

Lars Meyer, Serdar Bilgin, Sebastian Filusch
Thomas Freimann, Ulli Heinlein, Knut Herrmann

Bauwerksabdichtung mit Frischbetonverbundfolie – Grundlagen zur Erstellung eines Regelwerks für eine innovative Bauart

F 3183

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0465-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

**Bauwerksabdichtung mit Frischbetonverbundfolie –
Grundlagen zur Erstellung eines Regelwerks für eine innovative Bauart**
Az.: SWD-10.08.18.7-17.44, Zuwendungsbescheid vom 20.07.2017

ENDBERICHT

| | |
|-----------------------------|---|
| Projektzeitraum: | 24. Juli 2017 bis 31. Oktober 2019 |
| Berichtszeitraum: | Juli 2017 bis Oktober 2019 |
| Fachliche Betreuung: | Fabian Brodbeck, M. Sc. (Fraunhofer IRB) |
| Forschende Stellen: | Folgende Institutionen unterstützen die Umsetzung der Arbeiten im Rahmen des Forschungsvorhabens durch Personalgestellung, experimentellen Untersuchungen bzw. der Mitarbeit im Begleitgremium: |
| DBV: | Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Berlin |
| THN: | Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Nürnberg |
| MPA BS: | Materialprüfanstalt für das Bauwesen (MPA BS), Braunschweig |
| Aufgestellt am: | 21. Oktober 2019 |
| Projektleiter: | Dr.-Ing. Lars Meyer (DBV) |
| Autoren: | Serdar Bilgin M. Sc. (DBV), Dipl.-Ing.(FH) Sebastian Filusch (DBV), Prof. Dr. Thomas Freimann (THN), Ulli Heinlein M. Eng. (THN), Dr.-Ing. Knut Herrmann (MPA) |

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Der Bericht umfasst 128 Seiten und zwei Anhänge.

Kurzzusammenfassung

Frischbetonverbundsysteme (FBVS) werden in Deutschland i. d. R. als zusätzliche wasserseitige Abdichtungsebene auf wasserundurchlässigen Stahlbetonkonstruktionen (WU-Betonkonstruktion) angeordnet. Sie sollen das Zuverlässigkeitsniveau von Kellerbauwerken hinsichtlich der Wasserundurchlässigkeit verbessern – gerade bei schwierigen Bauwerksrandbedingungen oder hohen Nutzungsanforderungen der Innenräume. FBVS werden im Gegensatz zu ‚klassischen‘ hautförmigen Abdichtungen vor dem Betoneinbau verlegt und gehen mit dem später aufgetragenen Frischbeton einen zugfesten sowie wasserundurchlässigen (hinterlaufsicheren) Verbund ein. Letzterer verhindert u. a. seitliche Wasserbewegungen in der Verbundschicht, wenn es zu Beschädigungen der Dichtschicht kommen sollte.

Diese Form der Bauwerksabdichtung wird in Deutschland vermehrt seit 2012 eingesetzt und ist als neue Bauart bisher keinen Regelwerken zuzuordnen. Zum einen werden die FBVS i. d. R. nicht als eigenständige Abdichtung nach DIN 18533 angesehen, zum anderen werden sie derzeit nicht in der DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“ behandelt. Der Verwendbarkeitsnachweis wurde bisher über allgemein bauaufsichtliche Prüfzeugnisse (abP) erbracht, der allerdings nicht auf einheitlichen Prüfgrundsätzen beruhte. Wesentliche Merkmale verschiedener Produkte können daher nur schwer miteinander verglichen werden. Neben diesen Unklarheiten zur Vergleichbarkeit von Produkten sind am Markt nach wie vor zahlreiche Planungs- und Anwendungsfragen zur Bauart vorhanden.

Aus den genannten Gründen wurde vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (DBV) im Jahr 2017 ein Arbeitskreis HABA-FBV gegründet, der zunächst einen Sachstandbericht (DBV-Heft 44) verfasste und zurzeit ein Merkblatt zu FBVS erarbeitet. Um die Bauweise darin fundiert behandeln zu können, waren noch grundlegende Fragestellungen zu den FBVS zu klären, die z. T. in diesem Forschungsvorhaben behandelt wurden. Unter anderem war die Regelwerkssituation zu analysieren, wesentliche Produkteigenschaften und zugehörige Prüfverfahren zu identifizieren, Merkmale der Bauweise in Laboruntersuchungen zu ermitteln und Empfehlungen für die Praxis auszuarbeiten.

Das Forschungsvorhaben sah dazu zehn Arbeitspakete vor, die nachfolgend kurz vorgestellt werden.

Zu Beginn sollte das Vorhaben die unklare Regelwerkssituation um die neuartige Bauweise klären. Dazu sollten bestehende Regelwerke sowie rechtliche Grundlagen recherchiert und die FBVS hinsichtlich ihrer bisherigen Verwendung in Deutschland bauordnungsrechtlich eingeordnet werden. Diese Einstufung konnte bereits in die Gremienarbeit des DBV-Arbeitskreises HABA-FBV miteinfließen und wurde im DBV-Heft 44 Ende 2018 veröffentlicht.

Um im späteren DBV-Merkblatt praxisnah auf die Anforderungen bzw. den Informationsbedarf der Beteiligten aus Planung und Bauausführung eingehen zu können, ist die derzeitige Praxiserfahrung in Form einer Umfrage evaluiert worden. Darauf aufbauend konnten zu Ende des Vorhabens die Untersuchungsergebnisse in Empfehlungen zur Anwendung und zu Maßnahmen der Qualitätssicherung ausgearbeitet werden.

Der dritte Teil des Vorhabens beschäftigte sich mit FBV-Produkteigenschaften und geeigneten Prüfverfahren für diese Systeme. Ziel davon war es, in einem späteren DBV-Merkblatt Prüfverfahren formulieren zu können, die die wesentlichen Produkteigenschaften der FBVS einheitlich prüfen und so übergreifend vergleichbar machen. Dazu wurden zuerst Produkteigenschaften von deutschen sowie ausländischen Produkten zusammengetragen, davon für die Bauweise wichtige Eigenschaften identifiziert und anschließend hierzu geeignete Prüfverfahren zugeordnet. Teilweise konnten Prüfnormen von anderen Abdichtungsbauarten übernommen werden, stellenweise wurden auch bestehende Prüfungen angepasst oder neue Prüfungen formuliert.

Weiterhin sollten bereits einige wesentliche Eigenschaften der FBVS in Laboruntersuchungen stichprobenartig geprüft werden. Von zehn im Projekt beteiligten Industriepartnern wurde jeweils ein FBVS-Produkt auf ausgewählte Eigenschaften hin geprüft. Es wurden vor allem Einflüsse auf den wasserundurchlässigen Verbund, der Einfluss der FBVS auf die angrenzenden Festbetoneigenschaften, der Wärmeausdehnungskoeffizient, der Haftverbund zum Beton sowie die Scherfestigkeit und Verbundfestigkeit verschiedener Bahnennähte überprüft. Die Ergebnisse dienen auch als Basis zur Formulierung von einheitlichen Prüfbedingungen.

Abstract

In Germany, pre-applied bonded membranes are usually installed as an additional sealing layer on the water-side of the water-impermeable reinforced concrete structures. They are supposed to improve the reliability of basement structures with regards to their water impermeability, especially in the case of difficult building constraints or high interior usage requirements. In contrast to 'classic' below-grade waterproofing, pre-applied bonded membranes are installed before concrete is poured and form a tear-resistant and water-impermeable bond with the fresh concrete (cf. attached blindside membrane). This also prevents lateral water movements in the composite layer if the sealing layer is damaged.

This form of sealing has been used in Germany increasingly since 2012, but there are still no regulations that can be applied to it. These membranes are considered neither as independent waterproofing membranes regulated by DIN 18533, nor they are being dealt with in the DAfStb guideline "Water impermeable concrete structures". So far, the proof of usability has been provided through general appraisal certificates, which, however, are not based on uniform test principles and thus essential characteristics could hardly be compared between the products. In addition to these ambiguities regarding the comparability of products, there are also further questions concerning design and application of these sealings.

For these reasons, in 2017, the German Society of Concrete and Construction Technology (DBV) founded a working group HABA-FBV, who first wrote a progress report (DBV-Heft 44) and is currently working on a leaflet on the pre-applied bonded membranes. In order to be able to deal with this technology in a well-founded manner, fundamental questions regarding the membranes still had to be clarified. These fundamentals were partly dealt with in this research project. Among

other things, the regulatory situation had to be analysed, essential product properties and associated test procedures had to be identified, characteristics of the technology to be determined in laboratory tests and practical recommendations had to be elaborated.

The research project included ten work packages, which are briefly presented below.

The aim of the first part of the project was to clarify the unclear regulatory situation for this technology. For this purpose, existing rules, regulations and legal foundations were analysed and the membranes were classified in terms of their use in Germany, with regard to the building regulations. This classification was integrated into the work of the DBV working group HABA-FBV and was published in the DBV-Heft 44 in 2018.

In order to be able to respond practically to the information requirements of the parties involved in the design and construction in the planned DBV-leaflet, the current practical experience was evaluated in a survey. Based on the survey results, the application recommendations and quality assurance measures were elaborated at the end of the project.

The third part of the project dealt with product properties and suitable test methods for the pre-applied bonded membranes. The aim was to define in the DBV leaflet the test methods that uniformly check the essential product characteristics of the FBVS and thus make them comparable across the board. First, product properties of German and foreign products were compiled, properties important for this building technology were identified and suitable test methods were identified. In some cases, test standards for other types of waterproofing could be adopted, in some cases existing tests were adapted or new tests formulated.

Furthermore, some essential properties of the FBVS were examined in laboratory tests. The selected properties of ten membrane types, which were provided by project industrial partners, were tested. The influences of various parameters on the water impermeable bond, the influence of the membrane on the adjacent hardened concrete properties, the coefficient of thermal expansion, the bond to the concrete as well as the shear strength and bond strength of different membrane seams were tested. The results of the tests also serve as a basis for the formulation of standardised test descriptions.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|-----|
| 0 | Einführung | 7 |
| 0.1 | Motivation | 7 |
| 0.2 | Ziel | 7 |
| 0.3 | Forschungsansatz, Methodik und Bearbeiter | 7 |
| 1 | Stand der Forschung und Technik | 9 |
| 1.1 | Frischbetonverbundsysteme | 9 |
| 1.2 | Regelwerkssituation | 11 |
| 1.3 | Einordnung in Regelwerksstrukturen | 12 |
| 1.3.1 | Einordnung gegenüber bisher üblichen Bauarten und als Zusatzmaßnahme bei WU-Betonkonstruktionen | 12 |
| 1.3.2 | FBV-Systeme als Zusatzmaßnahme bei WU-Betonkonstruktionen | 14 |
| 1.3.3 | Europäische Einordnung über ETA auf Grundlage eines EAD | 15 |
| 1.4 | Bekannte Produkteigenschaften | 15 |
| 2 | Untersuchungen und Ergebnisse | 18 |
| 2.1 | Evaluierung von Prüfverfahren zu Produkteigenschaften | 18 |
| 2.2 | Evaluierung von Praxiserfahrungen | 29 |
| 2.2.1 | Umfrage zur Planung und Ausführung von FBV-Systemen | 29 |
| 2.2.2 | Umfrage zur Schwachstellen- und Schadensanalyse | 33 |
| 2.2.3 | Praxisnahe Baustellenversuche | 35 |
| 2.3 | Empfehlungen zur Anwendung | 37 |
| 2.4 | Maßnahmen zur Qualitätssicherung (DBV+MPA+THN) | 40 |
| 2.5 | AP E1-3: Laboruntersuchungen an FBVS – Allgemeines | 40 |
| 2.6 | AP E1: Laboruntersuchungen zur lateralen Wassermigration an FBVS | 43 |
| 2.6.1 | Übersicht über das Versuchsprogramm und Prüfregime | 43 |
| 2.6.2 | Ergebnisse des AP E1 | 46 |
| 2.7 | AP E2: Verbunduntersuchungen an FBVS (MPA Braunschweig) | 55 |
| 2.7.1 | Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen Beton und FBVS | 55 |
| 2.7.2 | Untersuchungen zu Scherverhalten und Dichtigkeit der Fügenähte | 79 |
| 2.8 | AP E3: Untersuchungen zum Wassertransportmodell | 96 |
| 2.8.1 | AP E3: Probekörper für Wassertransportmodell und Porosität | 96 |
| 2.8.2 | Ergebnisse der Austrocknungsversuche des AP E3 | 99 |
| 2.8.3 | Orientierende Vorversuche zur Messung der Luftpermeabilität und Kapillarporosität | 111 |
| 2.8.4 | Ergebnisse der Festbetonprüfungen des AP E3 | 114 |
| 3 | Diskussion der Ergebnisse | 120 |
| 3.1 | Prüfverfahren | 120 |
| 3.2 | Laboruntersuchungen | 121 |
| 4 | Zusammenfassung und Ausblick | 121 |
| 5 | Weiterer Forschungsbedarf | 123 |

| | |
|---|-----|
| Ergebnistransfer | 124 |
| Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit..... | 124 |
| Geplante Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens..... | 124 |
| Danksagung | 125 |
| Schrifttum | 126 |
| Normen und Regelwerke | 126 |
| Weitere Literatur | 127 |
| Anhang A: Laboruntersuchungen | 129 |
| Anhang A1: Mikroskopische Schnitte..... | 129 |
| Anhang A2: Einzelergebnisse der Wassermigrationsprüfungen..... | 130 |
| Anhang A3: Einzelergebnisse der Porositätsuntersuchungen..... | 133 |
| Anhang A4: Einzelergebnisse der Feuchteuntersuchungen..... | 141 |
| Anhang A5: Prüfung der lateralen Wassermigration an FBV-Systemen..... | 144 |
| Anhang A6: Einzelergebnisse der Untersuchungen zum Verbundverhaltenwerte – Haftzugwerte und Versagensbilder..... | 147 |
| Anhang A7: Einzelergebnisse der Untersuchungen zum Wärmeausdehnungs- koeffizienten der FBV-Systeme | 183 |
| Anhang A8: Einzelergebnisse der Untersuchungen zu Scherverhalten und Dichtigkeit der Fügenrechte | 187 |
| Anhang B: Evaluierung von Praxiserfahrungen | 214 |
| Anhang B1: Einzelergebnisse zur Umfrage zur Planung und Ausführung mit FBV- Systemen | 214 |
| Anhang B2: Einzelergebnisse zur Umfrage zur Schwachstellen-/Schadensanalyse | 235 |

Abkürzungen

In diesem Bericht werden folgende Abkürzungen verwendet:

| | |
|---------------|--|
| abP | <u>a</u> llgemeines <u>b</u> auaufsichtliches <u>P</u> rüfzeugnis |
| DAfStb | <u>D</u> eutscher <u>A</u> usschuss <u>f</u> ür <u>S</u> tahl <u>b</u> eton e.V. |
| DBV | <u>D</u> eutscher <u>B</u> eton- und Bautechnik- <u>V</u> erein E.V. |
| DIBt | <u>D</u> eutsches <u>I</u> nstitut für <u>B</u> autechnik |
| DIN | <u>D</u> eutsches <u>I</u> nstitut für <u>N</u> ormung e.V. |
| FBV | <u>F</u> risch <u>b</u> eton <u>v</u> erbund |
| FBVS | <u>F</u> risch <u>b</u> eton <u>v</u> erbund <u>s</u> ystem |
| FPO | <u>F</u> lexibles <u>P</u> olyolefin |
| HDPE | <u>H</u> igh <u>D</u> ensity <u>P</u> olyethylen (auch PE-HD) |
| LDPE | <u>L</u> ow <u>D</u> ensity <u>P</u> olyethylen (auch PE-LD) |
| PE | <u>P</u> olyethylen |
| PP | <u>P</u> olypropylen |
| PVC | <u>P</u> olyvinylchlorid |
| WU-Richtlinie | DAfStb-Richtlinie – <u>W</u> asser <u>u</u> ndurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie) |
| HABA-FBV | DBV-Arbeitskreis „ <u>F</u> risch <u>b</u> eton <u>v</u> erbund <u>s</u> ysteme“ des <u>H</u> aupt <u>a</u> usschusses <u>B</u> au <u>a</u> usführung als Begleitgremium des Forschungsvorhabens |
| 20/65 | <u>20</u> °C Temperatur und <u>65</u> % relative Luftfeuchte |

0 Einführung

0.1 Motivation

Der Einsatz von Frischbetonverbundbahnen als Frischbetonverbundsysteme (FBV-Systeme) erfreut sich in den letzten Jahren großer Beliebtheit. Daher haben der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) und der Deutsche Beton- und Bautechnik-Verein E. V. (DBV) sich entschieden, im April 2016 ein Fachkolloquium auszurichten. Bei Referenten, Planern und Anwendern von FBV-Systemen wurde die Unsicherheit bezüglich der Regelwerkssituation deutlich in der Anwendung der neuen Bauart. Anschließend wurde ein DBV-Arbeitskreis gegründet mit Mitgliedern aus FBV-Herstellern, Planern, Bauausführenden und Sachverständigen, die zusätzlich dieses Projekt als Beratergremium unterstützten.

Bei der Anwendung einer neuen Bauart oder innovativen Bauweise stellt sich für Bauherren, Planer, Anwender und ggf. die Genehmigungsbehörden stets die Frage, welche Regelwerke gelten und ob es sich hierbei um eine anerkannte Regel der Technik handelt. Dabei bilden die aktuell bestehenden themenbezogenen Regelwerke, wie Normen und Richtlinien den Ausgangspunkt der Betrachtungen. Darüber hinaus geht es um die Definition der erforderlichen Produkteigenschaften und zuverlässiger Nachweismethoden sowie um Handlungsempfehlungen zur zuverlässigen und zielsicheren Anwendung der Bauart einschließlich Maßnahmen zur Qualitätssicherung.

Die Grundlagenermittlung zur Erstellung eines Regelwerkes für die Bauart Frischbetonverbundsystemen liefert der Fachwelt Hilfestellung für die Planung und Ausführung von Baumaßnahmen unter Anwendung dieser Bauart. Auf diesem Wege lässt sich die Grundlage für eine solide Regelwerksituation über die Anwendung dieser neuen Bauart schaffen und die derzeit noch weit verbreitete Unsicherheit in der Fachwelt beseitigen. Dies trägt zur Vermeidung von Fehlern in der Planung und Fehlanwendungen in der Bauausführung bei und fördert somit die wirtschaftliche Anwendung der Bauart.

0.2 Ziel

Ziel war die Entwicklung und Zusammenstellung von Grundlagen für die Erstellung eines Regelwerks zur Bauart Frischbetonverbundfolie/-system, die z. B. später (außerhalb des Vorhabens) in einem Merkblatt oder in einer Richtlinie einfließen und dabei die Vorstufe einer normativen Regelung bilden können.

0.3 Forschungsansatz, Methodik und Bearbeiter

Zur Erreichung des Ziels waren zunächst bestehende Regelungen, die bei der Anwendung der neuen Bauart „Abdichten mit Frischbetonverbundfolie“ von Bedeutung sind, zu erfassen sowie auf ihre tatsächliche Eignung und Anwendbarkeit zu prüfen.

Neben der Einordnung der Bauart „Abdichten mit Frischbetonverbundfolie/-system“ in das Umfeld bestehender Regelwerke wurde mittels Abfrage von Erfahrungsberichten bei Herstellern, Planern und Bauunternehmen eine Zusammenstellung von Empfehlungen zum gezielten Produkteinsatz,

zur richtigen Produktauswahl und zur fachgerechten Anwendung der Bauart ermöglicht. Zudem wurde eine bessere Beschreibbarkeit der Produkteigenschaften erreicht werden. Die Arbeitspakete wurden folgendermaßen strukturiert und zeitlich aufgeteilt:

Tabelle 0.3.1. Arbeitspakete

| AP | Inhalt Arbeitspaket | DBV | MPA BS | THN |
|----|---|-----|-----------|-----|
| 1 | Klärung der Regelwerkssituation | x | | |
| 2 | Einordnung in Regelwerksstrukturen | x | x | x |
| 3 | Bekannte Produkteigenschaften | | x | x |
| 4 | Evaluierung Prüfverfahren zu Produkteigenschaften | | x | x |
| 5 | Evaluierung Praxiserfahrungen | x | x | x |
| 6 | Empfehlungen zur Anwendung | x | x | x |
| 7 | Maßnahmen zur Qualitätssicherung | x | x | x |
| E1 | Ergänzungspaket Verbunduntersuchung an FBVS (Wassermigration) | | | x |
| E2 | Ergänzungspaket Verbunduntersuchung an FBVS (Verbund Bahn/Beton; Verbund Nähte) | | x | |
| E3 | Ergänzungspaket Feuchttransportmodell/Randzone | | | x |

Die Untersuchung begann mit einer Bestandsaufnahme mittels Literaturrecherche und Erarbeitung des Entwicklungspotenzials der Frischbetonverbundtechnologie. Mögliche Defizite und der Informationsbedarf der Planungs- und Baubeteiligten wurden und werden ergänzend mittels Fragebögen und Interviews in den Gremien des DBV und darüber hinaus ermittelt. Die Darstellung der Ergebnisse wird über eine systematische Auswertung und Dokumentation erfolgen.

Die bisher bekannten Produkteigenschaften wurden evaluiert und zugehörige, auch internationale Prüfverfahren erfasst und bewertet. Zugleich wurden im Labor der Verbund der verschiedenen Folienbahnen mit dem Beton und in Zusammenhang mit den systembedingten Bahnennähten die Festigkeit und Dauerhaftigkeit der Verbindungen sowie mögliche Wasserdurchtritte in den Ergänzungspaketen E1 und E2 untersucht. Weiterhin wurden im Ergänzungspaket E3 die Einflüsse der FBVS auf die Festbetoneigenschaften des angrenzenden Betons sowie mögliche Einflüsse auf das Wassertransportmodell von WU-Betonen bestimmt. Ebenso wurden bisherige Praxiserfahrungen der beteiligten Planungsbüros und ausführenden Bauunternehmen abgefragt und evaluiert. In einem abschließenden Schritt wurden Empfehlungen zur Anwendung von Frischbetonverbundfolien erarbeitet und die Grundlagen zu qualitätssichernden Maßnahmen gelegt.

Die in diesem Bericht beschriebenen Forschungsergebnisse wurden federführend durch den Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (DBV) erarbeitet, dem auch die Koordination des Gesamtprojekts oblag (siehe Tabelle 0.3.2). Die gesamten experimentellen Untersuchungen und die Evaluierung der Prüfverfahren wurden und werden durch die Forschungspartner Materialprüfanstalt für das Bauwesen (MPA BS) und Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm (THN) durchgeführt und ausgewertet. Die Evaluierung der Praxiserfahrungen wurde anhand

einer Umfrage zu Frischbetonverbundsystemen durch den DBV durchgeführt und ausgewertet. Die Empfehlungen zur Anwendung sowie die Maßnahmen zur Qualitätssicherung wurden gemeinsam erarbeitet.

Tabelle 0.3.2. Mitarbeiter des Forschungsvorhabens

| Name | Adresse |
|--|--|
| Dr.-Ing. Lars Meyer Serdar Bilgin M. Sc. Dipl.-Ing.(FH) Sebastian Filusch Dr.-Ing. Lars Appel | Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. Kurfürstenstraße 129, 10785 Berlin |
| Prof. Dr.-Ing. Thomas Freimann Ulli Heinlein M. Eng. | Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm Fakultät Bauingenieurwesen Keßlerplatz 12, 90489 Nürnberg |
| Dr.-Ing. Knut Herrmann | Materialprüfanstalt (MPA) für das Bauwesen Beethovenstraße 52, 38106 Braunschweig |

1 Stand der Forschung und Technik

1.1 Frischbetonverbundsysteme

Die Frischbetonverbundtechnologie soll einem wasserundurchlässigen Betonbauwerk eine zusätzliche Sicherheit bei besonderen und schwierigen konstruktiven Bauwerksrandbedingungen oder z. B. bei hohen Nutzungsanforderungen bieten. Der Verbund mit dem Beton soll bei fachgerechtem Einbau des FBVS verhindern, dass kein Wasser seitlich (lateral) zwischen Beton und FBVS eindringen kann („Hinterlaufschutz“). Selbst bei einer lokalen Beschädigung der Dichtschicht soll Feuchtigkeit oder Druckwasser nur an dem Schadensort eindringen können, aber nicht seitlich z. B. durch kapillare Kräfte bis zum nächsten Trennriss im Bauwerk weitertransportiert werden. Hierdurch unterscheidet sich das Frischbetonverbundsystem von anderen hautförmigen Abdichtungssystemen, die bei Beschädigung eine Hinterläufigkeit nicht ausschließen können.

Ein FBV-System ersetzt zunächst keine herkömmlichen Bestandteile einer WU-Betonkonstruktion nach DAfStb-WU-Richtlinie [R2]. Eine Abschwächung oder Kompensation von einzelnen WU-Erfordernissen wie Risskontrolle, Mindestbauteildicke, Fugenabdichtung usw. ist daher beim Einsatz von FBV-Systemen nicht vorgesehen. Vielmehr soll eine zusätzliche Sicherheit vor allem bei schwierigen und anspruchsvollen WU-Bauwerken erreicht werden.

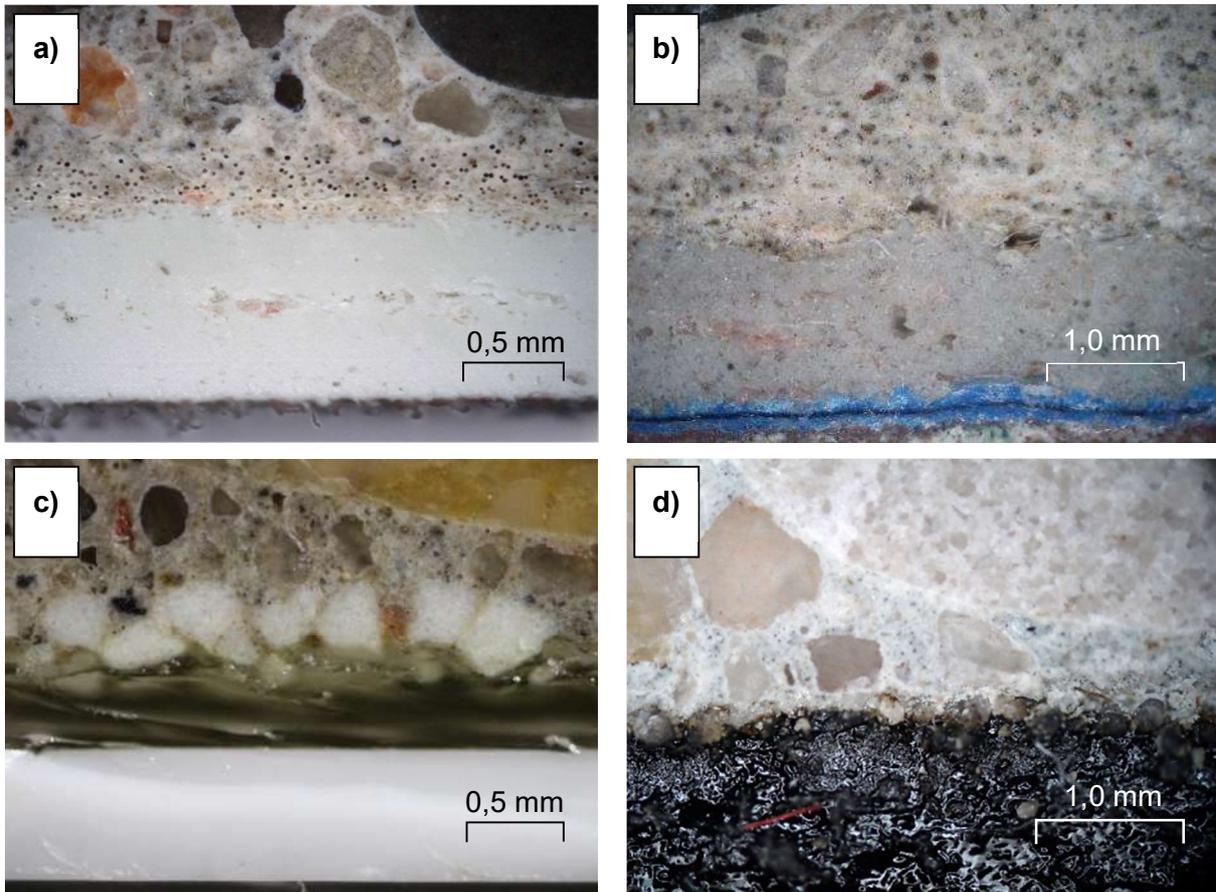


Bild 1.1.1. Querschnitte bzw. Verbundbereiche unterschiedlicher FBV-Systeme an Beton.

a) mechanisch-adhäsives System (hier Vlies)

b) mechanisch-adhäsives System (Vlies) mit in der Dichtschicht integrierten Quellpolymeren

c) klebe-adhäsives System mit granularer Besandung

d) bituminöses System (Elastomerbitumen) mit bituminös-adhäsiver Verbundschicht

Die zugehörigen FBV-Systemkomponenten bestehen aus der rissüberbrückenden Dichtschicht, die druckwasserdicht sein muss, sowie einer darauf fest applizierten Verbundschicht zur Frischbetonseite hin. Zwischen der Verbundschicht und dem Beton soll mit dem Erhärten des Frischbetons ein reißfester und wasserundurchlässiger Verbund entstehen.

Auf dem deutschen Markt sind verschiedene Systeme mit unterschiedlichen Wirkungsmechanismen der Verbundschicht verfügbar. Deren Funktionsweisen können vereinfachend in einen mechanisch-adhäsiven, einen klebe-adhäsiven und einen bituminös-adhäsiven Verbund unterschieden werden. Der mechanisch-adhäsive Verbund kann z. B. durch eine Vlieslage aus feinen, ungeordneten Polypropylenfasern hergestellt werden, deren Zwischenräume durch die Leimphase des Betons ausgefüllt werden. Durch diese Vliesschicht wird ein mechanisch zugfester Haftverbund ausgebildet. Ergänzend können Vliesschichten mit quellfähigen Dichtstoffen/Gelen bzw. quellfähigen Fasern ausgestattet sein, die die Funktionsfähigkeit und -sicherheit weiter erhöhen sollen. Klebe-adhäsive Verbundsysteme nutzen dagegen eine drucksensible Klebeschicht, die sich zum Frischbeton hin anpresst. Bituminöse Systeme aus Elastomerbitumen bilden ebenfalls einen adhäsiven Kontakt zum Beton aus, ähnlich wie er bei beschichteten Fugenblechen zu beobachten ist.

Die unterschiedlichen Verbundmechanismen sind in dem Bild 1.1.1 beispielhaft dargestellt. Weitere mikroskopische Schnitte verschiedener FBV-Systeme sind im Anhang A1 dargestellt. Dabei handelt es sich um die Querschnitte aller im Forschungsvorhaben enthaltenen FBV-Produkte.

1.2 Regelwerkssituation

Frischbetonverbundsysteme (FBV-Systeme, FBVS) werden in Deutschland fast ausschließlich als zusätzliche, ergänzende Maßnahme bei wasserundurchlässigen Bauwerken aus Beton (WU-Bauwerke) gemäß DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie) [R2] eingesetzt (siehe Abschnitt 1.3.2). FBV-Systeme sind hierbei ausdrücklich nicht einer bahnenförmigen Abdichtung im Sinne der DIN 18533 [R4] gleichzusetzen. In Deutschland wurden sie bisher bauordnungsrechtlich mit einem bauaufsichtlichem Prüfzeugnis abP verwendet. In Abschnitt 1.3 werden die zuvor beschriebenen Bauarten näher erläutert.

Die Frischbetonverbundtechnologie entspricht zum Zeitpunkt des Erscheinens dieses Abschlussberichts Ende 2019 (mit hoher Wahrscheinlichkeit) noch nicht den anerkannten Regeln der Technik (aRdT) (siehe DBV-Heft 44, Tab. 6 [1]). Allenfalls kann ein Stand der Technik zugesprochen werden, weshalb im zivilrechtlichen Bauvertrag der Einsatz der FBV-Systemen vereinbart werden, und nach schriftlicher Beratung mit Zustimmung des Bauherrn erfolgen sollte. Sinnvoll ist eine gemeinsame Abdichtungsplanung, also der Fugenplanung des WU-Bauwerks in Kombination mit einer Verbundabdichtung.

Die Regelwerkssituation ist zurzeit unklar, da eine klare Einordnung in die MVV-TB fehlt und die zurzeit im Entwurf vorliegenden Prüfgrundsätze des DIBt für die allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisse (abP) von den überwiegenden Produktherstellern abgelehnt werden. Die Prüfgrundsätze spiegeln nach Meinung der Produkthersteller und auch des DBV nicht die realen Einsatzbedingungen als Ergänzung zur WU-Bauweise wider. In den DIBt-Prüfgrundsätzen wird die Verwendung von Betonen mit hohem Wassereindringwiderstand in den Prüfungen wiederholt ausgeschlossen. Damit mögen die Prüfgrundsätze bauordnungsrechtlichen Fortschreibungen genügen, beurteilen somit aber nicht die Funktionsfähigkeit für die praktische Verwendung bei WU-Bauwerken. So werden z. B. keine abP-Prüfungen an Betonen mit hohem Wassereindringwiderstand für WU-Bauwerke durchgeführt. Ebenso herrscht noch Unklarheit über eine geeignete Prüfgrundlage für Migrationsprüfungen innerhalb der Verbundschicht.

Sowohl die Frage, welche wesentlichen Produkteigenschaften zur Vergleichbarkeit der FBVS geeignet sind, als auch die Frage, ob eventuell Leistungsklassen vereinbart werden sollen und auch wesentliche Prüfrandbedingungen sind zurzeit noch in Diskussion. Auch wurden bisher noch nicht alle Einflussgrößen auf die Verbundwirkung hinreichend untersucht, was auch Teil des Forschungsvorhabens war.

1.3 Einordnung in Regelwerksstrukturen

1.3.1 Einordnung gegenüber bisher üblichen Bauarten und als Zusatzmaßnahme bei WU-Betonkonstruktionen

Zur Einordnung der bauordnungsrechtlichen Situation bei der Verwendung von FBV-Systemen sind nach DBV-Heft 44 [1] zunächst die folgenden drei Bauarten zu unterscheiden:

Bauart I

Flächenhafte, wannenförmige Abdichtung von nicht wasserdichten Bauwerken oder Bauteilen mit bahnenförmigen oder flüssig zu verarbeitenden Abdichtungsstoffen. Hierbei ist die technische Regel für die Bauart die DIN 18533 Abdichtung von erdberührten Bauteilen [R4], (siehe DBV-Heft 44, Tab. 3 [1]).

Bauart II

WU-Betonkonstruktionen gemäß technischer Regel für die Bauart gemäß DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie) [R2], (siehe DBV-Heft 44, Tab. 3 [1]).

Bauart III

Mischbauart aus einer im Wandbereich angeordneten flächenhaften Abdichtung mit Übergang auf eine WU-Betonkonstruktion. Die in Kombination zu beachtenden technischen Regeln für die Bauart sind die DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie) [R2] und die DIN 18533 Abdichtung von erdberührten Bauteilen [R4] (siehe DBV-Heft 44, Tab. 5 [1]).

Die Auseinandersetzung mit der aktuellen Regelwerkssituation und den aktuellen bauordnungsrechtlichen Randbedingungen führt zu nachfolgendem Ergebnis.

Bei der flächenhaften, wannenförmigen Abdichtung mit FBV-Systemen (**Bauart I**) (siehe Bild 1.3.1) handelt es sich um eine **nichtgeregelte Bauart**, die somit **nicht in anerkannten Regeln der Technik beschrieben** ist.

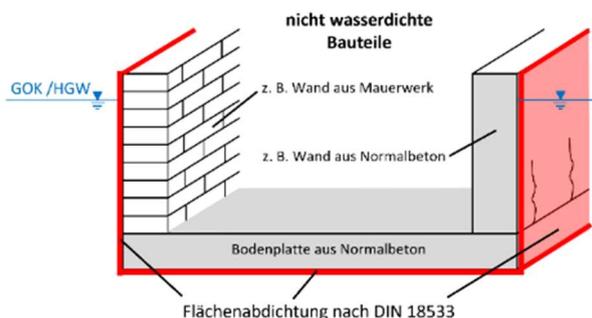


Bild 1.3.1. Prinzipdarstellung der Bauart I [1]

Bei FBV-Systemen, die als Abdichtung von Arbeits- und Sollrissfugen im Sinne der WU-Richtlinie [R2], [555] eingesetzt werden sollen (**Bauart II**) (siehe Bild 1.3.2), müssen diese über ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis (abP) als Verwendbarkeitsnachweis die Einhaltung bestimmter Anforderungen belegen. Nur wenn dieses vorliegt, können FBV-Systeme als Fugenabdichtung bei WU-Betonkonstruktionen nach WU-Richtlinie [R2] eingesetzt werden. **Es kann begründet vermutet werden, dass dies eine anerkannte Regel der Technik erfüllt.**

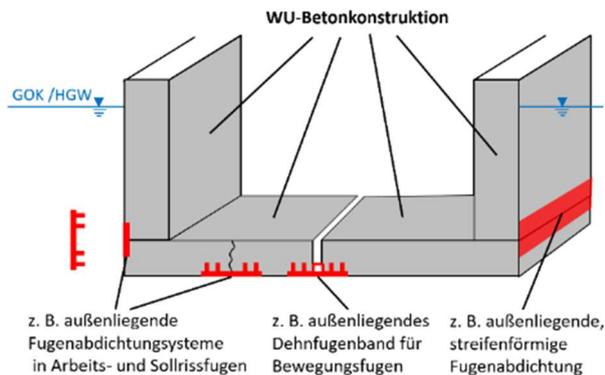


Bild 1.3.2. Prinzipdarstellung der Bauart II [1]

Bei FBV-Systemen, die als Übergang der Wandabdichtung auf die wasserundurchlässige Bodenplatte aus Beton im Sinne der DIN 18533 [R4] (**Bauart III**) (siehe Bild 1.3.3) eingesetzt werden sollen, müssen diese über ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis (abP) als Verwendbarkeitsnachweis die Einhaltung bestimmter Anforderungen belegen. Nur wenn dieses vorliegt, können FBV-Systeme als Übergang zwischen Flächenabdichtung und WU-Betonkonstruktionen nach WU-Richtlinie [R2] eingesetzt werden. **Es kann begründet vermutet werden, dass dies eine anerkannte Regel der Technik erfüllt.**

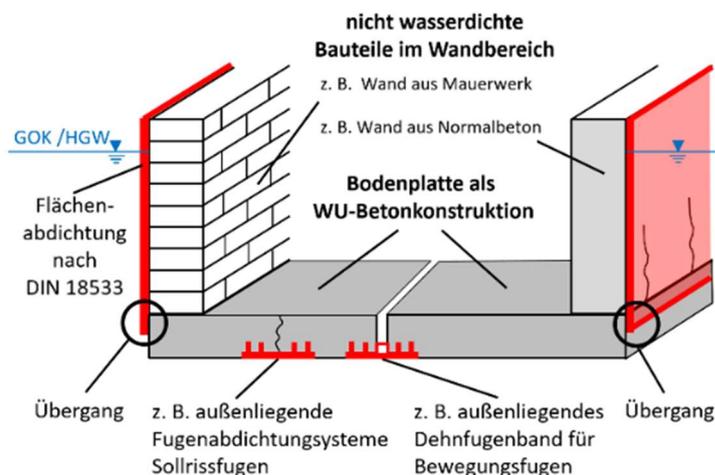


Bild 1.3.3. Prinzipdarstellung der Bauart III [1]

Die in Deutschland am häufigsten in Verbindung mit FBV-Systemen verwendete Bauart ist das FBV-System als Zusatzmaßnahme bei WU-Betonkonstruktionen gemäß WU-Richtlinie [R2].

Als Zusatzmaßnahme zur Sicherstellung der Wasserundurchlässigkeit bei WU-Betonkonstruktionen gemäß der WU-Richtlinie [R2] können FBV-Systeme unter Anwendung der in [1]

eingeführten Entwurfsgrundsätze (EGS) hinsichtlich Trennrissen geplant und ausgeführt werden. Es ergeben sich insgesamt die nachfolgend aufgeführten und in Tabelle 6 des DBV-Hefts 44 [1] genannten verschiedenen WU-Bauweisen.

Dabei können FBV-Systeme bei WU-Betonkonstruktionen auf Grundlage des Entwurfsgrundsatzes [a] und des Entwurfsgrundsatzes [c] als Zusatzmaßnahme zur Risikominimierung eingesetzt werden (WU-Bauweisen EGS [a + FBVS] und EGS [c + FBVS]). Diese beiden WU-Bauweisen erfüllen die Anforderungen der WU-Richtlinie.

Der Entwurfsgrundsatz [b] mit dem Ziel der Selbstheilung der Risse ist gemäß WU-Richtlinie [R2] nur für die Nutzungsklasse B und u. U. während der Bauzeit anwendbar. Insofern ist die WU-Bauweise EGS [b + FBVS] technisch nicht zielführend, da ein FBV-System das für die Selbstheilung der Risse notwendige Wasser von den Rissen abhält. Zudem erfüllt sie auch nicht die Anforderungen der WU-Richtlinie, da FBV-Systeme i. d. R. bei Nutzungsklasse A eingeplant werden.

Sollen oder können beim Einsatz von FBV-Systemen planmäßig nicht alle Festlegungen der WU-Richtlinie [R2], [555] umgesetzt werden, begründet dies eine **Abweichung von den anerkannten Regeln der Technik**. Diese bisher nicht geregelte WU-Bauweise wird als Sonderbauweise [FBVS] bezeichnet, siehe Zeile 7 in Tabelle 6. Sie liegt insbesondere dann vor, wenn:

- die Forderungen zu Dichtmaßnahmen bei Trennrissen oder Arbeitsfugen in Abhängigkeit von den Nutzungs- und Beanspruchungsklassen nicht vollständig umgesetzt werden

oder

- die Anforderungen zur Zugänglichkeit der WU-Betonkonstruktion gemäß WU-Richtlinie [R2] nicht eingehalten werden.

1.3.2 FBV-Systeme als Zusatzmaßnahme bei WU-Betonkonstruktionen

Für den Einsatz eines FBV-Systems als Zusatzmaßnahme bei WU-Betonkonstruktionen existieren unabhängig von der Wahl des Entwurfsgrundsatzes nach DBV-Heft 44 [1] **derzeit keine anerkannten Regeln der Technik**. Dies gilt auch, wenn es als Zusatzmaßnahme zur Risikominimierung bei WU-Betonkonstruktionen eingesetzt wird, die ansonsten jedoch vollständig die Anforderungen der WU-Richtlinie erfüllen (EGS [a + FBVS] bzw. EGS [c + FBVS]).

Insofern sind bei der Verwendung von FBV-Systemen in Verbindung mit WU-Betonkonstruktionen unabhängig vom gewählten Entwurfsgrundsatz stets Hinweis- und Aufklärungspflichten wahrzunehmen und entsprechende vertragliche Regelungen zu treffen. Dies gilt in Auftraggeber-/Auftragnehmerkonstellationen ebenso wie in Kunde-/Lieferantenkonstellationen.

Auch bei den WU-Betonkonstruktionen mit FBV-System, die vollständig die WU-Richtlinie umsetzen (EGS [a + FBVS] bzw. EGS [c + FBVS]), ist der Auftraggeber dahingehend aufzuklären, dass er auch ohne den Einsatz des FBV-Systems eine den anerkannten Regeln der Technik entsprechende WU-Betonkonstruktion erhält. Der Auftraggeber ist insofern durch

Aufklärung und Beratung in die Lage zu versetzen, die Mehrkosten der Zusatzmaßnahme zur Risikominimierung mit den Kosten eines eventuellen Feuchtedurchtritts beim Verzicht auf das FBV-System seinem Bedarf entsprechend abzuwägen und eine entsprechende Entscheidung zu treffen. Die aktuell fehlende Regel der Technik soll das in Vorbereitung befindliche DBV-Merkblatt „Frischbetonverbundsysteme“ enthalten.

1.3.3 Europäische Einordnung über ETA auf Grundlage eines EAD

Für FBV-Bahnen, bei denen Wesentliche Merkmale erklärt werden sollen, die (bisher) nicht in DIN EN 13967 [R5] oder DIN EN 13969 [R6] abgedeckt sind, wie z. B. das Verbundverhalten der Bahn mit dem WU-Beton, kann nach [1] auf europäischer Ebene eine Europäische Technische Bewertung (European Technical Assessment – ETA) auf der Grundlage eines Europäischen Bewertungsdokumentes (European Assessment Document – EAD) erwirkt werden. Hiermit ist jedoch kein Nachweis der Verwendbarkeit des Systems verbunden, sondern es kann damit bei entsprechender Formulierung des EAD die Grundlage geschaffen werden, die festgestellte Leistung für das Verbundverhalten der FBV-Bahn überhaupt in einer Leistungserklärung (Declaration of Performance) zu erklären und für das entsprechende Produkt eine CE-Kennzeichnung vorzunehmen. Damit ist zunächst eine Grundlage für das Inverkehrbringen der FBV-Bahnen gegeben.

Da es für eine derartige ETA jedoch national bisher keine Technischen Regeln für die Bauart „Frischbetonverbundsystem“ gibt, müsste für die Verwendung dieser FBV-Bahnen eine Verwendungsregel (Regel für die Bauart) aufgestellt werden, in der u. a. die Anforderungen an Frischbetonverbundsysteme mit einer solchen Leistungserklärung samt CE-Kennzeichnung festgelegt werden. Diese technische Regel soll das in Vorbereitung befindliche DBV-Merkblatt „Frischbetonverbundsysteme“ künftig enthalten.

1.4 Bekannte Produkteigenschaften

FBV-Systeme werden für eine bahnenförmige Verlegung in Rollen geliefert und durch system-spezifische Anschlussbänder (Tapes) und Hilfsmittel ergänzt, sodass ein flächig druckwasserdichtes System verlegt werden kann. Die Systeme selbst sind im Wesentlichen zweiteilig aufgebaut und bestehen aus einer dehnfähigen, druckwassergeeigneten Dichtschicht und einer darauf fest applizierten Verbundschicht. Die rissüberbrückenden Dichtschichten von FBV-Produkten werden im deutschen Markt bisher aus Kunststoffen wie beispielsweise FPO, PVC, PE (HDPE, LDPE) oder aus elastomermodifiziertem Bitumen gefertigt (siehe Tabelle 1.4.1). Die druckwasserdichte Dichtschicht ermöglicht Eintauchtiefen im Druckwasser je nach System bis ca. 20 m Wassersäule (2 bar Wasserdruck).

Die Verbundschicht wird bei der Verlegung zum Frischbeton hin angeordnet und soll mit dem erhärteten Beton einen hinterlaufsicheren und zugfesten Verbund gewährleisten. Es werden Produkte mit unterschiedlichen Verbundmechanismen angeboten, die durch klebe-adhäsive, mechanisch-adhäsive oder bituminös-adhäsive Verbundschichten wirken. Mit dem Erhärten des Frischbetons entstehen eine Fixierung des Systems (Lagesicherheit), ein rei- bzw. zugfester Verbund zum Beton sowie eine Wasserundurchlässigkeit der Verbundschicht gegenüber Druckwasser

(Hinterlaufschutz). Die Haftspannung bzw. die Abreißfestigkeit zwischen Verbundschicht und Beton variiert je nach Systemtyp, ist aber weitgehend unabhängig von der Hinterlaufsicherheit. Diese muss durch einen dichten und fehlerstellenfreien Einbau des Betons z. B. in eine mechanische Vlies-Verbundschicht oder zur Randzone einer klebe-adhäsiven Schicht gewährleistet werden. Eine Übersicht über wesentliche Merkmale in Deutschland verwendeter FBVS gibt Tabelle 1.4.1.

Tabelle 1.4.1. Übersicht über wesentliche Merkmale in Deutschland verwendeter Frischbetonverbundsysteme [1]

| S | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|--|---|---|---|
| Z | Verbundart Merkmal | klebe-adhäsiver Verbund | mechanisch-adhäsiver Verbund | bituminös-adhäsiver Verbund |
| 1 | Verbundschicht | Klebeschicht, z. B. drucksensible Kleber (PSA-Kleber) z. T. mit Schutzlage oder Besandung aus Kunststoffgranulat | z. B. Vlieslage aus Polypropylen-Faser als Wirrgelege, z. T. mit quellfähiger Einlage, z. T. mit Geokomposit | Elastomermodifiziertes Bitumen mit Besandung oder Bitumenkaltkleber (Elastomerbitumen); z. B. SBS-Bitumen |
| 2 | Dichtschicht | Polymerbahnen, z. B. aus PE-HD Polyethylen hoher Dichte | Polymerbahnen, z. B. aus FPO Flexibles Polyolefin, PVC Polyvinylchlorid, PE Polyethylen | Elastomerbitumen- Abdichtungsbahn PYE |
| 3 | Schichtdicke gesamt [mm] | 0,5 bis 2,2 | | ca. 4,5 |
| 4 | flächenbezogene Masse [g/m ²] | 820 bis 2 750 | | ca. 5 000 |
| 5 | Bahnenbreite [m] | 1,0 bis 2,1 | | 1,0 |
| 6 | Bahnenlänge [m] | ca. 10 bis 50 | | 5 |

Weltweit sind unterschiedliche Typen von Verbundbahnen im Einsatz, die sich vom Aufbau, der Gesamtdicke und der Art des Verbundes erheblich unterscheiden. Neben den Typen mit mechanisch-adhäsivem Verbund, z. B. durch eine Vlieslage, werden klebe-adhäsiv wirkende Verbundschichten verwendet. Ebenfalls werden bituminöse Membrane eingesetzt. Diese sind i. d. R. elastomermodifiziert, z. B. durch SBS (Styrol-Butadien-Styrol) oder BS (Butylkautschuk). Eine ähnliche Verbundwirkung ist von SBS-beschichteten Fugenblechen bekannt. Die Verbundwirkung von bituminösen FBVS ist allerdings durch eine Schutzschicht wie z. B. eine Besandung, die ein Begehen oder Aufrollen der Bahnen ermöglicht, gegenüber beschichteten Fugenblechen abgeschwächt.

In Tabelle 1.4.2 sind einige Produkte aus dem Ausland als Ergebnis von Recherchen zusammengestellt (ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Viele Systeme liegen mit ihrer Systemdicke bei etwa 1,5 – 2 mm, dünnere Systemdicken befinden sich bei 0,7 mm, dickere Systemdicken bei bis zu 3,5 mm. Teilweise werden die dort genannten Systeme auch in Deutschland vertrieben. Andere Systeme auf dem deutschen Markt weisen vergleichbare Eigenschaften auf. Ein deutsches FBV-System mit dem bituminös-adhäsivem Verbund hat beispielsweise eine Schichtdicke von ca. 4,5 mm.

Tabelle 1.4.2. Übersicht über Verbundsysteme im Ausland

| Produktname/product name | Aufbau/composition | Farbe/colour | Eigenschaften/properties |
|---|---|------------------------|--|
| CCW-Miradry 860/861 Sheet Waterproofing, Carlisle, Wylie, Texas, USA | Bituminös, mechanisch-adhäsiv; self-adhering sheet, rubberized asphalt laminated to 4 mils (0.1 mm) of polyethylene | white/black | 60-mil (1.5 mm) total thickness |
| Cohestar M3000P: China Guangdong | Bituminös, mechanisch-adhäsiv; HDPE sheet+modified bitumen+PE film | black | 0.7 mm thickness |
| Colphene BSW H, Soprema | Bituminös, mechanisch-adhäsiv; styrol butadiene (SBS) modified bitumina, sand coating | black | 3.5 mm thickness |
| BPA - DUAL PROOF with Hydrogel admixture, BPA GmbH, Herrenberg-Gültstein, Germany | mechanisch-adhäsiv; PVC-backing layer + hydrogel + fleece | transparent/light grey | 1.2 mm thickness |
| Easibond200 Pre-applied Waterproofing Membrane, Beijing JGHC Tech., Ltd | klebe-adhäsiv; HDPE backing layer + pressure-sensitive bonding adhesive + protective layer | white | 1.2/1.7/2.0 mm thickness |
| Proofex PGP/Alkorplan; Fosroc®, Parchem Construction Supplies Pty, New Zealand | mechanisch-adhäsiv; Unique mesh system. Blended polyethylene/polypropylene membrane incorporating a cell mesh | light grey/black | 2 mm thickness |
| Novatak; Kingsfield, Minneapolis, USA | chemically bonded (ionic bond); non-vulcanized reclaimed butyl rubber membrane | black | 1.52 mm thickness grammage 1.403 g/m ² |
| PRECON; W. R. Meadows | mechanisch-adhäsiv; Plasmatic polymer composite sheet, comprised of a non-woven fabric, elastomeric membrane | black | 73 mil (1.85 mm) thickness roll 1.2 x 15.2 m |
| Preprufe 300 LT Plus, GCP, Slough, UK | klebe-adhäsiv; HDPE membrane + adhesive layer + protection film | white | 1.20 mm thickness |
| SikaProof A-08/A-12, SIKA Deutschland, Germany | mechanisch-adhäsiv; Polyolefin (FPO) backing layer + fleece | yellow | 1.35 – 1.70 total thickness |
| Visqueen Pre Applied Membrane; Derbyshire UK | mechanisch-adhäsiv; fleece layer, HDPE Geomembrane | black | 1.5 mm thickness; roll 2.95 m x 25 m |
| Underseal® Underslab Membrane, Polyguard Products, Alabama USA | mechanisch-adhäsiv; geotextile, 20 mil backing HDPE+ adhesive compound + nonwoven geotextile | black/white | 2,15 mm thickness (85 mil total); 48" x 50' roll (1.78 m x 18.60 m) |

2 Untersuchungen und Ergebnisse

2.1 Evaluierung von Prüfverfahren zu Produkteigenschaften

Die Evaluierung der Produkteigenschaften vor allem von Produkten des deutschen Marktes wurde nachfolgend zusammengefasst. Wesentliche Prüfkriterien und Eigenschaften sind als erste Übersicht in Tabelle 2.1.1 dargestellt.

Die Prüfverfahren für FBVS lehnten sich bisher einerseits an die Prüfungen für bahnenförmige Kunststoffabdichtungen (nach DIN 18533 [R4]) an, die in DIN EN 3967 [R5] geregelt sind. Die dort bzw. in der zugehörigen Anwendungsnorm DIN Spec 20000-202 [R7] formulierten Vorgaben und Grenzwerte werden durch die FBVS aber nicht immer erfüllt. Auch werden einige wesentliche Eigenschaften, die für die Bauweise der Frischbetonverbundtechnologie maßgebend sind, teilweise nicht durch die genannten Normen abgedeckt. Beispielhaft sei hier der hinterlaufsichere Verbund genannt. Für den Anwendungsbereich der FBVS als ergänzende Maßnahme zu WU-Bauwerken gibt es daher andererseits abP-Prüfungen (siehe Tabelle 2.1.2). Dort wird mit unterschiedlichen, zum Teil modifizierten Prüfungen gearbeitet, die auch durch unterschiedliche Ausgangsbedingungen (Betonzusammensetzung, Prüfregime) nicht immer eine Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen abP zulassen.

Insbesondere bei den wichtigen Verbundprüfungen werden häufig nur einzelne Prüfungen mit der modifizierten Prüfung ASTM D5385 [R8] oder nach DIN EN 1928 [R9] angegeben. Hierbei ist weder eine einheitliche Betonzusammensetzung oder Zementart noch eine eindeutige Herstelleranweisung vorgegeben. Dies erschwert die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Produktangaben.

Weitere Prüfungen außerhalb DIN EN 13967 [R5], die im Rahmen von abP teilweise zur Charakterisierung von FBVS durchgeführt wurden, sind in Tab. 2.1.2 dargestellt.

Wesentliche im Versuch bestimmbare Unterschiede bzw. Produkteigenschaften zwischen den FBV-Systemen können sein:

- Abziehfestigkeit bzw. Haftzugfestigkeit;
- Streckgrenze der Deckfolie und Rissüberbrückungsfähigkeit;
- laterale Wassereindringung (Wassermigration, Hinterlaufschutz, max. Wassersäule);
- Gesamtdicke;
- Flächengewicht;
- Rollenmaße;
- Wärmeausdehnungskoeffizient;
- Penetration bei punktueller Einwirkung;
- pH-Verträglichkeit;
- Weiterreißwiderstand;
- aufnehmbare Gebäudelast;
- Brandverhalten;
- Alterungsverhalten;
- Diffusion, s_d -Wert;

- Gleitreibbeiwert zur Unterlage hin;
- ggf. Widerstand gegen chemischen Angriff;
- ggf. Gaspermeabilität.



Tabelle 2.1.1. Auswahl wesentlicher Produkteigenschaften und Prüfvorschriften von FBV-Systemen nach DIN EN 13967

| | Eigenschaft | Prüfnorm | Vorgehen der Prüfung | Forderung nach DIN EN 13967 | Forderung nach DIN SPEC 20000-202 |
|---------------------------------|---|---|---|---|-----------------------------------|
| Eigenschaften nach DIN EN 13967 | Sichtbare Mängel | EN 1850-2 | Prüfung auf Blasen, Risse, Löcher, Kratzer, Eindrücke | keine sichtbaren Mängel | keine sichtbaren Mängel |
| | Maße | EN 1848-2 | Prüfung der Geradheit und Planheit ausgerollter Produkte auf 1 mm genau gemessen | weniger als 75 mm Geradheitsabweichung auf 10 m Länge | bestanden |
| | Länge | | | innerhalb Toleranz MDV | k. A. |
| | Breite | | | | |
| | Dicke | EN 1849-2 | effektive Dicke ohne Vlies | innerhalb Toleranz MDV | MDV \geq 1,2 mm |
| | Flächenbezogene Masse | | Masse/Fläche | | k. A. |
| | Wasserdichtheit | EN 1928 | 60 kPa (0,6 Bar) Prüfdruck über 24 h auf Dichtungsschicht | bestanden | bestanden |
| | Widerstand gegen Stoßbelastung | EN 12691 | Falkkörper mit kugelförmiger Spitze (M = 500 g, D = 30 mm) auf harten bzw. weichen Untergrund | \geq MLV | MLV \geq 300 mm |
| | Dauerhaftigkeit, Alterung | EN 1296 | 12 Wochen Alterung bei 70 °C über mehrere Wochen, dann Wasserdichtheit nach EN 1928 | bestanden | k. A. |
| | Dauerhaftigkeit, Chemikalienbeanspruchung | EN 1847 | 28 d Lagerung in gesättigter Alkalilösung (Kalkmilch); Wasserdichtheit nach EN 1928 vor und nach Lagerung | bestanden | k. A. |
| | Verträglichkeit mit Bitumen | EN 1548 | Prüfung falls erforderlich; Kontakt mit Bitumen über 28 d bei 70 °C, dann Wasserdichtheit nach EN 1928 | bestanden | bestanden |
| | Weiterreißwiderstand Nagelschaft für Systeme ohne Einlage | EN 12310-1 | Widerstand gegen Weiterreißen eines quer durchstoßenen Nagelschafts (d = 2,5 mm) | \geq MLV | k. A. |
| Scherwiderstand der Fügenähte | EN 12317-2 | Prüfung falls erforderlich; Scherbeanspruchung auf Fügenaht bis zum Bruch | \geq MLV | Abriss außerhalb der Fügenaht | |
| Wasserdampfdurchlässigkeit | EN 1931 | Probekörper verschließt Schale mit Trocknungsmittel und wird bei 75 % RH gelagert | Innerhalb Toleranz Hersteller, aber min. MDV \pm 30 % | k. A. | |



| | Eigenschaft | Prüfnorm | Vorgehen der Prüfung | Forderung nach DIN EN 13967 | Forderung nach DIN SPEC 20000-202 |
|---|--------------------------------------|------------|---|-----------------------------|---|
| | Widerstand gegen statische Belastung | EN 12730 | 24 h Belastung mit max. 20 kg auf harten Untergrund durch Kugel (d = 10 mm) | ≥ MLV | k. A. |
| | Zug-Dehnungsverhalten | EN 12311-2 | Bestimmung Höchstzugkraft, zugehörige Dehnung und Bruchdehnung | ≥ MLV | Höchstzugkraft: MLV ≥ 12 N/mm ² zugeh. Dehnung: MLV ≥ 250 % |
| | Brandverhalten | EN 13501-1 | Prüfung durch untersch. Beflammungszeiten nach EN ISO 11925-2, Klasse E = 15 s | Klassifizierung | Klasse E nach EN 13501-1 |
| | Sicherheitsdatenblatt | EN 13967 | Alle als gefährlich geltende Zusatz- und Inhaltsstoffe müssen auf der Produktverpackung und im Sicherheitsdatenblatt angegeben werden | | |
| <p>MDV: Hersteller-Nennwert (manufacturer's declared value) MLV: Hersteller-Grenzwert (manufacturer's limited value) k. A: keine Anforderungen L/Q: längs bzw. quer zur Rollenrichtung</p> | | | | | |

Tabelle 2.1.2. Mögliche, weiterführende Prüfungen zur Erteilung eines abP (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

| | Eigenschaft | Prüfnorm | Vorgehen der Prüfung | |
|--------------------------------------|--|------------------|---|--|
| Zusätzliche/weiterführende Prüfungen | Haftfestigkeit zum Beton | EN 1542 | Direkter, lotrechter Abreißversuch durch aufgeklebten Stempel auf definierte Prüffläche des FBV-Systems | |
| | | EN 1372 | Schälversuch, Probekörper wird als Streifen im 90° Winkel vom Beton abgezogen | |
| | Abziehfestigkeit (Peel Adhesion) | ASTM D903 | Abziehen eines 50 mm breiten Streifen von Betonoberfläche, der 180° umgeschlagen wurde | |
| | Wasserdichtheit Füge- und Reparaturstellen | i. A. EN 1928 | Anordnung T-Stoß bzw. Reparaturstelle unter Druckzylinder; 200 kPa Wasserdruck, 14 d | |
| | Hinterlaufsicherheit im Perforationsfall | i. A. ASTM D5385 | System auf Beton appliziert, max. 690 kPa Wasserdruck auf Fehlstelle im System, im Versagensfall entweicht Wasser betonseitig aus Fehlstellen (Röhrchen) | |
| | | i. A. EN 1928 | System auf Beton appliziert, i. d. R. 500 kPa Wasserdruck auf Fehlstelle im System, Wassermigration kann durch eingefärbtes Prüfwasser nachvollzogen werden | |
| | Rissüberbrückung | ASTM D5385 | max. 690 kPa Wasserdruck auf Probekörper, der 3,2 mm breiten Riss überspannt (ohne Verbund zur Unterlage) | |
| | | i. A. EN 14224 | FBV auf Beton, kontrollierte Rissbildung im Beton bis 2 mm, anschließend Rissüberbrückung nach ASTM D5385 (mit Verbund zur Unterlage) | |
| | i. A.: in Anlehnung | | | |

Die technischen Eigenschaften von FBV-Systemen können grob in vier Einflussbereiche unterschieden werden, die bei der Auswahl und Entscheidung für oder gegen ein Produkt eine Rolle spielen können:

- 1: Bauwerksparameter/äußere Randbedingungen
- 2: Verbundmechanismus
- 3: Baustellenverarbeitung/Handhabung auf der Baustelle
- 4: Mechanisch/physikalische Robustheit der Dichtmembran

Einzelne Parameter dieser Einflussbereiche können für den Planenden oder Ausführenden die Entscheidungsgrundlage zur Auswahl eines geeigneten FBVS bilden. Die zwei Einflussbereiche 1 und 2 sind hierbei sicherlich bedeutsamer und gewichtiger im Entscheidungsprozess zwischen unterschiedlichen Systemtypen als die Einflussbereiche 3 und 4.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind in Tabelle 2.1.3 Beispiele dieser Parameter zusammengestellt. Um einen Vergleich zwischen den FBVS zu ermöglichen, müssten davon die wesentlichen Eigenschaften bestimmt werden.

Tabelle 2.1.3. Einflussgrößen, die sich auf erforderliche Produkteigenschaften auswirken

| |
|--|
| Bauwerkparameter/äußere Randbedingungen |
| <ul style="list-style-type: none"> - max. zulässiger Wasserdruck - aufnehmbare Gebäudelast - Reibungsparameter - Widerstand gegen chemische oder gasförmige Einwirkung - Nachhaltigkeitsparameter, Leed, DGNB; Rezyklierung |
| Verbundmechanismus |
| <ul style="list-style-type: none"> - Widerstand gegen Wassermigration - Art des Verbundes - Anfälligkeit gegenüber Einbaufehlern und Verbundstörungen (z. B. Verdichtung, Fügung, Pfützen) - Verbund zu Abstandhaltern - Dauerhaftigkeit |
| Baustellenverarbeitung/Handhabung auf der Baustelle |
| <ul style="list-style-type: none"> - Lagerung/Verwahrung auf der Baustelle - Anforderungen an Baustellenlagerung und Bettung/einfacher Baustelleneinbau - Ausführung von Detailanschlüssen und Übergängen (Systemlösungen vorhanden?) - Aufwand der Fügungen und Nahtausbildung zwischen Bahnen - Reinigungsfähigkeit bei Verschmutzungen und Zementschlämme - Schulungsaufwand/techn. Unterstützung und Arbeitshilfen - Witterungsunabhängigkeit (min. und max. Einbautemperaturen/Umgang mit Pfützenbildung) - ggf. erforderliche Schutzmaßnahmen bei intensiver Begehung - Rutschhemmung |
| Mechanisch/physikalische Eigenschaften der Membran |
| <ul style="list-style-type: none"> - Rissüberbrückung - Widerstand gegen Durchstoßen (Robustheit gegenüber Lagerungsbedingungen) - Zugfestigkeit an Fügenähten - Wärmeausdehnungskoeffizient - max. Liegezeit (UV-Beständigkeit) - Widerstand gegen chemischen Angriff aus Boden/Grundwasser - Hitzebeständigkeit - Diffusionsdichtigkeit |

Auf Grundlage der vorgestellten Literaturrecherche und den später vorgestellten Ergebnissen der Laboruntersuchungen wurde in Tabelle 2.1.4 – 2.1.8 die Relevanz von Einzelprüfungen bewertet, die im Hinblick auf die Prüfung der Verwendbarkeit von FBVS in Frage kommen. Die dargestellten Prüfungen wurden dem DBV-Heft 44 entnommen, das im Rahmen des Sachstandsberichts mögliche Prüfungen an FBVS im Anhang A2 darstellte.

Die Prüfungen wurden jeweils in der Spalte 5 mit den Bewertungen „P – Pflicht“, „O – Optional“ und „E – Entfall“ bewertet.

Weiterhin sollten zur Formulierung von Leistungsklassen einzelne Prüfungen ausgewählt werden, die eine besondere Bedeutung zur Beschreibung von FBVS haben. Auf deren Grundlage sollte eine Unterscheidung der Leistungsfähigkeit der Systeme getroffen werden können. Die dafür ausgewählten Prüfungen wurden jeweils in Spalte 6 mit „LK“ (Leistungsklasse) gekennzeichnet.

Tabelle 2.1.4. Prüfungen im Rahmen des Verwendbarkeitsnachweises an Kunststoff- und Elastomerbahnen mit Frischbetonverbundeigenschaften

| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|---|-----------------------------------|-------------------|--|-----------------|------------------|
| Z | Eigenschaft | Prüfnorm | Einheit | Anforderungen | R ⁴⁾ | LK ⁵⁾ |
| 1 | sichtbare Mängel | DIN EN 1850-2 | - | keine sichtbaren Mängel | P | |
| 2 | Länge | DIN EN 1848-2 | m | MDV ¹⁾ | P | |
| 3 | Breite | DIN EN 1848-2 | m | MDV ¹⁾ | P | |
| 4 | Geradheit | DIN EN 1848-2 | mm/ 10 m | ≤ 75 | P | |
| 5 | Flächengewicht | DIN EN 1849-2 | g/m ² | MDV ¹⁾ | P | |
| 6 | Dicke der Trägerbahn (Nennstärke d_{eff}) | DIN EN 1849-2 | mm | MDV ¹⁾ | P | |
| 7 | Gesamtdicke | DIN EN 1849-2 | mm | MDV ¹⁾ | P | |
| 8 | Brandverhalten | DIN EN ISO 11925-2 | - | Klasse E nach DIN EN 13501-1 | P | |
| 9 | Wasserdichtheit | DIN EN 1928, Verfahren B, 72 h | kPa | 500 | P | |
| 10 | Widerstand gegen Stoßbelastung | DIN EN 12691, Verfahren A | mm | ≥ 150 (vertikal 2) ≥ 250 (horizontal 3) | P | LK |
| | | DIN EN 12691, Verfahren B | | ≥ 500 (vertikal 2) ≥ 500 (horizontal 3) | P | LK |
| 11 | Wasserdichtheit nach künstlicher Alterung | DIN EN 1296 DIN EN 1928 | kPa | ≥ 400 (max. 20 % Verringerung gegenüber Anlieferung aus Anforderung Wasserdichtheit Zeile 9) | P | |
| 12 | Alkaliwiderstand | DIN EN 1847 DIN EN 1928 | kPa | ≥ 400 (max. 20 % Verringerung gegenüber Anlieferung aus Anforderung Wasserdichtheit Zeile 9) | P | |
| 13 | Weiterreißwiderstand | DIN EN 12310-1 | N | ≥ 150 | O | |
| 14 | Widerstand gegen statische Belastung | DIN EN 12730, Verfahren B | kg | ≥ 20 | P | |
| | | DIN EN 12730, Verfahren C | | noch zu deklarieren | P | |
| 15 | Reißfestigkeit | DIN EN 12311-2 | N/mm ² | ≥ 4 (für Bahnen mit homogenen Polymerschichten) | P | |
| | | | N/50mm | ≥ 250 (für kaschierte Bahnen) | P | |
| 16 | Reißdehnung | DIN EN 12311-2 | % | ≥ 2 | P | |
| 17 | Wasserdampfdurchlässigkeit | DIN EN 1931 | - | keine Anforderungen | E | |

| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|--|---|---------|--|-----------------|------------------|
| Z | Eigenschaft | Prüfnorm | Einheit | Anforderungen | R ⁴⁾ | LK ⁵⁾ |
| 18 | Bitumenverträglichkeit (wenn Kontakt FBV-Bahn mit Bitumen) | DIN EN 1548/ DIN EN 1928 | kPa | ≥ 400 (max. 20 % Verringerung gegenüber Anlieferung aus Anforderung Wasserdichtheit Zeile 9) | O/P | LK |
| 19 | linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient, Angabe bei Raumtemperatur | <i>Thermomech. Analyse nicht geeignet. Messung z. B. mit Setzdehnungsmesser</i> | 1/K | MDV ¹⁾ ; Rechenwert ca. 20 x 10 ⁻⁵ | P | LK |

1) **Manufacturer Declared Value** (vom Hersteller angegebener Nennwert)
2) Verlegung bei vertikalen Flächen, z. B. Wände
3) Verlegung bei horizontalen Flächen, z. B. Bodenplatten
4) Relevanz der Prüfungen für FBVS: P = Pflicht, O = Optional, E = Entfall
5) LK = Leistungsklasse. Vorgeschlagene Prüfungen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von FBVS

In der nachfolgenden Tabelle 2.1.5 sollen zukünftige Anforderungen an Bitumenbahnen als FBV-System formuliert werden. Bisher liegen keine Verwendbarkeitsnachweise und baupraktische Erfahrungen vor, weshalb derzeit keine Anforderungen zu wesentlichen Eigenschaften formuliert werden können.

Tabelle 2.1.5. Prüfungen im Rahmen des Verwendbarkeitsnachweises an Bitumenbahnen mit Frischbetonverbundeigenschaften

| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|--|--------------------------------------|------------------|---------------------------------|-----------------|------------------|
| Z | Eigenschaft | Prüfnorm | Einheit | Anforderungen | R ⁴⁾ | LK ⁵⁾ |
| 1 | sichtbare Mängel | DIN EN 1850-1 | - | keine sichtbaren Mängel | P | |
| 2 | Länge | DIN EN 1848-1 | m | MDV ¹⁾ | P | |
| 3 | Breite | DIN EN 1848-1 | m | MDV ¹⁾ | P | |
| 4 | Geradheit | DIN EN 1848-1 | mm/ 10m | ≤ 20 | P | |
| 5 | Flächengewicht | DIN EN 1849-1 | g/m ² | MDV ¹⁾ | P | |
| 6 | Gesamtdicke | DIN EN 1849-1 | mm | MDV ¹⁾ | P | |
| 7 | Brandverhalten | DIN EN ISO 11925-2 | - | Klasse E nach DIN EN 13501-1 | P | |
| 8 | Wasserdichtheit | DIN EN 1928, Verfahren B, 72 h | kPa | noch zu deklarieren | P | |
| 9 | Widerstand gegen Stoßbelastung | DIN EN 12691, Verfahren A | mm | noch zu deklarieren | P | LK |
| | | DIN EN 12691, Verfahren B | | noch zu deklarieren | P | LK |
| 10 | Wasserdichtheit nach künstlicher Alterung | DIN EN 1296 DIN EN 1928 | kPa | noch zu deklarieren | P | |

| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|--------------------------------------|--|---------|---------------------|-----------------|------------------|
| Z | Eigenschaft | Prüfnorm | Einheit | Anforderungen | R ⁴⁾ | LK ⁵⁾ |
| 11 | Alkaliwiderstand | DIN EN 1847 DIN EN 1928 | kPa | noch zu deklarieren | E | |
| 12 | Weiterreißwiderstand | DIN EN 12310-1 | N | noch zu deklarieren | O | |
| 13 | Widerstand gegen statische Belastung | DIN EN 12730, Verfahren A | kg | noch zu deklarieren | P | |
| | | DIN EN 12730, Verfahren B | | noch zu deklarieren | P | |
| 14 | Höchstzugkraft | DIN EN 12311-1 mit Einlage: DIN EN 13859-1 | N/50mm | noch zu deklarieren | P | |
| 15 | Höchstzugkraftdehnung | DIN EN 12311-1 | % | noch zu deklarieren | P | |
| 17 | Kaltbiegeverhalten | DIN EN 1109 | % | noch zu deklarieren | O | |
| 18 | Wasserdampfdurchlässigkeit | DIN EN 1931 | % | keine Anforderungen | E | |

1) **Manufacturer Declared Value** (vom Hersteller angegebener Nennwert)
2) Verlegung bei vertikalen Flächen, z. B. Wände
3) Verlegung bei horizontalen Flächen, z. B. Bodenplatten
4) Relevanz der Prüfungen für FBVS: P = Pflicht, O = Optional, E = Entfall
5) LK = Leistungsklasse. Vorgeschlagene Prüfungen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von FBVS

Tabelle 2.1.6. Prüfungen im Rahmen des Verwendbarkeitsnachweises an Kunststoff- und Elastomerbahnen oder Bitumenbahnen mit Frischbetonverbundeigenschaften an Fügenähten

| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|--|---|---|---|----|
| Z | Eigenschaft | Prüfnorm | Einheit | Anforderungen | R | LK |
| 1 | Scherwiderstand der Fügenähte (alle Varianten) | DIN EN 12317-2 bzw. DIN EN 12317-1 | Anlieferungszustand, Laborklima | Abriss außerhalb der Fügenaht oder ≥ 3 N/mm | P | LK |
| 2 | Scherwiderstand der Fügenähte (alle Varianten) | | Wasserlagerung bei 50 °C über 28 d | Abminderung des Scherwiderstand max. 20 % gegenüber Zeile 1 „Anlieferungszustand“ | P | |
| 3 | Wasserdichtheit Fügenaht am T-Stoß ohne Betonverbundkörper (alle Varianten) | DIN EN 1928, Verfahren A | Mindestabmessungen 20 x 20 cm Prüfdauer 72 h | Wasserdicht; Prüfdruck ist in Stufen aufzubringen und jeweils 24 h zu halten Mindestanforderung an Prüfdruck p = 1 bar | P | |

1) **Manufacturer Declared Value** (vom Hersteller angegebener Nennwert)
2) Verlegung bei vertikalen Flächen, z. B. Wände
3) Verlegung bei horizontalen Flächen, z. B. Bodenplatten
4) Relevanz der Prüfungen für FBVS: P = Pflicht, O = Optional, E = Entfall
5) LK = Leistungsklasse. Vorgeschlagene Prüfungen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von FBVS

Tabelle 2.1.7. Prüfungen am Betonverbundkörper im Rahmen des Verwendbarkeitsnachweises an Kunststoff- und Elastomerbahnen oder Bitumenbahnen mit Frischbetonverbundeigenschaften

| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|--|---|-----------------|-------------------------|
| Z | Eigenschaft | Prüfnorm | Einheit | Anforderungen | R ⁴⁾ | LK ⁵⁾ |
| 1 | zeitabhängige Haftzugfestigkeit nach Wärmealterung bei Wasserlagerung | DIN EN 1542 | Wasserlagerung bei Laborklima Prüfung nach 7 d und 28 d | ≥ 0,1 N/mm ² und kein linearer Abfall des zeitlichen Verlaufs | P | |
| 2 | Hinterläufigkeit nach 7 d und 28 d | in Anlehnung an: DIN EN 1928, Verfahren A oder DIN EN 12390-8 oder ASTM D 5385 modified | Perforationsdurchmesser: 1 inch (25,4 mm), $\rho_{\max} = 5$ bar über 7 d bzw. 28 d | ≤ 30 mm maximale seitliche Eindringtiefe ab Lochrand und keine Veränderung der Eindringtiefe zwischen 7 d und 28 d und kein seitlicher Wasseraustritt in der Betongrenzschicht bzw. über die FBV-Bahn | P | LK (Wasserdruckhöhe) |
| 3 | Rissüberbrückung | DIN EN 14224 DIN EN 1928, Verfahren A | Laborklima, Rissbreite nur 1 mm, Prüfdauer 72 h bei $\rho_{\max} = 5$ bar | wasserdicht und rissüberbrückend | P | |
| 4 | Widerstand gegen Verformung unter Last | DIN EN 13967, Abschnitt 5.15 und Anhang B | In Abhängigkeit von der Anwendung, (z. B. 1 500 kN/m ² über 48 h) | MLV ²⁾ , keine Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit | O/ E | |
| <p>¹⁾ Manufacturer Declared Value (vom Hersteller angegebener Nennwert)</p> <p>²⁾ Verlegung bei vertikalen Flächen, z. B. Wände</p> <p>³⁾ Verlegung bei horizontalen Flächen, z. B. Bodenplatten</p> <p>⁴⁾ Relevanz der Prüfungen für FBVS: P = Pflicht, O = Optional, E = Entfall</p> <p>⁵⁾ LK = Leistungsklasse. Vorgeschlagene Prüfungen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von FBVS</p> | | | | | | |

Tabelle 2.1.8. Funktionsprüfungen am Betonverbundkörper im Rahmen des Verwendbarkeitsnachweises

| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|-----------------|------------------|
| Z | Eigenschaft | Prüfnorm | Einheit | Anforderungen | R ⁴⁾ | LK ⁵⁾ |
| 1 | Wasserdichtigkeit im eingebauten Zustand (alle Fügevarianten) | PG-FBB Teil 1, Abschnitt 6 bzw. PG-ÜBB | Prüfdauer 28 d, $\rho_{\max} = 5$ bar | wasserdicht, keine Ablösungen oder Blasenbildungen | P | |
| 2 | Wasserdichtigkeit Durchdringungen | in Anlehnung an: PG-FBB Teil 1 bzw. PG-AIV je nach Art des Anschlussprinzips | Prüfdauer 28 d, $\rho_{\max} = 5$ bar | wasserdicht, keine Ablösungen oder Blasenbildungen | O | |

| S | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|--|----------------------------------|--|--|-----------------|------------------|
| Z | Eigenschaft | Prüfnorm | Einheit | Anforderungen | R ⁴⁾ | LK ⁵⁾ |
| 3 | Wasserdichtigkeit Übergangsabdichtungen ¹⁾ | in Anlehnung an: PG-FBB Teil 1 | Prüfdauer 28 d, $\rho_{max} = 5 \text{ bar}$ | wasserdicht, keine Ablösungen oder Blasenbildungen | O | |
| 4 | Wasserdichtigkeit an Übergängen zur WU-Betonkonstruktion | PG-FBB Teil 1 bzw. PG-ÜBB | Prüfdauer 28 d, $\rho_{max} = 5 \text{ bar}$ | wasserdicht, keine Ablösungen oder Blasenbildungen | O | |
| 5 | ggf. weitere Prüfungen für Detailausbildungen | in Abstimmung mit der Prüfstelle | Prüfdauer 28 d, $\rho_{max} = 5 \text{ bar}$ | wasserdicht, keine Ablösungen oder Blasenbildungen | O | |

¹⁾ **Manufacturer Declared Value** (vom Hersteller angegebener Nennwert)
²⁾ Verlegung bei vertikalen Flächen, z. B. Wände
³⁾ Verlegung bei horizontalen Flächen, z. B. Bodenplatten
⁴⁾ Relevanz der Prüfungen für FBVS: P = Pflicht, O = Optional, E = Entfall
⁵⁾ LK = Leistungsklasse. Vorgeschlagene Prüfungen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von FBVS

Auf Grundlage der vorgestellten Prüfungen können definierte Leistungsmerkmale über verschiedene FBVS hinweg verglichen werden, und die FBVS dementsprechend in „Leistungsklassen“ eingestuft werden.

Eine Einstufung der Systeme könnte beispielsweise nach der zeitlichen Abfolge im Bauablauf geschehen. Denkbar ist eine erste Einstufung gemäß den Eigenschaften der mechanischen Robustheit, den thermischen Eigenschaften und der Reinigungsfähigkeit. Weitere geforderte Eigenschaften könnten die maximale Liegezeit und evtl. besondere Abstandhalter berücksichtigen.

Anschließend könnte eine Einstufung gemäß den Eigenschaften nach dem Einbau des Frischbetons erfolgen. Mögliche Unterscheidungsmerkmale sind hier Ausschalfristen, Bitumenverträglichkeit (bei Einsatz von Kunststoffbahnen), und der maximal aufnehmbare Wasserdruck. Dieser ergibt sich aus dem aufnehmbaren Wasserdruck der Fügenähte sowie der Verbundschicht. In Tabelle 2.1.9 wurden die vorgeschlagenen Einstufungen nochmals stichpunktartig aufgeführt.

