingehalten wird. Ein höherer Anteil an Mikro-Luftporen im Vergleich zur Mikroskopie-Analyse wird auch bei vorliegendem Unterbeton (2-M-0,45-2) festgestellt. Zu beiden Prüfzeitpunkten wird ein deutlich höherer Gesamtluftporengehalt beim HYDRO\_5-Pososimeter im Vergleich zu anderen Prüfmethoden erfasst.

Die Kurvenverläufe der Mikroskopie-Analyse am Festbeton beider Laborinstitute zeigen eine starke Differenzierung. Ein ähnlicher Verlauf ist nur bei den erfassten Mikro-Luftporen bis zu einer Porengröße von 160 µm zu beobachten. Weiterhin wird ein deutlich geringerer Anstieg des Luftporengehalts mit steigendem Durchmesser der Luftporen bei dem externen Labor im Vergleich zu den Messwerten des IfM erfasst. Die höchste Differenz der Messwerte liegt hierbei bei etwa 1,9 Vol.-%. Die Messungen weisen einen deutlich niedrigeren Gesamtluftporengehalt auf als der rechnerisch ermittelte Soll-Wert an den zugehörigen Frischbetonwürfeln. Messdaten beider Labore weisen jedoch einen ausreichenden Mikro-Luftporengehalt von deutlich über 1,8 Vol.-% im Festbeton auf.

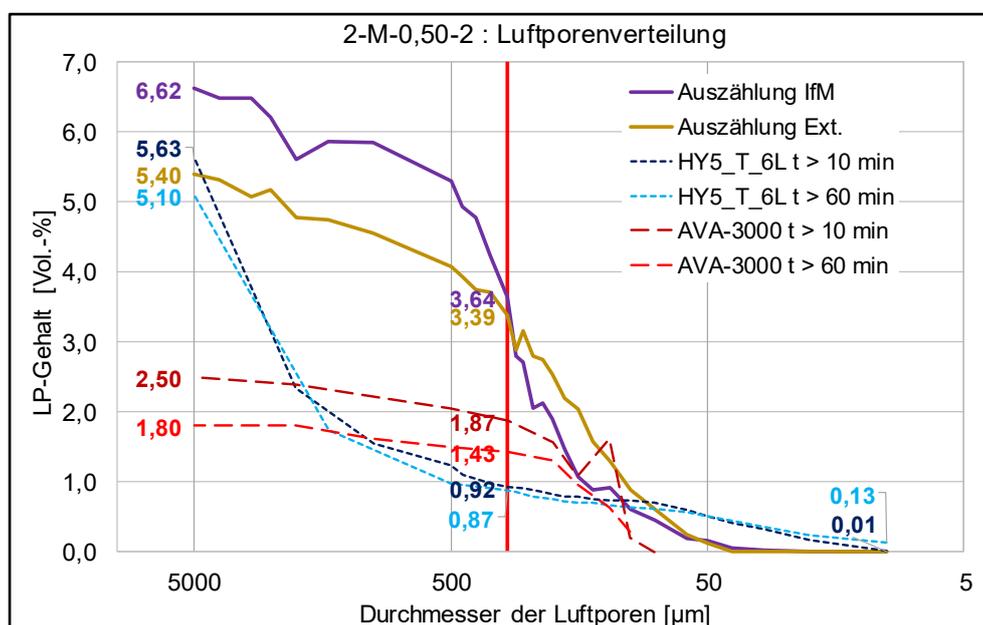


Bild 8-33: Ergebnisse der Luftporenverteilung am Unterbeton 2-M-0,50-2

Abschließend werden in vorliegendem Kapitel die Ergebnisse der Untersuchungen der Luftporenverteilung an dem Unterbeton 2-M-0,50-2 mit dem höchsten betrachteten w/z-Wert im Bild 8-33 dargestellt. Es ist zu vermerken, dass trotz der weichen Konsistenz des Frischbetons, aufgrund des angehobenen Wassergehaltes im Frischbeton, die Ergebnisse der AVA-3000-Prüftechnik geringe Gesamtluftporengehalte wiedergeben. Die Kurvenverläufe des AVA-3000 weisen Ähnlichkeiten mit den Ergebniskurven des HYDRO\_5-Pososimeters auf, jedoch ausschließlich bis zu einem gewissen Porendurchmesser. Ab einer Porengröße von ca. 1500 µm wurde bei den Messungen mit dem HYDRO\_5-Pososimeter eine hohe Anzahl

an großen Luftporen festgestellt. Vorliegende Luftporen sind jedoch anhand der Messergebnisse am AVA-3000 nicht zu erkennen. Der Mindestgehalt an Mikro-Luftporen wurde laut Ergebnissen des AVA-3000 zum ersten Prüfzeitpunkt beim Unterbeton eingehalten.

Die Ergebnisse des HYDRO\_5-Porosimeters zeigen weiterhin deutlich höhere Mikroluftporenanteile der künstlich eingeführten Luftporen bis zu ca. 100 µm. Die Kurvenverläufe der Ergebnisdaten beider Prüfzeitpunkte liegen sehr dicht nebeneinander. Der Gesamtluftporengehalt der Messungen zu beiden Prüfzeitpunkten weist eine geringfügige Differenz von 0,50 Vol.-% auf. Dennoch verlaufen die Kurven annähernd gleich und flach, wobei der Mindestwert an Mikro-Luftporen hierbei nicht eingehalten wird. Ab einem Luftporendurchmesser von ca. 1500 bis 2000 µm wird laut HYDRO\_5-Porosimeter ein deutlicher und starker Anstieg des Luftporengehalts im Frischbeton beobachtet.

Die Untersuchungen am Festbeton beider Laborinstitute zeigen wiederholt Kurvenverläufe mit deutlichen Differenzen untereinander. Im Bereich der Mikro-Luftporen wurden demnach geringfügig höhere Luftporengehalte extern erfasst als im Labor des IfM. Hierbei wurden ähnliche Gesamt-Mikro-Luftporengehalte in Größenordnung von 3,50 Vol.-% festgestellt. Zudem wurden im Labor des IfM größere Mengen an mittleren und großen Poren bei der Mikroskopie-Analyse beobachtet als bei dem externen Labor. Dies führt zu einer bedeutenden Differenz der gemessenen Gesamtluftporengehalte am Festbeton von über 1,0 Vol.-%. Hierbei ist zu beachten, dass sich der Gesamtluftporengehalt, ermittelt aus den Ergebnissen des externen Labors, dem gemessenen Gesamtluftporengehalt, ermittelt mit dem HYDRO\_5-Porosimeter am Frischbeton, annähert. Eine zusammenfassende Beurteilung der Erkenntnisse aus den vorliegenden Untersuchungen zu Luftporenkennwerten erfolgt im folgenden Abschnitt.

### **8.5.5 Zusammenfassung – Erkenntnisse zu Luftporenkennwerten am Festbeton**

Während der Erfassung der Frischbetonkennwerte bei der Vergleichsuntersuchung wurden zusätzlich Probenkörper zur Erfassung der Luftporenkennwerte im Festbeton hergestellt, gelagert und nachbearbeitet. Ab einem Probenalter von 28 Tagen wurden die Festbetonproben mikroskopisch analysiert, sowohl am IfM als auch ausgewählte Betone mit mittlerem Luftporengehalt an einer unabhängigen externen Laboreinrichtung. Die Ergebnisse wurden anschließend mit den zugehörigen Ergebnissen aus den Frischbeton-Untersuchungen mit verschiedener Prüftechnik ausgewertet und verglichen. Zuerst erfolgte die Analyse der ermittelten Gesamtluftporengehalte der untersuchten Festbetonproben an denselben unabhängigen Laboren im Vergleich zu den zugehörigen rechnerisch ermittelten Soll-Werten.

Die Ergebnisse an Oberbetonen zeigten, dass die am IfM ermittelten Gesamtluftporengehalte meistens geringfügig den LP-Gehalt unterschätzten. Im Schnitt wurde eine Differenz zwischen dem rechnerischen Soll-Wert und den erfassten Messwerten am IfM von 0,36 Vol.-% (erste Vergleichsuntersuchung) bzw. 0,56 Vol.-% (zweite Vergleichsuntersuchung) beobachtet. Extern wurden geringfügig höhere Gesamtluftporengehalte erfasst.

Aus den ermittelten Ergebnissen an den Unterbetonen wurden deutlich höhere Differenzen der Gesamtluftporengehalte als bei Oberbetonen beobachtet. Die Soll-Werte wurden zwar meistens ebenfalls unterschätzt, die mittlere Abweichung der Kennzahlen, ermittelt am IfM, lag hierbei bei 0,60 bzw. 0,49 Vol.-%. Bei den externen Untersuchungen wurden Ergebnisse mit deutlich größeren Abweichungen zu dem rechnerisch ermittelten Soll-Luftporengehalt beobachtet.

Die vorliegenden Messwertabweichungen bei den beiden voneinander unabhängigen Laboren könnten auf die Methode zur Erfassung der Kennwerte zurückgeführt werden. Die Erfassung der Luftporenkennwerte erfolgt durch optisches Abfahren einer definierten Strecke an der polierten Betonschnittfläche. Wenn sich eine Luftpore im Zementstein auf dieser Strecke befindet, wird sie erfasst. Wenn im externen Labor

eine geringfügig verschobene Linienstrecke auf der Probe abgefahren wird, werden abweichende Luftporenkennzahlen (Anzahl, Größe) registriert. Einen großen Einfluss spielt hierbei die Betonrezeptur, besonders in Bezug auf den Anteil und das Größtkorn der natürlichen Gesteinskörnung der Festbetonprobe. Die untersuchten Oberbetone wurden mit 8 mm Größtkorn und höheren Zementsteinanteilen hergestellt als die Unterbetone, die mit einem deutlich größeren Größtkorn von 22 mm und geringerem Zementsteinanteil konzipiert wurden. Erfassen geringfügig verschobene Linienstrecken vorab nicht erfasste natürliche Gesteinskörnungen, so ergeben sich deutliche Unterschiede im Messergebnis. Bei den Oberbetonen mit 8 mm Größtkorn und höheren Zementsteinanteilen ist die Verteilung der Gesteinskörnung an der zu untersuchenden Schnittfläche gleichmäßiger verteilt, was eine Reduktion der Messwertabweichungen an gleichem Probekörper durch verschiedene Labore im Vergleich zu den Ergebnissen bei den Unterbetonen erklären lässt. Eine ausreichende Wiederholbarkeit des Verfahrens durch optische Mikroskopie-Analyse ist ausschließlich dann gegeben, wenn exakt dieselbe Strecke am Festbeton bei der Analyse betrachtet wird.

Die geringsten Abweichungen der Kurvenverläufe der Luftporenverteilung im Festbeton zwischen beiden Laboren wurden bei zwei Oberbetonen mit einem w/z-Wert von 0,40 bzw. 0,50 sowie bei einem Unterbeton mit einem w/z-Wert von 0,40 festgestellt. Die größten Abweichungen der betrachteten Kurvenverläufe wurden hingegen bei den Unterbetonen mit einem w/z-Wert von 0,45 und 0,50 beobachtet (siehe Bild 8-32 und Bild 8-33).

Im nächsten Schritt wurden weitere am Frisch- und Festbeton mit unterschiedlicher Prüftechnik ermittelte Luftporenkennwerte miteinander verglichen, um die Aussagekraft dieser mit alternativer Prüftechnik ermittelten Kennwerte beurteilen zu können.

Die Ermittlung des Mikro-Luftporengehalts erfolgte mithilfe der Mikroskopie-Analyse am Festbeton sowie mit dem HYDRO\_5-Pososimeter und der AVA-3000-Prüftechnik am Frischbeton. Die Untersuchungen zeigten, dass der Messwert, ermittelt mit dem HYDRO\_5-Pososimeter zu beiden Prüfzeitpunkten meistens geringer erfasst wurde als bei dem gleichartigen Festbeton durch die mikroskopische Analyse. Mit steigendem Prüfzeitalter des Frischbetons wurden stärker abgeminderte Mikro-Luftporengehalte detektiert. Gleichzeitig zeigte die Luftporenverteilung, dass das HYDRO\_5-Pososimeter vor allem im sehr feinen Bereich eine deutlich größere Anzahl an Luftporen erfasste, als dies durch die Mikroskopie-Analyse erfolgte. Die Ermittlung des Mikro-Luftporengehaltes erfolgt mit dem HYDRO\_5-Pososimeter ausschließlich am Frischbeton. Es ist zu vermuten, dass voranschreitender Hydratation sich die Luftporenmatrix durch Zukristallisieren der kleineren Luftporen mit den Hydratationsprodukten verändert. Zudem könnten sich kleinere Luftporen während der Frischbetonphase zu größeren zusammenschließen. Hierauf deuten die Differenzen der Kurvenverläufe der Luftporengrößenverteilung im Bereich der Luftporen mit einem Durchmesser von  $> 200 \mu\text{m}$  hin. Am Festbeton werden meistens mehr größere Luftporen festgestellt als im Frischbeton mittels des HYDRO\_5-Pososimeters. Aufgrund vorliegender laufender Veränderungsprozesse der Luftporenverteilung im Frischbeton ist eine klare Aussage über den ausreichenden Mikro-Luftporengehalt im Frischbeton mit Bezug auf aktuell geregelte Grenzwerte für den Festbeton nicht eindeutig gegeben.

Die Ermittlung der Kennwerte mit dem AVA-3000 erwies sich als äußerst komplex und mit hohen Abweichungen behaftet. Die Durchführbarkeit der Untersuchung ist sehr stark von der Konsistenz der Probe abhängig, aufgrund des wiederholten Durchmischens des zugeführten Frischmörtels in das Prüfungsgefäß. Bei den meistens äußerst steifen Frischbetonen wurde bei der überwiegenden Anzahl der Versuche eine ausreichende Durchmischung der Probe behindert oder mit nachgeschalteten zusätzlichen Mischprozessen erst durchführbar, was direkte Auswirkungen auf die zu messenden Luftporenkennwerte zur Folge hatte. Zudem erfasst die Prüftechnik ein begrenztes Spektrum an Luftporengrößen zwischen 100 und 2000  $\mu\text{m}$ . Somit wurden die Mikro-Luftporengehalte  $< 100 \mu\text{m}$  mit der Prüftechnik nicht detektiert.

Des Weiteren wurde der Abstandfaktor L anhand der Mikroskopie-Analyse am Festbeton sowie durch den Einsatz vom AVA-3000 am Frischbeton gemessen. Zusätzlich wurde der Abstandsfaktor durch die Bestimmung der SAM-Number am SAM\_7L abgeschätzt.

Die Mikroskopie-Analyse am Festbeton zweier unabhängiger Labore zeigte vergleichbare Luftporenkennwerte untereinander auf.

Bei einer Abschätzung des Abstandsfaktors mit der AVA-3000-Prüftechnik war aufgrund bereits beschriebener Störfaktoren mit hohen Messwertabweichungen zu rechnen. Daher wird die AVA-3000-Prüftechnik zur Ermittlung des Mikro-Luftporengehalts speziell für Straßenbetonrezepturen als ungeeignet eingestuft.

Eine Vergleichsauswertung des am Festbeton ermittelten Abstandsfaktors  $L$  und der am Frischbeton ermittelten SAM-Number zeigten, dass eine Korrelation beider Messwerte nur bei maximal 10 % der Fälle vorlag. Die SAM-Number wies deutlich stärkere Streuungen auf, wobei bei den gewonnenen Daten keine Systematik in Abhängigkeit des eingestellten  $w/z$ -Wertes, des Luftporengehalts, der Betonsorte oder dem Prüfzeitpunkt erkennbar war.

Abschließend wurden die Ergebnisse der Untersuchung der Luftporenverteilung an sechs Betonen dargestellt und diskutiert. Dabei wurden folgende Erkenntnisse gewonnen: Je nach Betonzusammensetzung und angewandter Prüfmethode wurden unterschiedliche Kurvenverläufe der Ergebnisse beobachtet. Das AVA-3000 zeigte bei den überwiegenden Untersuchungen eine stark abgeminderte Porosität der betrachteten Frischbetone. Aufgrund der steifen Konsistenz der untersuchten Betone wurden eher geringe Luftporengehalte beobachtet. Mit steigendem  $w/z$ -Wert konnten zumindest beim ersten Prüfzeitpunkt in Einzelfällen ähnliche Luftporenverteilungen wie am Festbeton beobachtet werden.

Die ermittelte Porosität des jeweiligen Frischbetons mit dem HYDRO\_5-Porosimeter wies einen höheren Anteil an sehr feinen Luftporen mit einem Durchmesser  $< 100 \mu\text{m}$  auf. Entsprechend wurden meistens geringere Mengen an groben Luftporen am Frischbeton mit der genannten alternativen Prüfmethode festgestellt, wobei die Gesamtluftporengehalte meistens auf einem ähnlichen Höhenniveau wie die am Festbeton ermittelten Summen lagen. Zudem wurde eine Annäherung des Ergebniskurvenverlaufs aus beiden Prüfzeitpunkten des HYDRO\_5-Porosimeters bei steigendem  $w/z$ -Wert beobachtet, was auf die Voranschreitung des Ansteifungsprozesses bei unterschiedlichen  $w/z$ -Werten und somit eine Veränderung der Luftporenverteilung in der Zementmatrix zurückzuführen ist. Um anhand der Porengrößenverteilung am Frischbeton auf den mindestens einzuhaltenden Mikro-Luftporengehalt vom Festbeton schließen zu können, sind weitere Überlegungen zur Einführung neuer Grenzwerte speziell für den Frischbetonzustand erforderlich. Aufgrund weiterer Analysen der Daten könnte ein Umrechnungsfaktor zur Abschätzung des Mikro-Luftporengehalts am Festbeton abgeleitet werden.

## 8.6 Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen im Probenalter von 28 Tagen

### 8.6.1 Allgemein

Die Herstellung der Begleitprobekörper erfolgte unmittelbar im Anschluss an die Erfassung der relevanten Frischbetonkennwerte zum ersten Prüfzeitpunkt während der beiden Hauptvergleichsuntersuchungen. Dies gewährleistete, dass der Zeitpunkt der Probenherstellung zwischen den beiden FB-Prüfzeitpunkten von  $t > 10 \text{ min}$  und  $t > 60 \text{ min}$  lag. Die geplanten Festigkeitsuntersuchungen wurden im Probenalter von 28 d durchgeführt. Die Ergebnisse der Spaltzug- und Druckfestigkeitsprüfungen sind nachfolgend als Diagrammgruppe und im Anhang in Tab. I - 69 bis Tab. I - 78 zusammengefasst.

In den Ergebnistabellen finden sich die Einzelwerte (EW bzw.  $f_{ct,sp}$ ), die Mittelwerte (MW bzw.  $f_{ctm,sp}$ ) und die Standardabweichung ( $s$ ) für sechs Proben nach 28 Tagen, wobei auch mögliche Ausreißer angegeben sind. Zusätzlich wurde für jede Betonrezeptur die charakteristische Spaltzugfestigkeit ( $f_{ctk,sp}$ ) berechnet. Zur Ermittlung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit gemäß TP B-StB [N8] wurden sechs Unterscheiben aus wassergelagerten Zylindern mit einem  $\varnothing = 100 \text{ mm}$  aus einer Betoncharge pro Betonrezeptur herge-

stellt und geprüft. Die daraus resultierenden Einzelwerte wurden einer statistischen Untersuchung unterzogen, wobei der Grubbs-Test zur Identifizierung möglicher Ausreißer und der Anderson-Darling-Test zur Überprüfung der Normalverteilung angewandt wurden. Die Ergebnisse der 28-tägigen Spaltzugprüfungen aller Wasch- und Unterbetone wiesen eine Normalverteilung auf. Mögliche Ausreißer wurden in der tabellarischen Darstellung im Anhang markiert, jedoch nicht aus der Wertung ausgeschlossen. Für die Berechnung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit bei den durchgehend wassergelagerten Probekörpern im Alter von 28 Tagen wurde ein Sicherheitsmaß mit einem Toleranzwert von  $k = 2,950$  verwendet, basierend auf dem 5 %-Quantil bei einer statistischen Sicherheit von  $P = 90 \%$  und einer Probekörperanzahl von  $n = 6$ .

Die Druckfestigkeit ( $f_c$ ) wurde anhand von jeweils drei Würfeln (cubes) ermittelt. Die Einzelwerte (EW bzw.  $f_{c,cube}$ ) sowie die Mittelwerte (MW bzw.  $f_{cm,cube}$ ) der ermittelten Druckfestigkeiten der Betone sind ebenfalls im Anhang nach Rezeptur-ID sortiert aufgeführt.

Die zugehörigen Festbetonrohddichten wurden jeweils als Mittelwert aller Einzelwerte für die entsprechende Mischungszusammensetzung und betrachteten Spaltzug- bzw. Druckfestigkeitsuntersuchungen zusammengefasst.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen separat nach der verwendeten Grundrezeptur für alle Frischbeton-LP-Gehalte und w/z-Werte unter Angabe der Trendlinien und dem zugehörigen Bestimmtheitsmaß grafisch dargestellt. Der vertikale Abstand der Trendlinien veranschaulicht die Auswirkungen der Anpassung des w/z-Wertes. Das Bestimmtheitsmaß gibt an, wie zuverlässig die Trendlinie die Ergebnisse der entsprechenden Festigkeitsmittelwerte wiedergibt.

Im nächsten Schritt wurden die Gleichungen der Trendlinien ausgelesen, tabellarisch ausgewertet und dargestellt. Die errechnete Steigung der Trendlinie dient als grobe Kennzahl für das Einflusspotenzial auf die Spaltzugfestigkeit durch das Anpassen des Frischbeton-Luftporengehaltes.

### 8.6.2 Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsuntersuchung

Im Folgenden werden die Gesamtergebnisse der Spaltzugfestigkeitsuntersuchung nach den verwendeten Grundrezepturen sortiert dargestellt und diskutiert. Hierzu erfolgt eine grafische Darstellung der Ergebnisse in Form von vier Diagrammen (siehe Beispiel in Bild 8-34). In der oberen linken Ecke jedes Diagramms werden die ermittelten Spaltzugfestigkeiten den zugehörigen FB-Luftporengehalten zum Prüfzeitpunkt von  $t > 10$  min gegenübergestellt. Datenpunkte, die einem definierten LP-Bereich angehören, sind eingekreist. Rot eingekreiste Datenwerte repräsentieren die N-Rezepturen, gelb angekreiste die M-Rezepturen und grün angekreiste die H-Rezepturen. Darüber hinaus geben verschiedene Datenpunktformen den entsprechenden w/z-Wert der einzelnen Rezepturen an. Die Spaltzugfestigkeiten und LP-Gehalte der Betone mit einem Wasserzementwert von 0,40 sind als quadratische Datenpunkte gekennzeichnet. Dreiecksförmige Datenpunkte repräsentieren die Werte der Betone mit einem w/z-Wert von 0,45. Kreisförmige Datenpunkte in den Diagrammen zeigen die Spaltzugfestigkeiten und die entsprechenden FB-Luftporengehalte der Straßenbetone mit einem eingestellten w/z-Wert von 0,50.

Im Diagramm oben rechts in Bild 8-34 sind die Spaltzugfestigkeiten in Abhängigkeit von der ermittelten Festbetonrohddichte dargestellt. Violett hinterlegte Datenpunkte und deren Trendlinie repräsentieren die Ergebnisse der Untersuchungen bei Betonen mit variierendem FB-Luftporengehalt und einem festgelegten w/z-Wert von 0,40. Blau markierte Datenpunkte stellen die Ergebnisse der Betonrezepturen mit einem w/z-Wert von 0,45 dar, während grüne Datenpunkte für die Betone mit einem w/z-Wert von 0,50 stehen. Es ist zu beachten, dass die Probekörper normkonform bis zum Prüfzeitpunkt unter Wasser gelagert wurden. Kurz vor dem Prüftermin wurden die Proben aus der Wasserlagerung entnommen und bis zur Oberflächentrockenheit an der Luft gelagert. Es ist anzunehmen, dass in den Probekörpern noch Restwasser

aus der Wasserlagerung vorhanden war, was sich direkt auf die Ermittlung der Festbetonrohddichte auswirken kann. Dennoch liegen die Bestimmtheitsmaße der erzeugten Trendlinien in einem moderaten Bereich zwischen 70 und 85 %.

Es ist erkennbar, dass ein Anstieg des LP-Gehaltes zu einem Rückgang der Festbetonrohddichte und der Spaltzugfestigkeit führt. Dieser Festigkeitsabfall ist bei Betonen unabhängig vom w/z-Wert etwa auf dem gleichen Niveau. Spaltzugfestigkeiten über 4,5 N/mm<sup>2</sup> werden in der Regel bei Festbetonrohddichten von über 2300 kg/m<sup>3</sup> erreicht. Darüber hinaus zeigen Betone mit einem w/z-Wert unter 0,50 in der Regel um etwa 1 N/mm<sup>2</sup> höhere Spaltzugfestigkeiten.