Tabelle 2.1.9. Vorgeschlagene Kriterien zur Einteilung von FBVS in Leistungsklassen

| | A – Bauzustand bis Betoneinbau | B – Bauzustand nach Betoneinbau |
|---|--|---|
| Berücksichtigte Eigenschaften zur Klassifizierung | <ul style="list-style-type: none"> - Widerstand gegen Stoßbelastung (mechanische Durchdringung) - Temperaturwechselbeanspruchung (thermische Ausdehnung) - Temperatureinsatzgrenzen für die Verarbeitung - Reinigungsfähigkeit - evtl. Art des Versagens an der Fügenaht - evtl. maximale Liegezeit - evtl. besondere Abstandhalter | <ul style="list-style-type: none"> - Ausschalfristen (Wände) - Verträglichkeit mit Bitumen (Wände, Perimeterdämmung) - Maximal erlaubter Wasserdruck |

Neben der Recherche zu Prüfverfahren wurden innerhalb des Forschungsvorhabens auch einzelne Prüfungen zu wesentlichen Eigenschaften genauer betrachtet. Gerade die Prüfung der lateralen Wassermigration erfolgte bisher nicht nach einheitlichen Herstell- oder Prüfbedingungen, was vergleichende Aussagen zwischen unterschiedlichen FBVS-Produkten erschwert. Daher wurden innerhalb des Vorhabens bei der Prüfung der lateralen Wassermigration gezielt Variationen im Herstellprozess der Prüfkörper sowie Variationen der Prüfrandbedingungen vorgenommen, um mögliche Einflüsse auf die Versuchsergebnisse zu erkennen. Die Ergebnisse dieser Variationen sollen verwendet werden, um einheitliche Prüfrandbedingungen formulieren zu können und sind im Kapitel 2.6 dargestellt.

2.2 Evaluierung von Praxiserfahrungen

2.2.1 Umfrage zur Planung und Ausführung von FBV-Systemen

Es wurde mittels Abfrage von Erfahrungsberichten bei Herstellern, Planern und Bauunternehmen eine Zusammenstellung von Empfehlungen zum gezielten Produkteinsatz, zur richtigen Produktauswahl und zur fachgerechten Anwendung der Bauart zusammengetragen. Mögliche Defizite und der Informationsbedarf der Planungs- und Baubeteiligten sind ergänzend mittels Fragebögen und Interviews in den Gremien des DBV ermittelt worden. Die Ergebnisse der Umfrage sind systematisch ausgewertet und dokumentiert worden und werden nachfolgend vorgestellt. Sie sind detailliert im Anhang B1: Einzelergebnisse zur Umfrage zur Planung und Ausführung mit FBV-Systemen aufgeführt.

Die Teilnahmen an der Online-Umfrage zu FBV-Systemen im Zeitraum vom 15. Januar 2018 bis zum 6. April 2018 wurden anonymisiert, so wurden z. B. keine personen-, hersteller- oder firmenbezogenen Daten erfragt.

Die Befragung wurde 163 Mal aufgerufen und von 90 Teilnehmenden vollständig abgeschlossen, d. h. alle Fragen des Fragebogens wurden beantwortet. Aus Tabelle 2.2.1 geht die Anzahl der Teilnehmenden (absolut und prozentual) hervor. Dabei wurde die Auswertung aufgeteilt in die Gewerke und Funktionen, die die Teilnehmenden angegeben haben. 26 % (absolut: 43 Teilnehmende) haben angegeben, bei Generalunternehmern, SF-Bauern bzw. im Rohbau- und Stahlbetongewerk beschäftigt zu sein. Der Anteil derjenigen, die die Angabe „Tragwerksplaner“ gemacht haben, lag bei 19 % (31 Teilnehmende). Jeweils 6 bis 8 % gaben an, als Sachverständige bzw. Gutachter, als Fachunternehmen für Abdichtungen bzw. FBV-Systeme oder als Hersteller und Vertrieb für Abdichtungen bzw. FBV-Systeme Erfahrungen mit FBV-Systemen gesammelt zu haben, siehe Tabelle 2.2.1.

Tabelle 2.2.1. Teilnahmen aufgeteilt in Gewerke/Funktionen

| Nr. | Sie sind ... | Teilnahmen prozentual | Teilnahmen gesamt |
|-----|--|-----------------------|-------------------|
| 1 | Auftragnehmer – Generalunternehmer/SF-Bau/Rohbau-/Stahlbetongewerk | 26 % | 43 |
| 2 | Planer – Tragwerksplaner (TWP) | 19 % | 31 |
| 3 | Auftragnehmer – Fachunternehmen für Abdichtungen/FBV-Systeme | 8 % | 13 |
| 4 | Vertrieb von FBV-Systemen | 8 % | 13 |
| 5 | Sachverständiger/Gutachter | 6 % | 10 |
| 6 | Hersteller von FBV-Systemen/Baustoffhersteller | 6 % | 10 |
| 7 | Planer – Fachplaner für WU-Konstruktionen | 4 % | 7 |
| 8 | Auftraggeber/Bauherr (privat/öffentlich) | 4 % | 6 |
| 9 | Planer – Architekt | 3 % | 5 |
| 10 | Planer – Objektüberwachung (Bauüberwachung, Projektsteuerung, Projektleitung) | 2 % | 4 |
| 11 | Systemanbieter von FBV-Systemen | 2 % | 3 |

In bisher ausgeführten Bauprojekten oder noch in Planung befindlichen Bauprojekten wurden meist mechanisch-adhäsive FBV-Systeme ohne quellfähigen Dichtstoff, gelegentlich FBV-Systeme mit adhäsiven drucksensiblen Klebeschichten mit besonderen Eigenschaften und seltener mechanisch-adhäsive FBV-Systeme mit quellfähigen Dichtstoff eingesetzt.

Die Ergebnisse der Befragung werden nachfolgend in anonymisierter Form zusammenfassend vorgestellt.

Frage: Welche Arten von FBV-Systemen haben Sie bisher bei Projekten verwendet?

In bisher ausgeführten Bauprojekten oder noch in Planung befindlichen Bauprojekten wurden bzw. werden meist mechanisch-adhäsive FBV-Systeme ohne quellfähigen Dichtstoff, gelegentlich FBV-Systeme mit adhäsiven drucksensiblen Klebeschichten mit besonderen Eigenschaften und seltener mechanisch-adhäsive FBV-Systeme mit quellfähigem Dichtstoff eingesetzt.

Frage: Bei welchen Beanspruchungsklassen nach DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“ (WU-Richtlinie) [R2] wurden FBV-Systeme eingesetzt?

Die Teilnehmenden der Befragung gaben an, dass FBV-Systeme meist bei Beanspruchungsklasse 1 (ständig oder zeitweise drückendem Wasser) nach WU-Richtlinie des DAfStb [R2] eingesetzt wurden bzw. werden. Teilweise werden FBV-Systeme jedoch auch bei Beanspruchungsklasse 2 (Bodenfeuchte) eingesetzt.

Frage: Bei welchen Nutzungsklassen gemäß WU-Richtlinie wurden FBV-Systeme eingesetzt?

Als Nutzungsklasse wurde fast ausschließlich NKL A (keine Feuchtstellen auf der Bauteiloberfläche zulässig) nach WU-Richtlinie [R2] angegeben, teilweise wurde explizit eine hochwertige Nut-

zung (z. B. NKL A^{***}) nach DBV-Merkblatt „Hochwertige Nutzung von Untergeschossen – Bauphysik und Raumklima“ [R18] genannt. Bei Nutzungsklasse B nach [1] wurden FBV-Systeme nach Angabe der Teilnehmenden selten eingesetzt.

Frage: Was waren die Gründe für den Einsatz von FBV-Systemen?

Der meistgenannte Grund für den Einsatz von FBV-Systemen war die Minimierung des Durchfeuchtungsrisikos bei hohen Nutzungsanforderungen unter Verwendung des Entwurfsgrundsatzes (EGS) [a] hinsichtlich Trennrissbildung nach WU-Richtlinie [R2]. Seltener wurde als Grund für den Einsatz von FBV-Systemen der Schutz gegenüber chemischem Betonangriff aus dem Grundwasser bzw. der Schutz gegen Eindringen von Gas aus dem Boden (Radon) in das Bauwerk genannt. Aus den Antworten zu dieser Frage konnte auch abgeleitet werden, dass in vielen Fällen der Entwurfsgrundsatz (EGS) [b] hinsichtlich Trennrissbildung nach WU-Richtlinie [R2] in Verbindung mit FBV-Systemen ausgeschrieben war.

Frage: Wie wurde der Untergrund bei Verwendung von FBV-Systemen vorbereitet?

Als Untergrundvorbereitung für das FBV-System gaben die Teilnehmenden meist eine einfache Sauberkeitsschicht ohne weitere Anforderungen oder Perimeterdämmung an.

Frage: Wie oft kam es bei Beanspruchungsklasse 1 nach [R2] zu Schadensfällen (Feuchtigkeitseintrag ins Bauwerk) und was war der Grund für die Schadensfälle?

Aufgetretene Schadensfälle (Feuchtigkeitseintrag ins Bauwerk) wurden selten bis gelegentlich genannt. Überwiegend konnte die Schadensursache nicht oder nur schwer festgestellt werden. Falls die Schadensursache für den Feuchteeintrag, z. B. infolge Hinterläufigkeit, ermittelt werden konnte, wurde als Schadensursache insbesondere genannt:

- kein ausreichender Betondruck oben in der Schalung,
- nicht gereinigte Verschmutzungen auf der FBV-Bahn,
- Undichtigkeit der Nahtstellen an Quer- oder Längsstößen,
- Undichtigkeit nachträglich abgedichteter Fehlstellen (z. B. Reparaturen mit Tapes, Durchdringungen, Schalungsankerfehlstellen usw.),
- Beschädigungen der FBV-Bahnen (z. B. durch Transport Betonstahlbewehrung).

Frage: Welches sind aus Ihrer Sicht derzeit die Probleme bei der Anwendung von FBV-Systemen?

Die häufigsten Antworten der Teilnehmenden bezogen sich auf das Risiko für Planende und Ausführende aufgrund der unklaren Regelwerkssituation bzw. der aktuellen Regelwerkssituation (keine anerkannte Regel der Technik, keine geregelte Bauart). Als weiterer Problempunkt wurde von den Befragten eine unzureichende Qualitätsprüfung und -sicherung vor, während oder nach der Verlegung von FBV-Bahnen, vor dem Betonieren sowie nach dem Ausschalen genannt.

Frage: Wie würden Sie die Notwendigkeit der Anpassung der vorhandenen Planung an FBV-Systeme einschätzen?

Von allen Befragten wurde angegeben, dass die Planung notwendigerweise auf die Verwendung von FBV-Systemen abgestimmt sein muss. Ebenso gaben die Teilnehmenden an, dass es dringend notwendig sei, den Bauherrn hinsichtlich der momentan noch schwierigen Regelwerkssituation aufzuklären.

Frage: Wie würden Sie den Schwierigkeitsgrad bei verschiedenen Tätigkeiten mit FBV-Systemen auf der Baustelle einschätzen?

Von den Befragten wurden alle im Fragebogen vorgegebenen Antwortmöglichkeiten von „normal“ bis „schwer/kompliziert“ genannt. Als „besonders kompliziert“ wurden insbesondere folgende Tätigkeiten eingestuft:

- Sauberhalten der verlegten FBV-Bahnen (Verschmutzungen vermeiden) bzw. nachträgliches Reinigen der verlegten FBV-Bahnen,
- Verlegen von FBV-Bahnen bei niedrigen Temperaturen,
- Sensibilisierung anderer Gewerke hinsichtlich FBV-Systemen,
- Ausführung von Dehnfugen,
- Vermeiden von Wellen- und Faltenbildung beim Verlegen.

Frage: Wurde das FBV-System-/Abdichtungspersonal zuvor geschult (insbesondere Schutz und Vorgehen bei Verschmutzungen und Beschädigungen)?

Die Teilnehmenden der Befragung gaben an, dass das mit dem Verlegen der FBV-Bahnen beauftragte Personal hinsichtlich des Schutzes der verlegten FBV-Bahnen und dem Umgang mit Verschmutzungen und Beschädigungen meist geschult wurde. Teilweise gaben die Teilnehmenden der Befragung jedoch an, dass ihnen nicht bekannt war, ob das Personal speziell bezüglich des FBV-Systems geschult wurde.

Frage: Wurde das für die Bewehrung bzw. das Betonieren zuständige Personal geschult (insbesondere hinsichtlich Schutz und Vorgehen bei Verschmutzungen und Beschädigungen der verlegten FBV-Systeme)?

Das für die Bewehrung bzw. das Betonieren zuständige Personal wurde nach Angabe der Teilnehmenden meist auf der Baustelle durch die Bauleitung bzw. den Polier eingewiesen. Gelegentlich erfolgte die Einweisung auch durch den Hersteller bzw. Systemanbieter. Die vorgesehenen Schutzmaßnahmen zur Vermeidung von Schmutzeintrag auf die verlegten FBV-Bahnen wurden vom für die Bewehrung bzw. das Betonieren zuständige Personal jedoch nur gelegentlich bis selten durchgeführt.

Kommentare der Teilnehmenden

Neben den spezifischen Fragen enthielt der Fragebogen auch ein Kommentarfeld für freie Eintragungen. Es handelt sich jeweils um Einzelmeinungen, die im Folgenden sinngemäß wiedergegeben sind:

- Aus unternehmerischer Sicht (Bauausführung) sollte das FBV-System auch in Zukunft nur als zusätzliche Maßnahme bei WU-Betonkonstruktionen eingesetzt werden, da das FBV-System

- als alleinige „Abdichtung“ ein hohes Risikopotenzial birgt, welches zu Lasten des Bauausführenden geht.
- FBV-Systeme sind oftmals wegen fehlender Planung und für FBV-Systeme ungeeigneter Geometrien nicht realisierbar.
 - Teilweise besteht mangelndes Fachwissen bei Architekten und Planern in Kombination mit überhöhten Erwartungen der Bauherren an FBV-Systeme.
 - Die Frage nach der Ausführung von Dehnfugen mit FBV-Systemen konnte von keinem der Hersteller beantwortet werden.
 - FBV-Systeme passen nicht zu alltäglichen, baulichen Gegebenheiten vor Ort (Witterung, hohe Lasten beim Einbau der Bewehrung, Schutz der eingebauten FBV-Systeme bis zum Betonieren, Beschädigung durch Zigaretten etc.).
 - Viele Planer nehmen kaum Rücksicht auf die Schwierigkeiten der Ausführenden (Verarbeiter) im Hinblick auf FBV-Systeme. Insbesondere Vouten, Höhenversätze, Durchdringungen in den Bauteilen sollten bei Verwendung von FBV-Systemen vermieden/minimiert werden. Gelegentlich wurden (aus Sicht der Teilnehmenden planungstechnisch zu vermeidende) Versätze und Vouten in der Gründungsebene als potenzielle Schadensursache genannt.
 - Es bestehen hohe Risiken für die ausführende Baufirma bezüglich der vertraglich geschuldeten Leistung, eines Gewährleistungsrisikos und ein extremes Risiko bei erst später folgender Wasserbeaufschlagung (nach erfolgtem Ausbau).

Die Umfrage verdeutlicht die Notwendigkeit zur Erstellung eines Regelwerks zur Planung und Ausführung von FBV-Systemen zur Erhöhung der Verwendungssicherheit bei FBV-Systemen.

2.2.2 Umfrage zur Schwachstellen- und Schadensanalyse

Mit den ersten Erkenntnissen aus Abschnitt 2.2.1 Umfrage zur Planung und Ausführung von FBV-Systemen wurde eine Schwachstellen- und Schadensanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse der Umfrage werden nachfolgend vorgestellt und sind detailliert im Anhang B2: Einzelergebnisse zur Umfrage zur Schwachstellen-/Schadensanalyse aufgeführt.

Die Befragung wurde mit sechs im Umgang mit FBV-Systemen erfahrenen Teilnehmenden aus FBV-Herstellern, bauausführenden Unternehmen, Ingenieurbüros und Sachverständigenbüros aus den DBV-Gremien und den Baustellen der Bauberatung des DBV durchgeführt, welche anonymisiert wurden.

Die Umfrage betrachtet die Planung, welche speziell die FBVS-Planung, Tragwerksplanung und Schalplanung beinhaltet. Darüber hinaus wird die Bauausführung einschließlich der Einweisung bzw. Schulung des Personals, der Verlegung der Bahnen, der Bewehrungs- und Betonagearbeiten sowie der nachträglichen Maßnahmen an Wänden, wie die Ausschalzeitpunkte, die Betonierfehler bzw. Kiesnester und die Reparaturen an Beschädigungen und Fehlstellen der FBV-Bahnen abgefragt.

Der Umfrageteil „Planung“ zeigt auf, dass bislang FBV-Systeme und insbesondere die Detailausbildungen und Schutzmaßnahmen vom Auftraggeber (i. d. R. ein Ingenieur- oder Architekturbüro) nicht vollumfänglich geplant wurden und daher vom Auftragnehmer (i. d. R. das bauausführende

Unternehmen) in Abstimmung mit den Verarbeitungsrichtlinien des FBV-Herstellers geplant und ausgeführt wurden. Weiterhin wurde der Bauherr meist nur unzureichend über die Möglichkeiten und auch Risiken aufgeklärt, wobei eine vermehrte Aufklärung des Bauherrn ab etwa Ende 2016 festzustellen war. Ein Teilnehmer gab an, dass es in der Vergangenheit Projekte gab, bei denen das FBV-System ohne eine WU-Betonkonstruktion nach WU-Richtlinie als alleinige Dichtmaßnahme geplant wurde. Bei der Planung des FBV-System als Zusatzmaßnahme zur WU-Betonkonstruktion nach WU-Richtlinie wurde zudem oftmals der Entwurfsgrundsatz b geplant. Weiterhin wurde den bauausführenden Unternehmen auch durch die Planung i. d. R. kein Verlegeplan zur Verfügung gestellt.

Im Umfrageteil „Bauausführung“ teilten die Teilnehmenden mit, dass die Schulung der die FBV-Systeme verlegenden Mitarbeiter noch nicht zufriedenstellend ist und auch die Betreuung der Baustellen durch die FBV-Hersteller teilweise nicht erfolgt ist. Die anderen auf der Baustelle tätigen Gewerke werden durch die Baustelle zu den Besonderheiten im Umgang mit montierten FBV-Bahnen (Sorgfalt, Sauberkeit, keine Schweiß- oder Flex-Arbeiten, ...) eingewiesen. Es wird mitgeteilt, dass eine Faltenbildung, die vermeiden werden sollte zur Einhaltung der Mindestbetondeckung und der Hinterlaufsicherheit, nicht verhindert werden konnte. An aufgehenden Bauteilen kann der Beton bei unsachgemäßer Verlegung der FBV-Bahnen zwischen der Schalung und der FBV-Bahn gelangen, was ebenfalls zu einer zu geringen Betondeckung führen kann. Zur Vermeidung der Verschmutzung der FBV-Bahnen, wodurch eine Hinterläufigkeit entstehen kann, werden nach Aussage eines Teilnehmenden bereits mehrere besondere Maßnahmen, wie z. B. Böschungsschutz, Betreten der FBV-Bahnen nur über besondere Zugänge einschließlich Sauberlaufstrecke mit Gitterrosten, Belehrung aller gewerblichen Arbeiter mit Arbeiten auf den FBV-Bahnen, regelmäßige Kontrolle der Wirksamkeit der Maßnahmen und Erneuerung der Hinweise usw. durchgeführt. Dennoch kann es, speziell bei Liegezeiten der FBV-Bahnen von mehr als eine Woche vor der Betonage, neben den Verunreinigungen aus dem Baustellenbetrieb zu Verschmutzungen durch Gewitterregen bzw. Platzregen, Sandverwehungen, Herbstlaub usw. kommen. Diese sind offenbar auch mit besonderen Maßnahmen nicht immer zu vermeiden. Beschädigungen der FBV-Bahnen oder Verschmutzungen der FBV-Bahnen durch ausgelaufene Zementschlemme der benachbarte Betonierabschnitte sind nur durch entsprechende Maßnahmen (wie z. B. einer Verwahrung bzw. Abschalelemente/Spacer) zu vermeiden. Die Reparaturen der Beschädigungen sind nach Bewehrungsverlegung bei mehrlagiger Bewehrung und hohem Bewehrungsgrad nicht mehr möglich. Ein Teilnehmender teilte zudem mit, dass die Verschmutzungen und Wasseransammlungen auf den FBV-Bahnen vor dem Betonieren meist nicht ausreichend entfernt werden, wodurch eine Hinterläufigkeit entstehen bzw. die Betonqualität beeinträchtigt werden kann. Die Abstandhalter der Bewehrung sind teilweise nicht systemkompatibel und werden bei Projekten eines Teilnehmenden erst seit 2018 versetzt angeordnet, was eine Bildung von „Wasserautobahnen“ zwischen den nicht auszuschließenden lokalen Schadstellen und den unplanmäßigen Rissen vermeidet. Hinsichtlich der für FBV-Systeme aufgrund der Ausbildung des Frischbetonverbunds sehr wichtigen Verdichtung des Betons wird nach Aussage eines Teilnehmenden kein besonderer Verdichtungsaufwand betrieben, der über die konventionelle Verdichtung bei WU-Beton hinausgeht.

Im Umfrageteil „Nachträgliche Maßnahmen an Wänden“ wird von den Teilnehmenden mitgeteilt, dass Ablösungen der FBV-Bahn vom WU-Beton, insbesondere, wenn die FBV-Bahn mechanisch an der Schalung befestigt wurde, bei frühzeitigem Ausschalen, z. B. ein Tag nach Betonierarbeiten, auftreten können. Diese frühen Ausschalzeiten sind üblicherweise regelwerkskonform und ausreichend für die Anforderungen aus der Standsicherheit. Je später allerdings ausgeschalt wird, desto kleiner ist das Risiko von Ablösungen der FBV-Bahnen. Reparaturen an Schalungsankerfehlstellen, Beschädigungsstellen, Verbundfehlstellen in der Fläche bzw. in Stoßbereichen werden systembedingt unterschiedlich ausgeführt, i. d. R. mit Flüssigabdichtung oder mit Tapes.

Die Umfrage verdeutlicht ebenfalls die Notwendigkeit zur Erstellung eines Regelwerks zur Planung und Ausführung von FBV-Systemen zur Erhöhung der Verwendungssicherheit bei FBV-Systemen.

2.2.3 Praxisnahe Baustellenversuche

Neben der Evaluierung der Praxiserfahrungen durch Umfragen sollten außerdem die Funktionstüchtigkeit der Bauweise unter Baustellenbedingungen sowie die Erfahrung des Baustellenpersonals auf ausgewählten Baustellen bestimmt werden. Dazu wurden vor Ort Testfelder (L/B/H = 1 x 1 x 0,25 m) durch das Baustellenpersonal erstellt und daraus gewonnene Probekörper im Anschluss im Labor auf die laterale Wassermigration und die Haftzugfestigkeit hin geprüft. Zum Zeitpunkt des Abschlussberichts wurden n = 3 Testfelder erstellt und ausgewertet.

Das Anlegen der Testfelder erfolgte im Winter 2018. Zur Erstellung des Testfeldes wurde vorab vom Baustellenpersonal auf der Fläche eine FBV-Bahn verlegt, die dann einige Tage der Witterung ausgesetzt war. Wie bei der herkömmlichen Bodenplatte erfolgte die Verlegung auf einer Sauberkeitsschicht, Nahtstellen waren allerdings nicht vorgesehen. Zu einem regulären Betonagetermin wurde dann, mit dem für die Bodenplatte vorgesehenen Beton das Testfeld vom Baustellenpersonal betoniert und gleichartig verdichtet (Rüttelflasche). Nach rund 14 Tagen wurden jeweils n = 7 Bohrkerne (Ø 150 mm) gezogen, an die THN transportiert, bis zum 28. Tag im Wasserbad gelagert und anschließend auf wesentliche Verbundeigenschaften geprüft.

An jeweils n = 4 Bohrkernen wurde die laterale Wassermigration in Anlehnung an DIN EN 12390-8 bei $p_{\max} = 5$ bar und einer Prüfdauer von $t = 7$ Tagen bestimmt. Nach der Lagerungsdauer wurde dazu das FBVS im Kreismittelpunkt angebohrt (Ø 23 mm), sodass Wasserdruck auf die Verbundschicht aufgebracht werden konnte (siehe auch Bild 2.2.1). Dem Prüfwasser wurde ein fluoreszierender Farbstoff zugegeben, der nach der Prüfung sowie dem Abziehen des FBVS vom Beton eine optische Bewertung der lateralen Wassermigration zuließ. An n = 2 Bohrkernen wurde die Haftzugfestigkeit der FBV-Bahn (Ø 50 mm) bestimmt. Ein weiterer Bohrkern war für mikroskopische Untersuchungen der Verbundschicht vorgesehen. Bild 2.2.1 soll einen Eindruck der Vorgehensweise geben.



Anlegen von Testfeldern
(durch das Baustellenpersonal)



Entnahme von n = 7 Bohrkernen nach rd. 14 d



Probekörper zur Prüfung des Hinterlaufschutzes
Prüfung der lateralen Wassermigration (n = 4, p_{max} = 5 bar, t = 7 d) sowie der Haftzugfestigkeit (n = 2) nach 28 (bzw. 56) d

Bild 2.2.1. Anlegen der Testfelder unter Baustellenbedingungen und Entnahme von Bohrkernen zur Untersuchung im Labor.

Die Ergebnisse der Hinterlauf- und Haftzugprüfungen sowie die betontechnologischen und witterungsbedingten Rahmenbedingungen der Herstellung sind in Tabelle 2.2.1 aufgeführt.

Tabelle 2.2.1. Randbedingungen der Herstellung der Testfelder sowie Ergebnisse der Prüfungen

| | FBVS | Beton | Bemerkung | Hinterlaufprüfung [mm] | | | | | Haftzug [MPa] | | |
|-------|-----------------|---------------------------------------|--|------------------------|-------|-------|-------|-------------|---------------|-------|-------------|
| | | | | Nr. 1 | Nr. 2 | Nr. 3 | Nr. 4 | Mittel | Nr. 1 | Nr. 2 | Mittel |
| Nr. 1 | Sika-Proof A-12 | CEM III/A 32,5 N-LH (56 d); F3; GK 16 | Sauber, trocken, T = +5 °C (*) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,509 | 0,469 | 0,49 |
| Nr. 2 | | | Leicht verschmutzt, trocken, T = +5 °C (*) | 40 | 0 | 5 | 5 | 12,5 | 0,306 | 0,204 | 0,25 |
| Nr. 3 | Sika-Proof A-08 | CEM II/B-M (S-LL) 42,5; F3; GK 32 | Sauber, trocken, T = -1 °C (*) | 0 | 5 | - | - | 2,5 | 1,28 | - | 1,28 |
| | | | Leichter Reif, T = -1 °C (*) | - | - | 30 | > 45 | 37,5 | - | 0,39 | 0,39 |

* Lufttemperatur zum Zeitpunkt des Betoneinbaus

Auf allen besuchten Baustellen wurde die Verlegung und Verarbeitung der Systeme durch geschultes Baustellenpersonal oder durch geschulte Fremdfirmen durchgeführt. Die Verarbeitung der FBV-Bahnen und die Vorgehensweise beim Betoneinbau entsprachen den derzeit empfohlenen Randbedingungen.

Die Ergebnisse der Laborprüfungen lassen erkennen, dass die hier untersuchten zwei mechanisch-adhäsiven FBV-Systeme bei Einhaltung der empfohlenen Randbedingungen (Vermeidung Verschmutzung und Feuchte, ausreichende Temperatur etc.) einen ausreichenden Hinterlaufschutz wie ausreichende Haftzugwerte aufweisen. Sobald allerdings Verschmutzungen oder Eis auf den Systemen verblieben, ist ein Rückgang des Hinterlaufschutzes und der Haftzugwerte zu

verzeichnen. Gerade beim Testfeld Nr. 3 war dies deutlich zu erkennen, dass an der Grenze zu einer Eisfläche aufgestellt wurde und einen direkten Vergleich zwischen Proben einer trockenen Fläche und Proben der Eisfläche zuließ. Bild 2.2.2 zeigt das Testfeld und zwei ausgewählte Ergebnisse der Hinterlaufprüfung (Nr. 2 und 4). Dort ist der Bohrkern nach der Hinterlaufprüfung mit bereits abgezogenem FBVS abgebildet. Die grün fluoreszierende Farbe stellt Bereiche mit Wasserbewegungen innerhalb der Verbundschicht dar. Die Wasserbewegungen waren in diesem Fall vermutlich auf die Bildung eines dünnen Eisfilms um die Polymerfasern zurückzuführen, der zum Zeitpunkt des Betoneinbaus nicht aufgetaut war und möglicherweise als kapillarer Hohlraum in der Verbundschicht verblieb. Gleichermäßen könnte die adhäsive Anlagerung an die Dichtschicht durch den Reiffilm gestört worden sein.

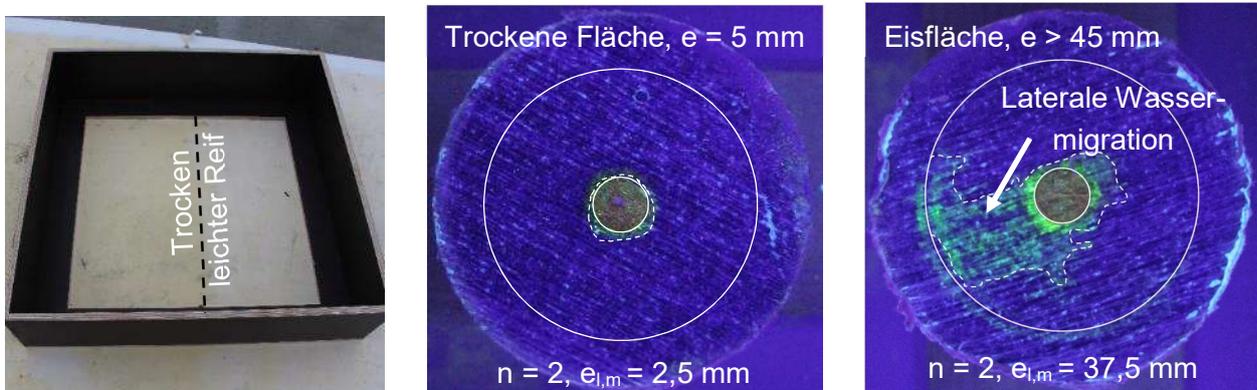


Bild 2.2.2. Testfeld Nr. 3 und Ergebnisse der Hinterlaufprüfungen Nr. 2 und 4

Die Ergebnisse der Testfelder bestätigen die derzeitigen Empfehlungen, Verschmutzungen und Eis vor dem Betoneinbau zu entfernen. Sie zeigen aber auch die Funktionstüchtigkeit der FBVS unter den realen Einbaubedingungen auf der Baustelle. Die FBV-Bahnen wurden in den Testfeldern auf die gleiche Weise vom gleichen Personal eingebaut wie im angrenzenden Bauwerk. Ebenso wurde der gleiche Beton wie im Bauwerk verwendet. Bei den Feldern ohne Verschmutzung oder Eis wurden mit den Laborergebnissen vergleichbar gute Ergebnisse erzielt und keine Hinterläufigkeiten festgestellt. Die Versuchsfelder können somit als geeignet zur Beurteilung der praxisnahen Rand- und Einbaubedingungen bewertet werden.

2.3 Empfehlungen zur Anwendung

Um eine erfolgreiche Anwendung der FBVS zu gewährleisten, ist sowohl in der Planung wie auch in der Ausführung insgesamt eine hohe Sorgfalt ratsam. Es handelt sich bei der Frischbetonverbundtechnologie noch immer um eine neue Bauweise, die erst in den letzten Jahren zunehmend Verwendung findet. Ein erhöhter Kommunikationsaufwand kann daher zwischen den am Bau Beteiligten zur Fehlerminimierung beitragen. Auch das ausführende Baustellenpersonal ist ebenso in die Thematik der FBVS einzuweisen und auf kritische Punkte während der Ausführung hinzuweisen.

Da der Sachstandbericht des DBV zum Thema FBVS (DBV-Heft 44, Kap. 7 und 8 [1]) bereits ausführlich auf die Planung und Ausführung eingegangen ist, sollen im Folgenden nicht alle relevanten Punkte aufgeführt werden. Vielmehr werden nach einer kurzen Zusammenfassung der Schilderungen des DBV-Hefts 44 die Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben geschildert und daraus Empfehlungen für die Anwendung abgeleitet.

Die Planung eines FBVS sollte im ersten Schritt eine Bedarfsplanung sowie eine umfassende Bauherrenberatung und -aufklärung vorsehen. Die Anwendungsmöglichkeiten und Nutzen eines FBVS sind gegenüber den Risiken und Kosten klar darzustellen. Die Entscheidung für oder gegen ein FBVS sollte dann möglichst frühzeitig getroffen werden, da die Anordnung eines FBVS auch Auswirkungen auf die WU-Betonkonstruktion selbst hat. So sind beispielsweise nicht alle Entwurfsgrundsätze (EGS) in Kombination mit einem FBVS technisch sinnvoll. Kommt es zur Entscheidung für ein FBVS, sollten die Anforderungen gemäß den objektspezifischen Randbedingungen ermittelt werden. Die Planung der FBVS ist anschließend in Kombination mit der Planung der WU-Betonkonstruktion in Form einer ganzheitlichen WU-Fachplanung durchzuführen. Alle Details und z. B. Durchdringungen oder Dehnfugenanschlüsse sind aufeinander abzustimmen. Die Anforderungen der FBVS sind dabei stets zu berücksichtigen. Die Planung endet mit der Erstellung der Ausschreibungsunterlagen, einer Ausführungs- und ggf. einer Werkstattplanung und schließlich einer Dokumentation.

Die Verlegung der FBVS ist anschließend durch spezialisierte Fremdfirmen oder eigenes Personal durchzuführen, welches für die Verlegung eines FBVS durch den Hersteller geschult wurde. Bei der Verlegung ist auf geeignete und saubere Untergründe zu achten. In der horizontalen Verlegung ist das FBVS auf einer Sauberkeitsschicht oder einer Perimeterdämmung zu verlegen, bei der vertikalen Verlegung auf einer Systemschalung oder z. B. auf geglätteten Betonuntergründen an der Baugrube (z. B. Spritzbetonvorsatzschale auf Schlitzwand o. ä. Verbauwände inkl. einhäufiger Schalung). Das FBVS ist nach den Verarbeitungsrichtlinien der FBVS-Hersteller zu verlegen und sollte eine flächig wasserdichte Abdichtung bilden (planmäßige Abdichtung aller Nähte, Durchdringungen etc.). Vor und während den Bewehrungsarbeiten sind Beschädigungen und Verschmutzungen zu vermeiden oder zu beseitigen. Auch sind für das FBVS geeignete Abstandhalter zu wählen. Beim Betoneinbau sollte kein stehendes Wasser, Eis oder Schnee auf dem FBVS vorhanden sein.

Aus dem Forschungsvorhaben konnten insbesondere die folgend dargestellten Empfehlungen zur Anwendung von FBVS abgeleitet werden.

- Um die Ausbildung eines Verbunds zwischen den FBVS und dem WU-Betonbauwerk gewährleisten zu können, muss der Frischbeton ungehindert an die Verbundschicht der FBVS herankommen. Jede Form einer Trennlage, die vor dem Betoneinbau auf den FBVS verbleibt, kann eine potentielle Verbundstörung darstellen bzw. die Anlagerung des Frischbetons verhindern. Beispielhaft können Verbundstörungen durch Verschmutzungen, Zementschlämme Wasser, Eis, Laub, Sägespane etc. auftreten. Es ist daher zu empfehlen das FBVS planmäßig frei von Verschmutzungen zu halten oder Verschmutzungen spätestens kurz vor dem Betoneinbau zu entfernen. Somit ist auch die Reinigungsfähigkeit der Verbundschichten eine wesentliche Eigenschaft eines FBVS und kann beispielsweise in die Formulierung von Leistungsklassen mit

einfließen (siehe auch Kap. 2.1). Ein hoher Bewehrungsgrad beispielsweise komplexer Gebäudegeometrien stellt hierbei eine große Herausforderung dar, die der nachträglichen Reinigungsmöglichkeit vor Betoneinbau hier gegenübersteht.

- Die FBV-Systeme sollten mit entsprechenden besonderen Maßnahmen vor Verschmutzungen und Beschädigungen geschützt werden, wie z. B. einem Böschungsschutz oder über das Betreten der FBV-Bahnen nur über besondere Zugänge einschließlich Sauberlaufstrecke mit Gitterrosten, der Belehrung aller gewerblichen Arbeiter mit Arbeiten auf den FBV-Bahnen und der regelmäßigen Kontrolle der Wirksamkeit der Maßnahmen mit Erneuerung der Hinweise. Der Zeitraum zwischen der Verlegung der FBV-Bahnen und der Betonierarbeiten (Liegezeiten FBV-Bahnen) sollte möglichst kurzgehalten werden, da längere UV-Expositionen den FBV-Bahnen schaden können und es speziell bei Liegezeiten der FBV-Bahnen von mehr als eine Woche zu Verschmutzungen durch Gewitterregen bzw. Platzregen, Sandverwehungen, Herbstlaub usw. kommen kann.
- Gerade bei der Verwendung von mechanisch-adhäsiven Systemen haben die Untersuchungen aus Kapitel 2.6 gezeigt, dass die Frischbetonkonsistenz und insbesondere die eingebrachte Verdichtungsenergie Einfluss auf den erzielten Hinterlaufschutz haben. Durch ausreichend langes Verdichten sowie ausreichend hohe Konsistenzklassen des Frischbetons kann genügend viel Zementleim aus der Betonmatrix abgetrennt und in eine Vliesstruktur eingebracht werden, bis die Vlieslage folglich vollständig mit Zementleim gefüllt vorliegt. Bei der Ausführung der FBVS ist daher darauf zu achten, dass die Frischbetonkonsistenz den Anforderungen des FBVS genügt (siehe Herstellerangabe Mindestkonsistenzklasse) und dass während des Betoneinbaus nahe dem FBVS ausreichend lange verdichtet wird. Bei den meisten Systemen führte in den Laboruntersuchungen eine Verdichtungszeit von $t = 2$ s mit einem Innenrüttler zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Ein hoher Bewehrungsgrad beispielsweise komplexer Gebäudegeometrien stellt hierbei eine große Herausforderung dar, die eine intensive Verdichtung erschwert.
- Um abschätzen zu können, wie hoch mögliche Haftspannungen beim Ausschalen zwischen einem FBVS und einer Schalttafel werden können, wurden im Rahmen einer Abschlussarbeit an der THN [9] orientierende Versuche durchgeführt. Es sollte ermittelt werden, wie hoch eine Haftspannung durch einen Wasserfilm zwischen einem FBVS und der Schalttafel durch eine reine Adhäsionsanlagerung werden kann. Untersucht wurden unterschiedliche Feuchtegehalte auf der Oberfläche der Schalttafel. Der Versuch sollte dazu im kleinen Maßstab zuerst einen Frischbetondruck, und anschließend das Ausschalen simulieren. Dazu wurden kleine Probekörper mit FBVS ($L/B = 75 \times 75$ mm) hergestellt, die im Zuge des Versuchs zuerst durch eine definierte Kraft auf eine phenolharzbeschichtete Schalttafel gepresst wurden, und dann wieder zentrisch abgezogen wurden. Die Versuche wurden für vier FBVS mit unterschiedlichen Dichtschichten durchgeführt, wobei der Feuchtegehalt auf der Schalttafel stufenweise erhöht wurde. Die orientierenden Untersuchungen ließen eine maximale Haftspannung über alle Systeme von $\sigma < 2,5 \cdot 10^{-3}$ N/mm² erkennen. Diese Spannung ist deutlich kleiner als die zentrischen Haftzugwerte von FBVS (im jungen Betonalter) und zeigt, dass beim Ausschalen nicht mit Beschädigungen durch Adhäsionskräfte infolge Feuchtigkeit zu rechnen ist. Ausgenom-

men davon sind Beschädigungen und punktuelle Ablösungen der Verbundschicht, die auf unsachgemäße Befestigungen der FBVS z. B. durch Tackerklammern folgen. Sollen Ablösungen der FBVS im Wandbereich daher gänzlich vermieden werden, dürfen die Bahnen nur am Wandkopf oberhalb der späteren Betonierhöhe befestigt werden.

- Bei der Verwendung der FBVS im vertikalen Wandbereich ist zu beachten, dass sich die Ausschallfrist zum einen nach der Festigkeitsentwicklung des Betons, zum anderen aber auch nach der Entwicklung des Haftverbunds der FBVS richtet. Die Festigkeitsentwicklungen der FBVS unterscheiden sich insbesondere durch die Verbundart, sind allerdings auch systemspezifisch und können nicht allgemeingültig formuliert werden. Die an der MPA BS durchgeführten Untersuchungen (siehe Abschnitt 2.7) haben gezeigt, dass die Verbundfestigkeiten bereits nach 2 Tagen so hoch sind, dass ausreichende Sicherheiten gegen Ablösungen vorhanden sind und der Verbund durch das Ausschalen nicht gestört wird. Der niedrigste Haftzugwert ergab sich für eine Bahn aus einem Stützen- bzw. Wandversuch. Am oberen Schalungsrand wurde als kleinster Einzelwert aus allen durchgeführten Untersuchungen ein Wert von $0,15 \text{ N/mm}^2$ ($15\,000 \text{ kg/m}^2$) ermittelt. Wird die im vorgenannten Punkt von der THN genannte maximale Haftspannung für das Ausschalen von $\sigma < 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ (250 kg/m^2) herangezogen, ergeben sich Sicherheiten vom Faktor 60. Die Aussage bezieht sich allerdings nur auf die reinen Sog- bzw. Haftkräfte bei einem Feuchtefilm zwischen FBVS und Schalhaut. In der Praxis werden die Bahnen häufig durch Tackern mit Klammern an der Schalung befestigt, was partiell dann ggf. zu höheren, nicht definierten Haftzugkräften und zur Störung des Haftverbundes führen kann. Entsprechende Befestigungsmittel sind zu vermeiden oder deren Eignung durch gesonderte Versuche bahnen-spezifisch nachzuweisen (Anforderung keine Schädigung des Verbundes).

2.4 Maßnahmen zur Qualitätssicherung (DBV+MPA+THN)

Es wurden Checklisten zur Qualitätssicherung erstellt, die im Anhang C des DBV-Hefts 44 [1] veröffentlicht wurden. Die Checklisten betrachten jeweils verschiedene Zeitpunkte im Verlauf der Bauausführung (vor der Verlegung, nach der Verlegung und vor Bewehrungsverlegung bzw. vor Betonage und nach der Betonage). Folglich werden bei Ausführung mit einer Qualitätssicherung durch die Checklisten die Risiken eines nachträglichen Schadensfalls deutlich minimiert bzw. der Schadensbereich möglicherweise schneller lokalisiert und instandgesetzt.

2.5 AP E1-3: Laboruntersuchungen an FBVS – Allgemeines

In den Ergänzungspaketen AP E1 bis E3 wurden verschiedene Laboruntersuchungen an FBVS durchgeführt, um wesentliche Funktionen wie Wasserbewegungen in der Verbundschicht oder den Haftverbund unter verschiedenen Randbedingungen zu ermitteln. Die Untersuchungen gliederten sich in folgende Arbeitspakete:

- AP E1 – Laboruntersuchungen zur lateralen Wassermigration: An Proben mit appliziertem FBVS sollte der Widerstand der Verbundschicht gegen laterale Wassermigration unter Wasserdruck bei verschiedenen Herstell- und Prüfrandbedingungen gemessen werden.

- AP E2 – Verbunduntersuchungen an FBVS: Der Haftverbund der FBVS zum Beton sollte in Abhängigkeit vom Betonalter, von der verwendeten Sieblinie und in Abhängigkeit vom Zement ermittelt werden. Darüber hinaus sollten Aussagen zum Einfluss einer Wärmeeinwirkung und dem Feuchtezustand der Verbundschichten sowie zu den Versagensbildern getroffen werden. Es war auch die Frage zu klären, ob die Haftzugfestigkeit und die Hinterlaufsicherheit miteinander korrelieren. Aus der Diskussion im Arbeitskreis ergab sich außerdem die Aufgabe, eine orientierende Untersuchung zum Einfluss der Betonierhöhe bzw. des Betondrucks auf die Haftzugfestigkeit durchzuführen. In Zusammenhang mit den systembedingten Bahnennähten sollte die Festigkeit und Dauerhaftigkeit der Verbindungen in Abhängigkeit von der Wassereinwirkung, der Lagerungstemperatur und der Einlagerungszeit durch Nahtuntersuchungen zum Scherverhalten geprüft werden.
- AP E3 – Feuchtetransportmodell und Randzone: In stichprobenartigen Untersuchungen sollte die Gültigkeit des WU-Arbeitsmodells gemäß WU-Richtlinie bei FBVS-Applikation überprüft sowie die Festbetoneigenschaften am FBVS-zugewandten Randbeton geprüft werden.

Die Laboruntersuchungen wurden an insgesamt 10 der in Tabelle 2.5.1 aufgeführten FBVS der Industriepartner durchgeführt. Bei den zur Verfügung gestellten Bahnen handelte es sich um Qualitäten und Aufbauten, die vor den in der Tabelle angegebenen Zeiten der Materialanlieferung (Spalte 4 in Tabelle 2.5.1) gefertigt wurden. Im Anhang A1 ist jeweils ein Querschnitt jeden Systems als mikroskopische Darstellung aufgeführt.

Tabelle 2.5.1. In den Laboruntersuchungen vertretene FBVS

| Industriepartner | FBVS-Produkt | Verbundart | Zeitpunkt der Materialanlieferung |
|--|---|--|-----------------------------------|
| BPA GmbH | DualProof T 2,0 | mechanisch-adhäsiv | Oktober 2017 |
| Max Frank GmbH & Co.KG | Zemseal Standard | mechanisch-adhäsiv | November 2017 |
| GCP Germany GmbH | Preprufe 300 Plus LT | klebe-adhäsiv | November 2017 |
| Roland Wolf GmbH | Wolfseal | bituminös-adhäsiv | Januar 2018 |
| Volteco S.p.A bzw. wba Abdichtungssysteme | Amphibia 3000 | mechanisch-adhäsiv mit Quellpolymeren | November 2017 |
| Sika GmbH | SikaProof A-08 | mechanisch-adhäsiv | Dezember 2017 |
| H-Bau Technik GmbH | Secuflex | klebe-adhäsiv | Dezember 2017 |
| ankox GmbH | Polyfleece SX1000 | mechanisch-adhäsiv mit Quellpolymeren | Oktober 2017 |
| WFP Waterproofing GmbH | Pre-Tec Dichtungsbahn Plus | klebe-adhäsiv | Januar 2018 |
| nik ing-sv-büro gmbh | [NIK]-Seal FBVS Typ P „Weiße-Wanne-Plus“ | mechanisch-adhäsiv | Juni 2018 |

Im Folgenden wurden die Produkte zur Anonymisierung mit S1 – S10 bezeichnet. Die Reihenfolge der Bezeichnung wurde zufällig gewählt.

Die in den Laboruntersuchungen verwendeten Mischungszusammensetzung der Betone wurden zwischen der MPA BS und der THN abgestimmt. Es wurden Betone mit hohem Wassereindringwiderstand verwendet, um realitätsnahe Bedingungen zu schaffen. Die Sieblinie wurde meist mit einer Körnung A/B32, für einige Versuche mit A/B16 gewählt. Der Wasserzementwert betrug $w/z = 0,55$ bei einem Zementgehalt von $z = 320 \text{ kg/m}^3$.

Es wurden typische Zemente für WU-Betonbauwerke in Deutschland gewählt, wie sie im Folgenden dargestellt wurden. Es wurden an der MPA BS und an der THN Zemente der gleichen Chargen für alle Untersuchungen verwendet.

- Zement 1 (Z1): CEM II/A-LL 32,5 R (Schwenk Zement AG, Werk Bernburg);
- Zement 2 (Z2): CEM III/A 32,5 N-LH (HeidelbergCement AG, Werk Burglengenfeld).

Der Zement 1 (CEM II II/A-LL 32,5 R) zeichnet sich durch eine normale Hydratationstemperatur, eine normale Frühfestigkeit und eine normale Nacherhärtung aus, während der Zement 2 durch eine niedrige Hydratationswärme (LH), eine langsamere Festigkeitsentwicklung und eine gute Nacherhärtung charakterisiert werden kann.

Da die für den Beton in Braunschweig und Nürnberg verwendete Gesteinskörnung aus unterschiedlichen Vorkommen stammte, war es mit Blick auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erforderlich, die Sieblinien aufeinander abzustimmen. Die an der MPA Braunschweig und der TH Nürnberg verwendeten Sieblinien A/B 16 und A/B 32 werden in Bild 2.5.1 gezeigt.

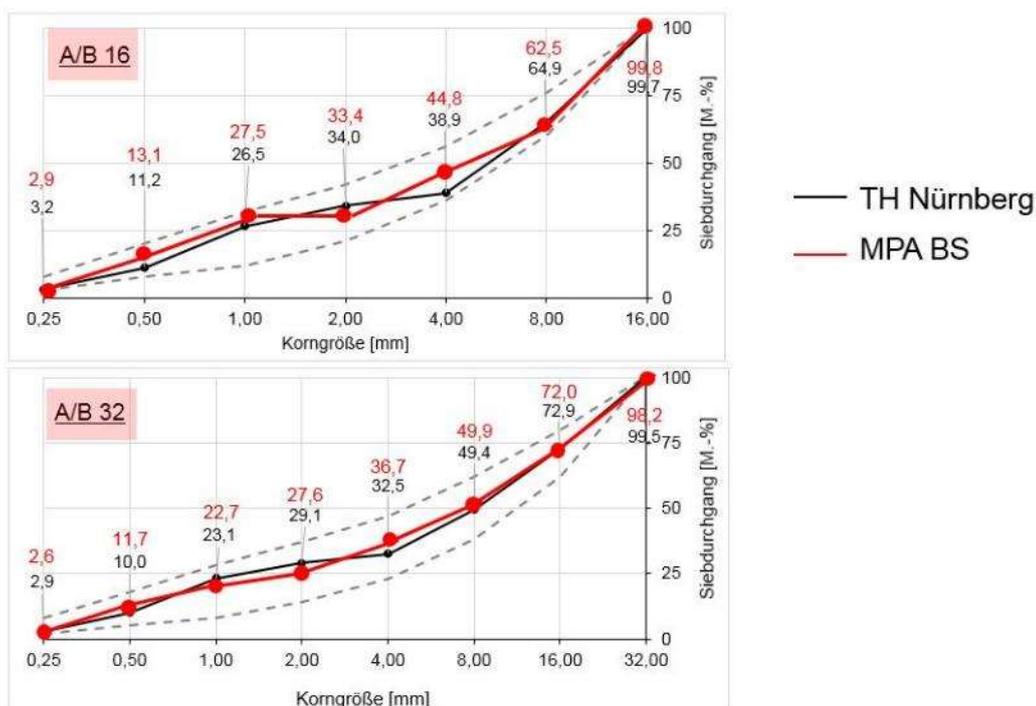


Bild 2.5.1. An der TH Nürnberg und der MPA Braunschweig verwendete Sieblinien

2.6 AP E1: Laboruntersuchungen zur lateralen Wassermigration an FBVS

2.6.1 Übersicht über das Versuchsprogramm und Prüfregime

Eine wesentliche Eigenschaft der FBVS ist der Schutz gegen laterale Wassermigrationen in der Verbundschicht im Falle einer Fehlstelle in der Dichtschicht. Ziel der „Hinterlaufprüfungen“ bzw. Prüfungen der lateralen Wassermigration war es, störende Einflüsse auf die Ausbildung eines wasserundurchlässigen Verbundes zu ermitteln, z. B. aus ungeeigneten rheologischen Eigenschaften des Betons oder bei nicht fachgerechtem Betoneinbau.

Die Migrationsversuche für den seitlichen Feuchtetransport wurden an Betonplatten mit den Abmessung L/B/H = 200 x 200 x 100 mm durchgeführt, bei denen Wasserdruck auf die Verbundschicht zwischen FBVS und Beton über eine Fehlstelle aufgebracht werden konnte (siehe Bilder 2.6.1 und 2.6.2). Die Probekörperherstellung erfolgte in Metallschalungen, auf deren Boden jeweils ein FBV-System vor dem Betoneinbau eingelegt wurde. Dieses wies bereits eine mittig gestanzte Fehlstelle (\varnothing 25 mm) auf, auf die in der späteren Prüfung der Wasserdruck aufgebracht wurde. Zum Betoneinbau wurde die Fehlstelle wieder verschlossen, indem das ausgestanzte Stück verkehrt herum eingelegt wurde. Beim Ausschalen wurde das kreisförmige FBVS-Stück anschließend wieder vorsichtig entfernt. So konnte die Fehlstelle frei von Beton gehalten werden und musste nach dem Betoneinbau nicht gebohrt werden. Die Probekörper verblieben nach der Betonage zwei Tage abgedeckt in der Schalung und wurden anschließend bis zur Prüfung im Wasserbad ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) gelagert. Die Hinterlaufprüfung begann frühestens 28 Tage, spätestens 35 Tage nach Herstellung der Probekörper.

Nach der Wasserlagerung wurden die Probekörper in Anlehnung an DIN EN 12390-8 [R1] geprüft und dazu in eine WU-Prüfanlage eingebaut. Das Wasser der Prüfanlage wurde mit einem fluoreszierenden Tracer eingefärbt, um den Wasserweg später unter UV-Licht nachvollziehen zu können. Als Tracer kam Uranin AP (CAS-Nr. 518-48-8; C.I. 45350) in einer Konzentration von 0,17 g/l zum Einsatz.

Das Prüfregime sah eine stufenweise Steigerung des Wasserdrucks vor. Damit wurde sich der amerikanischen modifizierten Prüfnorm ASTM D5385 angenähert, nach der vergleichbare Versuche zur Ermittlung des Hinterlaufschutzes im Ausland durchgeführt werden. Durch die stufenweise Laststeigerung sollte quellbeschichteten FBVS auch die Möglichkeit einer gewissen Reaktionszeit gegeben werden. Stündlich wurde der Wasserdruck um 1 bar (10 m Wassersäule) erhöht, bis ein Gesamtdruck von 5 bar erreicht war. Dieser Gesamtdruck wurde dann bis zur 72. Stunde gehalten; anschließend wurden die Proben stufenlos entlastet und ausgebaut. Die FBVS-Dichtschichten wurden dann von der Betonfläche abgezogen und die maximale laterale Migrationstiefe unter UV-Licht bestimmt. Diese wurde von dem Rand der Perforation aus in radialer Richtung ermittelt und zur Dokumentation fotografiert. Der Versuchsstand und die UV-Lichtkammer sind in den Bildern 2.6.3 bis 2.6.6 abgebildet.

Probekörperabmessung:
 $l/b/h = 150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$

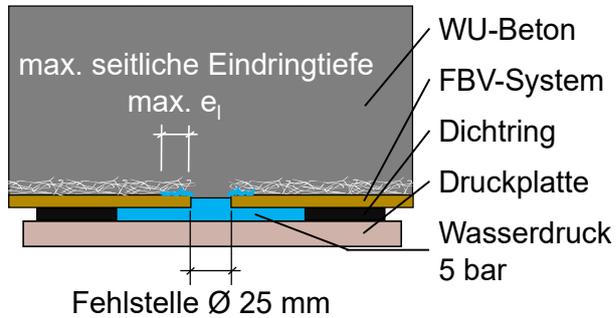


Bild 2.6.1. Probekörperaufbau und Anordnung im WU-Prüfstand



Bild 2.6.2. Probekörper mit appliziertem FBVS vor dem Einbau in die WU-Anlage (Draufsicht auf FBVS)



Bild 2.6.3. Bestückte WU-Anlage

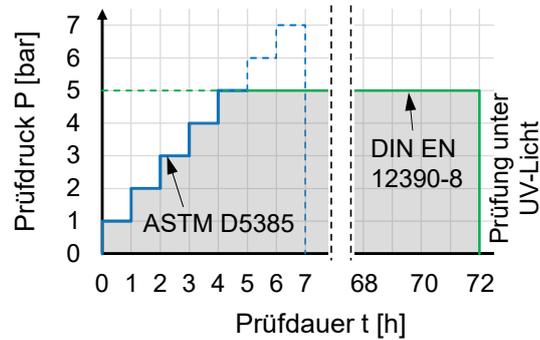


Bild 2.6.4. Druckverlauf bei den Prüfungen

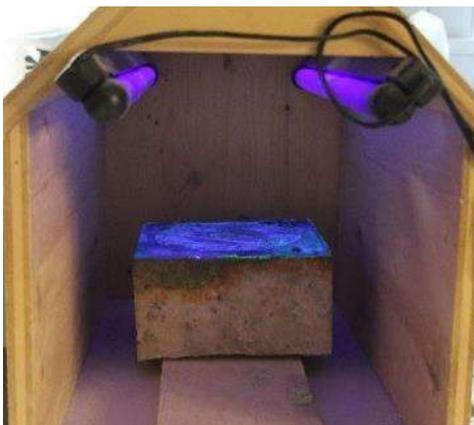


Bild 2.6.5. Die visuelle Bewertung der Hinterläufigkeiten fand in einer „UV-Kammer“ statt.

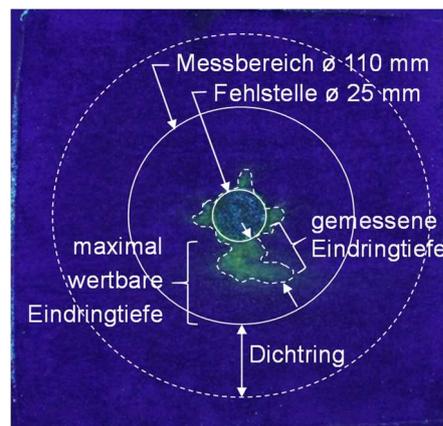


Bild 2.6.6. Visuelle Bewertung der Hinterläufigkeiten unter UV-Licht.

Der Umfang der geplanten Versuche zur Prüfung des Hinterlaufschutzes im Ergänzungspaket AP E1 ist in Tabelle 2.6.2 dargestellt. Diese Prüfungen wurde an jedem FBVS durchgeführt mit dem Ziel, potentielle Einflüsse auf den Verbund zu ermitteln, die aus unsachgemäßem Betoneinbau oder ungünstigen rheologischen Betoneigenschaften hervorgehen können. Aus Vorversuchen konnten gerade die Verdichtungsenergie, das Verdichtungsgerät und die Frischbetonkonsistenz als Einflussgrößen festgestellt werden. Weiterhin wurde die Betonrezeptur in den Eigenschaften Zement und Größtkorn variiert. Für jede Variation wurden an jedem FBVS mindestens $n = 2$ Hinterlaufprüfungen durchgeführt – teilweise auch weiterführende Versuche. Zu ausgewählten Variationen wurden außerdem Probekörper hergestellt, die unter einem Auflichtmikroskop untersucht wurden. Dadurch konnten die Ergebnisse der Hinterlaufprüfungen bestätigt und nachvollzogen werden. Aus den Produkten des Untersuchungsprogramms wurden aus der ganzen Bahn statistisch verteilt Proben entnommen, die für die Untersuchungen weiterverarbeitet wurden.

Als Referenzbeton wurde eine möglichst realitäts- und praxisnahe Betonzusammensetzung verwendet und nicht auf typische Laborzusammensetzungen mit geringerem Größtkorn zurückgegriffen. Daher kam für den Großteil der Versuche ein typischer Transportbetonzement CEM II/A-LL 32,5 R und eine Sieblinie A/B mit einem Größtkorn von 32 mm zum Einsatz (siehe auch Tab. 2.6.1)

Tabelle 2.6.1. Alle verwendeten Betonmischungen im Forschungsprojekt

| Zementart | | Zement- gehalt | Wasser | Gestein (Anteile in M.-%) (quarzitisches Rundkorn, Donauregion) | | | | | |
|-----------|------------------------|-------------------|--------|--|----------------------|------|------|------|------|
| | | | | kg/m ³ | kg/m ³ | | 0/2 | 2/8 | 8/16 |
| Z1 | CEM II/A-LL 32,5 R | 320 | 175 | 1 847,1 | A/B 16 (k = 4,21) | 35 % | 30 % | 35 % | - |
| Z2 | CEM III/A 32,5 N-LH | | | | A/B 32 (k = 4,81) | 30 % | 20 % | 20 % | 30 % |

Tabelle 2.6.2. Untersuchungsmatrix zur Ermittlung der Einflüsse auf Verbundschichten je FBVS

| | Zuschlag | Zement | Konsistenz- klasse | Verdichtung | Hinterlauf- prüfungen | Mikros- kopie |
|----------------|----------|--------|-----------------------|--------------------|--------------------------|------------------|
| 1. Referenz | A/B 32 | Z1 | obere F3 | 90 s Rütteltisch | n = 3 | n = 1 |
| 2. Verdichtung | A/B 32 | Z1 | obere F3 | 20 s Rütteltisch | n = 2 | n = 1 |
| | A/B 32 | Z1 | obere F3 | 10 s Rütteltisch | n = 2 | |
| | A/B 32 | Z1 | obere F3 | 10 s Rüttelflasche | n = 2 | |
| 3. Konsistenz | A/B 32 | Z1 | F5 | 20 s Rütteltisch | n = 2 | n = 1 |
| | A/B 32 | Z1 | F5 | 10 s Rütteltisch | n = 2 | |
| | A/B 32 | Z1 | F3 | 90 s Rütteltisch | n = 2 | |
| | A/B 16 | Z1 | untere F3 | 20 s Rütteltisch | n = 2 | |
| 4. Beton | A/B 32 | Z2 | obere F3 | 20 s Rütteltisch | n = 2 | |
| | A/B 32 | Z2 | F5 | 20 s Rütteltisch | n = 2 | |
| | A/B 16 | Z1 | obere F3 | 90 s Rütteltisch | n = 2 | |

Probekörper für mikroskopische Analysen

Neben den Wassermigrationsprüfungen wurden zur Bewertung von verbleibenden Fehlstellen in der Verbundschicht stichprobenartig mikroskopische Probekörper hergestellt, die eine optische Kontrolle der Verbundschicht zuließen. Die Probekörper wurden in gleicher Weise wie die Probekörper zur Hinterlaufprüfung hergestellt, allerdings wurden 150er Würfel verwendet. Nach 28 Tagen Wasserlagerung wurde im Nassverfahren eine Scheibe aus dem Würfel geschnitten, aus der die Proben für die mikroskopische Analyse entstammten. Beim Schneiden wurde darauf geachtet, dass auf die FBVS-Verbundschicht keine ablösenden Kräfte wirken konnten. Um die Erkennbarkeit von evtl. Fehlstellen unter dem Mikroskop zu verbessern, wurden die Proben anschließend unter Vakuum mit eingefärbtem Epoxidharz geschlossen bzw. offene Hohlräume damit gefüllt. Die Probekörper wurden dann im Nassverfahren schrittweise mit zunehmender Körnung geschliffen und poliert.

2.6.2 Ergebnisse des AP E1

Es wurden im AP E1 insgesamt 292 Hinterlaufprüfungen an zehn unterschiedlichen FBV-Systemen durchgeführt. Diese Prüfanzahl umfasst alle geplanten Versuche im Rahmen der Variationen aus Tabelle 2.6.2 (versch. Herstellbedingungen), sowie einige Variationen der Prüfbedingungen und Wiederholungsversuche. Neben den Hinterlaufprüfungen wurden 30 Probekörper für mikroskopische Analysen hergestellt und die jeweiligen Grenzschichten auf Hohlräume untersucht, wodurch die Prüfergebnisse der Hinterlaufprüfungen plausibel nachvollzogen werden konnten. Alle Einzelergebnisse der Wassermigrationsprüfung sind in Anhang A2 bzw. in den Bildern 2.6.8 und 2.6.9 aufgeführt.

Die Standardabweichung bei den Wassermigrationsprüfungen betrug, gemittelt über alle Messreihen, $s = \pm 3,0$ mm. Eine Messreihe versteht sich als Prüfung mit jeweils gleichen Randbedingungen sowie FBVS und setzte sich aus jeweils 2 – 5 Einzelversuchen zusammen ($n = 115$ Messreihen mit in Summe $m = 292$ Einzelwerten). Die Standardabweichung von $s = \pm 3,0$ mm zeigt die Wiederholbarkeit der Messungen bei den Wassermigrationsprüfungen.

Bild 2.6.7 zeigt schematisch eine Zusammenstellung aller Ergebnisse und veranschaulicht die ermittelten Einflüsse auf den Hinterlaufschutz mit einer qualitativen Gewichtung. So hat sich gerade die Verdichtung als ausschlaggebender Einfluss bei mechanisch-adhäsiven Vliesssystemen herausgestellt. Eine bestimmte Verdichtungsenergie ist notwendig, um durch die Senkung der Fließgrenze Zementleim aus der Matrix zu lösen, ausreichend viel Zementleim in die Vliesstruktur einzubringen und die dortigen Zwischenräume zu füllen. Je nach Vlieseigenschaften (Dichte, Dicke und Struktur) fallen die nötigen Mengen an Zementleim und somit die Verdichtungsenergien unterschiedlich hoch aus.

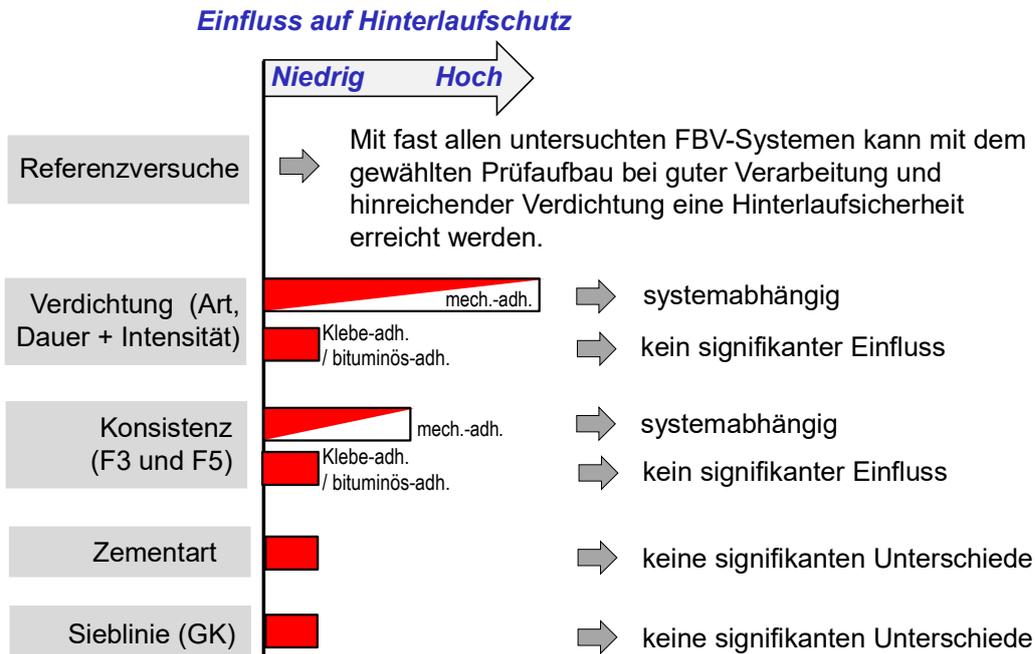


Bild 2.6.7. Zusammenfassung der Ergebnisse der Hinterlaufprüfungen (n = 292)

Die Verdichtungsenergie wird neben der gewählten Verdichtungsdauer auch durch das Verdichtungsgerät selbst beeinflusst. Baustellentypische Rüttelflaschen führten in den Prüfungen wesentlich schneller zu einer hinreichenden Leimpenetration und zu einer Ausbildung eines Hinterlaufschutzes. Labortypische Rütteltische benötigten dagegen deutlich längere Verdichtungsauern. Die eingetragene Energie scheint durch abweichende Verdichtungsparameter (Frequenz, Amplitude) und durch dämpfende Effekte (Schalung, FBVS als Federelemente) geringer zu sein. So führten Verdichtungszeiten eines Innenrüttlers nach rund 1 – 2 s oft schon zum Erfolg, während bei gleichen Systemen mit dem Rütteltisch rund 10 – 20 s verdichtet werden musste, um die gleiche Wirkung zu erzielen. Diese Erkenntnis ist gerade im Hinblick auf die Formulierung einheitlicher Prüfgrundsätze relevant. Auch bestätigen die nur kurzen nötigen Verdichtungsenergien mit der Rüttelflasche die Anwendbarkeit der FBVS auf Baustellen.

Bilder 2.6.10 und 2.6.11 sollen die Auswirkung unterschiedlicher Verdichtungsauern und -geräte auf die laterale Wassermigration veranschaulichen. Bild 2.6.10 zeigt die Ergebnisse der lateralen Wassermigration von vier mechanisch-adhäsiven Systemen, die über vergleichbar dicke Verbundschichten verfügten (andere Vlieseigenschaften wurden nicht betrachtet). Die höhere „Effektivität“ der Rüttelflasche wird sichtbar, die im Vergleich zum Rütteltisch in kürzerer Zeit zu einem hinreichenden Hinterlaufschutz führt. Die genauen Ursachen für diese Effekte konnten nicht abschließend geklärt werden, sind aber vermutlich auf unterschiedliche Verdichtungsparameter wie Frequenz, Amplitude und Ausbreitungsrichtung sowie die unterschiedliche Art des Energieeintrags zurückzuführen. Die Rüttelflasche kann dadurch in kürzerer Zeit mehr Zementleim aus der Matrix abtrennen und in die Vliesstruktur eintragen.

| Geprüfte Systeme | Referenz (Z1, A/B 32, F3/F4) | | | | Einfluss der Verdichtung (Z1, A/B 32, F3/F4) | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|---------------------------------|------|------|------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| | Rütteltisch | | | | Rüttelflasche (ø 55 mm) | | | | | | | | | | | | | |
| | 90 s | | 20 s | | 10 s | | 5 s | | 20 s | | 10 s | | 5 s | | 1-2 s | | | |
| S1 | 5 | 0 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 25 | | | 5 | 0 | | | | | | |
| S2 | 0 | 0 | 0 | / | 0 | 0 | / | / | 10 | 5 | / | / | 0 | 0 | 0 | 0 | > 45 | 0 |
| | | | | | | | | | 10 | 0 | | | | | | | 0 | 5 |
| S3 | > 45 | > 45 | > 45 | / | > 45 | > 45 | / | / | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | 10 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 |
| | | | | | | | | | > 45 | > 45 | > 45 | 0 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | | |
| S4 | 0 | 0 | / | / | 0 | 0 | / | / | 0 | 5 | / | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S5 | 0 | 0 | 0 | / | > 45 | 0 | / | / | 15 | 5 | / | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S6 | 10 | 10 | 0 | 5 | 5 | 0 | 5 | 0 | / | / | / | / | 10 | 0 | / | / | / | / |
| S7 | 0 | 0 | 0 | / | 0 | 0 | / | / | 0 | 0 | / | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| S8 | 30 | 20 | 10 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | / | / | 0 | 0 | 30 | 5 | 0 | 20 | > 45 | > 45 |
| | 20 | 0 | 5 | 0 | / | / | / | / | 0 | 0 | > 45 | 0 | 0 | 35 | 20 | 15 | > 45 | |
| S9 | 0 | 0 | 10 | / | 0 | 5 | / | / | 10 | 15 | / | / | 0 | 0 | 5 | 0 | 5 | 10 |
| | | | | | | | | | 25 | 15 | 0 | 0 | | | | | | |
| S10 | 0 | 0 | 0 | / | 0 | 0 | 0 | 0 | / | / | / | / | 0 | 0 | / | / | / | / |

Z1: CEM II/A-LL 32,5 R (Schwenk Zement, Werk Bernburg)
 Z2: CEM III/A 32,5 N-LH (Heidelberger Zement, Werk Burglengelfeld)
 A/B 32: Zuschlag aus quarzitischem Rundkorn mit GK 32 mm
 F3/F4: Konsistenz wurde auf ein Ausbreitmaß von 47 – 49 cm eingestellt

Bild 2.6.8. Ergebnisse der Hinterlaufprüfungen – Referenz und Einfluss der Verdichtung

| Geprüfte Systeme | Einfluss des Größtkorns und der Konsistenz (Z1, Verdichtung 10 s bzw. 20 s RT) | | | | | | Einfluss Zement Z2 (A/B 32, 10 bzw. 20 s RT) | | | | | | | |
|------------------|---|------|------|----------|----|------|---|------|------|------|------|------|------|------|
| | GK 16 mm | | | GK 32 mm | | | GK 32 mm | | | | | | | |
| | F2/3 | | F3/4 | F5 | | F3/4 | | F5 | | F3/4 | | F5 | | |
| S1 | 5 | 10 | / | / | / | / | 5 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| S2 | 10 | 20 | | | | | 10 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | > 45 | 0 |
| | | 10 | 5 | / | / | / | / | / | / | / | / | / | / | |
| S3 | > 45 | > 45 | / | / | / | / | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 |
| S4 | 0 | 0 | / | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| S5 | 0 | 0 | / | / | 0 | 0 | > 45 | 0 | 0 | 5 | 0 | 40 | 0 | 0 |
| S6 | 0 | 10 | 10 | 0 | / | / | 5 | 0 | 10 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S7 | 0 | 0 | / | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S8 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | / | / | > 45 | > 45 | 30 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | 0 |
| S9 | 5 | 10 | / | / | 30 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 |
| S10 | 0 | 0 | / | / | / | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Z1: CEM II/A-LL 32,5 R (Schwenk Zement, Werk Bernburg)
 Z2: CEM III/A 32,5 N-LH (Heidelberger Zement, Werk Burglengelfeld)

Bild 2.6.9. Ergebnisse der Hinterlaufprüfungen – Einfluss Größtkorn, Konsistenz und Zement

Bild 2.6.11 zeigt ebenfalls ein mechanisch-adhäsives FBVS mit im Vergleich dickerer Vlieslage. Hier war die Auswirkung der Verdichtungszeit auf den Hinterlaufschutz besonders ausgeprägt. Durch das größere notwendige Leimvolumen, das aus der Betonmatrix abgetrennt werden musste, waren auch entsprechend längere Verdichtungsauern nötig. So musste mit der Rüttelflasche bis zu 20 s, mit dem Rütteltisch über 90 s verdichtet werden, um einen vollständig hinterlaufsischeren Verbund zu erzielen. Dieses System (S8) besitzt eine im Vergleich zu anderen Vlies-systemen außergewöhnlich dicke Vlieslage und verdeutlicht den Verdichtungseinfluss besonders gut.

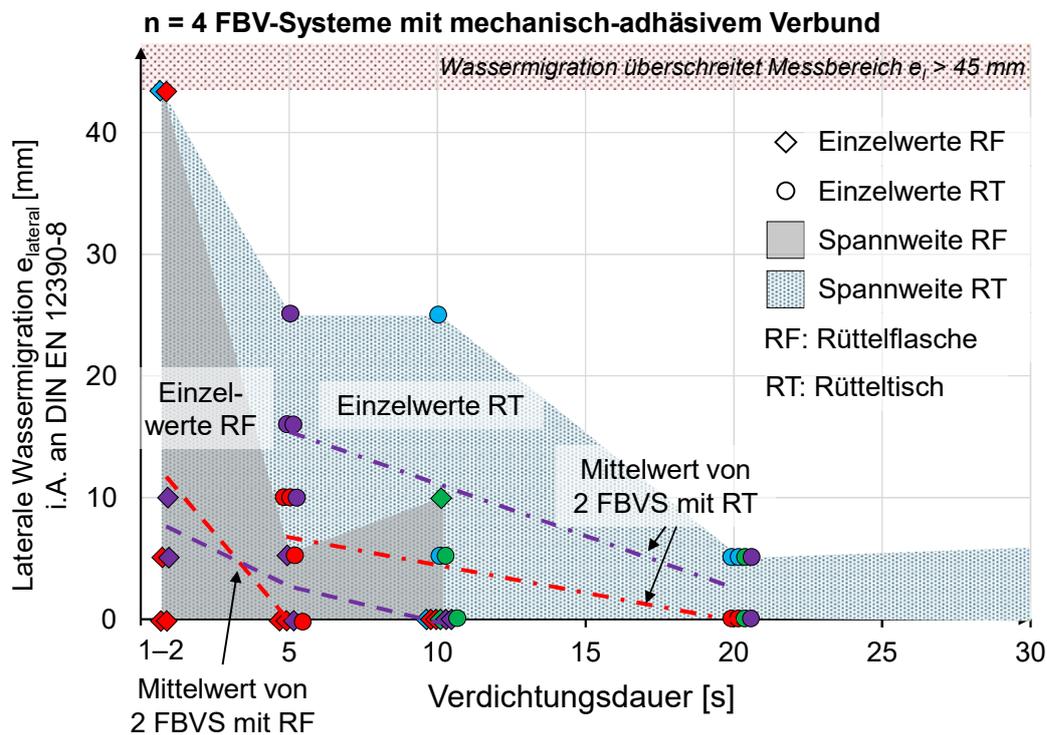


Bild 2.6.10. Unterschiedliche Verdichtungsgeräte zeigten unterschiedliche Wirkungsgrade bei den mechanisch-adhäsiven Verbundsystemen (* Empfehlung der maximalen lateralen Wassermigration abgeleitet aus dem DBV-Heft 44 [1], Tab. A4, Zeile 2)

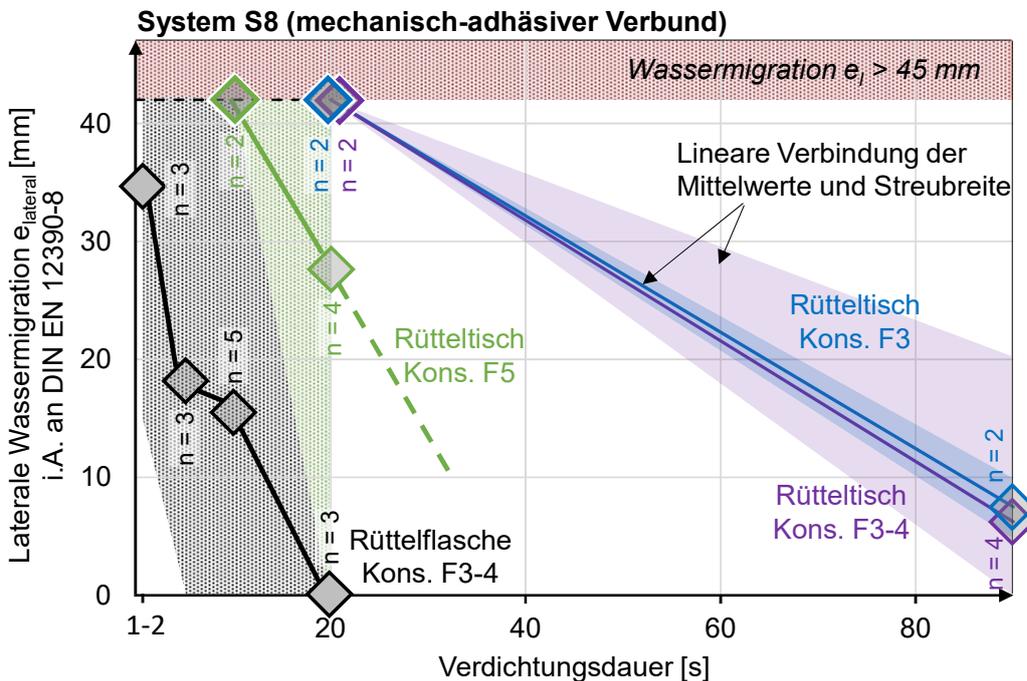


Bild 2.6.11. Auswirkung der unterschiedlichen Verdichtungsgeräte und Frischbetonkonsistenzen beim System S8 mit dicker Vlieslage

Neben der Verdichtung hatte bei mechanisch-adhäsiven Systemen auch die Frischbetonkonsistenz einen Einfluss auf die Leimpenetration. Je höher die Konsistenzklasse gewählt wurde, und je fließfähiger der Leim war, desto leichter konnte der Zementleim bei Verdichtung aus der Betonmischung abgetrennt werden und in die Hohlräume des Vlieses eindringen. Der Konsistenzeinfluss war allerdings deutlich geringer als der Einfluss der Verdichtungsenergie. Trotzdem ist eine fließfähige Ausgangskonsistenz vorteilhaft für einen wirksamen Hinterlaufschutz.

Bei klebe-adhäsiven Systemen war ein Einfluss der Verdichtungsenergie und der Frischbetonkonsistenz kaum erkennbar. In fast allen Prüfungen wurden laterale Wassermigrationen mit $e_l = 0$ mm festgestellt. Der Leim kann sich aufgrund der eher glatten Oberflächen offenbar bereits mit geringem Energieeintrag durch Verdichtung an die Verbundschicht gut anlagern. Bereits sehr kurze Verdichtungszeiten von 5 s mit dem Rütteltisch oder 1 s mit der Rüttelflasche führten so zu funktionsfähigen Verbundschichten und einem wirksamen Hinterlaufschutz. Das bituminös-adhäsive System zeigte weitgehend ähnliche Verhaltensweisen wie die klebe-adhäsiven Systeme. So konnten auch hier keine Einflüsse durch Verdichtungsenergie und Frischbetonkonsistenz festgestellt werden, was die Wirksamkeit des bituminösen Verbunds bestätigte. Allerdings wurde bereits bei diesen Versuchen deutlich, dass sich der Haftverbund der bituminösen Bahn langsamer entwickelt als bei anderen FBVS. Dies führte in einem Fall zur Beschädigung der Verbundschicht beim Ausschalen und konnte später durch Untersuchungen des Haftverbunds bestätigt werden (siehe Kap. 2.7)

Die Variation der Zementart und des Größtkorns der Gesteinskörnung hatte bei Verwendung eines baustellentypischen WU-Betons keinen signifikanten Einfluss auf die Wassermigration (siehe Bilder 2.6.12 und 2.6.13).