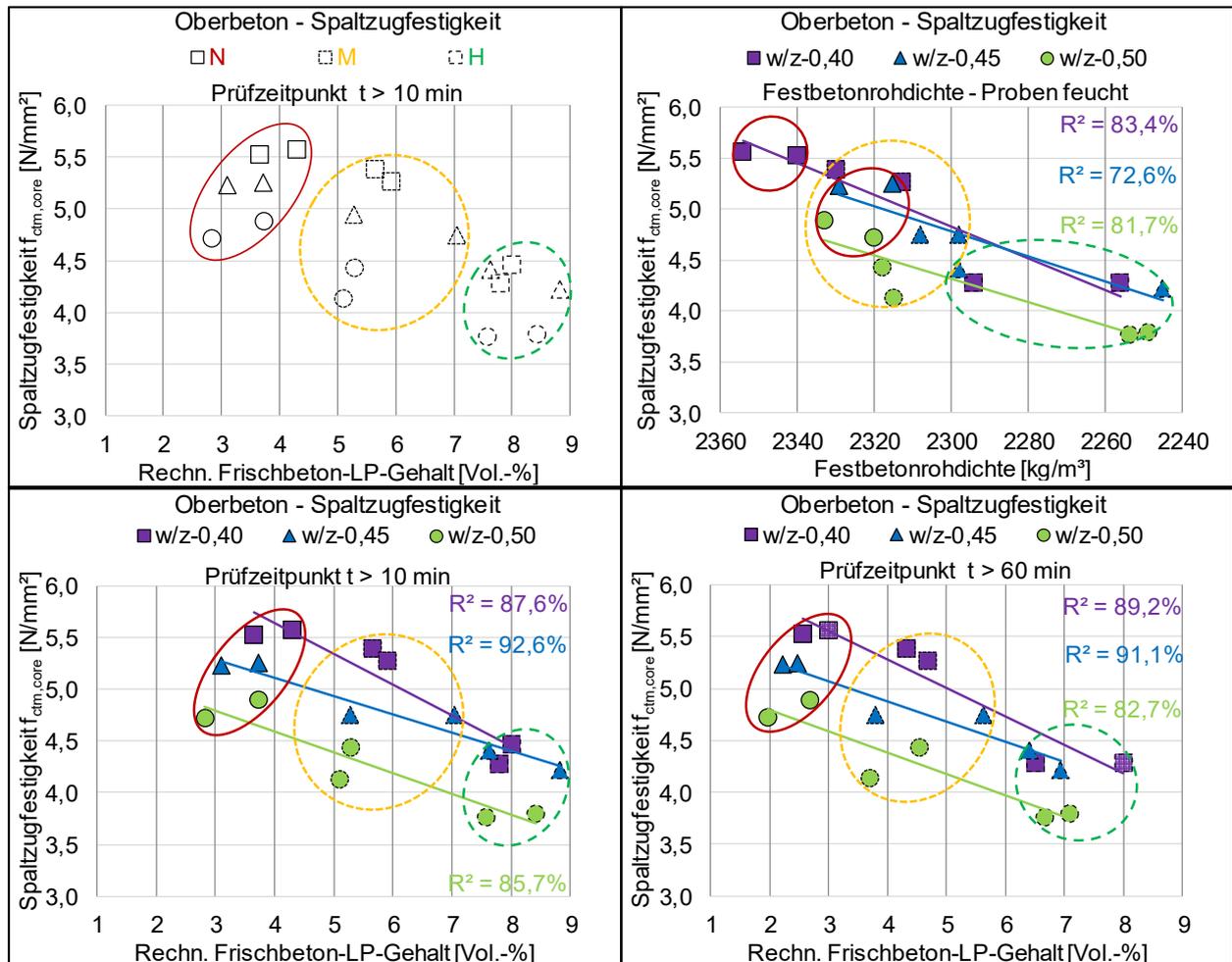


Bild 8-34: Ermittelte Spaltzugfestigkeitsergebnisse der untersuchten Oberbetone (D = 8 mm)

Im Diagramm unten in Bild 8-34 sind die Spaltzugfestigkeiten in Abhängigkeit von den aus den Ist-FB-Rohdichten errechneten Soll-FB-LP-Gehalten dargestellt. Die Auswertung der Trendgeraden ist in Form von zwei Tabellen, Tab. 8-14 und Tab. 8-15 im Folgenden dargestellt.

Im unteren linken Teil von Bild 8-34 ist ein Liniendiagramm abgebildet, das die Entwicklung der Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit von zwei Variablen zeigt: dem Frischbeton-Luftporengehalt und dem w/z-Wert zum ersten Zeitpunkt der Frischbetonprüfung (t > 10 min). Deutlich erkennbar ist, dass die Spaltzugfestigkeit der verschiedenen Straßenbetone in Abhängigkeit von ihren Luftporengehalten und dem w/z-Wert variiert. Im gesamten Spektrum der Luftporengehalten weisen die Oberbetone (D > 8 mm) mit einem w/z-Wert von 0,40 die höchsten Spaltzugfestigkeitswerte auf, gefolgt von den Betonen mit höheren w/z-Werten. Die Trendlinie für die Oberbetone mit dem höchsten w/z-Wert von 0,50 liegt deutlich niedriger. Die Bestimmtheitsmaße, die die Genauigkeit der Trendlinien darstellen, liegen bei etwa 90 %.

Die mathematische Auswertung der Geradengleichungen für die Festigkeitssteigungen wurde durchgeführt, indem die LP-Gehalte in definierten 2 Vol.-%-Schritten im Bereich von 3 bis 9 Vol.-% berücksichtigt wurden. In der Tab. 8-14 sind die Ergebnisse der zugehörigen Geradengleichungen der einzelnen Trendlinien aufgeführt. In weiteren Zeilen der Tabelle sind mehrere Beispiele für die Auswertung der Geradengleichungen angegeben. In der letzten Zeile der Tab. 8-14 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 2 Vol. % vorliegt. Bei Oberbeton mit einem w/z-Wert von 0,40 würden demnach beim Anstieg des Frischbeton-Luftporengehaltes von 2 Vol. % um bis zu 0,6 N/mm<sup>2</sup> geringere Spaltzugfestigkeiten erwartet. Bei Oberbetonen mit höherem w/z-Werten liegt die Einflussgröße bei ca. 0,4 N/mm<sup>2</sup>. Es ist somit zu erkennen, dass die Steigerung des w/z-Wertes von 0,40 auf höhere w/z-Werte den Einfluss des Luftporengehaltes auf die Spaltzugfestigkeit deutlich reduziert. Werden Betone mit geringem FB-Luftporengehalt hergestellt, so bewirkt die Reduktion des w/z-Wertes einen Anstieg der Spaltzugfestigkeit von bis zu 0,65 N/mm<sup>2</sup>. Betone mit hohem Luftporengehalt über 7 Vol.-% und einem w/z-Wert von 0,40 bis 0,45 weisen hingegen ähnliche Spaltzugfestigkeiten von ca. 4,6 N/mm<sup>2</sup> auf.

Tab. 8-14: Spaltzugfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Oberbetone - Prüfzeitpunkt: t > 10 min

OB-10 min; w/z-Wert		0,40	0,45	0,50
1		2	3	4
Geradengleichung		$y = -0,298x + 6,834$	$y = -0,177x + 5,819$	$y = -0,201x + 5,396$
Auswertung der Trendgeradengleichung	x [Vol.-%]	y [N/mm <sup>2</sup> ]		
	3	5,94	5,29	4,79
	5	5,34	4,93	4,39
	7	4,75	4,58	3,99
	9	4,15	4,23	3,59
Steigung		0,60 [N/mm <sup>2</sup> ]	0,35 [N/mm <sup>2</sup> ]	0,40 [N/mm <sup>2</sup> ]

In dem Bild 8-35 unten rechts sind die Spaltzugfestigkeiten den errechneten Soll-FB-Luftporengehalten zum Prüfzeitpunkt t > 60 min. gegenübergestellt. Anhand des Trendlinienverlaufs wird ebenfalls ersichtlich, dass durch den steigenden w/z-Wert die Spaltzugfestigkeit bei verschiedensten Luftporengehalten deutlich sinkt. Die Trendlinien verlaufen mit eindeutigem Abstand zueinander. Eine Überkreuzung der Trendlinien der Oberbetone mit w/z-Wert von 0,40 und 0,45 werden rechnerisch erst beim LP-Gehalt von ca. 9 Vol.-% festgestellt. Die Bestimmtheitsmaße der erzeugten Trendlinien bleibt auf dem ähnlichen Höhenniveau.

Tab. 8-15: Spaltzugfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Oberbetone - Prüfzeitpunkt: t > 60 min

OB-60 min; w/z-Wert		0,40	0,45	0,50
1		2	3	4
Geradengleichung		$y = -0,275x + 6,384$	$y = -0,196x + 5,666$	$y = -0,205x + 5,201$
Auswertung der Trendgeradengleichung	x [Vol.-%]	y [N/mm <sup>2</sup> ]		
	3	5,56	5,08	4,59
	5	5,01	4,69	4,18
	7	4,46	4,29	3,77
	9	3,91	3,90	3,36
Steigung		0,55 [N/mm <sup>2</sup> ]	0,39 [N/mm <sup>2</sup> ]	0,41 [N/mm <sup>2</sup> ]

Die jeweilige Steigung der Trendlinien in Tab. 8-15 entspricht etwa dem aus der Tab. 8-14. Bei der Auswertung der Trendgeradengleichungen ist zu erwähnen, dass bei der Gegenüberstellung der ermittelten

Spaltzugfestigkeiten zu den LP-Gehalten aus dem zweiten Prüfzeitpunkt bei gleichem rechnerischen Luftporengehalt sich um ca. 5 % geringere Spaltzugfestigkeiten ergeben.

Die Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsuntersuchungen für die untersuchten Unterbetone sind in Bild 8-34 in der gleichen grafischen Darstellungsweise zusammengefasst. Im oberen linken Teil sind die Datenpunkte farblich nach ihren Luftporengehalten gekennzeichnet. Es ist zu beobachten, dass die Spaltzugfestigkeiten der Unterbetone in Abhängigkeit von den gewählten w/z-Werten und dem Luftporengehalt zwischen 5,1 und 3,3 N/mm<sup>2</sup> variieren. Im Vergleich dazu lag die Spanne der Spaltzugfestigkeiten der Oberbetone zwischen 5,6 und 3,7 N/mm<sup>2</sup>, was in der gleichen Größenordnung liegt. Ein auffälliges Ergebnis ist die hohe Spaltzugfestigkeit von 4,4 N/mm<sup>2</sup> (schwarz markierter Datenpunkt im oberen linken Teil von Bild 8-35) trotz eines hohen Luftporengehaltes von über 7 Vol.-%. Dieser Datenpunkt wurde als Ausreißer bei der Analyse der ermittelten Spaltzugfestigkeiten im Verhältnis zu den Soll-Luftporengehaltswerten identifiziert und nicht weiter berücksichtigt.

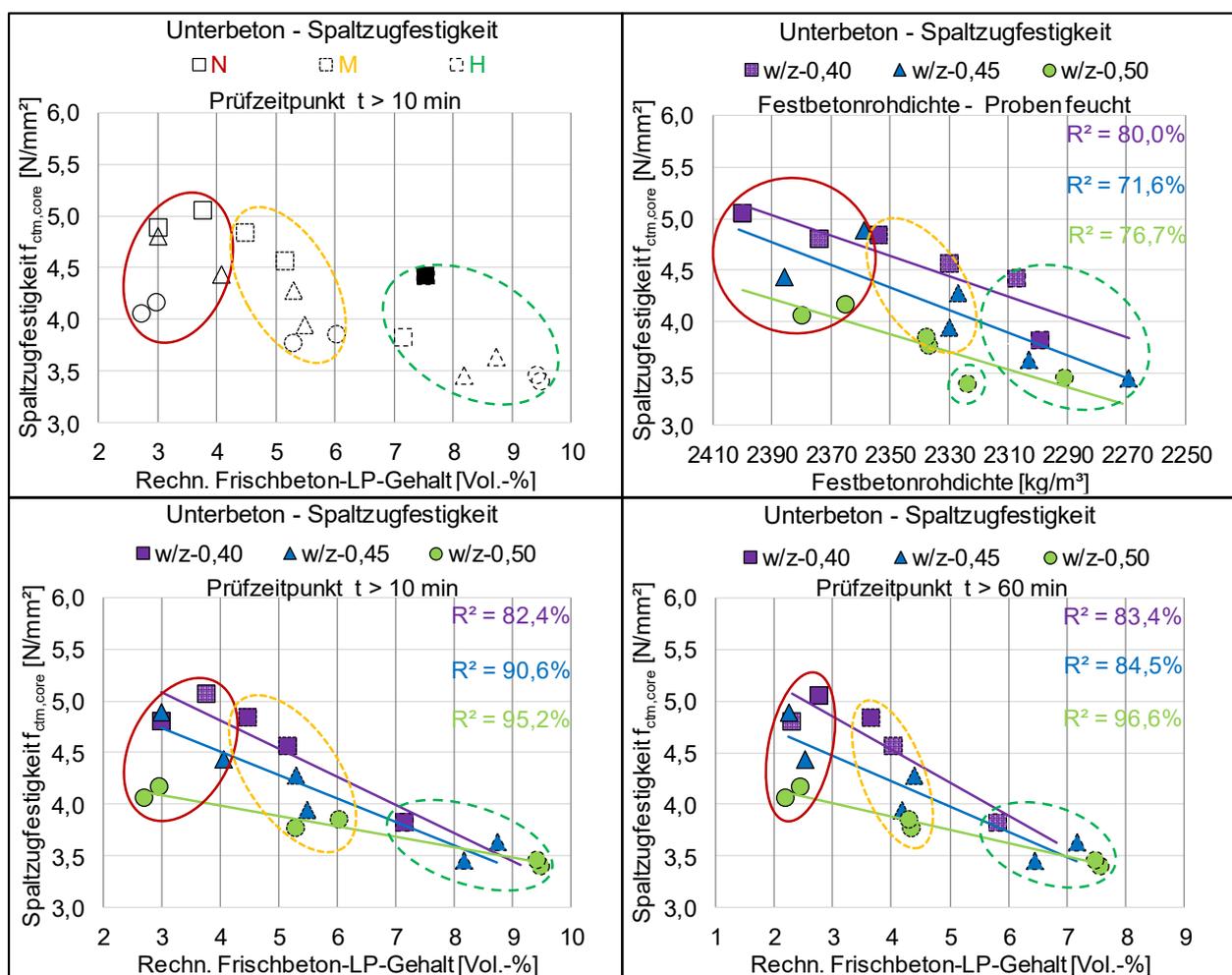


Bild 8-35: Ermittelte Spaltzugfestigkeitsergebnisse der untersuchten Unterbetone (D = 22 mm)

Das Diagramm rechts oben in Bild 8-35 zeigt Trendlinien, die sich mit annähernd konstantem Abstand in Abhängigkeit von dem gewählten w/z-Wert erstrecken. Die Bestimmtheitsmaße liegen auf einem ähnlich hohen Niveau wie bei den Oberbetonen. Hierbei ist zu erkennen, dass bei Betonen mit ähnlichen Rohdichten die Variation des w/z-Wertes um 0,05 zu einer maximalen Veränderung der Spaltzugfestigkeit von bis zu 0,5 N/mm<sup>2</sup> führen kann.

Das Liniendiagramm unten links in Bild 8-35 zeigt die Entwicklung der Spaltzugfestigkeit der Unterbetone in Abhängigkeit von den betrachteten Variationsparametern zum Zeitpunkt  $t > 10$  min. Es wird deutlich, dass der w/z-Wert einen bedeutenden Einfluss auf die Spaltzugfestigkeit hat, insbesondere bis zu einem Luftporengehalt von etwa 5 Vol.-%. Bei höheren Luftporengehalten nähern sich die Trendlinien an und schneiden sich schließlich bei einem Luftporengehalt von etwa 8 Vol.-%.

Die höchsten Spaltzugfestigkeiten von bis zu  $5,1 \text{ N/mm}^2$  wurden hauptsächlich bei Unterbetonen mit dem niedrigsten w/z-Wert beobachtet. Die Bestimmtheitsmaße der Trendgeraden liegen bei Unterbetonen mit einem w/z-Wert von 0,45 (blau) und 0,50 (grün) über 90 %. Bei den Betonrezepturen mit einem w/z-Wert von 0,40 (lila) ist die Streuung etwas höher, was sich in einem Bestimmtheitsmaß von ca. 80 % für die Trendgeraden widerspiegelt.

Die in Tab. 8-16 angegebene Steigung jeder Trendlinie entspricht einer Veränderung der durchschnittlichen Spaltzugfestigkeit bei einer Anpassung des Luftporengehaltes um 2 Vol.-%. Beispielsweise würde bei Unterbetonen mit einem w/z-Wert von 0,40 eine Erhöhung des Luftporengehaltes um 2 Vol.-% voraussichtlich zu einer Abnahme der Spaltzugfestigkeit um bis zu  $0,6 \text{ N/mm}^2$  führen. Bei einer ähnlichen Anpassung des Luftporengehaltes bei einem w/z-Wert von 0,45 wäre die Spaltzugfestigkeitsveränderung um etwa 25 % geringer ( $0,45 \text{ N/mm}^2$  je 2 Vol.-% LP-Anpassung) im Vergleich zu 0,40. Die Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 senkt die Spaltzugfestigkeit zwar erheblich, verringert jedoch auch den Einfluss des Luftporengehaltes auf die Spaltzugfestigkeit deutlich. Die Steigung bei einer 2 Vol.-%-igen Abnahme des LP-Gehaltes beträgt bei weichem Oberbeton  $0,20 \text{ N/mm}^2$ .

Tab. 8-16: Spaltzugfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Unterbetone - Prüfzeitpunkt:  $t > 10$  min

UB-10 min; w/z-Wert		0,40	0,45	0,50
1		2	3	4
Geradengleichung		$y = -0,272x + 5,901$	$y = 0,225x + 5,408$	$y = 0,100x + 4,391$
Auswertung der Trendgeradengleichung	x [Vol.-%]	y [ $\text{N/mm}^2$ ]		
	3	5,09	4,73	4,09
	5	4,54	4,28	3,89
	7	4,00	3,83	3,69
	9	3,45	3,38	3,49
Steigung		$0,60 \text{ [N/mm}^2]$	$0,45 \text{ [N/mm}^2]$	$0,20 \text{ [N/mm}^2]$

Rechts unten im Bild 8-35 ist ein Liniendiagramm mit den Spaltzugfestigkeiten und den zugehörigen errechneten Soll-FB-Luftporengehalten zum Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min angegeben. Der Verlauf, die Bestimmtheitsmaße und die Steigung der Trendlinien entsprechen den Daten aus dem Diagramm unten links im Bild 8-35. Beim Betrachten der Tab. 8-17 ist ein geringfügiger Rückgang der Spaltzugfestigkeiten bei der Auswertung der Trendgeraden im Vergleich zu den Daten aus Tab. 8-16 zu erkennen.

Tab. 8-17: Spaltzugfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Unterbetone - Prüfzeitpunkt:  $t > 60$  min

UB-60 min; w/z-Wert		0,40	0,45	0,50
1		2	3	4
Geradengleichung		$y = -0,319x + 5,801$	$y = -0,245x + 5,208$	$y = -0,128x + 4,395$
Auswertung der Trendgeradengleichung	x [Vol.-%]	y [ $\text{N/mm}^2$ ]		
	3	4,84	4,47	4,01
	5	4,21	3,98	3,76
	7	3,57	3,49	3,50
	9	2,93	3,00	3,24
Steigung		$0,64 \text{ [N/mm}^2]$	$0,49 \text{ [N/mm}^2]$	$0,26 \text{ [N/mm}^2]$

### 8.6.3 Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchung

Die Druckfestigkeit einer Betonrezeptur wurde jeweils anhand von drei Würfeln der Kantenlänge 150 mm, hergestellt zwischen den beiden Prüfzeitpunkten der FB-Kennwerte, die nach dem Ausschalen 6 Tage unter Wasser und 21 Tage an der Luft unter Laborbedingungen bis zum Prüfzeitpunkt gelagert wurden, im Probenalter von 28 Tagen ermittelt. Die Darstellungsweise der vorliegenden Ergebnisse ist identisch mit der Darstellung der Spaltzugfestigkeitsergebnisse aus dem Kapitel 8.6.2.

Oben links im Bild 8-36 sind die Druckfestigkeiten der Oberbetone in Abhängigkeit vom gemessenen Luftporengehalt dargestellt und entsprechend den farblichen Kreisen einer LP-Gehaltskategorie (N, M bzw. H) zugeordnet. Anhand der Darstellung ist zu erkennen, dass die Druckfestigkeiten bei niedrigem oder mittlerem LP-Gehalt hohe Streuungen aufweisen, abhängig von der Wahl des w/z-Wertes. Die Druckfestigkeiten der Probekörper mit niedrigem LP-Gehalt liegen zwischen 63 und 47 N/mm<sup>2</sup>, während die Probekörper mit mittlerem LP-Gehalt auf einem etwas niedrigeren Festigkeitsniveau liegen, jedoch eine ähnliche Streuung aufweisen. Bei einem LP-Gehalt der Probekörper von ca. 7 Vol.-% oder höher ist der Einfluss der Variation des w/z-Wertes auf die Druckfestigkeit der Probekörper unter 5 N/mm<sup>2</sup> zu verzeichnen. Die geringsten 28-Tage-Druckfestigkeiten von ca. 36 N/mm<sup>2</sup> sind erwartungsgemäß bei den Oberbetonen mit höchstem w/z-Wert und Luftporengehalt festzustellen.

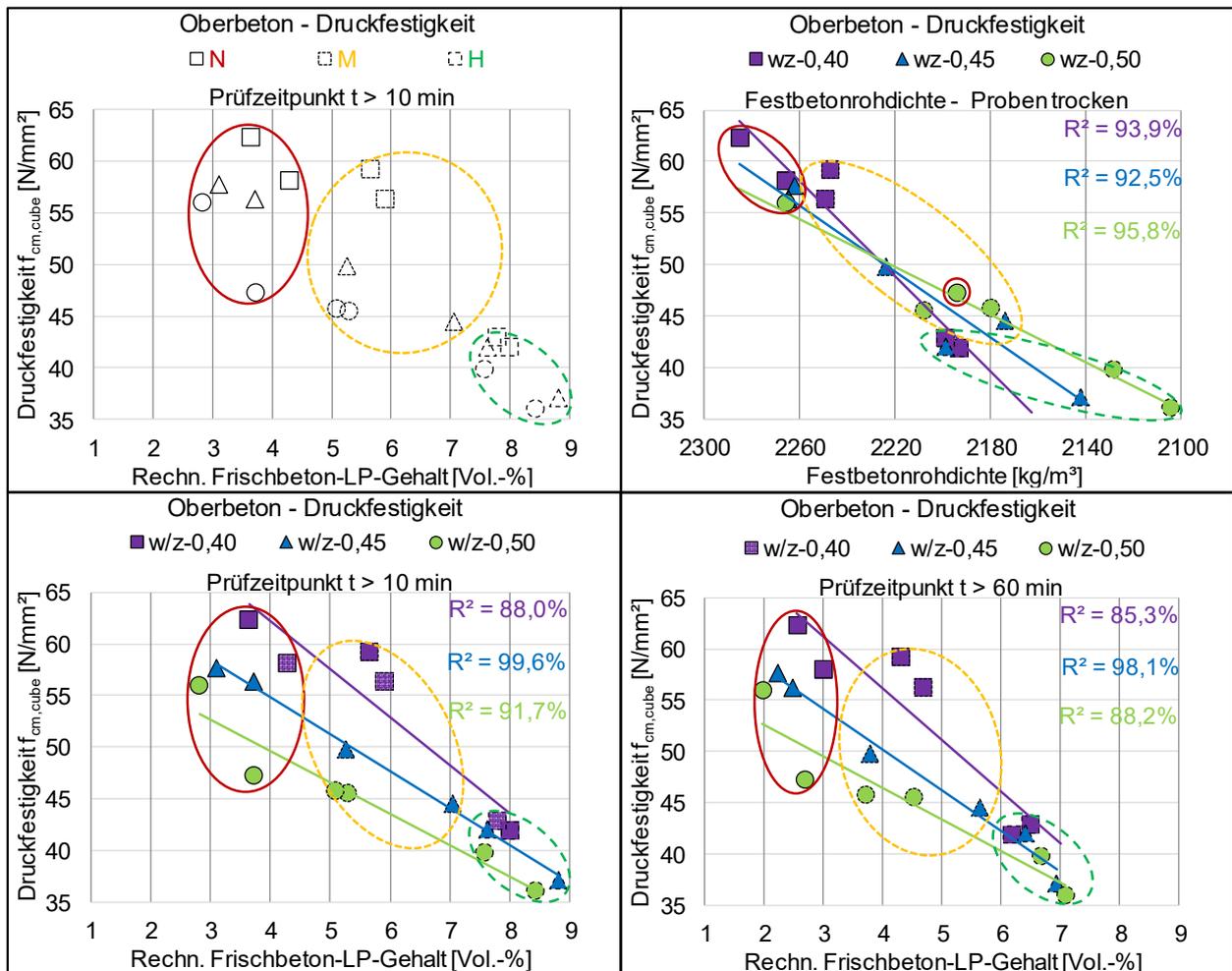


Bild 8-36: Ermittelte Druckfestigkeitsergebnisse der untersuchten Oberbetone (D = 8 mm)

Im Diagramm oben rechts in Bild 8-36 werden die Resultate der Druckfestigkeitsuntersuchungen in Relation zur ermittelten Rohdichte der 28-d-Festbetonprobewürfel veranschaulicht. Die Bestimmtheitsmaße der vorliegenden Trendkurven für die analysierten Daten übertreffen die 90 %-Marke. Bei dieser Darstellung der betrachteten Festbetonkennwerte fällt die Beeinflussung der Druckfestigkeit durch den w/z-Wert weniger deutlich auf. Die Kurven schneiden sich an einem Punkt bei einer Festbetonrohddichte von etwa 2220 kg/m<sup>3</sup>. Vor diesem Schnittpunkt verlaufen die Kurven erwartungsgemäß im Hinblick auf die vertikale Achse des Diagrammes. Die höchsten Festigkeiten werden bei einem w/z-Wert von 0,40 verzeichnet, gefolgt von den Werten der Oberbetone mit einem w/z-Wert von 0,45 und 0,50. Die Unterschiede in den Festigkeiten erweisen sich in vorliegendem Bereich jedoch von untergeordneter Rolle.

Nach dem Schnittpunkt der Kurven spiegelt sich die Position der Trendlinien und ihre Reihenfolge zueinander. Somit ist erkennbar, dass ab einer Festbetonrohddichte von 2220 kg/m<sup>3</sup> der Anstieg des LP-Gehaltes und damit der Rückgang der Rohdichte weniger ausgeprägt ist als bei den Proben mit einem w/z-Wert unter 0,50. Daher ist der Rückgang der Druckfestigkeit bei den Oberbetonen mit niedrigem w/z-Wert in Abhängigkeit von der eingestellten Festbetonrohddichte deutlich stärker ausgeprägt als bei Oberbetonen mit höherem w/z-Wert.

Die Analyse der Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von den gemessenen Durchschnittswerten der Soll-LP-Gehalte zu den beiden Prüfzeitpunkten, t > 10 min (links) und t > 60 min (rechts), ist in der unteren Reihe der Diagrammgruppe dargestellt. Die entsprechenden Trendlinien wurden ebenfalls ermittelt und in tabellarischer Form nachfolgend präsentiert.

Das Diagramm zur Entwicklung der Druckfestigkeit zum Zeitpunkt t > 10 min ist in Bild 8-36 links unten eingeordnet. Hierbei zeigt sich eine deutliche Variation der Festigkeitskennwerte in Abhängigkeit von den jeweiligen Parametern. Die höchsten Druckfestigkeiten im gesamten betrachteten Bereich der LP-Gehalte, die zwischen ca. 42 und 63 N/mm<sup>2</sup> liegen, werden bei den Oberbetonen (D ≥ 8 mm) mit einem w/z-Wert von 0,40 festgestellt. Die Druckfestigkeiten im Bereich von 37 bis 57 N/mm<sup>2</sup> werden bei den Oberbetonen mit einem w/z-Wert von 0,45 beobachtet. Die Trendlinie der Oberbetone mit dem höchsten w/z-Wert von 0,50 liegt deutlich unter den beiden Trendlinien der Oberbetone mit niedrigeren w/z-Werten. Die Bestimmtheitsmaße bewegen sich in einer Größenordnung von ca. 88 bis 99 %.

Tab. 8-18: Druckfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Oberbetone - Prüfzeitpunkt: t > 10 min

OB-10 min; w/z-Wert		0,40	0,45	0,50
1		2	3	4
Geradengleichung		$y = -4,646x + 80,784$	$y = -3,586x + 69,169$	$y = -3,025x + 61,688$
Auswertung der Trendgeradengleichung	x [Vol.-%]	y [N/mm <sup>2</sup> ]		
	3	66,85	58,41	52,61
	5	57,55	51,24	46,56
	7	48,26	44,07	40,51
	9	38,97	36,90	34,46
Steigung		9,29 [N/mm <sup>2</sup> ]	7,17 [N/mm <sup>2</sup> ]	6,05 [N/mm <sup>2</sup> ]

Gleichungen der Trendgeraden aus dem Bild 8-36 unten links sind in der Tab. 8-18 aufgeführt. Anhand der Auswertungsdaten zeigt sich, dass eine Reduktion des LP-Gehaltes um 2 Vol.-% bei Oberbetonen zu folgendem Anstieg der Druckfestigkeit führen würde: Bei Straßenoberbetonen mit dem niedrigsten w/z-Wert würde die Reduktion des LP-Gehaltes einen Anstieg der Druckfestigkeit um etwa 9 N/mm<sup>2</sup> bewirken. Mit steigendem w/z-Wert nimmt der Einfluss des LP-Gehaltes auf die Druckfestigkeit deutlich ab. Bei einem w/z-Wert von 0,45 beträgt der Anstieg der Druckfestigkeit durch eine Reduktion des LP-Gehaltes um 2 Vol.-% etwa 7 N/mm<sup>2</sup>, während er bei einem höheren w/z-Wert von 0,50 etwa 6 N/mm<sup>2</sup> beträgt. Aus dem

betrachteten Diagramm ist zudem erkennbar, dass mit zunehmendem Luftporengehalt die Druckfestigkeiten der untersuchten Betone einander annähern, wodurch der Einfluss der Wahl des w/z-Wertes geringer ausfällt.

Im Bild 8-36 unten rechts sind die Druckfestigkeiten im Verhältnis zu den berechneten Durchschnittswerten der Soll-FB-Luftporengehalte zum Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min dargestellt. Ähnlich wie bei der Entwicklung der Spaltzugfestigkeit bei den untersuchten Oberbetonen wird auch in diesem Diagramm deutlich, dass die Druckfestigkeit bei steigendem w/z-Wert deutlich abnimmt, unabhängig von dem betrachteten Luftporengehaltsbereich. Der Verlauf der Trendlinien ist gut voneinander abgetrennt und weist einen steileren Verlauf auf als in dem linken Diagramm. Eine Überlagerung der Trendlinien aller w/z-Werte bei den Oberbetonen wird erst bei einem LP-Gehalt von etwa 8 bis 9 Vol.-% nach der tabellarischen Auswertung festgestellt. Die Bestimmtheitsmaße der erzeugten Trendlinien sind geringfügig niedriger ausgefallen.

Tab. 8-19: Druckfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Oberbetone - Prüfzeitpunkt:  $t > 60$  min

OB-60 min; w/z-Wert	0,40	0,45	0,50	
1	2	3	4	
Geradengleichung	$y = -5,040x + 76,280$	$y = -3,979x + 66,086$	$y = -3,075x + 58,740$	
Auswertung der Trendgeradengleichung	x [Vol.-%]	y [N/mm <sup>2</sup> ]		
	3	61,16	54,15	49,52
	5	51,08	46,19	43,37
	7	41,00	38,23	37,22
	9	30,92	30,28	31,07
Steigung	10,08 [N/mm <sup>2</sup> ]	7,96 [N/mm <sup>2</sup> ]	6,15 [N/mm <sup>2</sup> ]	

Die Steigung der Trendlinien gemäß Tab. 8-19 ist etwa um 10 % höher als die Steigung der entsprechenden Trendlinien in dem linken unteren Diagramm. Beim Vergleich der Festigkeitskennwerte derselben Trendlinien zu verschiedenen Prüfzeitpunkten wird deutlich, dass auch bei den Druckfestigkeiten ein Festigkeitsrückgang zwischen 3 und 6 N/mm<sup>2</sup> bei gleichem berechneten Luftporengehalt festzustellen ist.

Bild 8-37 gibt in Form einer grafischen Zusammenfassung die Resultate der Druckfestigkeitsuntersuchungen an den Unterbetonrezepturen wieder. In dem oberen linken Diagramm sind die Datenwerte farblich nach ihren LP-Bereichen markiert. Es fällt auf, dass die Streuung der Druckfestigkeiten je nach LP-Gehalt im Vergleich zu den Oberbeton-Daten auf einem anderen Niveau liegt. Die Druckfestigkeiten der Unterbetone in den Kategorien N und M zeigen geringere Streuungen als die Druckfestigkeiten der Straßenunterbetone mit hohem LP-Gehalt. Die Unterbetone der ersten beiden LP-Bereiche weisen Druckfestigkeiten zwischen 43 und 55 N/mm<sup>2</sup> auf. Unterbetone mit hohem Luftporengehalt zeigen Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von ihrem gewählten w/z-Wert zwischen 28 und 44 N/mm<sup>2</sup>.

Das obere rechte Diagramm in Bild 8-37 zeigt teilweise überlappende Trendlinien der beobachteten Druckfestigkeiten der Unterbetone mit verschiedenen w/z-Werten in Abhängigkeit von der Festbetonrohddichte. Die Bestimmtheitsmaße deuten auf eine hohe Übereinstimmung zwischen den gemessenen Daten und den jeweiligen Trendlinien von über 90 % hin. Es ist zu erkennen, dass Unterbetone mit niedrigerem w/z-Wert erwartungsgemäß höhere Rohdichten aufweisen. Ein deutlicher Unterschied in der Druckfestigkeit in Abhängigkeit des w/z-Wertes und gemessener Festbetonrohddichte ist an dieser Stelle nicht zu verzeichnen.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsentwicklung der Unterbetone unter Einfluss der betrachteten Variationsparameter zum FB-Prüfzeitpunkt von  $t > 10$  min sind dem Bild 8-37 links unten zu entnehmen. Die Druckfestigkeit weist erwartungsgemäß Unterschiede in Abhängigkeit vom eingestellten w/z-Wert auf. Die höchsten Druckfestigkeiten zwischen 56 und 42 N/mm<sup>2</sup> werden weitgehend bei den Unterbetonen mit dem

niedrigsten w/z-Wert (lila Trendlinie) beobachtet, gefolgt von den Festigkeiten der Unterbetone mit einem w/z-Wert von 0,45 (blaue Trendlinie). Die Trendlinien für die Unterbetone mit den w/z-Werten 0,40 und 0,45 verlaufen nahezu parallel, was darauf hinweist, dass eine Steigerung des LP-Gehaltes in diesen Bereichen zu einem nahezu konstanten Rückgang der Druckfestigkeit führt. Die Unterbetone mit einem w/z-Wert von 0,50 zeigen hingegen eine geringere Steigerung der Festigkeitsentwicklung in Abhängigkeit des LP-Gehaltes. In diesem Fall sind die niedrigsten Druckfestigkeiten im gesamten Spektrum der Frischbeton-LP-Gehalte zwischen 49 und 27 N/mm<sup>2</sup> zu verzeichnen. Die Bestimmtheitsmaße der Trendlinien liegen bei über 90 %.

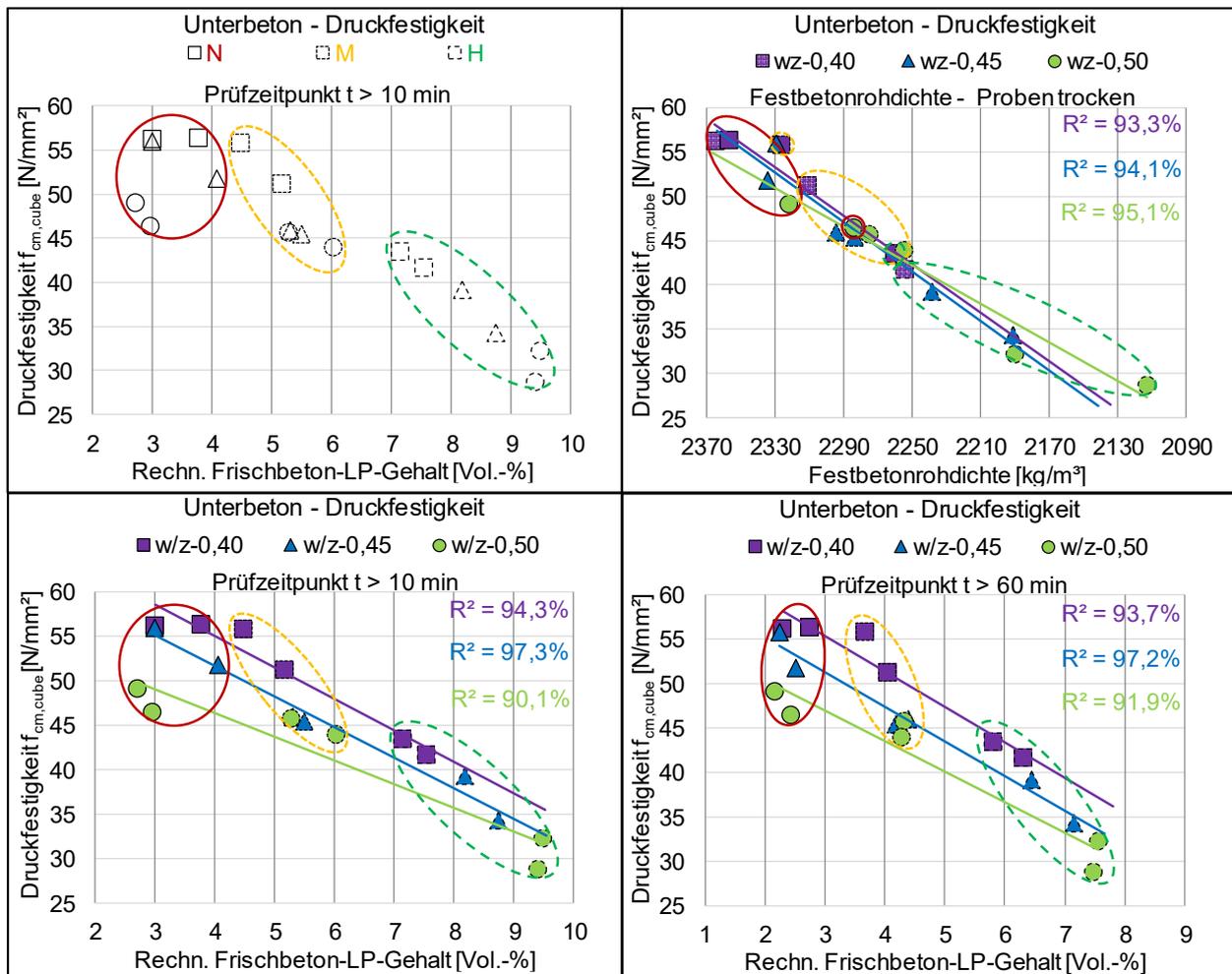


Bild 8-37: Ermittelte Druckfestigkeitsergebnisse der untersuchten Unterbetone (D = 22 mm)

Die in der Tab. 8-20 angegebene Steigung der jeweiligen Trendlinie entspricht einer Veränderung der mittleren Druckfestigkeit bei einer Anpassung des LP-Gehaltes von 2 Vol.-%. Für die Unterbetone mit w/z-Wert von 0,40 würden demnach beim Anheben des LP-Gehaltes um 2 Vol.-% um bis zu 7,1 N/mm<sup>2</sup> niedrigere Druckfestigkeiten erwartet. Eine ähnliche Druckfestigkeitsreduktion ist bei den Unterbetonen mit einem w/z-Wert von 0,45 zu beobachten. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 senkt die Druckfestigkeit deutlich. Der Einfluss des LP-Gehaltes wird mit dem Einstellen des w/z-Wertes auf 0,50 um ca. 1,7 N/mm<sup>2</sup> reduziert.

Tab. 8-20: Druckfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Unterbetone - Prüfzeitpunkt:  $t > 10$  min

UB-10 min; w/z-Wert		0,40	0,45	0,50
1		2	3	4
Geradengleichung		$y = -3,543x + 69,155$	$y = -3,457x + 65,457$	$y = -2,678x + 57,082$
Auswertung der Trendgeradengleichung	x [Vol.-%]	y [N/mm <sup>2</sup> ]		
	3	58,53	55,09	49,05
	5	51,44	48,17	43,69
	7	44,35	41,26	38,34
	9	37,27	34,34	32,98
Steigung		7,09 [N/mm <sup>2</sup> ]	6,91 [N/mm <sup>2</sup> ]	5,36 [N/mm <sup>2</sup> ]

Im Diagramm unten rechts in Bild 8-37 sind die Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von den berechneten Soll-FB-Luftporengehalten zum Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min dargestellt. Die Trendlinien verlaufen hier etwas ausgeglichener und die Bestimmtheitsmaße bleiben auf einem sehr hohen Niveau. Die Steigungen der Trendlinien sind geringfügig höher im Vergleich zu den Trendlinien im Diagramm unten links in Bild 8-37. Somit reduziert der steigende LP-Gehalt die Druckfestigkeit zum späteren Prüfzeitpunkt etwas stärker. Beim Blick auf Tab. 8-21 fällt auf, dass die errechneten Druckfestigkeiten, basierend auf der Auswertung der Geradengleichungen, um etwa 4 N/mm<sup>2</sup> niedriger ausfallen als die Druckfestigkeiten zum Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min bei gleichbleibenden rechnerischen FB-LP-Gehalten.

Tab. 8-21: Druckfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Unterbetone - Prüfzeitpunkt:  $t > 60$  min

UB-60 min; w/z-Wert		0,40	0,45	0,50
1		2	3	4
Geradengleichung		$y = -3,995x + 67,364$	$y = -3,908x + 62,983$	$y = -3,430x + 57,223$
Auswertung der Trendgeradengleichung	x [Vol.-%]	y [N/mm <sup>2</sup> ]		
	3	55,38	51,26	46,93
	5	47,39	43,44	40,07
	7	39,40	35,63	33,21
	9	31,41	27,81	26,35
Steigung		7,99 [N/mm <sup>2</sup> ]	7,82 [N/mm <sup>2</sup> ]	6,86 [N/mm <sup>2</sup> ]

#### 8.6.4 Zusammenfassung - Erkenntnisse zu Festigkeitsuntersuchungen

Die oben dargestellten Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen wurden an Ober- und Unterbetonen mit variierendem Luftporengehalt und w/z-Wert durchgeführt, um den Einfluss genannter Parameter auf die Festigkeitseigenschaften zu bewerten. Bei der Auswertung der Festigkeitsergebnisse wurden die Festigkeiten den FB-Kennwerten gegenübergestellt, die zu beiden Prüfzeitpunkten ermittelt wurden.

Die Festigkeitsuntersuchungen an den betrachteten Straßenbetonen zeigen, dass der Einfluss des w/z-Wertes in Kombination mit einer Veränderung des Luftporengehaltes im Frischbeton unterschiedlich stark wirkt. Abhängig vom eingestellten w/z-Wert werden differenzierte Einflusspotenziale für die Anpassung des Luftporengehaltes beobachtet. Generell weisen Straßenbetone mit niedrigerem w/z-Wert höhere Festigkeiten auf. Eine Variation des w/z-Wertes bei einem Straßenbeton mit niedrigem LP-Gehalt (bis 3,5 Vol.-%) kann eine Festigkeitsänderung von bis zu  $\pm 0,4$  N/mm<sup>2</sup> bei der Spaltzug- bzw. bis zu  $\pm 7$  N/mm<sup>2</sup> bei der Druckfestigkeit hervorrufen. Bei Betonen mit höherem LP-Gehalt verringert sich der Einfluss des w/z-Wertes auf die Festigkeitseigenschaften.

Die Trendgeraden weisen ein hohes Bestimmtheitsmaß auf, was auf eine gute Korrelation zwischen den Festigkeiten und den betrachteten Einflussparametern deutet. Die Auswertung der Trendgeraden zeigt zudem, dass der Einfluss des Luftporengehaltes auf die jeweilige Festigkeit ebenfalls von dem gewählten w/z-Wert abhängt. Straßenbetone mit niedrigem w/z-Wert weisen zwar höhere Festigkeitskennwerte auf als Straßenbetone mit höherem w/z-Wert, jedoch wird eine stärkere Reduktion der Festigkeit mit steigendem LP-Gehalt ebenfalls beobachtet. Die Steigung der Trendgeraden der Festigkeitsergebnisse verringert sich mit zunehmendem w/z-Wert im Frischbeton. Somit nimmt der Einfluss des LP-Gehalts auf die Festigkeit bei den Straßenbetonen mit steigendem w/z-Wert ab, wobei die ermittelten Festigkeitskennwerte im vorliegenden Fall ebenfalls erwartungsgemäß geringer ausfallen.

Beim Vergleich der Ergebnisse der beiden Prüfzeitpunkte fällt auf, dass zum zweiten Prüfzeitpunkt bei gleichen Luftporengehalten niedrigere Festigkeitskennwerte errechnet wurden. Gleichzeitig verstärkt sich der Einfluss des LP-Gehalts im Frischbeton, erkennbar durch eine zunehmende Steigung der Trendgeraden. Diese Entwicklung der Ergebnisse lässt sich durch die Auswertungsmethodik erklären. Bei der Gegenüberstellung der gleich gebliebenen Festigkeitskennwerte mit den FB-Kennwerten aus dem zweiten Prüfzeitpunkt erfolgt eine Verschiebung der Festigkeiten in den Diagrammen entlang der X-Achse zum Ursprung. Dadurch werden den Festigkeitskennwerten geringere LP-Gehalte gegenübergestellt. Folglich wird die Steigung der Trendgeraden beeinflusst, sodass sich bei der Auswertung von gleichen LP-Gehalten rechnerisch geringere Festigkeiten im Vergleich zur Auswertung mit den FB-Kennwerten aus dem ersten Prüfzeitpunkt ergeben.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sowohl der Luftporengehalt als auch der w/z-Wert signifikante Einflussfaktoren auf die Spaltzug- und Druckfestigkeit von Straßenbetonen darstellen. Betone mit einem niedrigeren w/z-Wert tendieren dazu, höhere Festigkeiten aufzuweisen, während ein Anstieg des Luftporengehaltes zu einer stärkeren Reduzierung der Festigkeiten führt. Bei Betonen mit hohen w/z-Werten werden zwar niedrigere ermittelte Festigkeitswerte erreicht, jedoch wird dieser Einfluss durch den Luftporengehalt ebenfalls reduziert. Somit ist bei einem niedrigen w/z-Wert ein starker Einfluss des LP-Gehalts auf die Festigkeit zu erwarten, während bei einem hohen w/z-Wert eine geringere Auswirkung des LP-Gehalts auf die Festigkeitskennwerte zu erwarten ist.

Daher ist es von großer Priorität, den Luftporengehalt im Frischbeton mit der aus der Praxis vorhandenen Prüftechnik möglichst genau zu erfassen und somit detailliert zu regeln. Mit einem weiter reduzierten w/z-Wert im Beton steigt der Einfluss des Luftporengehaltes auf die Festigkeit der Betonstraßen deutlich an.

## **8.7 Messgütebewertung der verwendeten konventionellen und alternativen Prüfverfahren anhand der gesamten Datenbasis der Vergleichsuntersuchungen**

### **8.7.1 Allgemeines**

In den Arbeitspaketen fünf und sechs wurden Vergleichsuntersuchungen zwischen den in Deutschland genormten und den alternativen Prüfmethode zur Erfassung des Frischbeton-Luftporengehaltes durchgeführt. Dabei wurden die genannten Prüfgeräte an verschiedenen Ober- und Unterbetonen eingesetzt, wobei die Kenndaten zu zwei verschiedenen Prüfzeitpunkten erfasst wurden. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Ergebnisse, sortiert nach den Betonsorten, ist in den Kapiteln 8.3 und 8.4 enthalten. Im vorliegenden Kapitel soll die Messgüte der einzelnen Prüftechniken unter Bezugnahme der gesamten an Ober- und Unterbetonen erzeugten Datenbasis bewertet werden.

Als Beurteilungskriterien wurden zwei Parameter herangezogen. Zum einen wurde die maximale Streuung der Prüfgeräte unter Verwendung der jeweiligen Grundrezeptur über alle eingestellten Variationsparameter (Luftporengehalt, w/z-Wert) betrachtet. Nach der Feststellung des maximalen Streubereichs wurde als

zweites Beurteilungskriterium die Verteilung der Messwertabweichungen aller Messungen an der jeweiligen Betonsorte herangezogen. Die Messwertabweichungen wurden in insgesamt vier Streubereiche kategorisiert:

- niedrige bzw. vernachlässigbare Messwertabweichung im Bereich von  $\pm 0,25$  Vol.-%
- mittlere bzw. akzeptable Messwertabweichung im Bereich von  $\pm 0,26$  bis  $\pm 0,50$  Vol.-%
- deutliche bzw. grobe Messwertabweichung im Bereich von  $\pm 0,51$  bis  $\pm 1,00$  Vol.-%
- starke Messwertabweichung im Bereich von  $> \pm 1,00$  Vol.-%

Anhand der Anzahl der Messwertabweichungen je Streubereich für jede Prüftechnik kann eine Aussage über die Messgüte getroffen werden. Eine tabellarische Auswertung der Anteile der Messwertabweichungen der jeweiligen Prüftechnik in jeweiligen Bereich sind den Tabellen Tab. I – 79 und Tab. I - 80 im Anhang zu entnehmen.

Die Ergebnisse der baugleichen Prüftechniken (z.B. LP\_A\_5L\_1 und LP\_A\_5L\_2) wurden dabei zu einem Datenpaket zusammengefasst. Die Verteilung der Messwertabweichungen in die jeweiligen Streubereiche wurde anschließend in [%] in summierten Balkendiagrammen dargestellt.

### 8.7.2 Spannweite der Streuung von ermittelten Messwertabweichungen der verwendeten Prüftechnik

Als erstes Beurteilungskriterium wurde die maximale Streuung der bei der Vergleichsuntersuchung verwendeten Prüftechniken aus dem Datensatz erarbeitet und in den folgenden Balkendiagrammen in Bild 8-38 und Bild 8-39 nach der Grundrezeptur sortiert dargestellt. Die Prüftechniken wurden entsprechend ihrer Art und ihres Volumens in vier Bereiche unterteilt, die in den Diagrammen unterschiedlich dargestellt sind. Zur besseren Identifikation weisen die Ergebnisse gleicher Prüftechnikart ein definiertes Muster der abgebildeten Balken auf. Zur Unterstützung des Diagrammes sind die Grenzwerte zusätzlich in tabellarischer Form angegeben (siehe Tab. 8-22 ).

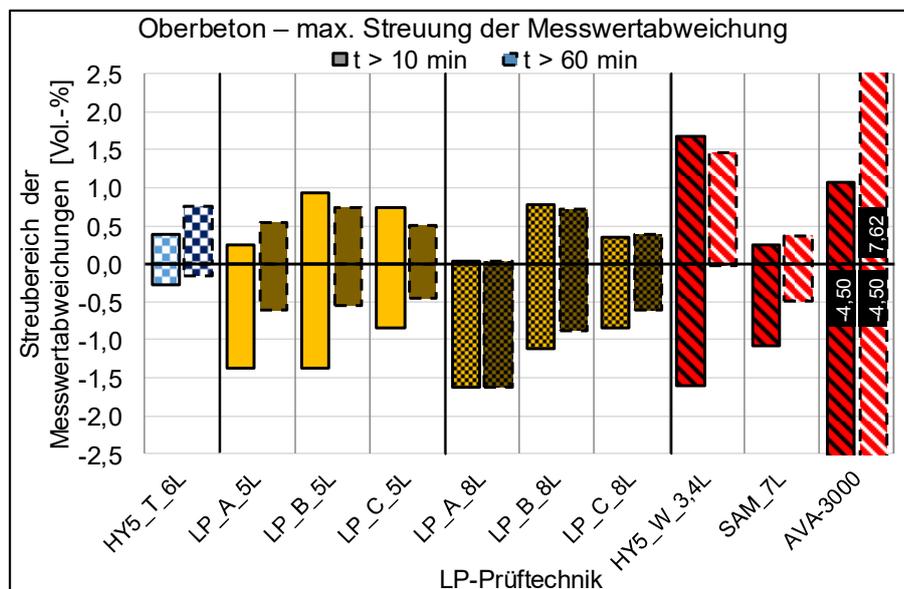


Bild 8-38: Maximale Streubereiche der Prüftechnik ermittelt an Oberbetonen

Links außen sind die maximalen Streubereiche der HYDRO\_5\_T\_6L abgebildet (blau gekachelt). Der nächste Block zeigt die Ergebnisse der drei national genormten LP-Töpfe verschiedener Hersteller mit einem Fassungsvermögen von 5 l (einfarbig gelb und braun). Im dritten Bereich sind die Streubereiche der Messwertabweichungen der größeren LP-Töpfe identischer Hersteller mit einem Fassungsvermögen von

8 I dargestellt (gelb bzw. braun und fein kariert). Abschließend, im rechten äußeren Bereich, sind die Ergebnisse der drei alternativen Prüfmethoden dargestellt (rot schraffiert). Zwei benachbarte Balken, die jeweils einer Prüftechnik zugeordnet sind, zeigen die maximalen Streubereiche des Luftporengehaltes zu den unterschiedlichen Prüfzeitpunkten am Frischbeton. Die Ränder der Ergebnisbalken, die die ermittelten Ergebnisse zum zweiten Prüfzeitpunkt von  $t > 60$  min widerspiegeln, sind schraffiert abgebildet.