Einfluss der Sieblinie bzw. Größtkorn bei mechanisch-adhäsiven Systemen

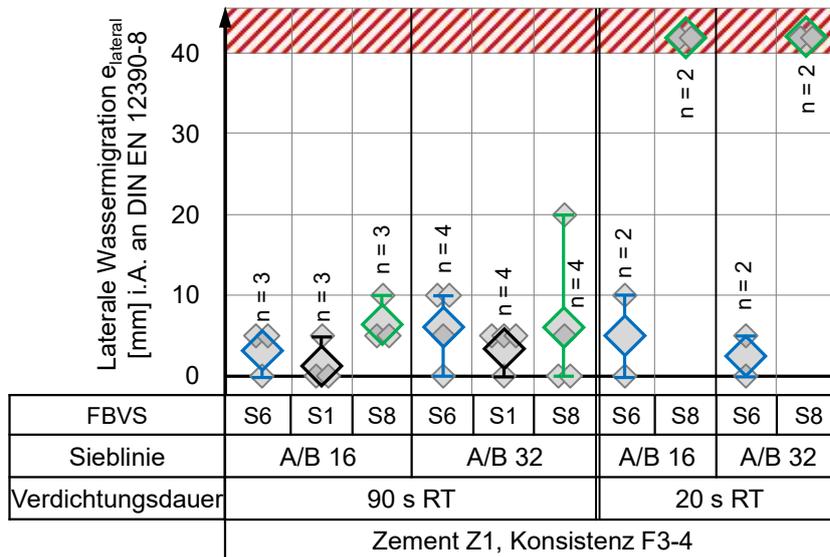


Bild 2.6.12. Einfluss der Sieblinie bzw. Größtkorn auf die laterale Wassermigration

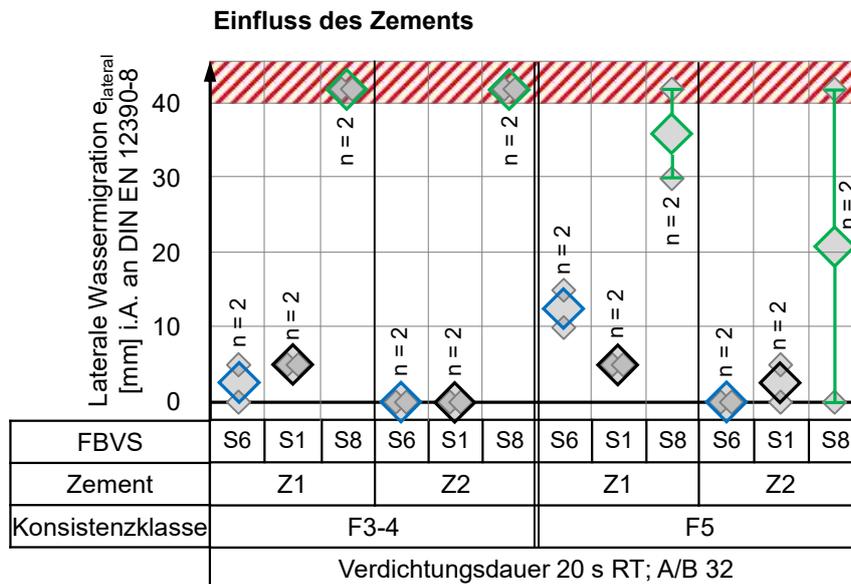


Bild 2.6.13. Einfluss der Zementart auf die laterale Wassermigration

Lediglich ein FBVS-Produkt (S3) zeigte in den Versuchen auffällige Verhaltensweisen und Ergebnisse, die nicht im Einklang mit den Beobachtungen der anderen FBVS standen. So zeigte das System S3 mit mechanisch-adhäsiver Verbundschicht und integrierten Quellpolymeren unabhängig von den Herstellbedingungen immer Hinterläufigkeiten in der Verbundschicht, trotz sehr sorgfältiger Herstellung (siehe auch Anhang A2, Teil 1 und 2). Es war daher zu vermuten, dass die Hinterläufigkeiten nicht allein auf unzureichende Herstellbedingungen, sondern auch auf die Prüfrandbedingungen selbst zurückzuführen waren. Angemerkt sei, dass dieses Verhalten nicht bei allen FBVS mit Quellpolymeren auftrat und das System S3 in diesen Versuchen einen Einzelfall darstellte.

Zu Ende des Forschungsprojekts wurden daher Versuche mit variierenden Prüfandrbedingungen wiederholt, um deren Einfluss auf die laterale Wassermigration quellbarer Systeme zu überprüfen. Hierbei wurde vor allem die Steigerung des Prüfdrucks variiert. Es bestand die Vermutung, dass die Quellpolymere bei der sonst angewendeten Prüfdrucksteigerung von 1,0 bar/h kein ausreichend schnelles Quellvermögen zeigten, um die innere Struktur des FBVS abzudichten. Im ersten Schritt wurde die Prüfdrucksteigerung auf die Vorgaben der PG-FBB [R3] „Prüfgrundsätze für Fugenabdichtungen in Bauteilen aus Beton“ abgemindert, die für quellbare Fugenabdichtungen eine Prüfdrucksteigerung auf 5 bar innerhalb von zwei Wochen vorsieht. Gemäß dieser Vorgaben wurde der Wasserdruck in der ersten Woche um jeweils 0,2 bar/d auf 1 bar gesteigert; in der zweiten Woche um jeweils 1,0 bar/d auf 5 bar. Dieser Druck wurde dann bis zum 28. Tag gehalten. Der fluoreszierende Farbstoff zur Bewertung der lateralen Wassermigrationen war in diesem Aufbau noch von Beginn an im Wasser enthalten.

Die langsamere Prüfdrucksteigerung verbesserte die Leistungsfähigkeit des Systems S3 bzw. verringerte die Durchlässigkeit gegenüber Wasser, allerdings waren immer noch hohe Wassermigrationen zu beobachten. Zu Beginn des Versuchs trat weiterhin Wasser seitlich aus den Probekörpern aus. Bei diesem Versuchsaufbau wurden $n = 6$ Proben geprüft, die eine laterale Wassermigration im Mittel von $e_{l,m} = 40$ mm zeigten (siehe auch Tab. 2.6.3 bzw. Anhang A2 – Teil 4). Die Wassermigration wurde auch hier anhand der fluoreszierenden Farbe des Tracers erkannt und die maximale Wasserbewegung ab der Kante der gestanzten Fehlstelle als Ergebnis der Prüfung gemessen.

Die Funktionsweise von Quellpolymeren (sog. Superabsorber, engl. Super Absorbent Polymer SAP) ist nach *Mechtcherine und Reinhardt* [2] im Allgemeinen auf die Einlagerung von Wassermolekülen in vernetzte Polymere zurückzuführen, die unter Volumenzunahme ein sog. Hydrogel bilden. Verbleibende Hohlräume können so geschlossen und der entstehende Quelldruck zur Abdichtung gegen drückendes Wasser genutzt werden. Dies hat gleichzeitig zur Folge, dass für das gewünschte Quellverhalten eine gewisse Wasserbewegung erforderlich ist. Es war daher denkbar, dass die Wasserbewegung im Rahmen des Quellprozesses notwendig war bzw. nach dem Quellprozess keine Wasserbewegung mehr auftreten würde.

Tabelle 2.6.3. Einfluss der Prüfdrucksteigerung auf die Wassermigration des FBVS S3

| FBVS | Prüfungsrandbedingungen | Mittelwert der Wassermigration $e_{l,m}$ [mm] |
|------|--|---|
| S3 | Drucksteigerung nach PG-FBB (mit sofortigem Messbeginn): $p_{\max} = 5$ bar, Drucksteigerung in der 1. Wo. $\Delta p = 0,2$ bar/d bis $p = 1$ bar, in der 2. Wo. $\Delta p = 1,0$ bar/d bis $p = 5$ bar; Prüfung nach 28 d | 40 ($n = 6$) |
| S3 | Drucksteigerung nach PG-FBB (mit späterer Zugabe des Farbstoffs bzw. mit ‚Vorquellung‘): 1. Phase: Steigerung des Drucks nach PG-FBB auf $p = 5$ bar ohne Farbstoff (Vorquellung) 2. Phase: Zugabe Farbstoff, $p = 5$ bar, Prüfung nach 14 d (insg. Dauer $t = 28$ d) | 35 ($n = 6$) |

Im letzten Versuchsaufbau sollte daher ermittelt werden, wie groß die lateralen Wasserbewegungen sind, wenn von einem vollständig gequollenen Zustand ausgegangen werden kann. Es wurden dazu Probekörper hergestellt, die nach der Lagerungsdauer zuerst ohne Farbstoff mit Wasserdruck ($p = 5 \text{ bar}$) beaufschlagt wurden. Ziel war es, die Quellpolymere ‚vorzuquellen‘, bevor dem Prüfwasser der Tracer zugegeben wurde und die eigentliche Hinterlaufprüfung startete. Die Bewertung der lateralen Wassermigration wurde somit auf den Zeitraum nach dem Quellprozess gelegt. Die Vorquellung erfolgte dabei wiederum nach den Grundsätzen der PG-FBB und der vorher dargestellten Prüfdrucksteigerung. Im Anschluss an die Drucksteigerung wurde am 14. Tag der Prüfung der Tracer zum Prüfwasser zugegeben und die Prüfung bei 5 bar bis zum 28. Tag fortgesetzt.

Nach dem Ausbau und Prüfung der Probekörper zeigte sich allerdings auch nach einer ‚Vorquellung‘ ein sehr ähnliches Bild zu der vorangegangenen Prüfung. Es wurden wiederum $n = 6$ Proben geprüft, und eine laterale Wassermigration im Mittel von $e_{l,m} = 35 \text{ mm}$ gemessen. Im Rahmen der Messgenauigkeit ($s \pm 3,0 \text{ mm}$) sind diese Wassermigrationen in etwa vergleichbar mit den vorherigen Ergebnissen ($e_{l,m} = 40 \text{ mm}$).

Als möglicher Einfluss für die (bei diesem System) dennoch eingetretenen Wasserbewegungen ist zum einen eine unvollständige Quellung der Polymere zum Zeitpunkt der Tracerzugabe. Die Prüfdrucksteigerung erfolgte allerdings bereits nach den Grundsätzen der PG-FBB, die wohl als realitätsnahe Drucksteigerung angesehen werden kann. Im Falle von starken Niederschlägen kann es bei Böden mit geringer Durchlässigkeit in kurzer Zeit zu wenigen Metern Wassersäule durch anfallendes Stauwasser kommen, die durch eine Prüfdrucksteigerung von $0,2 \text{ bar/d}$ im Versuch beschrieben werden. Auch für quellpolymere FBVS ist es daher nicht sinnvoll, noch geringere Prüfdrucksteigerungen vorzunehmen. Andererseits ist eine gewisse kapillare Durchlässigkeit der gequollenen Struktur vorstellbar, die einen Transport von Tracer ermöglichen würde. In beiden Fällen ist die Leistungsfähigkeit des Systems S3 im Hinblick auf den Hinterlaufschutz in Frage zu stellen.

Diese Beobachtungen konnten nur an dem System S3 gemacht werden und können daher nicht allgemein auf FBVS mit Quellpolymeren übertragen werden. Auch das System S1 verfügte beispielsweise über integrierte Quellpolymere und zeigte eine gute Funktionsfähigkeit der Verbundschicht. Quellpolymere können daher auf Grundlage der hier durchgeführten Prüfungen nicht grundsätzlich als nachteilig eingestuft werden.

Temporäre, merkliche Wassertransporte in der Verbundschicht von FBVS, z. B. zur Quellung, sind grundsätzlich in Frage zu stellen, wenn die Systeme als zusätzliche Abdichtung an hochwertig genutzten WU-Betonkonstruktionen eingesetzt werden. Sollte im Falle einer Schadstelle der Dichtschicht Wasser in der Verbundschicht transportiert werden, z. B. bis zur vollständigen Quellung der Polymere, kann Feuchtigkeit ggf. bis zum nächsten Trennriss in der Betonkonstruktion gelangen. Die Funktion der Verbundbahn wäre damit punktuell – im Bereich einer Schadstelle – nur bedingt vorhanden. Sobald ein FBVS daher temporäre Wasserdurchtritte zeigt, ist eine Gleichwertigkeit gegenüber ‚sofort dichten‘ Verbundbahnen nicht mehr vorhanden. Bei der Formulierung von Versuchen zur Verwendbarkeit erscheint es daher sinnvoll, an FBVS mit Quellpolymeren zunächst einmal die gleichen Anforderungen an die Hinterlaufsicherheit wie an FBVS

ohne Quellpolymere zu stellen. Im Versuch sollten auch Quellpolymere in der Lage sein, das Druckwasser augenblicklich auf einen geringen Bereich in der Verbundschicht zu begrenzen (bei einer festgelegten Prüfdrucksteigerung und Probekörpergeometrie). Als Vorschlag ist die Begrenzung auf eine maximale laterale Wassermigration von $e_{l,max} = 30$ mm denkbar, die einen Kompromiss zwischen vollständigem Schutz gegen laterale Wassermigration und einer gewissen ‚Reaktionsfläche‘ bietet. Ebenso wären hiermit geringe verfahrenstechnische Einflüsse bei der Herstellung der Fehlstelle abgedeckt.

Alternativ ist auf Grundlage der maximal möglichen Drucksteigerung sowie der maximal aufnehmbaren Druckhöhe die Formulierung von Leistungsklassen denkbar, durch die ‚sofort dichte‘ von FBVS mit temporären Wassermigrationen unterschieden werden könnten. Leistungsschwächere Systeme könnten dann z. B. noch für eine Wassereinwirkungsklasse W2.1-E gemäß DIN 18533-1 [R4] bis zu einer Eintauchtiefe von 3 m eingesetzt werden.

Hinsichtlich der Formulierung einheitlicher Prüfgrundsätze sollte abschließend geklärt werden, ob eine Variation der Prüfdauer Einfluss auf den Hinterlaufschutz von mechanisch-adhäsiven Systemen hat. Hierzu wurden Proben mit dem System S2 und S9 hergestellt und jeweils über einen Zeitraum von $t = 3$ d, 7 d sowie 28 d geprüft ($p_{max} = 5$ bar). Es wurden jeweils $n = 3$ Proben geprüft und die Mittelwerte der Serien anschließend verglichen. Es zeigten sich in Abhängigkeit der Prüfdauern keine signifikanten Unterschiede in den lateralen Wassermigrationen. So betrug die mittlere Wassermigration beim System S2 beispielsweise nach 3 Tagen $e_{l,m,3d} = 8,6$ mm ($n = 7$), nach 7 Tagen $e_{l,m,7d} = 10$ mm ($n = 3$) und nach 28 Tagen $e_{l,m,28d} = 5$ mm ($n = 3$) (siehe auch Anhang A2 – Teil 3).

Aufgrund der dargestellten Ergebnisse und der Erkenntnisse bei den Prüfungen können für die Formulierung einheitlicher Prüfungen folgende Empfehlungen gegeben werden:

- Die planmäßige Perforation/Fehlstelle im FBVS muss bei Wassermigrationsprüfungen so hergestellt werden, dass beim Betoneinbau kein Zementleim in die Perforation eindringen kann. Die Perforation kann dafür nach dem Betoneinbau durch Bohren, oder vor dem Betoneinbau durch Stanzen hergestellt werden. Im Falle des Stanzens muss das ausgestanzte Stück vor Betoneinbau verkehrt herum in die Perforation eingelegt und fixiert werden, um die Perforation frei von Zementleim zu halten.
- Nur Versuche, die einen Beton mit hohem Wassereindringwiderstand gemäß DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie) verwenden, können realitätsnahe Ergebnisse zum Hinterlaufschutz liefern. Üblich ist ein w/z -Wert von 0,50 – 0,55 und ein Größtkorn von mindestens 16 mm.
- Die Frischbetonkonsistenz ist nach den Vorgaben der WU-Richtlinie mindestens als F3 zu wählen. Da die Frischbetonkonsistenz Einfluss auf die Verdichtungswilligkeit von mechanisch-adhäsiven Systemen hat, würde dies gleichzeitig ein „Worst-Case-Szenario“ darstellen. Höhere, für den Hinterlaufschutz erforderliche Konsistenzklassen sind im Prüfbericht anzugeben.
- Die Verdichtung hat Einfluss auf den erzielten Hinterlaufschutz insbesondere von mechanisch-adhäsiven Systemen. Als einheitliche Verdichtungsparameter wird bei einer Konsistenzklasse F3 eine Verdichtung mit einem Rütteltisch von 20 s oder alternativ mit einem Innenrüttler bzw.

einer Rüttelflasche von 2 s vorgeschlagen. Diese Verdichtungszeiten sind für die meisten Systeme hinreichend und liefern bezüglich des Energieeintrags vergleichbare Ergebnisse. Die Verdichtung mit der Rüttelflasche spiegelt dabei den realitätsnahen Fall wider, stellt aber nicht die übliche Vorgehensweise in Laboren dar. Die Verdichtung mit einem Rütteltisch führte in diesen Versuchen gerade bei dicken Vliesstrukturen zu unzureichenden Füllungsgraden.

- Die Prüfdauer scheint für das Ergebnis der lateralen Wassermigration von untergeordneter Bedeutung zu sein. Eine Prüfdauer von 7 bzw. 28 Tagen erscheint angemessen.
- Bei der Prüfung von FBVS mit Quellpolymeren ist ein möglicher Einfluss der Prüfdrucksteigerung zu beachten. Wenn die FBVS zur Gewährleistung eines hinterlaufsicheren Verbunds eine langsame Prüfdrucksteigerung benötigen, ist dies im Prüfbericht anzugeben. Langsamere Prüfdrucksteigerungen als nach PG-FBB für quellbare Fugenabdichtungen erscheinen nicht sinnvoll.
- Die Bewertung der lateralen Wassermigration durch eingefärbtes Prüfwassers (z. B. mit fluoreszierendem Tracer) hat sich als geeignet erwiesen.

Diese Empfehlungen wurden im Anhang A5 im Rahmen einer eigenständigen Prüfbeschreibung zusammengestellt.

2.7 AP E2: Verbunduntersuchungen an FBVS (MPA Braunschweig)

Im Rahmen der Verbunduntersuchungen wurden an der MPA Braunschweig sowohl Untersuchungen zum Haftverbund zwischen dem Beton und den zu untersuchenden FBVS als auch zu den Scherfestigkeiten bzw. Verbundfestigkeiten der verschiedenen Bahnnähte durchgeführt.

2.7.1 Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen Beton und FBVS

Eine wesentliche Eigenschaft der FBVS ist der Verbund bzw. die ausreichende Haftzugfestigkeit zwischen dem Beton und dem FBVS in Verbindung mit einer guten Hinterlaufsicherheit im Falle einer Perforation der Bahn. Zudem sind in der Praxis häufig Ablösungen beim Ausschalen der Wände zu beobachten, deren Ursache auf eine schlechte Verbundfestigkeit zurückgeführt wird.

Die Untersuchungen zur Haftzugfestigkeit verfolgten daher das Ziel, Erkenntnisse über den Einfluss des Zementes, der Körnung, des Feuchtezustandes der Bahnen und der Wärmeeinwirkung auf die Haftzugfestigkeiten in Abhängigkeit von der Erhärtungszeit zu erhalten. Darüber hinaus sollten die Versagensbilder Hinweise auf unterschiedliche Wirkungsmechanismen geben und es sollte geklärt werden, ob die Eigenschaften der Haftzugfestigkeit und der Hinterlaufsicherheit miteinander korrelieren.

Darüber hinaus kam im Rahmen der Arbeitskreissitzungen die Frage auf, welchen Einfluss der Betondruck, z. B. beim Betonieren einer Wand oder Stütze, und die Verdichtung mit einer Rüttelflasche auf den Haftverbund haben. Um Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wurde eine Stütze bzw. ein kleiner Wandabschnitt mit einer Höhe von 2,5 m und einer inneren Kantenlänge von jeweils 0,4 m hergestellt und anschließend der Verbund in Abhängigkeit von der Betonierhöhe bestimmt.

Die Herstellung aller Probekörper erfolgte unter Verwendung der unter Abschnitt 2.5 genannten Zemente und Körnungslinien (Größtkorn 16 mm und 32 mm) mit den in Tabelle 2.7.1-1 aufgeführten Betonmischungen.

Tabelle 2.7.1-1. Im Rahmen der Verbundprüfungen verwendete Betonmischungen

| Zementart | | Zement- gehalt | Wasser | Gestein (Anteile in M.-%) (quarzitisches Rundkorn, Region Magdeburg) | | | | | |
|-----------|------------------------|-------------------|--------|---|----------------------|------|------|------|------|
| | | | | kg/m ³ | kg/m ³ | | 0/2 | 2/8 | 8/16 |
| Z1 | CEM II/A-LL 32,5 R | 320 | 175 | 1847,1 | A/B 16 (k = 4,21) | 35 % | 30 % | 35 % | - |
| Z2 | CEM III/A 32,5 N-LH | | | | A/B 32 (k = 4,81) | 30 % | 20 % | 20 % | 30 % |

Eine Übersicht über das Untersuchungsprogramm gibt Tabelle 2.7.1-2. Die für die Untersuchungen jeweils verwendeten Betonmischungen ergeben sich aus Spalte 1 der Tabelle.

Für die Herstellung der Probekörper zur Untersuchung der Verbundfestigkeit wurden Bahnenabschnitte mit den Maßen von 30 cm x 30 cm aus den verschiedenen FBV-Bahnen herausgeschnitten und mit der Verbundseite nach oben in Schalungskörper mit der gleichen Grundfläche von 30 cm x 30 cm und einer Höhe von 10 cm eingebaut (siehe Bild 2.7.1-1). Als vorbereitende Maßnahmen wurden die innenliegenden Seitenwände der Schalungen, die aus einem Hart-Kunststoff bestehen, mit einem Trennmittel bestrichen, sodass der Beton sich nicht mit der Schalung verbinden kann. Die Übergänge der Bahnenabschnitte zur aufgehenden Schalung wurden mit Silikon versiegelt, um Umläufigkeiten des Zementleims auszuschließen. Im Anschluss wurden die Schalungskörper betoniert und auf dem Rütteltisch für 10 s verdichtet.

Tabelle 2.7.1-2. Untersuchungsprogramm zum Verbundverhalten (Haftzugfestigkeit) und zur Hinterläufigkeit

| Betonmischung (Zement) und Sieb- linie | Prüfkörper/Lagerung/Einwirkung | Prüfung der Haftzugfestigkeit im Betonalter von | | |
|--|---|--|-------------|-------------|
| | | 2 d | 7 d | 28 d |
| Z1 (CEM III); AB16/32 | Prüfkörper: Platten Bahn: trocken Beton: - 2 d Schalung => Klima 20/65 | X n = 50 | X n = 50 | X n = 50 |
| Z2 (CEM II); AB16/32 | | X n = 50 | X n = 50 | X n = 50 |
| Z2 (CEM II); AB 8/16 | | X n = 50 | X n = 50 | X n = 50 |
| Z2 (CEM II); AB 8/16 | Prüfkörper: Platten Bahn: trocken Beton: - 2 d Schalung => Wärmealterung im Tro- ckenschrank bei 50 °C | - | X n = 50 | X n = 50 |
| Z2 (CEM II); AB 8/16 | Prüfkörper: Platten Bahn: wassergesättigt; 2 d mit 5 cm Wassersäule be- aufschlagt; danach abgießen des Wassers und sofortige Betonage Beton: -2 d Schalung => Klima 20/65 | - | X n = 50 | X n=50 |

| Betonmischung (Zement) und Sieblinie | Prüfkörper/Lagerung/Einwirkung | Prüfung der Haftzugfestigkeit im Betonalter von | | |
|--------------------------------------|--|--|---|---|
| | | 2 d | 7 d | 28 d |
| | Prüfkörper: Stütze/Wand Bahn: trocken Beton: - 2 d Schalung => Klima 20/65 | X =30 - Oben, - Mitte, - Unten | X n=30 - Oben, - Mitte, - Unten | X n=30 - Oben, - Mitte, - Unten |
| | Prüfkörper: Platten Bahn: trocken Beton: - 2 d Schalung => Klima 20/65 Beaufschlagung: max. 5 bar in Druckstufen von 0,5 bar Prüfung n. 28 d und 56 d | Hinterlaufsicherheit n ₁ =20 (2 je System) | | |

n: Anzahl der Haftzugprüfungen (5 bzw. 3 je System); n₁: Anzahl der Hinterlaufprüfungen

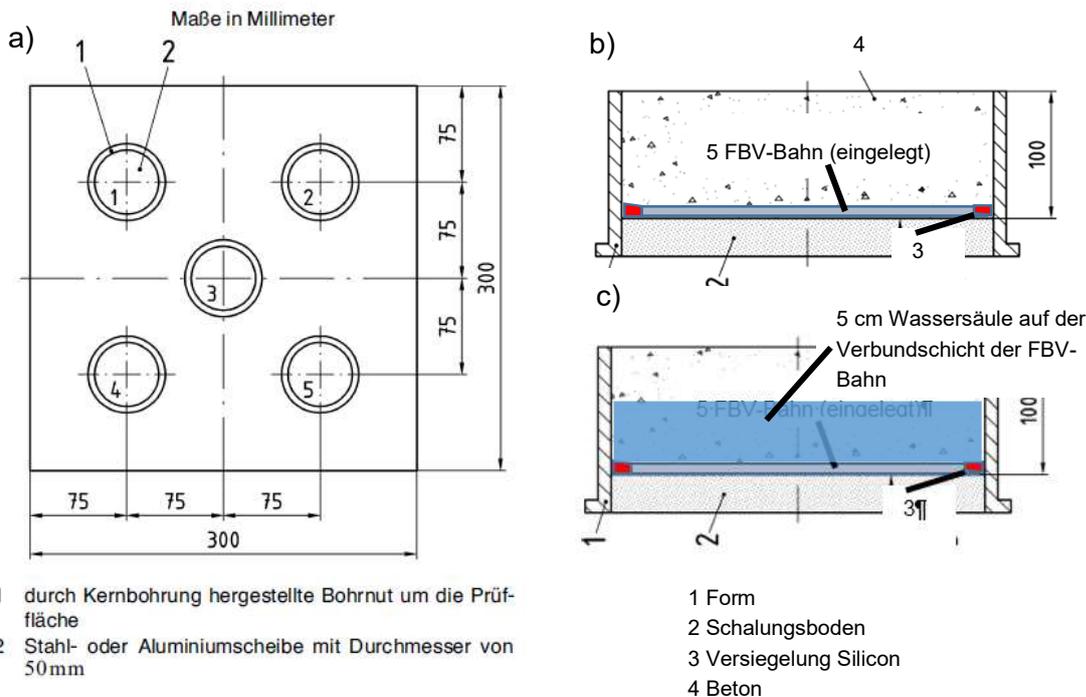


Bild 2.7.1-1. Plattenprüfkörper zur Ermittlung der Haftzugfestigkeit mit Darstellung der Lage der Stempelstellen (links; a)) und Schnitt durch die Schalung mit Prüfkörper und eingelegerter und versiegelter FBV-Bahn (rechts oben; b)) sowie Skizze der mit 5 cm Wasser gefüllten Schalung mit Bahn (rechts unten; c)).

Die Betonage erfolgte i. d. R. auf die „trockene“ Bahn. Um den Einfluss einer wassergesättigten Bahn (in der Praxis z. B. durch Pfützenbildung bzw. länger anhaltenden Niederschlag verursacht) auf den Haftverbund zu klären, wurde die in der Schalung befindliche Bahn für drei Werktage mit einer Wassersäule von 5 cm beaufschlagt (siehe Skizze in Bild 2.7.2-1 c)). Das Wasser wurde unmittelbar vor der Betonage abgegossen, anschließend der Beton eingebracht und auf dem Rütteltisch für 10 s verdichtet.

Die frisch betonierten Probekörper lagerten für zwei Tage in der Schalung mit aufliegender Folie und anschließend – in Abhängigkeit von den Zielen der Untersuchung – im:

- Normalklima nach DIN EN 12390-2 [R12] bei $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $(65 \pm 5) \%$.
- im Wärmeschrank bei $50 ^\circ\text{C}$ und anschließend zur Konditionierung 24 h im Normalklima bei $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Durch die Konditionierungszeit betrug die reine Lagerung unter $50 ^\circ\text{C}$ bei den 7 d Werten 4 Tage und bei den 28 d Werten 25 Tage.

Die Bestimmung der Haftzugfestigkeit (Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch) erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1542 [R10]. Dafür wurden fünf kreisförmige Prüfstempel aus Stahl mit einem Durchmesser von 50 mm und 25 mm Dicke auf die Frischbetonverbundabdichtungen geklebt. Vor dem Aufkleben der Prüfstempel wurde die Bahn mit einem Kernbohrgerät angeschnitten und eine kreisrunde Nut mit einer Tiefe von 5 bis 10 mm Nass hergestellt. Anschließend wurden die entfetteten und sauberen Prüfstempel mit einem 2-Komponenten Kleber auf die gereinigte und getrocknete Prüffläche aufgeklebt. Der Kleber hatte eine Haftwirkungszeit von ca. 15 bis 30 Minuten.

Nach Erhärten des Klebstoffs wurde der aufgeklebte Prüfstempel zentrisch und kraftgeregelt mit einer Geschwindigkeit von 100 N/s abgezogen. Die Prüfungen erfolgten i. d. R. im Betonalter von 2 d, 7 d und 28 d mit einem Freundl Haftzugprüfgerät. Die Verbundfestigkeit wurde als Quotient aus der Abreißkraft und der Fläche des Prüfstempels in N/mm^2 ermittelt. Die Haftzugwerte sowie die Bruchbilder wurden dokumentiert. Die Prüfungen erfolgten unter Normalbedingungen im Betonlabor bei Temperaturen von $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Bild 2.7.1-2 zeigt Aufnahmen der Kernbohrung und des Abreißversuches.



**Bild 2.7.1-2. a) Prüfkörper mit markierten Bohrstellen
b) Kernbohrung**

**c) geklebte Haftzugstempel
d) Haftzugprüfungen**

Die Einzelergebnisse der Haftzugfestigkeit in N/mm^2 und eine zugehörige grafische Darstellung der Ergebnisse finden sich in der Anlage 6 (A6) in den nachstehend aufgeführten Tabellen wieder:

- Tabelle A6-1 und Diagramme: Haftzugfestigkeit – **Beton 16/32 CEM III – 2 Tage-Werte**
- Tabelle A6-2 und Diagramme: Haftzugfestigkeit – **Beton 16/32 CEM III – 7 Tage-Werte**
- Tabelle A6-3 und Diagramme: Haftzugfestigkeit – **Beton 16/32 CEM III – 28 Tage-Werte**

- Tabelle A6-4 und Diagramme: Haftzugfestigkeit – **Beton 16/32 CEM II – 2 Tage-Werte**
- Tabelle A6-5 und Diagramme: Haftzugfestigkeit – **Beton 16/32 CEM II – 7 Tage-Werte**
- Tabelle A6-6 und Diagramme: Haftzugfestigkeit – **Beton 16/32 CEM II – 28 Tage-Werte**
- Tabelle A6-7 und Diagramme: Haftzugfestigkeit – **Beton 8/16 CEM II – 2 Tage-Werte**
- Tabelle A6-8 und Diagramme: Haftzugfestigkeit – **Beton 8/16 CEM II – 7 Tage-Werte**
- Tabelle A6-9 und Diagramme: Haftzugfestigkeit – **Beton 8/16 CEM II – 28 Tage-Werte**
- Tabelle A6-10 und Diagramme: Haftzugfestigkeit nach Wärmealterung bei 50 °C
– **Beton 8/16 CEM II – 7 Tage-Werte**
- Tabelle A6-11 und Diagramme: Haftzugfestigkeit nach Wärmealterung bei 50 °C
– **Beton 8/16 CEM II – 28 Tage-Werte**
- Tabelle A6-12 und Diagramme: Haftzugfestigkeit – Betonage auf wassergesättigte
Verbundseite – **Beton 8/16 CEM II – 7 Tage-Werte**
- Tabelle A6-13 und Diagramme: Haftzugfestigkeit – Betonage auf wassergesättigte
Verbundseite – **Beton 8/16 CEM II – 28 Tage-Werte**

Die Festigkeitsentwicklung der Betonmischung mit dem CEM II mit normaler Hydratationstemperatur, normaler Frühfestigkeit und normaler Nacherhärtung nach 2 d, 7 d und 28 d verdeutlicht Bild 2.7.1-3. Die Einzelergebnisse können den Tabellen A6-4 bis A6-6 entnommen werden. Die FBV-Systeme haben Haftzugfestigkeiten auf unterschiedlichem Niveau. Die niedrigsten Kennwerte weist das System S2 mit Werten zwischen 0,36 bis 0,40 N/mm² auf. Dagegen hebt sich das System S6 mit Festigkeiten von 0,65 bis 0,91 N/mm² oder das System S9 mit Werten zwischen 0,85 und 0,93 N/mm² deutlich ab. Eine mit dem Betonalter steigende Festigkeitsentwicklung deutet sich aber nur bei dem System S8 an. Bei allen anderen FBV-Bahnen bleibt die Haftzugfestigkeit nahezu auf einem sich systemspezifisch einstellenden Festigkeitsniveau, das bei 9 von 10 Systemen bereits im Betonalter von 2 Tagen erreicht wird.

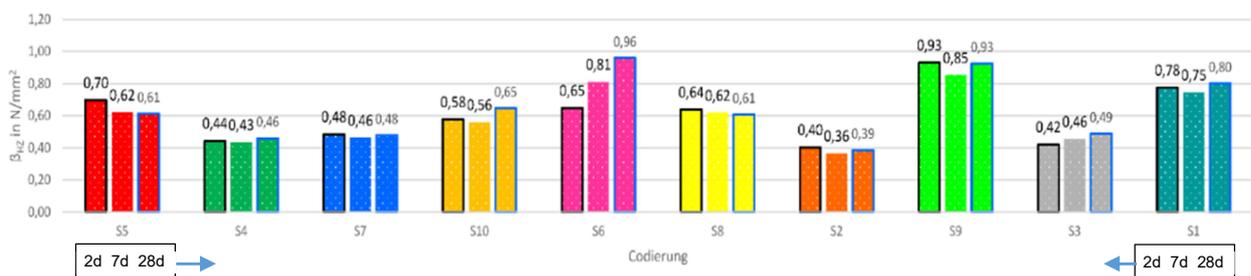


Bild 2.7.1-3. Festigkeitsentwicklung – Haftzugfestigkeit nach 2 d, 7 d und 28 d; 16/32 –CEM II

Anders stellt sich die Entwicklung der Haftzugfestigkeit bei gleicher Sieblinie (A/B 32) unter Verwendung des CEM III mit niedrigerer Hydratationswärmeentwicklung, einer langsameren Festigkeitsentwicklung (geringere Frühfestigkeiten) und einer guten Nacherhärtung dar. Wie Bild 2.7.1-4 verdeutlicht, sind insbesondere die 2 d- und teilweise auch die 7 d-Werte deutlich geringer, was aufgrund der langsameren Festigkeitsentwicklung zu erwarten war. Die niedrigsten 2 d-Haftzugfestigkeiten weisen die Systeme S7 und S3 mit Werten von 0,22 N/mm² bzw. 0,28 N/mm² auf. Aufgrund der guten Nacherhärtung liegen bei einigen Systemen die 7 d-Werte, aber

Bauwerksabdichtung mit Frischbetonverbundfolie –

Grundlagen zur Erstellung eines Regelwerks für eine innovative Bauart

insbesondere die 28 d-Festigkeiten, mit Ausnahme der zwei klebe-adhäsiv wirkenden Systeme S7 und S10 wieder auf einem vergleichbaren Niveau. Die geringeren Haftzugfestigkeiten der klebe-adhäsiven Systeme könnten in Zusammenhang mit der niedrigeren Hydratationswärme stehen, die Einfluss auf die Haftung des Klebers auf der Trägerbahn nimmt.

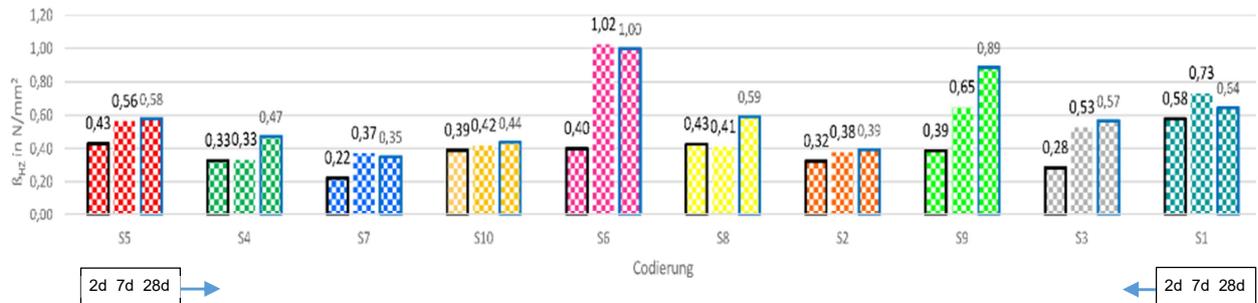


Bild 2.7.1-4. Festigkeitsentwicklung – Haftzugfestigkeit nach 2 d, 7 d und 28 d; 16/32 – CEM III

In Bild 2.7.1-5 sind die 2 d, 7 d und 28 d Haftzugfestigkeiten der mit geringerem Größtkorn hergestellten Mischung CEM II - 8/16 dargestellt. Ein Vergleich der Kennwerte mit denen in Bild 2.7.1-3 (CEM II - 16/32) verdeutlicht, dass das Größtkorn keinen signifikanten Einfluss auf die Verbundfestigkeit hat. Bei den Systemen S6, S2 und S3 fallen die etwas niedrigeren 2 d-Wert auf. Die 7 d und 28 d Werte sind größenordnungsmäßig aber vergleichbar, was die direkte Gegenüberstellung der 7 d-Kennwerte in Bild 2.7.1-6 verdeutlicht.

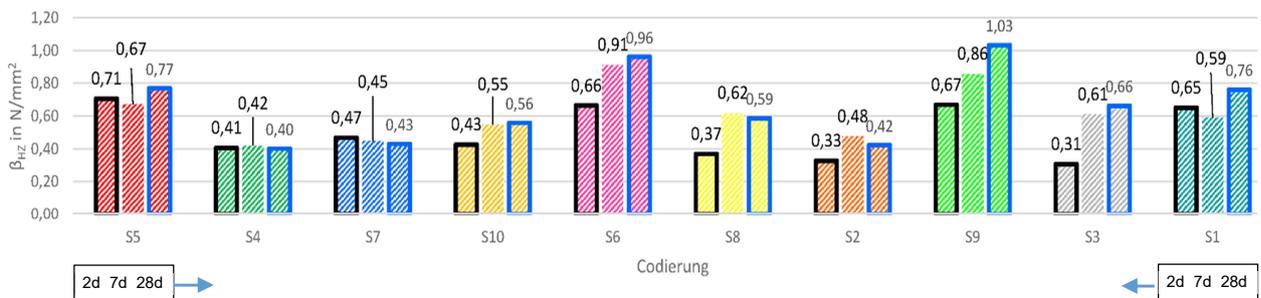


Bild 2.7.1-5. Festigkeitsentwicklung – Haftzugfestigkeit nach 2 d, 7 d und 28 d; 8/16 – CEM II

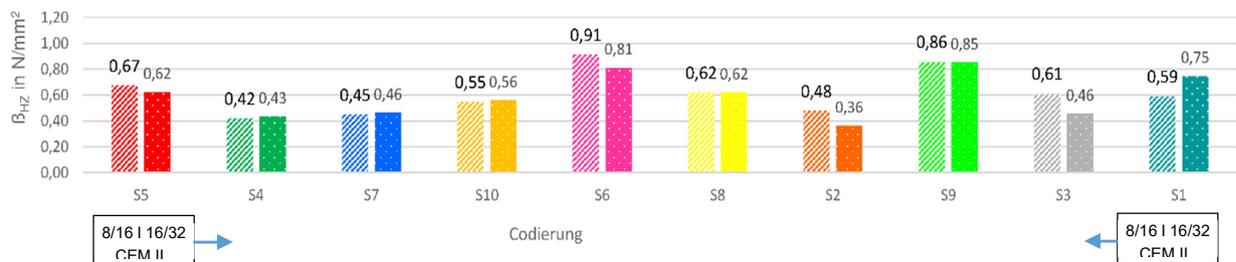
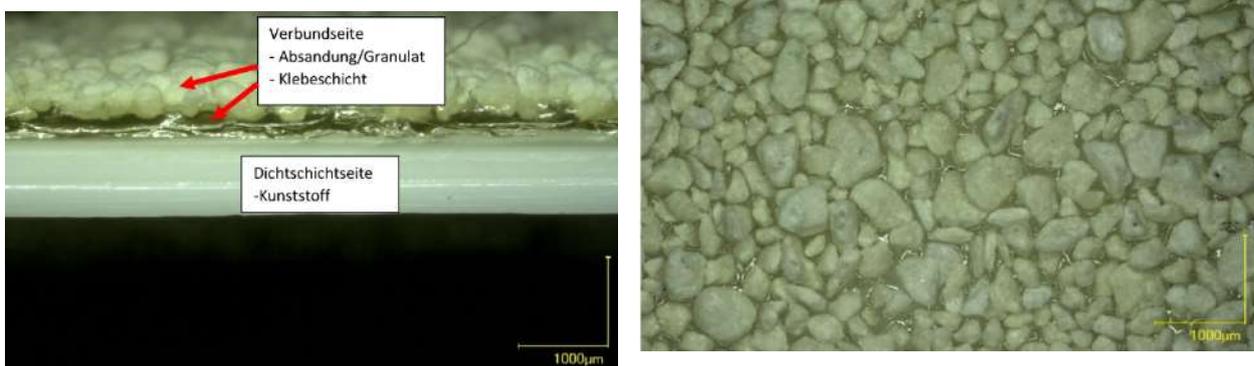


Bild 2.7.1-6. Einfluss der Sieblinie (8/16 und 16/32) auf die Haftzugfestigkeit; EM II – Betonalter 7 d (exemplarisch)

Insbesondere die in Bild 2.7.1-3 dargestellten, unter Verwendung des Zementes CEM II mit normaler Hydratationstemperatur, normaler Frühfestigkeit und normaler Nacherhärtung ermittelten

Haftzugfestigkeiten lassen mit zunehmendem Betonalter bis auf ein System (S6) keinen Festigkeitsanstieg erkennen. Ein solches Verhalten kann nur in Zusammenhang mit den Versagensmechanismen in der Verbundzone stehen, die ab einem systemspezifischen Wert unabhängig von der Entwicklung der Beton Zug- und Druckfestigkeit versagt. Diese Aussage wurde durch entsprechende Versagensbilder im zentrischen Haftzugversuch bestätigt. Es trat ausschließlich ein Verbundversagen auf.

Um die unterschiedlichen Haftzugfestigkeiten und Versagensbilder der FBVS erklären zu können, wurde der Aufbau der Bahnen und die Verbundzone lichtmikroskopisch betrachtet. Die Bilder A6-1 bis A6-10 in Anlage 7 zeigen jeweils einen Anschnitt der Bahnen und eine Aufnahme der Verbundschicht bzw. Verbundseite. Die Vergrößerung ergibt sich aus dem „1000 µm Maßstab in den einzelnen Bildern. Während das System S5 aus einer reinen Bitumschicht mit Einlage und einer fein besandeten Verbundseite besteht (Bild A6-1), lassen die Systeme S4 und S7 einen nahezu gleichen Aufbau mit einer Kleberschicht auf der Trägerbahn aus Kunststoff erkennen, in die das Granulat mit feiner Körnung eingebunden/eingeklebt ist. Es besteht somit eine klebeadhäsive Verbundschicht zwischen Bahn und Granulat, was Bild 2.7.1-7 exemplarisch verdeutlicht.



a) Anschnitt

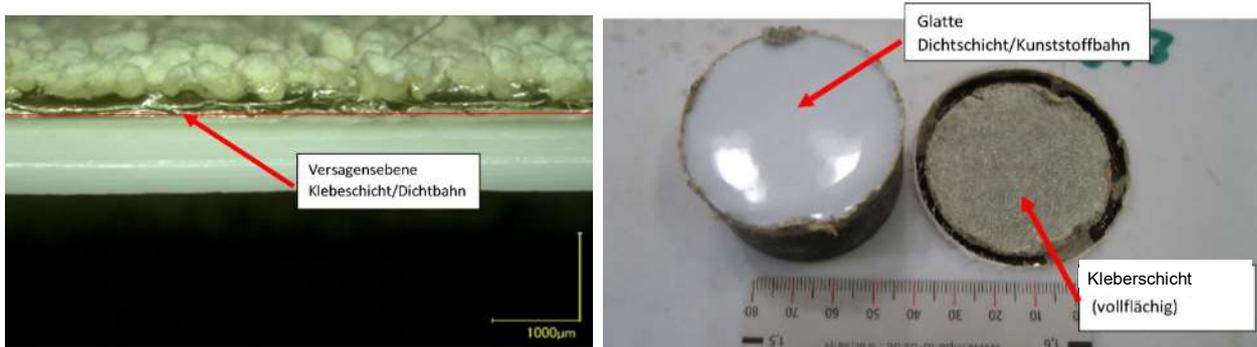
b) Draufsicht

Bild 2.7.1-7. Lichtmikroskopische Aufnahme einer klebe-adhäsiv wirkenden FBV-Bahn – exemplarisch

Ausweislich der Bilder A7-4 und A7-7 (Anlage 7) weisen auch die Systeme S10 und S2 eine auf der Kunststoffbahn angeordnete Kleberschicht auf, wobei bei dem System S10 kein Granulat, sondern eine zusätzliche Beschichtung/Schutzschicht (ca. 50 µm) auf eine ca. 300 µm dicke Kleberschicht mit adhäsiver Verbindung aufgebracht wurde. Bei der FBV-Bahn S2 (Bild A7-7) ist dagegen offensichtlich ein Vliesgewebe klebe-adhäsiv eingebunden.

Die reinen klebe-adhäsiv wirkenden Systeme S4, S7 und S10 zeigten – unabhängig von den Randbedingungen – immer das gleiche Versagensbild. Es kam bei den Bahnen ausnahmslos zum 100%igen Adhäsionsversagen zwischen der Kunststoffdichtungsbahn und der Kleberschicht, was die Bilder A7-13 bis A7-14 (Anlage 7) für die einzelnen Systeme und das Bild 2.7.2-8 exemplarisch veranschaulichen. Das linke Bild zeigt den Anschnitt mit der kenntlich gemachten Lage der Versagensebene und das rechte Bild gibt ein für die Systeme typisches Versagensbild eines Zugstempels wieder. Die Kleberschicht löst sich vollflächig von der Bahn ab und verbleibt

auf der Betonseite. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Anbindung der Zementsteinmatrix mit höheren Haftzugkräften einhergeht. Das Versagensverhalten erklärt auch, dass die drei klebe-adhäsiven Systeme immer nahezu gleiche bzw. vergleichbare Haftzugkennwerte aufzeigen. Das trotz des immer gleichen Versagensbildes auch mal geringere Kennwerte ermittelt werden (z. B. bei der Verwendung des CEM III), könnte in Zusammenhang mit der Hydratationstemperatur und deren Auswirkung auf den Kleber und dessen Ankopplung an die Kunststoff-Dichtungsbahn stehen.



a) Anschnitt

b) Versagensbild Haftzugstempel

Bild 2.7.1-7. Darstellung der Versagensebene und des Versagensbildes – exemplarisch für die FBV-Bahnen S4, S7 und S10

Die Versagensebene des bituminös-adhäsiven Systems S5 war ebenfalls immer gleich. Bild 2.7.1-8 zeigt die Versagensebene (Bild links) und verdeutlicht exemplarisch das Versagensbild mit begrenztem kohäsiven Versagen in der Zementsteinmatrix (ca. 10 %). Im Wesentlichen trat aber ein adhäsives Versagen in der Ebene Zementstein/Bitumen auf, wobei die feine Besandung der Bahn i. d. R. an dem Zementstein haftete.



a) Anschnitt

b) Versagensbild Haftzugstempel

Bild 2.7.1-8. Darstellung der Versagensebene und des Versagensbildes für die FBV-Bahn S5

Neben der bereits erwähnten FBV-Bahn S2 mit durch einen Kleber angekoppeltem Vliesgewebe (Bild A7-7), weisen auch die Bahnen S6, S8, S9, S3 und S10 ein Vliesgewebe auf der Verbundseite auf. Die Bilder A7-5, A7-6 sowie A7-8 bis A7-10 in Anlage 7 zeigen einen Anschnitt und eine Draufsicht auf die Verbundseite der FBV-Bahnen. Die Vliesgewebe sind im Gegensatz zur S2-

Bahn nicht über einen Kleber an die Dichtungsbahn angekoppelt, sondern thermisch mit der Bahn verschmolzen bzw. mehr oder weniger in diese thermisch/mechanisch eingebunden. Die Bahnen S3 und S1 verfügen noch über eine quellfähige Einlage, die bei der Bahn S3 auf die Ankopplung der Zementsteinmatrix aber keinen Einfluss nehmen dürfte. Der Nutzen liegt eher darin, bei einer feinen Perforation die Schadstelle durch den Quelleffekt wieder zu schließen. Bei der S1 Bahn befindet sich eine quellfähige Einlage dagegen im Kontakt zum Vlies, was sich positiv auf die Hafteigenschaften und die Eigenschaft der Hinterlaufsicherheit auswirken könnte.

Die Aufnahmen in Bild 2.7.1-9 zeigen die unterschiedlichen Vliesgewebdecken und die unterschiedliche Gewebestruktur.

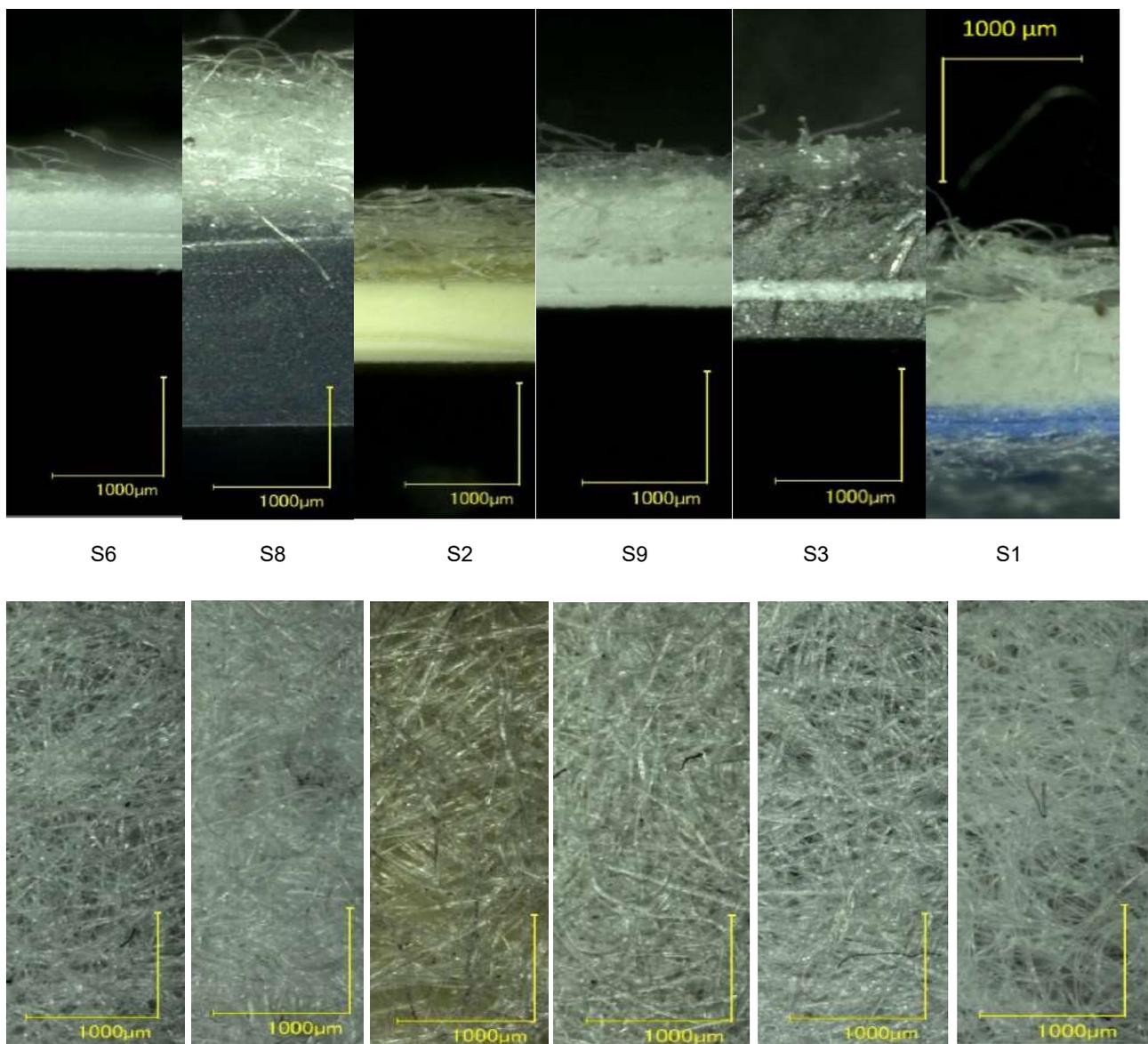


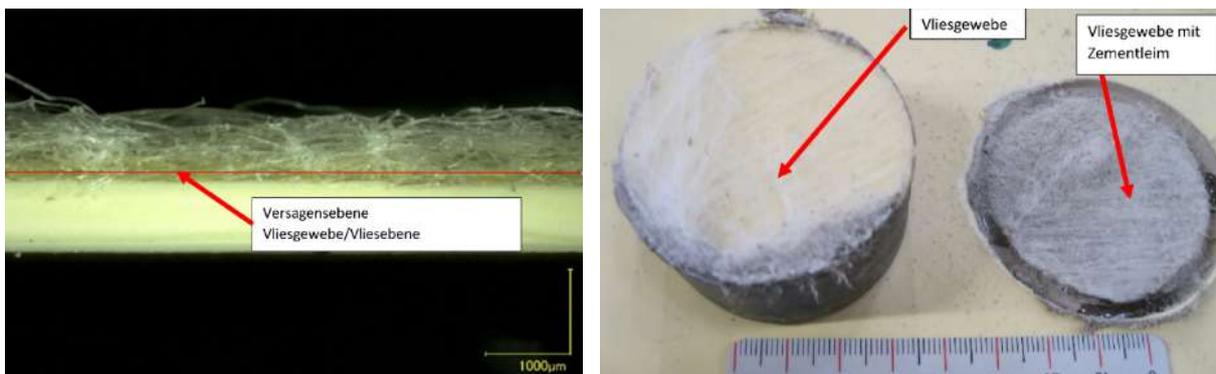
Bild 2.7.1-9. Gegenüberstellung der Vliesgewebe und der Anschnitte der FBV-Bahnen S6, S8, S2, S9, S3 und S1

Bei genauer Betrachtung der Aufnahmen weisen die Vliesgewebe unterschiedliche Dicken, Unterschiede in der Faserdicke, Faserdichte sowie in der Verteilung der Fasern auf, die sich auf das

Eindringvermögen und die Ankopplung des Zementleims und damit auf die Haftzugfestigkeit unterschiedlich auswirken können und die festgestellten Unterschiede in der Haftzugfestigkeit der untersuchten Bahnen (siehe Bild 2.7.1-3) erklären.

Die zugehörigen Versagensbilder und die Lage der Versagensebene der mechanisch-adhäsiv ankoppelnden Systeme S6, S8, S2, S9, S3 und S1 geben die Bilder A7-15 bis A7-20 in Anlage 7 wieder.

Vergleichsweise geringe Haftzugfestigkeiten wies die FBV-Bahn S2 auf. Das immer gleiche Versagensbild und die Versagensebene zeigen exemplarisch die Aufnahmen in Bild 2.7.1-10. Bei der Bahn S2 waren immer beidseitig am Stempel und am Untergrund Vliesanteile sichtbar, wobei der Kleber mit Vliesresten sich nicht von der Trägerbahn löste. Der Zementleim dringt offensichtlich in das Vliesgewebe ein, erreicht aber nicht die Kleberebene, sodass das System in den Versuchen immer in der Grenzschicht Kleber/Vlies versagt hat.

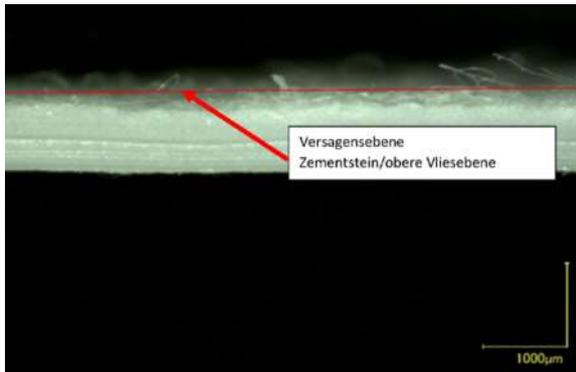


a) Anschnitt

b) Versagensbild Haftzugstempel

Bild 2.7.1-10. Darstellung der Versagensebene und des Versagensbildes – exemplarisch für die FBV-Bahn S2

Die dünnen Vliesdicken der FBV-Bahnen S6 und S9 scheinen aufgrund der Untersuchungen offensichtlich zu höheren Verbundfestigkeiten zu führen. Die Versagensebene und das Versagensbild geben die Aufnahmen in Bild 2.7.1-11 exemplarisch wieder. Bei den Systemen tritt sowohl adhäsives (ca. 70 %) als auch kohäsives Verbundversagen (ca. 30 %) auf. Der Zementstein durchdringt die dünne Vliesebene und koppelt stellenweise an die Dichtungsbahn an. Das Versagen tritt dann kohäsiv in der durch das Vlies im Querschnitt geschwächten Zementsteinmatrix auf. Das adhäsive Versagen erfolgt in der Grenzschicht Vlies/Dichtbahn.



a) Anschnitt



b) Versagensbild Haftzugstempel

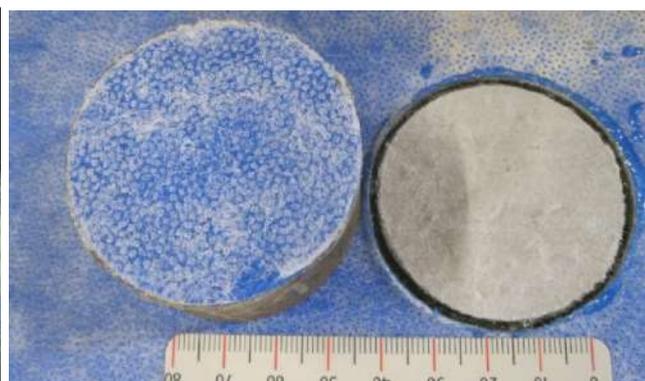
Bild 2.7.1-10. Darstellung der Versagensebene und des Versagensbildes – exemplarisch für die FBV-Bahn S6 und S9

Bei der FBV-Bahn S3 dringt der Zementleim dagegen ausweislich der Versagensbilder nicht tief genug in die Vliesebene ein. Bild A7-19 (Anlage 7) lässt erkennen, dass das Versagen im Wesentlichen in der Grenzschicht zwischen Zementstein und Vlies erfolgt. Auf der Zementsteinmatrix werden nur wenige Fasern eingebunden; das Vliesgewebe befindet sich nahezu ohne Zementsteinreste auf der Stempelseite, was Probleme hinsichtlich der Hinterläufigkeit erwarten lässt.

Bei der mechanisch-adhäsiv ankoppelnden Bahn S1 befindet sich die Versagensebene im Aufbau. Das System versagt grundsätzlich in der Grenzschicht zwischen der quellfähigen, von Fasern durchzogenen Schicht und der Kunststoffschicht (blau), was die Aufnahmen in Bild 2.7.1-11 verdeutlichen. Der Zementleim geht somit einen Verbund zwischen dem Vlies und der Quellschicht ein.



a) Anschnitt



b) Versagensbild Haftzugstempel

Bild 2.7.1-11. Darstellung der Versagensebene und des Versagensbildes für das System S1

Die Einzelergebnisse der Haftzuguntersuchungen an den bis zum Betonalter von 28 Tagen im Trockenschrank bei 50 °C wärmebehandelten Probekörpern und die Einzelergebnisse der Verbundprüfungen an den Probekörpern aus den Betonagen mit wassergesättigter Verbundseite der FBVS sind in Anlage 7 in den Tabellen A7-10 bis A7-13 mit zugehörigen Diagrammen aufgeführt.

Die 7 d- und 28 d-Werte der wärmebehandelten Prüfkörper sind in Bild 2.7.1-12 grafisch dargestellt. Im darunter befindlichen Bild 2.7.1-13 sind die Referenzwerte der über den gleichen Zeitraum im Klima 20/65 gelagerten Probekörper abgebildet, die mit gleicher Mischungsrezeptur (Sieblinie A/B 16 und CEM II) hergestellt wurden. Ein Vergleich der Kennwerte zeigt, dass die Wärmeeinwirkung bei dem bituminösen System S5 und bei den klebe-adhäsiven Systemen S4, S7 und S10 zu einer Verringerung der Haftzugwerte von 5 % bis 30 % führt. Die längere Beaufschlagung lässt im Betonalter von 28 d keinen zusätzlichen Alterungseffekt erkennen, da keine signifikant veränderten Haftzugfestigkeiten festzustellen sind.

Bei den mechanisch-adhäsiv wirkenden Systemen S6, S2, S9, S3 und S1 lässt die Wärmebeanspruchung von 50 °C bei den 7 d-Werten tendenziell einen leichten Festigkeitsanstieg erkennen. Bei der Bahn S8 führt die Wärme dagegen zu rund 14 % niedrigeren Haftzugfestigkeiten. Während die Festigkeiten der Bahnen S9 und S1 unter der Temperatureinwirkung positiv beeinflusst werden und weiter ansteigen, zeigt sich bei den Bahnen S6, S8, S2 und S3 ein deutlicher Einbruch mit Festigkeitsabnahmen von bis zu 40 % gegenüber den 7 d-Werten der wärmebehandelten Probekörper und bis zu 45 % gegenüber den 28 d-Werten der Referenzserie. Da die Versagensbilder der wärmebehandelten FBV-Bahnen unverändert bzw. vergleichbar waren, wird der Festigkeitsverlust in der Materialalterung bzw. einem nicht beständigen Vliesgewebe vermutet. Die Wärmealterung der Systeme ist aufgrund der Ergebnisse ein wichtiger Parameter, der bei den Prüfungen berücksichtigt werden muss.

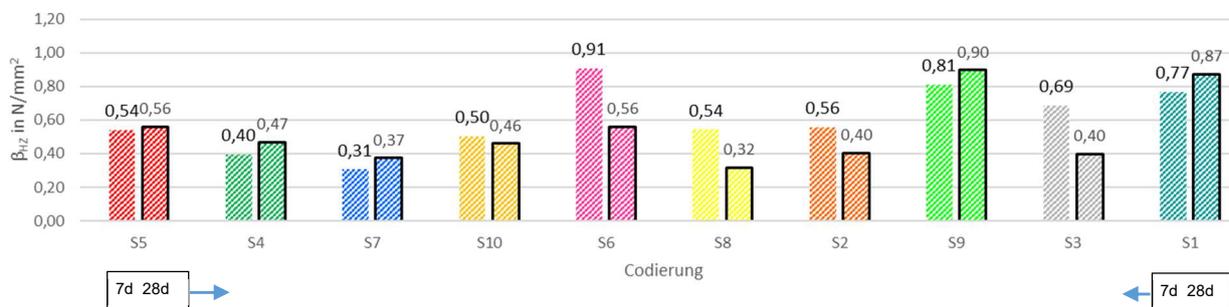


Bild 2.7.1-12. Einfluss einer Wärmelagerung bei 50 °C auf die Haftzugfestigkeit; 8/16 – CEM II
Betonalter: 7 d und 28 d
Lagerung: 2 d Schalung; 4 d bzw. 25 d im Wärmeschrank bei 50 °C und 24 h Rekonditionierung im Klima 20/65.

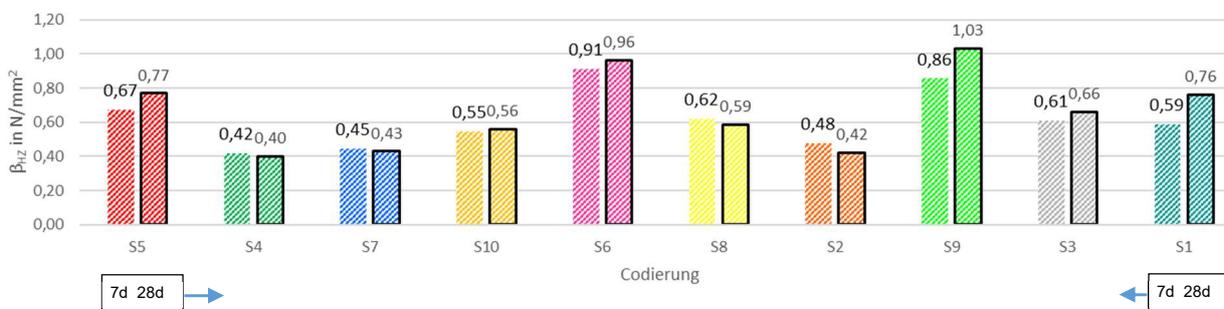


Bild 2.7.1-13. Referenzwerte; Haftzugfestigkeit nach Klimalagerung; 8/16 – CEM II
Betonalter: 7 d und 28 d
Lagerung: 2 d Schalung; 5 d bzw. 26 d Klima 20/65

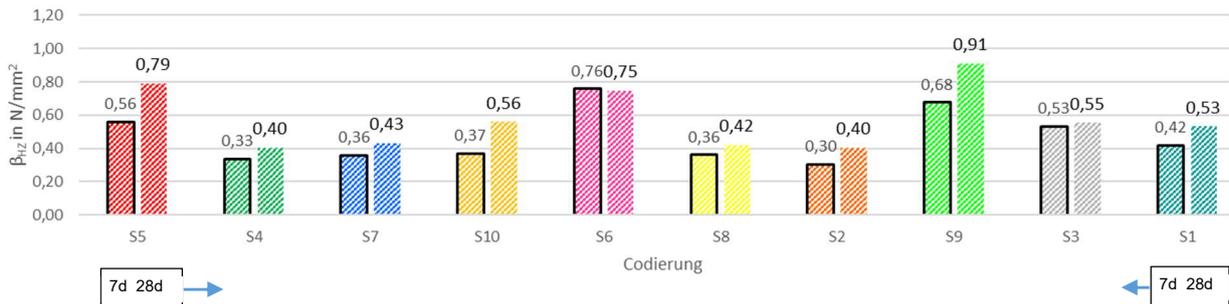


Bild 2.7.1-14. Einfluss der wassergesättigten Bahnen auf die Haftzugfestigkeit; 8/16 – CEM II

Betonalter: 7 d und 28 d

Lagerung: Vorbehandlung 3 d mit 5 cm Wassersäule; Nach der Betonage 2 d Schalung; 5 d bzw. 26 d Klima 20/65

Welchen Einfluss eine durch Niederschläge während des Einbaus wassergesättigte Verbundseite auf die Verbundeigenschaften der FBVS hat, verdeutlichen die in Bild 2.7.1-14 aufgeführten 7 d und 28 d-Kennwerte im Vergleich zu den Referenzwerten in Bild 2.7.1-13, die an mit trockener Bahn hergestellten Probekörpern ermittelt wurden.

Für alle FBVS kann festgestellt werden, dass die Betonage auf eine wassergesättigte Bahn zur deutlichen Herabsetzung der 7 d-Haftzugfestigkeiten um mindestens 14 % (S3) bis maximal 42 % (S8) führt. Die FBV-Bahn S8 weist ein besonders dickes Vliesgewebe auf (ca. 1 800 μm) und reagiert auf die Feuchtigkeit offensichtlich besonders stark. Für die FBV-Bahn auf Bitumenbasis (S5), die klebe-adhäsiven Systeme S4, S7 und S10 und das mit einem Vliesgewebe und Kleberschicht ausgestattete System S2 ist ersichtlich, dass diese nach 28 d das gleiche Festigkeitsniveau wie die 28 d-Referenzwerte aufweisen. Die mechanisch-adhäsiv wirkenden FBV-Bahnen S6 und S3 bleiben mit zunehmenden Betonalter auf dem 7 d-Niveau. Die Systeme S8, S9 und S1 lassen dagegen einen leichten Anstieg erkennen. Die Bahnen S6 mit Haftzugfestigkeiten von ca. 0,75 N/mm² und die Bahn S9 mit Werten von 0,65 N/mm² (7 d-Wert) und 0,91 N/mm² (28 d) zeigen weiterhin auffällig hohe Festigkeiten. Der niedrigste Wert wurde für das System S2 mit 0,30 N/mm² ermittelt.

Sowohl im Rahmen der Prüfungen zum Einfluss der Wärmealterung als auch zum Einfluss einer wassergesättigten Verbundseite der FBV-Bahnen entsprachen die Versagensbilder den bisherigen Feststellungen bzw. Beschreibungen.

Um den Einfluss der Betonierhöhe bzw. des Betondrucks auf die Verbundfestigkeit zu hinterfragen, wurde eine 2,5 m hohe Stütze bzw. ein Wandabschnitt mit einem Innenquerschnitt von 0,4 m x 0,4 m betoniert. Die 10 FBV-Bahnen wurden in die Schalung derart eingebaut, dass auf jeweils zwei Schalplattenseiten drei ca. 13 cm breite Bahnenstreifen und auf den zwei weiteren Schalplattenseiten jeweils zwei ca. 19 cm breite Bahnenstreifen angeordnet werden konnten. Die Bahnen wurden oben und unten außerhalb des Prüfkörpers befestigt. Um ein Unterlaufen mit Zementleim zu verhindern, wurden die Längsfugen der Bahnen und die Schalungsecken mit Silikon versiegelt.

Die Betonage erfolgte unter Verwendung des Zement 1 (CEM II) und der Sieblinie A/B 16 (Körnung 8/16) mit der in Tabelle 2.7.1-1 aufgeführten Mischungsrezeptur.

Bild 2.7.1-15 beinhaltet verschiedene Aufnahmen von der Herstellung des Probekörpers. Die Aufnahme a) gibt einen Einblick in die Schalung mit den umlaufend angeordneten FBV-Bahnen. Die Aufnahmen b) und c) zeigen den Schalkörper. Zur Verdichtung wurde ein handelsüblicher Flaschenrüttler (Durchmesser 45 mm; Länge 36 cm) verwendet. Nachdem die Schalung bis zur Hälfte gefüllt wurde, erfolgte die Verdichtung im unteren Bereich. Anschließend wurde der Schalkörper bis zur Oberkante gefüllt und der Bereich von ca. 1,0 m bis 2,5 m Höhe mit dem Rüttler verdichtet.



b) Schalkörper vor der Betonage
(2,5 m x 0,4 m x 0,4) m



a) Blick in die Schalung mit den eingebauten
FBV-Bahnen



c) Schalkörper nach der Betonage

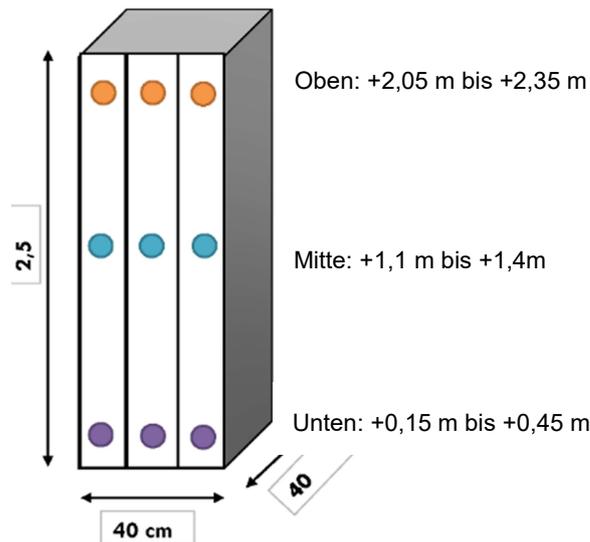
Bild 2.7.1-15. Bilder der Stützenherstellung

Der Probekörper wurde unter Raumtemperaturbedingungen gelagert und nach 2 Tagen ausgeschalt. Beim Abziehen der Schalung war eine Haftspannung zwischen Schalung und Bahnen spürbar; es konnten aber keine Ablösungen oder Beschädigungen der Bahnenstreifen festgestellt werden. Der Probekörper hatte beim Ausschalen noch eine Temperatur von ca. 40 °C.

Die Bestimmung der Haftzugfestigkeiten erfolgte innerhalb der nachstehenden Bereiche der Stütze jeweils im Betonalter von 2 d, 7 d und 28 d:

- Oben (Bereich +2,05 m bis +2,35 m)
- Mitte (Bereich +1,1 m bis 1,4 m)
- Unten (Bereich +0,15 m bis +0,45 m)

Eine Skizze der Prüfbereiche und ein Bild der Haftzugprüfungen finden sich in Bild 2.7.1-16 wieder.



a) Haftzugprüfung

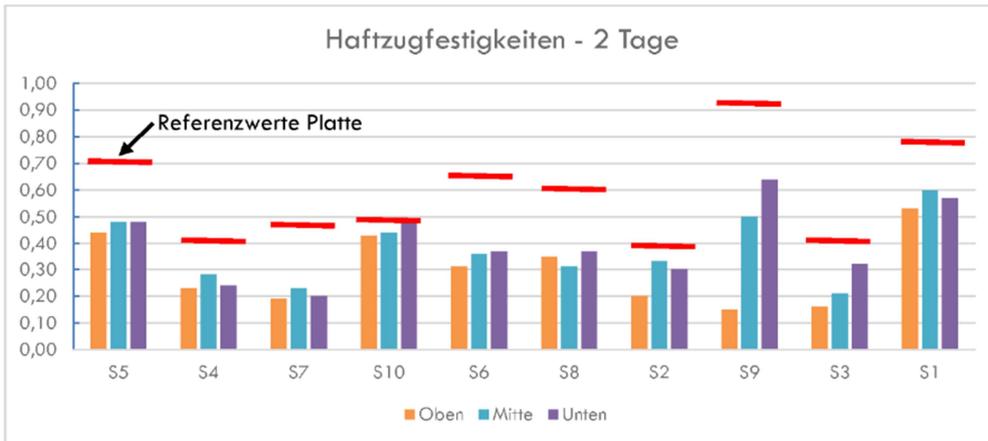
b) Skizze Probekörper und Prüfstellen (2,5 m x 0,4 m x 0,4 m)

Bild 2.7.1-16. Untersuchungen zur Haftzugfestigkeit – Lage der Prüfstellen

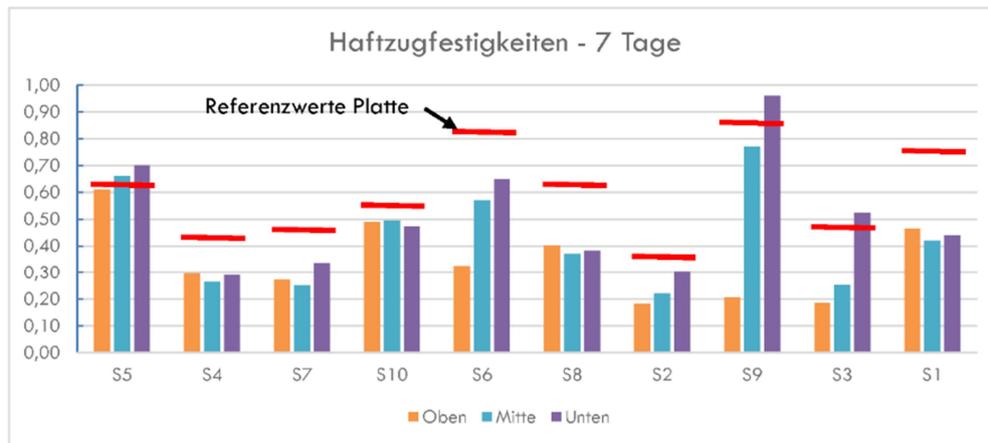
Die Einzelwerte der durchgeführten Haftzugprüfungen sind in Anlage 7 in den Tabellen A7-14 bis A7-15 aufgeführt. Im nachstehenden Bild 2.7.1-17 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Die über den Balken angeordneten horizontalen roten Linien geben die Referenzwerte wieder, die für die jeweiligen FBVS an den Plattenprüfkörpern unter gleichen Lagerungsbedingungen festgestellt wurden. Grundsätzlich zeigt sich, dass die an den Platten ermittelten Haftzugfestigkeiten nur von wenigen Bahnen erreicht werden.

Eine Abhängigkeit des Haftverbundes von der Betonierhöhe zeigen die mechanisch-adhäsiven FBV-Abdichtungen S6, S2, S9 und S3 mit Vliesgewebe (Bahn S8 ausgenommen), wobei der Effekt für die genannten Bahnen bereits im Betonalter von 2 d sichtbar ist. Besonders auffällig sind die Systeme S6 und S9, also die FBVS, die sich bisher aufgrund des dünnen Vlieses durch hohe Haftzugfestigkeiten auszeichneten. Für die FBV-Bahn S9 zeigen sich im oberen Prüfbereich bereits im Betonalter von 2 d und 7 d um den Faktor 4,5 geringere Haftzugfestigkeiten als im unteren Stützenbereich. Im oberen Bereich wurde als niedrigster Kennwert eine Haftzugfestigkeit von 0,15 N/mm² ermittelt. Im Betonalter von 28 d unterscheiden sich die Kennwerte noch um den Faktor 2. Die FBV-Bahnen S5 und S1 zeigen nur geringe Unterschiede der Haftzugfestigkeit in Abhängigkeit von der Betonierhöhe, die aber nicht signifikant sind. Überraschend ist, dass die FBVS S4, S7 und S10 mit drucksensibler Kleberschicht keine Abhängigkeit erkennen lassen.

a)



b)



c)

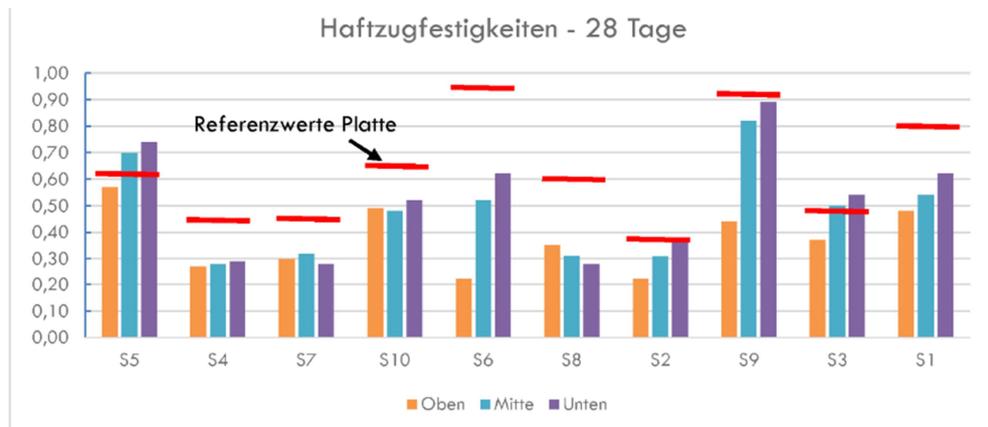


Bild 2.7.1-17. Ergebnisse der Haftzugfestigkeit nach 2 d, 7 d, und 28 d in Abhängigkeit von der Schalungs- bzw. Betonierhöhe (oben, Mitte und unten) sowie Gegenüberstellung der an den Prüfplatten ermittelten Haftzugwerte (roter waagerechter Balken).

Eine zwingend erforderliche Eigenschaft der FBVS ist ein dauerhaft wasserdichter bzw. wasserundurchlässiger Verbund zwischen der Bahn und dem Beton, sodass im Falle einer Perforation sich kein Wasser über die Grenzschicht ausbreiten kann. In Zusammenhang mit den Untersuchungen zur Verbundfestigkeit stellte sich die Frage, ob die Eigenschaft einer guten Verbundfestigkeit mit der Eigenschaft der Hinterlaufsicherheit korreliert. Erkenntnisse dazu sollten orientierende Untersuchungen an Verbundprobekörpern mit den Abmessungen von 30 cm x 20 cm x 5 cm (Länge x Breite x Höhe) liefern. Die Untersuchungen erfolgten unter Verwendung des Zementes 1 (CEM II) und der Sieblinie A/B 16 (Körnung 8/16) sowie der in Tabelle 2.7.1-1 aufgeführten Mischungsrezeptur, die auch im Zuge der Untersuchungen zur Haftzugfestigkeit zur Anwendung kam.

Zur Herstellung der Probekörper wurden die FBVS in Holzschalungen (aus Schalplatten) eingelegt und der Spalt zur aufgehenden Schalung mit Silikon gegen das Unterlaufen mit Zementleim verschlossen. Vor der Betonage wurden die Schalungsseiten mit einem Trennmittel benetzt und anschließend betoniert. Die Verdichtung erfolgte – wie auch bei den Haftzugversuchen – für 10 s auf dem Rütteltisch.

Die Prüfungen wurden ab einem Betonalter von mindestens 28 d und spätestens nach 35 d gestartet. Die Perforation der Bahn wurde über eine ca. 10 mm tiefe Bohrung mit einem Durchmesser von 10 mm simuliert, die zentrisch in Plattenmitte eingebracht wurde. Dadurch war sichergestellt, dass Wasser an der Grenzschicht ansteht.

Die Fehlstelle wurde erst kurz vor der Prüfung im Nachgang hergestellt, um zu verhindern, dass die Grenzschicht nicht durch in den Spalt eines vor der Betonage ausgestanzten und wieder eingelegten Bahnenstückes durch Zementleim verschlossen wird. Die durch die Bohrung erzeugte Fehlstelle spiegelt eine z. B. im Wandbereich nach dem Ausschalen entstandene partielle Perforation wider, die nicht erkannt wird und im Zuge der Nutzung dann dem drückenden Wasser ausgesetzt ist.

Die hergestellten Prüfkörper lagerten zwei Tage mit Folie abgedeckt in der Schalung und anschließend im Klima 20/65 nach DIN EN 12390-2 Ber 1 [R12]. Die Druckwasserbeaufschlagung erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1928 [R9], Verfahren A, in dem die geschädigten Prüfplatten mit Hilfe eines Druckbehälters mit einem Innendurchmesser von 100 mm, der in einen Stahlrahmen mit dem Prüfkörper verspannt ist, mit Wasser beaufschlagt wurden (Bild 2.7.1-18).