Im Bild 8-38 ist zu erkennen, dass bei den national genormten Prüftechniken zum zweiten Prüfzeitpunkt sich meistens die Spannweite der Streuung reduziert und sich in den Bereich der Abweichung mit positiven Vorzeichen (Überschätzung) verschiebt. Beim weiteren Betrachten der Ergebnisse der konventionellen Prüftechnik LP\_A\_5L/8L weisen die größeren LP-Töpfe breitere Streubereiche auf, vor allem zu späteren Prüfzeitpunkten, und neigen ebenfalls dazu, den LP-Gehalt bis zu ca. 1,5 Vol.-% zu unterschätzen. Die LP\_B\_5L/8L weisen zum ersten Prüfzeitpunkt die höchsten Spannweiten der Streuung der Messwerte unter den genormten Prüftechniken auf. Bei kleineren Töpfen wird zum zweiten Prüfzeitpunkt der Streubereich deutlich reduziert. Zu den genormten LP-Töpfen mit den geringsten Streuspannweiten zählen laut vorliegender Datenübersicht die LP\_C\_5L/8L. Die Streubereiche des LP\_C\_5L/8L zum ersten Prüfzeitpunkt liegen innerhalb des Bereichs von  $\pm 1,00$  Vol.-%. Zum zweiten Prüfzeitpunkt sind reduzierte Spannweiten im Bereich von ca.  $\pm 0,50$  Vol.-% zu beobachten.

Tab. 8-22: Spannweite der Streuung der einzelnen Prüftechniken beim Einsatz an Oberbetonen

Prüfgerät / Prüfzeitpunkt	HY5_T_6L	LP_A_5L	LP_B_5L	LP_C_5L	LP_A_8L	LP_B_8L	LP_C_8L	HY5_W_3,4L	SAM_7L	AVA-3000
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Obere und untere Streubereichwerte der Messwertabweichung										
Max: $t > 10$ min	0,38	0,24	0,93	0,73	0,04	0,78	0,35	1,67	0,24	1,07
Min: $t > 10$ min	-0,27	-1,37	-1,38	-0,85	-1,62	-1,12	-0,85	-1,61	-1,07	-4,50
Max: $t > 60$ min	0,76	0,54	0,74	0,50	0,04	0,71	0,39	1,46	0,36	7,62
Min: $t > 60$ min	-0,16	-0,61	-0,56	-0,45	-1,62	-0,88	-0,62	-0,02	-0,49	-4,50

Legende:

Messwertabweichung im Streubereich:	bis $\pm 0,25$ Vol.-%	bis $\pm 0,50$ Vol.-%	bis $\pm 1,0$ Vol.-%	$> 1,0$ Vol.-%
-------------------------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	----------------

Die größten Streubereiche, unabhängig vom Prüfzeitpunkt, weist die AVA-3000 auf, gefolgt von der weiteren Alternative HYDRO\_5\_W\_3,4L. Die geringsten Spannweiten der Streuung unter den alternativen Prüfmethoden sind bei dem HYDRO\_5\_T\_6L und SAM\_7L festzustellen. Zum ersten Prüfzeitpunkt wurde beim HYDRO\_5\_T\_6L eine Streuung der Messwertabweichungen innerhalb von  $\pm 0,50$  Vol.-% verzeichnet. Zum zweiten Prüfzeitpunkt verschiebt sich der Streubereich und wird geringfügig größer. SAM\_7L zeigt eine Tendenz zur Unterschätzung zu beiden Prüfzeitpunkten, wobei eine geringere Spannweite der Streuung zum späteren Prüfzeitpunkt beobachtet wird.

Bei den Ergebnissen an Unterbetonen sind überwiegend größere Spannweiten der Streuung bei den Prüftechniken zu beiden Prüfzeitpunkten zu beobachten (siehe Bild 8-39). Das AVA-3000 neigt dazu, den realen LP-Gehaltswert stark zu unterschätzen. Der HYDRO\_5\_W\_3,4L zeigt ebenfalls große Spannweiten der Messwertabweichungen, die sich zum zweiten Prüfzeitpunkt verdoppeln. HYDRO\_5\_T\_6L sowie SAM\_7L weisen im Vergleich zu den anderen betrachteten Prüfgeräten relativ geringe Extremwerte auf. Die Streuung des HYDRO\_5\_T\_6L liegt dabei innerhalb des Bereichs von -0,27 bis 0,76 Vol.-%. Der SAM\_7L neigt zum starken Unterschätzen, welches zum späteren Prüfzeitpunkt deutlich reduziert wird.

Bei den Untersuchungsergebnissen der konventionellen LP-Prüftechnik zeigen die kleineren LP-Töpfe der Hersteller A und B die geringsten Spannweiten der Streuung mit ähnlicher Größenordnung. Der LP\_C\_5L weist zum ersten Prüfzeitpunkt sehr starke Messwertabweichungen auf, während zum zweiten Prüfzeitpunkt der kleinste Streubereich unter den 5-l-Töpfen zu verzeichnen ist.

Die LP\_A/B/C\_8L unterschätzen den LP-Gehalt mit bis zu 2,2 Vol.-% stark. Zum zweiten Prüfzeitpunkt verschieben sich die Streubereiche innerhalb der Y-Achse geringfügig nach oben, jedoch bleibt die Spannweite meistens erhalten. Unter den größeren LP-Töpfen zeigt der LP\_B\_8L die geringsten Streubereiche.

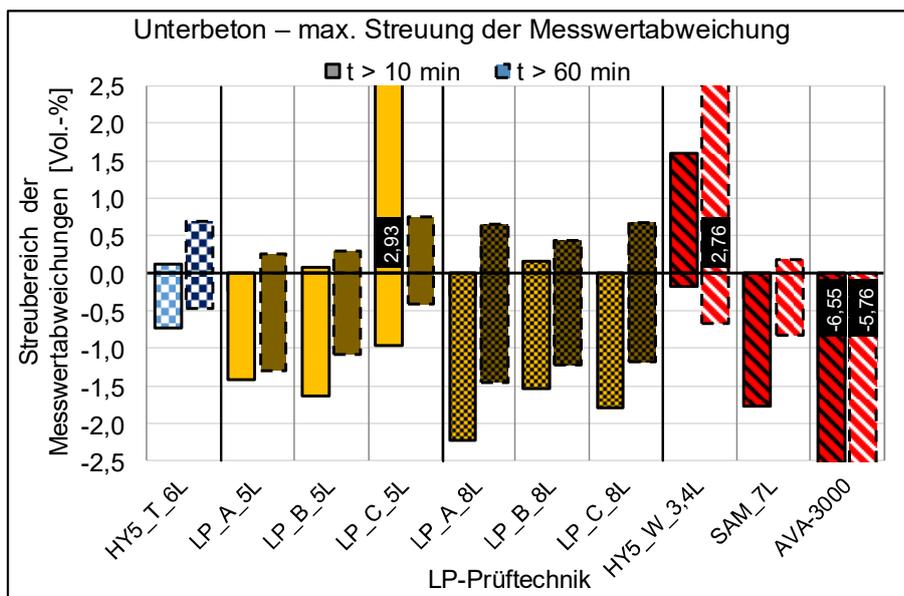


Bild 8-39: Maximale Streubereiche der Prüftechnik ermittelt an Unterbetonen

Diese Streubereiche geben einen ersten Eindruck über die Messgenauigkeit der verwendeten Prüftechniken. Es scheint, dass unter den alternativen Prüfverfahren die HYDRO\_5\_T\_6L und SAM\_7L die geringsten Streuungen aufweisen. Bei den national genormten Prüftechniken sind die LP\_C bei den Oberbetonen und LP\_B bei den Unterbetonen diejenige Prüftechnik mit der geringsten Messwertstreuung.

Tab. 8-23: Spannweite der Streuung der einzelnen Prüftechniken beim Einsatz an Unterbetonen

Prüfgerät / Prüfzeitpunkt	HY5_T_6L	LP_A_5L	LP_B_5L	LP_C_5L	LP_A_8L	LP_B_8L	LP_C_8L	HY5_W_3,4L	SAM_7L	AVA-3000
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Obere und untere Streubereichwerte der Messwertabweichung										
Max: t > 10 min	0,12	-0,23	0,09	2,93	-0,29	0,17	-0,13	1,60	-0,33	-1,41
Min: t > 10 min	-0,72	-1,42	-1,64	-0,97	-2,23	-1,53	-1,80	-0,17	-1,78	-6,55
Max: t > 60 min	0,70	0,26	0,31	0,76	0,65	0,44	0,68	2,76	0,19	-1,18
Min: t > 60 min	-0,47	-1,30	-1,09	-0,41	-1,45	-1,21	-1,18	-0,67	-0,83	-5,76
Legende:										
Messwertabweichung im Streubereich:	bis ± 0,25 Vol.-%		bis ± 0,50 Vol.-%		bis ± 1,0 Vol.-%		> 1,0 Vol.-%			

Es ist jedoch zu beachten, dass es sich bei den angegebenen Werten um die Extremgrenzwerte der beobachteten Messwertabweichungen handelt. Diese repräsentieren nicht die tatsächliche Verteilung der Abweichungen innerhalb der jeweiligen Spannweite. Die Fragestellung, ob vorliegende Extremwerte Einzelfälle oder regelmäßig auftretende Abweichungen darstellen, wird im folgenden Kapitel 8.7.3 untersucht.

### 8.7.3 Beurteilung der Messgüte der verwendeten Prüftechnik anhand der Verteilung der Messwertabweichungen innerhalb der Streubereiche

Nach der Darstellung der Spannweiten der Messwertabweichungen der verwendeten Prüftechniken wird im nächsten Schritt anhand der gewonnenen Daten die Verteilung der Messwertabweichungen innerhalb der jeweiligen Spannweite betrachtet. Hierzu wurden die Ergebnisse in Form von aufsummierten Balkendiagrammen erzeugt, welche die Verteilung einzelner Messwertabweichungen in vier Streubereiche in den folgenden Diagrammen Bild 8-40 bis Bild 8-43 darstellen. Eine tabellarische Übersicht der Anteile der Messwertabweichungen der einzelnen Prüfgeräte in dem jeweiligen Streubereich sind den Tabellen Tab. I – 79 und Tab. I - 80 im Anhang zu entnehmen. Dabei wurden die Ergebnisse zu verschiedenen Prüfzeitpunkten getrennt voneinander ausgewertet. Im unteren Bereich der Ergebnisbalken ist der Anteil der Messwertabweichungen innerhalb des ersten Grenzbereiches bis zu  $\pm 0,25$  Vol.-% grün angegeben. Gelb kariert wurde der Anteil der Messwertabweichungen des zweiten Streubereiches gekennzeichnet. Der dritte Streubereich bis  $\pm 1,0$  Vol.-% ist rot und fein kariert abgebildet. Der Anteil der Messwertabweichungen außerhalb des  $\pm 1,0$  Vol.-%-Bereichs ist rot schraffiert angegeben. Die auf der X-Achse eingetragenen Bezeichnungen der verwendeten Prüftechnik sind nach der Art und der festgestellten Messgüte sortiert. Als besonders präzise und somit in der jeweiligen Kategorie links außen abgebildet ist die Prüftechnik mit dem höchsten Anteil der Messwertabweichungen im ersten Streubereich aufgeführt. Bei einem Gleichstand an Messwertabweichungen im ersten Streubereich wurde zur Beurteilung der Anteil des zweiten Streubereiches herangezogen. Die Prüftechnik mit der geringsten Messgüte steht demnach jeweils rechts außen in dem jeweiligen Balkenblock. Insgesamt wurden untereinander vier verschiedene Kategorien der Prüftechniken betrachtet. Links sind die zwei Ergebnisbalken der HYDRO\_5-Prüftechnik aufgetragen. Weiter rechts sind die LP\_A/B/C\_5L\_1/2 einzeln aufgeführt. Im dritten Ergebnisblock sind die LP-Töpfe mit dem größeren Fassungsvermögen von 8 l angegeben. Im abschließenden Ergebnisblock sind die Ergebnisse der übrigen beiden alternativen Prüfmethode aufgeführt.

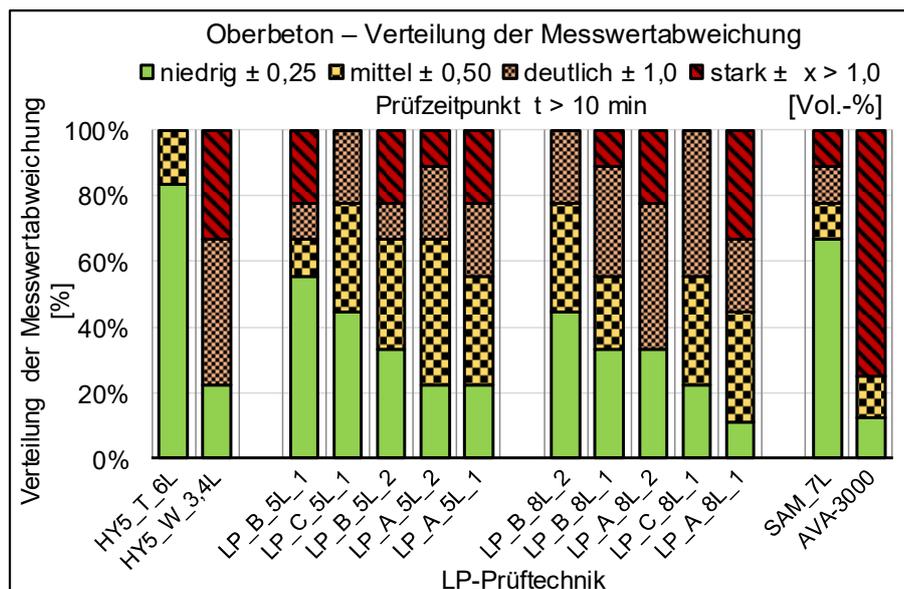


Bild 8-40: Verteilung der Messwertabweichungen ermittelt an Oberbetonen zum ersten Prüfzeitpunkt

Im Bild 8-40 sind die Verteilungen der Messwertabweichungen in insgesamt vier Streubereichen für die jeweiligen Prüftechniken an den Oberbetonen zum ersten Prüfzeitpunkt dargestellt. Bei der Betrachtung der äußeren beiden Ergebnisblöcke werden bei der einzelnen alternativen Prüfverfahren deutliche Unterschiede in der jeweiligen Anzahl der Messwertabweichungen in jeweiligen definierten Wertungsbereichen ersichtlich. Unter der HYDRO\_5-Prüftechnik zeigt der HYDRO\_5\_T\_6L eine hohe Präzision. Über 80 % der Messwertabweichungen wurden als niedrig eingestuft, während die restlichen als akzeptabel definiert wurden. HYDRO\_5\_W\_3,4L weist hingegen ca. 45 % deutliche und 35 % starke Messwertabweichungen auf. SAM\_7L zeigt zwar Messwertabweichungen in jedem der vier Streubereiche, jedoch liegen fast 80 % im niedrigen bzw. akzeptablen Bereich. AVA-3000 verzeichnet die meisten Messwertabweichungen im Bereich der starken Streuung.

Unter den kleinen LP-Töpfen wies ausschließlich der LP\_B\_5L\_1 ein Anteil von ca. 55 % an niedrigen Messwertabweichungen auf. Der LP\_C\_5L\_1 zeigt ähnlichen Anteil der Messwertabweichungen unter Einbezug des zweiten Streubereichs vor. Ca. 60 % der Messwertabweichungen der LP\_A-Töpfe liegen in den ersten beiden Streubereichen, jedoch wurden niedrige Abweichungen ausschließlich in 22 % der Messungen beobachtet.

Laut der vorliegenden Untersuchungsergebnisse weisen die konventionellen LP-Töpfe mit größerem Fassungsvermögen tendenziell höhere Messwertabweichungen auf. Geringe Messwertabweichungen wurden zwischen 11 % und 44 % aller Messungen in Abhängigkeit vom verwendeten national genormten LP-Topf mit einem Fassungsvermögen von 8 l festgestellt. Mit relativ hoher Messgüte im Vergleich zu den LP\_A/B/C\_8L\_1/2 können die Prüfgeräte des Herstellers B als präziser bezeichnet werden. Eine große Anzahl an hohen und starken Streuungen wurde bei den LP\_A\_8L\_1/2 und LP\_C\_8L\_1 beobachtet. Somit weisen laut vorliegender Datenlage die LP-Töpfe des Herstellers A eine vergleichsweise geringe Messgüte auf.

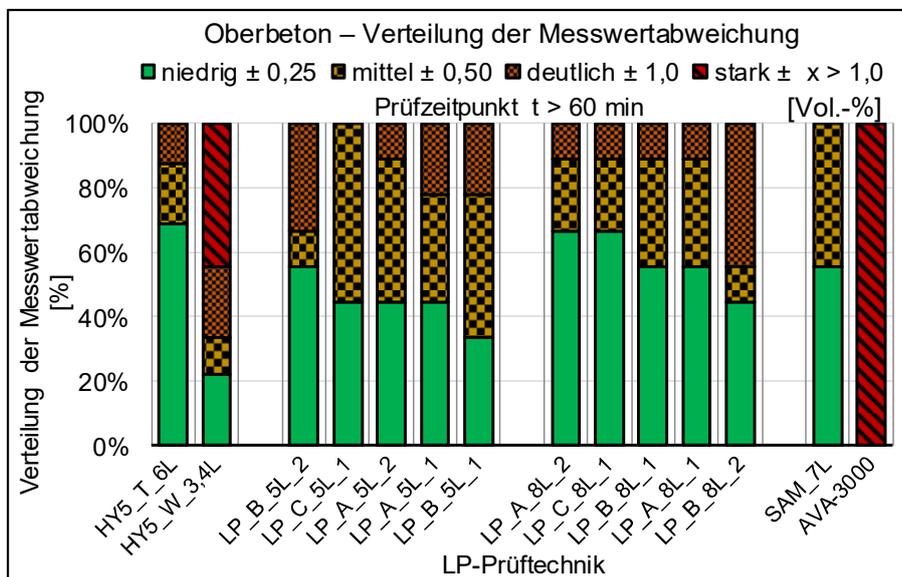


Bild 8-41: Verteilung der Messwertabweichungen ermittelt an Oberbetonen zum zweiten Prüfzeitpunkt

Zum zweiten Prüfzeitpunkt zeigt sich eine steigende Messgenauigkeit bei den konventionellen Prüftechniken (siehe Bild 8-41). Die Messwertabweichungen im niedrigen Bereich wurden deutlich häufiger beobachtet. Starke Abweichungen treten ausschließlich bei den Alternativmethoden wie AVA-3000 und HYDRO\_5\_W\_3,4L auf. Weitere alternative Prüfverfahren zeigen weiterhin eine hohe Genauigkeit. SAM\_7L weist bei 100 % der Abweichungen eine Genauigkeit innerhalb der Grenzwerte von  $\pm 0,50$  Vol.-% auf, wobei etwa die Hälfte im niedrigen Bereich liegt. Bei der Verwendung von HYDRO\_5\_T\_6L wurden in den meisten Fällen ebenfalls niedrige Messwertabweichungen beobachtet.

Zum zweiten Prüfzeitpunkt wurden jedoch ca. 13 % der Abweichungen im Bereich zwischen  $\pm 0,50$  bis  $\pm 1,00$  Vol.-% festgestellt.

Bei den kleineren LP-Töpfen ist die Reihenfolge der Messgeräte in dem Diagramm anhand der vorliegenden Datenlage angepasst. Es ist zu erkennen, dass zwei identische LP-Töpfe desselben Herstellers unterschiedliche Genauigkeiten aufweisen können. Der LP\_B\_5L\_2 weist über 55 % der Abweichungen im niedrigen Bereich auf, während der baugleiche LP\_B\_5L\_1 33 % aufweist. Werden die Messwertabweichungen aus dem zweiten Streubereich zur Bewertung hinzugezogen, so weisen die Messungen mit dem LP\_B\_5L\_1 eine Trefferquote von etwa 80 % auf, während beim Einsatz des LP\_B\_5L\_2 67 % der Messergebnisse in dem genannten Streubereich festgestellt wurden.

Deutlich präziser arbeiten zum zweiten Prüfzeitpunkt die größeren LP-Töpfe. Die Abweichung unter  $\pm 0,50$  Vol.-% wird bei vier der fünf betrachteten LP-Töpfe bei ca. 90 % aller Messungen beobachtet. LP\_B\_8L\_2 weist in vorliegendem Ergebnisblock die geringste Genauigkeit auf, während LP\_A\_8L\_2 und LP\_C\_8L\_1 mit einem Anteil von 67% der Messwertabweichungen im niedrigen Bereich die höchste Genauigkeit aufweisen. Daraus ergibt sich eine signifikante Abhängigkeit der Messgüte der einzelnen betrachteten Prüftechniken vom jeweiligen gewählten Messzeitpunkt.

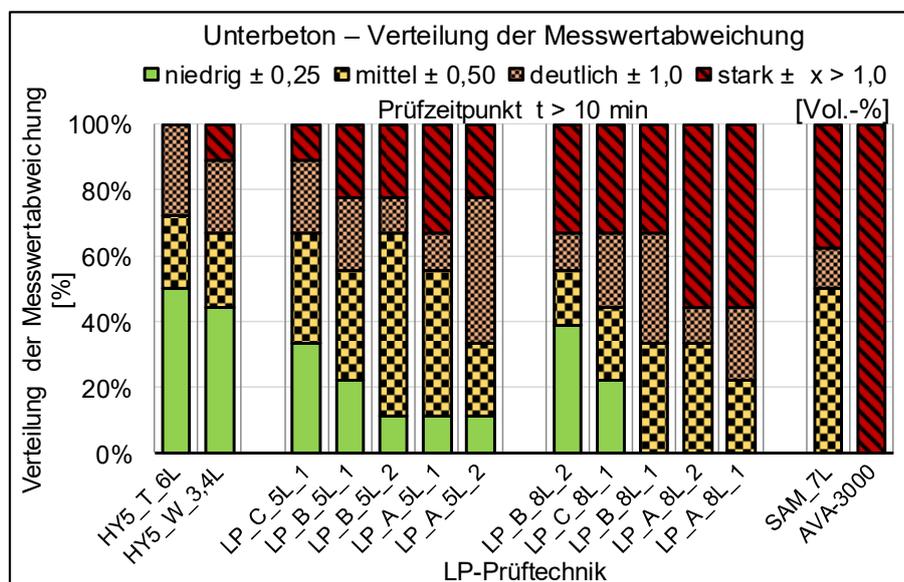


Bild 8-42: Verteilung der Messwertabweichungen ermittelt an Unterbetonen zum ersten Prüfzeitpunkt

Eine weitere Datenerfassung der Messwertabweichungen erfolgte beim Einsatz der Prüftechnik an Unterbetonen. Die Ergebnisse der Untersuchungen zum ersten Prüfzeitpunkt sind dem Bild 8-42 zu entnehmen. Anhand der Übersicht wird deutlich, dass die überwiegende Anzahl der Prüftechnik den Frischbeton-LP-Gehalt meistens mit mittleren und deutlichen Messwertabweichungen bei Einsatz an verschiedenen Unterbetonen erfasst.

Bei den alternativen Prüfverfahren wies die HYDRO\_5-Prüftechnik eine relativ hohe Präzision auf, mit einem Anteil von deutlichen und starken Messwertabweichungen bis 28 %. Messungen mit der HYDRO\_5\_T\_6L wurden zu 50 % ausschließlich mit niedrigen Messwertabweichungen und zu 72 % inklusive akzeptabler mittlerer Abweichungen beobachtet. SAM\_7L konnte die Hälfte aller Messungen mit ausschließlich akzeptablen Messwertabweichungen durchführen. AVA-3000 erwies sich als ungeeignetes Prüfverfahren zur Bestimmung des Frischbeton-Luftporengehaltes an Unterbetonen, da Abweichungen außerhalb der  $\pm 1,00$  Vol.-% Grenzen festgestellt wurden.

Die Messwertabweichungen im niedrigen Bereich wurden bei der national genormten Prüftechnik maximal bei ca. 40 % der Fälle beobachtet (LP\_B\_8L\_2). Kleinere LP-Töpfe scheinen zum ersten Prüfzeitpunkt

geringfügig genauer den LP-Gehalt zu erfassen, wobei ca. 44 % der Messwerte im Schnitt deutliche bis starke Messwertabweichungen aufweisen. LP\_B/C\_5L\_1 zählen nach den vorliegenden Ergebnissen zu den präzisesten unter den LP-Töpfen mit einem Fassungsvermögen von 5 l und mit einem Anteil an akzeptablen Messwertabweichungen (unter 0,5 Vol.-%) von 66 % aller Messungen.

Unter den größeren LP-Töpfen weisen die Prüfgeräte der Hersteller B und C höhere Messgüte unter den baugleichen LP-Töpfen auf, der Anteil der akzeptablen Messwertabweichungen ist jedoch niedriger. Sie liegt bei 58 (LP\_B\_8L\_1) bzw. 44 % (LP\_C\_8L\_1). Zu den LP-Töpfen mit den höchsten Messwertabweichungen sind nach den vorliegenden Untersuchungen die LP-Töpfe des Herstellers A einzuordnen.