Bild 2.7.1-18. Prüfeinrichtung zur Untersuchung der Hinterläufigkeit der geschädigten FBV-Bahnen

Der maximale Druck orientierte sich an den Prüfgrundsätzen PG-FBB-1 [R3] und PG-FBVA [R11] vom Deutschen Institut für Bautechnik und betrug maximal 5 bar (50 m Wassersäule). Der Prüfdruck berücksichtigt einen Sicherheitsbeiwert von 2,5.

Die Drucksteigerung erfolgte in Absprache mit der TH-Nürnberg stufenweise, indem der Wasserdruck stündlich um 1 bar bis zum Maximaldruck von 5 bar gesteigert wurde. Anschließend wurde der Druck über einen Zeitraum von 7 d gehalten. Zur Beurteilung, ob und wie sich das Wasser in der Grenzschicht verteilt hat, wurde das Wasser im Drucktopf mit einem Tracer (Uranine AP (C.I. 45350) eingefärbt. Da das Uranine fluoreszierend ist, konnte die Verteilung im Bedarfsfall mit Hilfe von UV-Licht erfolgen. In der Regel war die Ausbreitung aber bereits mit dem bloßen Auge zu sehen oder das Wasser trat seitlich aus der Grenzschicht aus.

Sofern der Prüfkörper dem Prüfdruck von 5 bar über den Prüfzeitraum von 7 d standgehalten hat, wurde dieser im Dreipunktbiegeversuch in Querrichtung in der Achse der Perforation gebrochen. Bild 2.7.1-19 zeigt exemplarisch das Ergebnis eines Versuches, bei dem es über die Grenzschicht keine Wasserverteilung gegeben hat.



Bild 2.7.1-19. Ergebnis der Hinterlaufprüfung (exemplarisch für eine FBV-Bahn, bei der es keine Unterwanderung mit Wasser gegeben hat)

Die Untersuchungsergebnisse sind in nachstehender Tabelle 2.7.1-3 aufgeführt und den 28 d-Haftzugfestigkeiten gegenübergestellt. Die in der zugehörigen Spalte (rechts außen) in den runden Klammern angegebenen Zahlen, geben die Reihenfolge von der höchsten zur niedrigsten Haftzugfestigkeit dar. Die (1) steht für die im Vergleich höchste festgestellte Haftzugfestigkeit.

Die Ergebnisse zeigen, dass für sechs von zehn FBVS die Wasserdichtheit der Grenzschicht gegenüber dem maximalen Wasserdruck von 5 bar über einen Zeitraum von 7 d nachgewiesen werden konnte. Es handelt sich dabei um die klebe-adhäsiven Systeme S4, S7 und S10 und um das mechanisch-adhäsiv wirkende und mit einer Quelllage im Verbundbereich ausgerüstete System S1. Darüber hinaus hat die mit einer Kleberschicht in Kombination mit einem Vliesgewebe aufgebaute FBV-Bahn S2 der Wasserbeaufschlagung standgehalten.

Am schlechtesten hat die FBV-Bahn S3 abgeschnitten, bei der es bereits bei einem Wasserdruck von 1 bar (Probe 2) bzw. im Zuge der Erhöhung des Drucks auf die zweite Druckstufe von 2 bar

(Probe 2) zum seitlichen Wasseraustritt kam. Die ebenfalls mechanisch-adhäsiv ankoppelnde FBV-Bahn S8 versagte im Zuge der dritten Druckstufe bei 3 bar. Die FBV-Bahn S6 versagte kurz nach aufbringen der letzten Druckstufe von 5 bar, obwohl für das System die dritthöchste Haftzugfestigkeit nach 28 Tagen ermittelt wurde. Auch das bituminöse FBVS S5, mit der zweithöchsten Haftzugfestigkeit, versagte nach aufbringen der Druckwasserbeanspruchung von 4 bar, in dem das Wasser ebenfalls seitlich aus der Grenzschicht austrat.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine gute oder höhere Haftzugfestigkeit zwischen Beton und der Verbundseite der FBV-Bahn nicht zwangsläufig mit der Wasserdichtheit der Grenzschicht verbunden ist. Die Eigenschaften korrelieren daher nachweislich nicht. Ein Vergleich der Ergebnisse zur Hinterläufigkeit mit den an der TH-Nürnberg ermittelten Ergebnissen zeigen eine gute Übereinstimmung (siehe auch Bild 2.6.8 und 2.6.9 im Abschnitt 2.6).

Tabelle 2.7.1-3. Ergebnisse der Hinterlaufprüfungen und Ergebnisse der 28 d Haftzugfestigkeiten (siehe Tabelle A7-13)

| FBVS | | Beanspruchungsdauer und Wasserdruck | | | | | 28 d Haftzugwerte N/mm ² (Ranking) |
|------|-----------|-------------------------------------|------------------|--|---|---|---|
| Bahn | Probe Nr. | 1 h - 1bar | 1 h - 2bar | 1 h - 3bar | 1 h - 4bar | 7 d - 5 bar | |
| S5 | 1 | + | + | + | - (>100 mm)* bei 4 bar nach 30 min (P1) und sofort (P2) undicht; seitlicher Austritt aus der Grenzschicht | | 0,79 (2) |
| | 2 | + | + | + | | | |
| S4 | 1 | + | + | + | + | + (~0 mm)* | 0,40 (9) |
| | 2 | + | + | + | + | + (~0 mm)* | |
| S7 | 1 | + | + | + | + | + (~0 mm)* | 0,43 (7) |
| | 2 | + | + | + | + | + (~0 mm)* | |
| S10 | 1 | + | + | + | + | + (~0 mm)* | 0,56 (4) |
| | 2 | + | + | + | + | + (~0 mm)* | |
| S6 | 1 | + | + | + | + | - (>100 mm)* bei 5 bar sofort undicht (P1) seitlicher Austritt aus der Grenzschicht | 0,75 (3) |
| | 2 | + | + | + | + | + (~30 mm)* | |
| S8 | 1 | + | + | - (>100 mm)* bei 3 bar nach ca.30 min (P1) und (P2) sofort undicht; seitlicher Austritt aus der Grenzschicht | | | 0,42 (8) |
| | 2 | + | + | | | | |
| S2 | 1 | + | + | + | + | + (~0 mm)* | 0,40 (9) |
| | 2 | + | + | + | + | + (~0 mm)* | |
| S9 | 1 | + | + | + | + | + (~15 mm)* | 0,91 (1) |
| | 2 | + | + | + | + | + (~25 mm)* | |

| FBVS | | Beanspruchungsdauer und Wasserdruck | | | | | 28 d Haftzugwerte N/mm ² (Ranking) |
|------|-----------|--|---|------------------|--|-------------------|---|
| Bahn | Probe Nr. | 1 h - 1bar | 1 h - 2bar | 1 h - 3bar | 1 h - 4bar | 7 d - 5 bar | |
| S3 | 1 | + | - (>100 mm)* bei 2 bar sofort undicht; seitlicher Austritt aus der Grenzschicht | | | | 0,55 (5) |
| | 2 | - (>100 mm)* bei 1 bar nach 50 min undicht; seitlicher Austritt aus der Grenzschicht | | | | | |
| S1 | 1 | + | + | + | + | + (~0 mm)* | 0,53 (6) |
| | 2 | + | + | + | + | + (~0 mm)* | |
| | | + Wasserdicht nach Wasserbeaufschlagung | | | * () Abschätzung des Wasserweges (Verfärbung oder seitlicher Austritt aus der Grenzschicht) | | |
| | | - undicht nach Wasserbeaufschlagung | | | | | |

Aus den im Abschnitt 2.7.1 dargestellten Ergebnissen der Untersuchungen zum Verbundverhalten der FBVS und zu deren Hinterläufigkeit, lassen sich nachstehende Kernaussagen und Schlussfolgerungen ableiten:

- Das zur Bestimmung der Haftzugfestigkeit verwendete Prüfverfahren in Anlehnung an DIN EN 1542 (Messung der Haftzugfestigkeit im zentrischen Abreißversuch) führt zu reproduzierbaren Ergebnissen mit geringen Streuungen. Es ist zur Charakterisierung der Verbundeigenschaften von FBVS geeignet und sollte für die Eigenschaftsprüfungen herangezogen werden. Die Versuche sind mit einer Abzugsgeschwindigkeit von 100 N/s an jeweils fünf Prüfstellen durchzuführen.
- Unter Verwendung des Zementes CEM II/A-LL 32,5 R mit normaler Hydratationstemperatur, Frühfestigkeit (Anfangserhärtung) und normaler Nacherhärtung und der Mischungsrezeptur für einen WU-Beton der Festigkeitsklasse C30/37 mit einem Größtkorn von 32 mm (Sieblinie A/B 32), weisen die FBVS untereinander bis zu einem Betonalter von 28 Tagen Haftzugfestigkeiten auf unterschiedlichem Niveau zwischen 0,36 N/mm² und 0,96 N/mm² auf. Mit zunehmenden Betonalter (2 d, 7 d, 28 d) zeigte sich bei neun von zehn Bahnen keine Zunahme der Verbundfestigkeit. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das Verhalten in Zusammenhang mit den Versagensmechanismen in der Verbundzone der FBV-Bahnen steht, die mit Erreichen der systemspezifischen Haftzugfestigkeit unabhängig von der Entwicklung der Beton-Zug- und Druckfestigkeit versagt. Bei 9 der untersuchten Bahnen wurde die systemspezifische Verbundfestigkeit bereits nach zwei Tagen erreicht, was sich durch die immer gleichen bahnen-spezifischen Versagensbilder widerspiegelt.
- Die Höhe der Haftzugfestigkeit der untersuchten FBV-Bahnen und die Lage der Versagensebene werden durch den bahnen-spezifischen Aufbau der FBV-Bahn und die Eigenschaften sowie die Struktur der jeweiligen Schichten bestimmt.
- Bei den klebe-adhäsiven Systemen S4, S7 und S10 lag die Versagensebene immer zwischen der Kleberschicht und der Dichtungsbahn. Der Kleber verblieb grundsätzlich vollflächig auf der

Betonseite bei einem sich einstellenden Festigkeitsniveau zwischen 0,4 und 0,5 N/mm² (S4 und S7) bzw. 0,5 und 0,6 N/mm² (S10). Bei der bituminösen Bahn S5 trat im Wesentlichen ein adhäsives Versagen in der Ebene Zementstein/Bitumen bei Haftzugfestigkeiten um ca. 0,7 N/mm² auf. Die FBV-Bahn S2 versagte bei Werten um 0,4 N/mm² immer zwischen der Kleberschicht und dem darin befestigten Vliesgewebe und die mechanisch-adhäsiven Bahnen mit dünnem Vliesgewebe versagten auf einem wesentlich höheren Festigkeitsniveau zwischen 0,8 und bis zu 1,0 N/mm² sowohl adhäsiv in der Ebene Zementstein/Bahn als auch kohäsiv im durch das Vlies im Querschnitt geschwächten Zementstein. Bei den ebenfalls mechanisch-adhäsiv ankoppelnden FBVS S8 und S3 befand sich die Versagensebene in der Grenzschicht des Vliesgewebes zur Bahn bei Haftzugfestigkeiten um 0,6 N/mm² (S8) bzw. 0,45 N/mm² (S3). Die mit quellfähiger Einlage versehene Bahn versagte immer in der Grenzschicht zur Dichtungsbahn bei Versagenskräften um 0,7 bis 0,8 N/mm².

- Das immer vergleichbare Versagensbild erklärt die geringe Streuung der Haftzugwerte und die gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Prüfserien.
- Die Verwendung eines Zementes mit niedriger Hydratationswärme, langsamerer Festigkeitsentwicklung und einer guten Nacherhärtung (CEM III/A 32,5 N-LH) führt bei sonst gleicher Mischungsrezeptur und Sieblinie (A/B 32) erwartungsgemäß zu geringeren 2 d-Werten. Der niedrigste 2 d-Wert betrug 0,22 N/mm². Durch die Nacherhärtung stellt sich nach 7 bzw. spätestens nach 28 ein zur mit dem CEM II hergestellten Mischung vergleichbares Festigkeitsniveau ein. Die Verwendung des CEM III hat somit keinen signifikanten Einfluss auf das Verbundverhalten. Die Versagensbilder waren auch bei den 2 d-Werten trotz geringerer Verbundspannung unverändert, was für die klebe-adhäsiven Systeme in Zusammenhang mit der geringeren Hydratationswärme und den Auswirkungen auf die Klebkraft des Klebers auf der Dichtungsbahn stehen könnte. Bei den bituminösen und mechanisch-adhäsiven Systemen liegt aufgrund der noch nicht so weit fortgeschrittenen Erhärtung des Zementleims eine geringere adhäsive Ankopplung des entstandenen Zementsteins am jeweiligen Untergrund vor, die geringere Haftzugfestigkeiten mit sich bringt. Die Versagensebene bleibt aber unverändert.
- Die Verwendung eines Größtkorns von 16 mm und 32 mm (Sieblinie A/B 16 und A/B 32) ließ bei sonst gleicher Mischungsrezeptur ebenfalls keinen wesentlichen Einfluss auf die Haftzugfestigkeiten erkennen. Für alle FBVS konnten Verbundfestigkeiten auf einem vergleichbaren Festigkeitsniveau festgestellt werden. Nur die 2 d Werte der mechanisch-adhäsiven Bahnen S8 und S2 und S3 wichen durch ca. 25 % (S2 und S3) bzw. ca. 40 % (S8) niedrigere Festigkeiten ins Auge. Die 7 d und 28 d Werte waren aber wieder auf dem alten Niveau. Den geringsten Wert wies die Bahn S3 mit 0,31 N/mm² auf.
- Auf eine Wärmealterung bei 50 °C nach dem Ausschalen (nach 2 d) reagieren die Systeme recht unterschiedlich. Bei dem bituminösen System S5 und bei den klebe-adhäsiven Systemen S4 und S7 führt die Wärmebehandlung gegenüber der klimagelagerten Referenz zu 5 % bis 30 % geringeren 7 d Haftzugfestigkeiten. Mit zunehmendem Alter zeigt sich nach 28 d bei den Systemen kein zusätzlicher Alterungseffekt. Die Festigkeiten verbleiben nahezu auf dem 7 d-Niveau. Bei anderen Systemen bewirkt der Einfluss der Wärme keine Veränderung bzw. einen

leichten Anstieg der 7 d- und 28 d-Kennwerte (S2, S6 und S1). Die mechanisch-adhäsiven Bahnen S6, S8 und S3 reagieren bei der 7 d-Prüfung ebenfalls auf die Wärme mit unveränderten bzw. leicht erhöhten Haftzugwerten. Eine längere Wärmeeinwirkung bis zu einem Betonalter von 28 d bewirkt bei den Systemen eine deutliche Abnahme der Haftzugfestigkeit um ca. 40 %, was in Zusammenhang mit einem nicht alterungsbeständigen Vliesgewebe stehen könnte. Für die zukünftig vorgesehenen Eignungsprüfungen der Haftzugfestigkeit der Verbundkörper wird daher empfohlen, die Platten nach 7 d, 28 d und 56 d Wärmealterung zu prüfen. Zudem sollte der Abfall des 28 d-Wertes gegenüber dem 7 d-Wert nicht > 30 % und der Abfall der Haftzugfestigkeiten zwischen 28 d und 56 d nicht > 10 % betragen. Den geringsten Wert wies die Bahn S7 mit 0,31 N/mm² im Betonalter von 7 d auf.

- Die Betonage auf die wassergesättigte Verbundseite der FBVS führt bei allen Systemen zur Herabsetzung der 7 d Haftzugfestigkeit um mindestens 14 % (S3) bis maximal 42 % (S8). Tendenziell werden die 28 d Haftzugfestigkeiten der Referenzprüfkörper bei der Mehrzahl der Systeme erreicht bzw. stellen sich vergleichsweise hohe Haftzugfestigkeiten ein. Der geringste Haftzugwert von 0,30 N/mm² wurde am System S2 nach 7 d festgestellt. Verbundprobleme bezüglich der Haftzugfestigkeit gibt es nicht. Es stellt sich aber die Frage, wie sich das hohe Wasserangebot in der Grenzschicht und die Vermischung mit dem Zementleim auf die Hinterläufigkeit auswirkt. Es wird daher empfohlen die Hinterläufigkeit an Probekörpern zu prüfen, die auf wassergesättigter Verbundschicht betoniert wurden.
- Durch Untersuchungen an einer 2,5 m hohen Stütze zeigte sich, dass die Referenzwerte der im Klima gelagerten aber auch wärmebehandelten Prüfplatten i. d. R. am großen Probekörper nicht erreicht werden. Die mechanisch-adhäsiv wirkenden Systeme S6, S2, S9 und S3 lassen im oberen Bereich geringere Haftzugwerte erkennen als im unteren bzw. mittleren Bereich. Für die Bahn S9 wurde im oberen Bereich eine 2 d-Haftzugfestigkeit von 0,15 N/mm² (niedrigster Wert aller Untersuchungen) und nach 7 d ein Wert von 0,21 N/mm² ermittelt. Die Systeme S5 (bituminös) und S1 (mechanisch-adhäsiv mit Quellschicht) zeigen nur geringe, nicht signifikante Unterschiede und die klebe-adhäsiven Systeme S4, S7 und S10 mit drucksensibler Kleberschicht lassen keine Abhängigkeit der Haftzugwerte von der Betonierhöhe erkennen. In diesem Zusammenhang würde sich eine Klassifizierung der Systeme anbieten.
- Die durchgeführte Prüfung zur Hinterläufigkeit stellt ein geeignetes Nachweisverfahren zur Überprüfung der Eigenschaft der druckwasserdichten Grenzschicht zwischen Beton und FBVS da. Für die zukünftigen Untersuchungen wird aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse empfohlen, die Prüfung wie folgt zu gestalten:
 - Verwendung eines Drucktopfes mit ca. 100 mm Durchmesser.
 - Stündliche Erhöhung des Wasserdrucks um 1 bar bis zum Erreichen des maximal zulässigen Prüfdruckes von 5 bar, der dann über 7 Tage zu halten ist.
 - Bei positivem Ergebnis wird der Prüfkörper in Querrichtung gebrochen und der Wasserweg makroskopisch oder – falls erforderlich – mit der UV-Lampe bestimmt. Der zulässige Wasserweg sollte auf 40 mm begrenzt werden, damit sichergestellt ist, dass durch den Druck-

- topf und den aufgetragenen Anpressdruck die Verteilung nicht verhindert wird. Die bisherigen zwei Prüftermine nach 7 d und 28 d und die Anforderung „keine Veränderung der Ausbreitung zwischen den Prüfterminen“ ist entbehrlich.
- Seitlicher Wasseraustritt während der Prüfung führt zum Abbruch der Prüfung. Der Nachweis der dichten Grenzsicht wäre dann für die darunterliegende Druckstufe zu erbringen, die ebenfalls über 7 d gehalten werden muss. Die anschließende Bewertung erfolgt wie zuvor beschrieben.
 - Die Perforation sollte nach der Betonage im Betonalter von 28 d durch eine Bohrung erfolgen. Alternativ auch vor der Betonage – wie an der TH-Nürnberg umgesetzt – durch Stanzen und Wiedereinlegen des Abschnitts mit der Verbundseite zur Schalung. Es muss für diesen Fall aber sichergestellt sein, dass kein Zementleim während der Betonage in die Grenzsicht eintritt.
 - Der Durchmesser der Bohrung bzw. des gestanzten Loches sollte 10 mm betragen. Für den Fall der Bohrung soll diese 10 mm tief sein.
 - Die Versuche sind unter Verwendung der Mischungsrezeptur mit dem CEM II und 16 mm Größtkorn an Platten (L x B x D=200 mm x 100 mm x 50 mm) durchzuführen, damit das Verhältnis vom Größtkorn zur Plattendicke stimmig ist. Bei Verwendung des Betons mit Größtkorn 32 mm ist ein 100 mm dicker Prüfkörper herzustellen. Verdichtung: 20 s auf dem Rütteltisch (Empfehlung der TH Nürnberg).
 - Auf der Grundlage der Ergebnisse aus den Versuchen zur Hinterläufigkeit bietet sich eine Klassifizierung der Systeme nach dem zulässigen Wasserdruck an. Wird die Prüfung z. B. bei 5 bar bestanden, ist das System bis 20 m zugelassen. Besteht das System die 2 bar Prüfung, wäre das System bis 8 m Wasserdruck geeignet. Sofern keine Klassifizierung erfolgt, wären die Systeme S5, S6, S8 und S3 aufgrund der ermittelten Prüfergebnisse nicht geeignet.
 - Da die Hinterlaufsicherheit eine der wichtigsten Eigenschaften für die FBVS ist, wird unter Berücksichtigung der Prüfergebnisse empfohlen, die Prüfung an sechs Platten durchzuführen, wobei die Betonage bei 4 Platten auf der trockenen Verbundseite und bei zwei Platten auf der wassergesättigten Seite (5 cm WS für 2 d und unmittelbar vor der Betonage abgießen) erfolgen sollte. Die Lagerung aller Prüfkörper erfolgt 2 d in der abgedeckten Schalung. Anschließend werden zwei der auf trockenen Untergrund betonierten Probekörper einer Wärmealterung bei 50 °C bis zum Betonalter von 27 d ausgesetzt, anschließend 24 h rekonditioniert und dann die Hinterlaufsicherheit geprüft. Die vier weiteren Platten lagern bis zur Prüfung im Klima 20/65.
 - Der Vergleich der Ergebnisse zur Hinterläufigkeit mit den 28 d Haftzugfestigkeiten belegt, dass die Wasserundurchlässigkeit der Grenzsicht nicht mit der Haftzugfestigkeit korreliert. Entscheidend ist hier die wasserdichte Ankopplung des Zementsteins an die Dichtbahn mit Vliesgewebe bzw. an eine Kleberschicht und der druckwasserdichte Verbund der Bahnschichten untereinander (z. B. Verbund zwischen Kleber und Dichtbahn oder Quelleinlage und Dichtbahn).

- Da die Höhe der Haftzugfestigkeit nicht maßgebend für die Hinterläufigkeit der FBVS ist und sich daraus keine Mindestanforderung ergibt, stellt sich die Frage, wie hoch die Haftzugfestigkeit mindestens sein muss, damit es nicht zu einer Ablösung bzw. Beeinträchtigung des Frischbetonverbundes beim Ausschalen im Wandbereich kommt. Im eingebauten Zustand wirken außer der Haftspannung der Schalplatte beim Ausschalen keine zentrischen Zugkräfte oder andere Kräfte auf die Bahn ein. Aus Untersuchungen an der TH-Nürnberg zur Frage der Haftspannungen wird für das Ausschalen in Verbindung mit FBV-Bahnen eine maximale Haftspannung von $\sigma < 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ (250 kg/m²) genannt. In den Untersuchungen der MPA BS zum Verbundverhalten der FBVS wurde als schlechtester Wert eine Haftzugfestigkeit von 0,15 N/mm² (15000 kg/m²) an einem Stützen- bzw. Wandversuch ermittelt. Der Wert ergab sich am oberen Schalungsrand als kleinster Einzelwert aus allen durchgeführten Untersuchungen im Betonalter von 2 d und wurde unmittelbar nach dem Ausschalen ermittelt. Gegenüber der möglichen maximalen Haftspannung ergibt sich mit dem niedrigsten Kennwert ein Sicherheitsfaktor von 60, sodass die festgestellten Haftzugfestigkeiten nach 2 d für alle untersuchten FBV-Bahnen ausreichend hoch sind und nach 2 d ausgeschalt werden kann. Die bisher gestellte Anforderung an die Haftzugfestigkeit von 0,1 N/mm² (siehe Tabelle 2.1.7) kann bestehen bleiben. Eine Erhöhung auf 0,15 N/mm² wäre auch denkbar. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse müssen die in der Praxis festgestellten Ablösungen/Verbundstörungen andere Ursachen haben. Eine mögliche Ursache könnte z. B. die in der Praxis häufig anzutreffende Befestigung der Bahnen durch Tackern mit Klammern an der Schalung darstellen. Damit können partiell auf den Verbund einwirkende erhöhte, über den festgestellten Kennwerten liegende Haftzugkräfte auftreten und den Verbund stören. Derartige Befestigungsmittel sind zu vermeiden oder deren Eignung durch gesonderte Versuche bahnen-spezifisch nachzuweisen (Anforderung: keine Schädigung des Verbundes). Eine geeignete Prüfung ist ggf. mit in das zukünftige Prüfprogramm aufzunehmen.
- Als eine mögliche bzw. denkbare weitere Ursache für die in der Praxis nach dem Ausschalen festgestellten Verbundstörungen (Ablösungen der Bahn) wurden in einer Projektsitzung auch Scherspannungen in der Grenzschicht durch unterschiedliche Längenausdehnungen bzw. Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen FBVS und Bahn genannt. Da die Wärmeausdehnungskoeffizienten der Bahnen nicht bekannt waren, wurden zur Klärung der Frage orientierende Untersuchungen zur temperaturabhängigen Längenänderung durchgeführt. Die Einzelergebnisse, Angaben zur Versuchsdurchführung und die Bewertung der Ergebnisse finden sich im Anhang A7 wieder. Zusammenfassend lassen die Ergebnisse die Aussage zu, dass die für die untersuchten FBV-Bahnen ermittelten unterschiedlichen Längenänderungen im Vergleich zum Beton nicht zu Scherspannungen führen, die eine Ablösung bzw. Beeinträchtigung des Frischbetonverbundes beim Ausschalen im Wandbereich bewirken.
- Das in Anhang A7 beschriebene Verfahren bietet sich zur Bestimmung der Wärmeausdehnungskoeffizienten der FBVS an. Ein Vergleich der ermittelten Werte mit den Literaturwerten [11], [12] der verschiedenen Basismaterialien der Bahnen (PE-LD, PE-HD, PP, PVC-P etc.) zeigt größenordnungsmäßig eine gute Übereinstimmung.

2.7.2 Untersuchungen zu Scherverhalten und Dichtigkeit der Fügenähte

Frischbetonverbundabdichtungen werden vor der Betonage der erdberührten Bauteile einlagig, vollflächig, lose und untereinander überlappend auf dem Untergrund verlegt. Die Herstellung der Nahtverbindungen (Füge- und/oder Klebenähte) erfolgt nach den Vorgaben der Hersteller und erfordert qualifiziertes Personal sowie eine gewissenhafte Ausführung. Die Nahtverbindungen müssen den thermischen und mechanischen Einwirkungen aus der Einbauphase (z. B. Kräften durch das Einbringen des Frischbetons; Windsogkräften sowie Scherkräften aus thermischen Längenänderungen) standhalten und im eingebauten Zustand als zusätzliche Abdichtungslage dauerhaft dicht gegen das am Bauwerk anstehende drückende Wasser sein. Zudem kreuzen die Nähte der FBVS Arbeits- und Sollrissfugen und in der Fläche ggf. entstehende Zwangsrisse, die mit Hilfe der zusätzlichen Anordnung der FBV-Bahnen rissüberbrückend abgedichtet werden sollen. Daraus resultierend müssen nicht nur die Bahnen, sondern auch die Längs- und Quernähte und T-Stöße dauerhaft dicht sein. Füge- und Klebenähte, die nicht wasserdicht sind, widersprechen dem Ansatz einer dichten Bauweise.

Das Bild 2.7.2-1 zeigt links beispielhaft das Verlegen der als Rollenware angelieferten FBV-Systeme auf einer Baustelle (Breite je nach System ca. 1 bis 2 m) und im rechten Teil eine schematische Darstellung eines verlegten FBV-Systems mit überlappten Längs-, Quer- bzw. Kopfnähten sowie T-Stößen. In einigen Systemen werden die Längs- und/oder Quernähte auch gestoßen. Diese werden dann mit einem bis zu 200 mm breiten Tape oder auch Streifen gesichert. Anstatt mit adhäsiv wirkenden Tapes und Randstreifen werden Nähte auch mittels thermischen Schweißens sowie Montagekleber, Hotmelt-Verfahren oder unter Verwendung von Schmelzklebstoffen hergestellt. Unabhängig vom Fügeverfahren müssen Nähte immer versetzt angeordnet werden, Kreuzstöße sind dabei nicht zulässig.

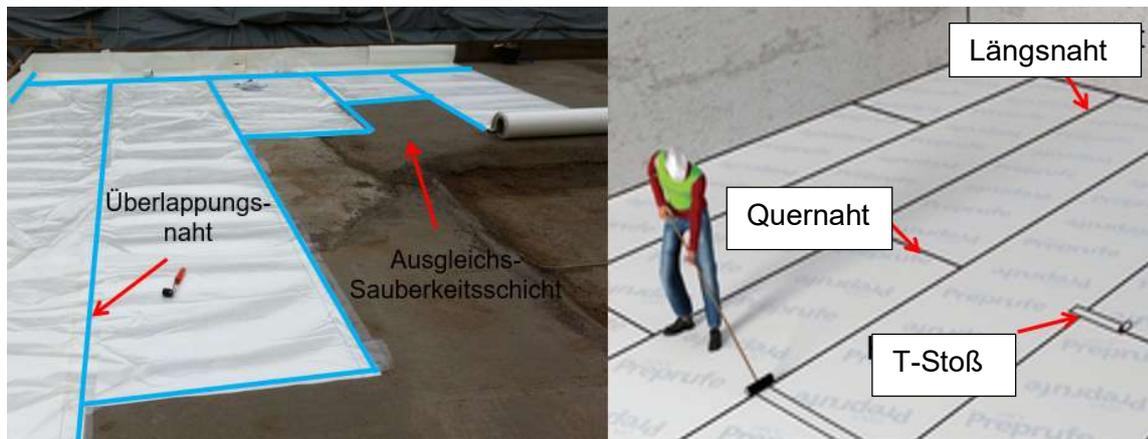


Bild 2.7.2-1. Verlegen von FBV-Systemen mit Längsnähten, Quer- bzw. Kopfnähten und T-Stößen

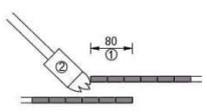
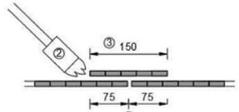
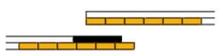
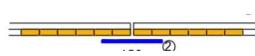
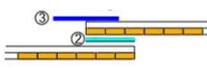
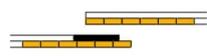
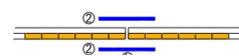
In einem ersten Schritt wurden die Produktdatenblätter und Ausführungsanleitungen der Hersteller der zu untersuchenden FBVS gesichtet und von den zur Anwendung kommenden Nahtvarianten schematische Darstellungen erstellt. Eine Übersicht über die verschiedenen Nahtformen findet sich in Anlage 9 in den Bildern A8-1 bis A8-6 wieder. Ein Teil der schematischen Darstellungen wurde bereits im DBV Heft 44 [1] veröffentlicht.

Die Bilder A8-1 bis A8-6 zeigen eine Vielzahl unterschiedlicher Nahtausführungen der Füge- und Klebenähte der FBV-Bahnen. Die Fügung der Bahnen in Längsrichtung erfolgt bei den Bahnen

auf Kunststoffbasis häufig über werkseitig auf die Bahn applizierte selbstklebende Randstreifen. Teilweise werden so hergestellte Nahtverbindungen zusätzlich über einseitige Klebebänder abgesichert. Bei anderen Systemen erfolgt die Herstellung der Nahtverbindungen in Längsrichtung mittels Heiß- oder Kaltklebern, unter Verwendung von Klebstoffen, Klebebändern (einseitig oder beidseitig klebende Tapes), unter Verwendung von Schweißmitteln oder durch thermische Schweißverfahren (z. B. dem Heizkeilschweißen und Warmgasschweißen). Entsprechende Ausführungen finden sich auch zur Verbindung der Quernähte und für die Herstellung der Nähte von Zuschnitten wieder. Zur Anwendung kommen auch Stumpfstöße der Bahnen, bei denen die Verbindung durch einseitige Klebebänder hergestellt wird, die entweder oberseitig oder unterseitig oder auch beidseitig angeordnet sind. Klebebänder (Tapes) die zur Bauteilseite angeordnet sind und Überlapp- oder Stoßbereiche überdecken, müssen auf der Betonseite eine Verbundschicht (mechanisch-adhäsiv, klebe-adhäsiv oder bituminös-adhäsiv wirkend) aufweisen.

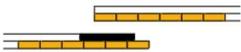
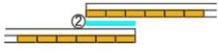
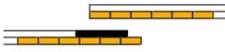
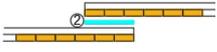
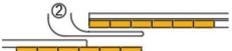
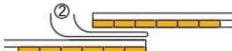
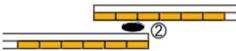
In Tabelle 2.7.2-1 sind die geprüften Naht- und Fügeverfahren der untersuchten Bahnen aufgeführt.

Tabelle 2.7.2-1. FBVS und deren Naht- und Fügeverfahren (Übersicht)

| FBVS | Naht-Fügeverfahren | Verbundmechanismus |
|-----------|--|--------------------------------|
| S5 | thermisch verschweißt, Flämmen a) Überlappnaht  b) Stoßnaht mit Bitumenstreifen  | bituminös-adhäsiv |
| S4 | SK-Randstreifen a) Überlappnaht (Längsnaht)  einseitiges Klebeband b) Stoßnaht; horizontale Quernaht (Tape untergelegt)  ein- und beidseitiges Klebeband c) Überlappnaht; vertikale Quernaht  | klebe-adhäsiv mit Besandung |
| S7 | SK-Randstreifen a) Überlappnaht (Längsnaht)  Sicherungstape b) Stoßnaht (Quernaht)  | klebe-adhäsiv mit Besandung |

... Fortsetzung Tabelle 2.7.2-1

Tabelle 2.7.2-1. (Fortsetzung)

| FBVS | Naht-Fügeverfahren | Verbundmechanismus |
|------------|---|--------------------|
| S10 | <p>SK-Randstreifen</p> <p>a) Überlappnaht (Längsnaht)</p>  <p>Sicherungstape (beidseitig mit Acrylat)</p> <p>b) Überlappnaht (Quernaht)</p>  <p>c) Kombination aus a) und b) (abgesicherte Längsnaht)</p>  | klebe-adhäsiv |
| S6 | <p>SK-Randstreifen</p> <p>a) Überlappnaht (Längsnaht)</p>  <p>Sicherungstape (beidseitig beschichtet)</p> <p>b) Überlappnaht (Quernaht)</p>  | mechanisch-adhäsiv |
| S8 | <p>thermisch verschweißt</p> <p>a) Überlappnaht) Bahn mit Bahn (Längsnaht) Bahn auf Bahn mit Vlies (Quer naht)</p>   <p>Montagekleber</p> <p>b) Überlappnaht) Bahn mit Bahn (Längsnaht) Bahn auf Bahn mit Vlies (Quer naht)</p>   | mechanisch-adhäsiv |

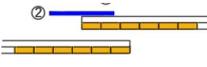
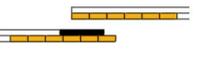
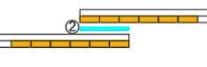
... Fortsetzung Tabelle 2.7.2-1

Tabelle 2.7.2-1. (Fortsetzung)

| FBVS | Naht-Fügeverfahren | Verbundmechanismus |
|-----------|--|--------------------|
| S2 | SK-Randstreifen a) Überlappnaht (Längsnaht) | mechanisch-adhäsiv |
| | Hotmeltkleber b) Überlappnaht (Längs-/Quernaht) | |
| | Sicherungstape c) Überlappnaht (Längs/Quernaht) | |
| | Sicherungstape 2x d) Überlappnaht (Längs-/Quernaht (Wandbereich)) | |
| S9 | Integrierter Hotmeltstreifen a) Überlappnaht (Längsnaht) | mechanisch-adhäsiv |
| | Hotmeltkleber b) Überlappnaht | |
| | thermisch verschweißt c) Überlappnaht | |
| | Sicherungstape d) Überlappnaht (Quernaht) | |

... Fortsetzung Tabelle 2.7.2-1

Tabelle 2.7.2-1. (Fortsetzung)

| | | | |
|-----------|--|--|--|
| S3 | SK-Randstreifen | a) Überlappnaht  | mechanisch-adhäsiv |
| S1 | SK-Randstreifen | a) Überlappnaht (Längsnaht)  | mechanisch-adhäsiv mit Quelleinlage |
| | Sicherungstape (beidseitig mit Acrylat) | b) Überlappnaht (Quernaht)  | |

Um Erkenntnisse zur Dauerhaftigkeit der Nahtverbindungen zu erhalten, wurden durch die MPA BS Untersuchungen zur Nahtfestigkeit (Scherfestigkeit) an unterschiedlichen Nahtvarianten der FBVS in Abhängigkeit vom Probestalter und der Probenlagerung durchgeführt. Die Prüfung erfolgte nach einer Lagerung im Normalklima [R15] bei $(23\pm 3)^\circ\text{C}$ und $(50\pm 5)\%$ relativer Luftfeuchtigkeit, nach einer Wärmealterung bei 50°C , nach der Probenlagerung im Wasser bei 23°C sowie im Wasser bei 50°C . Einen Überblick über das Versuchsprogramm gibt Bild 2.7.2-2.

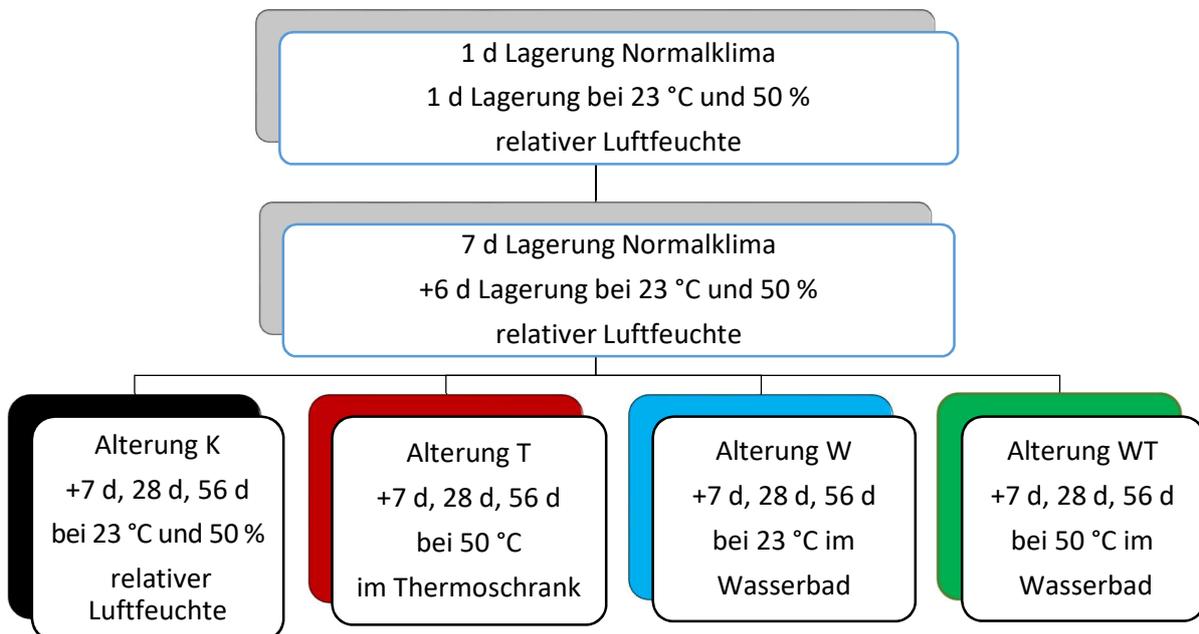


Bild 2.7.2-2. Versuchsprogramm

Die Herstellung der Probekörper mit mittig liegender Naht erfolgte durch Vertreter der Firmen oder durch einen Mitarbeiter des Hauses, der gelernter Dachdeckermeister ist. Je Nahtvariante wurden ca. 5 laufende Meter hergestellt und streifenförmige Probekörper mit den Ca.-Abmessungen von $400\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ (Länge x Breite) mit mittiger Naht daraus entnommen. Für jeden Prüftermin und jede Nahtvariante wurden 5 Probekörper ausgeschnitten. Die Prüfungen erfolgten nach 1 d und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 und nach den vorgenannten Alterungslagerungen K, T,

W und WT nach 7 d, 28 d und 56 d Beanspruchung und einer anschließenden 24-stündigen Re-konditionierung im Prüfklima 23/50.

Die Bestimmung des Scherwiderstandes erfolgte gemäß DIN EN 12317-1 [R16] bzw. DIN EN 12317-2 [R17] in einer Universalprüfmaschine. Bild 2.7.2-3 zeigt einen in der Prüfmaschine eingespannten Streifenprobenkörper. Die freie Einspannlänge zwischen den Klemmbacken betrug 200 mm. Der Probekörper wird mit einer Vorschubgeschwindigkeit von konstant 100 mm/min bis zum Bruch oder der vollständigen Trennung der Fügenaht belastet. Während der Prüfung erfolgte eine kontinuierliche Aufzeichnung der Kraft und der dazugehörigen Dehnung. Ein Kraft-Weg-Diagramm ist exemplarisch in Bild 2.7.2-3 (rechts) dargestellt

Der Scherwiderstand ergibt sich aus der Höchstzugkraft, die erforderlich ist, um die Fügenaht durch die Scherbeanspruchung bis zum Bruch oder bis zur vollständigen Trennung der Naht zu beanspruchen. Der Scherwiderstand wird in N/50 mm angegeben. Die jeweilige Versagensart wird festgehalten.

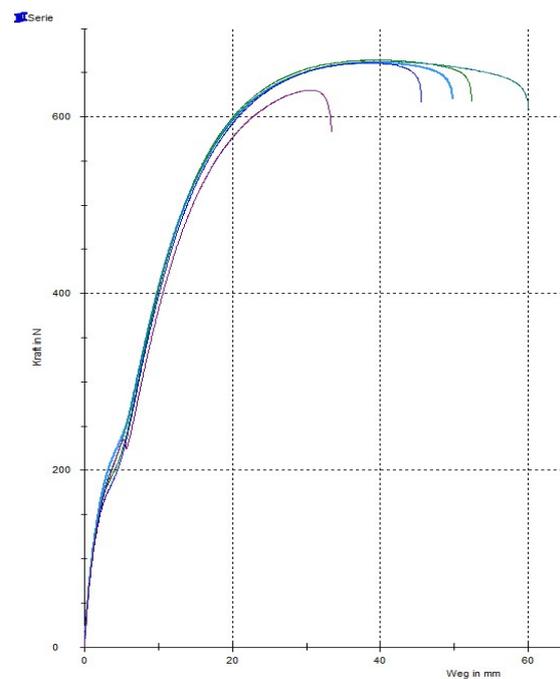


Bild 2.7.2-3. Prüfung des Scherwiderstandes der Nahtvarianten in einer Universalprüfmaschine (Bild links) und zugehöriges Kraft-Weg-Diagramm (Bild rechts)

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Scherwiderstand der Fügenähte der FBVS finden sich im Anhang 8 in den Bildern A8-7 bis A8-34 wieder. Angegeben ist der Verlauf der Höchstzugkraft in N/50 mm bei unterschiedlichen Lagerbedingungen über die Zeit. Bei den angegebenen Werten handelt es sich jeweils um Mittelwerte aus mindestens fünf einzelnen Scherversuchen.

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Scherfestigkeit der Nähte zwischen 1 d und 7 d Klimalagerung bei allen Nahtvarianten keine signifikanten Veränderungen erkennen lässt. Es zeigen sich hier nur unwesentliche Änderungen in Form leicht erhöhter bzw. leicht verringerter

Scherwiderstände. Die ermittelten Scherwiderstände der verschiedenen Nahttypen und der untersuchten Systeme liegen auf einem unterschiedlichen Niveau, was die Diagramme in Bild 2.7.2-4 für die Überlappnähte und in Bild 2.7.2-5 für die Varianten der Stoßnähte exemplarisch dokumentieren. Dargestellt sind die 1 d Werte der Scherwiderstände in N/50 mm in Abhängigkeit von den Füge-/Klebeverfahren. Die zu den Scherversuchen zugehörigen Versagensarten sind in Tabelle 2.7.2-2 aufgeführt. In der Regel versagen die Nähte in dem die Überlappbereiche abscheren oder die Tapes im Übergangsbereich abreißen. Ein Versagen außerhalb der Fügenaht stellt eher die Ausnahme dar und wurde nur für die klassisch im Warmgasverfahren verschweißte Fügenaht des Systems S8 und für das System S1 in Verbindung mit einem beidseitig klebenden Tape im Überlappbereich sowie einer Nahtversiegelung mit Quellpaste festgestellt. Eine thermische Verschweißung der Bahn mit dem Vlies der Verbundschicht führt zur deutlichen Herabsetzung der aufnehmenden Scherwiderstände (siehe Bild 2.7.2-4 b) und ist auch ursächlich für die Undichtigkeit der Nähte. Die selbstklebenden Randstreifen zeigen je nach System Scherwiderstände zwischen 215 N/50 mm und 972 N/50 mm bei vergleichbarer Versagensart. Die geringsten Scherwiderstände weisen die Sicherungstapes auf, die einseitig auf die überlappten Bahnen geklebt werden. Die Kennwerte betragen im Mittel zwischen 129 N/50 mm und 256 N/50 mm. Die derzeit bestehende Anforderung an den Scherwiderstand von 3 N/mm wird hier von dem System S3 nicht erfüllt. Alle anderen geprüften Nahtvarianten erfüllen dagegen die Anforderungen.

Die reine Klimalagerung (23/50) bis zu einem Alter von 56 d lässt ausweislich der Bildern in Anlage 9 (Bild A8-7 bis Bild A8-34) erwartungsgemäß keine wesentlichen Veränderungen erkennen. Kleine Schwankungen stehen im Zusammenhang mit einer nicht immer gleichmäßigen Klebe- bzw. Fügequalität über die Nahtlänge und der daraus resultierenden Streubreite.

Auch der Einfluss der Wärmealterung bei 50 °C im Wärmeschrank und der Wasserlagerung sowie der Einfluss der Kombination daraus führt bei der Mehrzahl der Nahtvarianten zu keinen signifikanten Veränderungen. Die nach 7, 28 und 56 d ermittelten Kennwerte liegen für die Mehrzahl der FBVS und deren Nahtvarianten auf einem nahezu unveränderten bzw. vergleichbaren Niveau und lassen keine Alterung der Nahtverbindungen erkennen. Die entsprechenden Systeme und Nahtausführungen sind nachstehend aufgeführt:

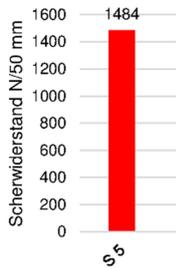
- System S5 Überlappnaht thermisch verschweißt (Bild A8-7)
- System S5 Stoßnaht thermisch verschweißt (Bild A8-8)
- System S4 Überlappnaht mit selbstklebendem Randstreifen (Bild A8-9)
- System S4 Stoßnaht mit unterliegendem Tape (Bild A8-10)
- System S7 Überlappnaht mit selbstklebendem Randstreifen (Bild A8-12)
- System S7 Stoßnaht mit ober- und unterseitigem Tape (Bild A8-13)
- System S10 Überlappnaht mit selbstklebendem Randstreifen (Bild A8-14)
- System S10 Überlappnaht mit selbstklebendem Randstreifen und zusätzlichem Sicherungstape (Bild A8-15)
- System S10 Überlappnaht mit Sicherungstape (Bild A8-16)
- System S8 Handschweißnaht Bahn/Bahn und Handschweißnaht Bahn/Vlies (Bild A8-19 und A8-20)

- System S2 Überlappnaht mit selbstklebendem Randstreifen und Überlappnaht mit Hot-Melt-Kleber (Bild A8-23 und A8-24)
- System S9 Überlappnaht mit selbstklebendem Randstreifen und Überlappnaht mit Hot-Melt-Kleber (Bild A8-27 und A8-28)
- System S9 Überlappnaht thermische verschweißt und Überlappnaht mit ober- und unterseitigem Tape (Bild A8-29 und A8-30)

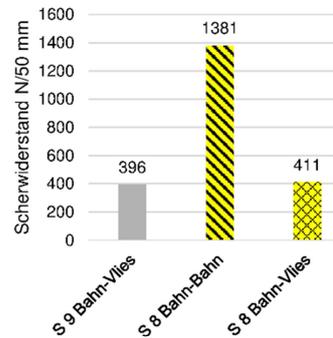
Bei der Verwendung von Dichtstoffen führt die Wärmebehandlung zur deutlichen Erhöhung der Klebkraft und des Scherwiderstandes, was in Zusammenhang mit der temperaturabhängigen Erhärtung des Dichtstoffes steht. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt beim System S8 (Bild A8-22). Hier wurde die glatte Oberseite der Dichtbahn mit der Vliesseite verklebt. Deutlich geringer ausgeprägt ist der Effekt, wenn zwei homogene Bahnenabschnitte miteinander verklebt werden. Ein gleicher Effekt ist für das System S6 für die Überlappnähte mit selbstklebendem Randstreifen und mit beidseitig klebenden Tape zu erkennen (Bild A8-17 und A8-18). Hier wurde offensichtlich ein von der Temperatur abhängiger Klebstoff verwendet. Für das genannte System S6 mit beidseitig klebendem Sicherungstape zeigt sich darüber hinaus eine deutliche Abnahme der Scherzugfestigkeit nach 28-tägiger Lagerung im Wasser bei 23 °C und verstärkt im Wasser bei 50 °C, sodass hier nach 56 d nur noch ein Scherwiderstand von 76 N/50 mm gegenüber 204 N/50 mm nach 1 d erreicht werden. Eine Unverträglichkeit nach Lagerung im Wasser bei 50 °C die Systeme S4 (Überlappnaht mit beidseitig klebendem Tape – Bild A8-11), S 3 (Überlappnaht mit Sicherungstape – Bild A8-31) sowie S1 (Überlappnaht mit selbstklebendem Randstreifen; Überlappnaht mit beidseitig klebendem Tape – Bild A8-32, A8-33 und A8-34). Gegenüber dem reinen Wärmeeinfluss bei 50 °C und unter Normalklima lassen die genannten Systeme dagegen keine negativen Änderungen erkennen.

Die doppelte Absicherung der Nähte führt i. d. R. zu keinen nennenswert höheren Scherwiderständen. Sie ergibt somit nur mit Blick auf die Wasserdichtheit der Nähte einen Sinn (siehe z. B. System S10 in Bild A8-14 und A8-15). Allgemein kann weiterhin festgestellt werden, dass die Nahtfestigkeiten innerhalb eines Systems mehr oder weniger schwanken. Die schwächste Naht stellt i. d. R. die verbundseitige Verwendung eines Sicherungstapes dar.

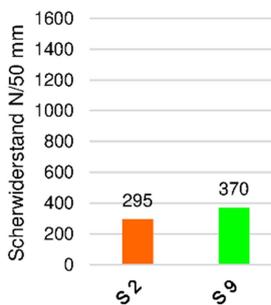
a) therm. geschweißt (Flämmen, Bitumen)



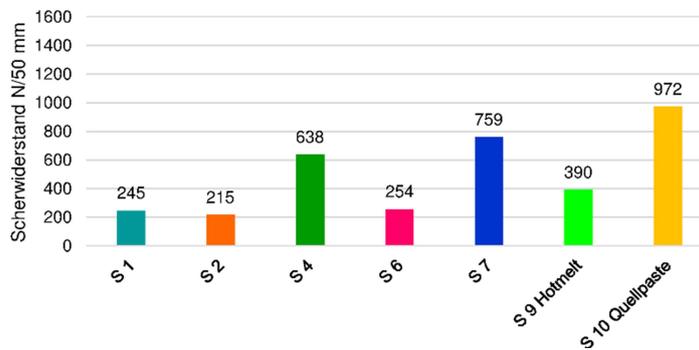
b) therm. geschweißt (Warmgas, Kunststoffe)



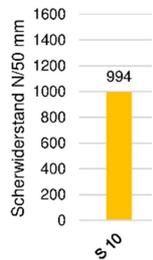
c) Hotmeltkleber (195 °C)



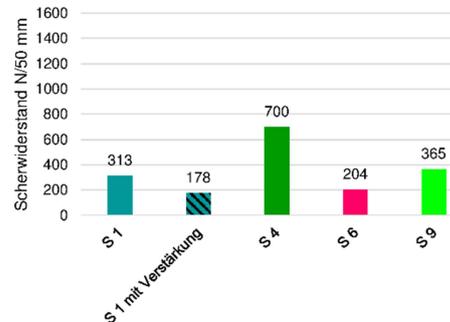
d) selbstklebender Randstreifen



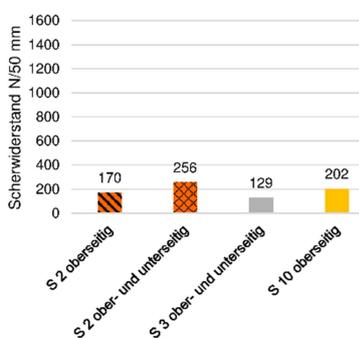
e) selbstklebender Randstreifen und Sicherungstape



f) beidseitig klebendes Tape



g) Sicherungstape



h) Dichtstoff

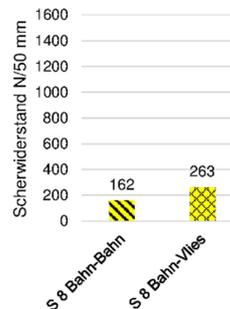
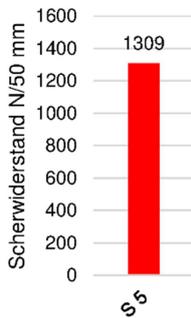


Bild 2.7.2-4. Überlappnähte – Scherwiderstand in N/50 mm in Abhängigkeit vom Füge- bzw. Klebeverfahren a) bis h) – 1d Klima Lagerung

a) thermisch geschweißt (Flämmen, Bitumen)



b) Tape

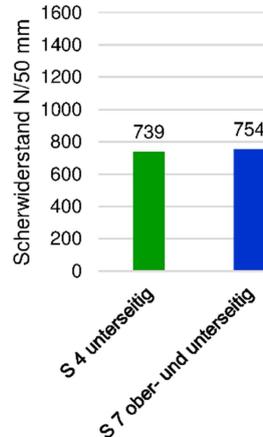


Bild 2.7.2-5. Stoßnähte – Scherwiderstand in N/50 mm in Abhängigkeit vom Füge- bzw. Klebeverfahren a) und b) – 1d Klima Lagerung

Tabelle 2.7.2-2. FBVS – Versagensart der Nähte im Scherzugversuch

| FBVS | Naht-Fügeverfahren (Skizze siehe Tabelle 2.7.2-1) | Versagensart im Scherversuch |
|------------|--|--|
| S5 | thermisch verschweißt, Flämmen a) Überlappnaht b) Stoßnaht mit Bitumenstreifen | - Abscheren in der Naht - Abscheren in der Naht |
| S4 | a) SK-Randstreifen – Überlappnaht b) Stoßnaht; einseitiges Klebeband (Tape untergelegt) c) Überlappnaht mit beidseitig klebendem Tape in der Naht und Sicherungstape im Bahnenübergang | - Abscheren in der Naht - Abscheren des Tapes - Abscheren in der Naht |
| S7 | a) SK-Randstreifen – Überlappnaht b) Stoßnaht mit unseitigem Tape c) Stoßnaht mit ober- und unseitigem Tape | - Abscheren in der Naht unter teilweisem Verstrecken des Grundmaterials - Abscheren der Tapes und Verstrecken des Grundmaterials/der Tapes - leichtes Abscheren, hauptsächlich Verstrecken der Tapes |
| S10 | a) SK-Randstreifen – Überlappnaht b) Überlappnaht mit beidseitig klebendem Tape c) Überlappnaht mit beidseitig klebendem Tape und Sicherungstape im Bahnenübergang | - Abscheren in der Naht unter leichter Verstreckung des Grundmaterials - Abscheren in der Naht - Abscheren in der Naht unter Verstreckung des Grundmaterials |
| S6 | a) SK-Randstreifen – Überlappnaht b) Überlappnaht mit beidseitig klebendem Tape | - Abscheren in der Naht - Abscheren in der Naht |
| S8 | a) thermisch verschweißt Überlappnaht a1) Bahn mit Bahn a2) Bahn mit Vliesseite b) Montagekleber/Dichtstoff - Überlappnaht a1) Bahn mit Bahn a2) Bahn mit Vliesseite | - Bruch im Übergang zur Naht - Abscheren in der Naht - Abscheren in der Naht - Abscheren in der Naht |

| FBVS | Naht-Fügeverfahren (Skizze siehe Tabelle 2.7.2-1) | Versagensart im Scherversuch |
|-----------|---|--|
| S2 | a) SK-Randstreifen – Überlappnaht b) Überlappnaht mit Hotmeltkleber c) Überlappnaht mit Sicherungstape d) Überlappnaht mit beidseitig kleben dem Tape | - Abscheren in der Naht - Abscheren in der Naht - Versagen des Tapes (gerissen) - Versagen des Tapes (gerissen) |
| S9 | a) SK-Randstreifen – Überlappnaht mit Hotmeltkleber b) Überlappnaht mit Hotmelt c) Überlappnaht thermisch verschweißt d) Überlappnaht mit beidseitig kleben den Tape | - Versagen (Bruch) im Übergang der Naht - Versagen (Bruch) im Übergang der Naht - Versagen (Bruch) im Übergang der Naht - Abscheren in der Naht |
| S3 | a) Überlappnaht mit Sicherungstape b) Überlappnaht mit Butyl-Klebeband | - Abscheren und Verstrecken des Klebebandes - Abscheren in der Naht |
| S1 | a) SK-Randstreifen – Überlappnaht b) Überlappnaht mit beidseitig kleben-dem Tape | - Abscheren in der Naht - Abscheren in der Naht (Typ 1) und Versagen (Bruch) im Übergang der Naht (Typ 2) |

Eine zwingend erforderliche Eigenschaft der FBVS sind dauerhaft wasserdichte Nahtverbindungen auch ohne Frischbetonverbund. Erkenntnisse dazu sollten orientierende Untersuchungen an T-Stößen unterschiedlicher Nahtvarianten liefern. Für die Durchführung der Prüfungen wurden Probekörper mit den Abmessungen von mind. 50 cm x 50 cm (Länge x Breite) und mittig angeordnetem T-Stoß von den Mitarbeitern der MPA oder den Herstellern bzw. Vertreibern gefertigt (siehe Bild 2.7.2-6). Geprüft wurden verschiedene systemabhängige Ausführungsvarianten. Aus den Probekörpern wurden dann wiederum kreisrunde Proben mit einem Durchmesser von ca. 37 cm geschnitten und mit der Verbundseite nach unten in den in Bild 2.7.2-7 dargestellten Versuchsstand eingebaut.

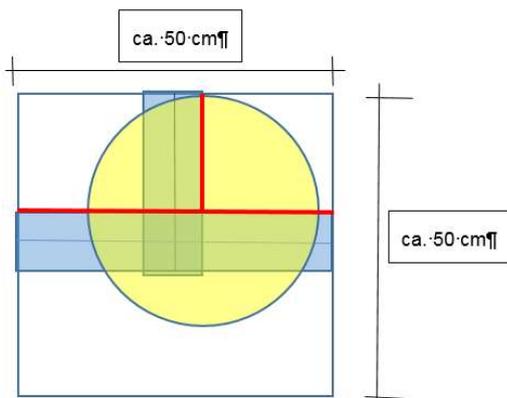


Bild 2.7.2-6. Skizze des Probekörpers zur Untersuchung der Wasserdichtheit der T-Stöße der Nähte



Bild 2.7.2-7. Prüfeinrichtung zur Untersuchung der Wasserdichtheit der T-Stöße der Nähte

Der Einbau erfolgte ab einem Nahtalter von mindestens 7d. Der Innendurchmesser des Drucktopfes betrug unter Berücksichtigung der Nahtvarianten und Überlappungsbreiten 300 mm. Der in Bild 2.7.2-7 unter dem Drucktopf mit Probe sichtbare Betonkörper wies mittig einen wasser-durchlässigen Kern auf. In der Regel trat das Wasser im Falle der Undichtigkeit aber seitlich zwischen Probekörper und Betonuntergrund aus.

Im Bereich des Drucktopfandes wurde die wasserseitige Überlappung so zurückgeschnitten, dass eine druckwasserdichte Abdichtung zwischen dem Drucktopf und der Bahn unter Verwendung eines Dichtstoffes hergestellt werden konnte. Der Drucktopf wurde mit dem Betonuntergrund mit zwischenliegendem Probekörper verspannt.

Die Druckwasserbeaufschlagung erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1928, Verfahren A. Der maximale Druck orientierte sich an den Prüfgrundsätzen PG-FBVA vom Deutschen Institut für Bautechnik und betrug maximal 1 bar (10 m Wassersäule).

Der Wasserdruck wurde stufenweise um 0,2 bar (2 m Wassersäule) pro Stunde bis zum Maximaldruck von 1 bar gesteigert und anschließend über einen Zeitraum von 72 Stunden gehalten. Die Dichtheit der Nähte wurde visuell nach allen Druckstufen und mit Erreichen der 1 bar Druckstufe nach 24 h, 48 h und abschließend nach 72 h beurteilt. Das Beurteilungskriterium war „kein Wasseraustritt“.

Die Untersuchungsergebnisse sind in nachstehender Tabelle 2.7.2-3 aufgeführt. Die im Anhang A9 aufgeführten Bilder A8-35 bis A8-37 dokumentieren exemplarisch die im T-Stoß geprüften Nahtvarianten.

Wie die Ergebnisse verdeutlichen, konnte nur an wenigen T-Stößen die Wasserdichtigkeit festgestellt werden. Es handelte sich dabei um die thermisch (homogen) verschweißten Varianten der FBVS S5 und S8, bei denen die Trägerbahnen direkt und homogen miteinander verschweißt werden. Eine Verschweißung der homogenen Bahn mit der Vliesseite führte dagegen zur sofortigen Undichtigkeit des T-Stoßes (S8/Nahtvariante 2). Aber auch die unter Verwendung von Tapes hergestellten T-Stöße der klebeadhäsiven Systeme S7 und S10 hielten der Wasserbeaufschlagung von maximal 1 bar über 72 Stunden stand.

Die mit einem Hotmelt-Kleber hergestellten T-Stöße erfüllten die Anforderungen hingegen nicht. An einem System (S9/Variante 1) wurde in Verbindung mit einem integrierten Hotmelt-Längsrand das System mit Erreichen der Druckstufe von 1 bar undicht. Andere in Verbindung mit Hotmeltklebern hergestellten Nahtvarianten der T-Stöße versagten schon bei der niedrigsten Druckstufe von 0,2 bar (S2/Variante 3 sowie S9/Variante 2 und 3).

Die T-Stöße, bei denen ein Dichtstoff oder Tape auf die Verbundseite der FBVS aufgebracht wurde (S4/Variante 1, S6/Variante 1, S8/Variante 2 und 3, S2/Variante 2 und 3; S9/Variante 2 und 3, S3/Variante 1 und 2 und S1 mit der Variante 1), wurden im Zuge der Befüllung bzw. bei Aufbringen der ersten Druckstufe von 0,2 bar sofort undicht. Hier findet das Wasser offensichtlich sofort den Weg durch die Vliesebene. Möglich wäre aber auch ein Wasserdurchtritt durch den Versatz der Bahn im Bereich des dreilagigen T-Stoßes.

Tabelle 2.7.2-3. Ergebnisse der Untersuchungen zur Wasserdichtheit der Fügenähte (T-Stöße)

| Bahn | FBVS Nahtvariante und Proben-Nr. | Probe | Beanspruchungsdauer und Wasserdruck | | | | |
|------|--|---------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|----------------|-----------------|
| | | | 1 h 0,2 bar | 1 h 0,4 bar | 1 h 0,6 bar | 1 h 0,8 bar | 72 h 1,0 bar |
| S5 | V1=> LN – geschweißt (überlappt) QN – geschweißt (überlappt) | Probe 1 | + | + | + | + | + |
| | | Probe 2 | + | + | + | + | + |
| | V2=> LN – geschweißt (überlappt) QN – Streifen (gestoßen) | Probe 1 | + | + | + | + | + |
| | | Probe 2 | + | + | + | + | + |
| S4 | V1=> LN – SK-Rand integriert QN – Tape unterklebt | Probe 1 | undicht bei 0,2 bar | - | - | - | - |
| | | Probe 2 | undicht bei 0,2 bar | - | - | - | - |
| | V2=> LN – SK-Rand integriert QN – Tape unterklebt und Tape auf der Bahn | Probe 1 | + | undicht bei 0,4 bar | - | - | - |
| | | Probe 2 | + | + | undicht bei 0,4 bar | | |
| S7 | V1=> LN – SK-Rand (Kleber) QN – Tape unterklebt | Probe 1 | + | + | + | + | + |
| | | Probe 2 | + | + | + | + | + |
| | V1=> LN – SK-Rand (Kleber) QN – Tape unterklebt + oberseitiges Tape (besandet) | Probe 1 | + | + | + | + | + |
| | | Probe 2 | + | + | + | + | + |
| S10 | V1=> LN – SK-Rand (beidseitig Kleber) QN – Tape aufgeklebt | Probe 1 | + | + | + | + | + |
| | | Probe 2 | + | + | + | + | + |
| S6 | V1=> LN – SK-Rand (beidseitig Kleber) QN – Tape beidseitig kle- bend | Probe 1 | Sofort undicht beim Befüllen | - | - | - | |
| | | Probe 2 | Sofort undicht beim Befüllen | | | | |

| Bahn | FBVS Nahtvariante und Proben-Nr. | Probe | Beanspruchungsdauer und Wasserdruck | | | | |
|------|--|---------|-------------------------------------|----------------|----------------|---------------------|-----------------------------|
| | | | 1 h 0,2 bar | 1 h 0,4 bar | 1 h 0,6 bar | 1 h 0,8 bar | 72 h 1,0 bar |
| S8 | V1=> LN – geschweißt (Heißluft) (homogen Bahn auf Bahn) QN – geschweißt (Heißluft/homogen Bahn auf Bahn) | Probe 1 | + | + | + | + | + |
| | | Probe 2 | + | + | + | + | + |
| | V2=> LN – geschweißt (Heißluft) (homogen Bahn auf Bahn) QN – geschweißt (Heißluft) (homogen Bahn auf Verbundebene) | Probe 1 | Sofort undicht beim Befüllen | - | - | - | |
| | | Probe 2 | Sofort undicht beim Befüllen | - | - | - | |
| | V3=> LN – geschweißt (Heißluft) (homogen Bahn auf Bahn) QN – Dichtstoff zwischen (Bahn (glatt) und Verbundseite) | Probe 1 | Sofort undicht beim Befüllen | | | | |
| | | Probe 2 | Sofort undicht beim Befüllen | | | | |
| S2 | V1=> LN – SK-Rand (Kleber) QN – SK-Rand (Kleber) und Absicherung T-Stoß mit Tape auf 20 cm Länge) | Probe 1 | + | + | + | undicht bei 0,8 bar | |
| | | Probe 2 | | | | | undicht bei 1 bar nach 24 h |
| | V2=> LN – SK-Rand (Kleber) QN – Tape b=15 cm mit 100 cm Überlappung auf Naht geklebt (Tape) | Probe 1 | Sofort undicht beim Befüllen | - | - | - | |
| | | Probe 2 | Sofort undicht beim Befüllen | | | | |
| | V3=> LN – SK-Rand (Kleber) QN – Hotmelt 195 °C | Probe 1 | undicht bei 0,2 bar | | | | |
| | | Probe 2 | undicht bei 0,2 bar | - | - | - | - |
| S9 | V1=> LN – SK-Rand Hotmelt QN – Hotmelt 195 °C | Probe 1 | + | + | + | + | undicht bei 1 bar nach 24 h |
| | | Probe 2 | + | + | + | + | undicht nach 24 h bei 1 bar |
| | V2=> LN – Hotmelt 195°C QN – Hotmelt 195°C | Probe 1 | undicht bei 0,2 bar | - | - | - | - |
| | | Probe 2 | undicht bei 0,2 bar | - | - | - | - |
| | V3=> LN – SK-Rand (Buthylklebestreifen) QN – Hotmelt 195°C | Probe 1 | undicht bei 0,2 bar | - | - | - | - |
| | | Probe 2 | undicht bei 0,2 bar | - | - | - | - |

| Bahn | FBVS Nahtvariante und Proben-Nr. | Probe | Beanspruchungsdauer und Wasserdruck | | | | |
|------|---|---------|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| | | | 1 h 0,2 bar | 1 h 0,4 bar | 1 h 0,6 bar | 1 h 0,8 bar | 72 h 1,0 bar |
| S3 | V1=> LN – Dichtband QN – Dichtband | Probe 1 | sofort undicht beim Befüllen | - | - | - | - |
| | | Probe 2 | sofort undicht beim Befüllen | - | - | - | - |
| | V2=> LN – Tape QN – Tape | Probe 1 | Sofort undicht beim Befüllen | - | - | - | - |
| | | Probe 2 | Sofort undicht beim Befüllen | - | - | - | - |
| S1 | V1=> LN – SK-Rand QN – beidseitig klebendes Tape +Quellpaste (Nahtver- siegelung) | Probe 1 | undicht bei 0,2 bar | - | - | - | - |
| | | Probe 2 | undicht bei 0,2 bar | - | - | - | - |

+ = Wasserdicht nach Wasserbeaufschlagung unter der jeweiligen Druckstufe

Zur Klärung der Ursache der an den T-Stößen festgestellten Undichtigkeiten wurden stichprobenweise einzelne Nahtvarianten für sich (ohne T-Stoß) auf Wasserdichtigkeit geprüft. Die Ergebnisse finden sich in der Tabelle 2.7.2-4 wieder.

Tabelle 2.7.2-3. Ergebnisse der Untersuchungen zur Wasserdichtheit einzelner Nahtvarianten

| Bahn | FBVS Nahtvariante und Proben-Nr. | Ergebnis/Ursache |
|------|--|--|
| S4 | Integrierter SK-Rand | undicht im Zuge der Druckstufe 1 (0,2 bar) => der integrierte Kleberand klebt im Überlappungsbereich zwischen den Trägerbahnen; Wasser dringt offensichtlich durch die Klebeebene |
| | Tape unterklebt und Tape auf der Bahn | undicht im Zuge der Druckstufe 2 (0,4 bar) => das oberseitige Tape wird auf der Verbundseite (feines Granulat) geklebt; Wasser dringt durch die Bestreuungsebene |
| S6 | SK-Rand (beidseitig Kleber) | undicht im Zuge der Druckstufe 1 (0,2 bar) => Tape klebt im Überlappungsbereich zwischen Verbundvlies und Trägerbahn; Wasser dringt durch Vliesebene |
| | Tape (beidseitig klebendes Klebeband) | undicht im Zuge der Druckstufe 1 (0,2 bar) => Tape klebt im Überlappungsbereich zwischen Verbundvlies und Trägerbahn; Wasser dringt durch Vliesebene |

| FBVS | | |
|------|---|--|
| Bahn | Nahtvariante und Proben-Nr. | Ergebnis/Ursache |
| S2 | Tape b=15 cm mit 100 cm Überlappung auf Naht geklebt (Tape) | undicht beim Befüllen (erste Druckstufe) => Tape klebt auf Verbundvlies; Wasser dringt durch Vliesebene |
| | SK-Rand | dicht gegenüber 1,0 bar über 72 h |
| S8 | Dichtstoff | undicht beim Befüllen (erste Druckstufe) => Dichtstoff klebt auf Verbundvlies; Wasser dringt durch Vliesebene |
| | thermisch geschweißt homogene Bahn auf Verbundebene | undicht beim Befüllen (erste Druckstufe) => durch die Verschweißung der Vliesebene entsteht keine wasserdichte, homogene Verbindung; Wasser dringt durch die Vliesebene |
| S9 | Hotmelt Kleber | dicht gegenüber 1,0 bar über 72 h |
| S3 | beidseitig klebendes Dichtband | undicht beim Befüllen => Tape klebt im Überlappungsbereich zwischen Verbundvlies und Trägerbahn; Wasser dringt durch Vliesebene |
| | Tape | undicht beim Befüllen => Tape klebt auf der Verbundvliesebene; Wasser dringt durch Vliesebene |
| S1 | Integrierter SK-Rand | undicht im Zuge der Druckstufe 1 (0,2 bar) => Tape klebt im Überlappungsbereich zwischen Verbundvlies und dem Vlies der Trägerbahn; Wasser dringt durch Vliesebene |
| | beidseitig klebendes Tape + Quellpaste (Nahtversiegelung) | undicht im Zuge der Druckstufe 1 (0,2 bar) => Tape klebt im Überlappungsbereich zwischen Verbundvlies und dem Vlies der Trägerbahn; Wasser dringt durch Vliesebene |

Die Untersuchungen zeigen, dass die Nahtverbindungen, bei denen ein Tape auf die Verbundseite (Vlies oder auch feines Granulat) geklebt wird, nicht wasserdicht sind. Der Kleber dringt nicht ausreichend tief in die Vliesebene ein um eine wasserdichte Sperrwirkung zu erzielen. Diese Feststellung ist auch für die Dichtstoffe oder Quellpasten zutreffend, die zur Verklebung bzw. zur Absicherung der Nahtüberlappungen der Frischbeton-Verbundsysteme verwendet werden. Weiter haben die Untersuchungen gezeigt, dass auch die Verwendung von Hotmeltklebern zu undichten Nähten führen kann, wenn die streifenförmig aufgebraachte Klebmasse die Vliesschichtebene der Verbundseite nicht ausreichend durchdringt oder wenn der Kleber nicht ausreichend vollflächig aufgebracht wird. Die untersuchten Nähte wiesen teilweise nur eine streifen- und schlaufenförmige Verklebung auf, wodurch wassergängige Fehlstellen entstehen. In Verbindung mit den T-Stößen können im Bereich der Abkantung Wasserdurchtritte bzw. Lücken entstehen,

wenn der Hotmeltkleber im Stoßbereich nicht vollflächig verarbeitet wird. Darüber hinaus konnte an den T-Stößen teilweise festgestellt werden, dass die Klebmassen der Tapes entlang der Abstufung um die Bahndicke – auch wenn sie mit Druck an der Abkantung angearbeitet wurden – wieder „ablupfen“. Dadurch entsteht ein kleiner wassergängiger Kanal, der die Undichtigkeit des T-Stoßes mit sich bringt.

Zusammenfassend lassen die Untersuchungen zu den Scherwiderständen und zu den Nahtdichtigkeiten folgende Schlussfolgerungen zu:

- Die derzeit bestehende Anforderung an den Scherwiderstand von 3 N/mm wird i. d. R. von den Systemen erfüllt. In diesem Zusammenhang wäre zu diskutieren, ob die Anforderung ggf. auf 4 oder 5 N/mm für den Anlieferungszustand erhöht wird.
- Nahtverbindungen die der Anforderung „Abriss außerhalb der Fügenaht“ gerecht werden, stellen den Einzelfall dar; die Anforderung kann entfallen, da derartige Systeme den Scherwiderstand ≥ 3 N/mm grundsätzlich erfüllen.
- Das Prüfverfahren nach Norm hat sich erwartungsgemäß zur Beurteilung der Nahtfestigkeit als geeignet erwiesen.
- Eine kritische Einwirkung ist die Kombination der Einlagerung in Wasser und Wärme. Ein Einlagerungszeitraum von 56 d wäre überzogen, da sich ein eventueller Alterungseffekt bereits nach 28 d einstellt. Die Ermittlung des 7 d Wertes kann entfallen.
- Die derzeit bestehende Anforderung (zulässige Abminderung des Scherwiderstandes nach Alterung max. 20 % gegenüber dem Anlieferungszustand) ist zu diskutieren und ggf. eine Erhöhung auf max. 30 % festzulegen.
- In Zusammenhang mit der Wasserdichtheit der ausgeführten Nahtvarianten (mit und ohne T-Stoß) ist eine Prüfung aller Nahtvarianten und daraus erstellter T-Stöße ohne Betonverbundkörper zwingend erforderlich, da die hergestellten T-Stöße und Nahtverbindungen teilweise Undichtigkeiten aufwiesen.
- Ursache für die Undichtigkeiten sind wasserführende Vliesebenen und feine wassergängige Kapillaren im Bereich des Bahnenversprunges (Abkantung).
- Das verwendete Prüfverfahren zum Nachweis der Nahtdichtheit in Anlehnung an DIN EN 1928, Verfahren A, hat sich bewährt. Für die Prüfung hat sich eine stündliche Erhöhung des Prüfdrucks um 0,2 bar bis zu einem max. Wasserdruck von 1 bar als geeignet erwiesen. Der max. Wasserdruck ist für 72 Stunden aufrecht zu erhalten und es darf kein Wasseraustritt festgestellt werden (Anforderung wasserdicht). Unter Berücksichtigung der Tapebreiten und Überlappbreiten wird die Verwendung eines Drucktopfes mit einem Innendurchmesser von 30 cm abweichend von den bisherigen Regelungen empfohlen.
- Mit Blick auf den bisher zulässigen maximalen Wasserdruck (20 m WS) wäre zu diskutieren, ob der Versuch zum Nachweis der Nahtdichtheit zukünftig mit einem maximalen Druck von 20 m Wassersäule (2 bar) durchgeführt werden sollte. Eine Berücksichtigung von Sicherheitsbeiwerten mit einem Faktor von 2,5 – wie bei den Versuchen zur Hinterläufigkeit und bei den

Funktionsversuchen üblich- ist aus abdichtungs- und versuchstechnischer Sicht schwierig umzusetzen.

- Auf der Grundlage der Ergebnisse aus den Versuchen zur Wasserdichtheit der Nähte würde sich bei einem maximalen Prüfdruck von 20 m WS eine Klassifizierung der Systeme nach dem erreichten Wasserdruck anbieten. Wird die Prüfung z. B. bei 2 bar bestanden, ist das System bis 20 m zugelassen. Besteht das System die 1 bar Prüfung, wäre das System bis 10 m Wasserdruck geeignet. Sofern keine Klassifizierung erfolgt und die Anforderung „dicht gegenüber 1 bar oder auch 2 bar“ bestehen bleibt, wären einige Systeme aufgrund der ermittelten Prüfergebnisse nicht geeignet.

2.8 AP E3: Untersuchungen zum Wassertransportmodell

2.8.1 AP E3: Probekörper für Wassertransportmodell und Porosität

Im Ergänzungspaket AP E3 sollte durch stichprobenartige Untersuchungen an Proben und anhand theoretischer Überlegen untersucht werden, ob das der Planung zugrundeliegende Feuchte-transportmodell des WU-Betons (gemäß DAfStb-WU-Richtlinie [R2]) auch auf Bauteile mit einer Applikation aus FBVS übertragen werden kann. Hierfür sollte der Feuchtegehalt, die Porosität und die Durchlässigkeit in der Betonrandschicht zum FBVS hin nach entsprechender Lagerung ermittelt werden. So sollte auch festgestellt werden, ob die Betonrandzone nahe dem FBVS dauerhaft wassergesättigt vorliegt bzw. ob eine merkliche Austrocknung oder Diffusion durch die FBV-Dichtschicht stattfindet. Weiterhin wurde untersucht, welchen Einfluss unterschiedliche FBVS-Produkte auf diese Parameter haben. Bild 2.8.2 zeigt die Vorgehensweise und die Ziele der Untersuchung im AP E3.

Es wurden zylindrische Proben vorbereitet, wie sie in Bild 2.8.1 dargestellt sind. In Anlehnung an die Mindestbauteildicke von WU-Sohlplatten wurden 250 mm hohe Betonzyylinder (150 mm Durchmesser) mit einem stirnseitig applizierten FBVS hergestellt. An der seitlichen Mantelfläche wurden sie mit Epoxidharz beschichtet, um so die eindimensionale Austrocknung über die Stirnflächen zu gewährleisten. Im Januar 2018 wurden 24 Zylinder mit fünf FBV-Systemen hergestellt und seitlich mit Epoxidharz beschichtet. Bis zur Öffnung und weiteren Untersuchung lagerten die Proben trocken im Laborklima bei rund 20 °C über einen Zeitraum von rund 12 Monaten.

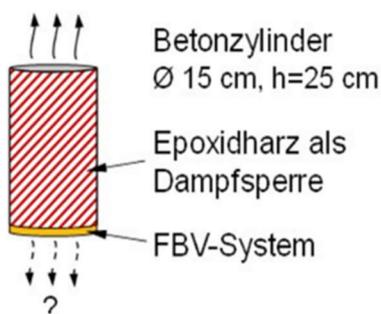


Bild 2.8.1. Probekörper zur Bestimmung des Feuchtehaushaltes in der Betonrandzone

Für die Prüfungen wurden fünf im Aufbau unterschiedliche FBVS ausgewählt. Von jedem FBVS-Typ wurden jeweils $n = 3$ Proben (Typ A1 – A5) hergestellt. Die verwendeten FBVS-Produkte sind in Tab. 2.8.1 aufgeführt. Diese FBVS wurden aufgrund ihrer Spannweite an s_D -Werten, Dicken und Verbundmechanismen ausgewählt. Die Probekörpermatrix ist in Tabelle 2.8.2 dargestellt.