Die Messergebnisse zum zweiten Prüfzeitpunkt sind in dem nachfolgenden Balkendiagramm im Bild 8-43 abgebildet. Hierbei ist erneut eine erhöhte Messgüte zum späteren Prüfzeitpunkt bei den meisten angewendeten Prüfverfahren, ähnlich wie bei der Anwendung an Oberbetonen, zu beobachten.

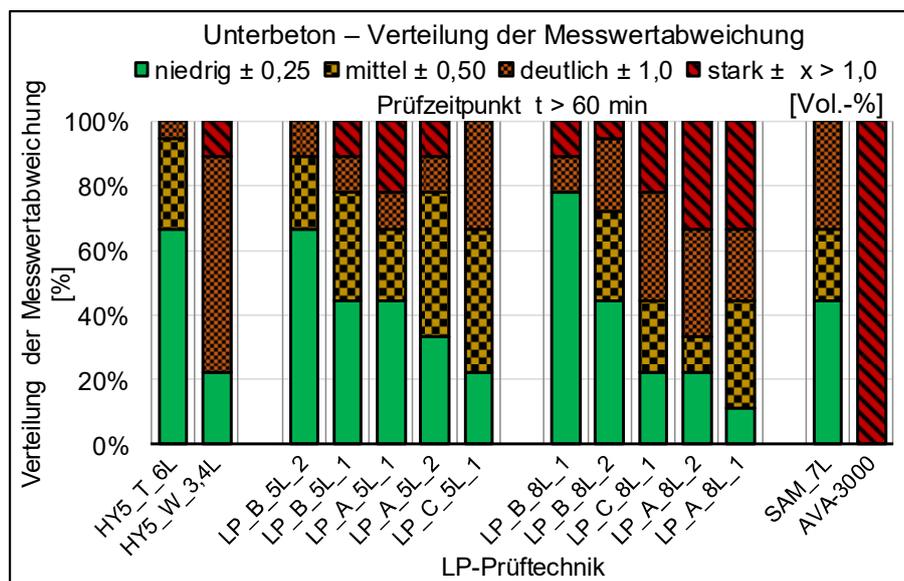


Bild 8-43: Verteilung der Messwertabweichungen ermittelt an Unterbetonen zum zweiten Prüfzeitpunkt

Der AVA-3000 weist als einziges Prüfverfahren ausschließlich starke Abweichungen der Messwerte vom Soll-Wert auf. Bei der weiteren Alternative HYDRO\_5\_W\_3,4L wurden ebenfalls deutliche bis starke Messwertabweichungen bei etwa 80 % der Messwerte festgestellt. Der SAM\_7L weist bei 66 % der Abweichungen eine Genauigkeit innerhalb der Grenzwerte von  $\pm 0,50$  Vol.-% auf. Als besonders präzise von den alternativen Prüfverfahren kann die HYDRO\_5\_T\_6L mit einem Anteil von über 90 % der Messwertabweichungen im akzeptablen Streubereich bezeichnet werden. Ca. 65 % aller Messungen der HYDRO\_5\_T\_6L weisen niedrige Messwertabweichungen auf.

Konventionelle LP-Töpfe weisen eine deutlich bessere Messgüte zum zweiten als zum ersten Prüfzeitpunkt auf. Kleinere Töpfe zeigen in mindestens 66 % der Messungen akzeptable Messwertabweichungen innerhalb der Grenzwerte von  $\pm 0,50$  Vol.-%. Höhere Messgüte unter den 5-l-LP-Töpfen kann dem LP\_B\_5L\_1/2 angerechnet werden. Im Schnitt wurden hierbei ca. 75 % der Messwerte mit einer Messwertabweichung im akzeptablen Bereich festgestellt. LP-Töpfe mit 8-l-Fassungsvermögen zeigten hingegen stärkere Streuungen der Messwertabweichungen im vorliegenden Vergleich als baugleiche mit kleinerem Fassungsvermögen. Akzeptable Messwertabweichungen bei einem durchschnittlichen Anteil von ca. 75 % wurden bei den LP\_B\_8L\_1/2 beobachtet. Die übrigen in dem Vergleich betrachteten national genormten LP-Töpfe mit größerem Fassungsvermögen konnten in über 50 % der Fälle die Ergebnisse der Frischbeton-Luftporenmessung ausschließlich mit deutlichen bzw. starken Messwertabweichungen vorweisen.

### 8.7.4 Messgütevergleich ausgewählter Prüftechnik sowie Beurteilung der Einflussfaktoren auf die Messqualität der LP-Messung aus der Vergleichsuntersuchung

Nach der Darstellung und Diskussion über die Streuung der Messwertabweichungen einzelner LP-Prüftechniken innerhalb ihrer Spannweite erfolgt eine Auswahl und Darstellung der Ergebnisse der ausgewählten Prüftechnik. Hierbei werden jeweils Prüfgeräte mit der festgestellten, relativ hohen Messgüte gemäß vorliegender Vergleichsuntersuchung in den folgenden Balkendiagrammen betrachtet. Von den alternativen Prüfverfahren werden zwei Prüfgeräte ausgewählt. Bei den national genormten Prüftechniken werden LP-Töpfe eines Herstellers zum Vergleich herangezogen. Die Ergebnisse, ermittelt an Oberbetonen zu zwei Prüfzeitpunkten, sind in zwei Balkendiagrammen im Bild 8-44 links ( $t > 10$  min) und rechts ( $t > 60$  min) unterteilt. Dabei ist zu erkennen, dass alternative Prüfgeräte eine gleichwertige bzw. höhere Messgüte bei beiden Prüfzeitpunkten aufweisen können. Zu beiden Prüfzeitpunkten weisen die alternativen Prüfverfahren bei ca. 80 % aller Messungen akzeptable Messwertabweichungen auf.

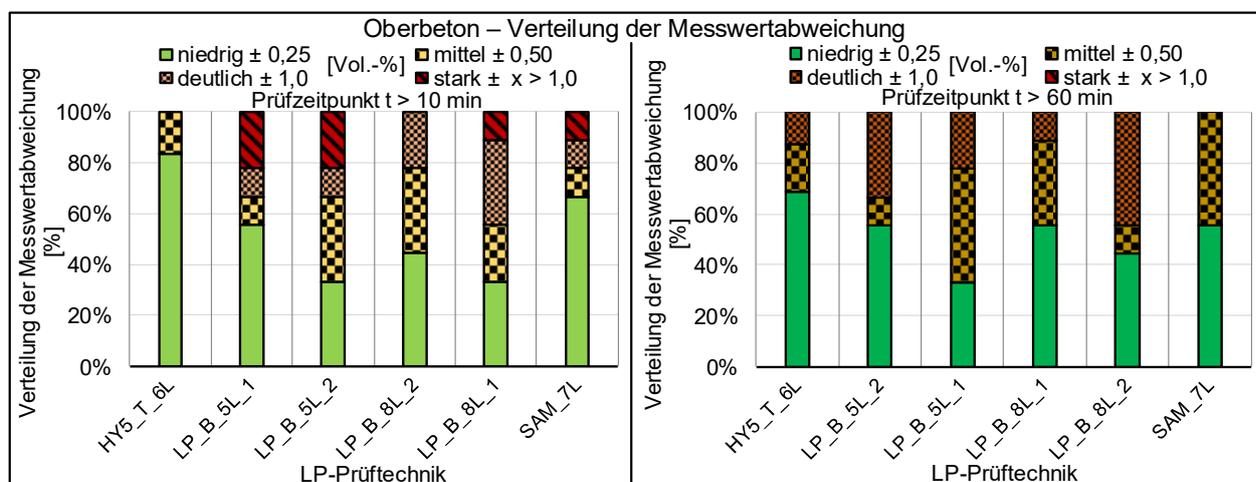


Bild 8-44: Verteilung der Messwertabweichung ausgewählter Prüftechnik ermittelt an Oberbetonen

Bei Betrachtung des Fassungsvermögens als Parameter der genormten LP-Töpfe als Einflussfaktor auf die Messgüte zeigen die Ergebnisse an Oberbetonen zum ersten Prüfzeitpunkt, dass die 8-l-LP-Töpfe geringfügig präzisere Ergebnisse liefern als die kleineren LP-Töpfe. Messungen mit dem LP\_B\_8L\_2 wiesen hierbei keine starken Abweichungen ( $> 1,0$  Vol.-%) auf, bei etwa 22 % davon sind jedoch deutliche Messwertabweichungen vom rechnerischen Soll-Wert festzustellen. Das baugleiche Modell 1 wies hingegen deutlich mehr Messwtergebnisse mit Abweichungen größer 0,50 Vol.-% auf. Die LP\_B\_5L\_1/2 wiesen laut vorliegendem Vergleich in mehr als 20 % der Fälle starke Abweichungen bei den ermittelten Messwerten auf. Zum zweiten Prüfzeitpunkt werden hierbei keine starken Abweichungen ( $> 1,0$  Vol.-%) bei der Verwendung betrachteter konventionellen Prüftechniken festgestellt. Eine deutliche Differenzierung der Messgüte anhand des Fassungsvermögens der LP-Töpfe ist zu diesem Zeitpunkt nicht zu definieren.

Werden die Ergebnisse zwei baugleicher LP-Töpfe eines Herstellers herangezogen, so sind deutliche Unterschiede in der Messgüte bei der vorliegenden Vergleichsuntersuchung festzustellen. Die LP\_B\_5L/8L\_1 weisen wesentlich höhere Anteile an Messergebnissen zum zweiten Prüfzeitpunkt mit akzeptablen Messwertabweichungen (78 und 55 %) als deren identische baugleiche Prüfgeräte LP\_B\_5L/8L\_2 (67 und 55 %) auf. Somit kann davon ausgegangen werden, dass jedes betrachtete Prüfgerät trotz gleichen Herstellers, Fassungsvermögens, Alters und Nutzungsbedingungen eine individuelle Messgüte vorweisen kann.

Um die Erkenntnisse mit weiteren Ergebnissen, ermittelt an Unterbetonen, zu bestätigen, sind die dazugehörigen Diagramme der gleichen Prüftechnik dem Bild 8-45 zu entnehmen. Im ersten Prüfzeitpunkt sind die Ergebnisse im Vergleich zu den ermittelten Messwerten an Oberbetonen mit deutlich stärkeren Messwertabweichungen zu verzeichnen. Hierbei ist ausschließlich der HYDRO\_5\_T\_6L als relativ genaue

Messmethode zur Ermittlung des Luftporengehaltes am Frischbeton zu nennen. Der SAM\_7L ist hingegen in Hinblick auf die Messgüte auf einem sehr niedrigen Niveau.

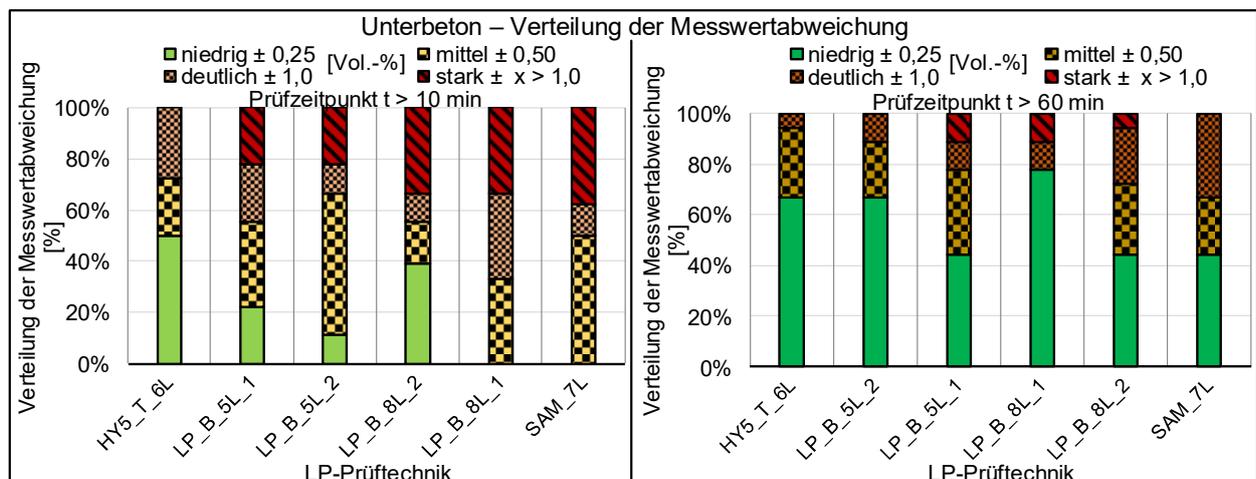


Bild 8-45: Verteilung der Messwertabweichung ausgewählter Prüftechnik ermittelt an Unterbetonen

Die konventionellen LP-Töpfe scheinen ebenfalls beim Einsatz an Unterbetonen eine geringere Messqualität der Ergebnisse vorzuweisen. Drei der vier LP-Töpfe weisen ausschließlich in ca. 55 bis 66 % der Messungen Ergebnisse mit akzeptablen Messwertabweichungen auf. Größere LP-Töpfe weisen hierbei geringere Messgüten auf als die kleineren des gleichen Herstellers.

Zum zweiten Prüfzeitpunkt sind insgesamt wesentlich präzisere Ergebnisse an Unterbetonen erzielt worden. Im Vergleich mit den Messwerten, ermittelt an Oberbetonen, weisen einige Prüfgeräte eine bessere Messgüte auf. Bei HYDRO\_5\_T\_6L ist die höchste Messgüte mit über 90 % der Messungen mit akzeptablen Messwertabweichungen zu verzeichnen. Bei kleineren konventionellen LP-Töpfen liegt der Anteil an Messungen mit akzeptablen Abweichungen hierbei im Schnitt bei ca. 84 %. Geringfügig reduziert ist der Anteil ähnlich hoher Messwertabweichungen bei größeren LP-Töpfen festzustellen. SAM\_7L weist zum zweiten Prüfzeitpunkt die geringste Messgüte der Ergebnisse auf.

### 8.7.5 Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse aus den Hauptuntersuchungen

Zusammenfassend ergeben sich aus den Hauptuntersuchungen folgende Erkenntnisse zur der Messgüte der betrachteten Prüfverfahren zur Bestimmung des Frisch- und Festbeton-Luftporengehaltes:

Die Begleitversuche der Vergleichsuntersuchungen am Festbeton zur Ermittlung der Festigkeitskennwerte verdeutlichen die signifikante Bedeutung einer gezielten Erfassung und Veränderung des Luftporengehaltes im Frischbeton. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Veränderung des LP-Gehaltes im Frischbeton einen erheblichen Einfluss auf die Festigkeit des Betons hat. Eine Veränderung des LP-Gehaltes um 1 Vol.-% im Frischbeton kann zu einer Druckfestigkeitsänderung zwischen 2,8 und 5,0 N/mm<sup>2</sup> sowie zu einer Spaltzugfestigkeitsänderung zwischen 0,10 und 0,32 N/mm<sup>2</sup> führen, abhängig von der gewählten Betonrezeptur (Ober- bzw. Unterbeton) und dem w/z-Wert. Infolgedessen könnte eine Messwertabweichung von etwa 1 Vol.-% bei der Frischbetonluftporenmessung eine Festigkeitsreduktion von bis zu 10 % zur Folge haben.

Um qualitativ hochwertige Betonstraßen herstellen zu können, ist daher eine Messung des Luftporengehaltes mit hoher Präzision unerlässlich. In der Vergleichsuntersuchung wurden vier Wertungsbereiche von Messwertabweichungen definiert, in welche jede Messung je Prüfgerät zugeordnet wurde. Die Rate der Messungen, die sich aus der Zuordnung der durchgeführten Messungen ergibt, spiegelt somit die Messgüte einzelner Prüfverfahren wider. Hierbei wurde festgestellt, dass die Messgüte der Prüfverfahren von mehreren Faktoren beeinflusst wird.

Die Vergleichsuntersuchungen zeigten, dass alle Prüfgeräte abhängig von der gewählten Grundrezeptur des betrachteten Betons unterschiedliche Messgüten aufweisen. Die Messgeräte erzielten eine höhere Messgüte bei der Erfassung der Messwerte an Oberbetonen im Vergleich zu Unterbetonen. Somit scheint die **Zusammensetzung der Frischbetone**, wie zum Beispiel ein höherer Zementgehalt, einen Einfluss auf die Messwertbildung der konventionellen Prüftechnik zu haben.

Der **Prüfzeitpunkt** spielte hierbei ebenfalls eine entscheidende Rolle. Im Laufe der Zeit verschob sich die Spannweite der Messwertabweichungen in Richtung einer Überschätzung des LP-Gehaltes. Während präzise ermittelte Messwerte zum ersten Prüfzeitpunkt (z.B. mit HYDRO\_5\_T\_6L) geringfügige Abweichungen mit der Tendenz zum Überschätzen bei späteren Messungen zeigten, ergab sich beim Einsatz konventioneller LP-Töpfe eher die Neigung, den LP-Gehalt zum ersten Prüfzeitpunkt deutlich zu unterschätzen. Die beobachtete Verschiebung der Spannweite der Messwertabweichungsstreuung in Richtung der Überschätzung führte somit zu einer Verbesserung der Messgüte der konventionellen LP-Töpfe zum zweiten Prüfzeitpunkt. Ursache für die vorliegende Entwicklung der Messwerte könnte die fortschreitende Hydratation des Frischbetons, verschiedene Verdichtungseffekte, die zunehmende Reifung sowie mögliche Temperaturänderungen im Frischbeton bis zum zweiten Prüfzeitpunkt sein. Es scheint, dass die Luftporen während der fortschreitenden Hydratation und somit der sich ändernden Konsistenzeigenschaften des Frischbetons durch den geringeren Prüfdruck der konventionellen Prüftechnik in ausreichender Anzahl im Zementleim erfasst wurden. Die Luftporenstruktur scheint im späteren Prüfalter des Frischbetons stabiler und somit einfacher zu erfassen zu sein.

Die **Veränderung des Luftporengehalts** im Beton hatte auch Auswirkungen auf die Ergebnisse der Luftporenbestimmung. Es wurde beobachtet, dass die Messwerte von Betonen mit niedrigem LP-Gehalt von den Prüftechniken mit geringfügigen Messwertabweichungen erfasst wurden. Möglicherweise reichte hierbei der niedrige Prüfdruck der konventionellen Prüftechniken aus, um die geringe Anzahl an Luftporen ausreichend genau zu erfassen. Mit der Erhöhung des FB-Luftporengehalts vergrößerten sich die Messwertabweichungen bei den meisten Prüftechniken. Die höchsten Messwertabweichungen wurden in der Regel bei Frischbetonen mit sehr hohem LP-Gehalt festgestellt. Dies könnte auf den konstanten maximalen Prüfdruck von 1 bar zurückzuführen sein, der bei den meisten Prüftechniken festgelegt ist. Je höher der Prüfdruck angesetzt ist, desto kleinere Luftporen werden im Frischbeton bei der Messung erfasst. Eine Druckanpassung zur Erfassung von kleiner werdenden Mikro-Luftporendurchmessern im Frischbeton ist bei konventioneller Prüftechnik technisch nicht vorgesehen. Ein weiterer Faktor, der das genaue Ablesen der Messwerte erschwert, ist der Aufbau der Ableseskala. Bei höheren LP-Gehalten im Frischbeton wird das Ablesen der Messergebnisse bei immer kleiner werdendem Ablesebereich auf der Skala erschwert, was die Genauigkeit der Messergebnisse beeinträchtigen kann.

**w/z-Wert** als Parameter zeigte ebenfalls Einfluss auf die Messgüte der Prüfgeräte. Anhand der Ergebnisse an Unterbetonen konnte beobachtet werden, dass bei steiferen Unterbetonen mit niedrigem w/z-Wert die jeweilige FB-Luftporenmessung höhere Messwertabweichungen aufwies als bei Frischunterbetonen mit höherem w/z-Wert. Diese Tendenz konnte jedoch ausschließlich bei Frischunterbetonen mit niedrigem und mittlerem FB-Luftporengehalt beobachtet werden. Die Konsistenz des Frischbetons während der Luftporenerefassung könnte eine mögliche Ursache für die beobachtete Entwicklung der Messwerte sein. Ein niedriger w/z-Wert führt zu einem steiferen Frischbeton, was möglicherweise zu unerwünschten Verdichtungseffekten wie einer inhomogenen Luftporenverteilung bzw. -struktur oder ungleichmäßigen Verdichtung führt.

Insbesondere bei der konventionellen Prüftechnik mit geringem Prüfdruck könnte dies zu einer unvollständigen Erfassung der Luftporen in unteren Lagen führen.

Das **Fassungsvermögen** der jeweiligen Prüftechnik sowie die **Geometrie** des einzufüllenden Volumens hatten ebenfalls erheblichen Einfluss auf die Messgüte der Prüfgeräte. Anhand der Ergebnisse der HYDRO\_5-Prüfgeräte wurde deutlich gezeigt, dass eine geringere Probenmenge und ein rechteckiges

Füllvolumen (Würfel) trotz gleichen Arbeitsdrucks der Wassersäule zu starken Abweichungen führten. Diese könnten auf Unterschiede in der Verteilung und Komprimierung des Frischbetons innerhalb der Prüftechnik zurückzuführen sein. Eine kleinere Probenmenge und ein rechteckiges Füllvolumen könnten dazu führen, dass der Frischbeton ungleichmäßig verdichtet wurde, was zu inkonsistenten Messergebnissen führte. Außerdem könnte die Form des Füllvolumens dazu führen, dass bestimmte Bereiche des Frischbetons stärker oder schwächer komprimiert wurden, was die Messgenauigkeit beeinträchtigte. Der HYDRO\_5\_T\_6L mit 6 l Fassungsvermögen, zylindrischer Geometrie und rechnerisch definierbarem Ausdehnungsvolumen ermöglichte während der Beanspruchung der Probe mit dem Prüfdruck von 2 bar eine deutlich präzisere Erfassung der Messwerte.

**Konventionelle LP-Töpfe derselben Herstellungsvariante, aber mit unterschiedlichen Fassungsvermögen**, zeigten an verschiedenen Betonen ebenfalls deutlich unterschiedliche Messwerte. Bei Messungen des FB-Luftporengehaltes mit konventionellen LP-Töpfen mit größerem Fassungsvermögen zum zweiten Prüfzeitpunkt an Oberbetonen wurde eine höhere Messgüte festgestellt als bei baugleichen LP-Töpfen mit niedrigem Fassungsvermögen. Bei Messungen an Unterbetonen hingegen wurden bei den kleineren LP-Töpfen präzisere Messwerte beobachtet als bei den größeren konventionellen LP-Prüfern. Dies könnte darauf hindeuten, dass das Fassungsvermögen der LP-Töpfe eine Rolle bei der Messgenauigkeit spielt, insbesondere in Bezug auf die Konsistenz und die Zusammensetzung des Luftporenbetones.

Die **Wahl der Herstellungsvarianten des konventionellen LP-Topfes** kann ebenfalls Auswirkungen auf die Messgüte der durchgeführten Messungen haben. Messungen mit LP-Töpfen der Hersteller B bzw. C wurden meistens mit präziseren Messergebnissen als Folge durchgeführt als mit Produkten des Herstellers A. Es ist jedoch auch zu beachten, dass **baugleiche Modelle derselben Herstellungsvariante** in der Vergleichsuntersuchung eine individuelle Messgüte aufwiesen, trotz gleicher Nutzungszeit seit Anschaffung des Prüfgerätes und gleicher Kalibrierrate. Trotz sorgfältiger Auswahl und Kalibrierung des konventionellen Prüfgerätes wird daher empfohlen, die Messgüte anhand einer alternativen Prüftechnik (z. B. HYDRO\_5\_T\_6L) zu überprüfen. Dies legt nahe, dass **neben der Bauweise und Volumen auch andere Faktoren wie Materialqualität, Fertigungsprozesse oder technische Details** der jeweiligen Prüftechnik eine Rolle bei der Messwertgenauigkeit spielen könnten. Das alternative Prüfverfahren mit stabil bleibender Wassersäule und doppeltem Arbeitsdruck erwies sich in den meisten Messungen als hinreichend präzise zum ersten Prüfzeitpunkt. Im Durchschnitt wurden dabei etwa 75 % aller Messungen an verschiedenen Betonen mit einer vernachlässigbaren Messwertabweichung bis  $\pm 0,25$  Vol.-% beobachtet, etwa 20 % mit einer akzeptablen Messwertabweichung bis  $\pm 0,50$  Vol.-% und nur etwa 5 % mit deutlichen Messwertabweichungen bis  $\pm 1,0$  Vol.-%.

Zusätzlich zur Erfassung des FB-Luftporengehaltes erfolgte eine Mikroskopie-Analyse am Festbeton durch zwei unabhängige Labore. Die Ergebnisse zeigen, dass trotz identischer Proben das Verfahren nur eine bedingte Wiederholbarkeit der Ergebnisse aufweisen kann. Aufgrund einer entlang eines definierten Strahls optischen Auszählung der Luftporen können bereits minimale Verschiebungen des Auszählstrahls oder seiner Richtung innerhalb der Probe zu erkennbaren Unterschieden in den Messwerten führen.

Für die Ermittlung der Luftporenkennwerte wurden alternative Prüfverfahren zur Bestimmung dieser am Frischbeton herangezogen. Die Ergebnisse der AVA-3000-Prüftechnik wurden größtenteils von erheblichen Messwertabweichungen beeinflusst. Das Verfahren ist aufgrund der hohen Steifigkeit der Frischbetone nicht für die Ermittlung der Kennwerte von Straßenbetonrezepturen geeignet.

Das Super Air Meter (SAM\_7L) konnte in den meisten Fällen den Gesamtluftporengehalt am Frischbeton mit hoher Messgüte bestimmen. Es konnte jedoch nicht bestätigt werden, dass die mit erfasste SAM-Nummer den Abstandsfaktor im Festbeton hinreichend genau abschätzte. Die Untersuchung zeigte hierbei, dass eine Übereinstimmung beider Parameter maximal in 10 % der Fälle vorlag.