Tabelle 2.8.1. FBVS in den Untersuchungen des Wassertransportmodells und Porosität

| Bezeichnung Proben mit FBVS | Verbundtyp | Material Dichtschicht | Wasserdampfdurchlässigkeit bzw. s_D -Wert [m] nach EN 1931 | Dicke der Dicht- schicht [mm] |
|-----------------------------------|------------|--------------------------|---|----------------------------------|
| Typ A1 | Vlies | PVC | k. A. | 2,0 |
| Typ A2 | Vlies | FPO | 69 | 1,2 |
| Typ A3 | Kleber | HDPE | 840 | 0,8 |
| Typ A4 | Vlies | Textil | 0,8 | 1,3 |
| Typ A5 | Vlies | HDPE | k. A. | 0,7 |

Um das Austrocknungsverhalten durch FBVS bestimmen bzw. die Betoneigenschaften am FBVS vergleichen zu können, wurden als Referenz- und Vergleichsproben vollständig unbeschichtete, vollständig beschichtete und einseitig unbeschichtete Proben hergestellt, wie nachfolgend beschrieben:

- Typ A: Betonzyylinder mit stirnseitig appliziertem FBVS und EP-abgedichteter Mantelfläche zur Messung des Feuchtestroms durch das FBV-System und der rau abgezogenen oberen Stirnfläche. → *Referenz für FBV-Applikation*
- Typ B: Zylinder mit allseitiger EP-Abdichtung aller Flächen zur Messung des Feuchtestroms durch die Abdichtung bzw. zum Nachweis der Funktion der Abdichtung. → *Funktionskontrolle EP-Beschichtung*
- Typ C: Zylinder mit abgedichteter Mantelfläche und einer abgedichteten Stirnfläche (anstatt FBVS), zur Messung des Masseverlusts an einer rau abgezogenen Stirnfläche. → *Verdunstung nur über Stirnseite möglich*
- Typ D: Zylinder ohne Abdichtung zur Bestimmung des insgesamt möglichen Masseverlusts → *maximal mögliche Verdunstungsmenge*



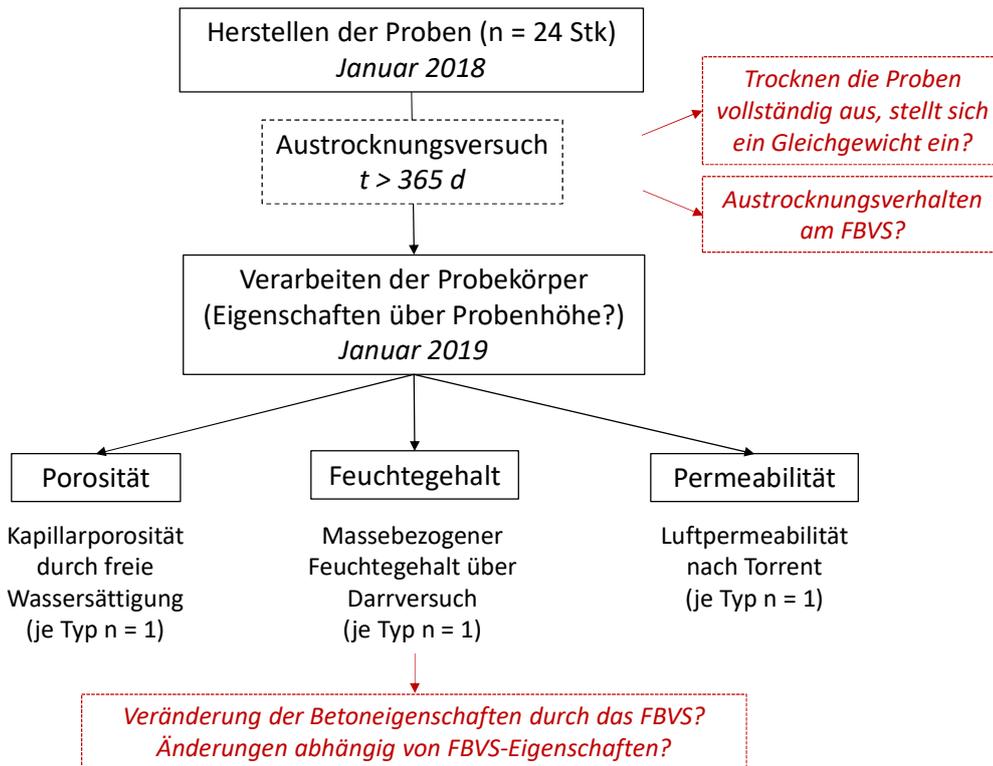


Bild 2.8.2. Vorgehensweise und Ziele der Untersuchungen zur Prüfung des Wassertransportmodells und der Porosität

Tabelle 2.8.2. Probekörpermatrix für die n = 24 zylindrischen Proben

| Proben | Austrocknungsversuch | Kapillarporosität | Feuchtegehalt | Luftpermeabilität |
|-------------|--------------------------------|-------------------|--|--|
| Typ A1 – A5 | jeweils n = 3 (alle Proben) | je Typ n = 1 | je Typ n = 1 (außer Typ B mit n = 2) | je Typ n = 1 (außer Typ B mit n = 0) |
| Typ B | | | | |
| Typ C | | | | |
| Typ D | | | | |

Auch von jeder Kontroll- bzw. Referenzprobe ohne FBVS wurden n = 3 Proben angefertigt. Insgesamt wurden bis Ende Januar 2018 inkl. der Referenzproben 24 Probekörper hergestellt, beschichtet und in die Dauerlagerung gegeben.

Die Beschichtung der Zylinder erfolgte in mehreren Arbeitsschritten. Dabei wurden mehrere Lagen (diffusionsdichtes) Epoxidharz aufgebracht, wobei Eckbereiche zum FBVS sorgfältig modelliert worden sind. Auf einen hohen Haftverbund zum Beton hin wurde besonders geachtet. Zwischen dem Entfernen der Schalung bis zum Aushärten der Beschichtung verging eine Zeitspanne von etwa zwölf Stunden. Dieser Zeitpunkt am Ende der Aushärtung wurde als Nullzeitpunkt der Messung angenommen.

Nach der Herstellung wurden die Proben im trockenen Innenraum über einen Zeitraum von zwölf Monaten gelagert und die Massenverluste der Zylinder infolge Austrocknung in regelmäßigen

Intervallen durch Wägung ermittelt. Die Klimadaten der Lagerung sind in Bild 2.8.3 dargestellt. Die Temperatur bewegte sich zwischen $T = 20 - 27\text{ °C}$, die Luftfeuchte zwischen rd. $20 - 60\text{ %}$ rel. LF.

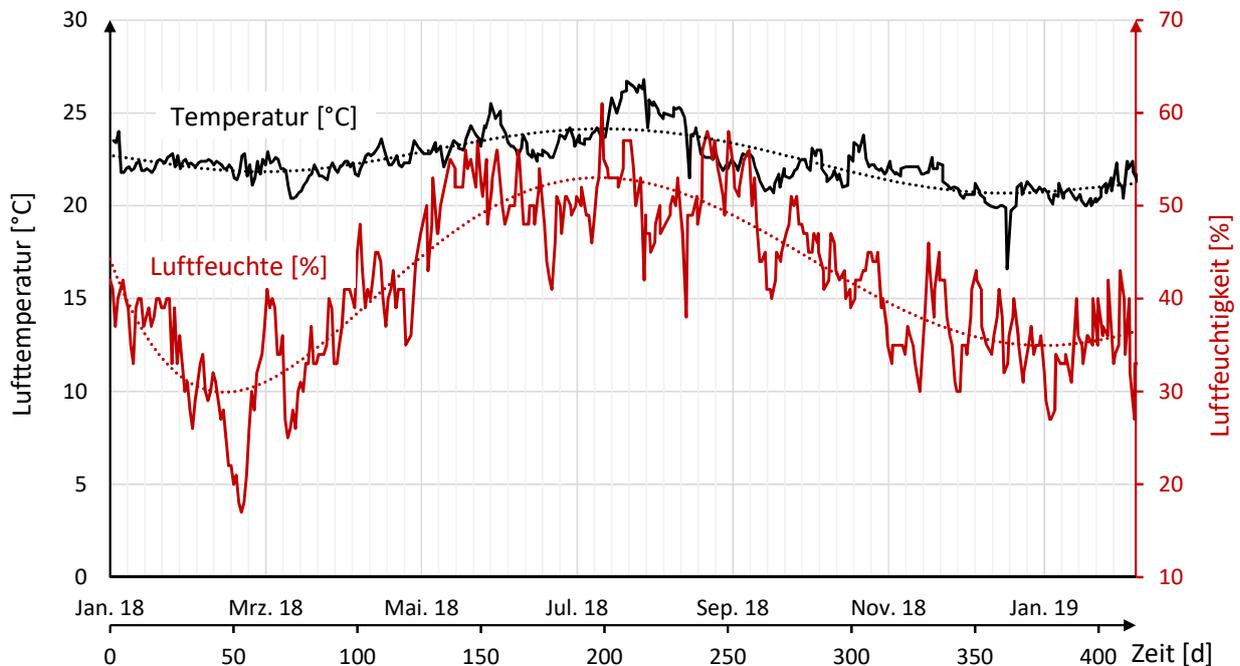


Bild 2.8.3. Klimadaten der Probenlagerung im trockenen Innenraum.

Die Probekörper sollen folgende Untersuchungen zu den nachfolgend aufgeführten Einflussgrößen an der FBVS-seitigen Betonrandzone ermöglichen:

- Über Langzeitbetrachtungen soll festgestellt werden, wie sich der Feuchtehaushalt der FBVS-nahen Betonrandzone verändert und soll somit Aufschluss über die Sperrwirkung der FBVS gegenüber dem Austrocknen des Betons geben. Bei einer weitgehend wasserdampfdichten Wirkung der FBVS-Dichtungsschicht würden die Kapillarporen der Betonrandzone quasi-dauerhaft wassergesättigt vorliegen und diese Zone einen vergleichbaren Zustand wie der Kernbereich des Betons aufweisen. Damit wäre durch die Wassersättigung der Poren die Selbstabdichtung des Zementsteins aktiviert. Der Anteil des Überschusswassers soll indirekt über die Verdunstungsmenge, den Feuchtegehalt und über die Porosität nachgewiesen werden.
- Es ist zu vermuten, dass ein weitgehend wasserdampfdichtes FBVS die Nacherhärtung der Betonrandzone verbessert bzw. die Kapillarporosität und Permeabilität verringert. An rund 12 Monate alten Probekörpern soll dies durch Bestimmung der Porosität und Luftpermeabilität nach Torrent geprüft werden.

2.8.2 Ergebnisse der Austrocknungsversuche des AP E3

Bild 2.8.4 zeigt die Messergebnisse des Austrocknungsverhaltens der Referenzprobekörper über die Lagerungsdauer von mind. zwölf Monaten. Dargestellt ist der prozentuale Masseverlust ($\Delta m/m_0$) über die Wurzel der Zeit. Die beschichteten Zylinder wiesen bis zum Wirksamwerden

der EP-Beschichtung bereits eine gewisse Wasserabgabe auf, die über die Beschichtungsdauer ($t \approx 12$ h) und der Wasserabgabe der unbeschichteten Zylinder in dieser Zeit rückgerechnet wurde. So ergab sich rechnerisch eine anfängliche Wasserabgabe über zwölf Stunden von rd. 0,9 M.-%, die folgend als Nullpunkt der Wasserabgabe der beschichteten Zylinder festgelegt wurde.

Die Zylinder mit freien Betonflächen des Typs C und D zeigten ein typisches Austrocknungsverhalten von Beton. Die Probekörper ohne Beschichtung erreichten nach rund 200 Tagen die Massenkonstanz mit einem plausibel nachvollziehbaren Masseverlust von rd. 3,1 M.-%.

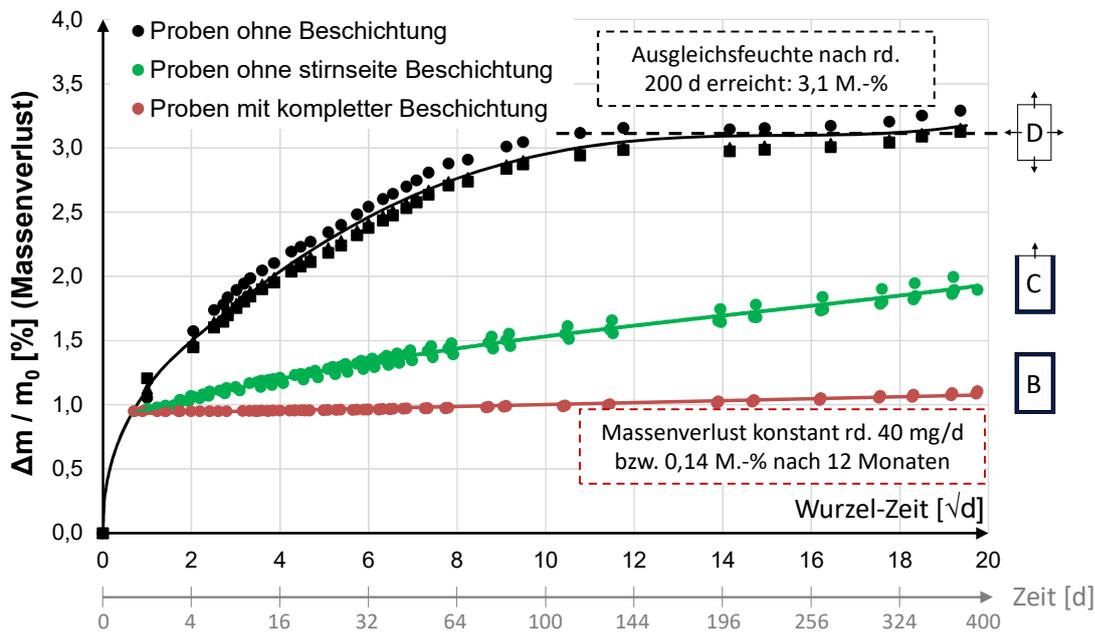
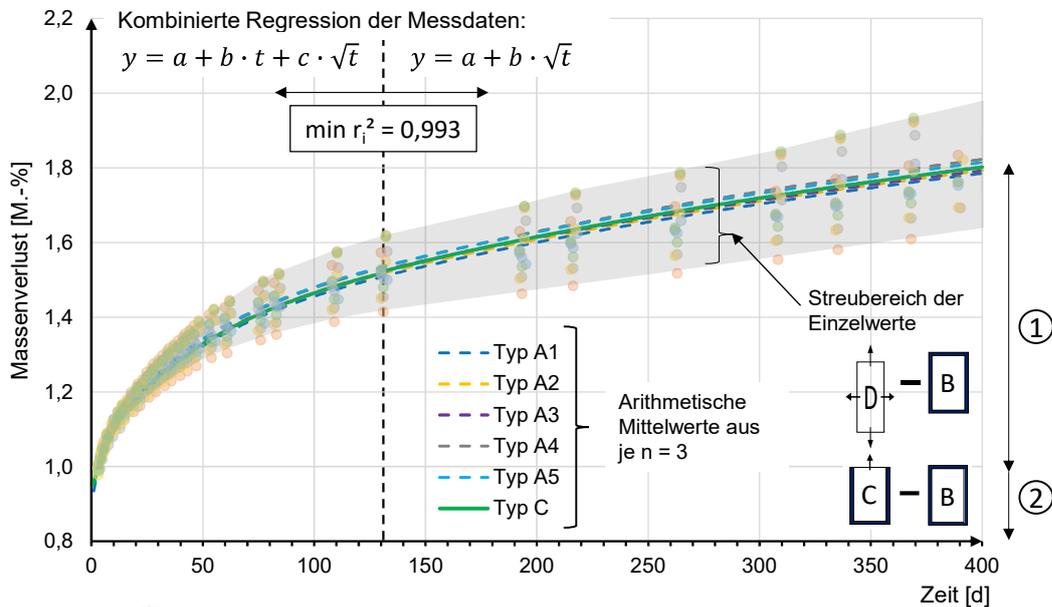


Bild 2.8.4. Wasserabgabe der Referenzprobekörper

Bei den Zylindern mit allseitiger (kompletter) Beschichtung (Typ B) zeigte sich ein sehr geringer linearer Masseverlust über die Zeit mit im Mittel rund 0,3 g Masseverlust je Woche bzw. 0,003 M. % / Woche. Dieser Masseverlust ist im Verhältnis zu den Werten der Typen A, C und D vernachlässigbar klein. Die Beschichtung mit Epoxidharz kann für diesen Versuchsaufbau daher als ausreichend dampfdicht und wirksam betrachtet werden.



- ① Wasserabgabe der luftberührten Oberseite während der Lagerung
 ② Rechnerische Wasserabgabe vor Beschichtungsarbeiten ($\approx 0,9$ M.-%)

Bild 2.8.5. Feuchteverlust der Probekörper mit FBVS und des Referenzprobekörpers mit einseitiger EP-Beschichtung. Der Masseverlust bis zum Erhärten der EP-Beschichtung ($\sim 0,9$ M.-%) wurde als Ausgangspunkt der Abszisse gewählt.

Alle weiteren Probekörper mit applizierten FBVS wurden im Bild 2.8.5 im Austrocknungsverhalten untereinander sowie mit dem Referenzkörper Typ C verglichen. Dabei wurde der Masseverlust über die Mantelflächen (Typ B) bereits berücksichtigt und bereinigt.

Alle Probekörper mit appliziertem FBV-System zeigten ein Austrocknungsverhalten, welches im Mittel annähernd dem des Typs C mit stirnseitiger EP-Beschichtung entsprach. Der Masseverlust über die unbeschichtete Oberseite der Zylinder überwog deutlich. Der Feuchtetransport durch die FBV-Systeme ist nach Auswertung mit der dargestellten kombinierten Regressionsrechnung als sehr klein zu bewerten. Ein signifikanter Unterschied zur dichten EP-Beschichtung besteht nicht – die Wasserabgabe durch die fünf untersuchten FBVS ist vernachlässigbar klein. Auf Grundlage der dargestellten Regression ergibt sich durch ein FBVS mit sehr geringem s_D -Wert ($s_D < 1$ m) rechnerisch ein maximaler Feuchtstrom von $0,14$ l/m² nach einer Lagerungsdauer von rund zwölf Monaten. Im Vergleich lag beim System A3 ($s_D = 840$ m), nach der dargestellten Regression ein rechnerischer Feuchtstrom von $0,01$ l/m² nach 12 Monaten Lagerungsdauer vor. Die Unterschiede zwischen den Feuchteabgaben der verschiedenen FBVS-Produkte sind gering, können aber vermutlich mit den unterschiedlichen s_D -Werten der FBVS begründet werden.

Zusammenfassend war selbst bei warm-trockenen Lagerungsbedingungen und einer Austrocknungsdauer von zwölf Monaten keine signifikante Austrocknung durch ein FBVS zu verzeichnen. Die Eigenschaften der Dichtschicht bzw. die Höhe der wasserdampfäquivalenten Luftschichtdicke haben offenbar sehr geringen Einfluss auf die Austrocknung durch die FBVS. Gegenüber der Austrocknung über die oberseitig offene Stirnseite scheint sie nur von untergeordneter Rolle zu sein.

Die folgenden Betrachtungen sollen zeigen, ob bzw. wie schnell die Proben mit FBVS austrocknen. Damit soll die Frage diskutiert werden, ob das klassische WU-Arbeitsmodell bei der Verwendung von FBVS dauerhaft gültig bleibt.

Zuerst soll dazu die Wasserabgabe der zylindrischen Proben betrachtet werden. Wird die rechnerische Wasserabgabe vor dem Wirksamwerden der EP-Beschichtung außer Acht gelassen, (rd. 0,9 M.-%) ergibt sich eine Wasserabgabe über die luftberührte Stirnseite innerhalb der Lagerungsdauer von rund 0,95 M.-%. Bezogen auf das Ausgangsgewicht der Proben ($M \approx 10,6 \text{ kg}$) und der stirnseitigen Austrocknungsfläche eines 150er Zylinders ($A = 0,01767 \text{ m}^2$) ergibt sich damit eine Feuchteabgabe von im Mittel $5,7 \text{ l/m}^2$ nach einer Lagerungsdauer von 12 Monaten. Dieser Wert stimmt annähernd mit den ermittelten Eigenfeuchteabgaben der Untersuchungen von *Rucker und Beddoe* [4] überein (im Vergleich rd. $5,1 \text{ l/m}^2$ nach 400 d). Unter Berücksichtigung von verschiedenen Ausgangsstoffen, verschiedenen Vorgehensweisen bei der Herstellung und Lagerungsbedingungen kann von vergleichbaren Werten gesprochen werden und zeigt die Plausibilität der vorliegenden Daten der Austrocknungsversuche. Die Regression der Wasserabgabe des Typs C über die luftberührte Stirnseite ist in Bild 2.8.6 dargestellt und soll im Folgenden eine Abschätzung des gesamten Trocknungsverlaufs ermöglichen. Im Vergleich betrug die Feuchteabgabe durch die FBVS-Seite nach 12 Monaten Lagerungsdauer im trockenen Innenraum maximal $0,14 \text{ l/m}^2$.

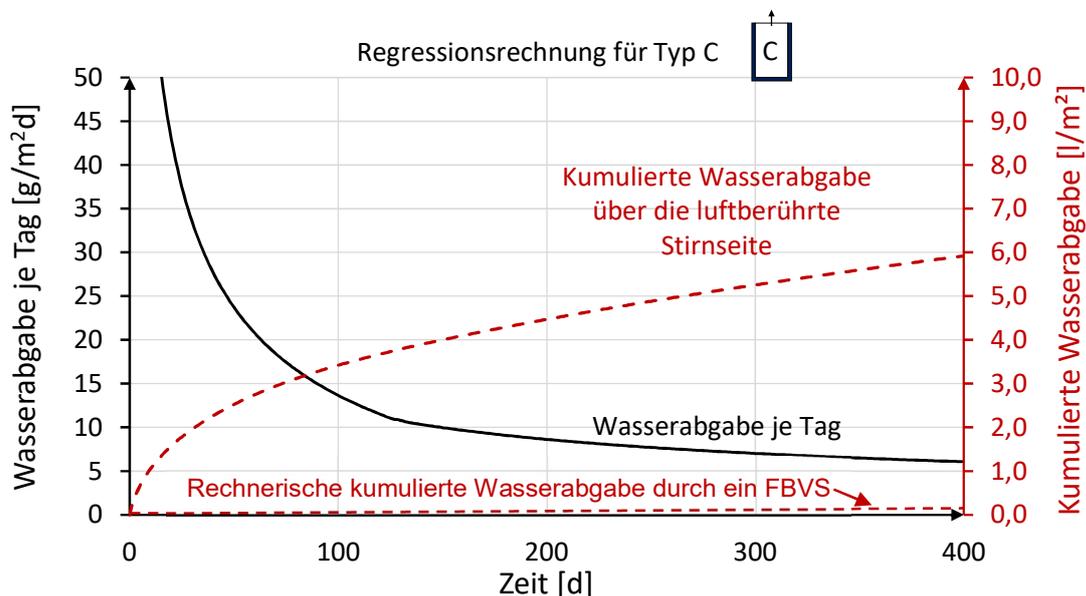


Bild 2.8.6. Wasserabgabe des Probekörpers Typ C über die luftberührte Stirnseite

Um die Austrocknung der untersuchten Proben über lange Zeiträume sowie das Austrocknungsende einschätzen zu können, wurde beispielhaft in Bild 2.8.7 der gemessene Austrocknungsverlauf vereinfacht mit einem \sqrt{t} – Ansatz extrapoliert. Das Austrocknungsende wurde mit der vollständigen Abgabe des Wasseranteils der Kapillarporen gleichgesetzt. Da bisher nicht bekannt ist, ob die Proben zur Luftseite vollständig austrocknen, oder wie im klassischen WU-Arbeitsmodell

die Austrocknungstiefe auf etwa 8 cm begrenzt ist, wurden beide Szenarien im Bild 2.8.7 betrachtet.

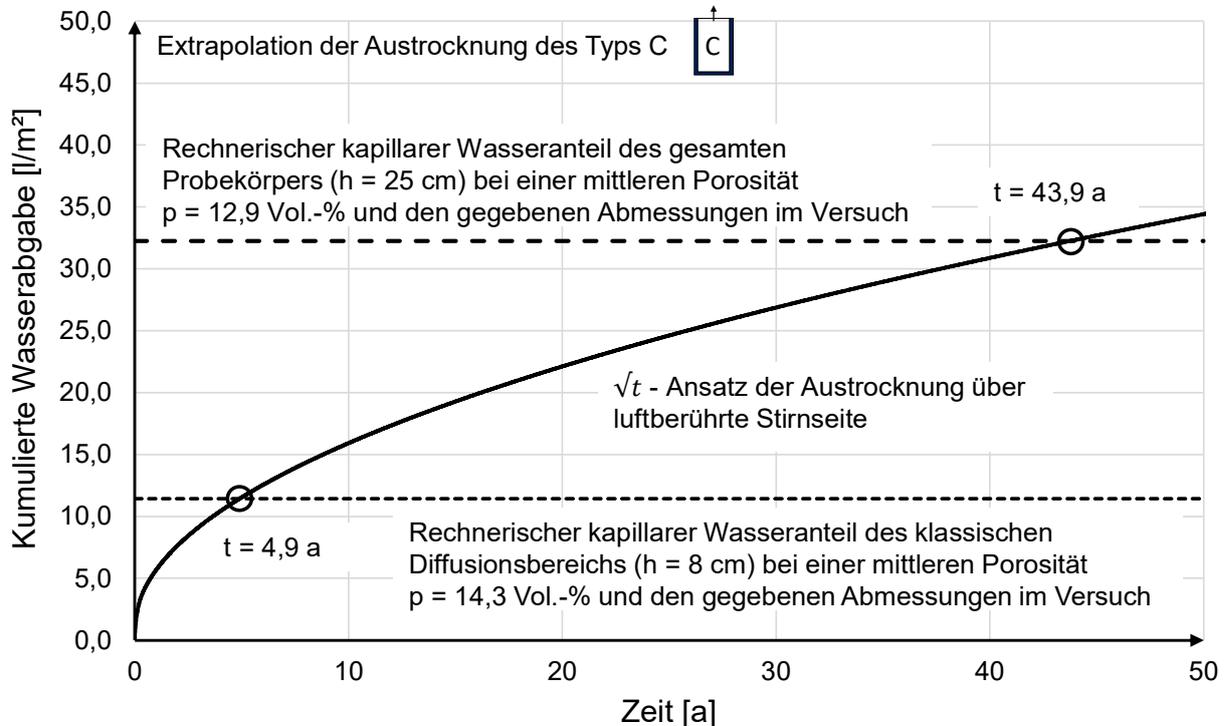


Bild 2.8.7. Vereinfachte Extrapolation der Austrocknung des Typs C

Der „verdunstbare“ Wasseranteil der Kapillarporen wurde über die offene Kapillarporosität rückgerechnet, die im Kapitel 2.8.4 auch für die Probe Typ C bestimmt wurde. Für den Fall der vollständigen Austrocknung wurde die mittlere Kapillarporosität über den gesamten Probekörper herangezogen, die bei $p = 12,9 \text{ Vol.-%}$ lag. Bei einem Gesamtvolumen der Probe von $V_{\text{ges}} = 4,418 \text{ dm}^3$ ergibt sich so ein Gesamtwassergehalt der Kapillarporen von $w = 0,570 \text{ l}$. Wird dies auf die Austrocknungsfläche der luftberührten Oberseite bezogen ($A = 0,01767 \text{ m}^2$), beträgt die maximal mögliche Wasserabgabe $32,3 \text{ l/m}^2$. Durch den \sqrt{t} – Ansatz wäre diese Wasserabgabe nach rund 43,9 Jahren erreicht.

Stellt sich keine vollständige Austrocknung ein, sondern stoppt die Austrocknungstiefe bei rund 8 cm, ergibt der gleiche Rechenansatz mit einer mittleren Kapillarporosität des oberen Randbereichs von $p = 14,3 \text{ Vol.-%}$ eine mögliche Wasserabgabe von $11,4 \text{ l/m}^2$. Durch den \sqrt{t} – Ansatz wäre diese Wasserabgabe nach rund 4,9 Jahren erreicht.

Diese Beispielrechnung soll zum einen zeigen, dass auf Grundlage der einjährigen Lagerungsdauer keine sicheren Aussagen zum Austrocknungsende getroffen werden können. Bisher schreitet die Austrocknung weiter voran und wird unter Annahme einer Austrocknung der oberen 8 cm (klassischer Diffusionsbereich) auch erst nach rund 4,9 Jahren abgeschlossen sein. Bei dieser Aussage wird der austrocknende Wassergehalt vereinfachend mit dem Kapillarporenanteil gleichgesetzt und dadurch impliziert, dass der Diffusionsbereich einer WU-Betonkonstruktion vollständig mit luftgefüllten Kapillarporen vorliegt und sich innerhalb des Austrocknungsbereichs kein Feuchtegradient einstellt.

Zum anderen soll die Beispielrechnung zeigen, dass eine vollständige Austrocknung selbst bei warm-trockenen Verhältnissen eines Innenraums sehr lange Zeiträume in Anspruch nimmt. Bei einer Probenabmessung von $h = 25 \text{ cm}$ wäre das Austrocknungsende rechnerisch erst nach über 40 Jahren erreicht und kommt damit nahe an eine erwartete Lebensdauer eines Bauwerks. Die Zusammenhänge der Austrocknung wurden hier vereinfacht dargestellt, verdeutlichen aber die sehr langwierigen Austrocknungsprozesse bei den Dimensionen gängiger WU-Betonbauteile.

Zur weiterführenden Einschätzung des Austrocknungsendes sollen im Folgenden einige wesentliche Zusammenhänge des Wärme- und Feuchtetransports dargestellt werden.

Für baupraktische Belange geht der Feuchtetransport in porösen mineralischen Baustoffen vor allem auf die Dampfdiffusion, Oberflächendiffusion, sowie bei anstehendem Wasser zusätzlich auf den Kapillartransport und die Permeation (Druckwasser) zurück. Alle in der Praxis auftretenden Feuchtetransportmechanismen wurden in Bild 2.8.8 zusammengestellt [7].

Der Feuchtetransport in mineralischen Baustoffen ist dabei von vielen unterschiedlichen Einflussgrößen aus den Baustoffeigenschaften und den Umgebungsbedingungen abhängig. So sind beispielsweise die Porengrößenverteilung, der anfängliche Wassergehalt und die anstehenden klimatischen Bedingungen der Umgebung zu beachten. Der Feuchtetransport in zementgebunden Bauteilen wird außerdem vom Selbstabdichtungseffekt beeinflusst, der durch die physikalische Einlagerung von Wassermolekülen in Gelporen den Kapillartransport verringert [8]. Der Feuchtetransport durch Betonbauteile ist dementsprechend keine triviale Fragestellung und wird im Folgenden für Betonbauteile mit FBVS lediglich diskutiert.

| | Transportmechanismus | Transportursache, -potential |
|------------------|---------------------------------------|---|
| Wärmetransport | Wärmeleitung | Temperatur |
| | Wärmestrahlung | Temperatur in der 4. Potenz |
| | Luftströmung | Gesamtdruck, Dichteunterschiede |
| | Enthalpieströme durch Feuchtebewegung | Dampfdiffusion mit Phasenwechsel und Flüssigtransportströme im Temperaturfeld |
| Dampftransport | Gasdiffusion | Dampfdruck (Temperatur, Gesamtdruck) |
| | Molekulartransport (Effusion) | Dampfdruck |
| | Lösungsdiffusion | Dampfdruck |
| | Konvektion | Gesamtdruckgefälle |
| Flüssigtransport | Kapillarleitung | Kapillarer Unterdruck |
| | Oberflächendiffusion | Relative Luftfeuchte |
| | Sickerströmung | Gravitation |
| | Hydraulische Strömung | Gesamtdruckunterschiede |
| | Elektrokinese | Elektrische Felder |
| | Osmose | Ionenkonzentrationen |

Bild 2.8.8. In der Praxis vorkommende Wärme- und Feuchtetransportmechanismen [7]

Der Dampf- wie Flüssigkeitstransport in porösen mineralischen Stoffen geht unter eindimensionalen Bedingungen hauptsächlich auf die Effekte der Dampfdiffusion (bzw. Effusion und Lösungsdiffusion), der Oberflächendiffusion, der Kapillarleitung und auf Permeation zurück.

Transportvorgänge aus der Dampfdiffusion sind dabei durch Dampfdruckgradienten der umgebenden Luft begründet und bewirken in Wandbauteilen beispielsweise eine Dampfdiffusion in Wintermonaten von innen nach außen. Sie kann entsprechend von Konzentrationsunterschieden analog zum 1. Fick'schen Gesetz beschrieben werden und tritt vor allem in weitgehend trockenen Bauteilen auf. Da die Dampfdiffusion in Beton nur in größeren Porenradien mit einer Dampfdiffusion in Luft vergleichbar ist, treten weiterhin die Mechanismen der Effusion und Lösungsdiffusion entsprechend der vorliegenden Porenradienverteilung auf. Diese Mechanismen überlagern sich und werden entsprechend des sich einstellenden „Mischtransports“ durch den experimentell bestimmten Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor μ berücksichtigt.

Bei steigender Bauteilfeuchte tritt der Transportvorgang der Oberflächendiffusion auf. Je nach Wasserdampfpartialdruck der Luft steigt die Menge des an der Porenwandoberfläche gebundenen Wassers. Nach der BET-Theorie liegt bis rund 25 % rel. LF eine monomolekulare Wassermolekülschicht an den Porenwandungen an. Bei steigenden Luftfeuchten bilden sich dann multimolekulare Schichten aus. Mit zunehmender Sorbatschichtdicke verringern sich die Wechselwirkungskräfte des Wassers zur Porenwandung und das Wasser wird beweglicher. Entsprechend eines Feuchtegradienten bewegt sich das an der Porenwandoberfläche gebundene bewegliche Wasser zu Bereichen geringerer Konzentration. Die Oberflächendiffusion wird in der Praxis ebenfalls analog zum 1. Fick'schen Gesetz und in Abhängigkeit zu einem Oberflächendiffusionskoeffizienten berücksichtigt. Die zunehmende Sorbatschichtdicke ist ebenfalls Auslöser für die sog. Kapillarkondensation, die verstärkt ab einer Luftfeuchte von rel. LF > 50 % auftritt. In unterschiedlich großen Poren bildet sich ein Flüssigkeitsfilm an den Wandungen. Durch die Krümmung des Flüssigkeitsfilms entsteht je nach dem Durchmesser ein mehr oder weniger stark gekrümmter Meniskus, der zu einer Erniedrigung des Sättigungsdampfdruckes führt. Wird der Sättigungsdampfdruck infolge zunehmender Luftfeuchte überschritten, füllt sich die Pore. Dies tritt bis zu einem Porendurchmesser von rund 0,1 μm auf. Ab dieser Porengröße ist die Krümmung des Meniskus zu gering um die Kapillarkondensation auszulösen. Die vollständige Füllung tritt dann erst durch eine Wasserzufuhr von außen auf.

Im teilgesättigten Porenraum kann ein Kapillartransport entstehen. Durch die Oberflächenspannung des Wassers übersteigt die Adhäsion zur Porenwandung die Kohäsion im Wasser und es bildet sich eine konkav gekrümmte Wasseroberfläche (Flüssigkeitsmeniskus), durch die ein Kapillarsug entsteht. Dabei sind die Transportvorgänge wiederum abhängig von dem Durchmesser der Kapillarporen. Große Kapillarporen bestimmen die Transportgeschwindigkeit bei Kontakt mit Wasser, kleine Kapillarporen können nach Beendigung einer Wasserzufuhr das Wasser im Porengefüge weiter transportieren. Anstehender Wasserdruck führt bei einem vollständig wassergesättigten Porengefüge zusätzlich zu einem zusätzlichen Kapillardruck. Bei drückendem Grundwasser ist dadurch beispielsweise eine Steigerung der Wassereindringtiefe zu beobachten.

In zementgebundenen Baustoffen muss neben den üblichen Transportmechanismen noch die Selbstabdichtung des Zementsteins beachtet werden. Diese äußert sich durch eine kapillare

Wasseraufnahme, die langsamer als das Wurzel-t-Gesetz erfolgt und ist im Grundsatz auf das feinporige Gefüge von zementgebundenen Baustoffen zurückzuführen. Nach *Rucker-Gramm* [8] wird im Prozess der Selbstabdichtung in den feinporigen Gelporen ‚freies‘ Kapillarwasser physikalisch aufgenommen und gebunden (als sog. „strukturiertes Wasser“). Dieser Wasseranteil steht dem Wassertransport durch die vergleichsweise hohen Bindungskräfte in den Gelporen nicht mehr zur Verfügung. Durch die Wassereinlagerung werden Spaltkräfte zwischen den Gelporen hervorgerufen, die einerseits eine Volumenzunahme der Gelporen und andererseits eine Verringerung des Kapillarporenvolumens zur Folge haben, wodurch folglich der Kapillartransport verringert wird. Dieser Effekt ist wiederum Abhängig von der Porenverteilung und dem Ausgangsfeuchtegehalt. Es handelt sich um einen reversiblen Prozess.

Durch den Effekt der Selbstabdichtung ist die Wasserundurchlässigkeit von WU-Betonkonstruktionen im Rahmen des WU-Arbeitsmodells der WU-Richtlinie erklärbar. Die Selbstabdichtung begrenzt die Tiefe der kapillaren Wasseraufnahme an der wasserzugewandten Seite. Der Wasserdurchtritt wird auf Dauer begrenzt, anders als bei anderen porösen mineralischen Baustoffen. Solange der Austrocknungsbereich des Betons sich nicht mit dem Kapillarbereich überschneidet, ist die Feuchteabgabe in den Innenraum vernachlässigbar klein.

Wird der Salztransport außer Acht gelassen, kann der gekoppelte Wärme- und Feuchtetransport in zementgebundenen Baustoffen nach [7], [8] durch folgende, nicht geschlossen lösbare Differentialgleichungen beschrieben werden:

Wärmetransport [7], [8]:

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{\partial p_D}{\partial x} \right)$$

Speicherung = Wärmeleitung + Dampfenthalpiestrom

Feuchtehaushalt [8]:

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta_a}{\mu} \cdot \frac{\partial p_D}{\partial x} \right) - \frac{\partial w_u}{\partial t}$$

Speicherung = Flüssigtransport + Wasserdampfdiffusion – umstrukturiertes Wasser (Gelporen)

| | | |
|------|----------------|--|
| mit: | H | Enthalpie [J/m ³] |
| | ϑ | Temperatur [°C] |
| | λ | Wärmeleitfähigkeit [W/m·K] |
| | h _v | Verdunstungsenthalpie von Wasser [J/kg] |
| | δ | Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft [kg/(m·s·Pa)] |
| | μ | Dampfdiffusionswiderstandszahl [-] |
| | p _D | Partialdampfdruck [Pa] |
| | w | lokaler Wassergehalt [kg/m ³] |

| | |
|-----------|--|
| φ | relative Luftfeuchte [-] |
| D_w | Transportkoeffizient des Flüssigtransportes [m^2/s] |
| w_u | umstrukturiertes Wasser [kg/m^3] (in die Gelporen umgelagertes Wasser) |

Zusammenfassend ist die Änderung des Feuchtehaushalts also abhängig vom Porengefüge und dem Ausgangszustand des Baustoffs ($\frac{\partial w}{\partial \varphi}$, μ , D_w , w , w_u), der Dicke des Bauteils (x), dem anstehenden Klima (ϑ , φ , p_D) und der Zeit.

Da im Rahmen des Forschungsvorhabens einige dieser Kenngrößen nicht ermittelt wurden, ist eine numerische Betrachtung des Austrocknungsverhaltens hier nicht möglich. Vielmehr wurde der sich einstellende Feuchtehaushalt am FBVS und die Folgen daraus diskutiert.

Werden die Transportmechanismen für den Fall einer WU-Betonkonstruktion mit FBVS betrachtet, so scheinen die Mechanismen der Permeation und Kapillarleitung (aus anstehendem Wasser) außer Kraft gesetzt. Mit einer Feuchteaufnahme aus z. B. anstehendem Grundwasser ist bei fehlstellenfreiem Einbau des FBVS nicht zu rechnen. Die Eigenfeuchteabgabe zum Innenraum hin ist dagegen unabhängig vom anstehenden Grundwasser und erfolgt dennoch bzw. unabhängig von der außen anstehenden Feuchtebedingung. Die unabhängige Eigenfeuchteabgabe des Diffusionsbereichs beschreiben bereits die Untersuchungen von [3], [4] und wurde auch im Positionspapier des DAfStb „Feuchtetransport durch WU-Konstruktionen“ in Bezug auf die Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“ dargestellt [5].

Ob die Eigenfeuchteabgabe bei Anordnung eines FBVS allerdings wie bei gängigen WU-Betonkonstruktion nur bis in eine Tiefe von rund 8 cm an der luftzugewandten Bauteilseite erfolgt, oder ob die WU-Betonkonstruktion mit FBVS vollständig austrocknen kann, lassen die bisherigen Daten nicht zweifelsfrei erkennen. Daher wird im Folgenden auf der ungünstigen Seite liegend davon ausgegangen, dass unter den richtigen Randbedingungen eine WU-Betonkonstruktion mit appliziertem FBVS nach sehr langen Zeiträumen mit luftgefüllten Kapillarporen vorliegen kann. Zur eindeutigen Formulierung wären weitere Untersuchungen nötig, z. B. auf numerischer Basis mit den oben vorgestellten Differentialgleichungen.

Entsprechend den Grundlagen des Feuchtetransports ist es vorstellbar, dass zumindest der „kapillaraktive“ Wasseranteil an den Innenraum abgegeben werden kann, d. h. das frei in den Kapillaren vorliegende Wasser. Durch die Mechanismen der Dampfdiffusion wie Oberflächendiffusion ist ein Feuchtetransport an den Innenraum denkbar. Durch die Wassersättigung der Poren bei der Herstellung des Betons liegen während der Austrocknung ausreichend hohe Dampfdruckgradienten zum Innenraum hin vor, bzw. Gradienten des Wassergehalts, die die Transportmechanismen ermöglichen. Das in den Gelporen eingelagerte „strukturierte“ Wasser wird durch die hohen Bindungskräfte vermutlich auch bei langen Austrocknungsprozessen nicht verdunsten. Bei einem Einsatz eines FBVS erscheint es daher möglich, dass das Kapillarporengefüge nach entsprechend langen Zeiträumen luftgefüllt vorliegt.

Die dafür nötigen Austrocknungsdauern wären abhängig von den vorliegenden Bedingungen für den Feuchtetransport. Beispielsweise seien die Abhängigkeit vom Temperatur- und Feuchtegradient im Beton genannt, die sich durch die umgebenden Klimata einstellen. Weiterhin sind die Diffusionswiderstände bzw. Transportkoeffizienten durch die Porenradialverteilung des Baustoffs zu beachten. Ebenso sind die Dicke der Konstruktion und der anfängliche Feuchtegehalt entscheidend. Diese Faktoren beeinflussen die Feuchteabgabe und würden bestimmen, ob bzw. wie schnell die Konstruktion austrocknen kann. In jedem Fall wären lange Austrocknungsdauern zu erwarten, die bis zum Erreichen einer Ausgleichsfeuchte die erwartete Lebensdauer des Bauwerks womöglich auch überschreiten können.

Wird der Fall einer typischen Wandkonstruktion aus WU-Beton mit FBVS, bei gleichzeitig hochwertig genutzten Kellerräumen betrachtet, erscheint die Austrocknung des Kapillarporengefüges über eine Lebensdauer des Bauwerks von 50 Jahren eher wahrscheinlich. Bei Bauteilabmessungen von $d < 30$ cm, einem w/z-Wert von 0,55 und entsprechendem Porengefüge, einem warm-trockenen Innenraumklima und einer außenliegenden Perimeterdämmung sprechen die Randbedingungen eher für eine Austrocknung als bei anderen Wandaufbauten. Wird keine Dämmung zum Erdreich hin angeordnet, ist am FBVS mit einer geringeren Bauteiltemperatur zu rechnen, die etwa der Temperatur des Erdbodens entspricht (im Mittel rd. 12 °C). Die geringere Temperatur (ohne XPS) erniedrigt den Sättigungsdampfdruck im Gefüge und be-/verhindert den Austrocknungsprozess. Bei höheren Bauteildicken ist entsprechend des höheren absoluten Wassergehalts auch mit deutlich längeren Austrocknungsdauern zu rechnen.

Demzufolge ist damit zu rechnen, dass die Austrocknung entweder sehr lange Zeiträume in Anspruch nimmt, die die erwartete Lebensdauer eines Bauwerks auch überschreiten können, oder je nach Randbedingungen nicht vollständig erfolgt. Bis die Austrocknungsfront das FBVS erreicht hat kann vermutet werden, dass das klassische WU-Arbeitsmodell zunächst erhalten bleibt, da auch die Kapillarporen wassergefüllt vorliegen.

Die Austrocknung des Kapillarporengefüges würde gleichzeitig voraussetzen, dass das applizierte FBVS fehlerfrei bzw. wasserundurchlässig vorliegt. Andernfalls kann Wasser zur WU-Betonkonstruktion herantreten und sich das klassische WU-Arbeitsmodell ausbilden. Das Austrocknen der Betonkonstruktion bedingt also eine wasserseitig dichte Abdichtung. Eine (eventuelle) vollständige Austrocknung der Betonkonstruktion ist daher nur von geringer Relevanz. Tritt unter den genannten Umständen eine Austrocknung nach vielen Jahren ein, wird die Abdichtung ohnehin vollständig durch das FBVS gewährleistet.

An Stellen mit Beschädigungen in der Dichtschicht, die bereits zum Zeitpunkt der Verlegung entstehen, kann das Wasser weiterhin dauerhaft bis zur WU-Betonkonstruktion vordringen, wodurch das klassische WU-Arbeitsmodell erhalten bleibt. Nur im Falle von sehr späten Beschädigungen des FBVS, und gleichzeitig anstehendem Wasserdruck, ist eine Kombination aus anstehendem Wasser – Fehlstelle im FBVS – und luftgefüllten Kapillarporen denkbar, die evtl. zu temporären Wasserbewegungen führen kann.

Bei einer WU-Betonkonstruktion mit appliziertem FBVS sind unter bestimmten Randbedingungen und langen Austrocknungsdauern demzufolge zwei Feuchtezustände denkbar, die in Bild 2.8.9 skizziert sind.

- a) Bei einem planmäßig dichten FBVS ohne Fehlstellen können die Kapillarporen der Betonkonstruktion unter bestimmten Randbedingungen womöglich über sehr lange Zeiträume vollständig zum Innenraum hin austrocknen. Die Austrocknung setzt voraus, dass die Abdichtungsfunktion vollständig durch das FBVS gewährleistet wird. Es liegt daher weiterhin eine vollständig wasserundurchlässige Konstruktion vor.
- b) Bei Fehlstellen im FBVS, die bei der Verlegung oder im frühen Nutzungszeitraum entstehen, bleibt das klassische WU-Arbeitsmodell in diesem lokalen Bereich erhalten.

Zusammenfassend bleibt eine WU-Betonkonstruktion mit FBVS vollständig wasserundurchlässig, unabhängig von einem möglichen Vorgang der Austrocknung. Falls eine Austrocknung der Konstruktion eintritt, wird die Abdichtung zwangsläufig durch das FBVS gewährleistet. Sind im FBVS Fehlstellen vorhanden, gilt das klassische WU-Arbeitsmodell.

Es sei angemerkt, dass ein FBVS dennoch planmäßig vollständig dicht auszubilden ist (inkl. aller Nahtstellen, Übergängen und Durchdringungen). Es bleibt ein Restrisiko bestehen, dass eine Fehlstelle im FBVS mit einem wasserführenden Trennriss in der Konstruktion zusammentrifft.

Im Anschluss werden Untersuchungen zur Prüfung der Porosität, Permeabilität und Feuchtegehalt vorgestellt, welche die Festbetoneigenschaften im FBVS-seitigen Randbeton ermitteln sollten.

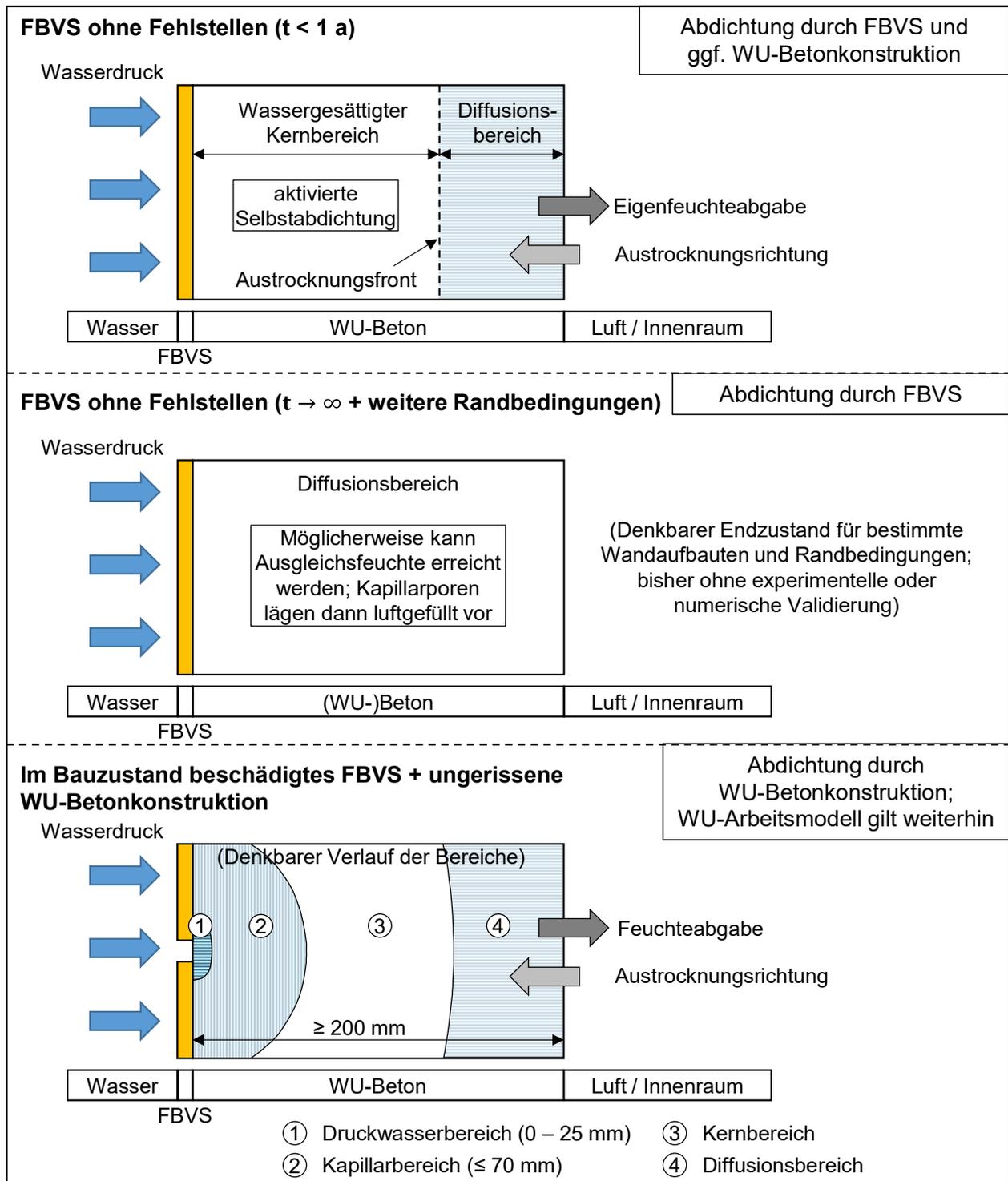


Bild 2.8.9. Feuchtezustände in einer WU-Betonkonstruktion mit appliziertem FBVS nach unterschiedlichen Austrocknungsdauern bzw. bei Beschädigungen im FBVS

2.8.3 Orientierende Vorversuche zur Messung der Luftpermeabilität und Kapillarporosität

In orientierenden Vorversuchen im Rahmen einer Abschlussarbeit an der THN [10] wurde der Einfluss eines FBVS auf die Dichtigkeit der dahinter liegenden Betonrandzone auf zwei unterschiedlichen Wegen überprüft. Zum einen wurde die Kapillarporosität mittels freier, kapillarer Wasseraufnahme bestimmt, zum anderen die Luftpermeabilität mit dem Verfahren nach Torrent bestimmt. Die Versuche wurden zur Orientierung und Abstimmung des Prüfablaufs für die Untersuchungen im Forschungsvorhaben durchgeführt.

Bereits im Sommer 2017 wurde dazu eine Betonplatte mit den Abmessungen L/B/H = 120/80/25 cm und flächig appliziertem, mechanisch-adhäsivem FBVS betoniert. Es kam lediglich ein FBVS zum Einsatz, welches auch später in den Prüfungen verwendet wurde (Typ A2). Als Größtkorn der Betonzusammensetzung wurde GK 16 mm verwendet (siehe Tabelle 2.8.1). Anschließend lagerte der Ausgangskörper rund sechs Monate (176 d) im trockenen Innenraum des Baustofflabors. Aus der Betonplatte wurden nach dieser Lagerungsdauer als Bohrkern mit 100 bzw. 150 mm Durchmesser gezogen. Die Bilder 2.8.7 und 2.8.8 zeigen eine Übersicht über die durchgeführte Weiterverarbeitung. Die folgenden Probekörper waren nicht im Versuchsplan dieses Forschungsprojekts enthalten und dienten lediglich der vorherigen Orientierung.

Tabelle 2.8.1. Betonzusammensetzung für Betonplatte für die Untersuchungen der Betonrandzone

| Zement | Zementgehalt | Wasser | Gestein (quarzitisches Rundkorn, $k = 4,23$) | | | |
|-------------------|-------------------|-------------------|--|------|------|------|
| | kg/m ³ | kg/m ³ | 0/2 | 2/8 | 8/16 | |
| CEM II/B-S 42,5 N | 350 | 175 | 1821 | 35 % | 30 % | 35 % |

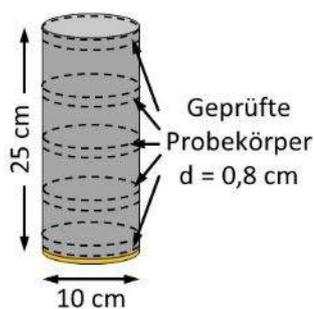


Bild 2.8.7. Probekörper zur Messung der Kapillarporosität

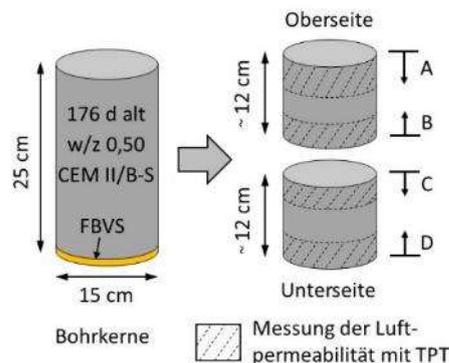


Bild 2.8.8. Probekörper zur Messung der Luftpermeabilität

Für orientierende Untersuchungen an der Betonplatte wurden zur Messung der Luftpermeabilität 150er Bohrkern entnommen. Das FBVS wurde von der Unterseite abgezogen und verbleibende Vliesfasern abgeschliffen. Anschließend wurden die Kerne in der Höhe halbiert, um auch die Permeabilität des Kernbereichs ermitteln zu können.

Da die Luftpermeabilität des Betons u. a. von der Feuchtigkeit des Probekörpers abhängig ist, lagerten die Probekörper rund neun Wochen bei 50 °C bis zur Massenkonstanz. Eine niedrige Trocknungstemperatur ist notwendig, um eine Veränderung der Gefügestruktur des Betons (Mikrorissbildung) zu vermeiden. Die Trocknungsphase wurde im März 2018 beendet, nachdem die Probekörper keinen signifikanten Masseverlust mehr zeigten. Der Ablauf der anschließenden Messungen der Luftpermeabilität nach Torrent sind in Bild 2.8.8 gezeigt. Jeweils von der Stirnseite und von der Mitte des Bohrkerns ausgehend wurden die Permeabilitätsmessungen durchgeführt. Die Messungen zeigten, dass der untere Randbereich zum FBVS hin eine ähnlich geringe Luftpermeabilität aufwies als der Kernbereich, während der luftberührte obere Randbereich einen deutlichen Anstieg der Permeabilität verzeichnete. In Bild 2.8.9 ist der Permeabilitätskoeffizient in einer logarithmischen Skalierung über die Bohrkernhöhe dargestellt. Dabei konnte an der FBVS-Randzone ein ähnlich geringer Permeabilitätskoeffizient wie in der Bohrkernmitte festgestellt werden, während er zum luftberührten Randbereich hin erheblich zunahm.

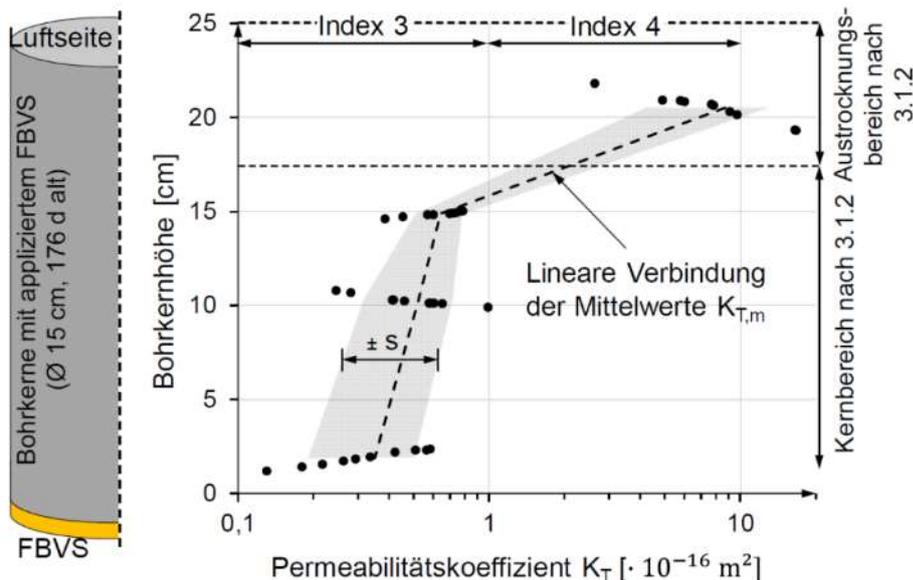


Bild 2.8.9. Zusammenstellung der Permeabilitätskoeffizienten über die Bohrkernhöhe

Zur Messung der Kapillarporosität wurde die freie, kapillare Wasseraufnahme unter atmosphärischem Luftdruck bestimmt. Aus 100er Bohrkernen wurden Scheiben als Probekörper herausgeschnitten, um einen Verlauf der Kapillarporosität über die Höhe des Kernes ermitteln zu können. An diesen Scheiben wurde das Nass- und Trockengewicht sowie das Volumen durch Tauchwägung bestimmt. Anschließend wurde die offene Porosität (Kapillarporosität) ermittelt.

Die Einzelmessungen der Kapillarporosität und eine Einteilung in Bereiche sowie statistische Kenngrößen sind in Bild 2.8.10 dargestellt. Die Versuche zeigten, dass die Kapillarporosität nahe dem FBVS vergleichbar niedrig wie im Kernbereich war und deutlich geringer als an der luftberührten Oberseite.

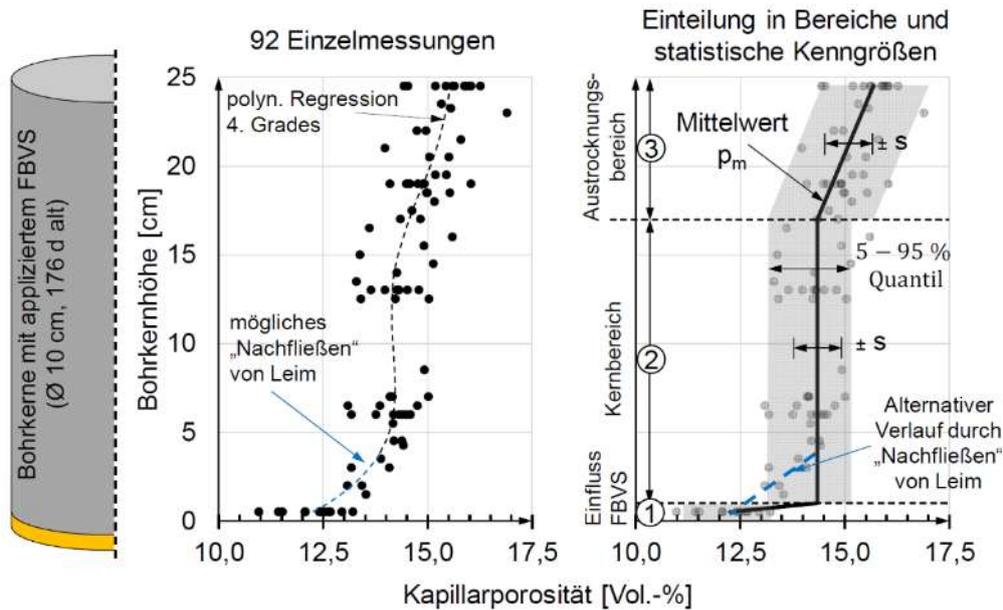


Bild 2.8.10. Daten und Trend der Kapillarporosität von 6 Monate alten Bohrkernen mit applizierten FBVS

Der Rückgang der Kapillarporosität unmittelbar am FBVS kann auf das verwendete mechanisch-adhäsive Vliesystem zurückgeführt werden. Während des Verdichtungsvorgangs wird Zementleim aus dem Frischbeton abgetrennt und wandert in die Hohlräume des Vliesystems. Dadurch ist in der Betonmatrix, die an das FBVS angrenzt, ein geringerer Anteil an Zementleim vorhanden, was sich in einem Rückgang der absoluten Kapillarporosität im Beton äußert. Dieser Effekt konnte über die Messungen deutlich beobachtet werden und rechnerisch über die Vlieseigenschaften und Hohlraumvolumina bestätigt werden. Der Rückgang der Kapillarporosität erhöht an einem WU-Betonbauwerk die Dichtigkeit der äußersten Randzone marginal, hat aber darüber hinaus kaum Einfluss auf die Gefügestruktur bzw. das WU-Arbeitsmodell. Auch sollte dieser Effekt bei Systemen ohne Vliesstrukturen (also z. B. klebe-adhäsiv/bituminös-adhäsiv) nicht zu beobachten sein.

Sowohl die orientierenden Permeabilitätsmessungen, wie auch die Porositätsmessungen zeigten, dass die Gefügestruktur nahe des FBVS vergleichbar dicht war wie im Kernbereich, und dieser Bereich in jedem Fall eine deutlich geringere Porosität bzw. Luftdurchlässigkeit aufwies als die luftberührte Oberseite. Dieser Effekt ist auf die quasi dauerhafte Nachbehandlung durch die Dichtungsschicht des FBVS zurückzuführen, die zu einem hohen Hydratationsgrad geführt hat.

2.8.4 Ergebnisse der Festbetonprüfungen des AP E3

Bestimmung der offenen Kapillarporosität

An den zylindrischen Proben der fünf FBVS sowie der drei Kontroll- bzw. Referenztypen wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens Anfang 2019 neben anderen Festbetoneigenschaften auch die offene Porosität durch freie, kapillare Wasseraufnahme bestimmt. Zu diesem Zeitpunkt lagerten die Proben rund 12 Monate (372 Tage) im trockenen Innenraum.

An jeweils einem Zylinder jeden Typs ($n = 8$, Typ A1 – A5, B, C, D) wurde die EP-Beschichtung und ggf. das FBVS abgeschliffen; anschließend sind die Zylinder in Scheiben mit jeweils rund 1 cm Dicke im Nassverfahren geschnitten worden (je Zylinder $n = 15 - 17$ Scheiben). Die offene Porosität wurde dann gravimetrisch und durch Tauchwägung an jeder Scheibe bestimmt. Die Messgenauigkeit lag jeweils bei $\pm 0,01$ g (bzw. $\pm 0,01$ cm³). Durch das Auftrennen der Proben in Scheiben konnte die Porosität über die Zylinderhöhe bestimmt werden. Die so ermittelten Werte der Roh- und Reindichten sind in Bild 2.6.11, die offene Kapillarporosität in Bild 2.6.12 dargestellt. Die Messwerte sind im Anhang A3 aufgeführt.

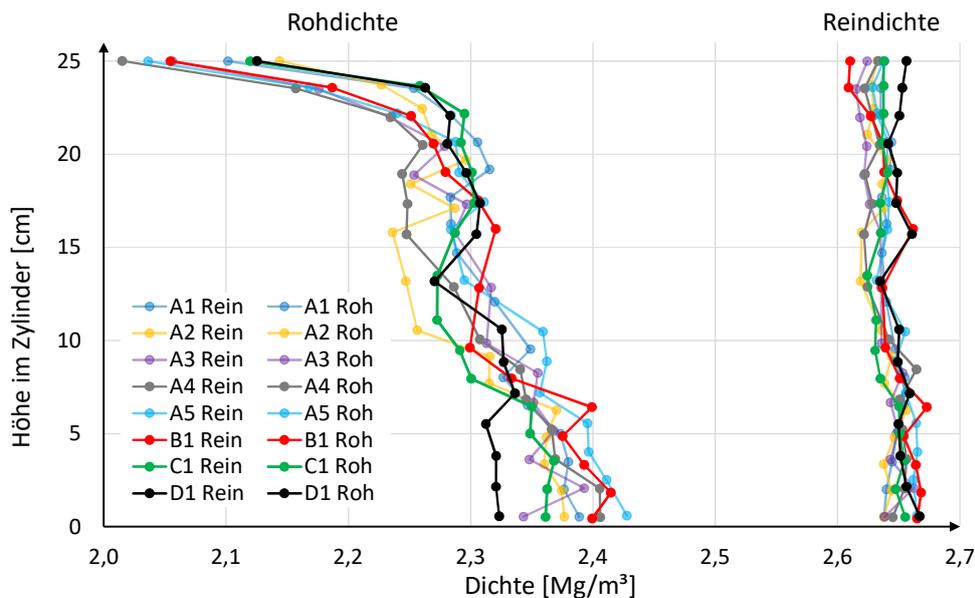


Bild 2.8.11. Ermittelte Werte der Roh- und Reindichte

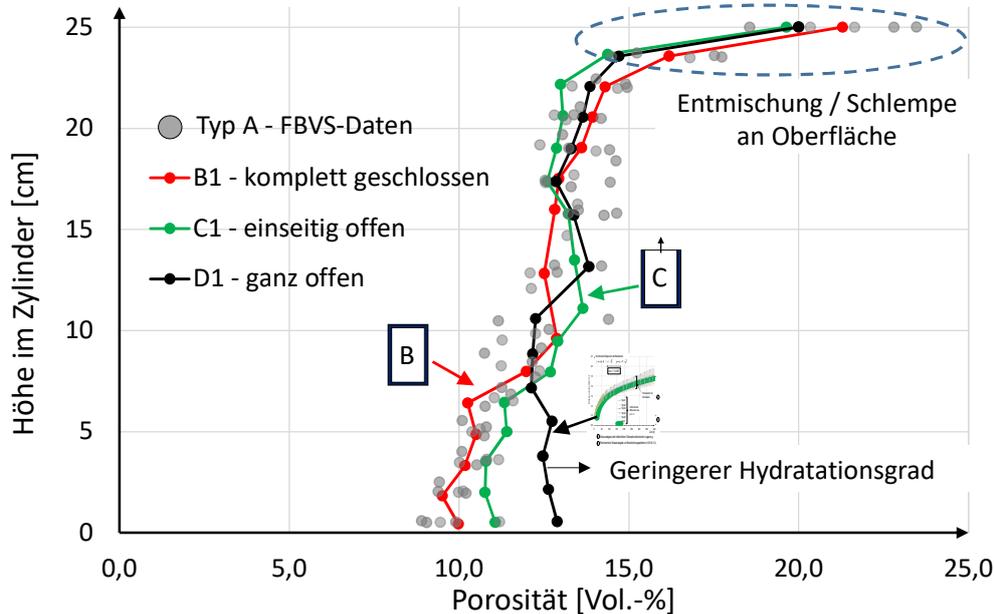


Bild 2.8.12. Offene Kapillarporosität über die Höhe der zylindrischen Proben

An der Oberseite der zylindrischen Proben wurde die Rohdichte vor allem durch leichte Entmischungerscheinungen beeinflusst. Dies ist daran erkennbar, dass auch beim Typ B mit vollständiger Beschichtung an der Oberfläche ein ähnlicher Verlauf der Rohdichte bzw. Porosität zu erkennen ist. Dieser ist durch die verhinderte Austrocknung (EP-Beschichtung) allerdings nicht auf einen veränderten Hydratationsgrad zurückführbar. Die im Mittel konstante Abnahme der Rohdichte mit steigender Zylinderhöhe weist ebenfalls auf eine unvollständige Verdichtung oder leichte Entmischungerscheinungen des Betons hin. Durch das Aufschwimmen des leichteren Zementleimanteils verringert sich die Rohdichte mit steigender Zylinderhöhe – der Kapillarporenanteil vergrößert sich entsprechend. Die leichte Sedimentation ist vermutlich durch die vergleichsweise lange Verdichtungsdauer verursacht bzw. verstärkt worden.

Die Rohdichte der Proben wurde im Mittel zu dem plausiblen Wert von $\rho = 2,32 \text{ Mg/m}^3$ bestimmt (ohne luftseitige Werte). Die offene Kapillarporosität ergab sich im Mittel zu 12,2 Vol.-%.

Die Kapillarporosität des unbeschichteten Probekörpers (Typ D) war am Fußpunkt ($h = 0 \text{ cm}$) gegenüber den restlichen Proben erhöht. Dies ist vermutlich auf einen geringeren Hydratationsgrad zurückzuführen, der durch die Austrocknung der unteren Randzone folgte. Alle anderen Proben zeigten hier eine niedrige Porosität, die am Fußpunkt rund 2 – 3 Vol.-% niedriger als beim unbeschichteten Referenzkörper war. Unterschiede zwischen den Proben mit FBVS und den unterseitig EP-beschichteten Proben waren nicht erkennbar. Ebenso war die Kapillarporosität im FBVS-zugewandten Beton vergleichbar niedrig wie im Kernbereich der Proben.

Es ist daher davon auszugehen, dass der Hydratationsgrad im FBVS-zugewandten Beton vergleichbar hoch ist wie im Kernbereich der Proben. Die FBVS begünstigen insgesamt die Nachbehandlung und Nacherhärtung. Diese Beobachtung trat bei allen FBVS auf, weshalb die verbesserte Nacherhärtung offenbar weitgehend unabhängig von den Materialeigenschaften des FBVS ist. Selbst beim FBVS mit geringem s_D -Wert ($s_D < 1 \text{ m}$) konnte eine dem EP-beschichteten

Referenzkörper vergleichbare geringe Porosität festgestellt werden. Diese Erkenntnis entspricht den Beobachtungen der Austrocknungsversuche. Dort konnten auch keine signifikanten Unterschiede in den Austrocknungsraten zwischen den FBVS festgestellt werden.

Bestimmung der Luftpermeabilität

Die Ermittlung der Luftpermeabilität bzw. des Permeabilitätskoeffizienten K_T der zylindrischen Proben sollte ebenfalls Aufschluss darüber geben, wie sich die Durchlässigkeit des Betons am FBVS von derjenigen im Kernbeton bzw. und oberen Randbeton unterscheidet. Dies würde die Beobachtungen der verbesserten Nachbehandlung und -erhärtung durch ein FBVS bestätigen.

Die Luftpermeabilität wurde an jeweils einer Probe jeden Typs (außer Typ B mit $n = 0$) mit einem Torrent-Permeabilitätstester gemessen. Um die Durchlässigkeit des Betons über die Probenhöhe zu erhalten, wurde der Permeabilitätskoeffizient an vier Bereichen über die Höhe jeder Probe gemessen. Das Vorgehen entsprach dem der Vorversuche aus Kapitel 2.8.3 (siehe auch Bild 2.8.8). Nach Ende der Trockenlagerung wurden die FBVS bzw. die EP-Beschichtung von den Stirnseiten der Proben durch Nassschleifen entfernt. Die EP-Beschichtung an den Mantelflächen verblieb. Anschließend wurden die Proben in der Höhe halbiert, um auch die Permeabilität des Kernbetons bestimmen zu können.

Die Proben wurden nach dem Auftrennen bis zur Massenkonstanz bei $T = 50 \text{ °C}$ im Trockenofen gelagert. Die Lagerungsdauer betrug dafür rund 27 Wochen. Eine niedrige Trocknungstemperatur ist bei der Ermittlung der Luftpermeabilität erforderlich, um eine Veränderung der Gefügestruktur des Betons (Mikrorissbildung) durch zu hohe Temperatur- und Dampfdruckgradienten zu vermeiden.

Sobald die Proben die Massenkonstanz erreicht hatten, wurden sie bis auf Lufttemperatur abgekühlt und anschließend an den vier beschriebenen Stellen über die Höhe der Proben auf die Luftpermeabilität geprüft.

Die Bestimmung der Luftdurchlässigkeit stützt sich im Grundsatz auf das Gesetz nach *Darcy* und wurde für kompressible Gase sowie die Abläufe im Versuch und die Abmessungen des Testgeräts modifiziert. Die Berechnungsgrundlagen sind in [6] aufgeführt.

Die Ergebnisse der Permeabilitätsmessung sind in Bild 2.8.13 dargestellt.

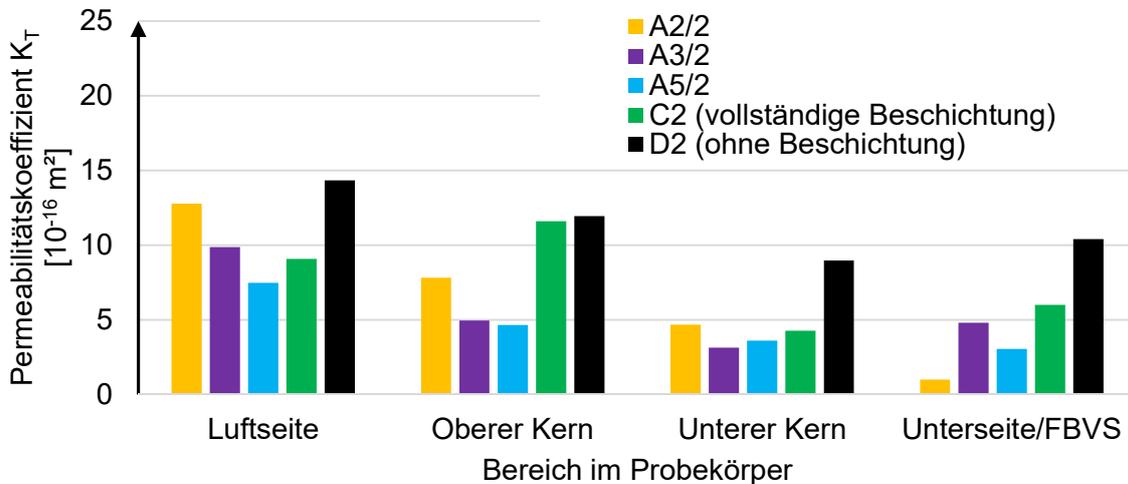


Bild 2.8.13. Ergebnisse der Luftpermeabilitätsmessungen nach Torrent

Die dargestellten Ergebnisse der Luftpermeabilitätsmessung bestätigen den vorher festgestellten Trend der Messungen der offenen Kapillarporosität.

Die völlig unbeschichtete Probe (Typ D) zeigte erwartungsgemäß die größte Luftpermeabilität mit einem Luftpermeabilitätskoeffizienten von etwa $K_T = 9,0 - 14,3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$. Dabei war an der luftberührten Oberseite die höchste Permeabilität zu beobachten, was vermutlich wiederum auf leichte Entmischungerscheinungen und einen erhöhten Anteil an Zementleim zurückzuführen war.

Die Probekörper mit appliziertem FBVS dagegen zeigten Luftpermeabilitäten, die an der luftberührten Seite am größten waren, und zum FBVS hin zurückgingen. In den unteren Probenbereichen (unterer Kern und Unterseite) wurden sehr geringe Permeabilitäten zwischen $K_T = 1,0 - 4,8 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ erreicht.

Dieser Trend konnte bereits bei der Bestimmung der offenen Kapillarporosität beobachtet werden und weist wiederum auf eine verbesserte Nachbehandlung und Nacherhärtung durch das FBVS und damit einen höheren Hydratationsgrad am FBVS hin. Die Luftpermeabilität in der Nähe zum FBVS ist, wie schon die Kapillarporosität, ähnlich gering wie im Kernbereich.

Bestimmung des Feuchtegehalts

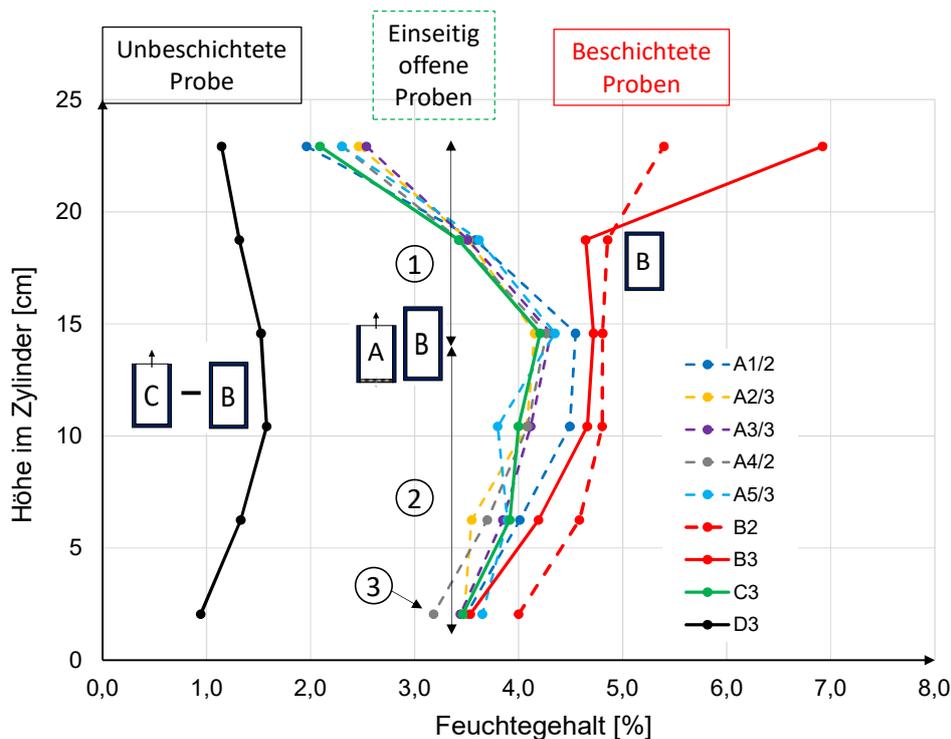
Um den Feuchtegehalt der Proben nach der Lagerung über zwölf Monate zielsicher ermitteln zu können, wurden die zylindrischen Proben in Scheiben aufgetrennt und im Trockenofen bei $T = +110 \text{ °C}$ darretrocknet. Der Feuchtegehalt wurde wiederum jeweils an einer Probe jeden Typs (außer Typ B mit $n = 2$) bestimmt.

Die zylindrischen Ausgangsproben ($n = 9$) wurden in jeweils $m = 6$ Scheiben mit einer jeweiligen Dicke von $d \approx 4 \text{ cm}$ gespalten. Um den Feuchtegehalt des Betons nicht durch Nassschneidverfahren zu verfälschen, wurden die Proben in Scheiben gespalten. Es wurde lediglich eine „Sollbruchstelle“ durch trockenes Trennschleifen an den Spaltpositionen geschnitten, mit einer Tiefe von $t \approx 8 \text{ mm}$. Die so erhaltenen Scheiben wurden bis zur Massenkonstanz im Trockenofen bei

T = 110 °C getrocknet. Das Vorgehen ist auch in Bild 2.6.14 dargestellt; die Einzelwerte sind im Anhang A4 aufgeführt.



Bild 2.8.14. Vorgehen bei der Bestimmung des Feuchtegehalts über die Probenhöhe



- ① Bereich der Austrocknung, Tiefe ≈ 10 cm
- ② Scheinbar wassergesättigter Bereich
- ③ FBVS mit niedrigstem s_D -Wert (Typ A4). Mögliche Austrocknung durch FBVS

Bild 2.8.15. Feuchtegehalt der untersuchten Referenz- und FBVS-Proben

Wie erwartet zeigte der bereits bis zur Massenkonstanz ausgetrocknete, unbeschichtete Probekörper (Typ D) den niedrigsten Feuchtegehalt mit im Mittel 1,3 M.-%. Diese Ausgleichsfeuchte ist für eine Lagerung im trockenen Innenraum plausibel. Die vollständig beschichteten Proben (Typ B) zeigten den höchsten Feuchtegehalt zwischen rund 3,5 – 6,9 M.-%. Der Feuchteverlauf

über die Probenhöhe wurde dabei vermutlich wiederum durch die unterschiedlichen Anteile an Zementleim hervorgerufen, die durch die geringe Entmischung bzw. die Zementleimschicht auf der Oberfläche entstanden ist. Beim unbeschichteten Probekörper Typ D wurde dieser Effekt möglicherweise noch durch unterschiedliche Hydratationsgrade infolge fehlender Nachbehandlung überlagert.

Die einseitig oben offenen Proben (Typ C und A1-A5) zeigten am Fußpunkt bzw. am FBVS ($h = 0$ cm) einen Feuchtegehalt von rund 3,2 – 3,6 M.-%, der sehr nahe am Feuchtegehalt des vollständig beschichteten Referenzkörpers Typ B lag. Dies bestätigt den sehr geringen Feuchtstrom durch die FBVS. Über die weitere Probenhöhe bewegte sich der Feuchtegehalt weiterhin dicht an den beschichteten Proben und zeigte erst ab einer Höhe im Zylinder von $h \approx 150$ mm einen abnehmenden Feuchtegehalt bzw. Austrocknungserscheinungen. Die Austrocknungstiefe lag damit bei rund 100 mm, ist aber durch den größeren Abstand der Messpunkte nicht genau zu quantifizieren. Bis zur luftberührten Oberseite sank der Feuchtegehalt bis auf im Mittel 2,3 M.-%.

Der Unterschied der Feuchtegehalte zwischen den verschiedenen Proben mit FBVS ist vernachlässigbar gering und befindet sich innerhalb der Streubreite des Messverfahrens. So zeigte lediglich das System Typ A4 mit geringem s_D -Wert einen geringfügig niedrigeren Feuchtegehalt – mit einer Differenz zum Mittel von 0,27 M.-%. Dies könnte durch den sehr niedrigen s_D -Wert ($s_D < 1$ m) und den trockenen Randbedingungen verursacht worden sein. Ein Einfluss des s_D -Werts auf den dauerhaften Feuchtegehalt des Randbetons wäre daher denkbar. Gleichzeitig zeigte sich durch die Untersuchungen, dass ein s_D -Wert der FBVS für das natürliche Austrocknungsverhalten des Randbetons (ohne weitere äußere Einflüsse) kaum Relevanz besitzt. Ob sich unter realen Umgebungsbedingungen eines Kellerbauwerks (feuchter Boden) und den dort vorhandenen Partialdruckdifferenzen überhaupt Feuchtströme durch das FBVS ergeben, ist daher fraglich. Feuchtströme sind auch nur bei nicht wassergesättigten Böden möglich.

Im Folgenden sollten die Kernaussagen der Untersuchungen des AP E3 nochmals stichpunktartig zusammengefasst werden:

- In Abhängigkeit der thermischen und hygrischen Umgebungsbedingungen (Boden-/Innenraumklima), den Betoneigenschaften und Bauteilabmessungen kann nach jetzigem Kenntnisstand nicht ausgeschlossen werden, dass eine WU-Betonkonstruktion mit appliziertem und fehlerstellenfreiem FBVS während der geplanten Nutzungsdauer eines Bauwerks vollständig zur Innenseite hin austrocknen könnte. Die Austrocknung würde sehr lange Zeiträume in Anspruch nehmen, die die erwartete Lebensdauer eines Bauwerks auch überschreiten können, oder je nach Randbedingungen nicht vollständig ablaufen. Die Betonrandzone am FBVS liegt demzufolge lange Zeit mit wassergefüllten Kapillarporen und somit in einem selbstabgedichteten Zustand vor; das klassische WU-Arbeitsmodell behält über lange Zeit Gültigkeit. Falls es zu einer vollständigen Austrocknung des Betons kommt, trocknet der Beton bis zur FBVS-Verbundzone hinaus.
- Eine vollständige Austrocknung der Betonkonstruktion ist allerdings nicht von baupraktischer Relevanz, da diese Austrocknung des Betons ein vollständig wasserdichtes FBVS voraussetzt. Tritt unter den genannten Umständen daher eine Austrocknung nach vielen Jahren ein,

wird die Abdichtung zwangsläufig vollumfänglich durch das FBVS gewährleistet. Solange es nicht nach vielen Jahren Nutzung dann noch zu nachträglichen Beschädigungen des FBVS kommt, ist die Leistungsfähigkeit der WU-Betonkonstruktion durch die Austrocknung nicht gefährdet.

- Im Bereich von Fehlstellen im FBVS, die bereits im Bauzustand vorhanden wären, bleibt das klassische WU-Arbeitsmodell im Bereich dieser lokalen Fehlstelle erhalten. Es kann weiterhin dauerhaft Wasser in einem lokalen Bereich an die Betonkonstruktion herantreten und dort die Selbstabdichtung aufrechterhalten.
- Die offene Kapillarporosität des Randbetons am FBVS konnte zu einem vergleichbaren Wert wie im Kernbeton ermittelt werden. Die Porosität an der luftberührten Oberseite war im Vergleich deutlich größer. Auch die Luftpermeabilität wies am FBVS vergleichbare Werte wie im Kern auf, und deutlich geringere Werte als an der luftberührten Oberseite. Bei allen untersuchten FBVS führt die hierdurch verhinderte Austrocknung zu einer sehr guten Nachbehandlung und Dichtigkeit des Betons. Dies zeigt sich durch Festbetoneigenschaften, die in der Nähe der FBVS-Verbundzone ähnlich gut wie im Kernbereich sind. Das FBVS kann aufgrund seiner flächigen Verlegung und wasserundurchlässigen Beschaffenheit u. a. als wirksames Nachbehandlungsmittel angesehen werden. Am Randbeton am FBVS kann auch bei langsam erhärtenden Betonen von einem Hydratationsgrad ausgegangen werden, wie er im Kernbereich vorliegt. Dieser Effekt ist unter realen Bedingungen (anstehender feuchter Boden) vermutlich nahezu unabhängig von unterschiedlichen s_D -Werten der Verbundbahnen.

3 Diskussion der Ergebnisse

3.1 Prüfverfahren

Einheitliche Prüfverfahren sollen es ermöglichen, wesentliche Merkmale über die FBVS hinweg zu vergleichen und die Systeme ggf. in „Leistungsklassen“ einstuft zu können. Das Forschungsvorhaben konnte hierzu gängige Prüfungen für Abdichtungsbahnen identifizieren und auf ihre Relevanz für FBVS bewerten. Weiterhin wurden wenige Prüfungen im praktischen Test näher untersucht und die Auswirkung von Prüfvariationen auf das Untersuchungsergebnis gezeigt. So wurde beispielsweise die Prüfung der Wassermigration bereits einheitlich formuliert und im Anhang A5 dargestellt.

Weitere (nicht genormte) Prüfverfahren zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit von FBVS stehen dagegen noch aus und müssen im Anschluss an das Forschungsvorhaben formuliert werden. Als Beispiel kann die Reinigungsfähigkeit einer Verbundschicht genannt werden. Die Reinigungsfähigkeit stellt ein Leistungsmerkmal eines FBVS dar, ist aber in keinen offiziellen Prüfverfahren geregelt und muss daher mit eigenen Formulierungen geregelt werden. Ein weiteres Prüfverfahren betrifft z. B. die Ermittlung des Gleitreibbeiwerts, welches derzeit auch nicht einheitlich erfolgt.

3.2 Laboruntersuchungen

Im Rahmen der Laboruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass das Zustandekommen des Verbunds von mechanisch-adhäsiven Systemen stark von der Verdichtungsenergie und der Frischbetonkonsistenz abhängig ist. Diese Parameter begünstigen ein Abtrennen von Zementleim aus der Betonmatrix und können den Leimeintrag in eine Vliesstruktur fördern. Ungeklärt bleibt allerdings, von welchen Vlieseigenschaften diese Mechanismen abhängig sind. Es ist denkbar, dass ein Vliesystem in diesen Fällen als Filter fungiert und den Zementleim von den größeren Gesteinskörnungen abtrennt (und somit von günstigen Filtereigenschaften profitieren könnte). Auch ist bisher ungeklärt, bis zu welchen Vliesdicken, -dichten oder Faserabständen dieser Effekt ausreichend schnell zustande kommt bzw. ob es Grenzen in der Anwendung der Vlieslagen gibt. Zur Klärung dieser Fragestellung sind bereits weiterführende Untersuchungen angedacht.

Weiterhin konnte auch der Haftverbund der FBVS zum Beton hin weitgehend untersucht sowie festgestellt werden, dass der Haftverbund bei vielen FBVS für den Einbauzustand ausreichend hoch ist. Ungeklärt bleibt aber, wie hoch zentrische Zugkräfte beim Ausschalen von FBVS werden können, wenn diese punktuell an der Schalhaut befestigt waren (z. B. durch Tackerklammern). In der Praxis können dort teilweise punktuelle Schadstellen beobachtet werden, die möglicherweise auf ein zu frühes Ausschalen bzw. zu geringe Haftzugfestigkeiten zurückzuführen sind. An dieser Stelle wäre es hilfreich zu untersuchen, mit welchen Kräften beim Ausschalen gerechnet werden muss, um zielsichere Ausschalfrieten für FBVS formulieren zu können.

Auch ob eine WU-Betonkonstruktion mit FBVS nach vielen Jahren vollständig austrocknen kann, konnte nicht abschließend geklärt werden. Da es sich bei der Austrocknung um langwierige und gleichzeitig komplexe Vorgänge handelt, waren die stichprobenartigen Untersuchungen nicht hinreichend, um die Fragestellung sicher klären zu können. Dazu wären im Nachgang beispielsweise numerische Untersuchungen möglich.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Frischbetonverbundsysteme (FBVS) werden in Deutschland i. d. R. als zusätzliche wasserseitige Abdichtungsebene auf wasserundurchlässigen Stahlbetonkonstruktionen (WU-Betonkonstruktionen) angeordnet. Sie sollen das Zuverlässigkeitsniveau von Untergeschossen in WU-Bauwerken hinsichtlich der Wasserundurchlässigkeit verbessern – gerade bei schwierigen Bauwerksrandbedingungen oder hohen Nutzungsanforderungen der Innenräume. FBVS werden im Gegensatz zu „klassischen“ hautförmigen Abdichtungen vor dem Betoneinbau verlegt und gehen mit dem später aufgebracht Frischbeton einen zugfesten sowie wasserundurchlässigen (hinterlaufsicieren) Verbund ein. Letzterer verhindert u. a. seitliche Wasserbewegungen in der Verbundschicht, selbst wenn es zu Beschädigungen der Dichtschicht kommen sollte.

Diese Form der Bauwerksabdichtung wird in Deutschland verstärkt seit 2012 eingesetzt und ist als neue Bauart bisher keinen der vorhandenen Regelwerken zuzuordnen. Zum einen werden die FBVS i. d. R. nicht als eigenständige Abdichtung nach DIN 18533 angesehen, zum anderen werden sie derzeit nicht in der DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“

behandelt. Der Verwendbarkeitsnachweis wurde bisher über allgemein bauaufsichtliche Prüfzeugnisse (abP) erbracht, der allerdings nicht auf einheitlichen Prüfgrundsätzen beruhte und so wesentliche Merkmale über Produkte hinweg nur schwer verglichen werden konnten. Neben diesen Unklarheiten zur Vergleichbarkeit von Produkten sind am Markt nach wie vor Planungs- und Anwendungsfragen vorhanden.

Aus den genannten Gründen wurde vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (DBV) im Jahr 2017 ein Arbeitskreis gegründet, der zurzeit ein Merkblatt zu FBVS erarbeitet. Um die Bauweise darin fundiert behandeln zu können, waren noch grundlegende Fragestellungen zu den FBVS zu klären, die z. T. in diesem Forschungsvorhaben behandelt wurden. Unter anderem war die Regelwerkssituation zu analysieren, wesentliche Produkteigenschaften und zugehörige Prüfverfahren zu identifizieren, Merkmale der Bauweise in Laboruntersuchungen zu ermitteln und Empfehlungen für die Praxis auszuarbeiten.

Das Forschungsvorhaben sah hierzu zehn Arbeitspakete vor, die nachfolgend kurz vorgestellt werden.

Zu Beginn sollte das Vorhaben die unklare Regelwerkssituation um die neuartige Bauweise klären. Dazu sollten bestehende Regelwerke sowie rechtliche Grundlagen recherchiert und die FBVS hinsichtlich ihrer bisherigen Verwendung in Deutschland bauordnungsrechtlich eingeordnet werden. Diese Einstufung konnte bereits in die Gremienarbeit des DBV-Arbeitskreises FBVS einfließen und wurde im DBV-Heft 44 Ende 2018 veröffentlicht.

Um im späteren DBV-Merkblatt praxisnah auf die Defizite bzw. den Informationsbedarf der Planungs- und Baubeteiligten eingehen zu können, wurde weiterhin die derzeitige Praxiserfahrung in Form einer Umfrage evaluiert. Darauf aufbauend konnten zu Ende des Vorhabens die Untersuchungsergebnisse in Empfehlungen zur Anwendung und zu Maßnahmen der Qualitätssicherung ausgearbeitet werden.

Der dritte Teil des Vorhabens beschäftigte sich mit Produkteigenschaften und geeigneten Prüfverfahren für FBVS. Ziel davon war es, in einem späteren DBV-Merkblatt Prüfverfahren formulieren zu können, die die wesentlichen Produkteigenschaften der FBVS einheitlich prüfen und so übergreifend vergleichbar machen. Dazu wurden zuerst Produkteigenschaften von deutschen sowie ausländischen Produkten zusammengetragen, davon für die Bauweise wichtige Eigenschaften identifiziert und anschließend dazu passende Prüfverfahren zugeordnet. Teilweise konnten Prüfnormen von anderen Abdichtungsbauarten übernommen werden, stellenweise wurden auch bestehende Prüfungen angepasst oder neue Prüfungen formuliert.

Weiterhin sollten bereits einige wesentliche Eigenschaften der FBVS in Laboruntersuchungen geprüft werden. Von zehn im Projekt involvierten Industriepartnern und Bahnenherstellern wurde jeweils ein FBVS-Produkt auf ausgewählte Eigenschaften hin geprüft und in das Untersuchungsprogramm eingebunden. Untersuchungsziele waren vor allem Einflüsse auf den wasserundurchlässigen Verbund, der Einfluss der FBVS auf die angrenzenden Festbetoneigenschaften, der Wärmeausdehnungskoeffizient, der Haftverbund zum Beton sowie die Scherfestigkeit und Verbundfestigkeit und Dichtigkeit verschiedener Bahnennähte. Die Ergebnisse dienen auch als Basis zur Formulierung von einheitlichen Prüfbedingungen.

5 Weiterer Forschungsbedarf

Die geplanten Ziele des Forschungsvorhabens wurden erreicht, decken aber nicht alle aktuellen Fragestellungen zu den FBVS ab. Die Fragestellungen um die bauordnungsrechtliche Einordnung der FBVS, die Evaluierung der Praxiserfahrung und die Laboruntersuchungen konnten erfolgreich umgesetzt werden. Wesentliche Produkteigenschaften von zehn auf dem Markt befindlichen Systemen konnten miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse fließen zurzeit in die Erstellung des DBV-Merkblatts FBVS ein. Auch konnten bereits einige wesentliche Prüfverfahren auf ihre Eignung hin bewertet werden. Allerdings konnte das Forschungsvorhaben hier nicht alle aktuell ausstehenden Prüfdefinitionen abdecken. Auch besteht weiterer Forschungsbedarf zu baupraktischen Fragestellungen.

So ist der Reibungskoeffizient der Dichtschichten der FBVS bisher nicht in einheitlichen Prüfungen ermittelt worden, weshalb Reibungskräfte zum Zeitpunkt der Erstverschiebung (z. B. infolge Schwinden) bisher nur grob abgeschätzt werden können. Hierzu wären vor allem Versuche im größeren Maßstab hilfreich, um auch den Einfluss von Nahtstellen berücksichtigen zu können.

Eine weitere Fragestellung betrifft die Reinigungsfähigkeit der Systeme. Durch die Verlegung vor dem Betoneinbau ergeben sich zwangsläufig Verschmutzungen auf den Systemen, die entweder konsequent durch Schutzmaßnahmen vermieden oder nachträglich entfernt werden müssen, z. B. durch einen Hochdruckwasserstrahl. Inwieweit die Systeme hierbei ihre volle Funktionsfähigkeit behalten, ist bisher nur orientierend betrachtet worden. Auch wären hierzu einheitliche Prüfrandbedingungen neu zu formulieren.

Der Einfluss der Temperaturdehnung auf die Dichtheit der Nahtstellen konnte bisher nicht abschließend geklärt werden und bedarf weiterer Untersuchungen. Die Wärmeausdehnungskoeffizienten, der Elastizitätsmodul sowie die Scherfestigkeit der Nahtstellen sind zwar bekannt, können aber noch in keinem Modell die Schadensfälle in der Praxis abbilden.

Zudem gibt es weitere Fragestellungen zur Wasserdichtheit von Fügenähten. Ungeklärt ist bisher, wie sich der Zementleim sowie der Betondruck auf die Dichtheit von T-Stößen auswirken, und welche Maßnahmen zur Vermeidung von Längskapillaren in überlappenden Bahnenstößen getroffen werden können.

Ergebnistransfer

Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Es wurden nur Bestandteile der Ergebnisse der Evaluierung von Praxiserfahrungen veröffentlicht, da die Ergebnisse der Forschungsversuche erst nach Projektende veröffentlicht werden.

| Maßnahme | Ziel | Ort/Rahmen | Datum/Zeitraum |
|--|---|--|--|
| Gremien des Deutschen Beton- und Bautechnik Vereins E.V. | Diskussion der Forschungsversuche | Begleitgremium – Arbeitskreis „Frischbetonverbundsysteme“ (HABA-FBV) | während und nach der Projektlaufzeit |
| Veröffentlichung im DBV-Rundschreiben | Information der Fachöffentlichkeit und Ergebnistransfer in die Wirtschaft | - | während und nach Abschluss des Vorhabens |

Geplante Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

| Maßnahme | Ziel | Ort/Rahmen | Datum/Zeitraum |
|--|--|--|--|
| Endbericht | Information über die Ergebnisse des Forschungsprojektes und deren Empfehlungen zur Anwendung | Der Endbericht wird der Wirtschaft, Wissenschaft und Behörden zur Verfügung gestellt | Projektende |
| Arbeitskreise (AK) und Hauptausschüsse (HA) des Deutschen Beton- und Bautechnik Vereins E.V. | Ergebnistransfer in die Wirtschaft | Verbreitung der Forschungsergebnisse auf den DBV-Ausschuss- und Arbeitskreissitzungen, wie z. B. AK „Frischbetonverbundsysteme“ (HABA-FBV), Hauptausschuss „Baustofftechnik“ (HABT), Hauptausschuss „Bauausführung“ (HABA) | nach Abschluss des Vorhabens |
| Veranstaltungen des DBV; wie z. B. Weiterbildungsseminare und Fachtagungen | Weiterbildung von Fachpersonal und Ergebnistransfer in Wirtschaft und Forschung | DBV-Arbeits- und Regionaltagungen | nach Abschluss des Vorhabens |
| Veröffentlichung im DBV-Rundschreiben | Information der Fachöffentlichkeit und Ergebnistransfer in die Wirtschaft | - | während und nach Abschluss des Vorhabens |
| Erarbeitung eines DBV-Merkblatts und/oder -Heften | Anwendungshilfen für Planer, Bauunternehmen und Bauherren | DBV-Merkblatt „Frischbetonverbundsysteme“ | nach Abschluss des Vorhabens |
| Übernahme in Vorlesungen | Schulung wissenschaftlichen Nachwuchses | TH Nürnberg, TU Braunschweig | nach Abschluss des Vorhabens |

| Maßnahme | Ziel | Ort/Rahmen | Datum/Zeitraum |
|---|--|---|------------------------------|
| Veröffentlichung in deutschsprachigen Fachzeitschriften | Ergebnistransfer in Wirtschaft und Forschung | Bautechnik, Beton- und Stahlbetonbau | nach Abschluss des Vorhabens |
| Veröffentlichung auf Fachtagungen | Ergebnistransfer in Wirtschaft und Forschung | z. B. Nürnberger Bauseminar, Informationszentrum Beton usw. | nach Abschluss des Vorhabens |
| Bibliotheken | Informationen für die interessierte Fachöffentlichkeit | Veröffentlichung beim Fraunhofer IRB | nach Abschluss des Vorhabens |

Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Rahmen eines ZukunftBau-Forschungsvorhabens, sowie für die finanzielle, materielle und beratende Unterstützung der Industriepartner adicon® Gesellschaft für Bauwerksabdichtungen mbH, ankox GmbH, BPA GmbH über BAS-de GmbH, GCP Germany GmbH, H-Bau Technik GmbH, Max Frank GmbH & Co.KG, nik ing-sv-büro gmbh, Roland Wolf GmbH, Sika Deutschland GmbH, Volteco S.p.A über WBA Abdichtungssysteme GmbH sowie WFP GmbH. Weiterhin gilt besonderer Dank den Teilnehmenden der Umfragen, die für Baustellenversuche zur Verfügung gestellten Baustellen sowie die fachliche Unterstützung durch das Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB.

Schrifttum

Normen und Regelwerke

- [R1] DIN EN 12390-8:2017-09: Prüfung von Festbeton – Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck. Deutsche und englische Fassung EN 12390-8:2017-09.
- [R2] DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie). – Ausgabe Dezember 2017.
- [R3] Deutsches Institut für Bautechnik: Prüfgrundsätze zur Erteilung von allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnissen für Fugenabdichtungen in erdberührten Bauteilen aus Beton mit hohem Wassereindringwiderstand. PG-FBB. Oktober 2012.
- [R4] DIN 18533 Abdichtung von erdberührten Bauteilen. Normenreihe.
- [R5] DIN EN 13967:2017-08: Abdichtungsbahnen – Kunststoff- und Elastomerbahnen für die Bauwerksabdichtung gegen Bodenfeuchte und Wasser – Definition und Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 13967:2012+A1:2017.
- [R6] DIN EN 13969:2007-03: Abdichtungsbahnen – Bitumenbahnen für die Bauwerksabdichtung gegen Bodenfeuchte und Wasser – Definitionen und Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 13969:2004 + A1:2006.
- [R7] DIN SPEC 20000-202:2016-03: Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 202: Anwendungsnorm für Abdichtungsbahnen nach Europäischen Produktnormen zur Verwendung als Abdichtung von erdberührten Bauteilen, von Innenräumen und von Behältern und Becken.
- [R8] ASTM D5385: Standard Test Methods for Hydrostatic Pressure Resistance of Waterproofing Membranes. America Society for Testing and Materials. 1993.
- [R9] DIN EN 1928: Abdichtungsbahnen. Bitumen-, Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen – Bestimmung der Wasserdichtheit. Deutsche Fassung EN 1928:2000.
- [R10] DIN EN 1542:1999-07: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch.
- [R11] Deutsches Institut für Bautechnik: Prüfgrundsätze zur Erteilung von allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnissen für die Abdichtung erdberührter Bauteile aus Beton mit Frischbetonverbundbahnen; PG-FBVB; Entwurf: Oktober 2017.
- [R12] DIN EN 12390-2 Ber 1:2012-02: Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung EN 12390-2:2009; Berichtigung zu DIN EN 12390-2:2009-08.

- [R13] DIN EN 1107-2:2001-04: Abdichtungsbahnen – Bestimmung der Maßhaltigkeit – Teil 2: Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen, Deutsche Fassung EN 1107-2:2001.
- [R14] DIN EN 1107-1:1999-10: Abdichtungsbahnen – Bestimmung der Maßhaltigkeit – Teil 1: Bitumenbahnen für Dachabdichtungen, Deutsche Fassung EN 1107-1:1999.
- [R15] DIN EN ISO 291:2008-08: Kunststoffe – Normalklimate für Konditionierung und Prüfung (ISO 291:2008); Deutsche Fassung EN ISO 291:2008.
- [R16] DIN EN 12317-1:1999-11: Abdichtungsbahnen Teil 1: Bitumenbahnen für Dachabdichtungen; Bestimmung des Scherwiderstandes der Fügenähte; Deutsche Fassung EN 12317-1:1999.
- [R17] DIN EN 12317-2:2010-12: Abdichtungsbahnen – Bestimmung des Scherwiderstandes der Fügenähte – Teil 2: Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen; Deutsche Fassung EN 12317-2:2010.
- [R18] DBV-Merkblatt „Hochwertige Nutzung von Untergeschossen – Bauphysik und Raumklima“. – Fassung Januar 2009, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.

Weitere Literatur

- [1] DBV-Heft 44 Frischbetonverbundsysteme (FBV-Systeme) – Sachstand und Handlungsempfehlungen. – Fassung Oktober 2018. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.
- [2] Mechtcherine, Reinhardt: Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction. RILEM State-of-the-Art-Report by Technical Committee 225-SAP. RILEM 2012. Springer Verlag.
- [3] Beddoe, Robin; Springenschmid, Rupert: Feuchtetransport durch Bauteile aus Beton. – In: Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999), Heft 4, S. 158 –166.
- [4] Rucker, Petra; Beddoe, Robin: Transport von drückendem Wasser in Betonbauteilen. – In: Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 7, S. 414 – 426.
- [5] Positionspapier des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton zur DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“ – Feuchtetransport durch WU-Konstruktionen. – In: Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), Heft 11, S. 923 – 925.
- [6] Jacobs, Frank: Permeabilität und Porengefüge zementgebundener Werkstoffe. Dissertation ETH Nr. 10818.
- [7] Künzel, Hartwig M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart. Lehrstuhl für konstruktive Bauphysik. 1994.

- [8] Rucker-Gramm, Petra: Modellierung des Feuchte- und Salztransports unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung in zementgebundenen Baustoffen. Dissertation Technische Universität München. 2008.
- [9] Kastner, Tobias: Untersuchung und Bewertung der Abziehfestigkeit und des Eindringverhaltens von Zementleim in die Vliesverbundschicht von Frischbetonverbundsystemen. Unveröffentlichte Bachelorarbeit an der Technischen Hochschule Nürnberg. 2018.
- [10] Heinlein, Ulli: Frischbetonverbundsysteme – Untersuchungen zu Lagerungsbedingungen und zu betontechnologischen Einflussgrößen auf Feuchtemigration und Gefügestruktur. Unveröffentlichte Masterthesis an der Technischen Hochschule Nürnberg. 2018.
- [11] Abts, Georg: Kunststoff-Wissen für Einsteiger. – Carl Hanser Verlag GmbH & Co., März 2017.
- [12] Neroth, Günter; Vollenschaar, Dieter: Wendehorst Baustoffkunde. – Vieweg + Teubner Verlag/Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011.

Anhang A: Laboruntersuchungen

Anhang A1: Mikroskopische Schnitte

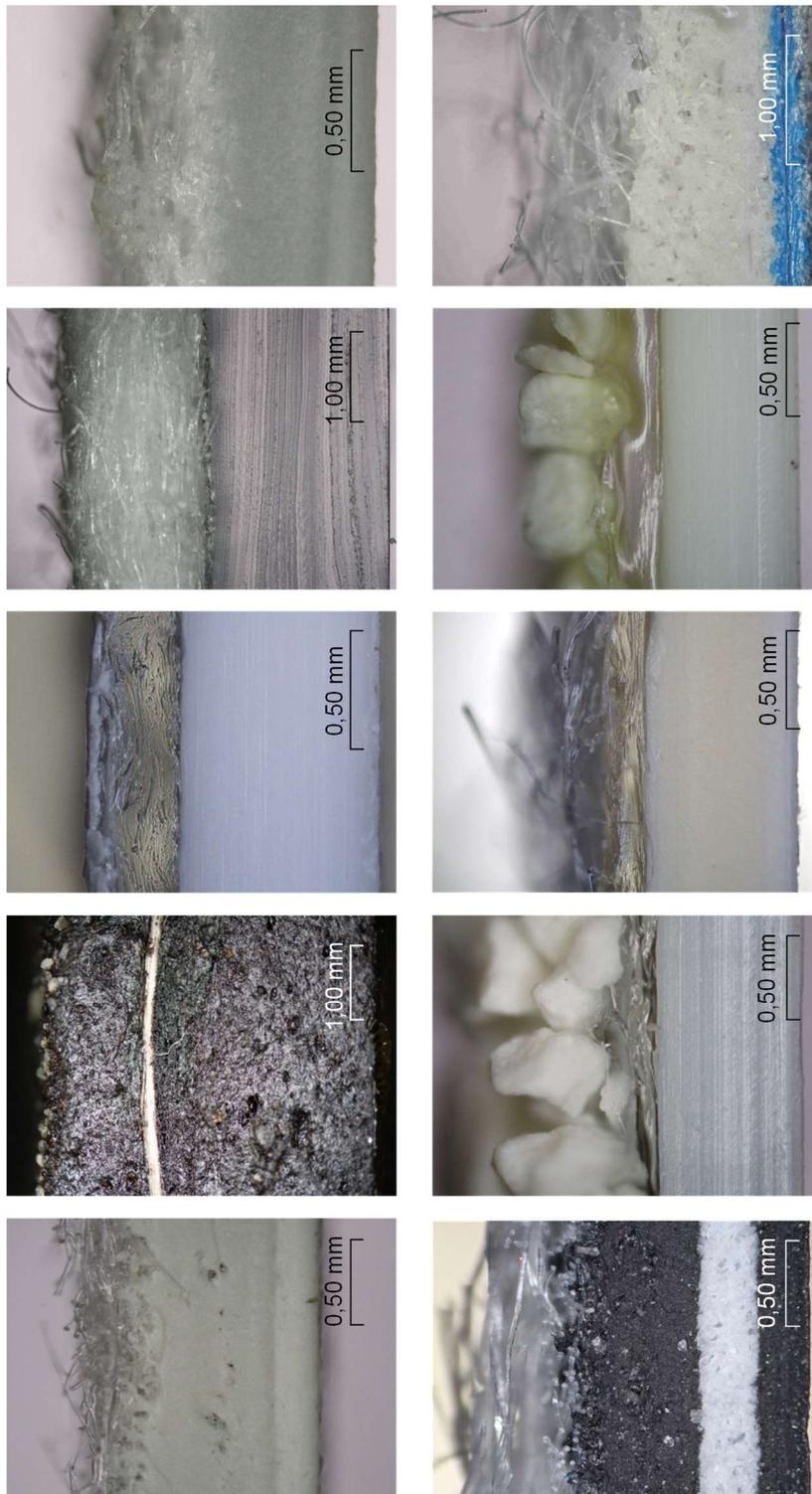


Bild A1-1. Mikroskopische Schnitte aller untersuchten FBV-Systeme

Anhang A2: Einzelergebnisse der Wassermigrationsprüfungen

Ergebnisse der Hinterlaufprüfungen (Teil 1) – Referenz und Einfluss der Verdichtung
 ($p = 5 \text{ bar}$, $t = 72 \text{ h}$; Angabe der maximalen lateralen Wasserbewegungen in der Verbundschicht e_l in mm, wobei $\max. e_l = 45 \text{ mm}$)

| Geprüfte Systeme | Einfluss der Verdichtung (Z1, A/B 32, F3/F4) | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|---|-----|------|-----|------|-----|--|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|-------|-----|
| | Referenz (Z1, A/B 32, F3/F4) | | | | | | Rüttelflasche ($\phi 55 \text{ mm}$) | | | | | | | | | |
| | 90 s | | 20 s | | 10 s | | 5 s | | 20 s | | 10 s | | 5 s | | 1-2 s | |
| S1 | 5 | 0 | 5 | 5 | 5 | 25 | / | / | / | / | 5 | 0 | / | / | / | / |
| S2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | / | 10 | 5 | / | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| S3 | >45 | >45 | >45 | >45 | >45 | >45 | >45 | >45 | >45 | >45 | 10 | >45 | >45 | >45 | >45 | >45 |
| S4 | 0 | 0 | / | 0 | 0 | / | 0 | 5 | / | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S5 | 0 | 0 | 0 | >45 | 0 | / | 15 | 5 | / | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S6 | 10 | 10 | 0 | 5 | 0 | 0 | / | / | / | / | 10 | 0 | / | / | / | / |
| S7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S8 | 30 | 20 | 10 | >45 | >45 | >45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 5 | >45 | >45 | >45 | >45 |
| S9 | 0 | 0 | 10 | 0 | 5 | 0 | 10 | 15 | 0 | 0 | >45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 |
| S10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Z1: CEM II/A-LI 32,5 R (Schwenk Zement, Werk Bernburg)
 Z2: CEM III/A 32,5 N-LH (Heidelberger Zement, Werk Burglengenfeld)
 A/B 32: Zuschlag aus quarzitischem Rundkorn mit GK 32 mm
 F3/F4: Konsistenz wurde auf ein Ausbreitmaß von 47 – 49 cm eingestellt

Ergebnisse der Hinterlaufprüfungen (Teil 2) – Einfluss Größtkorn, Konsistenz und Zement

($p = 5 \text{ bar}$, $t = 72 \text{ h}$; Angabe der maximalen lateralen Wasserbewegungen in der Verbundschicht e_l in mm, wobei max. $e_l = 45 \text{ mm}$)

| Geprüfte Systeme | Einfluss des Größtkorns und der Konsistenz (Z1, Verdichtung 10 s bzw. 20 s RT) | | | | | | Einfluss Zement Z2 (A/B 32, 10 bzw. 20 s RT) | | |
|------------------|---|------|----|----------|------|------|---|------|------|
| | GK 16 mm | | | GK 32 mm | | | GK 32 mm | | |
| | F2/3 | F3/4 | F5 | F3/4 | F5 | F5 | F3/4 | F5 | F5 |
| S1 | 5 | 10 | / | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 |
| | 10 | 20 | | 10 | 5 | 0 | > 45 | 0 | 0 |
| | 10 | 5 | | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 |
| S2 | > 45 | > 45 | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S3 | 0 | 10 | / | 5 | 0 | 10 | 5 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S4 | > 45 | > 45 | / | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S5 | 0 | 10 | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S6 | 0 | 10 | / | 5 | 0 | 10 | 15 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S7 | > 45 | > 45 | / | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 | > 45 |
| | 5 | 10 | | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S8 | 5 | 10 | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S9 | 0 | 0 | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S10 | 0 | 0 | / | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Z1: CEM II/A-LL 32,5 R (Schwenk Zement, Werk Bernburg)
 Z2: CEM III/A 32,5 N-LH (Heidelberger Zement, Werk Burglengenfeld)

Ergebnisse der Hinterlaufprüfungen (Teil 3) – Einfluss der Prüfdauer

($p = 5$ bar, $t = 3, 7$ bzw. 28 d)

| Geprüfte Systeme | Prüfdauer 3 Tage | | 3 Tage (aus vorherigen Untersuchungen) | | | Mittelwert $e_{l,m}$ 3 d | Prüfdauer 7 Tage | | | Mittelwert $e_{l,m}$ 7 d | Prüfdauer 28 Tage | | Mittelwert $e_{l,m}$ 28 d |
|------------------|------------------|---|--|----|----|--------------------------|------------------|----|----|--------------------------|-------------------|----|---------------------------|
| | 10 | 5 | 20 | 10 | 5 | | 10 | 0 | 15 | | 10 | 5 | |
| S2 (*) | 10 | 5 | 20 | 10 | 5 | 10 | 0 | 15 | 10 | 5 | 0 | 10 | 5,0 |
| S9 (*) | 0 | 5 | 5 | 10 | 15 | 25 | 15 | 0 | 0 | 20 | > 45 | 0 | 15,0 |

(*) Herstellbedingungen: Verdichtung Rütteltisch $t = 5$ s; Z1; Kons. F3/F4; A/B 32

Ergebnisse der Hinterlaufprüfungen (Teil 4) – Einfluss der Prüfdrucksteigerung bzw. Zeitpunkt der Farbstoffzugabe (Beginn Messzeitraum) auf FBVS mit Quellstoffen

($p = 5$ bar, $t = 28$ d; Angabe der maximalen lateralen Wasserbewegungen in der Verbundschicht e_l in mm, wobei max. $e_l = 45$ mm)

| Geprüftes System | Prüfungsrandbedingungen | | Ergebnisse der Hinterlaufprüfung e_l in mm (Verdichtung 10 s RF, Z1, A/B 32, F3/F4) | | | | | Mittelwert der Hinterlaufprüfungen $e_{l,m}$ [mm] |
|------------------|--|---|---|------|----|------|------|---|
| | Drucksteigerung nach PG-FBB (mit sofortigem Messbeginn): $p_{max} = 5$ bar, Drucksteigerung in der 1. Wo. $\Delta p = 0,2$ bar/d bis $p = 1$ bar, in der 2. Wo. $\Delta p = 1,0$ bar/d bis $p = 5$ bar; Prüfung nach 28 d | Drucksteigerung nach PG-FBB (mit späterer Zugabe des Farbstoffs bzw. mit „Vorquellung“): 1. Phase: Steigerung des Drucks nach PG-FBB auf $p = 5$ bar ohne Farbstoff (Vorquellung) 2. Phase: Zugabe Farbstoff, $p = 5$ bar, Prüfung nach 14 d (insg. Dauer $t = 28$ d) | 20 | > 45 | 40 | > 45 | > 45 | |
| S3 | | | 20 | > 45 | 40 | > 45 | > 45 | 40 |
| S3 | | | > 45 | > 45 | 30 | > 45 | 0 | 35 |

Anhang A3: Einzelergebnisse der Porositätsuntersuchungen

| Typ A1 | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------|-----------|---------|-----------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------|--|
| Nr. der Scheibe | Dicke [mm] | Masse [g] | | Tauchwägung [g] | Höhe im Bohrkern [mm] | Vol. gesamt [cm ³] | Vol. Poren [cm ³] | Porosität [Vol.-%] | Reindichte [Mg/m ³] | Rohdichte [Mg/m ³] | |
| | | Trocken | Nass | | | | | | | | |
| 1 | 10,3 | 363,29 | 398,39 | 225,87 | 250,0 | 172,87 | 35,17 | 20,35 | 2,64 | 2,10 | |
| 2 | 10,4 | 391,7 | 416,83 | 243,36 | 235,4 | 173,82 | 25,18 | 14,49 | 2,64 | 2,25 | |
| 3 | 10,2 | 386,07 | 408,55 | 239,85 | 220,9 | 169,04 | 22,53 | 13,33 | 2,64 | 2,28 | |
| 4 | 10,3 | 398,44 | 420,52 | 248,05 | 206,5 | 172,82 | 22,12 | 12,80 | 2,64 | 2,31 | |
| 5 | 10,7 | 401,6 | 423,03 | 249,94 | 191,8 | 173,44 | 21,47 | 12,38 | 2,64 | 2,32 | |
| 6 | 10,5 | 407,4 | 431,23 | 253,17 | 177,0 | 178,42 | 23,88 | 13,38 | 2,64 | 2,28 | |
| 7 | 10,1 | 375,02 | 397,13 | 233,26 | 162,5 | 164,20 | 22,15 | 13,49 | 2,64 | 2,28 | |
| 8 | 12,5 | 486,48 | 514,44 | 302,31 | 147,0 | 212,56 | 28,02 | 13,18 | 2,64 | 2,29 | |
| 9 | 31,4 | 1253,94 | 1319,35 | 779,86 | 120,8 | 540,57 | 65,54 | 12,12 | 2,64 | 2,32 | |
| 10 | 11,3 | 450,53 | 472,1 | 280,68 | 95,3 | 191,80 | 21,61 | 11,27 | 2,65 | 2,35 | |
| 11 | 10,6 | 412,73 | 434,62 | 257,58 | 80,1 | 177,39 | 21,93 | 12,36 | 2,65 | 2,33 | |
| 12 | 10,7 | 428,66 | 449,79 | 267,48 | 65,3 | 182,68 | 21,17 | 11,59 | 2,65 | 2,35 | |
| 13 | 11,4 | 465,87 | 486,2 | 290,3 | 50,0 | 196,29 | 20,37 | 10,38 | 2,65 | 2,37 | |
| 14 | 10,6 | 432,58 | 450,74 | 269,34 | 34,8 | 181,76 | 18,20 | 10,01 | 2,64 | 2,38 | |
| 15 | 10,6 | 420,47 | 438,1 | 261,52 | 20,0 | 176,93 | 17,67 | 9,98 | 2,64 | 2,38 | |
| 16 | 10,5 | 424,5 | 441,26 | 263,91 | 5,3 | 177,71 | 16,79 | 9,45 | 2,64 | 2,39 | |

| Typ A2 | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------|-----------|---------|-----------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------------|-----------|
| Nr. der Scheibe | Dicke [mm] | Masse [g] | | Tauchwägung [g] | Höhe im Bohrkern [mm] | Vol. gesamt [cm ³] | Vol. Poren [cm ³] | Porosität [Vol.-%] | Reindichte [Mg/m ³] | Rohdichte |
| | | Trocken | Nass | | | | | | | |
| 1 | 9,2 | 337,06 | 366,18 | 209,28 | 250,0 | 157,21 | 29,18 | 18,6 | 2,63 | 2,14 |
| 2 | 9,0 | 333,52 | 356,29 | 206,83 | 237,3 | 149,76 | 22,82 | 15,2 | 2,63 | 2,23 |
| 3 | 9,5 | 354,59 | 376,56 | 220,01 | 224,4 | 156,86 | 22,01 | 14,0 | 2,63 | 2,26 |
| 4 | 10,7 | 408,38 | 432,76 | 253,07 | 210,7 | 180,05 | 24,43 | 13,6 | 2,62 | 2,27 |
| 5 | 9,4 | 355,62 | 375,79 | 221,21 | 196,9 | 154,89 | 20,21 | 13,0 | 2,64 | 2,30 |
| 6 | 9,4 | 343,23 | 365,48 | 213,3 | 183,9 | 152,48 | 22,29 | 14,6 | 2,64 | 2,25 |
| 7 | 9,1 | 352,1 | 372,53 | 218,88 | 171,0 | 153,96 | 20,47 | 13,3 | 2,64 | 2,29 |
| 8 | 9,7 | 344,89 | 367,43 | 213,5 | 158,0 | 154,24 | 22,59 | 14,6 | 2,62 | 2,24 |
| 9 | 35,4 | 1360,34 | 1446,11 | 841,93 | 131,9 | 605,39 | 85,94 | 14,2 | 2,62 | 2,25 |
| 10 | 10,1 | 383,11 | 407,52 | 238,06 | 105,5 | 169,80 | 24,46 | 14,4 | 2,64 | 2,26 |
| 11 | 10,7 | 429,24 | 452,22 | 267,23 | 91,4 | 185,36 | 23,03 | 12,4 | 2,64 | 2,32 |
| 12 | 10,8 | 419,64 | 441,79 | 260,9 | 77,0 | 181,25 | 22,19 | 12,2 | 2,64 | 2,32 |
| 13 | 10,8 | 437,02 | 456,84 | 272,83 | 62,6 | 184,38 | 19,86 | 10,8 | 2,66 | 2,37 |
| 14 | 11,2 | 433,53 | 453,21 | 270,03 | 48,0 | 183,55 | 19,72 | 10,7 | 2,65 | 2,36 |
| 15 | 10,4 | 404,25 | 422,24 | 251,3 | 33,6 | 171,28 | 18,03 | 10,5 | 2,64 | 2,36 |
| 16 | 10,4 | 424,44 | 442,64 | 264,24 | 19,5 | 178,76 | 18,24 | 10,2 | 2,64 | 2,37 |
| 17 | 10,68 | 427,58 | 445,37 | 265,81 | 5,3 | 179,92 | 17,83 | 9,9 | 2,64 | 2,38 |

| Typ A3 | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------|-----------|---------|-----------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|-----------|
| Nr. der Scheibe | Dicke [mm] | Masse [g] | | Tauchwägung [g] | Höhe im Bohrkern [mm] | Vol. gesamt [cm ³] | Vol. Poren [cm ³] | Porosität [Vol.-%] | Reindichte | | Rohdichte |
| | | Trocken | Nass | | | | | | [Mg/m ³] | [Mg/m ³] | |
| 1 | 10,5 | 362,2 | 400,25 | 224,45 | 250,0 | 176,15 | 38,13 | 21,6 | 2,62 | 2,06 | |
| 2 | 10,9 | 390,56 | 420,65 | 241,51 | 234,9 | 179,50 | 30,15 | 16,8 | 2,62 | 2,18 | |
| 3 | 10,9 | 406,44 | 433,07 | 251,52 | 219,7 | 181,91 | 26,68 | 14,7 | 2,62 | 2,23 | |
| 4 | 11,3 | 429,81 | 454,56 | 266,33 | 204,2 | 188,61 | 24,80 | 13,1 | 2,62 | 2,28 | |
| 5 | 10,9 | 411,99 | 437,59 | 255,16 | 188,8 | 182,80 | 25,65 | 14,0 | 2,62 | 2,25 | |
| 6 | 11,6 | 452,75 | 477,44 | 280,7 | 173,1 | 197,13 | 24,74 | 12,5 | 2,63 | 2,30 | |
| 7 | 10,4 | 400,97 | 424,09 | 249,12 | 157,8 | 175,32 | 23,17 | 13,2 | 2,64 | 2,29 | |
| 8 | 39,5 | 1562,44 | 1643,83 | 970,78 | 128,5 | 674,40 | 81,55 | 12,1 | 2,64 | 2,32 | |
| 9 | 11,8 | 465,02 | 489,6 | 288,96 | 98,5 | 201,04 | 24,63 | 12,3 | 2,64 | 2,31 | |
| 10 | 11,3 | 441,28 | 462,3 | 275,29 | 82,6 | 187,38 | 21,06 | 11,2 | 2,65 | 2,35 | |
| 11 | 11,6 | 454,57 | 475,87 | 282,94 | 66,7 | 193,32 | 21,34 | 11,0 | 2,64 | 2,35 | |
| 12 | 10,4 | 401,35 | 419,32 | 250,17 | 51,4 | 169,49 | 18,01 | 10,6 | 2,65 | 2,37 | |
| 13 | 11,4 | 436,94 | 457,68 | 271,97 | 36,1 | 186,08 | 20,78 | 11,2 | 2,64 | 2,35 | |
| 14 | 10,8 | 436,01 | 454,41 | 272,56 | 20,7 | 182,21 | 18,44 | 10,1 | 2,66 | 2,39 | |
| 15 | 10,9 | 436,59 | 457,4 | 271,45 | 5,5 | 186,32 | 20,85 | 11,2 | 2,64 | 2,34 | |

| Typ A4 | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------|-----------|---------|-----------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------------|-----------|--|
| Nr. der Scheibe | Dicke [mm] | Masse [g] | | Tauchwägung [g] | Höhe im Bohrkern [mm] | Vol. gesamt [cm ³] | Vol. Poren [cm ³] | Porosität [Vol.-%] | Reindichte [Mg/m ³] | Rohdichte | |
| | | Trocken | Nass | | | | | | | | |
| 1 | 9,9 | 327,62 | 365,7 | 203,45 | 250,1 | 162,58 | 38,16 | 23,5 | 2,63 | 2,02 | |
| 2 | 10,1 | 365,4 | 395,38 | 226,33 | 235,3 | 169,39 | 30,04 | 17,7 | 2,62 | 2,16 | |
| 3 | 10,6 | 404,83 | 431,85 | 251,11 | 220,2 | 181,10 | 27,07 | 14,9 | 2,63 | 2,24 | |
| 4 | 10,5 | 390,76 | 415,22 | 242,73 | 204,9 | 172,84 | 24,51 | 14,2 | 2,63 | 2,26 | |
| 5 | 11,1 | 420,02 | 446,97 | 260,17 | 189,4 | 187,17 | 27,00 | 14,4 | 2,62 | 2,24 | |
| 6 | 11,5 | 429,12 | 456,65 | 266,18 | 173,3 | 190,85 | 27,59 | 14,5 | 2,63 | 2,25 | |
| 7 | 11,6 | 442,27 | 470,29 | 273,91 | 157,0 | 196,77 | 28,08 | 14,3 | 2,62 | 2,25 | |
| 8 | 35,3 | 1383,21 | 1461,02 | 857,23 | 128,8 | 605,00 | 77,97 | 12,9 | 2,62 | 2,29 | |
| 9 | 11,6 | 456,8 | 481,79 | 284,23 | 100,6 | 197,96 | 25,04 | 12,6 | 2,64 | 2,31 | |
| 10 | 11,1 | 426,99 | 449,12 | 267,05 | 84,5 | 182,43 | 22,17 | 12,2 | 2,66 | 2,34 | |
| 11 | 11,4 | 452,45 | 474,64 | 282,11 | 68,5 | 192,92 | 22,23 | 11,5 | 2,65 | 2,35 | |
| 12 | 11,5 | 415,85 | 434,8 | 259,42 | 52,3 | 175,73 | 18,99 | 10,8 | 2,65 | 2,37 | |
| 13 | 11,0 | 441,87 | 462 | 275,86 | 36,3 | 186,51 | 20,17 | 10,8 | 2,66 | 2,37 | |
| 14 | 11,2 | 460,94 | 478,88 | 287,65 | 20,5 | 191,61 | 17,98 | 9,4 | 2,65 | 2,41 | |
| 15 | 10,1 | 410,31 | 425,7 | 255,5 | 5,1 | 170,54 | 15,42 | 9,0 | 2,65 | 2,41 | |

| Typ A5 | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------------|-----------|---------|-----------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|-----------|
| Nr. der Scheibe | Dicke [mm] | Masse [g] | | Tauchwägung [g] | Höhe im Bohrkern [mm] | Vol. gesamt [cm ³] | Vol. Poren [cm ³] | Porosität [Vol.-%] | Reindichte | | Rohdichte |
| | | Trocken | Nass | | | | | | [Mg/m ³] | [Mg/m ³] | |
| 1 | 9,9 | 336,74 | 374,37 | 209,33 | 250,0 | 165,37 | 37,71 | 22,8 | 2,64 | 2,04 | |
| 2 | 9,3 | 330,54 | 357,19 | 205,04 | 236,0 | 152,45 | 26,70 | 17,5 | 2,63 | 2,17 | |
| 3 | 10,0 | 374,89 | 399,79 | 232,75 | 222,0 | 167,37 | 24,95 | 14,9 | 2,63 | 2,24 | |
| 4 | 11,9 | 465,41 | 492,57 | 289,53 | 206,7 | 203,45 | 27,21 | 13,4 | 2,64 | 2,29 | |
| 5 | 12,4 | 480,47 | 508,16 | 298,82 | 190,2 | 209,76 | 27,75 | 13,2 | 2,64 | 2,29 | |
| 6 | 10,6 | 411,44 | 433,71 | 256,03 | 174,3 | 178,04 | 22,31 | 12,5 | 2,64 | 2,31 | |
| 7 | 10,1 | 387,61 | 410,5 | 241,12 | 159,6 | 169,72 | 22,94 | 13,5 | 2,64 | 2,28 | |
| 8 | 35,6 | 1401,98 | 1480,08 | 870,36 | 132,4 | 610,94 | 78,26 | 12,8 | 2,63 | 2,29 | |
| 9 | 10,9 | 431,54 | 451,91 | 269,35 | 104,8 | 182,93 | 20,41 | 11,2 | 2,66 | 2,36 | |
| 10 | 12,4 | 498,46 | 521,1 | 310,52 | 88,8 | 211,00 | 22,69 | 10,8 | 2,65 | 2,36 | |
| 11 | 12,6 | 498,74 | 522,52 | 311,31 | 71,9 | 211,63 | 23,83 | 11,3 | 2,66 | 2,36 | |
| 12 | 11,4 | 469,37 | 489,1 | 293,55 | 55,5 | 195,94 | 19,77 | 10,1 | 2,66 | 2,40 | |
| 13 | 10,6 | 432,49 | 450,65 | 270,55 | 40,1 | 180,46 | 18,20 | 10,1 | 2,67 | 2,40 | |
| 14 | 10,6 | 426,96 | 443,61 | 266,88 | 25,2 | 177,08 | 16,68 | 9,4 | 2,66 | 2,41 | |
| 15 | 11,8 | 476,32 | 493,74 | 297,93 | 5,9 | 196,20 | 17,45 | 8,9 | 2,66 | 2,43 | |

| Referenzprobe - komplett beschichtet (Typ B) | | | | | | | | | | |
|--|------------|-----------|---------|-----------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------------|-----------|
| Nr. der Scheibe | Dicke [mm] | Masse [g] | | Tauchwägung [g] | Höhe im Bohrkern [mm] | Vol. gesamt [cm ³] | Vol. Poren [cm ³] | Porosität [Vol.-%] | Reindichte [Mg/m ³] | Rohdichte |
| | | Trocken | Nass | | | | | | | |
| 1 | 9,5 | 305,26 | 336,83 | 188,55 | 250,0 | 148,58 | 31,63 | 21,3 | 2,61 | 2,05 |
| 2 | 10,5 | 370,04 | 397,37 | 228,49 | 235,7 | 169,22 | 27,38 | 16,2 | 2,61 | 2,19 |
| 3 | 11,1 | 414,58 | 440,87 | 257,08 | 220,6 | 184,16 | 26,34 | 14,3 | 2,63 | 2,25 |
| 4 | 10,3 | 392,86 | 416,93 | 244,19 | 205,6 | 173,09 | 24,12 | 13,9 | 2,64 | 2,27 |
| 5 | 11,4 | 427,31 | 452,76 | 265,67 | 190,4 | 187,46 | 25,50 | 13,6 | 2,64 | 2,28 |
| 6 | 10,6 | 401,95 | 424,44 | 250,5 | 175,1 | 174,29 | 22,54 | 12,9 | 2,65 | 2,31 |
| 7 | 11,3 | 429,1 | 452,76 | 268,21 | 159,9 | 184,92 | 23,71 | 12,8 | 2,66 | 2,32 |
| 8 | 43,4 | 1676,61 | 1767,33 | 1041,99 | 128,2 | 726,79 | 90,90 | 12,5 | 2,64 | 2,31 |
| 9 | 12,3 | 453,55 | 478,89 | 282,04 | 96,1 | 197,24 | 25,39 | 12,9 | 2,64 | 2,30 |
| 10 | 11,7 | 429,1 | 451,09 | 267,55 | 79,8 | 183,91 | 22,03 | 12,0 | 2,65 | 2,33 |
| 11 | 10,8 | 429,29 | 447,6 | 269,01 | 64,2 | 178,95 | 18,35 | 10,3 | 2,67 | 2,40 |
| 12 | 11,6 | 447,3 | 467,04 | 279,1 | 48,7 | 188,32 | 19,78 | 10,5 | 2,65 | 2,38 |
| 13 | 10,8 | 416,91 | 434,6 | 260,72 | 33,2 | 174,23 | 17,73 | 10,2 | 2,66 | 2,39 |
| 14 | 10,4 | 409,08 | 425,15 | 256,07 | 18,3 | 169,42 | 16,10 | 9,5 | 2,67 | 2,41 |
| 15 | 8,8 | 356,7 | 371,5 | 223,13 | 4,4 | 148,67 | 14,83 | 10,0 | 2,67 | 2,40 |

| Referenzprobe - einseitig unbeschichtet (Typ C) | | | | | | | | | | |
|---|------------|-----------|---------|-----------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------------|-----------|
| Nr. der Scheibe | Dicke [mm] | Masse [g] | | Tauchwägung [g] | Höhe im Bohrkern [mm] | Vol. gesamt [cm ³] | Vol. Poren [cm ³] | Porosität [Vol.-%] | Reindichte [Mg/m ³] | Rohdichte |
| | | Trocken | Nass | | | | | | | |
| 1 | 8,5 | 299,07 | 326,72 | 185,92 | 249,9 | 141,08 | 27,71 | 19,6 | 2,64 | 2,12 |
| 2 | 10,6 | 396,73 | 421,93 | 246,62 | 236,6 | 175,66 | 25,25 | 14,4 | 2,64 | 2,26 |
| 3 | 11,4 | 439,17 | 463,98 | 273 | 221,8 | 191,36 | 24,86 | 13,0 | 2,64 | 2,29 |
| 4 | 12,2 | 448,78 | 474,3 | 278,89 | 206,2 | 195,80 | 25,57 | 13,1 | 2,64 | 2,29 |
| 5 | 12,4 | 468,78 | 494,95 | 291,63 | 190,1 | 203,73 | 26,22 | 12,9 | 2,64 | 2,30 |
| 6 | 13,0 | 459,21 | 484,28 | 285,27 | 173,7 | 199,41 | 25,12 | 12,6 | 2,63 | 2,30 |
| 7 | 11,3 | 427,44 | 452,1 | 265,57 | 157,7 | 186,90 | 24,71 | 13,2 | 2,64 | 2,29 |
| 8 | 26,7 | 1041,64 | 1102,91 | 645,52 | 134,9 | 458,31 | 61,39 | 13,4 | 2,62 | 2,27 |
| 9 | 13,5 | 495,44 | 525,13 | 307,55 | 110,9 | 218,02 | 29,75 | 13,6 | 2,63 | 2,27 |
| 10 | 11,4 | 446 | 471,07 | 276,8 | 94,7 | 194,66 | 25,12 | 12,9 | 2,63 | 2,29 |
| 11 | 11,4 | 427,15 | 450,67 | 265,37 | 79,5 | 185,67 | 23,57 | 12,7 | 2,64 | 2,30 |
| 12 | 11,0 | 443,85 | 465,22 | 276,71 | 64,5 | 188,89 | 21,41 | 11,3 | 2,65 | 2,35 |
| 13 | 10,5 | 405,84 | 425,51 | 253,05 | 49,9 | 172,81 | 19,71 | 11,4 | 2,65 | 2,35 |
| 14 | 11,1 | 423,59 | 442,85 | 264,34 | 35,3 | 178,87 | 19,30 | 10,8 | 2,65 | 2,37 |
| 15 | 11,8 | 451,3 | 471,82 | 281,18 | 20,1 | 191,02 | 20,56 | 10,8 | 2,65 | 2,36 |
| 16 | 10,4 | 398,09 | 416,71 | 248,46 | 5,2 | 168,59 | 18,66 | 11,1 | 2,66 | 2,36 |

| Referenzprobe - unbeschichtet (Typ D) | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------------|-----------|---------|-----------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|-----------|
| Nr. der Scheibe | Dicke [mm] | Masse [g] | | Tauchwägung [g] | Höhe im Bohrkern [mm] | Vol. gesamt [cm ³] | Vol. Poren [cm ³] | Porosität [Vol.-%] | Reindichte | | Rohdichte |
| | | Trocken | Nass | | | | | | [Mg/m ³] | [Mg/m ³] | |
| 1 | 9,3 | 336,71 | 368,33 | 210,21 | 250,1 | 158,44 | 31,68 | 20,0 | 2,66 | 2,66 | 2,13 |
| 2 | 10,2 | 376,31 | 400,72 | 234,75 | 235,7 | 166,30 | 24,46 | 14,7 | 2,65 | 2,65 | 2,26 |
| 3 | 10,6 | 363,8 | 385,83 | 226,82 | 220,6 | 159,33 | 22,07 | 13,9 | 2,65 | 2,65 | 2,28 |
| 4 | 10,3 | 370,18 | 392,28 | 230,32 | 205,5 | 162,28 | 22,14 | 13,6 | 2,64 | 2,64 | 2,28 |
| 5 | 11,5 | 434,06 | 459,15 | 270,52 | 190,0 | 189,01 | 25,14 | 13,3 | 2,65 | 2,65 | 2,30 |
| 6 | 11,9 | 450,7 | 475,75 | 280,83 | 173,7 | 195,31 | 25,10 | 12,9 | 2,65 | 2,65 | 2,31 |
| 7 | 12,0 | 452 | 478,18 | 282,46 | 157,1 | 196,11 | 26,23 | 13,4 | 2,66 | 2,66 | 2,30 |
| 8 | 29,5 | 1156,67 | 1226,94 | 718,53 | 131,7 | 509,43 | 70,41 | 13,8 | 2,63 | 2,63 | 2,27 |
| 9 | 12,7 | 498,73 | 524,95 | 310,93 | 105,9 | 214,45 | 26,27 | 12,3 | 2,65 | 2,65 | 2,33 |
| 10 | 13,0 | 480,2 | 505,26 | 299,3 | 88,4 | 206,37 | 25,11 | 12,2 | 2,65 | 2,65 | 2,33 |
| 11 | 11,3 | 417,97 | 439,64 | 261,09 | 71,7 | 178,91 | 21,71 | 12,1 | 2,66 | 2,66 | 2,34 |
| 12 | 12,4 | 459,58 | 484,83 | 286,49 | 55,1 | 198,74 | 25,30 | 12,7 | 2,65 | 2,65 | 2,31 |
| 13 | 12,6 | 446,53 | 470,46 | 278,45 | 38,0 | 192,39 | 23,98 | 12,5 | 2,65 | 2,65 | 2,32 |
| 14 | 11,2 | 447,85 | 472,18 | 279,59 | 21,4 | 192,98 | 24,38 | 12,6 | 2,66 | 2,66 | 2,32 |
| 15 | 11,2 | 443,22 | 467,76 | 277,37 | 5,6 | 190,77 | 24,59 | 12,9 | 2,67 | 2,67 | 2,32 |

Anhang A4: Einzelergebnisse der Feuchteuntersuchungen

| A1 | | | | | |
|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|---|
| Scheiben- kennung | Mittlere Höhe im Zylinder [cm] | Masse Probe feucht m_w [g] | Masse Probe trocken m_d [g] | Differenzgewicht $\Delta m = m_w - m_d$ [g] | Feuchtegehalt $w = \Delta m / m_d$ [%] |
| A1/2-1 | 22,9 | 1561,72 | 1531,67 | 30,05 | 2,0 |
| A1/2-2 | 18,8 | 1745,27 | 1684,87 | 60,40 | 3,6 |
| A1/2-3 | 14,6 | 1585,05 | 1516,1 | 68,95 | 4,5 |
| A1/2-4 | 10,4 | 1881,16 | 1800,29 | 80,87 | 4,5 |
| A1/2-5 | 6,3 | 1702,71 | 1637,03 | 65,68 | 4,0 |
| A1/2-6 | 2,1 | 1775,31 | 1715,29 | 60,02 | 3,5 |

| A2 | | | | | |
|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|---|
| Scheiben- kennung | Mittlere Höhe im Zylinder [cm] | Masse Probe feucht m_w [g] | Masse Probe trocken m_d [g] | Differenzgewicht $\Delta m = m_w - m_d$ [g] | Feuchtegehalt $w = \Delta m / m_d$ [%] |
| A2/3-1 | 22,9 | 1769,83 | 1727,28 | 42,55 | 2,5 |
| A2/3-2 | 18,8 | 1342,8 | 1297,18 | 45,62 | 3,5 |
| A2/3-3 | 14,6 | 1918,69 | 1842,15 | 76,54 | 4,2 |
| A2/3-4 | 10,4 | 1726,65 | 1659 | 67,65 | 4,1 |
| A2/3-5 | 6,3 | 1557,46 | 1504,08 | 53,38 | 3,5 |
| A2/3-6 | 2,1 | 1719,5 | 1661,74 | 57,76 | 3,5 |

| A3 | | | | | |
|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|---|
| Scheiben- kennung | Mittlere Höhe im Zylinder [cm] | Masse Probe feucht m_w [g] | Masse Probe trocken m_d [g] | Differenzgewicht $\Delta m = m_w - m_d$ [g] | Feuchtegehalt $w = \Delta m / m_d$ [%] |
| A3/3-1 | 22,9 | 1686,28 | 1644,56 | 41,72 | 2,5 |
| A3/3-2 | 18,8 | 1673,36 | 1616,61 | 56,75 | 3,5 |
| A3/3-3 | 14,6 | 1394,88 | 1337,2 | 57,68 | 4,3 |
| A3/3-4 | 10,4 | 2022,31 | 1942,37 | 79,94 | 4,1 |
| A3/3-5 | 6,3 | 1803,74 | 1736,88 | 66,86 | 3,8 |
| A3/3-6 | 2,1 | 1690,4 | 1634,19 | 56,21 | 3,4 |

| A4 | | | | | |
|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|---|
| Scheiben- kennung | Mittlere Höhe im Zylinder [cm] | Masse Probe feucht m_w [g] | Masse Probe trocken m_d [g] | Differenzgewicht $\Delta m = m_w - m_d$ [g] | Feuchtegehalt $w = \Delta m / m_d$ [%] |
| A4/2-1 | 22,9 | 1431,71 | 1399,48 | 32,23 | 2,3 |
| A4/2-2 | 18,8 | 1932,21 | 1868,14 | 64,07 | 3,4 |
| A4/2-3 | 14,6 | 1701,49 | 1631,83 | 69,66 | 4,3 |
| A4/2-4 | 10,4 | 1577,96 | 1516,03 | 61,93 | 4,1 |
| A4/2-5 | 6,3 | 1828,01 | 1762,8 | 65,21 | 3,7 |
| A4/2-6 | 2,1 | 1783,47 | 1728,46 | 55,01 | 3,2 |

| A5 | | | | | |
|----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|---|
| Scheiben- kennung | Mittlere Höhe im Zylinder [cm] | Masse Probe feucht m_w [g] | Masse Probe trocken m_d [g] | Differenzgewicht $\Delta m = m_w - m_d$ [g] | Feuchtegehalt $w = \Delta m / m_d$ [%] |
| A5/3-1 | 22,9 | 1400,74 | 1369,22 | 31,52 | 2,3 |
| A5/3-2 | 18,8 | 1971,81 | 1902,95 | 68,86 | 3,6 |
| A5/3-3 | 14,6 | 1665,49 | 1596,08 | 69,41 | 4,3 |
| A5/3-4 | 10,4 | 2038,89 | 1964,28 | 74,61 | 3,8 |
| A5/3-5 | 6,3 | 1603,23 | 1543,15 | 60,08 | 3,9 |
| A5/3-6 | 2,1 | 1639,61 | 1581,85 | 57,76 | 3,7 |

| Referenzprobe - komplett beschichtet (Typ B-2) | | | | | |
|---|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|---|
| Scheiben- kennung | Mittlere Höhe im Zylinder [cm] | Masse Probe feucht m_w [g] | Masse Probe trocken m_d [g] | Differenzgewicht $\Delta m = m_w - m_d$ [g] | Feuchtegehalt $w = \Delta m / m_d$ [%] |
| B2-1 | 22,9 | 2268,59 | 2152,42 | 116,17 | 5,4 |
| B2-2 | 18,8 | 1441,66 | 1374,89 | 66,77 | 4,9 |
| B2-3 | 14,6 | 1727,76 | 1648,5 | 79,26 | 4,8 |
| B2-4 | 10,4 | 1750,61 | 1670,35 | 80,26 | 4,8 |
| B2-5 | 6,3 | 1781,7 | 1703,59 | 78,11 | 4,6 |
| B2-6 | 2,1 | 1541,53 | 1482,23 | 59,30 | 4,0 |

| Referenzprobe - komplett beschichtet (Typ B-3) | | | | | |
|---|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|---|
| Scheiben- kennung | Mittlere Höhe im Zylinder [cm] | Masse Probe feucht m_w [g] | Masse Probe trocken m_d [g] | Differenzgewicht $\Delta m = m_w - m_d$ [g] | Feuchtegehalt $w = \Delta m / m_d$ [%] |
| B3-1 | 22,9 | 1806,02 | 1689,08 | 116,94 | 6,9 |
| B3-2 | 18,8 | 2112,94 | 2019,14 | 93,80 | 4,6 |
| B3-3 | 14,6 | 1412,07 | 1348,43 | 63,64 | 4,7 |
| B3-4 | 10,4 | 1797,89 | 1717,83 | 80,06 | 4,7 |
| B3-5 | 6,3 | 1954,52 | 1875,88 | 78,64 | 4,2 |
| B3-6 | 2,1 | 1536,45 | 1483,98 | 52,47 | 3,5 |

| Referenzprobe - einseitig unbeschichtet (Typ C) | | | | | |
|--|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|---|
| Scheiben- kennung | Mittlere Höhe im Zylinder [cm] | Masse Probe feucht m_w [g] | Masse Probe trocken m_d [g] | Differenzgewicht $\Delta m = m_w - m_d$ [g] | Feuchtegehalt $w = \Delta m / m_d$ [%] |
| C3-1 | 22,9 | 1355,87 | 1328,11 | 27,76 | 2,1 |
| C3-2 | 18,8 | 1859,28 | 1797,7 | 61,58 | 3,4 |
| C3-3 | 14,6 | 1385,62 | 1329,67 | 55,95 | 4,2 |
| C3-4 | 10,4 | 1923,13 | 1849,17 | 73,96 | 4,0 |
| C3-5 | 6,3 | 1914,81 | 1842,66 | 72,15 | 3,9 |
| C3-6 | 2,1 | 1573,55 | 1520,88 | 52,67 | 3,5 |

| Referenzprobe - unbeschichtet (Typ D) | | | | | |
|--|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|---|
| Scheiben- kennung | Mittlere Höhe im Zylinder [cm] | Masse Probe feucht m_w [g] | Masse Probe trocken m_d [g] | Differenzgewicht $\Delta m = m_w - m_d$ [g] | Feuchtegehalt $w = \Delta m / m_d$ [%] |
| D3-1 | 22,9 | 1449,99 | 1433,58 | 16,41 | 1,1 |
| D3-2 | 18,8 | 1384,13 | 1366,15 | 17,98 | 1,3 |
| D3-3 | 14,6 | 1614,61 | 1590,37 | 24,24 | 1,5 |
| D3-4 | 10,4 | 1916,61 | 1886,84 | 29,77 | 1,6 |
| D3-5 | 6,3 | 1831,98 | 1807,95 | 24,03 | 1,3 |
| D3-6 | 2,1 | 1436,22 | 1422,78 | 13,44 | 0,9 |

Anhang A5: Prüfung der lateralen Wassermigration an FBV-Systemen

1. Allgemeines

Die Prüfung der seitlichen Eindringtiefe von Wasserdruck in die Verbundschicht von Frischbetonverbundsystemen sowie der Nachweis der dichten Grenzschiicht kann nach verschiedenen Prüfverfahren bestimmt werden, bedarf aber vor allem einheitlicher Herstellbedingungen der Probekörper. Wesentliche, einflussgebende Herstellbedingungen wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Bauwerksabdichtung mit Frischbetonverbundfolie“ an der TH Nürnberg und der MPA Braunschweig bestimmt.

2. Probekörper

Die Probekörper bestehen aus einem FBVS auf einem Betonkörper aus wasserundurchlässigem Beton (gemäß DAfStb-WU-Richtlinie) und werden entsprechend den nachfolgenden Randbedingungen hergestellt. Die Probekörper müssen über eine mittige Perforation im FBVS verfügen, über die im Prüfablauf Wasserdruck auf die Verbundschicht aufgebracht werden kann.

Die Abmessungen der Probekörper richten sich nach dem gewählten Prüfverfahren, müssen aber in jedem Fall einen ungestörten Druckbereich (Bereich innerhalb einer Dichtung) von mindestens 40 mm ab dem Rand der Perforation in jede Richtung gewährleisten. Bei einer Perforation von $d = 25$ mm ergibt sich für eine Ringdichtung so beispielsweise ein Innendurchmesser von $d \geq 105$ mm. Beispielhafte Darstellungen der Wassermigrationsprüfung in Anlehnung an DIN EN 12390-8 sind in Bild A5.1 und A5.2 gegeben.

Die Perforation im FBVS muss so hergestellt werden, dass beim Betoneinbau kein Zementleim in die Perforation (bzw. von dort seitlich in eine Verbundschicht) eindringen kann. Die Perforation kann dafür nach dem Zeitraum der Wasserlagerung durch Bohren, oder vor dem Betoneinbau durch Stanzen des FBVS hergestellt werden. Im Falle des Bohrens ist vollständig durch das FBVS zu bohren (rd. 10 mm tief) und evtl. innenliegende Reste zu entfernen. Im Falle des Stanzens muss das ausgestanzte Stück vor Betoneinbau verkehrt herum in die Perforation eingelegt und fixiert werden, um die Perforation frei von Zementleim zu halten. Nach dem Ausschalen wird das ausgestanzte Stück wieder entfernt. Die Perforation ist mittig im FBVS anzuordnen. Der Durchmesser der Perforation ist so groß zu wählen, dass das Wasser ungehindert an die Verbundschicht herantreten kann. Ein üblicher Durchmesser der Perforation liegt zwischen 10 – 25 mm.

Das vorbereitete FBVS wird vor dem Betoneinbau in eine Schalung eingelegt, mit der Verbundschicht zum Frischbeton. Für die Herstellung der Proben ist ein Beton mit hohem Wassereindringwiderstand gemäß DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie) zu verwenden. Üblich ist ein w/z -Wert von 0,50 – 0,55 und ein Größtkorn von mindestens 16 mm. Die Frischbetonkonsistenz ist mindestens zu F3 zu wählen. Die Dicke bzw. Höhe der Proben sind je nach Prüfverfahren zu wählen, sollten aber mindestens eine Wasserundurchlässigkeit des Betons sicherstellen können. Orientierende Angaben zu den Probenabmessungen sind unter Punkt 3 in Abhängigkeit des Prüfverfahrens gegeben.

Die Verdichtung der Proben kann wahlweise realitätsnah mit einer Rüttelflasche und 2 s Verdichtungszeit erfolgen, oder mit einem Rütteltisch und 20 s Verdichtungszeit.

Je FBVS sind $n = 3$ Proben herzustellen. Die Proben sind bis zu einem Mindestalter von 28 Tagen in Übereinstimmung mit EN 12390-2 unter Wasser zu lagern.

3. Prüfverfahren

Die Prüfung der lateralen Wassermigration kann entsprechend den Folgend genannten Prüfverfahren erfolgen:

- Verfahren A: Prüfung in Anlehnung an DIN EN 1928
- Verfahren B: Prüfung in Anlehnung an DIN EN 12390-8
- Verfahren C: Prüfung in Anlehnung an ASTM D5385

Die Abmessungen der Probekörper richten sich auch nach dem gewählten Prüfverfahren. Bei der Prüfung in Anlehnung an DIN EN 1928 sind Platten mit den Abmessungen $L \times B \times D = 200 \times 100 \times 50$ mm bei einem Größtkorn von 16 mm üblich, bzw. Platten mit 200 mm Dicke bei einem Größtkorn von 32 mm. Bei der Prüfung in Anlehnung an DIN EN 12390-8 haben sich Probekörper mit den Abmessungen $L \times B \times D = 200 \times 200 \times 100$ mm bewährt. Bei den Prüfungen in Anlehnungen an ASTM D5385 können Proben mit den Abmessungen $L \times B \times D = 400 \times 200 \times 55$ mm verwendet werden.

4. Prüfregime und Bewertung

Die Probekörper sind nach Ende der Lagerungsdauer in das Prüfgerät des gewählten Prüfverfahrens einzubauen und anschließend mit Druck zu beaufschlagen.

Um nach Ende der Prüfung eine Bewertung der lateralen Wassermigration zu ermöglichen, hat es sich als geeignet erwiesen dem Prüfwasser einen Farbstoff oder fluoreszierenden Tracer in geringen Mengen zuzugeben. Die Zugabe darf die Eigenschaften des Wassers und des FBVS nicht wesentlich beeinflussen.

Der Prüfvorgang sieht anschließend die Steigerung des Wasserdrucks um 1 bar je Stunde vor, bis ein Maximaldruck von 5 bar erreicht ist. Dieser Wasserdruck wird anschließend 7 Tage lang gehalten. Wenn in diesem Zeitraum kein Wasseraustritt über die Probekörper hinaus zu beobachten war, werden die Proben stufenlos entlastet, ausgebaut und die Verbundschicht auf Wasserbewegungen geprüft. Dazu kann eine Probe entweder in Querrichtung mittig gebrochen, oder die Dichtschicht von der Probe flächig abgezogen werden. Wasserbewegungen können dann unter UV-Licht nachvollzogen und dokumentiert werden. Die maximale seitliche Wassermigration wird ab dem Lochrand der Perforation in Millimeter bestimmt.

Sollte im Zeitraum der Prüfung Wasser über den Probekörper hinaus austreten, so führt dies zum sofortigen Abbruch der Prüfung. Die Prüfung und der Nachweis der dichten Grenzschicht werden sind dann erneut für die darunterliegende Druckstufe durchzuführen. Tritt beispielsweise ein seitlicher Wasseraustritt bei einem Druck von 4 bar auf, wird die Prüfung mit einem Maximaldruck von 3 bar wiederholt.

Unmittelbar nach dem Ausbauen der Proben wird eine eventuelle Wasserbewegung in der Verbundschicht ermittelt und die maximale seitliche Wassermigration e_l ab dem Lochrand der Perforation in Millimetern bestimmt. Diese muss für jede Einzelprobe ≤ 30 mm betragen. Andernfalls ist die Einzelprüfung zu wiederholen oder der Nachweis der dichten Grenzschicht mit $n = 3$ Proben für die darunterliegende Druckstufe zu führen.