Mit dem HYDRO\_5-Porosimeter, angeschlossen an den HYDRO\_5\_T\_6L, kann am Frischbeton eine Porengrößenverteilung mit Erfassung des Mikro-Luftporengehaltes  $A_{300}$  erfolgen. Die Untersuchung zeigte jedoch, dass die Erfassung der Luftporenverteilung zu beiden Prüfzeitpunkten am Frischbeton mit der am Festbeton meistens nicht übereinstimmt. Es wird davon ausgegangen, dass die Erfassung der Luftporenverteilung am Frischbeton mit dem HYDRO\_5-Porosimeter bei noch nicht vollständig gebildeter Luftporenstruktur erfolgt. Es werden deutlich mehr feine Luftporen erfasst, die sich möglicherweise während des fortschreitenden Hydratationsprozesses später zu größeren Luftporen zusammenschließen oder mit den Hydratationsprodukten verdrängt bzw. aufgefüllt werden. Daher werden mit dem HYDRO\_5-Porosimeter zu den beiden Prüfzeitpunkten am Frischbeton abweichende Mikro-Luftporengehalte sowie nicht-identische Luftporenverteilungen wie am Festbeton durch die Mikroskopie-Analyse erfasst. Um die Luftporenverteilung am Festbeton mit dem HYDRO\_5-Porosimeter mit ausreichender Präzision abzuschätzen zu können, sind daher weitere Überlegungen bzw. eventuell Umrechnungen und gegebenenfalls auch technische Anpassungen nötig. Alternativ können neue Grenzwerte des Mikro-Luftporengehaltes am Frischbeton entsprechend definiert werden, um eine Abschätzung anhand der Ergebnisse des HYDRO\_5-Porosimeters zu ermöglichen. Grundsätzlich haben die Untersuchungen gezeigt, dass im Vergleich zur AVA-3000-Prüftechnik mit dem HYDRO\_5-Porosimeter ein potenzielles Messsystem besteht, um bei Frischbetonen mit steifer Konsistenz die Luftporenverteilung und den Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$  grob abschätzen zu können.

## 9 Zusammenfassung, Empfehlung und Ausblick

Fahrbahndeckenbetone sind frei bewitterte Verkehrsflächen und werden der Expositionsklasse XF4 „Frostangriff mit Taumittel“ zugeordnet. Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit wird ein hoher Frost-Tausalz-Widerstand gefordert, welcher mittels ausreichender Menge an künstlich eingeführten Luftporen gewährleistet werden kann. Dazu werden Luftporen bildende Zusatzmittel eingesetzt. Zur frühzeitigen Qualitätskontrolle werden die Luftporengehalte auf der Baustelle mit Luftgehaltsprüfgeräten am Frischbeton geprüft. Dazu muss die Messgüte der Prüfgeräte sichergestellt sein. Diese wurde im Zuge gerätetechnischer Vergleichsuntersuchungen durch die Ermittlung der Luftporengehalte an zuvor festgelegten aktuellen, aber auch außerhalb der Normregelungen modifizierten Betonrezepturen mit ausgewählten, national und international genormten Luftporengehaltsprüfern sowie nicht-genormten Alternativen nach einem einheitlichen Prüfregime beurteilt. Vorgesaltet war die Konzepterstellung für die Bewertung der Messgüte von Luftgehaltsprüfern, die Erarbeitung eines einheitlichen Prüfregimes, die Konzipierung von Grundrezepturen (eines Ober- und eines Unterbetons) und deren betontechnologische Variationen. Entsprechend der Zielsetzung wurde der Gesamtumfang der Untersuchungen in diesem FE-Projekt in die vier aufeinander aufbauenden Arbeitsphasen aufgeteilt.

- 1) In der ersten Arbeitsphase erfolgte die Zusammenstellung der Erfahrungssammlung auf Basis einer ausführlichen Literaturrecherche. Des Weiteren erfolgte die Bildung eines Bewertungskonzeptes sowie die Beschaffung zu untersuchender Prüftechnik und geeigneter Ausgangsstoffe. Anschließend erfolgte die Ermittlung der wichtigen Kennwerte der Ausgangsstoffe. Auf Basis der Ergebnisse der durchgeführten Materialanalyse sowie der Literaturstudie wurden zwei Grundrezepturen konzipiert und Prüfregimevariationen festgelegt.
- 2) In der zweiten Arbeitsphase erfolgten Versuche zur Bestimmung des einheitlichen Prüfregimes an der Oberbeton-Grundrezeptur. Anschließend wurden Tastversuche zur Bestimmung der Versuchsmatrix für gerätetechnische Vergleichsuntersuchungen absolviert.
- 3) In der dritten Arbeitsphase erfolgten gerätetechnische Vergleichsuntersuchungen inklusive der Herstellung von Begleitprobekörpern zur Bestimmung der Festigkeits- und Luftporenkennwerte am Festbeton in zwei separaten Arbeitspaketen. Bei den Vergleichsuntersuchungen erfolgte zur späteren Datenauswertung und Präzisionsbestimmung einzelner Luftgehaltsprüfer die Erfassung maßgeblicher Frischbetonkennwerte.
- 4) In der abschließenden Arbeitsphase 4 erfolgten detaillierte Analysen und Auswertungen der gesamten erstellten Datenbasis zur Ermittlung und Bewertung der Messgüte der in der Vergleichsuntersuchung eingesetzten Prüftechnik.

### **Zu 1) – Bildung eines Bewertungskonzeptes auf Grundlage der Erfahrungssammlung sowie Beschaffung der Prüftechnik und Ausgangsstoffe.**

Im ersten Arbeitspaket wurde als Grundlagenforschung eine vertiefte Literaturstudie zum Themengebiet der Straßenbetone bzw. des Luftporenbetons durchgeführt. Dabei wurden besonders verschiedene prozessbedingte Einflüsse auf die Luftporenbildung und das Luftporenverhalten der Straßenbetone behandelt. Dazu gehören unter anderem:

- ausführungs- und gerätetechnische Einflüsse während der Prüfung des Luftporengehaltes
- Mischtechnik- und Witterungseinflüsse während der Herstellung der luftporenhaltigen Straßenbetone unter Labor- bzw. Praxisbedingungen
- transportbedingte Einflüsse während des Transportvorganges der Betone zur Baustelle

In diesem Zusammenhang wurden verschiedene national und international genormte Prüfverfahren am Frisch- und Festbeton sowie das jeweilige Messprinzip beleuchtet und detailliert dargestellt. Zudem wurde

das Ausmaß des Einflusses der betontechnologischen Eigenschaften auf die Messwertbildung des Luftgehaltes bewertet und dargestellt.

Die Verfahrenskonzeption zur Bewertung der Messgüte der Luftgehaltsprüfer basierte auf der gewonnenen Erfahrungssammlung. Die Qualität der Messwerte wurde mit einfachen und nachvollziehbaren Methoden beurteilt, darunter:

- kontinuierliches Kalibrieren der LP-Prüfer nach entsprechender Anleitung
- Messung der Rohdichten der Betonbestandteile
- präzise Messung der Frischbeton-Rohdichte mittels der „Pyknometer-Methode“
- Rückrechnung des Wassergehaltes im Frischbeton im Stoffraum als Messgüteparameter
- Rückrechnung der Soll-FB-Rohdichte bzw. des darauf basierten rechnerischen Soll-Wertes des Gesamt-Luftporengehaltes im Stoffraum
- Ermittlung der Messwertabweichung als Beurteilungskriterium der Messgüte der verwendeten Prüftechnik

Des Weiteren erfolgte die Beschaffung der für die Untersuchungen geplanten nationalen und internationalen genormten sowie alternativen Luftgehaltsprüfgeräte. Dabei wurden verschiedene Auswahlkriterien berücksichtigt, darunter:

- Beschaffung von zwei baugleichen Prüfgeräten unterschiedlicher Hersteller und Volumina für die in Deutschland standardmäßig verwendeten Luftgehaltsprüfer
- Auswahl eines Prüfgerätes pro Alternative (national, international, genormt oder nicht-genormt) für die geplanten Untersuchungen

Insgesamt wurden zehn nationale Standard-Luftgehaltsprüfer von drei verschiedenen Herstellern mit unterschiedlichem Fassungsvermögen sowie vier alternative Prüfgeräte (HYDRO\_5\_T\_6L, HYDRO\_5\_W\_3.4L, SAM\_7L, AVA-3000) für die anstehende Vergleichsuntersuchung beschafft.

Nachfolgend wurden die für die zu konzipierenden Grundrezepturen erforderlichen Ausgangsstoffe gemäß den straßenspezifischen Regelwerken gewählt, beschafft und charakterisiert. Die Charakterisierung umfasste die Ermittlung der Korngrößenverteilung, die Bestimmung der Rohdichte sowie die Wasseraufnahme der groben und feinen Gesteinskörnung.

Auf Basis dieser Anforderungen wurden zwei Grundrezepturen mit folgenden Eigenschaften konzipiert:

- Oberbetonrezeptur als Waschbeton einsetzbar ( $D = 8 \text{ mm}$ )
- Unterbetonrezeptur, die als Oberbeton mit maximalem Größtkorn von  $D = 22 \text{ mm}$  und „Grinding/Grooving“-Textur eingesetzt werden kann
- beide Rezepturen wurden mit ofengetrockneter gebrochener Gesteinskörnung erstellt
- ein identischer  $w/z$  Wert wurde bei beiden Rezepturen eingehalten
- Wahl der Zementart: CEM I 42,5 N, Unterbeton: ein Zementgehalt von mind.  $340 \text{ kg/m}^3$ , Oberbeton: ein Zementgehalt von mind.  $420 \text{ kg/m}^3$
- die Konsistenzklasse der Frischbetone soll der Konsistenzklasse C1/C2 entsprechen

## **Zu 2) – Detaillierte Untersuchungen zur Bestimmung des Prüfregimes und Aufstellung der Versuchsmatrix für gerätetechnische Vergleichsuntersuchungen**

In vorliegender Arbeitsphase wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um das endgültige Prüfregime an einer Oberbeton-Grundrezeptur mit künstlich eingeführten Luftporen zu bestimmen. Es wurde die Auswirkung einzelner Prüfregimevariationen auf die Messwertbildung beurteilt, wobei sowohl das in Deutschland standardmäßig angewandte Druckausgleichsverfahren als auch das Wassersäulenverfahren (HYDRO\_5) zur Anwendung kamen.

Die Prüfausführung und die einzelnen Schritte der LP-Messung wurden variiert, wobei präzise bestimmte Frischbeton-Rohdichten und daraus rechnerisch ermittelte Soll-LP-Gehalte aus jedem eingesetzten Prüfgerät als Kontrollwert herangezogen wurden. Hierbei kamen zwei baugleiche LP\_A\_5L\_1/2 und zwei weitere alternative Prüfgeräte (HYDRO\_5\_T\_6L bzw. HYDRO\_5\_W\_3.4L) zur Messwertqualitätsuntersuchung zum Einsatz.

Alle LP-Messungen und relevante Frischbetonprüfungen nach DIN EN 12350 wurden sowohl 10 als auch 60 min nach dem Mischende der Betoncharge durchgeführt. Die Luftporenmessung mit konventionellen Prüfgeräten erfolgte auf zwei Arten, um den Einfluss auf die Wiederholungsgenauigkeit der Messergebnisse unter den genannten Prüfbedingungen am identischen Probenmaterial zu untersuchen:

- im ersten LP-Topf erfolgte die messwertbildende Betätigung sofort und anschließend erneut nach 60, 120, 240 und 600 s. Die Betonprobe wurde dabei kontinuierlich unter Druck gelassen
- in einem weiteren LP-Topf wurde die messwertbildende Betätigung sofort und anschließend in den genannten Zeitabständen durchgeführt. Die Betonprobe wurde zwischen den Zeitintervallen immer drucklos gesetzt

Um den Einfluss des Prüfregimes auf die Messwertbildung zu zeigen, wurden verschiedene Prüfregimevariationen gewählt, die sich jeweils in einem Variationsparameter von dem Referenzregime (Regelfall) unterscheiden:

- Probenzustand vor dem Befüllen der Prüftechnik (vorverdichtet, unverdichtet)
- Verdichtungsart (Rütteltisch, Innenrüttler)
- Verdichtungsablauf (Lagenanzahl, Intensität, Verdichtungszeit)
- Einfüllprozess des Wassers in die Prüftechnik (drucklos, unter Druck)
- Temperatur der Ausgangsstoffe und Umgebungstemperatur (10, 20, 30 bzw. 40 °C)

Durch die Doppelbestimmung der Messwerte ergaben sich mindestens 26 Betonchargen für die Vorversuche zur Bestimmung des Prüfregimes.

Darauf aufbauend erfolgten Tastversuche, bei denen die Zugabemenge der Zusatzmittel bei beiden Grundrezepturen variiert wurde, um eine Versuchsmatrix für nachfolgende gerätetechnische Vergleichsuntersuchungen zu erstellen. Das Ziel bestand darin, die in der Praxis teilweise stark schwankenden Parameter in Bezug auf die Zugabemenge der Zusatzmittel und somit die Konsistenz, den Luftporengehalt sowie den w/z-Wert zu berücksichtigen und deren Einfluss auf die Messwertqualität der LP-Gehaltsprüfer zu quantifizieren.

Dabei wurden drei Luftporengehalte der Untersuchungsbetone angestrebt, die einen Unterschied von mindestens 2,0 Vol.-% zueinander aufwiesen. Das passende Mischregime wurde auf Basis der Literaturrecherche und den Regelwerken erstellt. Anhand der Tastversuche wurde für jede Betonsorte mit drei verschiedenen w/z-Werten und drei verschiedenen Zugabemengen des gewählten Luftporenbildners, unter erforderlicher Zugabe eines geeigneten Fließmittels, die Versuchsmatrix festgelegt. Somit ergaben sich für die Versuchsreihe neun Betonzusammensetzungen je Grundrezeptur.

## **Fazit zu den Voruntersuchungen zum Prüfregime**

Zusammenfassend ergeben sich aus den Voruntersuchungen zum Prüfregime folgende Erkenntnisse:

**Die Vorverdichtung des Frischbetons** vor dem eigentlichen Verdichtungsprozess auf dem Rütteltisch zeigte einen signifikanten Einfluss auf die Bildung des Frischbeton-Luftporengehaltes. Der Gesamtluftporengehalt reduzierte sich durchschnittlich um ca. 1 Vol.-%. Dabei wurde ein geringer Einfluss auf die Messwertgenauigkeit festgestellt, jedoch ausschließlich unter Einsatz der konventionellen LP-Töpfe. Als Messwertgenauigkeit wurde die Differenz zwischen den Ist- und Soll-Luftporengehalten betrachtet, die aus den

Messungen bzw. nachfolgend aus der Rückrechnung der Ist-Rohdichten ermittelt wurden. Zum zweiten Prüfzeitpunkt nach 60 min war die Differenz des Luftporengehaltes bei den konventionellen LP-Töpfen geringer. Es ist wahrscheinlich, dass nach dem Freifall durch den Aufprall des Frischbetons in den Transportbehälter die Makroporen als Folge ausgetrieben wurden, und diese in der nachfolgenden Luftporenmessung bereits am ersten Prüfzeitpunkt somit nicht mehr vorhanden waren.

Der Vergleich zwischen **verschiedenen Verdichtungsverfahren** (Rütteltisch, Innenrüttler) zeigte meist geringfügig niedrigere Luftporengehalte nach der Innenrüttler-Verdichtung. Hierbei ist anzunehmen, dass der Einsatz eines Innenrüttlers mit erhöhter Verdichtungsenergie zu einer potenziellen Überverdichtung führt, was wiederum den Verlust größerer Mengen eingeführter Luftporen zur Folge haben könnte.

**Die Verdichtung in drei oder vier Lagen** zu beiden Prüfzeitpunkten führte zu einer Verringerung des Luftporengehalts im Frischbeton um bis zu 2 Vol.-% zum ersten Prüfzeitpunkt und zu einer deutlichen Reduzierung der Messwertabweichungen im frühen Frischbetonalter. Durch das Verdichten mit einer höheren Anzahl von Lagen trat vermutlich eine Überverdichtung auf, wodurch möglicherweise ein Teil der vorhandenen Luftporen in der Frischbetonmatrix entwichen ist. Zudem könnte eine größere Anzahl dünnerer Verdichtungslagen dazu geführt haben, dass die Luftporen während der intensiven Verdichtung in die darüberliegenden Schichten des Frischbetons im Prüfbehälter wanderten. Dort könnten sie größtenteils von der konventionellen Prüftechnik erfasst worden sein, obwohl ein niedrigerer Prüfdruck angewendet wurde.

**Die Erhöhung der Verdichtungsintensität** wirkt sich deutlich reduzierend auf den Frischbeton-Luftporengehalt aus. Eine Reduktion der Messwertabweichungen um 0,35 bis 0,70 Vol.-% beim Einsatz konventioneller Prüftechnik ist durch die Erhöhung der Verdichtungsintensität zu beobachten. Die vorliegende Veränderung des Luftporengehalts im Frischbeton könnte auf eine erhöhte Verdichtungsintensität zurückzuführen sein, die zu einer Überverdichtung führte. Dies könnte bewirken, dass Luftporen aus den unteren Schichten des Frischbetons stärker in die obere Schicht getrieben wurden. Mit zunehmender Verdichtungsintensität wurde vermutlich die Bildung größerer Verdichtungs-poren vermieden, was auf den Rückgang des Gesamtluftporengehalts hinweist. Die verbliebenen Luftporen im Frischbeton könnten durch den geringeren Druck der konventionellen LP-Töpfe in der oberen Schichtdicke effizienter erfasst werden. Zum zweiten Prüfzeitpunkt ist eine geringfügige bis bedeutende Wirkung (Messwertabweichung zwischen 0,25 und 0,75 Vol.-%) bei der Anpassung der Verdichtungsintensität festzustellen. Als Ursache könnte unter anderem die fortgeschrittene Hydratation angenommen werden, welche dem Aufsteigen der Luftporen durch die gestiegene Viskosität des Zementleimes bei höheren Verdichtungsintensitäten entgegenwirkte.

**Die Anpassung der Verdichtungszeit** von 45 s je Lage auf 30 bzw. 60 s erwies sich zum ersten Prüfzeitpunkt als überwiegend ohne Einfluss. Zum zweiten Prüfzeitpunkt führte das längere Verdichten zu einer Reduktion des Frischbeton-Luftporengehalts um ca. 1 Vol.-%.

**Die Variation der Wasserzugabe** zum Auffüllen bzw. zur Verdrängung des Luftpolsters bei der konventionellen Prüftechnik zeigte unter stetiger Beachtung des Prüfablaufes kaum einen Einfluss auf den Frischbeton-Luftporengehalt und die Messwertgenauigkeit. Es lässt sich vermuten, dass aufgrund der streng kontrollierten Einfüllmethode des Wassers unter Druck mit stets voll aufgefüllten Spritzflaschen kaum Luft eingetragen wurde. Grundsätzlich könnte es aufgrund von halbgefüllten Spritzflaschen oder unsachgemäßem Bedienen zu ungewolltem Lufteintrag ins Messmedium und somit zur Beeinflussung des Messwerts kommen.

Bei einer **Frischbeton-Temperatur** von 10 °C erhöhte sich zum ersten Prüfzeitpunkt der gemessene Luftporengehalt um bis zu 1 Vol.-%. Zum zweiten Prüfzeitpunkt ist kaum ein Einfluss zu beobachten. Bei einer Frischbeton-Temperatur von 30 °C bzw. 40 °C sind Reduktionen des Frischbeton-Luftporengehalts zu beiden Prüfzeitpunkten überwiegend über 2,0 Vol.-% zu verzeichnen. Die Differenz der Messwerte zum jeweiligen rechnerischen Soll-Wert stieg beim Einsatz der HYDRO\_5-Prüftechnik, sank jedoch beim Einsatz der konventionellen LP-Töpfe. Zum zweiten Prüfzeitpunkt verstärkte sich der Einfluss auf den Frischbeton-

Luftporengehalt und die Messwertgenauigkeit durch das Ansteigen der Frischbetontemperatur auf 30 °C bzw. 40 °C. Möglicherweise ist dies auf den thermischen Einfluss der Veränderung der Umgebungs- und Frischbetontemperatur auf die Prüftechnik und angestiegene Hydratationsgeschwindigkeit zurückzuführen, der bisher technisch oder rechnerisch nicht berücksichtigt wurde.

Die Gewichtung des Einflusses des Prüfregimes auf den Frischbeton-Luftporengehalt und dessen Messgenauigkeit in Abhängigkeit von den Variationsparametern und Prüfzeitpunkten ist in der Tab. 6-22 und Tab. 6-23 dargestellt.

### **Zu 3) – Vergleichsuntersuchungen mit nationalen / international genormten und alternativen LP-Gehaltsprüfern**

In Arbeitsphase 3 wurden gerätetechnische Vergleichsuntersuchungen mit national genormten Luftporengehaltsprüfmethode durchgeführt, wobei bis zu drei Prüfgeräte gleichen Volumens pro Betoncharge einer Rezeptur gleichzeitig untersucht wurden. Dies erfolgte gemäß dem in Arbeitsphase 2 abgestimmten Prüfregime und der festgelegten Versuchsmatrix. Neben der Luftporenbestimmung wurden auch weitere Frischbetonkennwerte nach DIN EN 12350 ermittelt, insbesondere die Konsistenz und die Frischbeton-Rohdichte. Bei den betrachteten Betonrezepturen wurden begleitende Festigkeitsuntersuchungen und Luftporenauszählungen am Festbeton nach TP B-StB 17 durchgeführt.

Die durchgeführten Prüfungen umfassten:

- Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen an drei Würfelprobekörpern
- Spaltzugfestigkeit im Alter von 28 Tagen an sechs Zylinderunterscheiben
- Festbetonluftporenauszählung ab dem Probenalter von 7 Tagen an den aus zwei Würfeln herausgesägten Probekörpern

Für ausgewählte Rezepturen wurden die Luftporenkennwerte am Festbeton zusätzlich an einer weiteren unabhängigen, externen Laboreinrichtung untersucht.

Anschließend erfolgten gerätetechnische Vergleichsuntersuchungen mit abgestimmten, teilweise außerhalb der DIN EN genormten bzw. alternativen Luftgehaltsprüfern gemäß der dafür vorgesehenen Prüfanleitung bzw. internationalen Norm. Zum qualitativen Messwertvergleich wurde auch ein national genormter LP-Topf eingesetzt. Dabei wurden die gleichen Betonrezepturen verwendet, und identische Frisch- und Festbetonuntersuchungen durchgeführt, wie bei der Vergleichsuntersuchung der national genormten Luftporenmesstechnik. Von jedem alternativen LP-Prüfgerät kam jeweils nur ein Modell zum Einsatz. Dabei wurden bis zu drei LP-Gehaltsprüfer pro Betoncharge einer Rezeptur gleichzeitig untersucht.

### **Zu 4) Finale Analyse und Auswertung der gesamten erstellten Datenbasis der Vergleichsuntersuchungen**

In der abschließenden Arbeitsphase 4 wurde die aus den Vergleichsuntersuchungen gewonnene Datenbasis bearbeitet und zusammenfassend ausgewertet. Die Bewertung der Messgüte erfolgte anhand von zwei formulierten Methoden, basierend auf den Messwertabweichungen vom berechneten Soll-Luftporengehalt der verwendeten Prüftechniken. Erstens wurde die Spannweite der Streuung einzelner Prüfgeräte unter Verwendung der jeweiligen Grundrezeptur über alle eingestellten Variationsparameter (Luftporengehalt und w/z-Wert) betrachtet. Nach der Feststellung und Beurteilung der Spannweite wurde zweitens die Verteilung der Messwertabweichungen aller Messungen innerhalb des jeweiligen Streubereiches an der jeweiligen Betonsorte als zweite Beurteilungsmethode herangezogen.

Die Messwertabweichungen wurden somit in vier Beurteilungskategorien eingeteilt:

- niedrige bzw. vernachlässigbare Messwertabweichung im Bereich von  $\pm 0,25$  Vol.-%
- mittlere bzw. akzeptable Messwertabweichung im Bereich von  $\pm 0,26$  bis  $\pm 0,50$  Vol.-%
- deutliche bzw. grobe Messwertabweichung im Bereich von  $\pm 0,51$  bis  $\pm 1,00$  Vol.-%
- starke Messwertabweichung im Bereich von  $> \pm 1,00$  Vol.-%

Anhand der Anzahl der Abweichungen je Streubereich für jede Prüftechnik wurde anschließend eine Aussage über die Messgüte getroffen. Die Ergebnisse der baugleichen Prüfgeräte (z. B. LP\_A\_5L\_1 und LP\_A\_5L\_2) wurden zu einem Datenpool zusammengefasst.

Zusätzlich wurden die Ergebnisse der Begleituntersuchungen herangezogen, um das Einflusspotential der Variation des Luftporengehaltes im Straßenbeton auf die Festigkeitseigenschaften aufzuzeigen, die Wiederholbarkeit der Mikroskopie-Untersuchung an gleichen Festbetonproben anhand der Ergebnisse zweier unabhängigen Laborinstitute zu untersuchen und die Qualität der Abschätzbarkeit betrachteter Luftporenkennwerte, ermittelt am Festbeton, durch die alternative Prüfmethode zu untersuchen.

### Fazit zu den Vergleichs- sowie Begleituntersuchungen

Zusammenfassend ergeben sich aus den Haupt- und Begleituntersuchungen folgende Erkenntnisse:

Die Begleitversuche der Vergleichsuntersuchungen am Festbeton zur Ermittlung der Festigkeitskennwerte verdeutlichen die signifikante Bedeutung einer gezielten Erfassung und Anpassung des Luftporengehaltes im Frischbeton. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Variationen des LP-Gehalts im Frischbeton signifikante Auswirkungen auf die Betonfestigkeit haben. Eine Änderung um 1 Vol.-% im Frischbeton kann zu einer Druckfestigkeitsänderung von 2,8 bis 5,0 N/mm<sup>2</sup> und einer Spaltzugfestigkeitsänderung von 0,10 bis 0,32 N/mm<sup>2</sup> führen, abhängig von der Zusammensetzung der Betonrezeptur. Eine Messwertabweichung von etwa 1 Vol.-% bei der Frischbeton-Luftporenmessung könnte somit zu einer Festigkeitsreduktion von bis zu 10 % führen. Eine präzise Messung des Luftporengehaltes ist daher unerlässlich, um hochwertige Betonstraßen herzustellen.