5. Angaben im Prüfbericht

Im Prüfbericht sind mindestens folgende Angaben zu machen:

- Identifizierung des FBVS
- Frischbetonkonsistenz
- Verdichtungsgerät und -dauer
- Gewähltes Prüfverfahren
- Angabe der Einzelwerte der Wassermigrationsprüfung
- Maximal möglicher Prüfdruck ohne seitliche Wasseraustritte und für seitliche Wassermigrationen $e_l \leq 30$ mm
- Jede Abweichung vom dargestellten Vorgehen

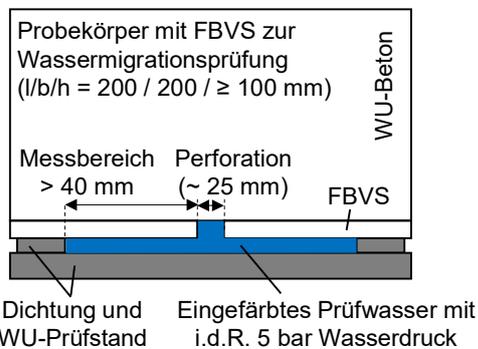


Bild A5-1. Probekörperaufbau und Anordnung im WU-Prüfstand beim Verfahren in Anlehnung an DIN EN 12390-8

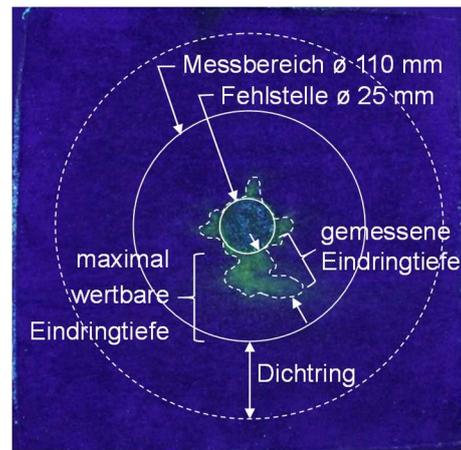


Bild A5-2. Visuelle Bewertung der Wassermigration im Verfahren nach DIN EN 12390-8 (hier unter UV-Licht)

Anhang A6: Einzelergebnisse der Untersuchungen zum Verbundverhaltenwerte – Haftzugwerte und Versagensbilder

1a. Tabelle: Beton 16/32 Cem III, 2 Tage Wert

| Beton 16/32 Cem III Charge 2 | 2 Tage Wert Betonierdatum | 2 Tage Wert Prüfdatum | Stempel1 N/mm ² | Stempel2 N/mm ² | Stempel3 N/mm ² | Stempel4 N/mm ² | Stempel5 N/mm ² | Mittelwert N/mm ² | Std Abw. N/mm ² | Verbund-mechanismus |
|------------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------|
| S5 | 26.09.2018 | 28.09.2018 | 0,47 | 0,42 | 0,41 | 0,42 | 0,43 | 0,43 | 0,022 | bituminös |
| S4 | 26.09.2018 | 28.09.2018 | 0,33 | 0,31 | 0,35 | 0,32 | 0,34 | 0,33 | 0,016 | kl.-ad |
| S7 | 26.09.2018 | 28.09.2018 | 0,21 | 0,22 | 0,24 | 0,21 | 0,23 | 0,22 | 0,013 | kl.-ad |
| S10 | 26.09.2018 | 28.09.2018 | 0,39 | 0,38 | 0,42 | 0,36 | 0,40 | 0,39 | 0,022 | kl.-ad |
| S6 | 26.09.2018 | 28.09.2018 | 0,43 | 0,42 | 0,39 | 0,39 | 0,40 | 0,40 | 0,017 | mech.-ad |
| S8 | 26.09.2018 | 28.09.2018 | 0,49 | 0,36 | 0,44 | 0,42 | 0,42 | 0,43 | 0,044 | mech.-ad |
| S2 | 26.09.2018 | 28.09.2018 | 0,34 | 0,40 | 0,28 | 0,33 | 0,27 | 0,32 | 0,051 | mech.-ad |
| S9 | 26.09.2018 | 28.09.2018 | 0,43 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,30 | 0,39 | 0,050 | mech.-ad |
| S3 | 26.09.2018 | 28.09.2018 | 0,29 | 0,31 | 0,25 | 0,26 | 0,28 | 0,28 | 0,023 | mech.-ad |
| S1 | 26.09.2018 | 28.09.2018 | 0,62 | 0,58 | 0,52 | 0,56 | 0,61 | 0,58 | 0,042 | mech.-ad-queill |

1a. Diagramm: Beton 16/32 Cem III, 2 Tage Wert

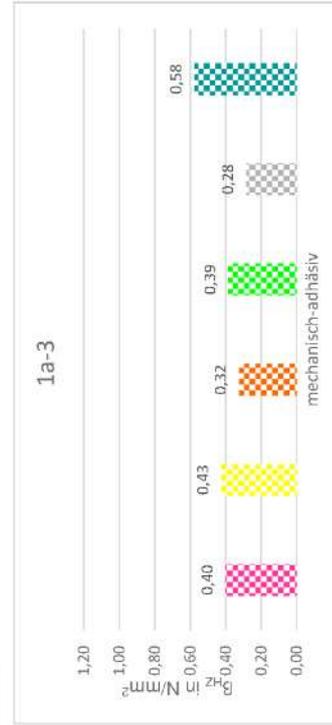
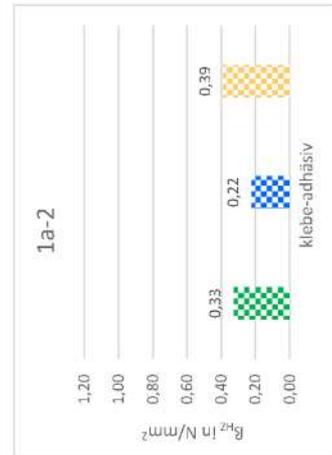
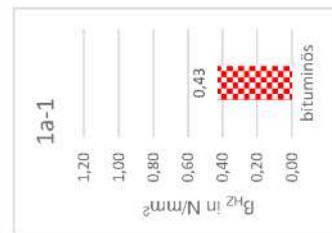
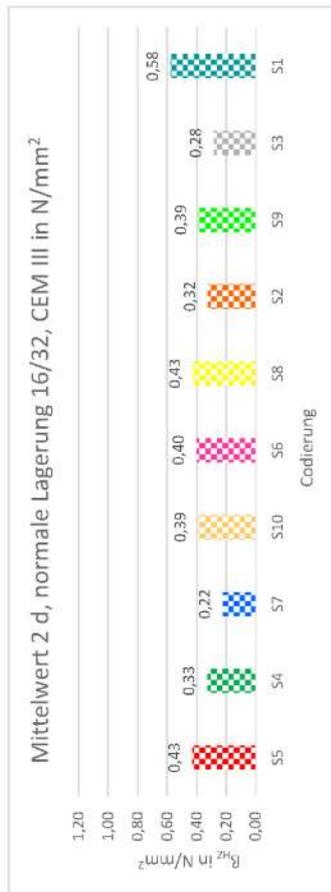


Bild A6-1. Haftzugfestigkeit – Beton 16/32 Cem III – 2-Tage-Werte

2a. Tabelle: Beton 16/32 Cem III, 7 Tage Wert

| Beton 16/32 Cem III Charge 2 | 7 Tage Wert Betonierdatum | 7 Tage Wert Prüfdatum | Stempel1 N/mm ² | Stempel2 N/mm ² | Stempel3 N/mm ² | Stempel4 N/mm ² | Stempel5 N/mm ² | Mittelwert N/mm ² | Std Abw. N/mm ² | Verbundmechanismus |
|------------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------|
| S5 | 29.06.2018 | 06.07.2018 | 0,63 | 0,55 | 0,52 | 0,59 | 0,53 | 0,56 | 0,045 | bituminös |
| S4 | 29.06.2018 | 06.07.2018 | 0,29 | 0,31 | 0,35 | 0,37 | 0,33 | 0,33 | 0,033 | kl.-ad |
| S7 | 29.06.2018 | 06.07.2018 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,34 | 0,35 | 0,37 | 0,027 | kl.-ad |
| S10 | 29.06.2018 | 06.07.2018 | 0,47 | 0,34 | 0,37 | 0,46 | 0,45 | 0,42 | 0,055 | kl.-ad |
| S6 | 29.06.2018 | 06.07.2018 | 1,03 | 1,04 | 1,04 | 1,01 | 1,00 | 1,02 | 0,017 | mech.-ad |
| S8 | 29.06.2018 | 06.07.2018 | 0,40 | 0,36 | 0,40 | 0,51 | 0,38 | 0,41 | 0,059 | mech.-ad |
| S2 | 29.06.2018 | 06.07.2018 | 0,39 | 0,37 | 0,34 | 0,40 | 0,37 | 0,38 | 0,023 | mech.-ad |
| S9 | 29.06.2018 | 06.07.2018 | 0,62 | 0,63 | 0,65 | 0,68 | 0,65 | 0,65 | 0,025 | mech.-ad |
| S3 | 29.06.2018 | 06.07.2018 | 0,54 | 0,52 | 0,50 | 0,53 | 0,54 | 0,53 | 0,020 | mech.-ad |
| S1 | 29.06.2018 | 06.07.2018 | 0,80 | 0,74 | 0,80 | 0,73 | 0,59 | 0,73 | 0,086 | mech.-ad-quell |

2a. Diagramm: Beton 16/32 Cem III, 7 Tage Wert,

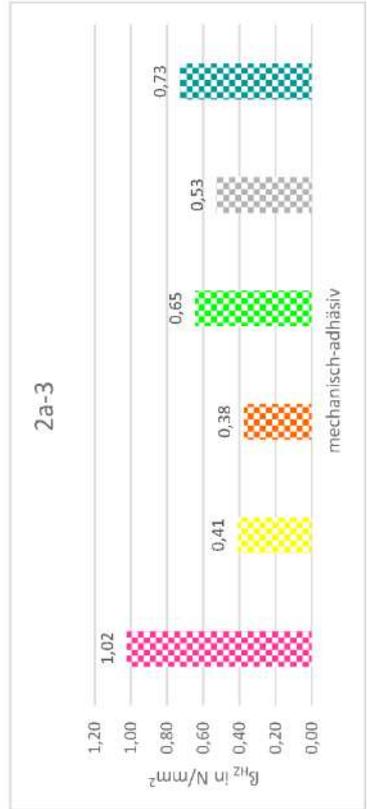
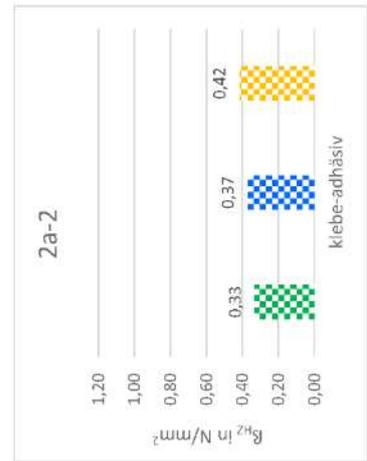
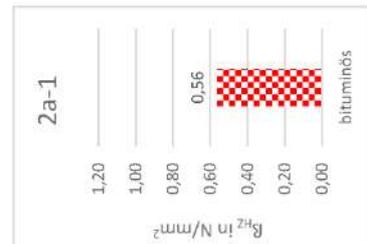
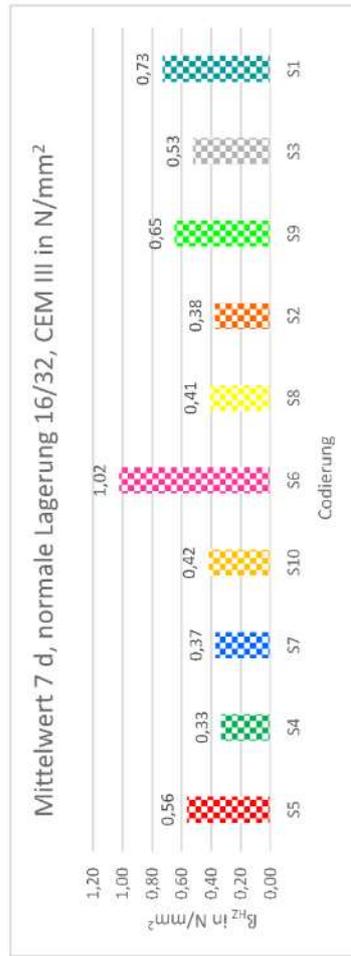
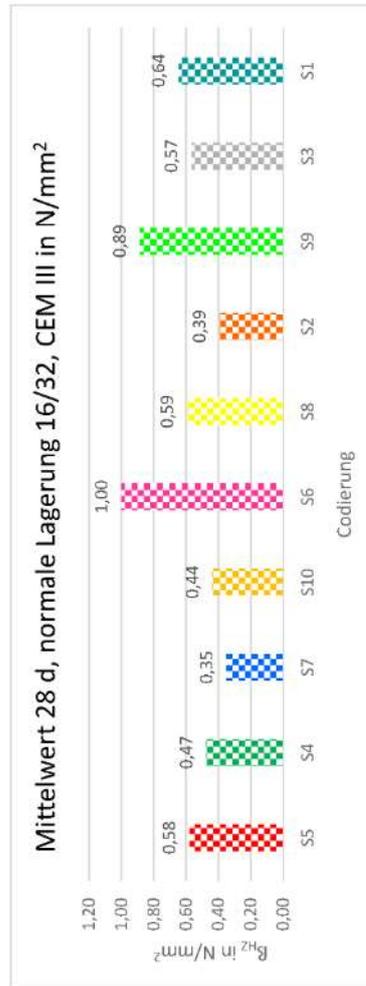


Bild A6-2. Haftzugfestigkeit – Beton 16/32 Cem III – 7-Tage-Werte

3a. Tabelle: Beton 16/32 Cem III, 28 Tage Wert

| Beton 16/32 Cem III Charge 2 | 28 Tage Wert | 28 Tage Wert | 28 Tage Wert | Stempel1 | Stempel2 | Stempel3 | Stempel4 | Stempel5 | Mittelwert | Std Abw. | Verbund-mechanismus |
|------------------------------|---------------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| | Betonierdatum | Prüfdatum | | N/mm ² | |
| S5 | 26.09.2018 | 26.10.2018 | | 0,49 | 0,60 | 0,62 | 0,61 | 0,57 | 0,58 | 0,052 | bituminös |
| S4 | 26.09.2018 | 26.10.2018 | | 0,46 | 0,51 | 0,44 | 0,46 | 0,49 | 0,47 | 0,027 | kl.-ad |
| S7 | 29.06.2018 | 27.07.2018 | | 0,36 | 0,37 | 0,34 | 0,31 | 0,37 | 0,35 | 0,023 | kl.-ad |
| S10 | 29.06.2018 | 27.07.2018 | | 0,41 | 0,48 | 0,45 | 0,39 | 0,45 | 0,44 | 0,037 | kl.-ad |
| S6 | 26.09.2018 | 26.10.2018 | | 1,07 | 0,97 | 0,93 | 1,15 | 0,87 | 1,00 | 0,112 | mech.-ad |
| S8 | 29.06.2018 | 27.07.2018 | | 0,51 | 0,52 | 0,63 | 0,63 | 0,67 | 0,59 | 0,072 | mech.-ad |
| S2 | 29.06.2018 | 27.07.2018 | | 0,37 | 0,45 | 0,40 | 0,33 | 0,41 | 0,39 | 0,044 | mech.-ad |
| S9 | 26.09.2018 | 26.10.2018 | | 0,93 | 0,90 | 0,78 | 0,84 | 0,97 | 0,89 | 0,074 | mech.-ad |
| S3 | 29.06.2018 | 27.07.2018 | | 0,52 | 0,59 | 0,54 | 0,58 | 0,59 | 0,57 | 0,032 | mech.-ad |
| S1 | 26.09.2018 | 26.10.2018 | | 0,75 | 0,67 | 0,60 | 0,56 | 0,65 | 0,64 | 0,071 | mech.-ad-quell |

3a. Diagramm: Beton 16/32 Cem III, 28 Tage Wert



Mittelwert 28 d, normale Lagerung 16/32, CEM III in N/mm²

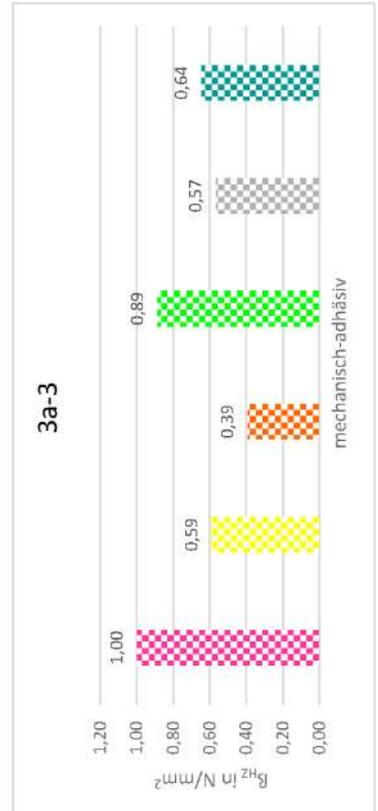
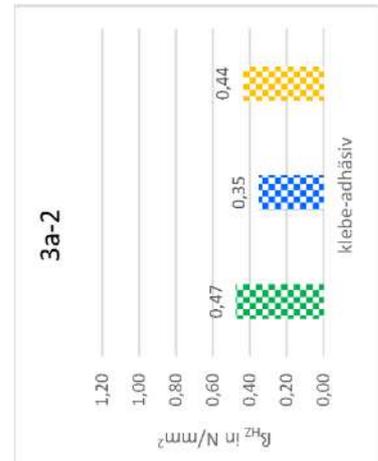
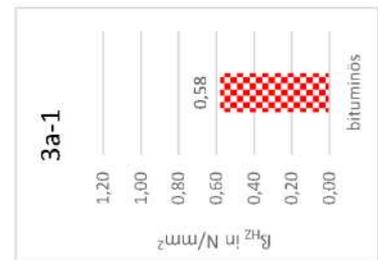


Bild A6-3. Haftzugfestigkeit – Beton 16/32 Cem III – 28-Tage-Werte

4a. Tabelle: Beton 16/32 Cem II, 2 Tage Wert

| Beton Charge 2 | 2 Tage Wert Betondatum | 2 Tage Wert Prüfdatum | Stempel1 N/mm ² | Stempel2 N/mm ² | Stempel3 N/mm ² | Stempel4 N/mm ² | Stempel5 N/mm ² | Mittelwert N/mm ² | Std Abw. N/mm ² | Verbund- mechanismus |
|----------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| S5 | 19.06.2018 | 21.06.2018 | 0,68 | 0,71 | 0,72 | 0,69 | 0,70 | 0,70 | 0,017 | bituminös |
| S4 | 19.06.2018 | 21.06.2018 | 0,47 | 0,45 | 0,43 | 0,45 | 0,43 | 0,44 | 0,019 | kl.-ad |
| S7 | 19.06.2018 | 21.06.2018 | 0,48 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,45 | 0,48 | 0,022 | kl.-ad |
| S10 | 19.06.2018 | 21.06.2018 | 0,61 | 0,66 | 0,56 | 0,52 | 0,54 | 0,58 | 0,058 | kl.-ad |
| S6 | 19.06.2018 | 21.06.2018 | 0,55 | 0,59 | 0,66 | 0,78 | 0,65 | 0,65 | 0,084 | mech.-ad |
| S8 | 19.06.2018 | 21.06.2018 | 0,64 | 0,63 | 0,69 | 0,59 | 0,65 | 0,64 | 0,035 | mech.-ad |
| S2 | 19.06.2018 | 21.06.2018 | 0,41 | 0,42 | 0,43 | 0,39 | 0,37 | 0,40 | 0,025 | mech.-ad |
| S9 | 19.06.2018 | 21.06.2018 | 0,91 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,93 | 0,014 | mech.-ad |
| S3 | 19.06.2018 | 21.06.2018 | 0,41 | 0,42 | 0,44 | 0,41 | 0,42 | 0,42 | 0,015 | mech.-ad |
| S1 | 19.06.2018 | 21.06.2018 | 0,74 | 0,79 | 0,81 | 0,82 | 0,72 | 0,78 | 0,046 | mech.-ad-uell |

4a. Diagramm: Beton 16/32 Cem II, 2 Tage Wert

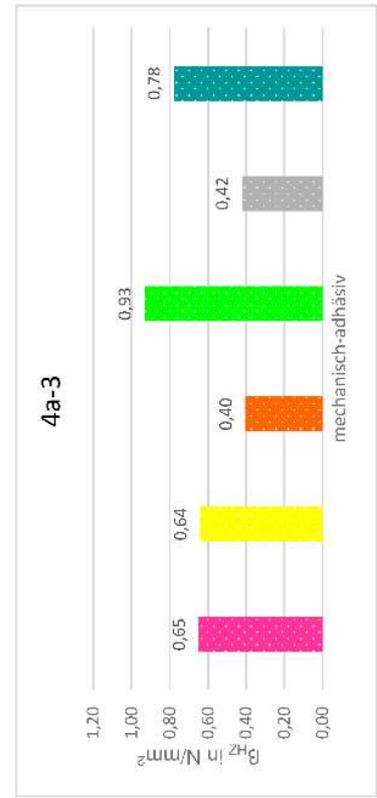
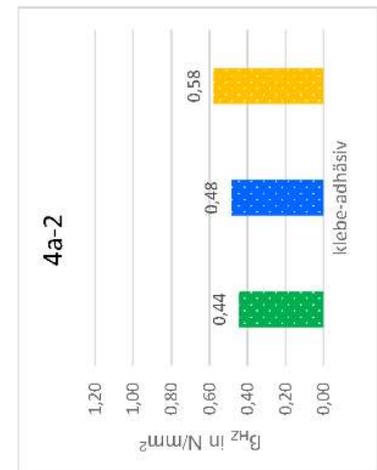
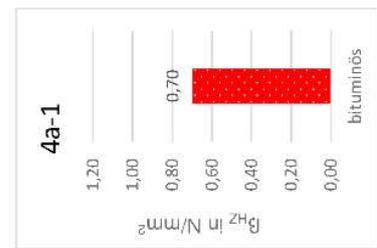
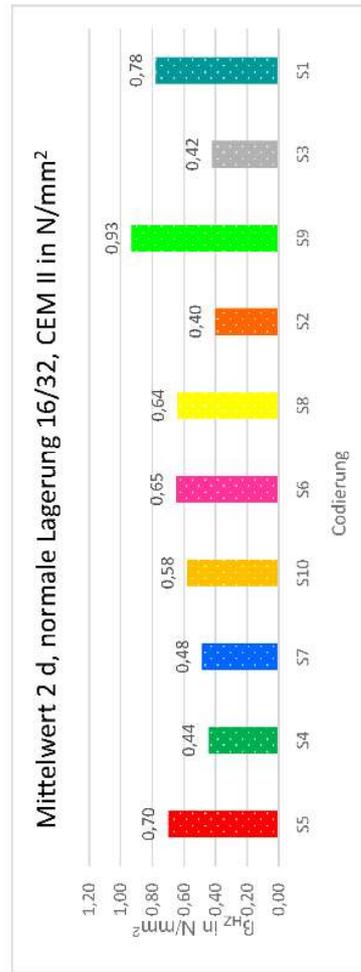


Bild A6-4. Haftzugfestigkeit – Beton 16/32 Cem II – 2-Tage-Werte

5a. Tabelle: Beton 16/32 Cem II, 7 Tage Wert

| Beton 16/32 Cem II Charge 2 | 7 Tage Wert Betonierdatum | 7 Tage Wert Prüfdatum | Stempel1 N/mm ² | Stempel2 N/mm ² | Stempel3 N/mm ² | Stempel4 N/mm ² | Stempel5 N/mm ² | Mittelwert N/mm ² | StdAbw N/mm ² | Verbundmechanismus |
|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------|
| S5 | 19.06.2018 | 17.07.2018 | 0,66 | 0,59 | 0,61 | 0,65 | 0,60 | 0,62 | 0,032 | bituminös |
| S4 | 29.05.2018 | 26.06.2018 | 0,39 | 0,44 | 0,38 | 0,50 | 0,46 | 0,43 | 0,050 | kl.-ad |
| S7 | 29.05.2018 | 26.06.2018 | 0,42 | 0,44 | 0,44 | 0,52 | 0,49 | 0,46 | 0,041 | kl.-ad |
| S10 | 29.05.2018 | 26.06.2018 | 0,60 | 0,55 | 0,60 | 0,50 | 0,54 | 0,56 | 0,043 | kl.-ad |
| S6 | 29.05.2018 | 26.06.2018 | 0,83 | 0,88 | 0,90 | 0,89 | 0,55 | 0,81 | 0,149 | mech.-ad |
| S8 | 19.06.2018 | 26.06.2018 | 0,63 | 0,64 | 0,57 | 0,66 | 0,61 | 0,62 | 0,034 | mech.-ad |
| S2 | 29.05.2018 | 26.06.2018 | 0,35 | 0,39 | 0,40 | 0,33 | 0,35 | 0,36 | 0,030 | mech.-ad |
| S9 | 15.11.2018 | 23.11.2018 | 0,80 | 0,91 | 0,81 | 0,73 | 1,01 | 0,85 | 0,109 | mech.-ad |
| S3 | 29.05.2018 | 20.07.2018 | 0,43 | 0,40 | 0,48 | 0,56 | 0,41 | 0,46 | 0,066 | mech.-ad |
| S1 | 29.05.2018 | 26.06.2018 | 0,80 | 0,77 | 0,69 | 0,71 | 0,76 | 0,75 | 0,045 | mech.-ad- quell |

5a. Diagramm: Beton 16/32 Cem II, 7 Tage Wert

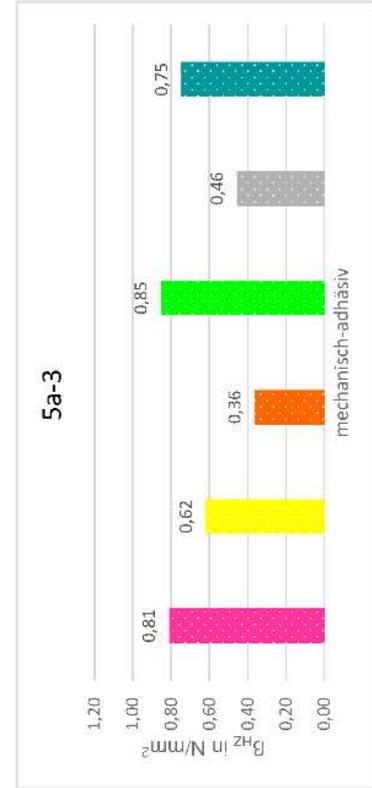
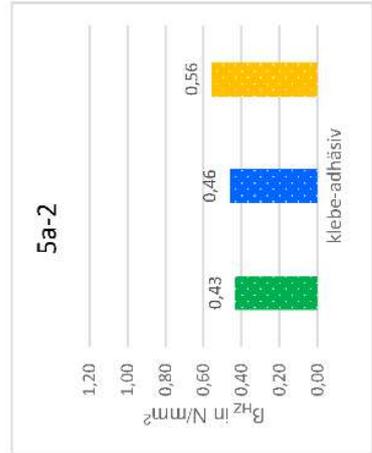
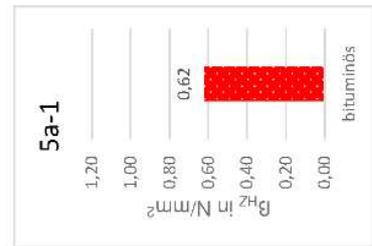
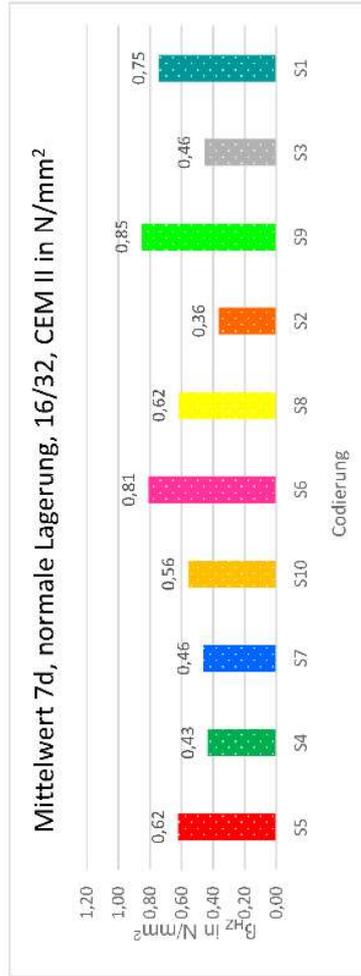


Bild A6-5. Haftzugfestigkeit – Beton 16/32 Cem II – 7-Tage-Werte

6a. Tabelle: Beton 16/32 Cem II, 28 Tage Wert

| Beton 16/32 Cem II Charge 2 | 28 Tage Wert Betonierdatum | 28 Tage Wert Prüfdatum | Stempel1 N/mm ² | Stempel2 N/mm ² | Stempel3 N/mm ² | Stempel4 N/mm ² | Stempel5 N/mm ² | Mittelwert N/mm ² | StdAbw N/mm ² | Verbundmechanismus |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------|
| S5 | 19.06.2018 | 17.07.2018 | 0,64 | 0,70 | 0,34 | 0,69 | 0,69 | 0,61 | 0,152 | bituminös |
| S4 | 29.05.2018 | 26.06.2018 | 0,44 | 0,49 | 0,47 | 0,44 | 0,46 | 0,46 | 0,024 | kl.-ad |
| S7 | 29.05.2018 | 26.06.2018 | 0,41 | 0,49 | 0,52 | 0,48 | 0,49 | 0,48 | 0,040 | kl.-ad |
| S10 | 29.05.2018 | 26.06.2018 | 0,64 | 0,62 | 0,68 | 0,64 | 0,66 | 0,65 | 0,023 | kl.-ad |
| S6 | 29.05.2018 | 26.06.2018 | 0,92 | 0,97 | 0,93 | 0,97 | 1,00 | 0,96 | 0,034 | mech.-ad |
| S8 | 19.06.2018 | 17.07.2018 | 0,61 | 0,62 | 0,64 | 0,62 | 0,55 | 0,61 | 0,032 | mech.-ad |
| S2 | 29.05.2018 | 26.06.2018 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,40 | 0,39 | 0,39 | 0,014 | mech.-ad |
| S9 | 19.06.2018 | 17.07.2018 | 0,91 | 1,06 | 0,82 | 0,80 | 1,04 | 0,93 | 0,121 | mech.-ad |
| S3 | 29.05.2018 | 20.07.2018 | 0,50 | 0,46 | 0,42 | 0,49 | 0,57 | 0,49 | 0,057 | mech.-ad |
| S1 | 29.05.2018 | 26.06.2018 | 0,81 | 0,80 | 0,82 | 0,76 | 0,81 | 0,80 | 0,022 | mech.-ad- quell |

6a. Diagramm: Beton 16/32 Cem II, 28 Tage Wert

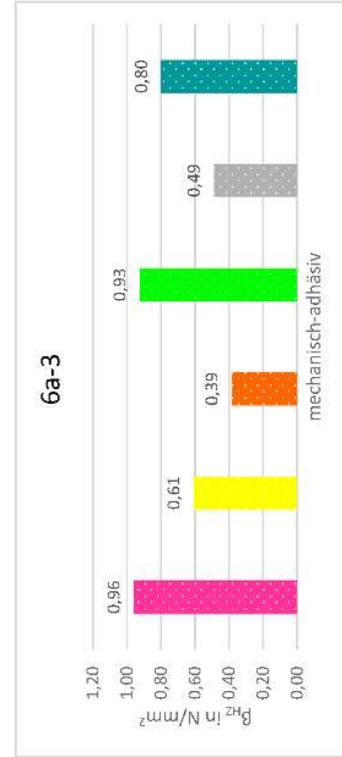
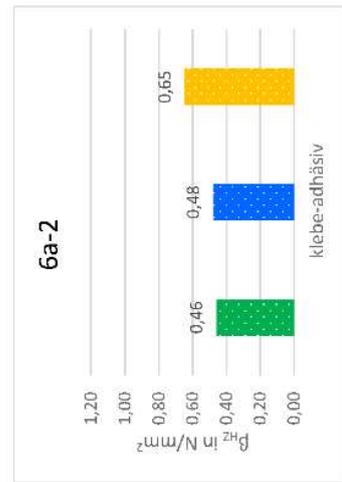
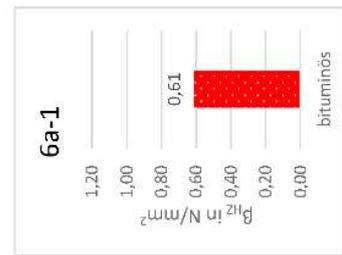
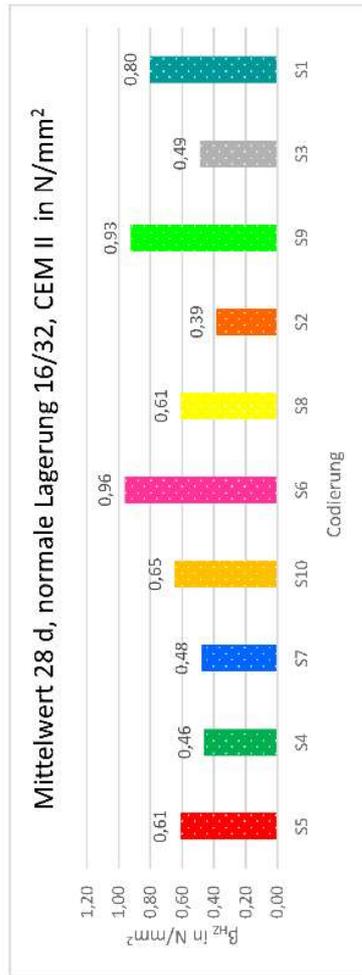


Bild A6-6. Haftzugfestigkeit – Beton 16/32 Cem II – 28-Tage-Werte

7a. Tabelle: Beton 8/16 Cem II, 2 Tage Wert

| Beton 8/16 Cem II Charge 2 | 2 Tage Wert Betonierdatum | 2 Tage Wert Prüfdatum | Stempel1 N/mm ² | Stempel2 N/mm ² | Stempel3 N/mm ² | Stempel4 N/mm ² | Stempel5 N/mm ² | Mittelwert N/mm ² | Std. Abw. N/mm ² | Verbundmechanismus |
|----------------------------|---------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| S5 | 26.06.2018 | 28.06.2018 | 0,73 | 0,73 | 0,74 | 0,71 | 0,62 | 0,71 | 0,051 | bituminös |
| S4 | 26.06.2018 | 28.06.2018 | 0,34 | 0,43 | 0,43 | 0,40 | 0,43 | 0,41 | 0,040 | kl.-ad |
| S7 | 26.06.2018 | 28.06.2018 | 0,47 | 0,47 | 0,49 | 0,45 | 0,45 | 0,47 | 0,018 | kl.-ad |
| S10 | 26.06.2018 | 28.06.2018 | 0,39 | 0,45 | 0,40 | 0,43 | 0,46 | 0,43 | 0,028 | kl.-ad |
| S6 | 26.06.2018 | 28.06.2018 | 0,53 | 0,78 | 0,79 | 0,59 | 0,63 | 0,66 | 0,118 | mech.-ad |
| S8 | 26.06.2018 | 28.06.2018 | 0,37 | 0,23 | 0,47 | 0,35 | 0,43 | 0,37 | 0,092 | mech.-ad |
| S2 | 26.06.2018 | 28.06.2018 | 0,32 | 0,33 | 0,33 | 0,37 | 0,30 | 0,33 | 0,025 | mech.-ad |
| S9 | 26.06.2018 | 28.06.2018 | 0,60 | 0,68 | 0,87 | 0,47 | 0,72 | 0,67 | 0,148 | mech.-ad |
| S3 | 26.06.2018 | 28.06.2018 | 0,30 | 0,29 | 0,39 | 0,33 | 0,23 | 0,31 | 0,060 | mech.-ad |
| S1 | 26.06.2018 | 28.06.2018 | 0,74 | 0,77 | 0,64 | 0,59 | 0,52 | 0,65 | 0,104 | mech.-ad-quell |

7a. Diagramm: Beton 8/16 Cem II, 2 Tage Wert

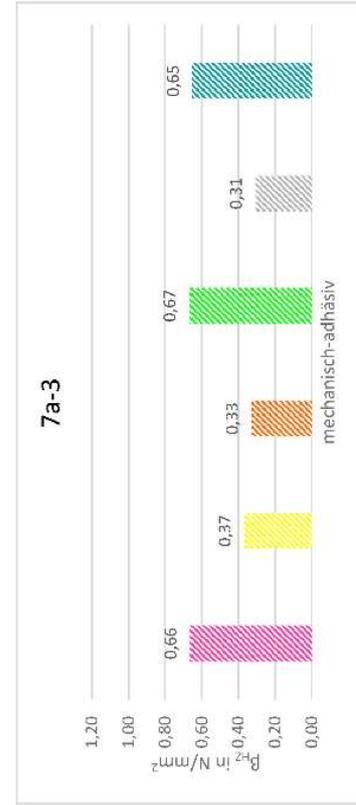
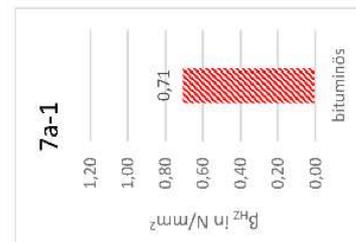
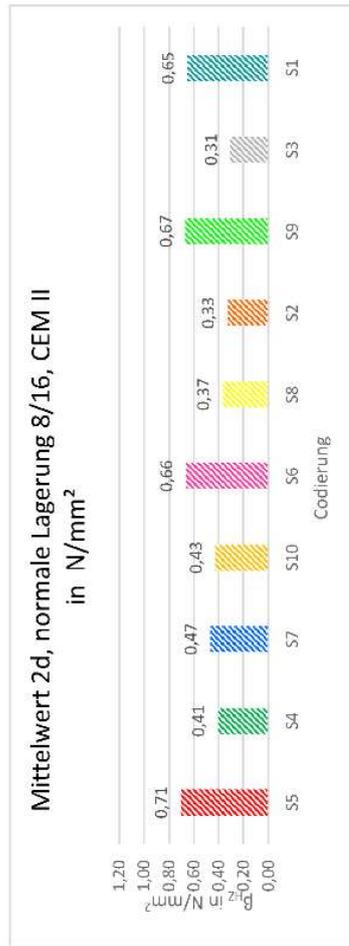


Bild A6-7. Haftzugfestigkeit – Beton 8/16 Cem II – 2-Tage-Werte

8a. Tabelle: Beton 8/16 Cem II, 7 Tage Wert

| Beton 8/16 Cem II | 7 Tage Wert | 7 Tage Wert | 7 Tage Wert | Stempel1 | Stempel2 | Stempel3 | Stempel4 | Stempel5 | Mittelwert | Std Abw. | Verbund- mechanismus |
|-------------------|---------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| Charge 2 | Betonierdatum | Prüfdatum | N/mm ² | |
| S5 | 22.06.2018 | 29.06.2018 | 0,71 | 0,69 | 0,61 | 0,65 | 0,70 | 0,67 | 0,67 | 0,040 | bituminös |
| S4 | 22.06.2018 | 29.06.2018 | 0,43 | 0,42 | 0,44 | 0,41 | 0,40 | 0,42 | 0,42 | 0,017 | kl.-ad |
| S7 | 22.06.2018 | 29.06.2018 | 0,44 | 0,44 | 0,46 | 0,46 | 0,44 | 0,45 | 0,45 | 0,009 | kl.-ad |
| S10 | 22.06.2018 | 29.06.2018 | 0,53 | 0,58 | 0,53 | 0,53 | 0,57 | 0,55 | 0,55 | 0,024 | kl.-ad |
| S6 | 22.06.2018 | 29.06.2018 | 0,92 | 0,99 | 0,78 | 1,05 | 0,82 | 0,91 | 0,91 | 0,114 | mech.-ad |
| S8 | 22.06.2018 | 29.06.2018 | 0,63 | 0,64 | 0,57 | 0,66 | 0,61 | 0,62 | 0,62 | 0,034 | mech.-ad |
| S2 | 22.06.2018 | 29.06.2018 | 0,45 | 0,55 | 0,45 | 0,45 | 0,48 | 0,48 | 0,48 | 0,044 | mech.-ad |
| S9 | 22.06.2018 | 29.06.2018 | 0,70 | 1,12 | 0,91 | 0,60 | 0,96 | 0,86 | 0,86 | 0,207 | mech.-ad |
| S3 | 22.06.2018 | 29.06.2018 | 0,64 | 0,58 | 0,61 | 0,65 | 0,57 | 0,61 | 0,61 | 0,034 | mech.-ad |
| S1 | 22.06.2018 | 29.06.2018 | 0,54 | 0,62 | 0,54 | 0,59 | 0,67 | 0,59 | 0,59 | 0,056 | mech.-ad- quell |

8a. Diagramm: Beton 8/16 Cem II, 7 Tage Wert

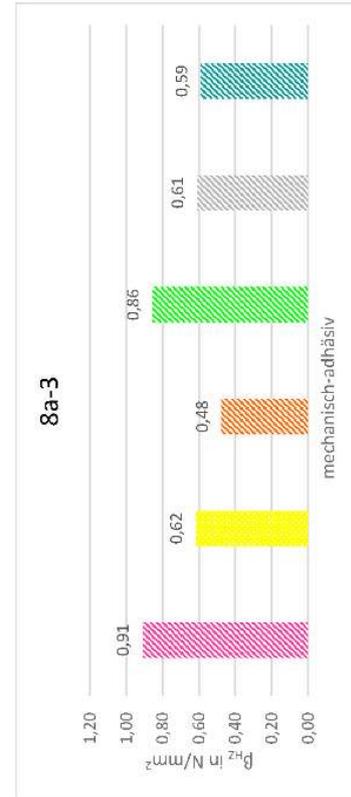
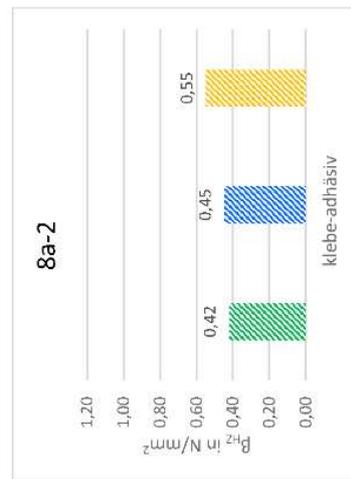
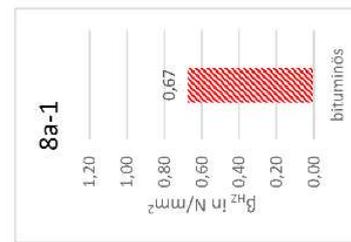
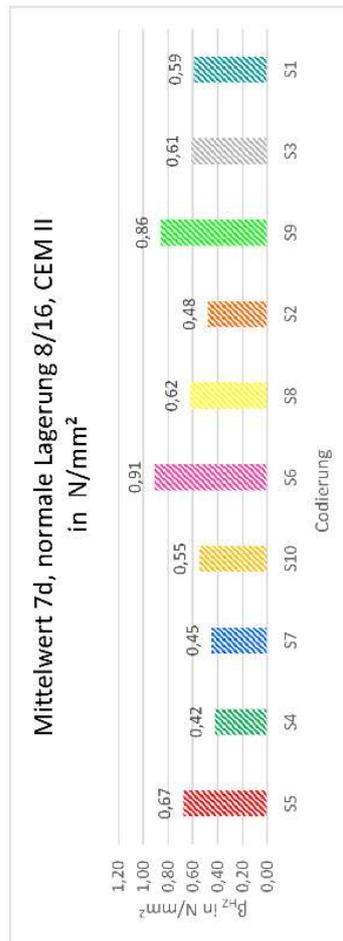


Bild A6-8. Haftzugfestigkeit – Beton 8/16 Cem II – 7-Tage-Werte

9a. Tabelle: Beton 8/16 Cem II, 28 Tage Wert

| Beton 8/16 Cem II Charge 2 | 28 Tage Wert Betonierdatum | 28 Tage Wert Prüfdatum | Stempel1 N/mm ² | Stempel2 N/mm ² | Stempel3 N/mm ² | Stempel4 N/mm ² | Stempel5 N/mm ² | Mittelwert N/mm ² | Std Abw. N/mm ² | Verbundmechanismus |
|----------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------|
| S5 | 26.06.2018 | 24.07.2018 | 0,77 | 0,76 | 0,72 | 0,80 | 0,79 | 0,77 | 0,029 | bituminös |
| S4 | 26.06.2018 | 24.07.2018 | 0,37 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,40 | 0,019 | kl.-ad |
| S7 | 22.06.2018 | 20.07.2018 | 0,43 | 0,44 | 0,46 | 0,43 | 0,40 | 0,43 | 0,022 | kl.-ad |
| S10 | 22.06.2018 | 20.07.2018 | 0,55 | 0,60 | 0,55 | 0,59 | 0,50 | 0,56 | 0,040 | kl.-ad |
| S6 | 26.06.2018 | 24.07.2018 | 0,93 | 0,92 | 1,18 | 1,07 | 0,70 | 0,96 | 0,183 | mech.-ad |
| S8 | 22.06.2018 | 20.07.2018 | 0,56 | 0,66 | 0,63 | 0,60 | 0,48 | 0,59 | 0,072 | mech.-ad |
| S2 | 22.06.2018 | 20.07.2018 | 0,39 | 0,43 | 0,41 | 0,46 | 0,41 | 0,42 | 0,027 | mech.-ad |
| S9 | 26.06.2018 | 24.07.2018 | 1,06 | 1,02 | 1,12 | 0,90 | 1,06 | 1,03 | 0,081 | mech.-ad |
| S3 | 22.06.2018 | 20.07.2018 | 0,67 | 0,62 | 0,68 | 0,68 | 0,67 | 0,66 | 0,025 | mech.-ad |
| S1 | 26.06.2018 | 24.07.2018 | 0,78 | 0,77 | 0,73 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 0,020 | mech.-ad-queil |

9a. Diagramm: Beton 8/16 Cem II, 28 Tage Wert

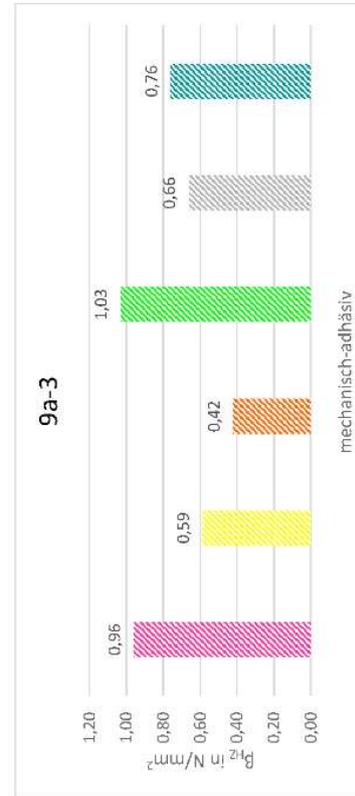
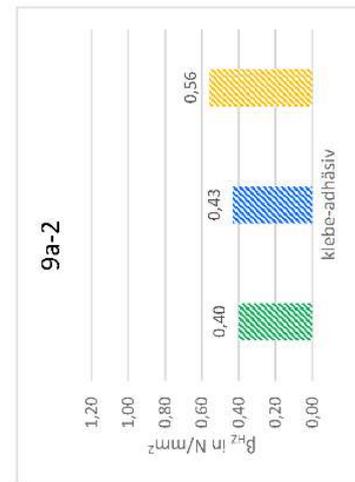
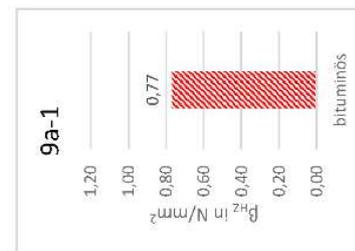
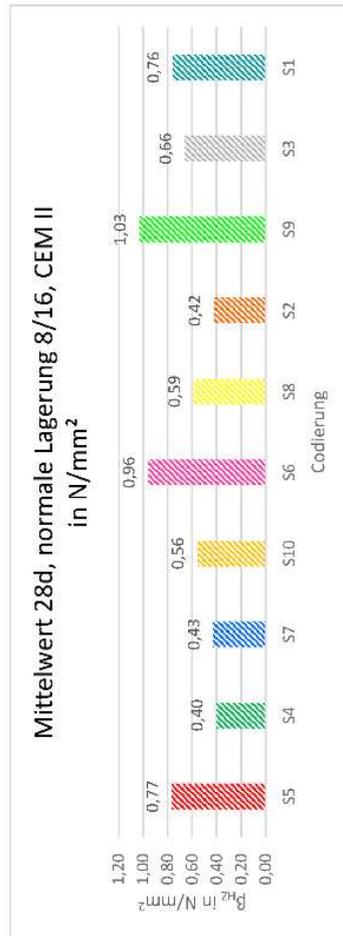


Bild A6-9. Haftzugfestigkeit – Beton 8/16 Cem II – 28-Tage-Werte

10a. Tabelle: Beton 8/16 Cem II, Wärme, 7 Tage Wert

| Beton 8/16 CEM II Wärme | | 7 Tage Wert | | 7 Tage Wert | | Stempel1 | | Stempel2 | | Stempel3 | | Stempel4 | | Stempel5 | | Mittelwert | | StdAbw | | Verbund- mechanismus | |
|----------------------------|---------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Charge 2 | Betonierdatum | Prüfdatum | N/mm ² | N/mm ² |
| S5 | 15.11.2018 | 29.11.2018 | 0,55 | 0,67 | 0,49 | 0,54 | 0,45 | 0,54 | 0,45 | 0,54 | 0,45 | 0,54 | 0,45 | 0,54 | 0,45 | 0,54 | 0,45 | 0,54 | 0,084 | 0,084 | bituminös |
| S4 | 15.11.2018 | 29.11.2018 | 0,43 | 0,40 | 0,39 | 0,39 | 0,37 | 0,39 | 0,40 | 0,39 | 0,39 | 0,37 | 0,39 | 0,40 | 0,37 | 0,40 | 0,37 | 0,40 | 0,020 | 0,020 | kl.-ad |
| S7 | 15.11.2018 | 29.11.2018 | 0,31 | 0,29 | 0,32 | 0,33 | 0,29 | 0,32 | 0,29 | 0,32 | 0,33 | 0,29 | 0,32 | 0,31 | 0,29 | 0,32 | 0,29 | 0,31 | 0,018 | 0,018 | kl.-ad |
| S10 | 15.11.2018 | 29.11.2018 | 0,43 | 0,50 | 0,56 | 0,45 | 0,50 | 0,56 | 0,50 | 0,56 | 0,45 | 0,50 | 0,56 | 0,50 | 0,56 | 0,45 | 0,50 | 0,063 | 0,063 | kl.-ad | |
| S6 | 15.11.2018 | 29.11.2018 | 0,91 | 0,73 | 1,01 | 0,92 | 0,91 | 0,73 | 1,01 | 0,92 | 0,91 | 0,73 | 1,01 | 0,91 | 0,73 | 1,01 | 0,91 | 0,111 | 0,111 | mech.-ad | |
| S8 | 15.11.2018 | 29.11.2018 | 0,49 | 0,71 | 0,59 | 0,58 | 0,49 | 0,71 | 0,59 | 0,58 | 0,49 | 0,71 | 0,59 | 0,58 | 0,49 | 0,71 | 0,59 | 0,131 | 0,131 | mech.-ad | |
| S2 | 15.11.2018 | 29.11.2018 | 0,55 | 0,60 | 0,54 | 0,51 | 0,55 | 0,60 | 0,54 | 0,51 | 0,55 | 0,60 | 0,54 | 0,51 | 0,55 | 0,60 | 0,54 | 0,034 | 0,034 | mech.-ad | |
| S9 | 15.11.2018 | 29.11.2018 | 0,91 | 0,56 | 0,84 | 0,75 | 0,91 | 0,56 | 0,84 | 0,75 | 0,91 | 0,56 | 0,84 | 0,75 | 0,91 | 0,56 | 0,81 | 0,164 | 0,164 | mech.-ad | |
| S3 | 15.11.2018 | 29.11.2018 | 0,71 | 0,68 | 0,64 | 0,72 | 0,71 | 0,68 | 0,64 | 0,72 | 0,71 | 0,68 | 0,64 | 0,72 | 0,71 | 0,68 | 0,69 | 0,032 | 0,032 | mech.-ad | |
| S1 | 15.11.2018 | 29.11.2018 | 0,84 | 0,71 | 0,72 | 0,68 | 0,84 | 0,71 | 0,72 | 0,68 | 0,84 | 0,71 | 0,72 | 0,68 | 0,84 | 0,71 | 0,77 | 0,087 | 0,087 | mech.-ad- quell | |

10a. Diagramm: Beton 8/16, Wärmealterung, Cem II, 7 Tage Wert

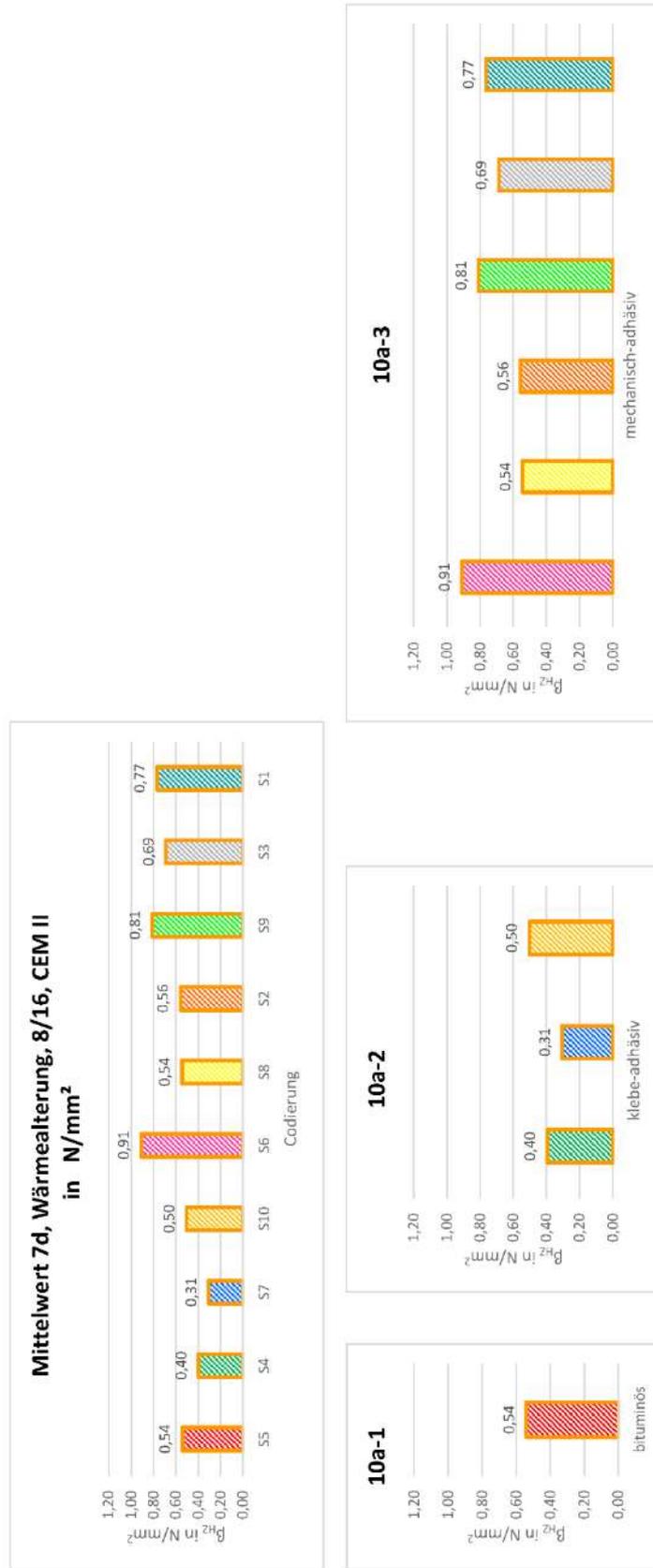


Bild A6-10. Haftzugfestigkeit nach Wärmealterung bei 50 °C – Beton 8/16 Cem II – 7-Tage-Werte

12a. Tabelle: Beton 8/16 Cem II, Wasser, 7 Tage Wert

| Beton 8/16 Cem II | | 7 Tage Wert | 7 Tage Wert | 7 Tage Wert | Stempel1 | Stempel2 | Stempel3 | Stempel4 | Stempel5 | Mittelwert | StdAbw | Verbund- |
|-------------------|------------|---------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------|
| Wasser | | Betonierdatum | Prüfdatum | Prüfdatum | N/mm ² | mechanismus |
| Charge 2 | | | | | | | | | | | | |
| S5 | 08.03.2019 | 15.03.2019 | 0,64 | 0,52 | 0,58 | 0,55 | 0,56 | 0,51 | 0,56 | 0,051 | bituminös | |
| S4 | 08.03.2019 | 15.03.2019 | 0,29 | 0,31 | 0,35 | 0,36 | 0,33 | 0,32 | 0,33 | 0,032 | kl.-ad | |
| S7 | 08.03.2019 | 15.03.2019 | 0,34 | 0,38 | 0,36 | 0,31 | 0,39 | 0,32 | 0,36 | 0,032 | kl.-ad | |
| S10 | 08.03.2019 | 15.03.2019 | 0,38 | 0,36 | 0,39 | 0,36 | 0,40 | 0,18 | 0,37 | 0,018 | kl.-ad | |
| S6 | 08.03.2019 | 15.03.2019 | 0,79 | 0,77 | 0,76 | 0,73 | 0,75 | 0,24 | 0,76 | 0,024 | mech.-ad | |
| S8 | 08.03.2019 | 15.03.2019 | 0,29 | 0,43 | 0,44 | 0,38 | 0,49 | 0,77 | 0,36 | 0,077 | mech.-ad | |
| S2 | 08.03.2019 | 15.03.2019 | 0,33 | 0,32 | 0,29 | 0,30 | 0,28 | 0,21 | 0,30 | 0,021 | mech.-ad | |
| S9 | 08.03.2019 | 15.03.2019 | 0,61 | 0,51 | 0,78 | 0,71 | 0,76 | 1,13 | 0,68 | 0,113 | mech.-ad | |
| S3 | 08.03.2019 | 15.03.2019 | 0,52 | 0,61 | 0,54 | 0,42 | 0,56 | 0,69 | 0,53 | 0,069 | mech.-ad | |
| S1 | 08.03.2019 | 15.03.2019 | 0,37 | 0,50 | 0,49 | 0,35 | 0,38 | 0,71 | 0,42 | 0,071 | mech.-ad- quell | |

12a. Diagramm: Beton 8/16 Cem II, Wasser, 7 Tage Wert

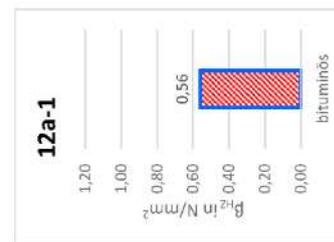
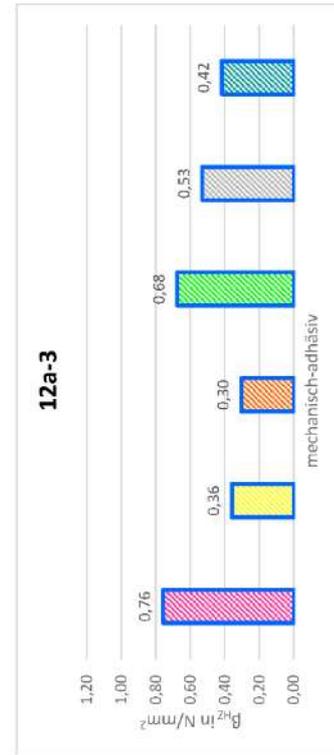
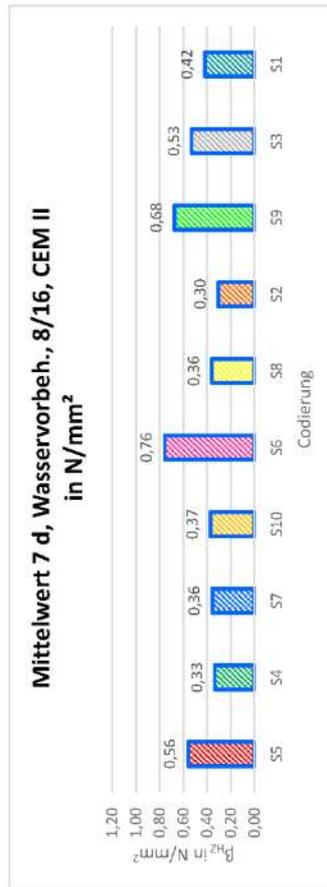


Bild A6-12. Haftzugfestigkeit bei Betonage auf wassergesättigter Bahn – Beton 8/16 Cem II – 7-Tage-Werte

13a. Tabelle: Beton 8/16 Cem II, Wasser, 28 Tage Wert

| Beton 8/16 Cem II Wasser | | 28 Tage Wert | 28 Tage Wert | 28 Tage Wert | Stempel1 | Stempel2 | Stempel3 | Stempel4 | Stempel5 | Mittelwert | StdAbw | Verbund- |
|--------------------------|---------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Charge 2 | Betonierdatum | Prüfdatum | N/mm ² | mechanismus |
| S5 | 08.03.2019 | 05.04.2019 | 0,78 | 0,76 | 0,81 | 0,78 | 0,81 | 0,78 | 0,81 | 0,79 | 0,023 | bituminös |
| S4 | 08.03.2019 | 05.04.2019 | 0,43 | 0,40 | 0,42 | 0,43 | 0,42 | 0,36 | 0,40 | 0,40 | 0,024 | kl.-ad |
| S7 | 08.03.2019 | 05.04.2019 | 0,37 | 0,41 | 0,48 | 0,37 | 0,48 | 0,45 | 0,46 | 0,43 | 0,044 | kl.-ad |
| S10 | 21.03.2019 | 18.04.2019 | 0,59 | 0,37 | 0,60 | 0,59 | 0,60 | 0,60 | 0,63 | 0,56 | 0,105 | kl.-ad |
| S6 | 21.03.2019 | 18.04.2019 | 0,71 | 0,76 | 0,85 | 0,71 | 0,85 | 0,74 | 0,66 | 0,75 | 0,071 | mech.-ad |
| S8 | 08.03.2019 | 05.04.2019 | 0,35 | 0,48 | 0,52 | 0,35 | 0,52 | 0,43 | 0,33 | 0,42 | 0,082 | mech.-ad |
| S2 | 21.03.2019 | 18.04.2019 | 0,46 | 0,37 | 0,42 | 0,46 | 0,42 | 0,39 | 0,37 | 0,40 | 0,037 | mech.-ad |
| S9 | 08.03.2019 | 05.04.2019 | 0,93 | 0,92 | 0,86 | 0,93 | 0,86 | 0,76 | 1,10 | 0,91 | 0,123 | mech.-ad |
| S3 | 21.03.2019 | 18.04.2019 | 0,56 | 0,59 | 0,57 | 0,56 | 0,57 | 0,53 | 0,53 | 0,55 | 0,027 | mech.-ad |
| S1 | 21.03.2019 | 18.04.2019 | 0,52 | 0,54 | 0,62 | 0,52 | 0,62 | 0,44 | 0,54 | 0,53 | 0,063 | mech.-ad- quell |

13a. Diagramm: Beton 8/16 Cem II, Wasser, 7 Tage Wert

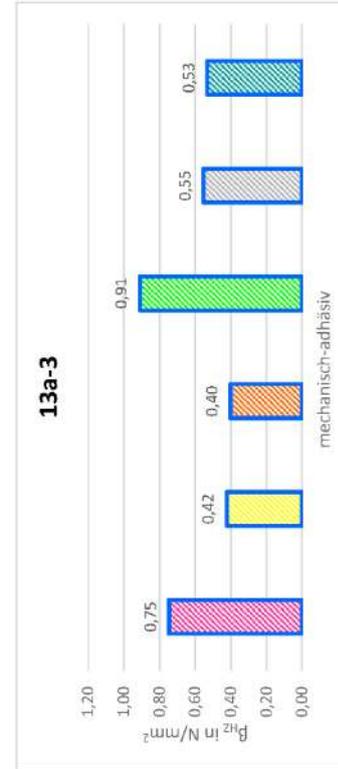
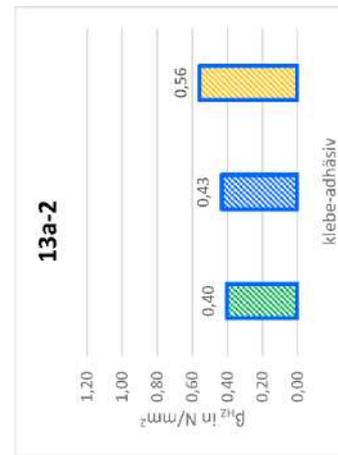
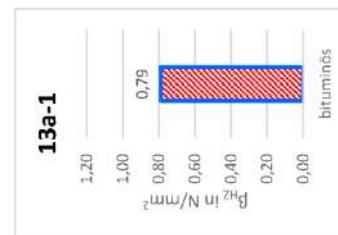
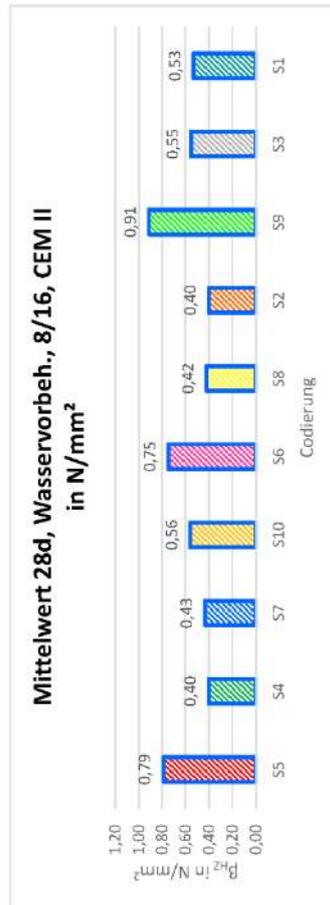


Bild A6-13. Haftzugfestigkeit bei Betonage auf wassergesättigter Bahn – Beton 8/16 Cem II – 28-Tage-Werte

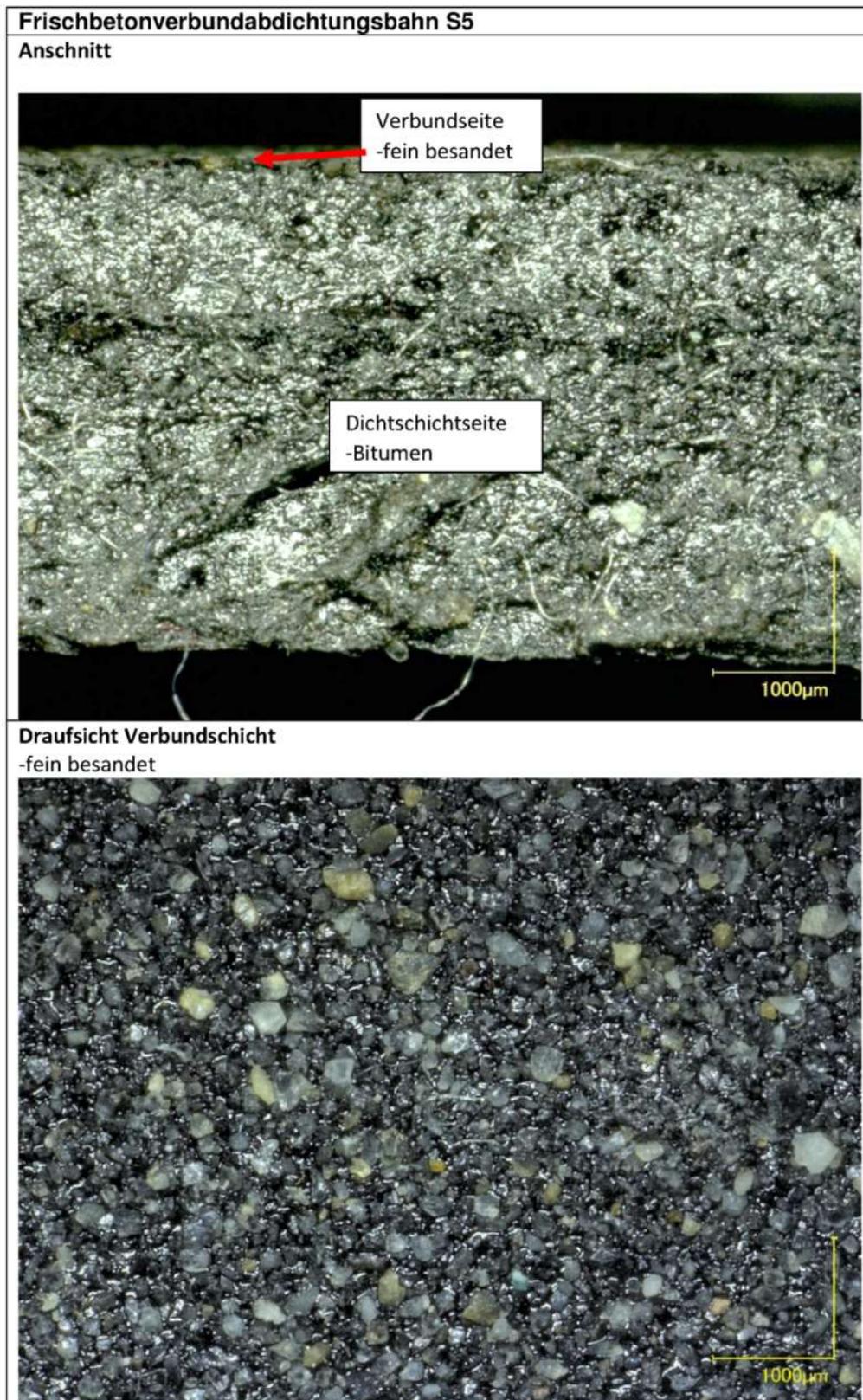


Bild A6-14. Lichtmikroskopische Aufnahme der FBV-Bahn S5 im Anschnitt und der Verbundseite

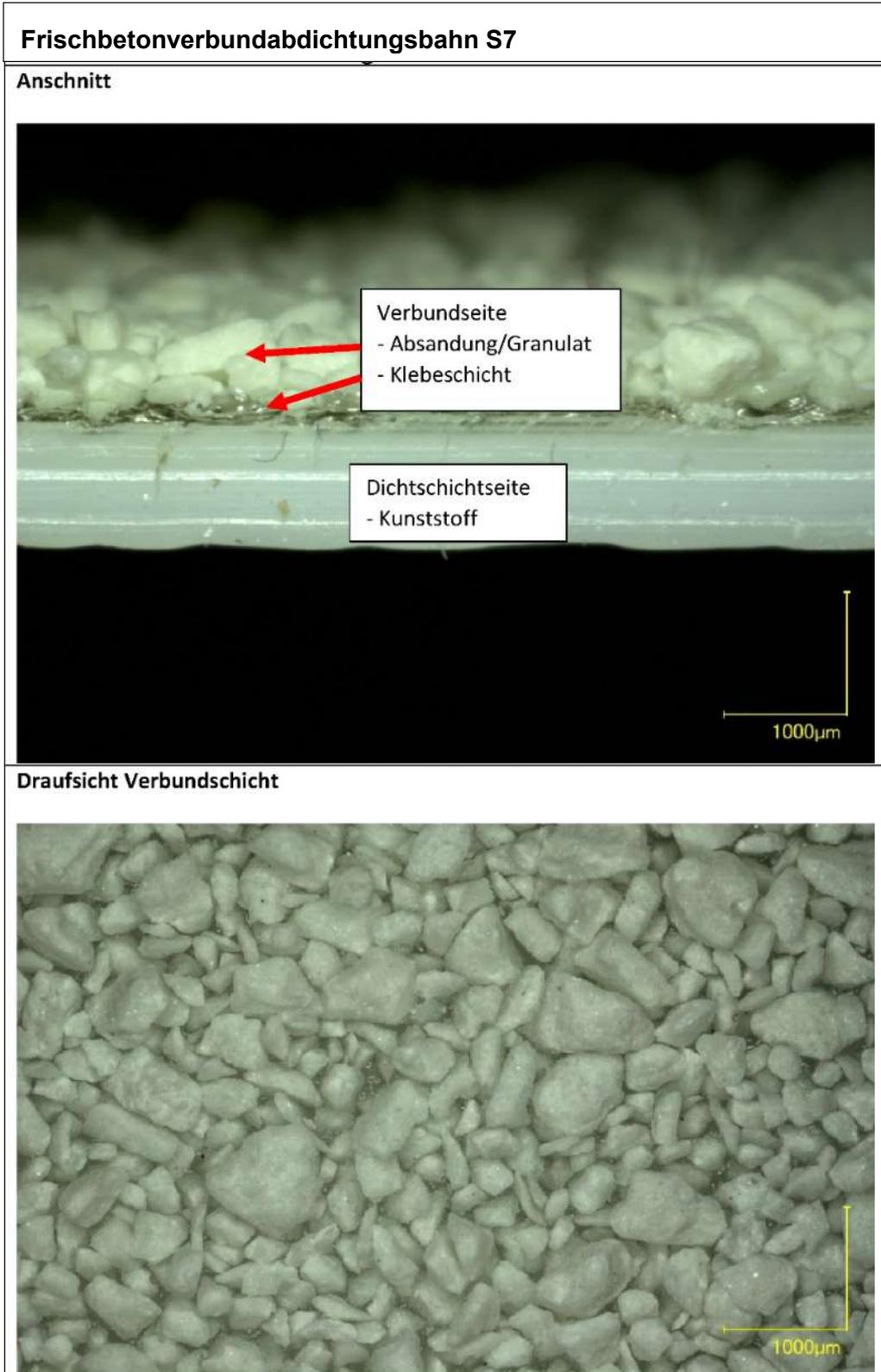
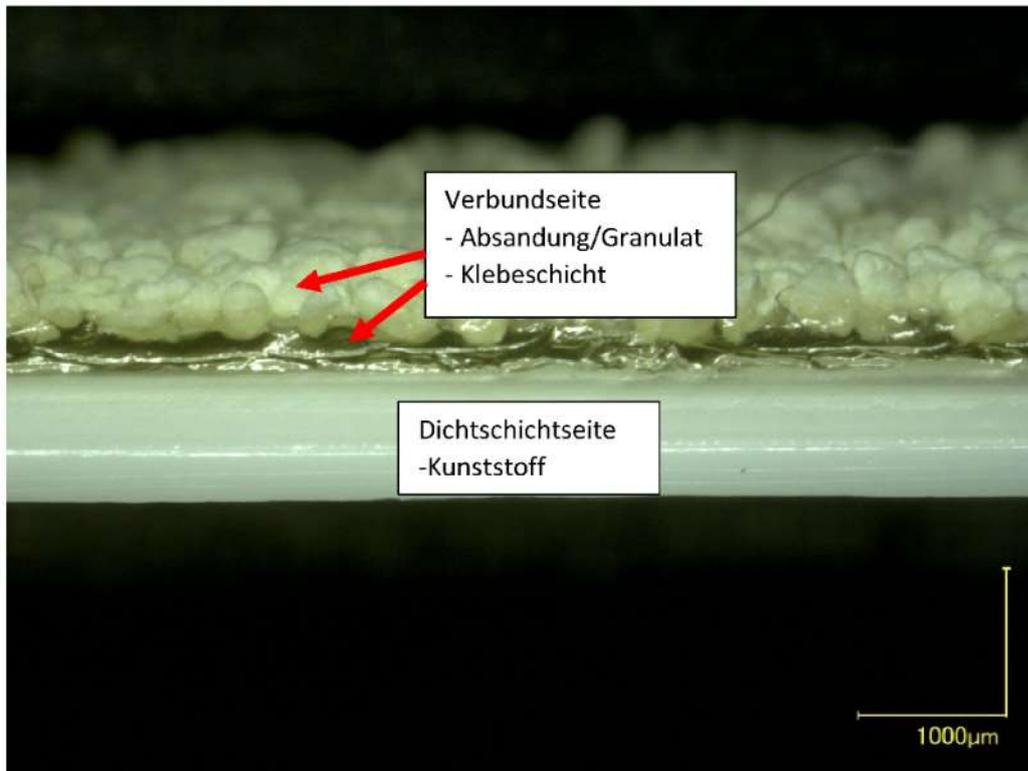


Bild A6-15. Lichtmikroskopische Aufnahme der FBV-Bahn S7 im Anschnitt und der Verbundseite

Frischbetonverbundabdichtungsbahn S4

Anschnitt



Draufsicht Verbundschicht



Bild A6-16. Lichtmikroskopische Aufnahme der FBV-Bahn S4 im Anschnitt und der Verbundseite

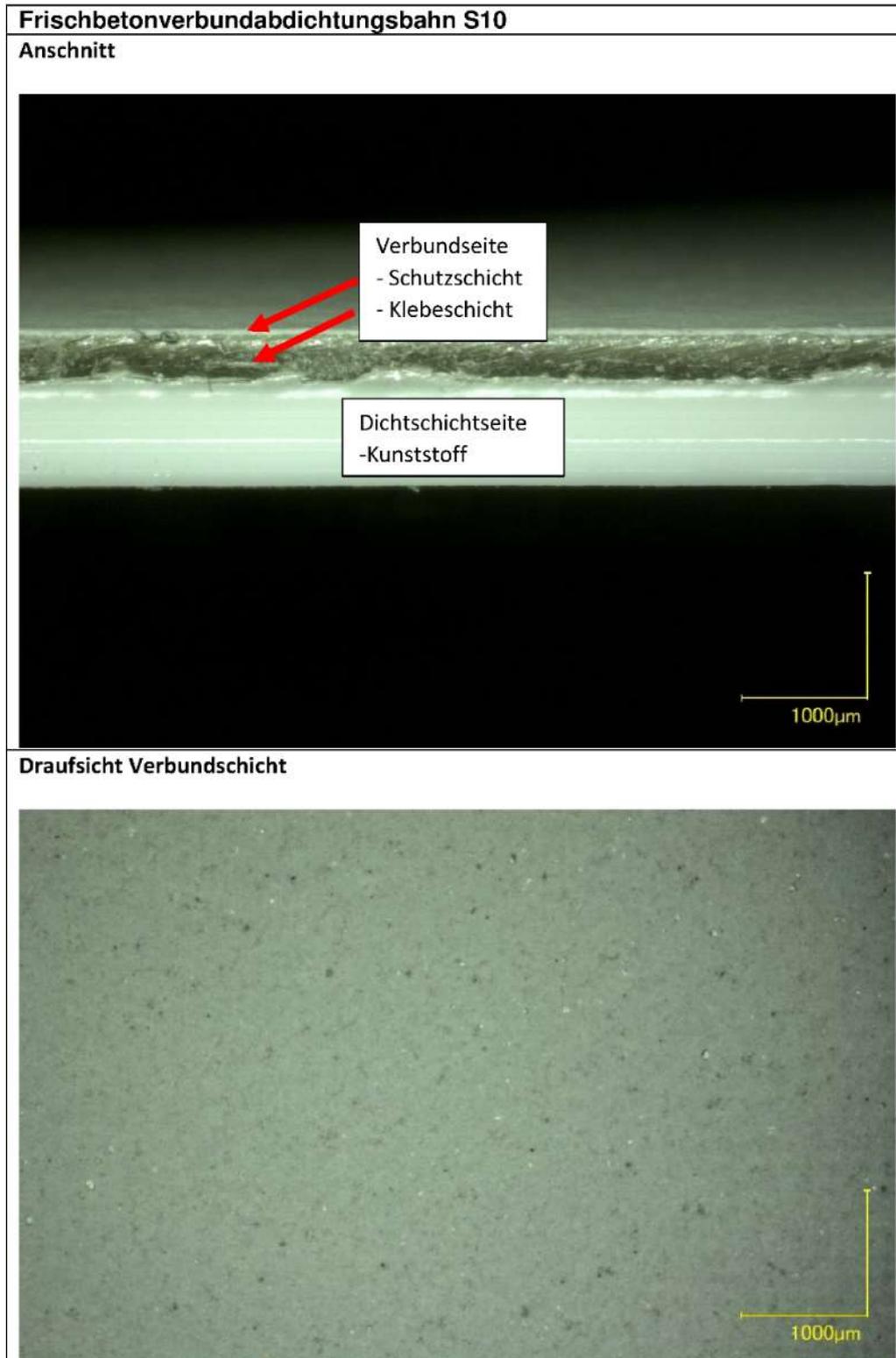


Bild A6-17. Lichtmikroskopische Aufnahme der FBV-Bahn S10 im Anschnitt und der Verbundseite

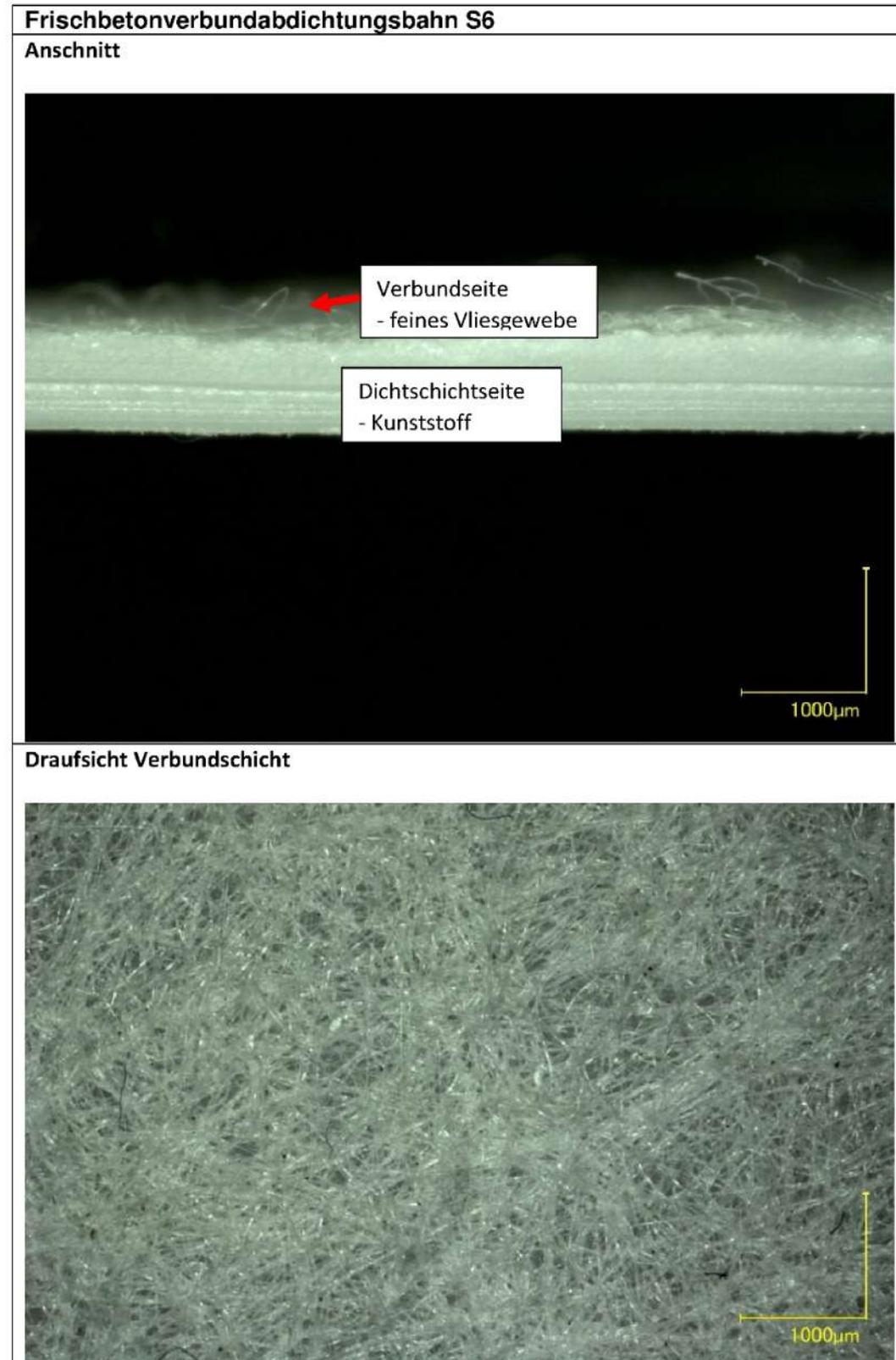


Bild A6-18. Lichtmikroskopische Aufnahme der FBV-Bahn S6 im Anschnitt und der Verbundseite

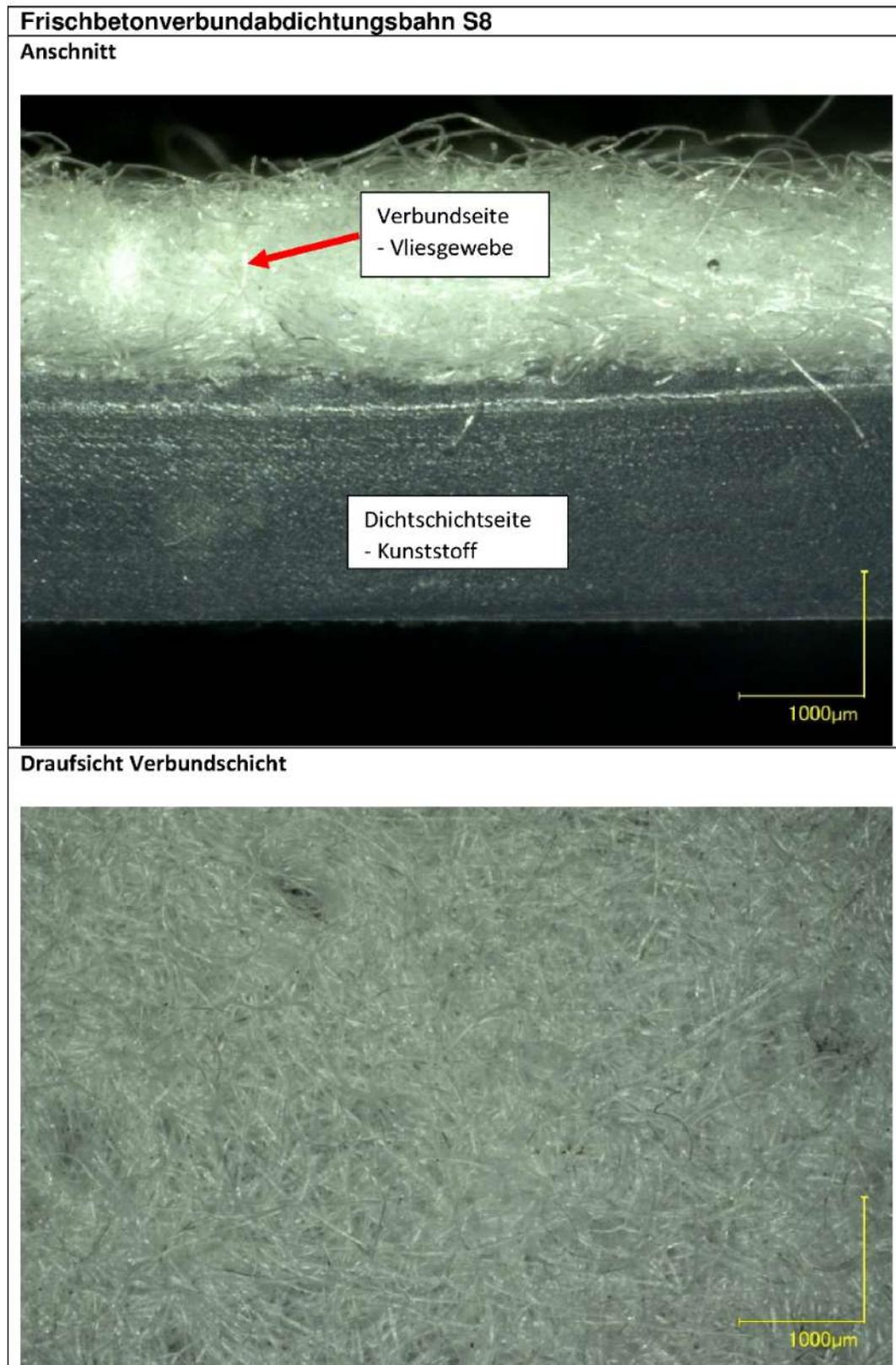


Bild A6-19. Lichtmikroskopische Aufnahme der FBV-Bahn S8 im Anschnitt und der Verbundseite

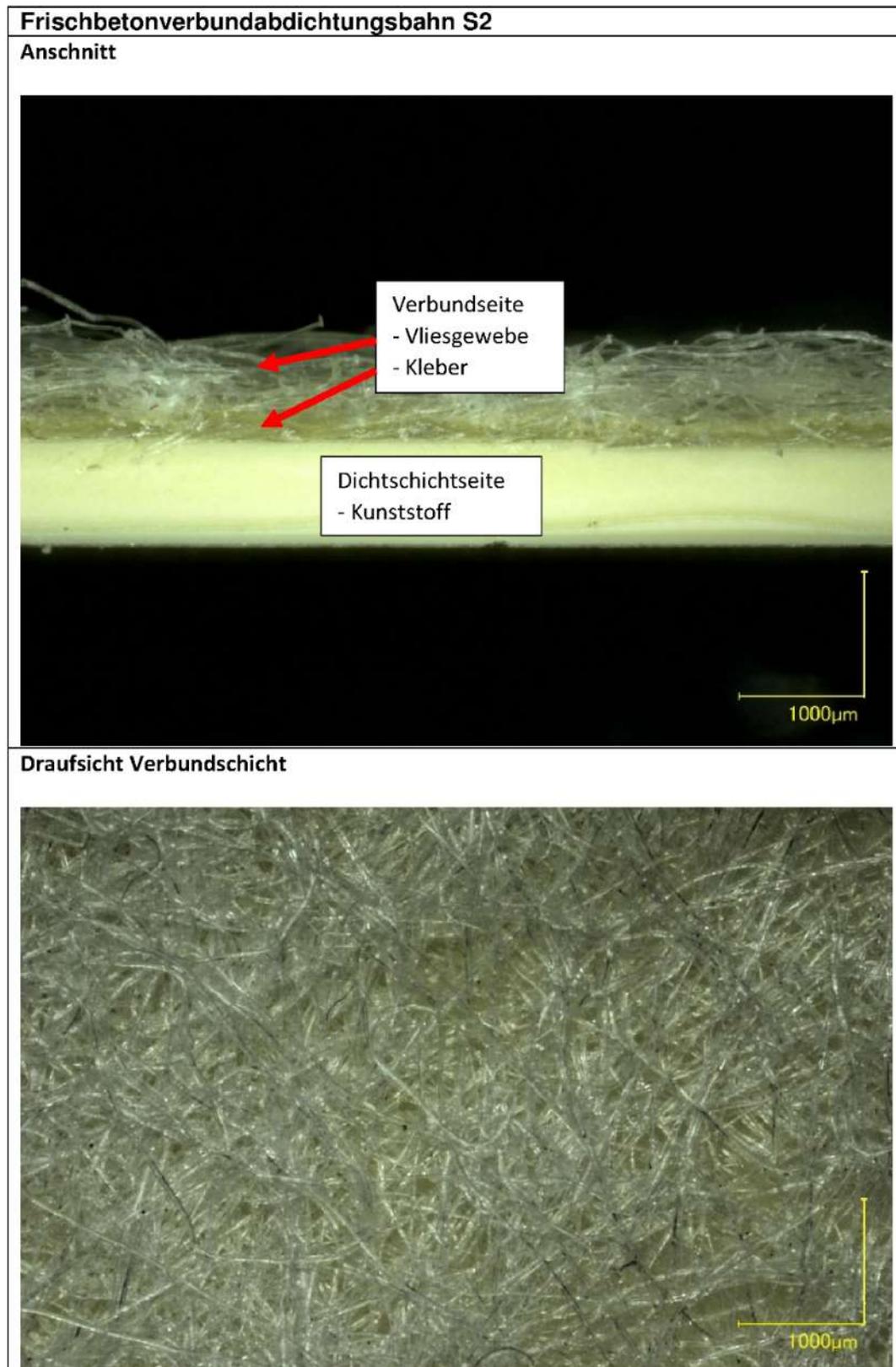


Bild A6-20. Lichtmikroskopische Aufnahme der FBV-Bahn S2 im Anschnitt und der Verbundseite