In den Vergleichsuntersuchungen wurden vier Wertungsbereiche von Messwertabweichungen definiert. Die Rate der Messwertabweichungen je Wertungsbereich spiegelt die Messgüte einzelner Prüfverfahren wider. Dabei wurde festgestellt, dass die Messgüte von mehreren Faktoren beeinflusst wird:

Die **Wahl der Betonrezeptur** beeinflusst die Messgüte, wobei die Messgeräte höhere Genauigkeiten bei Oberbetonen im Vergleich zu Unterbetonen erzielen. Die Zusammensetzung des Frischbetons, wie beispielsweise ein höherer Zementgehalt oder ein kleineres Größtkorn, scheint sich auf die Messwertbildung der überwiegend eingesetzten Prüftechnik auszuwirken.

Der **Prüfzeitpunkt** spielt eine bedeutende Rolle. Im Laufe der Zeit verschob sich die Spannweite der Messwertabweichungen vom rechnerischen Soll-Wert in Richtung einer Überschätzung des LP-Gehaltes. Präzise Messungen zum ersten Prüfzeitpunkt nach 10 min (z.B. mit HYDRO\_5\_T\_6L) zeigten geringfügige Abweichungen mit der Tendenz zum Überschätzen bei späteren Messungen, während konventionelle LP-Töpfe dazu neigten, den LP-Gehalt zum ersten Prüfzeitpunkt zu unterschätzen, später hingegen höhere Präzision der Messwerte vorzuweisen. Verantwortlich für die beobachtete Entwicklung der Messwerte könnten die fortschreitende Hydratation des Frischbetons sowie verschiedene Verdichtungseffekte und Temperaturänderungen bis zum zweiten Prüfzeitpunkt sein. Es scheint, dass die Luftporen während der fortschreitenden Hydratation und der Veränderung der Konsistenzigenschaften des Frischbetons durch den geringeren Prüfdruck der konventionellen Prüftechnik in ausreichender Anzahl im Zementleim erfasst werden. Die Struktur der Luftporen scheint im späteren Prüfzeitpunkt stabiler und damit einfacher zu erfassen zu sein.

Die **Veränderung des Luftporengehaltes** im Beton beeinflusst die Ergebnisse der Luftporengehaltsmessung. Geringfügige Messwertabweichungen wurden bei Betonen mit niedrigem LP-Gehalt erfasst, während bei höherem LP-Gehalt die Abweichungen zunahmten. Möglicherweise war der niedrige Prüfdruck der konventionellen Prüftechniken ausreichend, um die geringe Anzahl an Luftporen bei Betonen mit niedrigerem LP-Gehalt genau zu erfassen. Mit steigendem FB-Luftporengehalt nahmen jedoch die Messwertabweichungen bei den meisten Prüftechniken zu, insbesondere bei Frischbetonen mit sehr hohem LP-Gehalt. Dies könnte auf den üblichen Prüfdruck von 1 bar zurückzuführen sein, der bei den meisten Prüftechniken festgelegt ist. Je höher der Prüfdruck angesetzt ist, desto kleinere Luftporen werden im Frischbeton bei der Messung erfasst. Eine Druckanpassung zur Erfassung von kleiner werdenden Mikro-Luftporen im Frischbeton ist bei konventioneller Prüftechnik technisch nicht vorgesehen. Ein weiterer Faktor, der das genaue Ablesen der Messwerte erschwert, ist der Aufbau der Ablese skala. Bei höheren LP-Gehalten im Frischbeton wird das Ablesen der Messergebnisse an immer kleiner werdenden Ablesebereichen auf der Skala erschwert, was die Ablesegenauigkeit der Messungen beeinträchtigen kann.

Bei der **w/z-Wert-Variation** wurde ein Einfluss auf die Messgüte der Prüfgeräte beobachtet. Versuche an Unterbetonen zeigten, dass steifere Unterbetone mit niedrigem w/z-Wert höhere Messwertabweichungen bei der Frischbeton-Luftporenmessung aufwiesen, jedoch ausschließlich bei Frischunterbetonen mit niedrigem und mittlerem Frischbeton-Luftporengehalt. Die Konsistenz des Frischbetons während der Luftporenerfassung könnte eine mögliche Ursache für die beobachtete Entwicklung der Messwerte sein. Ein niedriger w/z-Wert führt zu einem steiferen Frischbeton, was möglicherweise zu unerwünschten Verdichtungseffekten wie einer inhomogenen Luftporenverteilung bzw. -struktur oder ungleichmäßigen Verdichtung führt. Insbesondere bei der konventionellen Prüftechnik mit geringem Prüfdruck könnte dies zu einer unvollständigen Erfassung der Luftporen in tieferen Frischbetonlagen führen.

Das **Fassungsvermögen** und die **Geometrie** des einzufüllenden Volumens der Prüftechnik hatten ebenfalls erheblichen Einfluss auf die Messgüte der Prüfgeräte. Anhand der Ergebnisse an HYDRO\_5-Prüfgeräten wurde deutlich gezeigt, dass eine kleinere Probenmenge und ein rechteckiges Füllvolumen (Würfel) trotz gleichen Arbeitsdrucks der Wassersäule bei der HYDRO\_5-Prüftechnik zu starken Abweichungen führten. Die Abweichungen könnten auf Unterschiede in der Verteilung und Komprimierung des Frischbetons innerhalb der Prüftechnik zurückzuführen sein. Eine kleinere Probenmenge und ein rechteckiges Füllvolumen könnten dazu führen, dass der Frischbeton ungleichmäßig verdichtet wurde, was zu inkonsistenten Messergebnissen führte. Außerdem könnte die Form des Füllvolumens dazu führen, dass bestimmte Bereiche des Frischbetons stärker oder schwächer komprimiert wurden, was die Messgenauigkeit beeinträchtigte.

**Konventionelle LP-Töpfe desselben Herstellers, aber mit unterschiedlichen Fassungsvermögen** (5 und 8 Liter), wiesen bei gleichen Betonen unterschiedliche Messwerte auf. Bei Messungen des Frischbeton-Luftporengehaltes mit konventionellen LP-Töpfen mit größerem Fassungsvermögen zum zweiten Prüfzeitpunkt an Oberbetonen wurde eine höhere Messgüte festgestellt als bei baugleichen LP-Töpfen mit niedrigem Fassungsvermögen. Bei Messungen an Unterbetonen hingegen wurden bei den kleineren LP-Töpfen präzisere Messwerte beobachtet. Dies könnte darauf hindeuten, dass das Fassungsvermögen der LP-Töpfe eine Rolle bei der Messgenauigkeit spielt, insbesondere in Bezug auf die Konsistenz des Frischbetons und die Zusammensetzung des Luftporenbetones. Bei Oberbetonen könnten größere LP-Töpfe bessere Messgenauigkeit erzielen, da sie eine größere Menge an Frischbeton aufnehmen können, was eventuell zu einer gleichmäßigeren Kompression während der Prüfung führte.

Die **Wahl der Herstellungsvarianten des konventionellen LP-Topfes** kann ebenfalls Auswirkungen auf die Messgüte der durchgeführten Messungen haben. Messungen mit LP-Töpfen der Hersteller B bzw. C ergaben meistens präzisere Messergebnisse als die Produkte des Herstellers A. Dabei ist zu beachten, dass **baugleiche Modelle desselben Herstellers** in der Vergleichsuntersuchung eine individuelle Messgüte aufwiesen, trotz gleicher Nutzungszeit seit Anschaffung des Prüfgerätes und gleicher Kalibrierrate.

Dies legt nahe, dass **neben der Bauweise und Volumen auch andere Faktoren wie Materialqualität, Fertigungsprozesse oder technische Details** der jeweiligen Prüftechnik eine Rolle bei der Messwertgenauigkeit spielen könnten.

Die alternative HYDRO\_5 (HY5\_T\_6L) mit Wassersäulenprüfverfahren und einem Arbeitsdruck von 2 bar erwies sich in den meisten Messungen als hinreichend präzise. Im Durchschnitt zeigten etwa 75 % aller Messungen an verschiedenen Betonen vernachlässigbare Messwertabweichungen bis  $\pm 0,25$  Vol.-%, etwa 20 % akzeptable Messwertabweichungen bis  $\pm 0,50$  Vol.-% und nur etwa 5 % deutliche Messwertabweichungen bis  $\pm 1,0$  Vol.-%. Konventionelle LP-Töpfe weisen im Vergleich wesentlich höhere Raten an groben und starken Messwertabweichungen auf.

Dies legt nahe, dass die auf dem Druckausgleichsverfahren basierende Prüftechnik, mit Luft als Prüfdruckmedium und einem nicht konstant angesetzten niedrigen Prüfdruck von 1 bar, deutlich empfindlicher auf Variationen des Frischbetons sowie des Prüfregimes hinsichtlich der Messgenauigkeit während der Luftporenerfassung reagiert.

Für die Ermittlung der Luftporenkennwerte wurden ebenfalls alternative Prüfverfahren herangezogen. Die Ergebnisse der AVA-3000 waren größtenteils von erheblichen Messwertabweichungen beeinflusst. Das Verfahren eignet sich aufgrund der hohen Steifigkeit der Frischbetone nicht für die Bestimmung der Kennwerte von Straßenbetonrezepturen.

Das Super Air Meter konnte in den meisten Fällen den Gesamt-Luftporengehalt am Frischbeton mit hoher Messgüte bestimmen. Es konnte jedoch nicht bestätigt werden, dass die erfasste SAM-Number den Abstandsfaktor im Festbeton hinreichend genau abschätzt. Die Untersuchung zeigte hierbei, dass die Übereinstimmungsrate beider Parameter maximal bei 10 % der Fälle vorlag.

Bei Begleituntersuchungen zur Erfassung der Luftporenkennwerte an Frisch- und Festbeton wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

Zusätzlich zur Erfassung des Frischbeton-Luftporengehaltes erfolgte eine Mikroskopie-Analyse an Festbeton durch zwei unabhängige Labore. Die Untersuchungen an identischen Proben zeigten, dass das Verfahren nur eine bedingte Wiederholbarkeit der Ergebnisse aufweisen kann. Aufgrund einer normativ geregelten entlang eines definierten Strahls optischen Auszählung der Luftporen können bereits minimale Verschiebungen der Auszählrichtung zu signifikanten Unterschieden in den Messwerten führen.

Mit dem HYDRO\_5-Porosimeter, angeschlossen an den HYDRO\_5\_T\_6L, kann am Frischbeton eine Porengrößenverteilung mit Erfassung des Mikro-Luftporengehaltes  $A_{300}$  erfolgen. Die Untersuchungen zeigten, dass die Erfassung der Luftporenverteilung zu beiden Prüfzeitpunkten am Frischbeton mit der am Festbeton meistens nicht korreliert. Es werden deutlich mehr feine Luftporen erfasst, die sich möglicherweise während des fortschreitenden Hydratationsprozesses später zu größeren Luftporen zusammenschließen oder mit den Hydratationsprodukten verdrängt bzw. aufgefüllt werden. Daher werden mit dem HYDRO\_5-Porosimeter zu den beiden Prüfzeitpunkten am Frischbeton abweichende Mikro-Luftporengehalte sowie nicht identische Luftporenverteilung im Vergleich zur Luftporenauszählung an Festbeton erfasst.

Um die Luftporenverteilung am Festbeton mit der HYDRO\_5-Porosimeter mit ausreichender Präzision abschätzen zu können, sind daher weitere Überlegungen zu alternativen Grenzwerten der maßgebenden Luftporenkennwerte im Frischbeton nötig. Alternativ ist eine Umrechnungsmethode der mit dem HYDRO\_5-Porosimeter erfassten Daten zu konzipieren.

## Empfehlungen an die Praxis und Ausblick

Basierend auf den erlangten Erkenntnissen aus dem vorliegenden FE-Vorhaben wurden für die aktuell verfügbaren Prüfgerätschaften folgende Empfehlungen für die Praxis ausgearbeitet:

- **Standardisierung des Prüfregimes:**

Die aktuelle Normung definiert die einzelnen Parameter des Prüfablaufs zur Erfassung des Luftporengehalts am Frischbeton nicht oder nur unzureichend. Angesichts der im vorliegenden Forschungsvorhaben beobachteten Einflüsse des Prüfregimes auf die Messwertbildung ist es daher ratsam, ein standardisiertes, ausführlich definiertes Prüfregime in der Norm festzulegen, das die wesentlichen Einflussvariablen berücksichtigt, die unter anderem im FE-Vorhaben aufgezeigt wurden. Dies könnte dazu beitragen, die Vergleichbarkeit von Messergebnissen zu verbessern und die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten.

- **Schulung und Qualifizierung des Personals:**

Angesichts der Komplexität der Einflussfaktoren, die im Rahmen des FE-Vorhabens auf die Messung des Luftgehalts untersucht wurden, ist es von entscheidender Bedeutung, das Personal, das für die Versuchsdurchführung verantwortlich ist, angemessen in der sensiblen Prüftechnik zu schulen und zu qualifizieren. Dies könnte dazu beitragen, die Fehleranfälligkeit bei der Prüfdurchführung zu minimieren und die Genauigkeit der Ergebnisse zu verbessern. In diesem Zusammenhang wird empfohlen, die Kalibrierrate der Prüftechnik zu erhöhen, einen schonenden Umgang zu pflegen und eine gründliche Reinigung nach der Prüfung sicherzustellen.

Daraufhin besteht weiterer deutlicher Forschungsbedarf zu folgenden Thematiken:

- **Optimierung des Prüfregimes:**

Zukünftiger Forschungsbedarf könnte darauf abzielen, das Prüfregime weiter zu optimieren sowie digitale Prozesse zu integrieren, um die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Luftgehaltmessung zu steigern. Dies könnte die Weiterentwicklung von Richtlinien und Standards für die Luftgehaltsprüfung, insbesondere für Straßenbeton, fördern.

- **Weiterentwicklung der Prüftechnik:**

Es besteht deutlicher Bedarf an der Entwicklung und Validierung verbesserter Prüftechniken, die präzisere und zuverlässigere Messergebnisse liefern können. Das FE-Vorhaben hat ausführlich gezeigt, dass Luftgehaltmessungen mit höheren Prüfdrücken über 1 bar auch zu präziseren Ergebnissen geführt hat. Die Versuche haben im Weiteren aufgezeigt, dass Potenzial besteht, die Luftporenverteilung bereits am Frischbeton abschätzen zu können. Um die Reproduzierbarkeit, die Handhabung und die subjektiven Einflüsse durch das Personal zu reduzieren, sind digitalisierte Prozessabläufe zu empfehlen. Dies könnte die Einführung neuer Prüfgeräte oder Verfahren zur Luftporengehaltmessung fördern und die Qualität der Straßenbetone insgesamt steigern.

- **Weitere Untersuchungen der Prüftechnik zur Erfassung der Festbetonluftporenkennwerte:**

Angesichts der beobachteten Unterschiede zwischen zwei unabhängigen Prüflaboren bei der Mikroskopieanalyse der Festbetone zur Ermittlung der Festbetonkennwerte nach TP B-StB 3.1.08 [N20] ist zu empfehlen, das Prüfverfahren grundlegend zu überarbeiten. Die Untersuchungen an identischen Proben zeigten, dass das Verfahren nur eine bedingte Wiederholbarkeit der Ergebnisse aufweisen kann. Aufgrund einer normativ geregelten entlang eines definierten Strahls optischen Auszählung der Luftporen können bereits minimale Verschiebungen der Auszählrichtung zu signifikanten Unterschieden in den Messwerten führen. Eine rechnergestützte Analyse hochauflösender Aufnahmen mit einer Bildverarbeitungsapplikation der Gesamtoberflächen der Prüfkörper kann vielversprechendere Ergebnisse der Luftporenverteilung an der Schnittfläche in relativ kurzer Zeit erfassen. Eine Korrelation der auf beschriebene Weise generierten Ergebnisse mit den aktuellen normativ geregelten Verfahren ist zu untersuchen.

- **Evaluierung von Betonen mit neuartigen, umweltschonenden Betonkomponenten:**

Zukünftige Studien könnten sich angesichts der erforderlichen Einsparungen an CO<sub>2</sub> im Bausektor darauf konzentrieren, die Auswirkungen verschiedener Betonzusammensetzungen inklusive dem Einsatz neuartiger Teil- oder Ersatzkomponenten für den Zement oder Rezyklatmaterialien auf den Luftgehalt im Frischbeton und deren Messung genauer zu bewerten sowie Empfehlungen für optimale Mischungen zu entwickeln. Dies könnte dazu beitragen, die Praxis der Betonherstellung umweltfreundlicher zu gestalten und die Dauerhaftigkeit von Straßenbetonen zu erhöhen.

## Literatur

- [1] AUBERG, R. (1999): Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands mit dem CDF- und CIF-Test. Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften, Hrsg. M. J. Setzer, Shaker Verlag, Aachen, Band 6
- [2] BECKER, C.; WIELAND, M. (2017): Fahrbahnoberflächen - Entwicklungen im Betonstraßenbau. In: Beton- und Stahlbetonbau Spezial, S. 54 – 62
- [3] BEVANDA, I. (2011): Modifizierter CIF-Test. Auswirkungen gelöster Ionen auf die Frostschädigung bei reinem Frostangriff. Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften, Hrsg. M. J. Setzer, Cuvillier Verlag Göttingen, Heft 16
- [4] BLÜMEL, O. W., SPRINGENSCHMID, R. (1979): Grundlagen und Praxis der Herstellung und Überwachung von Luftporenbeton. Straßen- und Tiefbau 24(2), S. 85-98
- [5] BOTTKE, R. (1998): Qualitätssicherung des Betons mit Luftporen-Topf. ARCONIS 1/98
- [6] BOTTKE, R. (2016): Voraussetzung für zuverlässige Messwerte des Luftgehaltes von Frischbeton mit Luftgehaltsprüfer nach dem Druckausgleichsverfahren nach DIN EN 12350 (Pressure Air Meter, ASTM C231 type B). In: Betonwerk International, 2016, H.5, S. 60-67. ISSN 1439-7706
- [7] BOTTKE, R. (2017): Voraussetzung für zuverlässige Messwerte des Luftgehalts von Frischbeton. Beton (67), Heft 4, S. 114 – 118
- [8] BROWN, L. S., PIERSON, C. U. (1951): Linear Traverse Technique for Measurement of Air in Hardened Concrete. Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, Bulletin 35, Chicago. Reprint from Journal of the American Concrete Institute (Oct. 1950), Proceedings, 47, p. 117-123
- [9] DANSK BETON TEKNIK, Air Void Analyser (AVA-Messgerät), <http://germann.org/products-by-application/air-void-system-parameters/ava>, abgerufen: 27.07.2022
- [10] DEUTSCHE BAUCHEMIE (DBC) E.V. (2013): Informationsschrift - Herstellen von LP-Beton. 2. Ausgabe, Frankfurt
- [11] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (DAfStb) (2020): Sachstandbericht Frischbeton – Eigenschaften, Einflüsse und Prüfungen. Heft 637, Berlin
- [12] DURIC, Z. (2017): Sättigungsverhalten und Schädigung von Zementstein bei Frostbeanspruchung. Dissertation, KIT, Karlsruhe
- [13] EICKSCHEN, E. (2003): Einflüsse auf die Luftporenbildung im Straßenbeton. Beton 53 H. 5, S. 265–270 und H. 6, S. 321–326
- [14] EICKSCHEN, E.: Nachaktivierungspotenzial Luftporen bildender Betonzusatzmittel. In: Beton Heft 10, 11, 12, s. 407-412, S. 509 – 512
- [15] EICKSCHEN, E., SIEBEL, E. (2001): Einflüsse auf die Luftporenbildung im Straßenbeton. Straße und Autobahn 52 H. 9, S. 517–521
- [16] EICKSCHEN, E.; MÜLLER, C. (2018): Erweiterte Erstprüfung für Luftporenbeton mit Fließmittel unter Berücksichtigung baupraktischer Bedingungen. In: beton 10+11/2018, S. 393-399 + S. 443-447
- [17] ERBAYDAR, S. (1987): Eisbildung, Volumendilatation und Wassertransport im Gefüge von Beton bei Temperaturen bis -60 °C. Dissertation TU München
- [18] EVERET, D. H., HAYNES, J. M. (1975): The Thermodynamics of Fluid Interfaces in a Porous Medium. Part II. Capillary Condensation, Surface Area and pore Size Distribution Determination and Hysteresis. Zeitung für Physikalische Chemie Neue Folge 97, S. 301-312
- [19] FAGERLUND, G. (1997): Frost Attack as a Moisture Mechanics Problem. RILEM Workshop Universität Essen, S. 23-27
- [20] FLEISCHER, W. (1997): Beton mit hohem Frost- und Frosttaumittel-Widerstand. Beton 47 H. 5, S. 266–273

- [21] GRÜBL, P., SOTKIN, A. (1980): Rapid Ice Formation in hardened Cement Paste, Mortar and Concrete due to Supercooling. *Cement and Concrete Research*, 10, p. 333-345
- [22] GRÜBL, P. WEIGLER, H. KARL, S. (1989): *Betonarten, Herstellung und Eigenschaften*. Hrsg. H. Kupfer, Verlag Ernst Sohn
- [23] DABROWSKI, M. et al (2019) Validation of Sequential Pressure Method for Evaluation of the Content of Microvoids in Air Entrained Concrete. *Construction and Building Materials* 227:116633
- [24] HALL, H., LEY, M. T. WELCHEL, D., PEERY, J., LEFLORE, J. KHATIBMASJEDI, M, GUDIMETTLA, J. M., PRAUL, M. (2020): Field and Laboratory Validation of the Sequential Air Method. *Materials and Structures* 53:14, p. 13-26,
- [25] HALL BECKER, H., LEY, M. T. WELCHEL, D., PEERY, J., LEFLORE, J., BRORSEN, B. W. (2021): Determining the AIR VOID Efficiency of Fresh Concrete Mixtures with the Sequential air method. *Construction and Building Materials* 288 122865, p. 1-9
- [26] HARNIK, A. B., MEIER, U., RÖSLI, A. (1980): Combined Influence of freezing and deicing Salt on Concrete – Physical Aspects: Durability of Building Materials and Components. ASTM STP 691, P. J. Sereda and G. G. Litvan, American Society for Testing and Materials, p. 474-484
- [27] HOVER, K. C. (1989): Some Recent Problems with Air-Entrained Concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, CCAGDP, Vol.11, No. 1,1989, p.67-72
- [28] HOVER, K. C.; PHARES, R. J. (1995): Impact of Concrete Placing Method on Air Content, Air-Void System Parameters, and Freeze-Thaw Durability" *Transportation Research Record* Volume 1532, p. 1-8
- [29] HUMBOLDT: Air Meters, Testing Equipment for Constructions Materials. <https://www.humboldtmsg.com/humboldt-concrete-air-meter-new-case.html>, abgerufen 30.04.2024
- [30] KLEIN, W., WALKER, ST. (1946): A Method for Direct Measurement of Entrained Air in Concrete. *Journal of ACI*, Vol. 17, No. 6
- [31] KROHM, W. (2018): KroBet-Bedienung\_Prüfgerät-plast-180829, Präsentation, unveröffentlicht
- [32] LITVAN, G. G. (1973) Frost Action in Cement Paste. *Materials and Structures*, Heft Vol. 6, No. 34, p. 293-298
- [33] LYE, M. T. (2015): Super Air meter• ACI Pittsburgh Area Chapter, Chapter news.
- [34] LYE, M. T., WELCHEL, D., PEERY, J., LEFLORE, J. (2017): Determining the air-void distribution in fresh concrete with the Sequential Air Method. *Construction and Building Materials* 150, p. 723-737
- [35] MEININGER, R. C. (1981): Use of Fly Ash in Air Entrained Concrete, -Report of Recent NSGA-NRMCA Research Laboratory Studies, report of the National Ready-Mixed Concrete Association, Silver Spring, MD
- [36] MENZEL, C. A. (1947): Development and Study of Apparatus and Methods for the Determination of the Air Content of Fresh Concrete, *Journal of ACI*, Vol. 18, No. 9, p. 1053-1072
- [37] NAGI, M. A., WHITING, D. A. (1994): Achieving and Verifying Air Content in Concrete. *Portland Cement Association, Research and Development Information*, RP324.01T
- [38] OZYILDIRIM, C. (1991): Comparison of the Air Contents of Freshly Mixed and Hardened Concretes. *Cement, Concrete and Aggregates*, CCAGDP, Vol.13, No. 1, 1991, p.11-17
- [39] PALECKI, S. (2006): Hochleistungsbeton unter Frost-Tau-Wechselbelastung. Schädigungs- und Transportmechanismen. *Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften*, Hrsg. M. J. Setzer, Cuvillier Verlag Göttingen, Heft 9
- [40] PICHOTTKA, S. (2014): Spaltzugfestigkeit als Eingangsgröße in die Bemessung von Fahrbahndecken aus Beton. *Stahnsdorf*, In: *Griffig* 1/2014, S. 5
- [41] PODVALNYI, A. M. (1976): Phenomenological Aspect of Concrete Durability Theory. *Materials and Structures* 9, p. 151-162

- [42] POWERS, T.C. (1945): A working Hypothesis for further Studies of Frost Resistance of Concrete. *Journal of ACI Proc.*, 41 p. 245-272
- [43] POWERS, T.C., HELMUTH, R. A. (1953): Theory of Volume Changes in hardened Portland Cement Pastes during Freezing. *Highway-Research Board Proceedings*, Vol. 32 p. 285-297
- [44] RÖSLI, A. (1985): Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton. *Schweizer Bauwirtschaft*, Heft 25, S. 27-32
- [45] SCHÄFER, A. (1964): Frostwiderstand und Porengefüge des Betons. Beziehungen und Prüfverfahren. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 167, Verlag Wilhelm Ernst und Sohn
- [46] SCHULTE HOLTHAUSEN, R., RAUPACH, M., MERKEL, M., BREIT, W.: Zerstörungsfreie Bestimmung der Auslaugung von Beton mittels einseitiger Wasserstoff-Kernspinresonanz. *Bautechnik* 97 (2020), H. 10, S. I-III
- [47] SETZER, M. J. (1975): Zum Mikrogefüge des Zementsteins und dessen Einfluss auf das mechanische Verhalten des Betons. Sonderdruck Zement und Beton, S. 29-34
- [48] SETZER, M. J. (1977): Einfluss des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 280
- [49] SETZER, M. J. (1999): Mikrolinsbildung und Frostschaaden. In: *Werkstoffe im Bauwesen – Theorie und Praxis*, H.-W. Reinhardt zum 60. Geburtstag, S. 397-413
- [50] SETZER, M. J. (1999): Development of Micro-Ice-Lens Model. RILEM proceedings on Frost Resistance of Concrete (Hrsg. Setzer, Auberg), p. 193-200
- [51] SETZER, M. J. (2001): Micro-Ice-Lens Formation in porous Solid. *J. Coll. Interface Science*, 243, p. 193-201
- [52] SETZER, M. J. (2009): Physikalische Grundlagen der Frostschaadigung von Beton.6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Universität Karlsruhe (TH), 12. März
- [53] SETZER, M. J., HARTMANN, V. (1991): CDF-Test Prüfvorschrift. *Betonwerk + Fertigteil-Technik* 57(9), S. 73-82, CDF-Testspezifikationen S. 73-82
- [54] SIEBEL, E. (1995): Einflüsse auf die Luftporenkennwerte und den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. *Beton* 45 H. 10, S. 724–730
- [55] SIEBEL, E.; EICKSCHEN, E. (1993): Bestimmung der Luftporenkennwerte am Frischbeton. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* Heft 640. Hrsg. Bundesminister für Verkehr, Abtlg. Straßenbau, Bad Godesberg
- [56] SIEBEL, E. et al (2005): Sachstandsbericht – Übertragbarkeit der Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 560, Beuth Verlag
- [57] SNYDER, K. A., CLIFTON, J. R., KNAB, L. I. (1994): Freeze-Thaw Susceptibility of High Performance Concrete. *Wiss. Z. Hochsch. Archit. Bauwes.*, Heft 5/6/7, S. 139-142
- [58] SPRINGENSCHMID, R. (2000): Technische Grundlagen des Betonstraßenbaus und ihre Umsetzung in die Praxis – gestern, heute, morgen. *Straße und Autobahn* 51 H. 3, S. 184–191
- [59] STARK, J., LUDWIG, H. M. (1994): Frost- und Tausalz-Widerstand von Beton – ein rein physikalisches Problem? *Wissenschaftliche Zeitung der Hochschule Weimar* 40 (56-7), S. 95-104
- [60] STARK, J., WICHT, B. (2013): *Dauerhaftigkeit von Beton*. Springer Vieweg Verlag
- [61] TANESI, J., KIM, H., BEYENCE, M., ARDANI, A. A. (2015): Super Air Meter for Assessing Air-Void-System of Fresh Concrete. Conference: 94th Transportation Research Board Annual Meeting. Washington DC, Jan. 2015, p.1-14, <https://www.researchgate.net/publication/271839732>
- [62] TANESI, J., MEININGER, R. (2007): Freeze-Thaw Resistance of Concrete with Marginal Air Content. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, No. 2020, Transportation Research Board of National Academies, Washington, D. C. 2007, p.61-66
- [63] TREMPER, B., GOODING, W. L. (1948): Washington Method of Determining Air in Fresh Concrete, presented at 1meeting of the Highway Research Board

- [64] WALZ, K. (1956): Luftporenbildende Betonzusatzmittel. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 123, Verlag Wilhelm Ernst und Sohn

## Normen und Regelwerke

- [N1] ASTM C173 / C 173M:2009 – Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method, 2009
- [N2] ASTM C231 / C 231M:2017 – Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method, 2017
- [N3] ASTM C457-08d Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, 2009
- [N4] DIN EN 197-1:2011-11 (2011) Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement, Beuth, Berlin, 2011
- [N5] DIN EN 206-1:2017-01: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016, Beuth, Berlin, 2017
- [N6] 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
- [N7] DIN EN 933-1, 2012-03: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:2012
- [N8] DIN EN 934-2:2012-08 (2012) Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Betonzusatzmittel – Teil 2: Definitionen, Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung; Deutsche Fassung EN934-2:2009+A1:2012, Beuth, Berlin, 2012
- [N9] DIN EN 1008:2002-10: Zugabewasser für Beton. Festlegung für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser, einschließlich bei der Betonherstellung anfallendem Wasser, als Zugabewasser für Beton. Deutsche Fassung EN 1008:2002
- [N10] DIN 1045-2:2008-08 (2008) Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Beuth, Berlin, 2008
- [N11] DIN EN 1097-6, 2022-05: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; Deutsche Fassung EN 1097-6:2022
- [N12] DIN EN 12350-4, 2009-08: Prüfung von Frischbeton – Teil 4: Verdichtungsmaß; Deutsche Fassung EN 12350-4:2009
- [N13] DIN EN 12350-5, 2009-08: Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5:2009
- [N14] DIN EN 12350-6, 2011-03: Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbeton-Rohdichte; 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] DIN EN 12390-3, 2019-10: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2019
- [N17] DIN CEN/TS 12390-9, DIN SPEC 91167:2017-05: Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung, Deutsche Fassung CEN/TS 12390-9:2016
- [N18] DIN 66137-2, 2019-03: Bestimmung der Dichte fester Stoffe –Teil 2: Gaspyknometrie, 2019
- [N19] TP Beton-StB 10- Technische Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. FGSV 892, 2010

- [N20] TP B-StB 17 – Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen. FGSV 893, 2017
- [N21] TL Beton-StB 07 - Technische Lieferbedingung für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. FGSV 891, 2007
- [N22] TL Gestein-StB 18 – Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau. FGSV 613, 2004/2018
- [N23] ZTV Beton-StB 07 - Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. FGSV 899, 2007
- [N24] FORSCHUNG FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV); Arbeitsgruppe „Betonbauweisen“: Merkblatt für bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen aus Beton, FGSV 823 (R2), FGSV Verlag, Köln, 2009
- [N25] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV) R1: RDO Beton 09 – Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen, 2009
- [N26] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN (FGSV): Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton., Köln, 2004
- [N27] GERMANN INSTRUMENTS A/S: Instruction and Maintenance Manual for Air Void Analyzer, AVA-3000. for assessment of the Air Void Structures in fresh, plastic concrete, Copenhagen, 2015.
- [N28] Patent Nr. 10 2020 000 572 – Verfahren und Gerät zur Untersuchung von Frischbeton mit künstlich eingeführten Luftporen. Erfinder Bottke, R., Baumert, Ch., Veröffentlichung der Patenterteilung 17.02.2022

## Tabellen

- Tab. 2-1: Einteilung der Porengröße nach Setzer [49] aus [12]
- Tab. 2-2: Gefrierpunkt des Porenwassers in den entsprechenden Porenklassen [49, 56], modifiziert [12]
- Tab. 2-3: Schadensmechanismen infolge Frostbeanspruchung nach [39]
- Tab. 2-4: Wichtige Einflussgrößen auf den LP-Gehalt im Frischbeton [60]
- Tab. 2-5: Mögliche Ursachen für die Diskrepanzen zwischen den gemessenen LP-Gehalten beim Frisch- und Festbeton [37]
- Tab. 3-1: Verwendete nationale bzw. alternative LP-Prüfgeräte und dessen berichtinterne Bezeichnung
- Tab. 3-2: Arbeitsphase 1 – Überblick über die Betonzusammensetzung der Grundrezepturen für Oberbeton als Waschbeton und Unterbeton
- Tab. 3-3: Übersicht der Voruntersuchungen zum Prüfregime
- Tab. 3-4: Untersuchungsprogramm der Voruntersuchung zur Bestimmung des Prüfregimes
- Tab. 3-5: Versuchsmatrix zur Vergleichsuntersuchung
- Tab. 3-6: Arbeitsprogramm für die gerätetechnischen Vergleichsuntersuchungen mit Mengenkalkulation des Frischbetons und Probekörperanzahl je Betonrezeptur
- Tab. 4-1: Eigenschaften des Zementes
- Tab. 4-2: Korngrößenverteilung der verwendeten Gesteinskörnung
- Tab. 4-3: Ausgewählte Eigenschaften der Gesteinskörnungen
- Tab. 4-4: Betonzusatzmittel
- Tab. 4-5: Grundrezepturen
- Tab. 4-6: Mischregime

- Tab. 4-7: Überblick – Rezepturkennzeichnung der Vergleichsuntersuchungen (Rezeptur-ID)
- Tab. 6-1: Ergebnisse der Kalibrierung des HYDRO\_5\_T\_6L vor den Voruntersuchungen zum Prüfregime
- Tab. 6-2: Häufigkeitsverteilung der FB-Rohdichtendifferenzen in % (Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min)
- Tab. 6-3: Häufigkeitsverteilung der FB-Rohdichtendifferenzen in % (Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min)
- Tab. 6-4: Häufigkeitsverteilung der FB-Luftporengehaltendifferenzen in % (Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min)
- Tab. 6-5: Häufigkeitsverteilung der FB-Luftporengehaltendifferenzen in % (Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min)
- Tab. 6-6: Häufigkeitsverteilung der FB-Wassergehaltendifferenzen in % (Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min)
- Tab. 6-7: Häufigkeitsverteilung der FB-Wassergehaltendifferenzen in % (Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min)
- Tab. 6-8: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Probeentnahme“ ( $t > 10$  min)
- Tab. 6-9: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Probeentnahme“ ( $t > 60$  min)
- Tab. 6-10: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Verdichtungsart“ ( $t > 10$  min)
- Tab. 6-11: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Verdichtungsart“ ( $t > 60$  min)
- Tab. 6-12: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Verdichtungslagen“ ( $t > 10$  min)
- Tab. 6-13: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Verdichtungslagen“ ( $t > 60$  min)
- Tab. 6-14: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Verdichtungsintensität“ ( $t > 10$  min)
- Tab. 6-15: Messwertabweichungen der Variation des Prüfregimes „Verdichtungsintensität“ ( $t > 60$  min)
- Tab. 6-16: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Verdichtungsdauer“ ( $t > 10$  min)
- Tab. 6-17: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Verdichtungsdauer“ ( $t > 60$  min)
- Tab. 6-18: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Einfüllprozess“ ( $t > 10$  min)
- Tab. 6-19: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „Einfüllprozess“ ( $t > 60$  min)
- Tab. 6-20: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „FB-Temperatur“ ( $t > 10$  min)
- Tab. 6-21: Messwertabweichungen bei der Variation des Prüfregimes „FB-Temperatur“ ( $t > 60$  min)
- Tab. 6-22: Zusammenfassung - Einfluss des Prüfregimes auf FB-Luftporengehalt;  
Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min
- Tab. 6-23: Zusammenfassung - Einfluss des Prüfregimes auf FB-Luftporengehalt;  
Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min
- Tab. 7-1: Ergebnisse der Tastversuche an Oberbetonen zum Aufspannen der Versuchsmatrix
- Tab. 7-2: Ergebnisse der Tastversuche an Unterbetonen zum Aufspannen der Versuchsmatrix
- Tab. 8-1: Mittelwerte der Frischbetonenndaten der Oberbetonrezepturen
- Tab. 8-2: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen; Oberbetone mit niedrigem LP-Gehalt
- Tab. 8-3: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen; Oberbetone mit mittlerem LP-Gehalt
- Tab. 8-4: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen; Oberbetone mit hohem LP-Gehalt
- Tab. 8-5: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen; Unterbetone mit niedrigem LP-Gehalt
- Tab. 8-6: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen; Unterbetone mit mittlerem LP-Gehalt
- Tab. 8-7: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen; Unterbetone mit hohem LP-Gehalt
- Tab. 8-8: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen - alternative Prüfgeräte; Oberbetone mit niedrigem LP-Gehalt

- Tab. 8-9: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen - alternative Prüfgeräte; Oberbetone mit mittlerem LP-Gehalt
- Tab. 8-10: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen - alternative Prüfgeräte; Oberbetone mit hohem LP-Gehalt
- Tab. 8-11: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen - alternative Prüfgeräte; Unterbetone mit niedrigem LP-Gehalt
- Tab. 8-12: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen - alternative Prüfgeräte; Unterbetone mit mittlerem LP-Gehalt
- Tab. 8-13: Rechnerisch ermittelte Messwertabweichungen - alternative Prüfgeräte; Unterbetone mit hohem LP-Gehalt
- Tab. 8-14: Spaltzugfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Oberbetone - Prüfzeitpunkt:  $t > 10$  min
- Tab. 8-15: Spaltzugfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Oberbetone - Prüfzeitpunkt:  $t > 60$  min
- Tab. 8-16: Spaltzugfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Unterbetone - Prüfzeitpunkt:  $t > 10$  min
- Tab. 8-17: Spaltzugfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Unterbetone - Prüfzeitpunkt:  $t > 60$  min
- Tab. 8-18: Druckfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Oberbetone - Prüfzeitpunkt:  $t > 10$  min
- Tab. 8-19: Druckfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Oberbetone - Prüfzeitpunkt:  $t > 60$  min
- Tab. 8-20: Druckfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Unterbetone - Prüfzeitpunkt:  $t > 10$  min
- Tab. 8-21: Druckfestigkeit: Auswertung der Trendgeraden der Unterbetone - Prüfzeitpunkt:  $t > 60$  min
- Tab. 8-22: Spannweite der Streuung der einzelnen Prüftechniken beim Einsatz an Oberbetonen
- Tab. 8-23: Spannweite der Streuung der einzelnen Prüftechniken beim Einsatz an Unterbetonen

## Bilder

- Bild 2-1: Größenvergleich von Feststoffen und Poren im Beton nach [48]
- Bild 2-2: Schichtenweises Gefrieren von Beton infolge von Tausalz [4]
- Bild 2-3: Mikroeislinnen-Modell, Vergleich zwischen makroskopischer (links) und submikroskopischer (rechts) Skala [52]
- Bild 2-4: Prüfgerät für das Druckausgleichsverfahren [N15] (links), Super Air Meter (SAM) [29] (rechts)
- Bild 2-5: Eine grafische Darstellung der Drücke in der oberen und unteren Kammer des SAM [34]
- Bild 2-6: Luftgehalt im Frischbeton im Vergleich zum Abstandsfaktor im Festbeton anhand von 231 Betonen aus Feldversuchen [24]
- Bild 2-7: SAM-Number beim Frischbeton im Vergleich zum Abstandsfaktor beim Festbeton. Die Ergebnisse zeigen 70 % Übereinstimmung [24]
- Bild 2-8: Air Void Analyzer (AVA-3000) – Bestimmung der Luftporenkennwerte am Frischbeton – Befüllen mit Mörtelprobe und Darstellung des Messprinzips durch Wägung der aufsteigenden Luftporen [N27]
- Bild 2-9: HYDRO\_5\_T\_6L (links), HYDRO\_5\_W\_3,4L (rechts)
- Bild 2-10: Definition der Luftporenkennwerte [10, 45]

- Bild 3-1: Prinzipielles Vorgehen innerhalb des Arbeitsprogramms
- Bild 3-2: Auswahl national genormter LP-Prüfgeräte
- Bild 3-3: Alternative Prüfgeräte; HYDRO\_5\_W\_3,4L und HYDRO\_5\_T\_6L (links); AVA-3000 und SAM\_6L (rechts)
- Bild 4-1: rechts: Sieblinie Grundrezeptur Oberbeton (D = 8 mm); links: Sieblinie Grundrezeptur Unterbeton (D = 22 mm)
- Bild 4-2: Zusammensetzung der Rezeptur-ID
- Bild 4-3: Spaltzugfestigkeitsprüfkörper - Schema der Aufbereitung
- Bild 6-1: Übersicht aller Prüfergebnisse zum Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min
- Bild 6-2: Übersicht aller Prüfergebnisse zum Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min
- Bild 6-3: Häufigkeitsverteilung der FB-Rohdichtendifferenzen (Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min)
- Bild 6-4: Häufigkeitsverteilung der FB-Rohdichtendifferenzen (Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min)
- Bild 6-5: Häufigkeitsverteilung der FB-Luftporengehaltendifferenzen (Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min)
- Bild 6-6: Häufigkeitsverteilung der FB-Luftporengehaltendifferenzen (Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min)
- Bild 6-7: Häufigkeitsverteilung der FB-Wassergehaltendifferenzen (Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min)
- Bild 6-8: Häufigkeitsverteilung der FB-Wassergehaltendifferenzen (Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min)
- Bild 6-9: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Probeentnahme“ ( $t > 10$  min)
- Bild 6-10: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Probeentnahme“ ( $t > 60$  min)
- Bild 6-11: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungsart“ ( $t > 10$  min)
- Bild 6-12: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungsart“ ( $t > 60$  min)
- Bild 6-13: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungslagen“ ( $t > 10$  min)
- Bild 6-14: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungslagen“ ( $t > 60$  min)
- Bild 6-15: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungsintensität“ ( $t > 10$  min)
- Bild 6-16: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungsintensität“ ( $t > 60$  min)
- Bild 6-17: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungsdauer“ ( $t > 10$  min)
- Bild 6-18: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Verdichtungsdauer“ ( $t > 10$  min)
- Bild 6-19: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Einfüllprozess“ ( $t > 10$  min)
- Bild 6-20: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „Einfüllprozess“ ( $t > 60$  min)
- Bild 6-21: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „FB-Temperatur“ ( $t > 10$  min)
- Bild 6-22: Ermittelte FB-Rohdichten und FB-Luftporengehalte; Variation „FB-Temperatur“ ( $t > 60$  min)
- Bild 8-1: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 1-N-1; Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min

- Bild 8-2: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 1-N-1; Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min
- Bild 8-3: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 1-M-1; Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min
- Bild 8-4: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 1-M-1; Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min
- Bild 8-5: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 1-H-1; Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min
- Bild 8-6: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 1-H-1; Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min
- Bild 8-7: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 2-N-1; Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min
- Bild 8-8: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 2-N-1; Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min
- Bild 8-9: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 2-M-1; Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min
- Bild 8-10: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 2-M-1; Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min
- Bild 8-11: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 2-H-1; Prüfzeitpunkt  $t > 10$  min
- Bild 8-12: Vergleichsuntersuchung: konventionelle Prüfgeräte; Rezepturen: 2-H-1; Prüfzeitpunkt  $t > 60$  min
- Bild 8-13: Vergleichsuntersuchung: alternative Prüfgeräte; Rezepturen: 1-N-2
- Bild 8-14: Vergleichsuntersuchung: alternative Prüfgeräte; Rezepturen: 1-M-2
- Bild 8-15: Vergleichsuntersuchung: alternative Prüfgeräte; Rezepturen: 1-H-2
- Bild 8-16: Vergleichsuntersuchung: alternative Prüfgeräte; Rezepturen: 2-N-2
- Bild 8-17: Vergleichsuntersuchung: alternative Prüfgeräte; Rezepturen: 2-M-2
- Bild 8-18: Vergleichsuntersuchung: alternative Prüfgeräte; Rezepturen: 2-H-2
- Bild 8-19: Ergebnisse der Ermittlung der Luftporenkennwerte an Oberbetonen; links: Messwerte aus Vergleichen der konventionellen Prüftechnik; rechts: Messwerte aus Vergleichen der alternativen Prüftechnik
- Bild 8-20: Ergebnisse der Ermittlung der Luftporenkennwerte an Unterbetonen; links: Messwerte aus Vergleichen der konventionellen Prüftechnik; rechts: Messwerte aus Vergleichen der alternativen Prüftechnik
- Bild 8-21: Ermittelte Luftporenkennwerte an Oberbetonen. Erste Vergleichsuntersuchung
- Bild 8-22: Ermittelte Luftporenkennwerte an Unterbetonen. Erste Vergleichsuntersuchung
- Bild 8-23: Ermittelter Mikro-Luftporengehalt an Oberbetonen. Zweite Vergleichsuntersuchung
- Bild 8-24: Ermittelter Abstandsfaktor und SAM-Number an Oberbetonen. Zweite Vergleichsuntersuchung

- Bild 8-25: Ermittelter Mikro-Luftporengehalt an Unterbetonen. Zweite Vergleichsuntersuchung
- Bild 8-26: Ermittelter Abstandsfaktor und SAM Number an Unterbetonen. Zweite Vergleichsuntersuchung
- Bild 8-27: Gegenüberstellung des Abstandsfaktors L mit zugehöriger SAM-Number gleicher Betone
- Bild 8-28: Ergebnisse der Porengrößenverteilung am Oberbeton 1-M-0,40-2
- Bild 8-29: Ergebnisse der Luftporenverteilung am Oberbeton 1-M-0,45-2
- Bild 8-30: Ergebnisse der Luftporenverteilung am Oberbeton 1-M-0,50-2
- Bild 8-31: Ergebnisse der Luftporenverteilung am Unterbeton 2-M-0,40-2
- Bild 8-32: Ergebnisse der Luftporenverteilung am Unterbeton 2-M-0,45-2
- Bild 8-33: Ergebnisse der Luftporenverteilung am Unterbeton 2-M-0,50-2
- Bild 8-34: Ermittelte Spaltzugfestigkeitsergebnisse der untersuchten Oberbetone (D = 8 mm)
- Bild 8-35: Ermittelte Spaltzugfestigkeitsergebnisse der untersuchten Unterbetone (D = 22 mm)
- Bild 8-36: Ermittelte Druckfestigkeitsergebnisse der untersuchten Oberbetone (D = 8 mm)
- Bild 8-37: Ermittelte Druckfestigkeitsergebnisse der untersuchten Unterbetone (D = 22 mm)
- Bild 8-38: Maximale Streubereiche der Prüftechnik ermittelt an Oberbetonen
- Bild 8-39: Maximale Streubereiche der Prüftechnik ermittelt an Unterbetonen
- Bild 8-40: Verteilung der Messwertabweichungen ermittelt an Oberbetonen zum ersten Prüfzeitpunkt
- Bild 8-41: Verteilung der Messwertabweichungen ermittelt an Oberbetonen zum zweiten Prüfzeitpunkt
- Bild 8-42: Verteilung der Messwertabweichungen ermittelt an Unterbetonen zum ersten Prüfzeitpunkt
- Bild 8-43: Verteilung der Messwertabweichungen ermittelt an Unterbetonen zum zweiten Prüfzeitpunkt
- Bild 8-44: Verteilung der Messwertabweichung ausgewählter Prüftechnik ermittelt an Oberbetonen
- Bild 8-45: Verteilung der Messwertabweichung ausgewählter Prüftechnik ermittelt an Unterbetonen

# Schriftenreihe

## Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Straßenwesen“

### 2023

**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 grundhafte Erneuerung auf dem duraBAST**

Alte-Teigeler, Britz, Kispert, Riwe, Tschernack, Villaret, Lüdi

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

**S 201: Textilbewehrter Oberbeton als Basis für eine fugenlose Oberfläche von Betonfahrbahnen**

Breitenbücher, Neumann, Curbach, Baumgärtel

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

### 2024

**S 202: Schaffung von Grundlagen für eine einheitliche Erfassung der Maschinenrohdaten im Seitenkraftmessverfahren – Weiterentwicklung der SKM-Griffigkeitsmessung durch Berücksichtigung der gemessenen Vertikalkraft**

Jürgen Schmidt, Julius Schmidt, Johannes Schmidt, Müller

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

**S 203: Prognose der Wirtschaftlichkeit von Betonfahrbahndecken – Bauweisen RStO/RDO**

Beckenbauer, Gebhardt, Riwe, Tschernack, Villaret

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

**S 204: Überprüfung der Auswirkungen der Anwendung der Filterregeln für Geokunststoffe des M Geok E**

Moormann, Liebl, Schlee

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

**S 205: Alternative Verfahren zur Beurteilung Offenporiger Asphaltdeckschichten hinsichtlich Hohlraumgehalt und Verdichtungszustand**

Roos, Plachkova-Dzhurova, Schwarzmann

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

**S 206: Weiterentwicklung der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltstraßen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit, Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit**

Neumann, Oeser, Reinhardt, Blasl, Canon Falla, Wellner, Kayser

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

## 2025

### **S 207: Optimierung der Kompositbauweise (Durchgehend bewehrte Betondecke mit dünner flexibler Deckschicht)**

Freudenstein, Dirnhofer, Eger

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

### **S 208: Verifizierung der Mischgutkonzeptionierung kaltgebundener bitumen-dominanter Tragschichten und Ableitung von Dimensionierungsgrundsätzen**

Radenberg, Staschkiewicz, Vienenkötter, Mollenhauer, Winter

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

### **S 209: Grundlagen für die Eignungsprüfung von Böden mit organischen Bestandteilen zur Verwendung als Baustoffe im Erdbau**

Uday, Huber, Birle, Cudmani

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

### **S 210: Prüfung und Bewertung der Dauerhaftigkeit „zeitweise fließfähiger und selbstverdichtender Verfüllbaustoffe (ZFSV)“ im Unterbau von Verkehrsflächen**

Zeni, Huber, Birle, Cudmani

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

### **S 211: Literaturstudie zur Nachhaltigkeit im Straßenbau**

Carreño, Schmitz, Kemper, Cypra, Holldorb

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

### **S 212: Einfluss von temporär auftretendem Grundwasser auf die Standsicherheit von Straßeneinschnittsböschungen**

Denne, Festag, Gattermann

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

### **S 213: Einfluss der Pendelbewegung der Fahrzeuge des Schwerverkehrs auf die Beanspruchung und Nutzungsdauer von Straßenbefestigungen**

Uhlig, Schlimper, Seeger, Zeißler, Wellner, Blasl, Kathmann, Scharrenbroich, Roggendorf, Haas

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

### **S 214: Kritikalitätsanalyse für die Bundesverkehrswege als Baustein der Klimawirkungsanalyse**

Burg, Franken, Gebhardt, Hewel, Schrempp

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

### **S 215: Erstellung eines Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung und zur Prognose des Verhaltens von Pflasterbefestigungen**

Wellner, Zeißler, Spanier, Blasl

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

### **S 216: Prüfmethode zur validen Bestimmung von Luftporengehalten an Fahrbahndeckenbetonen**

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

Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: [kontakt@schuenemann-verlag.de](mailto:kontakt@schuenemann-verlag.de)

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.



ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-95606-844-7  
<https://doi.org/10.60850/bericht-s216>

[www.bast.de](http://www.bast.de)