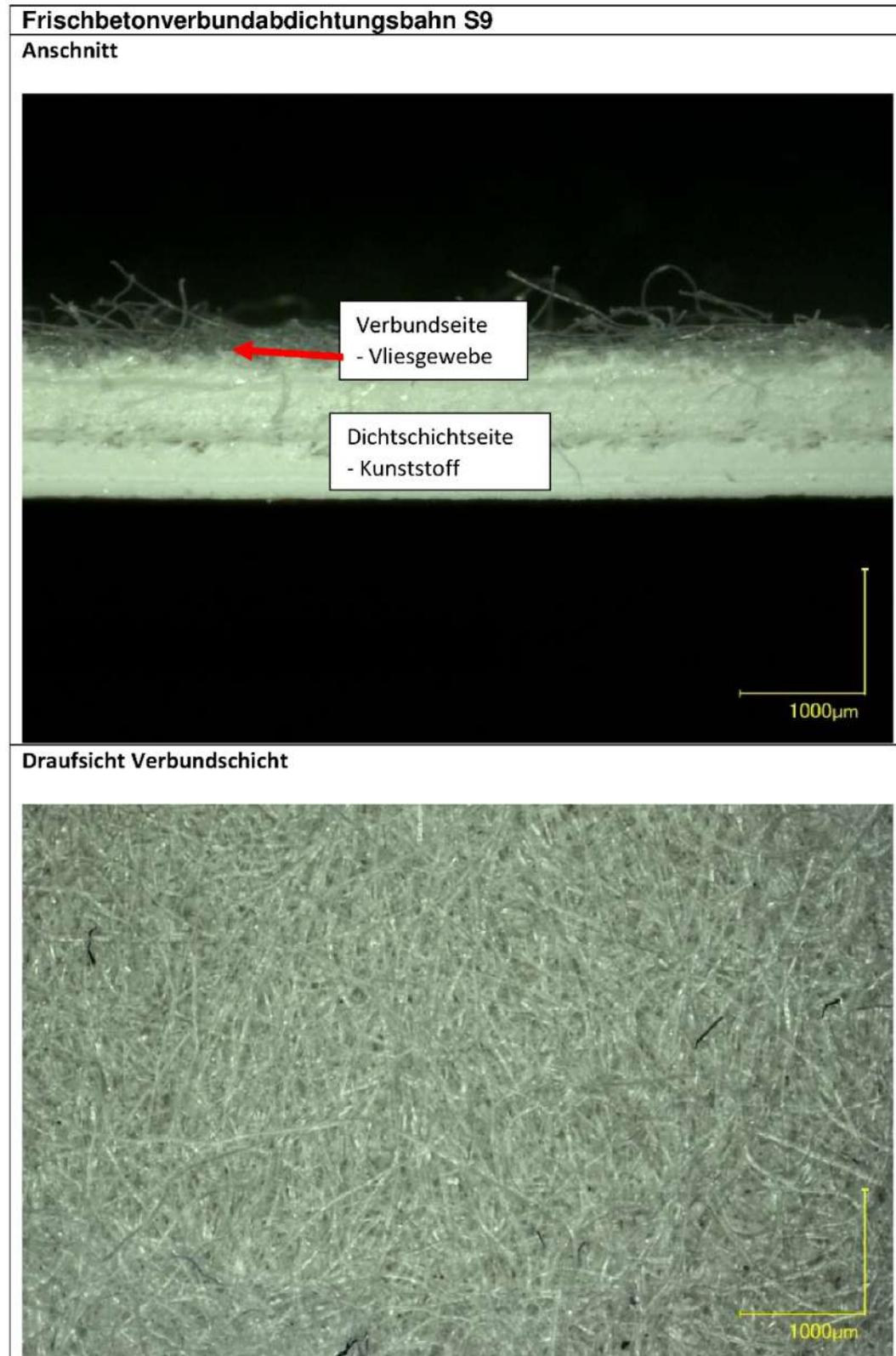


Bild A6-21. Lichtmikroskopische Aufnahme der FBV-Bahn S9 im Anschnitt und der Verbundseite

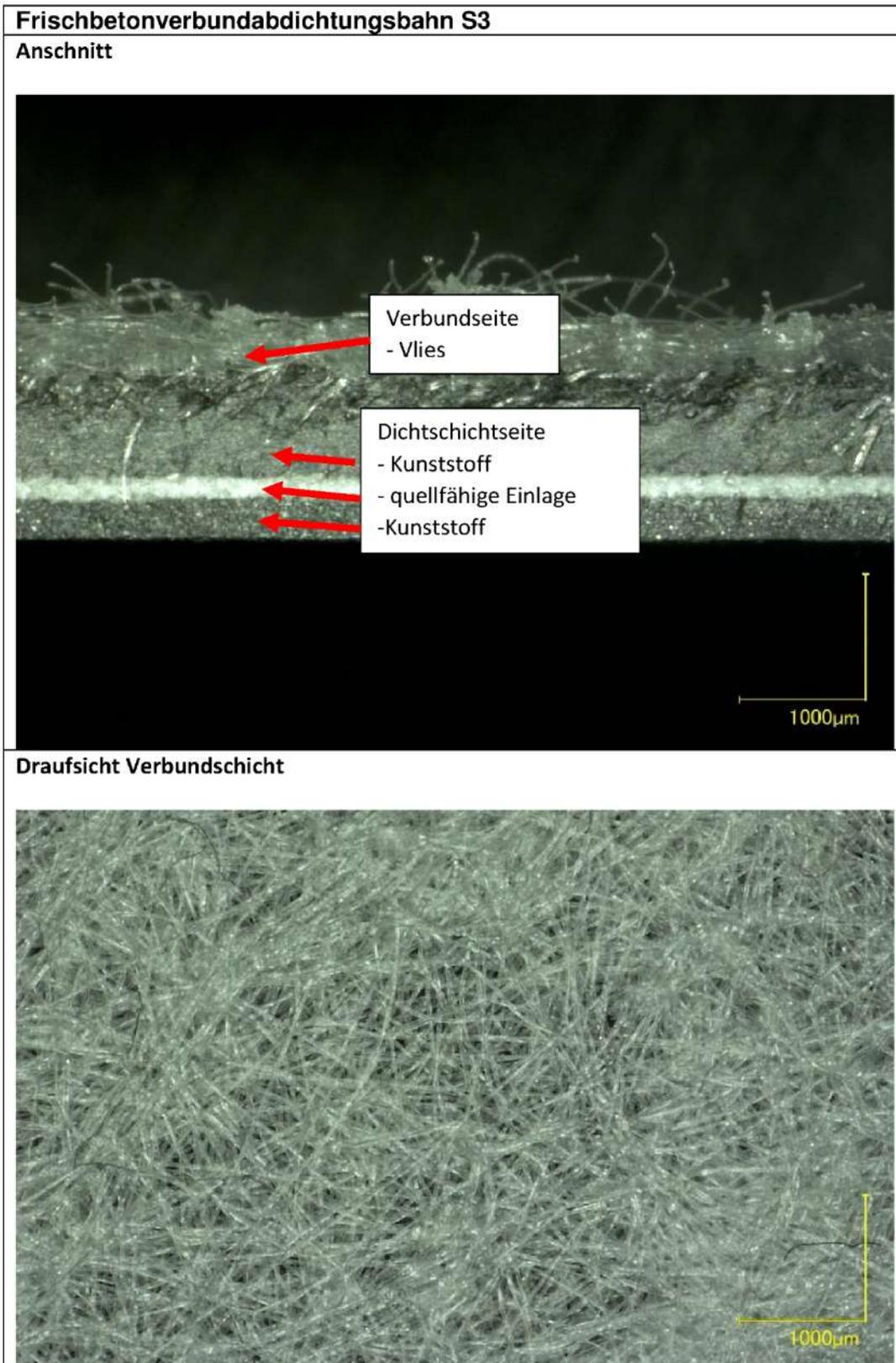


Bild A6-22. Lichtmikroskopische Aufnahme der FBV-Bahn S3 im Anschnitt und der Verbundseite

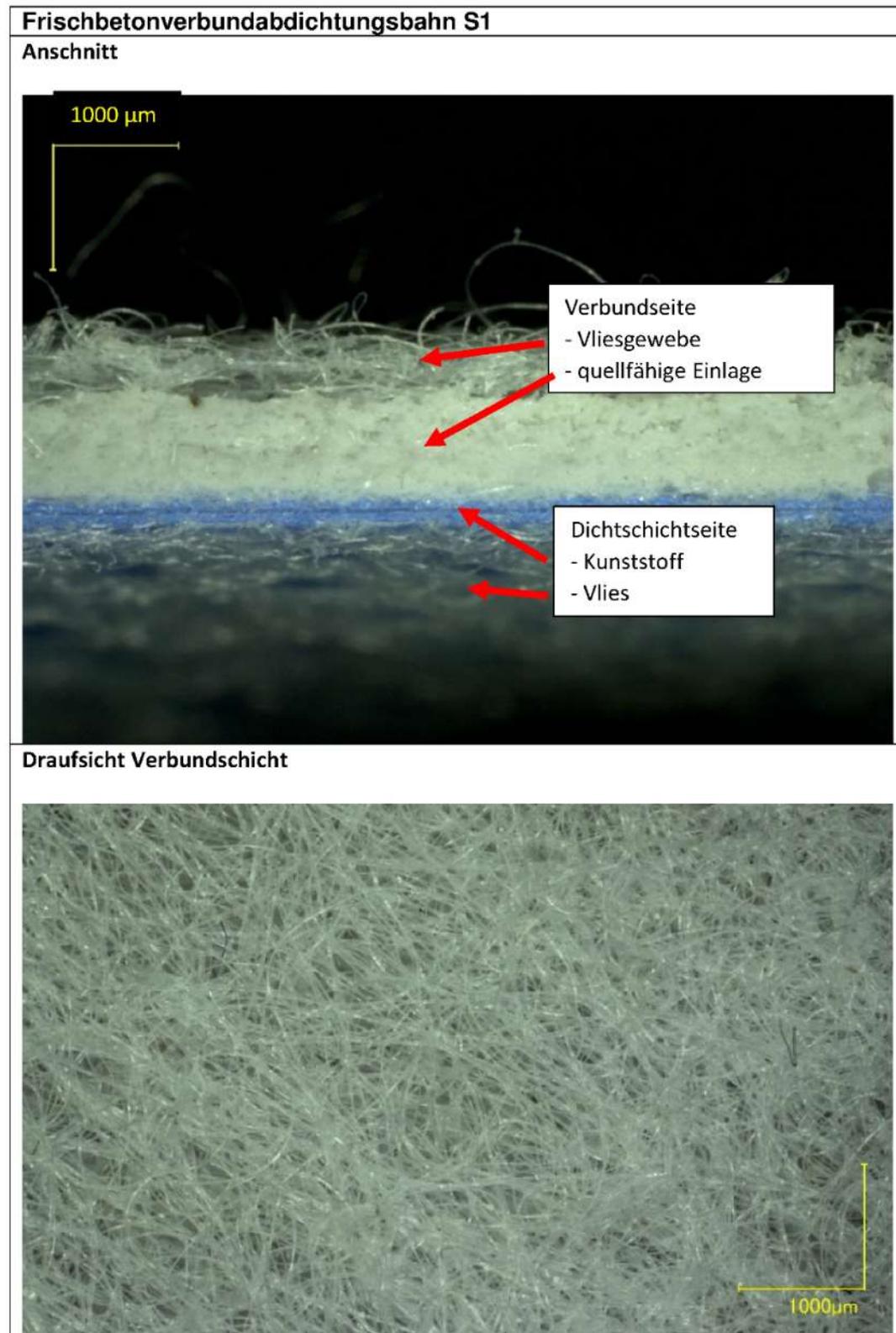


Bild A6-23. Lichtmikroskopische Aufnahme der FBV-Bahn S1 im Anschnitt und der Verbundseite

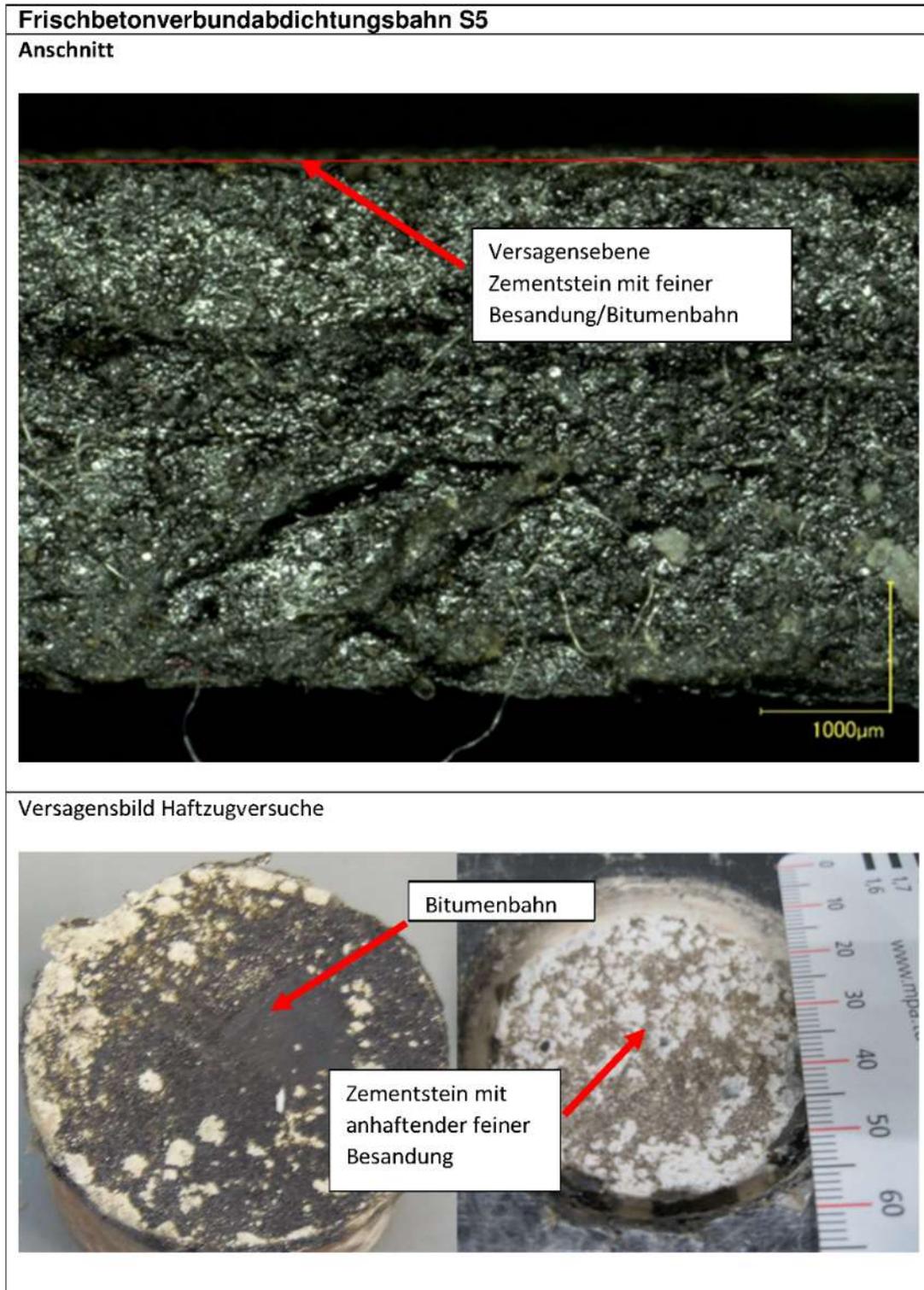
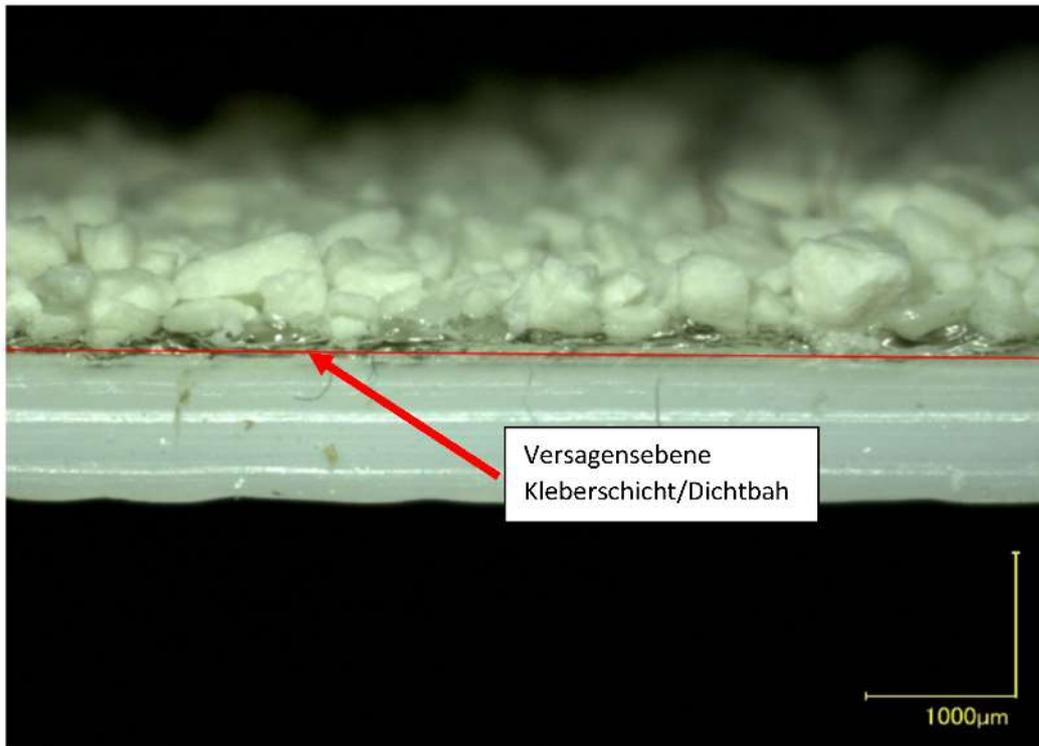


Bild A6-24. Darstellung der Versagensebene der FBV-Bahn S5

Frischbetonverbundabdichtungsbahn S7

Anschnitt



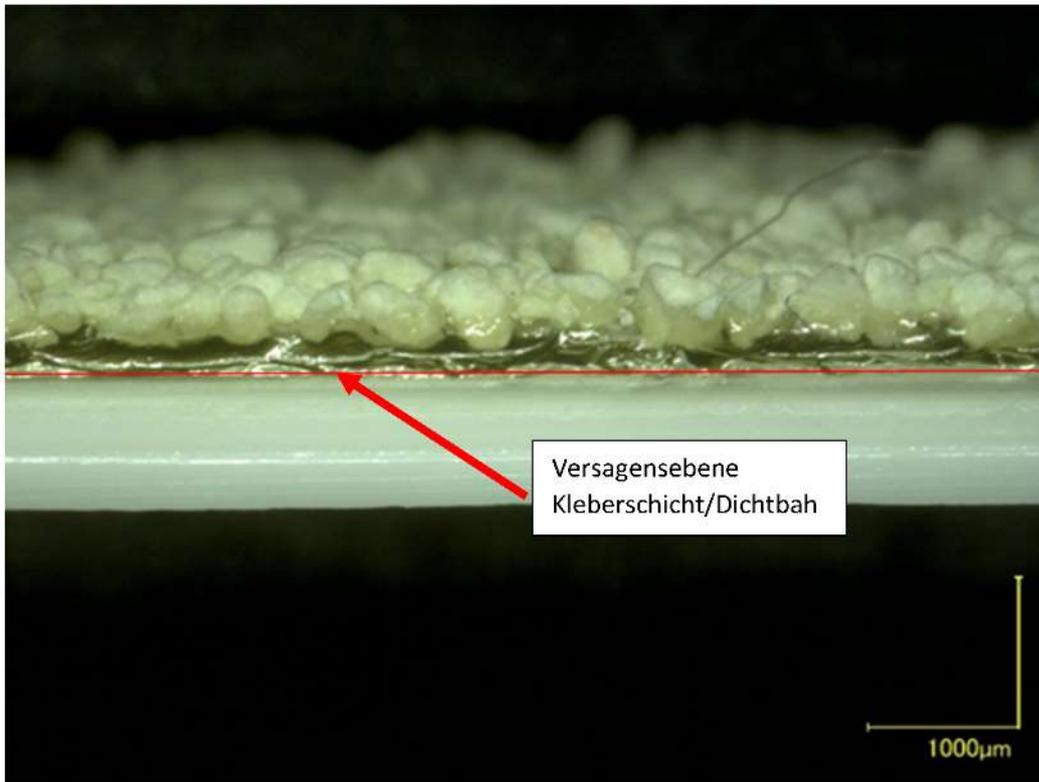
Versagensbild Haftzugversuche



Bild A6-25. Darstellung der Versagensebene der FBV-Bahn S7

Frischbetonverbundabdichtungsbahn S4

Anschnitt



Versagensbild Haftzugversuche



Bild 6-26. Darstellung der Versagensebene der FBV-Bahn S4

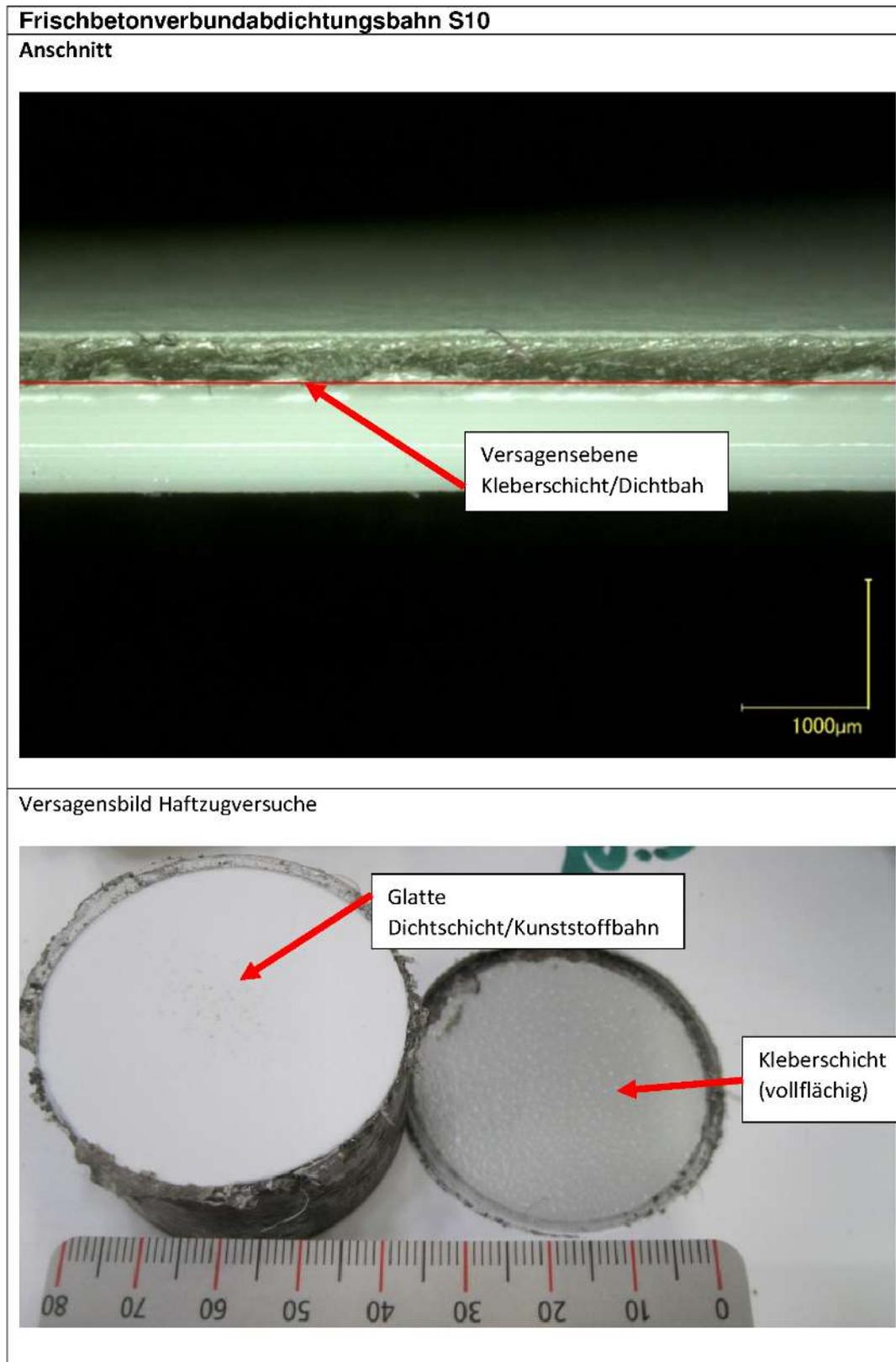


Bild A6-27. Darstellung der Versagensebene der FBV-Bahn S10

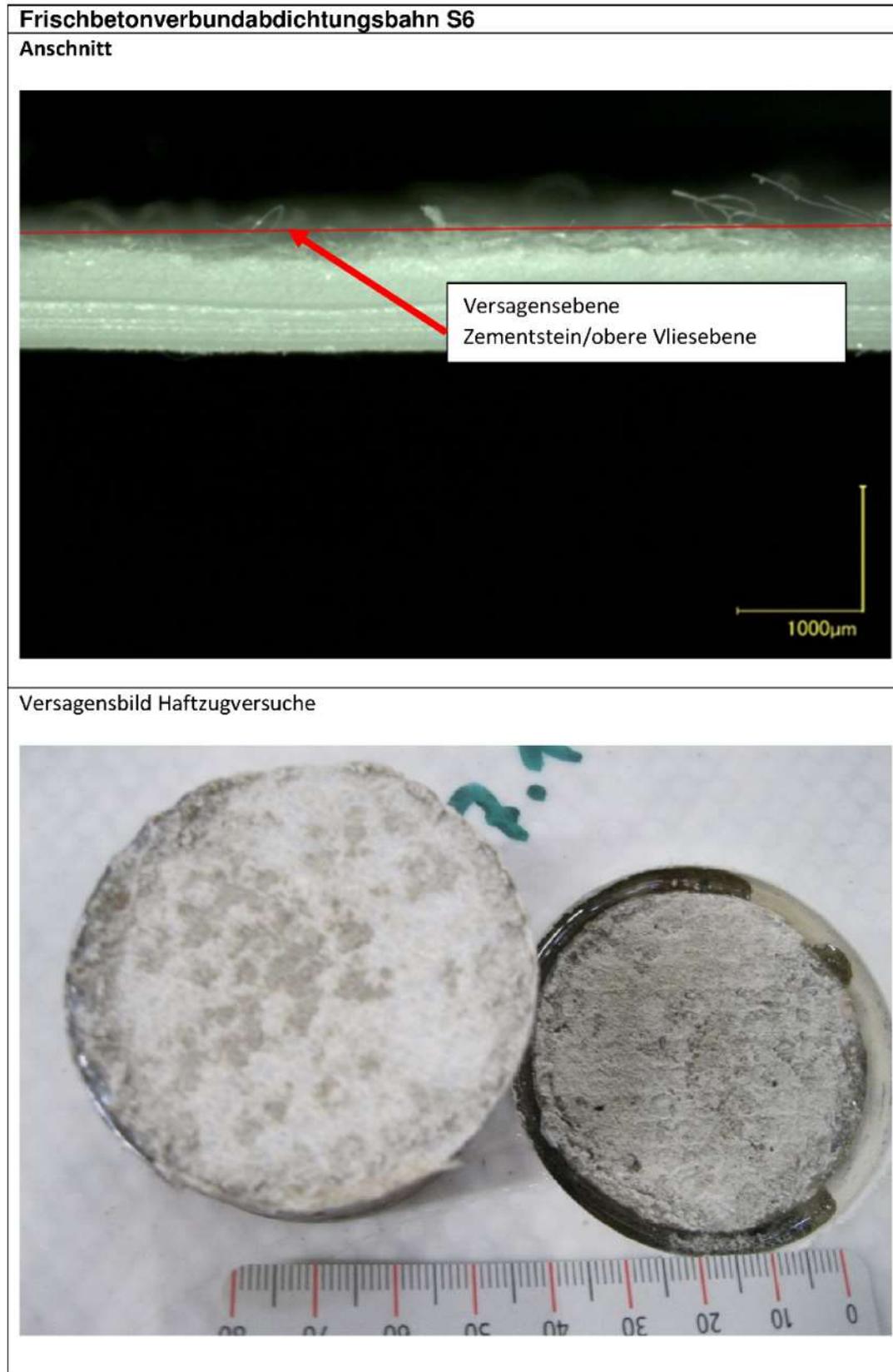


Bild A6-28. Darstellung der Versagensebene der FBV-Bahn S6

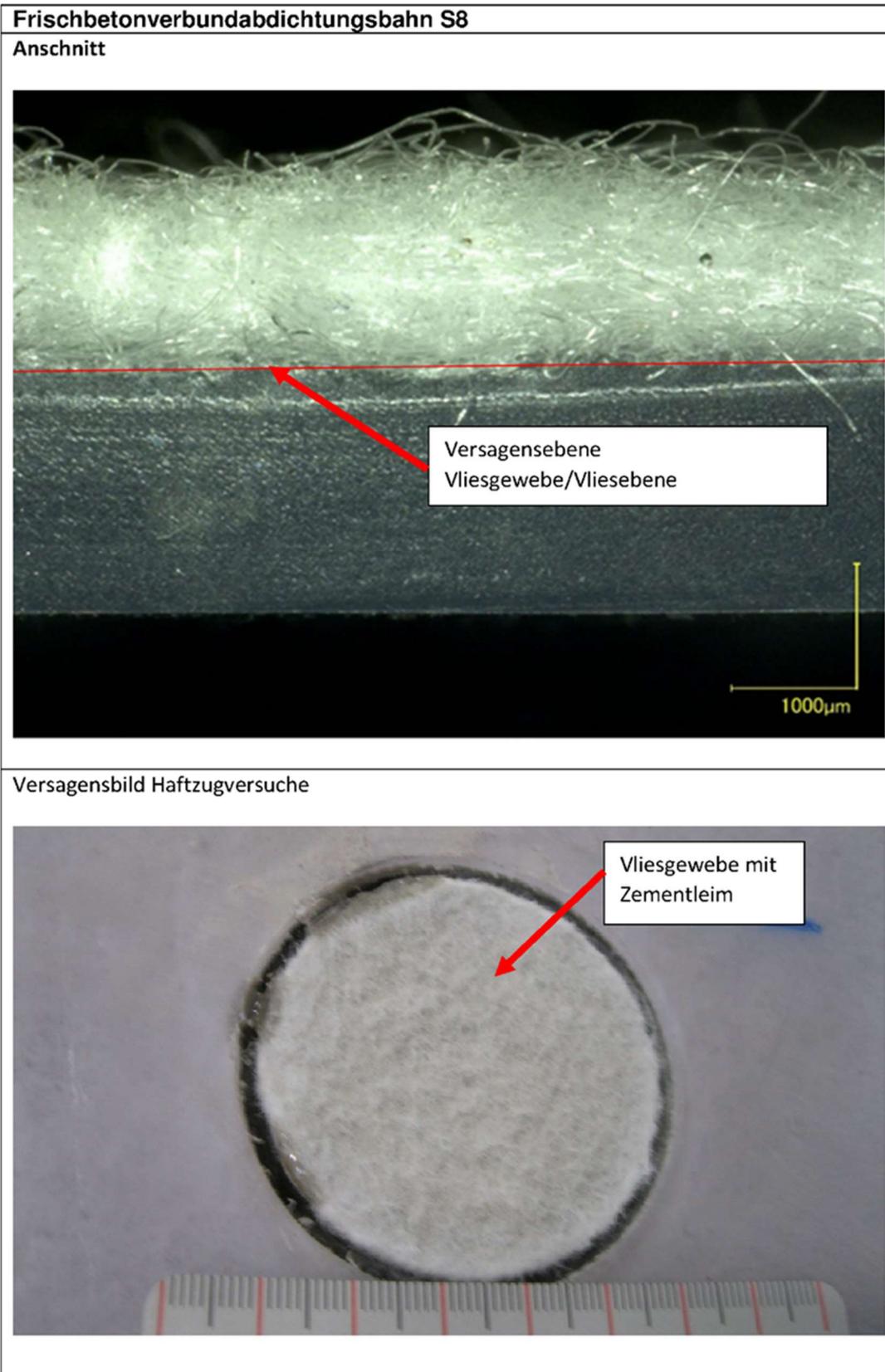


Bild A6-29. Darstellung der Versagensebene der FBV-Bahn S8

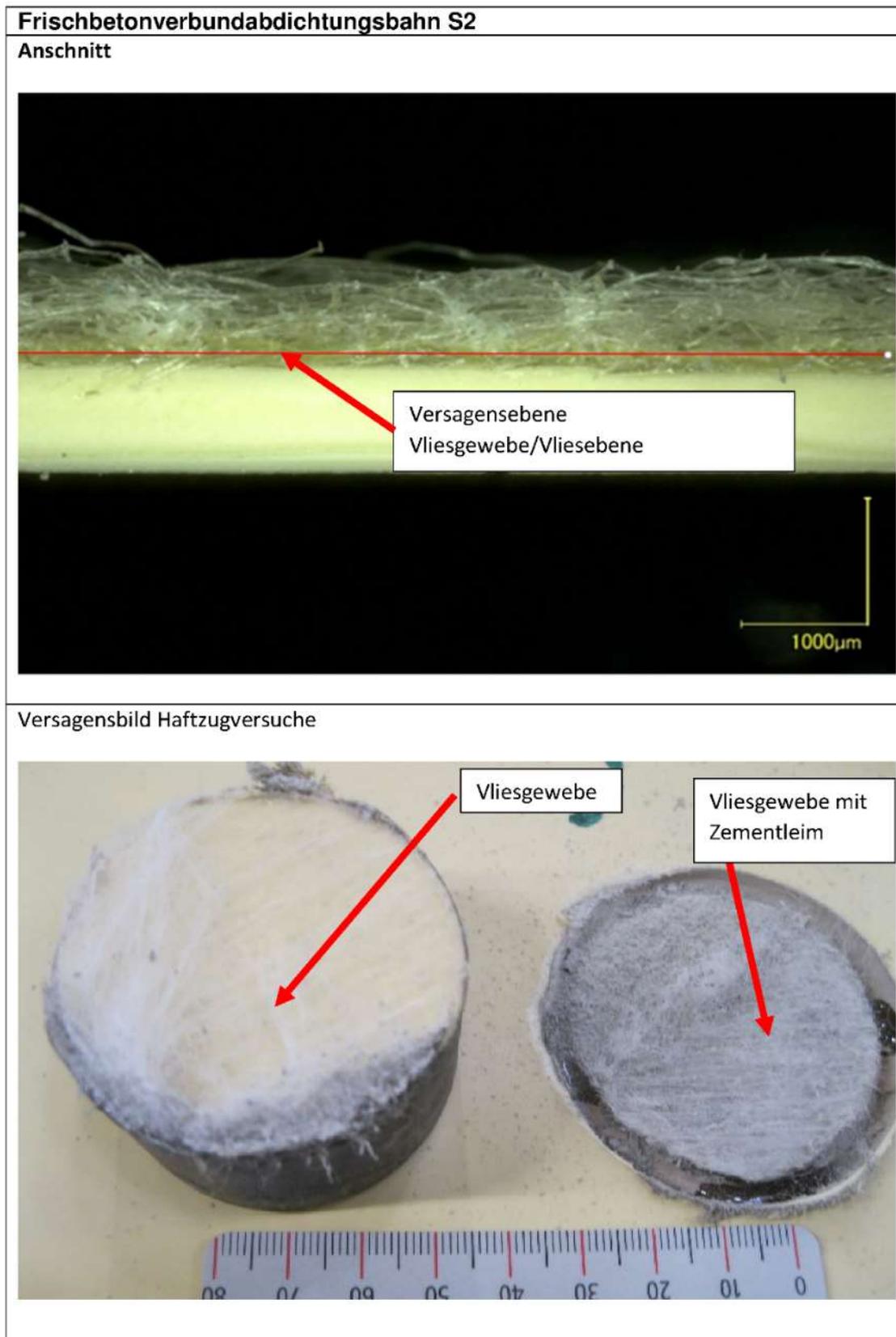


Bild A6-30. Darstellung der Versagensebene der FBV-Bahn S2

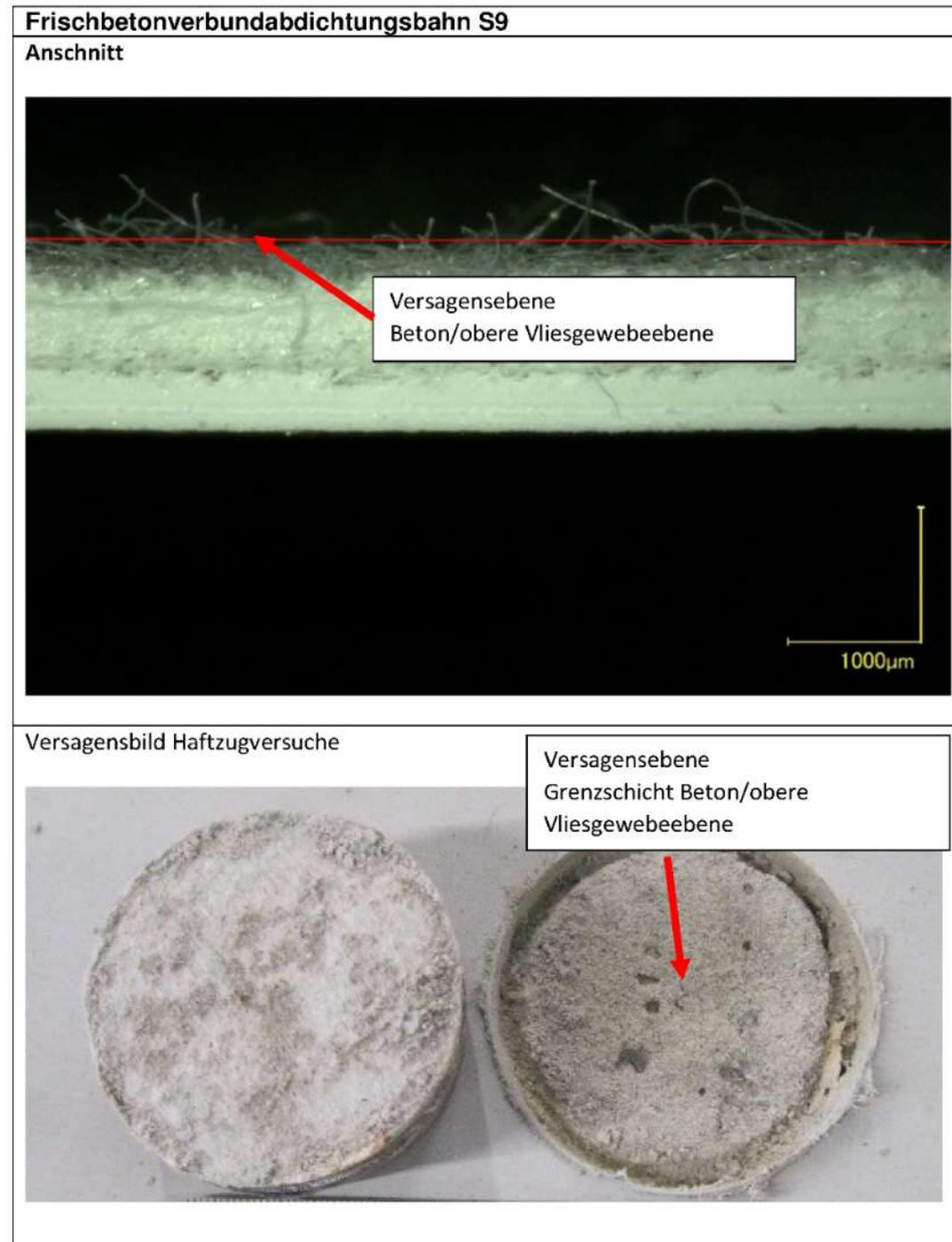
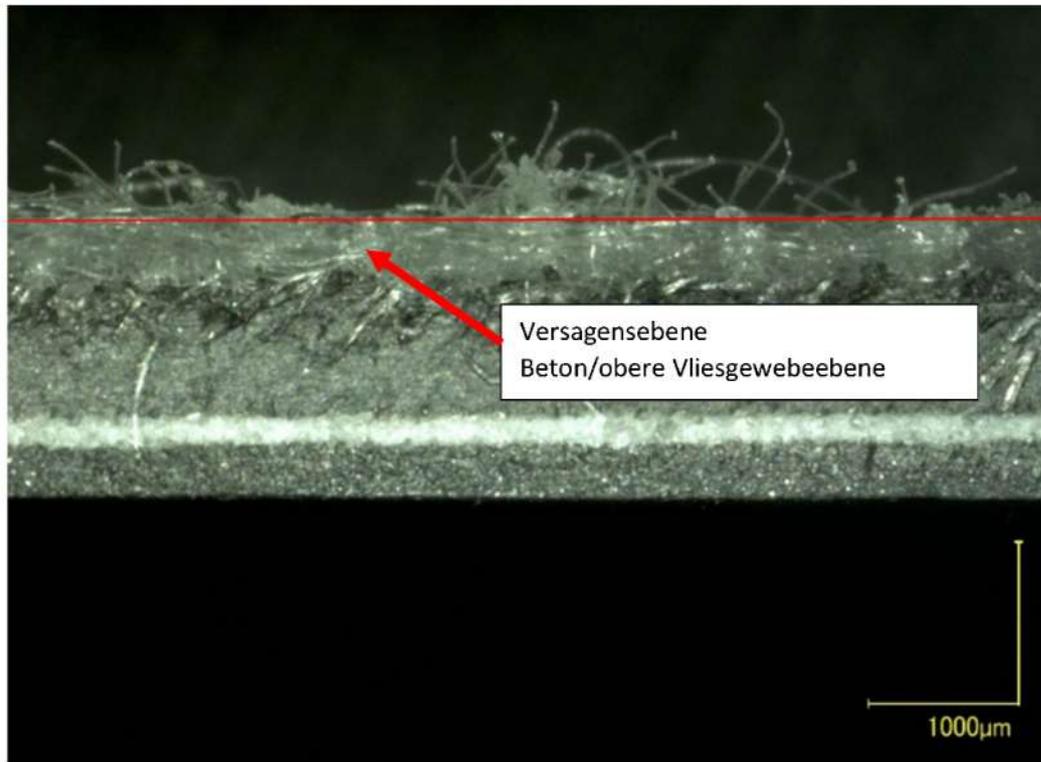


Bild A6-31. Darstellung der Versagensebene der FBV-Bahn S9

Frischbetonverbundabdichtungsbahn S3

Anschnitt



Versagensbild Haftzugversuche



Bild A6-32. Darstellung der Versagensebene der FBV-Bahn S3

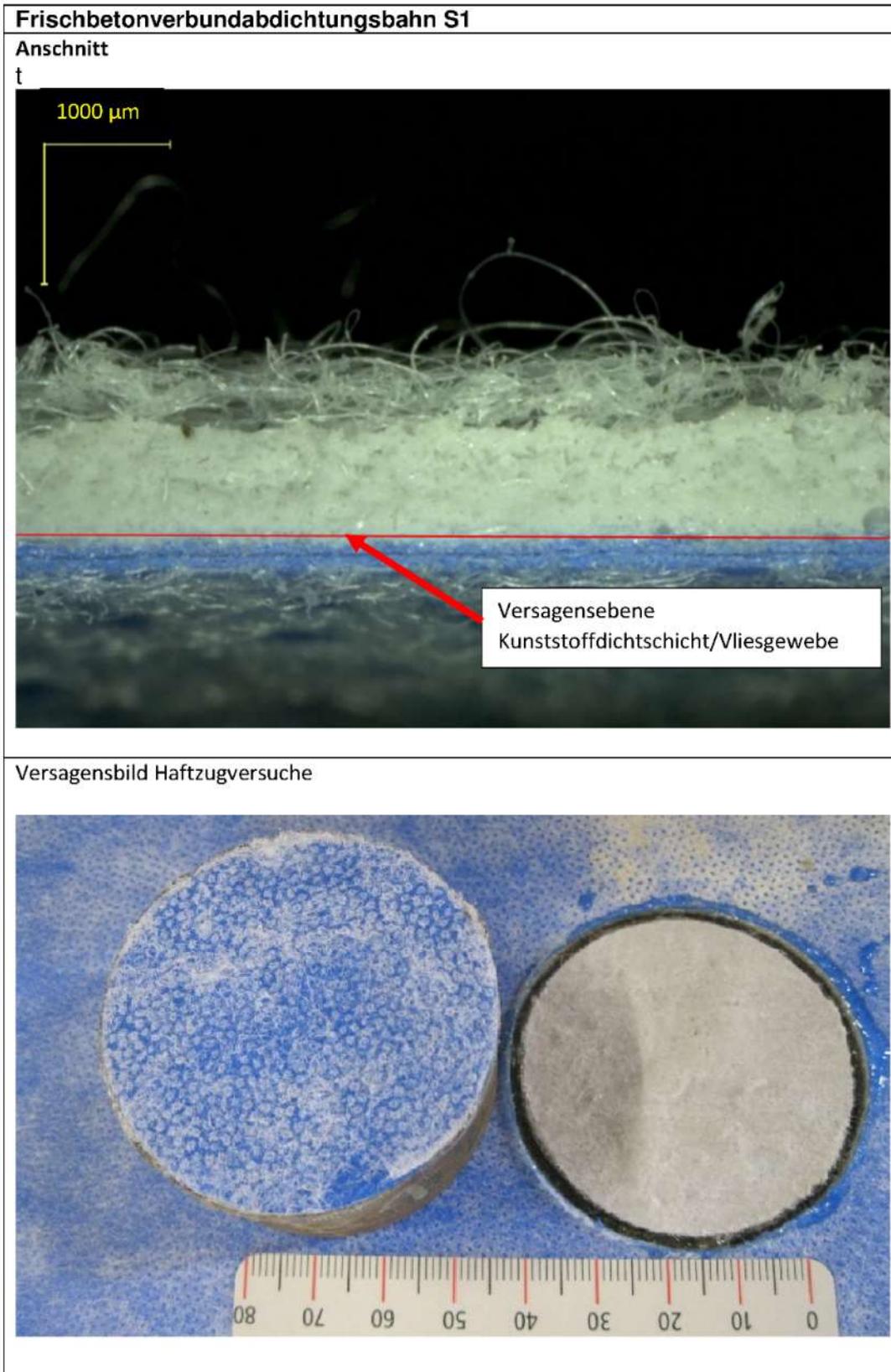


Bild A6-33. Darstellung der Versagensebene der FBV-Bahn S1

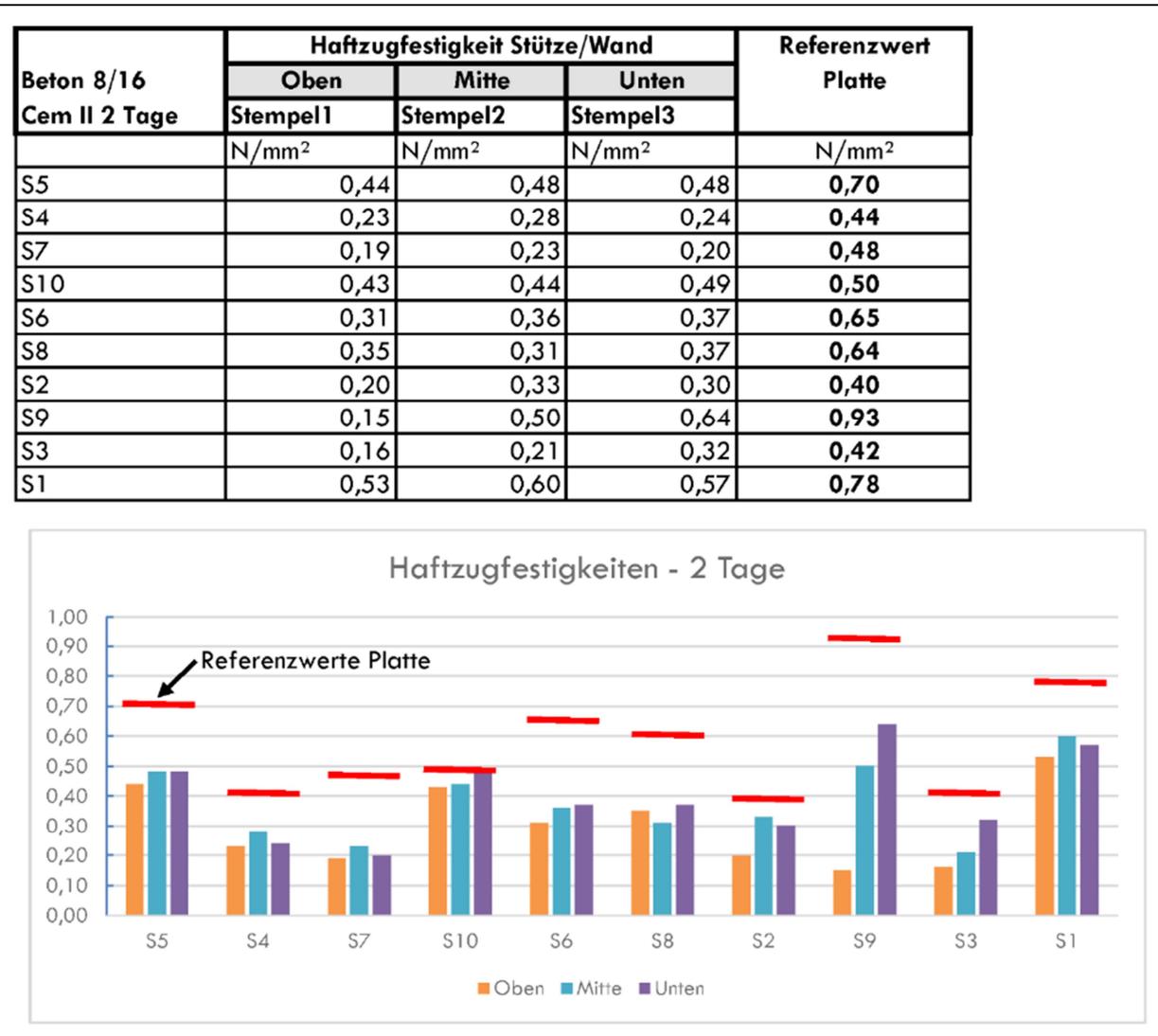


Bild A6-34. Haftzugfestigkeit in Abhängigkeit von der Betonierhöhe – 2 d-Werte – Ergebnisse aus dem Stützen/Wand-Versuch; Probekörperhöhe 2,5 m; Probenahme aus drei Bereichen (Oben (+2,05m bis 2,35 m), Mitte (+1,1 bis 1,4 m) und Unten (+0,15 m bis 0,45 m)); Beton 8/16 Cem II



Bild A6-35. Haftzugfestigkeit in Abhängigkeit von der Betonierhöhe – 7 d-Werte – Ergebnisse aus dem Stützen/Wand-Versuch; Probekörperhöhe 2,5 m; Probenahme aus drei Bereichen (Oben (+2,05m bis 2,35 m), Mitte (+1,1 bis 1,4 m) und Unten (+0,15 m bis 0,45 m)); Beton 8/16 Cem II

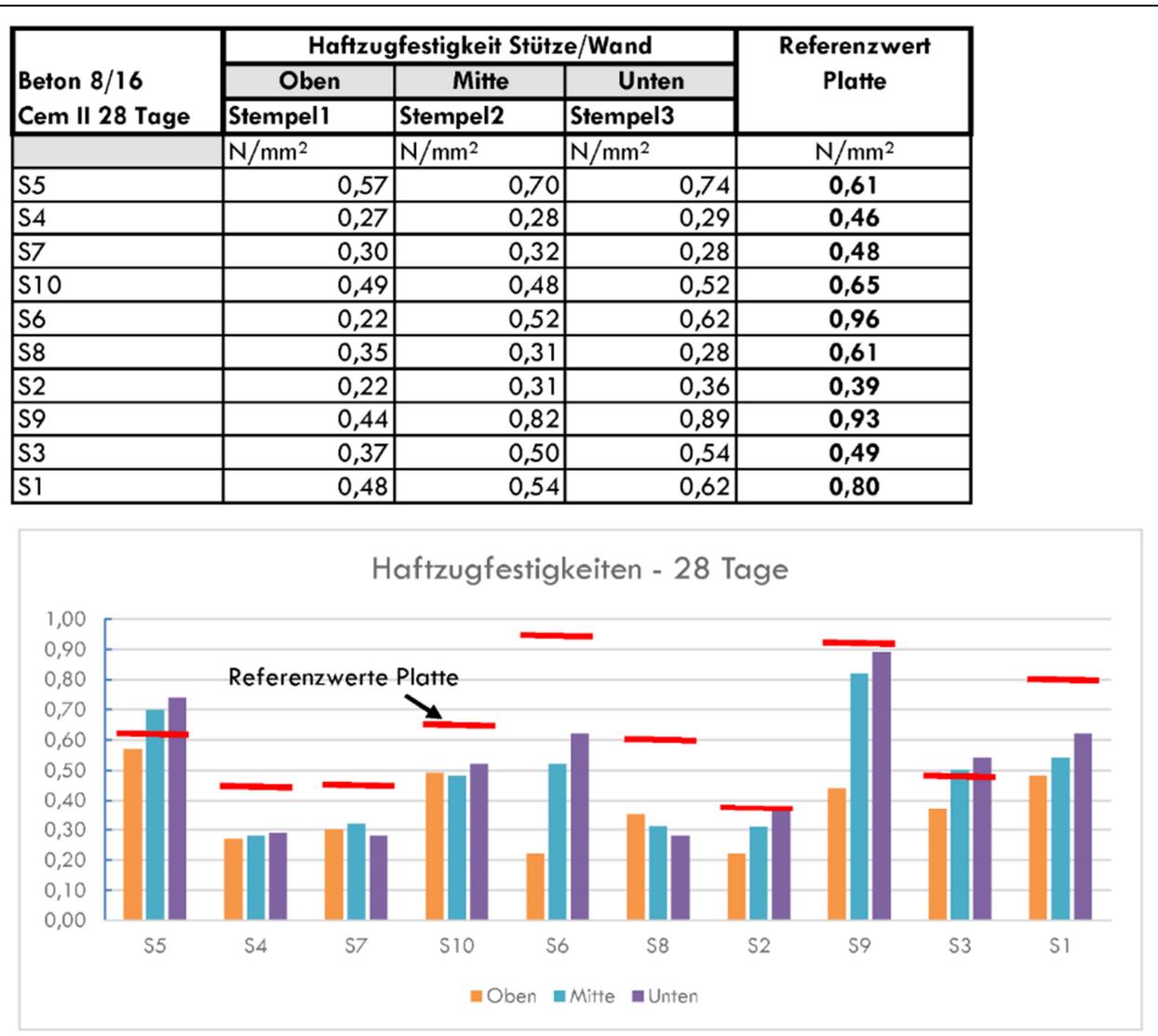


Bild A6-36. Haftzugfestigkeit in Abhängigkeit von der Betonierhöhe – 28 d-Werte – Ergebnisse aus dem Stützen/Wand-Versuch; Probekörperhöhe 2,5 m; Probenahme aus drei Bereichen (Oben (+2,05m bis 2,35 m), Mitte (+1,1 bis 1,4 m) und Unten (+0,15 m bis 0,45 m)); Beton 8/16 Cem II

Anhang A7: Einzelergebnisse der Untersuchungen zum Wärmeausdehnungskoeffizienten der FBV-Systeme

1. Allgemeines

Als eine mögliche bzw. denkbare weitere Ursache für in der Praxis nach dem Ausschalen festgestellten Verbundstörungen wurden in einer Projektsitzung neben einer zu geringen Haftzugfestigkeit auch Scherspannungen in der Grenzschicht durch unterschiedliche Längenausdehnungen bzw. Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen FBVS und Bahn genannt. Da die Wärmeausdehnungskoeffizienten der Bahnen nicht bekannt waren, wurden zur Klärung der Frage orientierende Untersuchungen zur temperaturabhängigen Längenänderung durch die MPA BS durchgeführt.

2. Prüfverfahren und Probekörper

Die Durchführung der Untersuchungen erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1107-2 [R13] und DIN EN 1107-1 [R14]. Für die Prüfung wurden aus den Bahnen jeweils 3 Probekörper mit den Abmessungen von 300 x 100 mm (Länge x Breite) in Längs-, Quer- und Diagonalrichtung aus der Bahnenmitte entnommen. Die Probekörper wurden mit der Verbundseite nach unten auf einer mit Talkumpuder vollflächig beschichteten Glasplatte gelagert. Auf die Dichtbahnseite wurden in Probenlängsrichtung Messmarken für ein Setzdehnungsmessgerät im Abstand von 150 mm geklebt. Die so vorbereiteten Probekörper wurden für 24 Stunden bei $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ gelagert und anschließend auf $-(20 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ in einer Klimatrue abgekühlt und für weitere 24 h unter den Temperaturbedingungen gelagert. Zur Erfassung von Längenänderungen wurde ein Extensometer mit einer Genauigkeit von 0,01 mm eingesetzt. Die Messung erfolgte unmittelbar vor der Einlagerung in die Klimatrue und am Ende der Kältebeanspruchung unmittelbar nach dem Öffnen der Truhe.

3. Ergebnisse und Bewertung

Die Ergebnisse sind in der nachstehenden Tabelle A7-1 und in Bild A7-1 zusammengestellt. Das bituminöse System S5 hebt sich deutlich ab. Es kommt durch die Temperaturdifferenz von 43°C und unbehinderter Ausdehnung nahezu zu keiner Längenänderung. Lediglich in Diagonalrichtung wurde ein Wert von $4,5 \times 10^{-6}$ (1/k) ermittelt. Die FBV-Bahnen S4, S6, S8 und S2 weisen in Längs- und Querrichtung vergleichbare Wärmedehnzahlen auf. Bei den Bahnen S7 und S10 ist die Ausdehnung in Querrichtung niedriger. Die FBVS S9, S3 und S1 zeigen dagegen in Querrichtung eine leicht erhöhte Wärmedehnzahl. Die Verformung in Diagonalrichtung liegt i. d. R. auf dem Niveau der Ausdehnungskoeffizienten in Querdehnung. In Längsrichtung lassen sich die Bahnen z. B. in folgende Gruppen einteilen:

| | |
|---|--|
| Gruppe 1: $\alpha_T = 0 \times 10^{-6}$ (1/k) | S5 (0) |
| Gruppe 2: $\alpha_T = 50$ bis 80×10^{-6} (1/k) | S9 (56), S1(64), S3(78) |
| Gruppe 3: $\alpha_T = 100$ bis 170×10^{-6} (1/k) | S3 (100), S10(119), S4(132); S2(141), S8(146), S7(165) |

Für den Beton findet sich in der Literatur ein Wert von $\alpha_T = 10 \times 10^{-6}$ (1/k) bzw. 0,01 mm/(mxK) wieder. Die Bahn S7 weist damit z. B. in Längsrichtung eine um den Faktor 17 höhere Wärme-dehnzahl aus als der Beton. Unter der Annahme, dass die Betonage z. B. bei +5 °C erfolgt und der Betonkörper durch die Hydratationswärme eine Temperatur von 50 °C erreicht, ergeben für die jeweils höchsten Werte der Gruppen 2 und 3 für z. B. eine 2,5 m hohe oder 5 m hohe Wand nachstehende Unterschiede in der Längenänderung:

| | | |
|-----------|---|-----------------------|
| Beton: | $\Delta L = 2500 \text{ mm} \times 45 \text{ °C} \times 10 \times 10^{-6} = 1,13 \text{ mm}$ | |
| | $\Delta L = 5000 \text{ mm} \times 45 \text{ °C} \times 10 \times 10^{-6} = 2,25 \text{ mm}$ | |
| Gruppe 2: | $\Delta L = 2500 \text{ mm} \times 45 \text{ °C} \times 78 \times 10^{-6} = 8,78 \text{ mm}$ | => Differenz: 7,65 mm |
| | $\Delta L = 5000 \text{ mm} \times 45 \text{ °C} \times 78 \times 10^{-6} = 17,6 \text{ mm}$ | => Differenz: 15,4 mm |
| Gruppe 3: | $\Delta L = 2500 \text{ mm} \times 45 \text{ °C} \times 165 \times 10^{-6} = 18,6 \text{ mm}$ | => Differenz: 17,5 mm |
| | $\Delta L = 5000 \text{ mm} \times 45 \text{ °C} \times 165 \times 10^{-6} = 37,1 \text{ mm}$ | => Differenz: 34,8 mm |

Über die Bauteilhöhe gesehen entspricht das Ergebnis für die Bahn der Gruppe 3 mit dem höchsten α_T -Wert und den getroffenen hohen Temperaturdifferenzen einer Verformung von z. B. 0,007 mm/cm. Da mit abnehmendem α_T -Wert und abnehmender Temperaturdifferenz zwischen der Einbautemperatur und der Hydratationstemperatur die Unterschiede in der Längenänderung und damit ggf. auftretende Scherspannungen, die die Verbundeigenschaften behindern können, abnehmen und die Ausdehnung der Bahnen durch die Haftspannung zwischen Schalung und Dichtbahn sowie die mit der Erhärtung zunehmende adhäsive Ankopplung die Ausdehnung behindert bzw. stark einschränkt wird, kann die Aussage getroffen werden, dass die Scherspannungen durch unterschiedliche α_T -Werte von den FBVS und Beton vernachlässigt werden können. Für die im Rahmen der Untersuchungen bei 20 °C hergestellte 2,5 m hohe Stütze, wurden für eine angenommene Temperaturdifferenz von 30 °C an keiner der untersuchten FBV-Bahnen Verbundstörungen festgestellt.

Tabelle A7-1. Anhaltswerte für Wärmeausdehnungskoeffizienten der FBVS – Einzel- und Mittelwerte

| FBVS | Entnahmerichtung* | Längendifferenz [mm] | | | Ausdehnungskoeffizient α [$10^{-6}/K$] | | | Mittelwert α | Mittelwert der α aller Richtungen |
|------|-------------------|----------------------|---------|---------|---|---------|---------|---------------------|--|
| | | Mess. 1 | Mess. 2 | Mess. 3 | Mess. 1 | Mess. 2 | Mess. 3 | | |
| S5 | L | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,9 | |
| | Q | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 0,0 | 13,6 | 0,0 | | |
| | D | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,0 | 1,7 | 1,6 | | |
| S4 | L | 0,82 | 0,87 | 0,72 | 136,0 | 142,5 | 118,3 | 137,2 | |
| | Q | 0,80 | 0,84 | 0,81 | 134,0 | 138,4 | 133,5 | | |
| | D | 0,86 | 0,91 | 0,85 | 142,9 | 148,8 | 140,7 | | |
| S7 | L | 0,93 | 1,04 | 1,02 | 153,3 | 173,8 | 168,8 | 131,8 | |
| | Q | 0,43 | 0,66 | 0,54 | 70,7 | 107,0 | 89,9 | | |
| | D | 0,76 | 1,00 | 0,78 | 124,8 | 167,5 | 130,4 | | |

| FBVS | Entnahmerichtung* | Längendifferenz [mm] | | | Ausdehnungskoeffizient α [$10^{-6}/K$] | | | Mittelwert α | Mittelwert der α aller Richtungen |
|------|-------------------|----------------------|---------|---------|---|---------|---------|---------------------|--|
| | | Mess. 1 | Mess. 2 | Mess. 3 | Mess. 1 | Mess. 2 | Mess. 3 | | |
| S10 | L | 0,68 | 0,67 | 0,79 | 113,9 | 113,8 | 131,1 | 119,6 | 106,3 |
| | Q | 0,58 | 0,55 | 0,54 | 97,7 | 92,2 | 88,6 | 92,8 | |
| | D | 0,57 | 0,67 | 0,67 | 95,9 | 113,2 | 110,6 | 106,6 | |
| S6 | L | 0,54 | 0,48 | 0,38 | 90,8 | 79,6 | 63,1 | 77,8 | 84,0 |
| | Q | 0,57 | 0,52 | 0,55 | 95,8 | 86,1 | 91,1 | 91,0 | |
| | D | 0,49 | 0,55 | 0,46 | 82,1 | 91,6 | 76,0 | 83,2 | |
| S8 | L | 0,88 | 0,81 | 0,95 | 174,4 | 132,4 | 157,6 | 145,8 | 138,9 |
| | Q | 0,89 | 0,73 | 0,82 | 149,1 | 120,8 | 135,7 | 135,2 | |
| | D | 0,90 | 0,82 | 0,71 | 150,8 | 138,4 | 118,2 | 135,8 | |
| S2 | L | 0,80 | 0,90 | 0,64 | 135,7 | 146,8 | 142,4 | 141,6 | 146,4 |
| | Q | 0,84 | 0,93 | 0,72 | 142,2 | 152,8 | 160,4 | 151,8 | |
| | D | 0,82 | 0,94 | 0,64 | 139,6 | 155,5 | 142,2 | 145,8 | |
| S9 | L | 0,32 | 0,33 | 0,32 | 53,7 | 53,8 | 52,6 | 53,4 | 66,6 |
| | Q | 0,52 | 0,40 | 0,53 | 87,1 | 64,9 | 87,0 | 79,7 | |
| | D | 0,41 | 0,41 | 0,39 | 69,0 | 66,9 | 64,8 | 66,9 | |
| S3 | L | 0,68 | 0,57 | 0,60 | 114,0 | 90,4 | 98,4 | 100,9 | 128,2 |
| | Q | 0,83 | 0,94 | 0,93 | 138,6 | 144,7 | 153,4 | 145,6 | |
| | D | 0,80 | 0,96 | 0,76 | 134,2 | 154,3 | 125,6 | 138,0 | |
| S1 | L | 0,43 | 0,35 | 0,38 | 72,2 | 57,5 | 62,5 | 64,1 | 76,5 |
| | Q | 0,51 | 0,51 | 0,60 | 86,0 | 83,5 | 98,5 | 89,3 | |
| | D | 0,48 | 0,49 | 0,41 | 80,0 | 81,0 | 67,0 | 76,0 | |

*L (Längs), Q (Quer), D (Diagonal) zur Ausrollrichtung

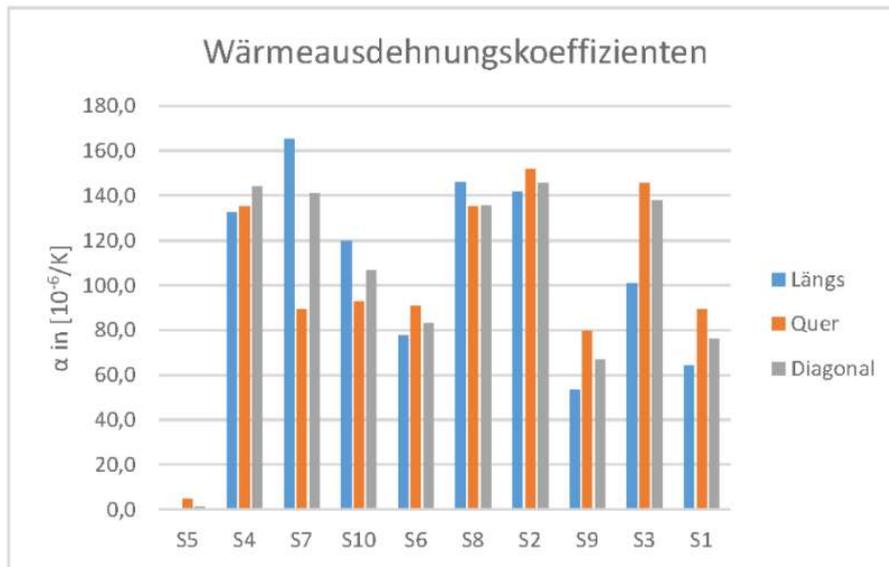


Bild A7-2. Anhaltswerte der Wärmeausdehnungskoeffizienten der FBVS – Mittelwerte aus jeweils Einzelmessungen

Anhang A8: Einzelergebnisse der Untersuchungen zu Scherverhalten und Dichtheit der Fügenähte

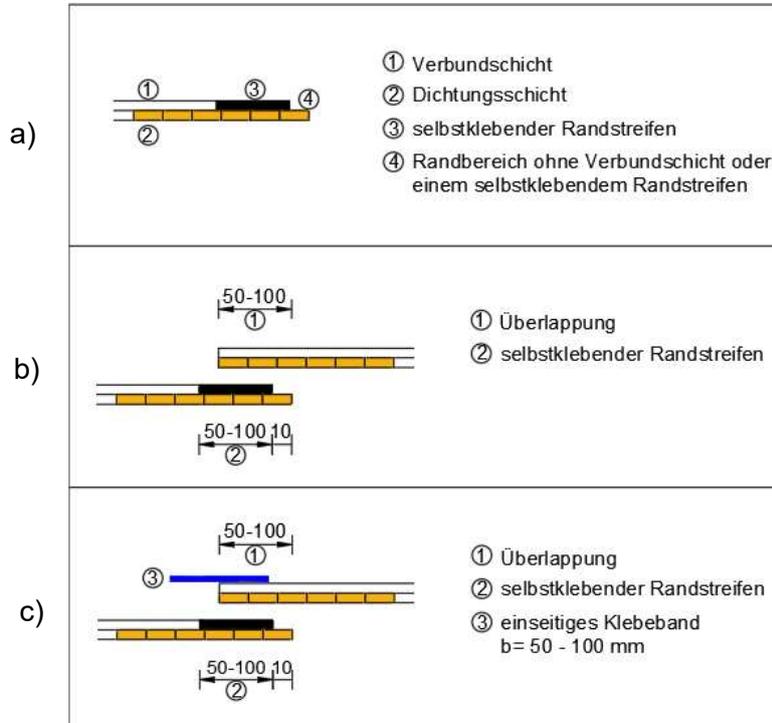


Bild A8-1. Nahtvarianten der untersuchten FBVS – Überlappnähte – a) Bahnenbezeichnung, b) Längsnaht mit Selbstklebestreifen und c) mit zusätzlicher Absicherung mit einem einseitig klebenden Sicherungstape mit zum System passender Verbundschicht

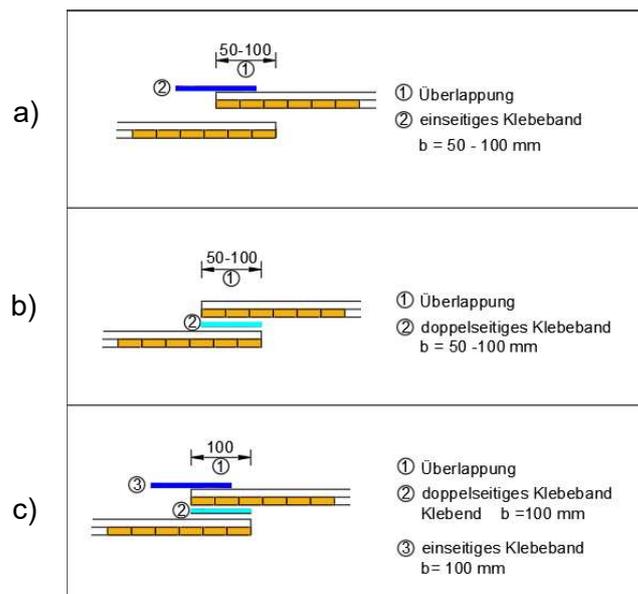


Bild A8-2. Nahtvarianten der untersuchten FBVS- Überlappnähte – a) Quernah mit einseitig klebendem Sicherungstape (mit zum System passender Verbundschicht), b) mit doppelseitigem Klebestreifen und c) als Kombination aus a) und b)

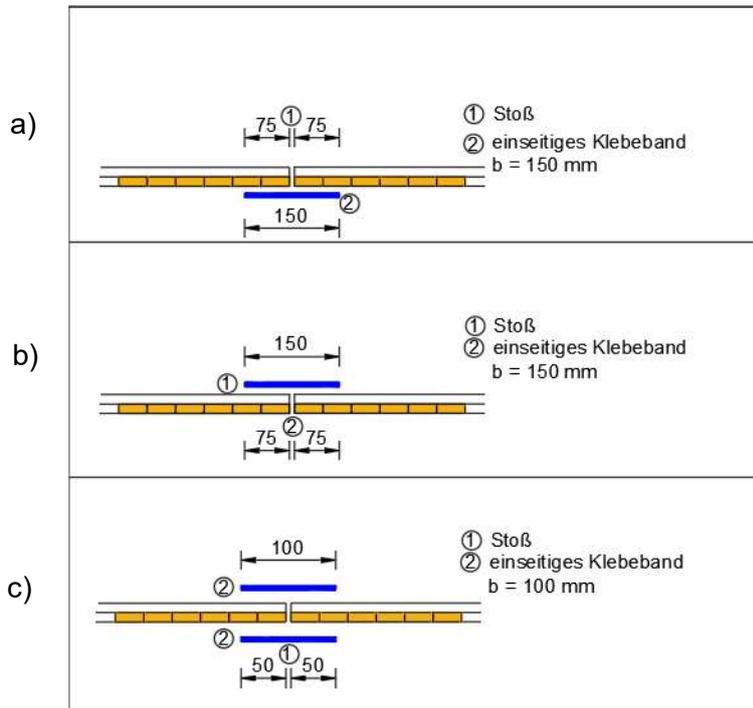


Bild A8-3. Nahtvarianten der untersuchten FBVS – Stoßnähte – a) Quernaht mit einseitig klebendem Sicherungstape (unterlegt), b) Quernaht mit einseitig klebendem Sicherungstape (mit zum System passender Verbundschicht) und c) als Kombination aus a) und b)

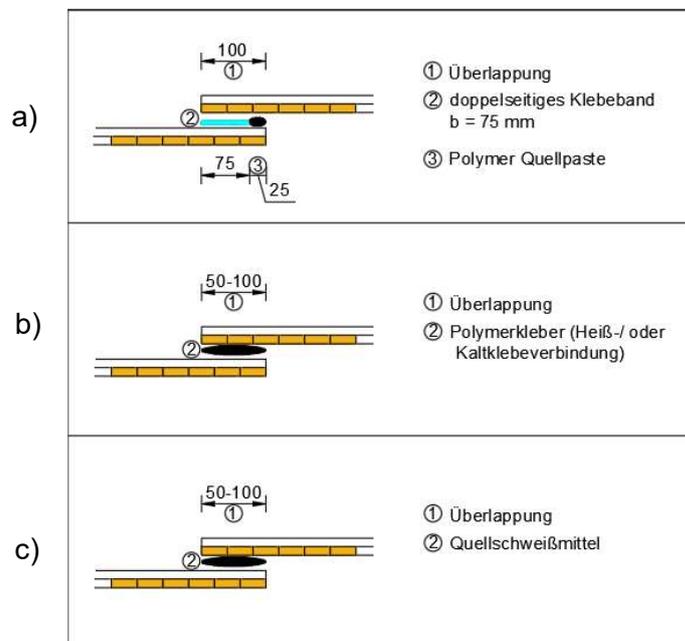


Bild A8-4. Nahtvarianten der untersuchten FBVS- Überlappnähte - a) Abdichtung mit doppelseitigem Klebeband und Quellpaste (Absicherung der Kaschierung), b) Verklebung mit Polymerkleber/Hotmelt (Heiß oder Kaltverbindung) und c) mit Quellschweißmittel

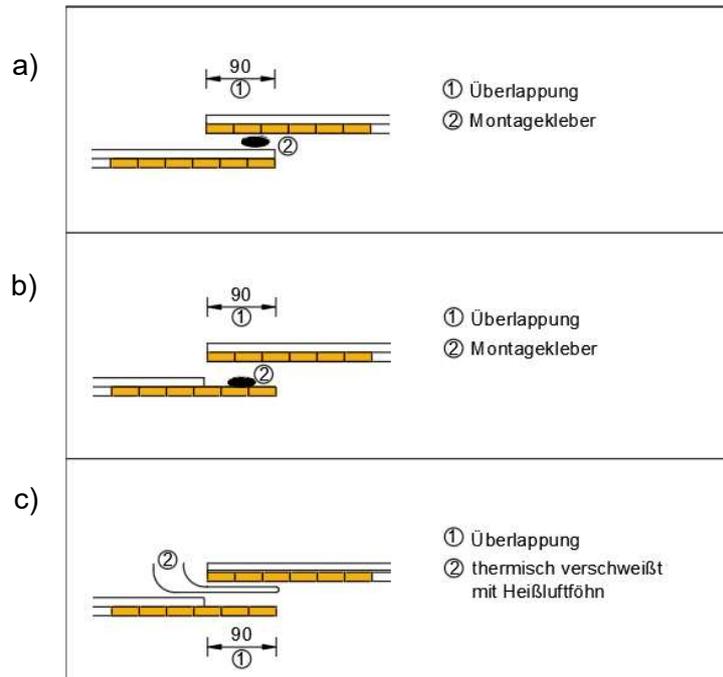


Bild A8-5. Nahtvarianten der untersuchten FBVS- Überlappnähte –Quernähte a) mit Montagekleber (Dichtstoff)/Verklebung Bahn auf Verbundschicht und b) Verklebung Bahn auf Bahn; c) thermische Verschweißung von Dichtungsbahnen mit Heißluft – Handschweißnaht

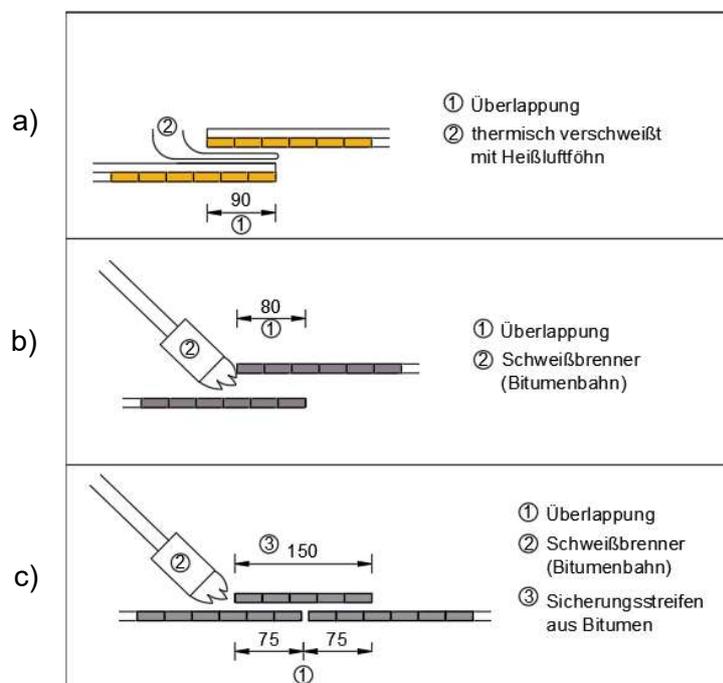


Bild A8-6. Nahtvarianten der untersuchten FBVS a) und b) Überlappnaht; c) Stoßnaht a) thermische Verschweißung von Dichtungsbahnen auf Vlies mit Heißluft b) thermische Verschweißung durch Flammen (Bitumenbahnen) c) Stoßnaht durch Aufschweißen eines Bitumenbahnenstreifens

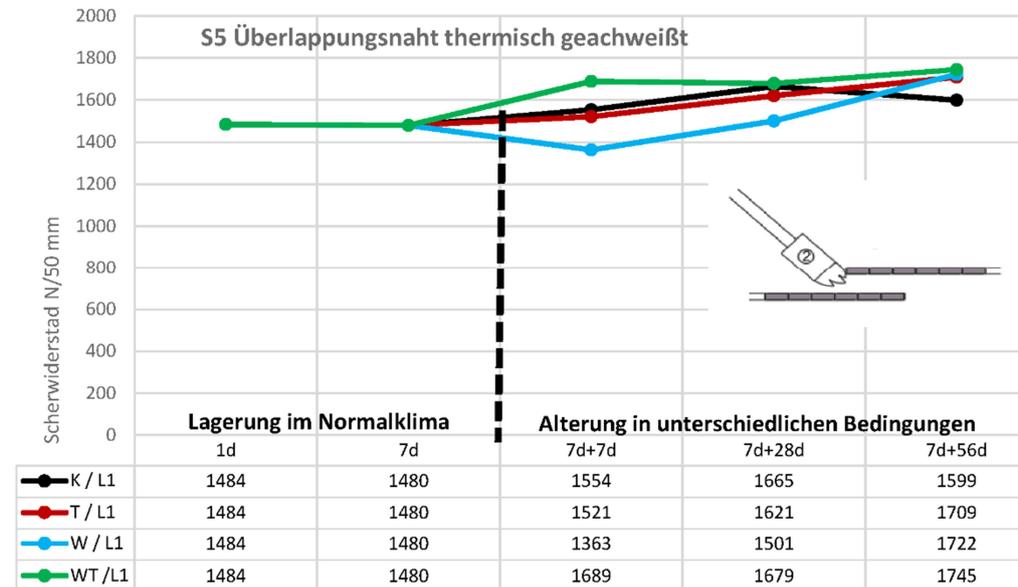


Bild A8-7. S5 – Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach

- 1 und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

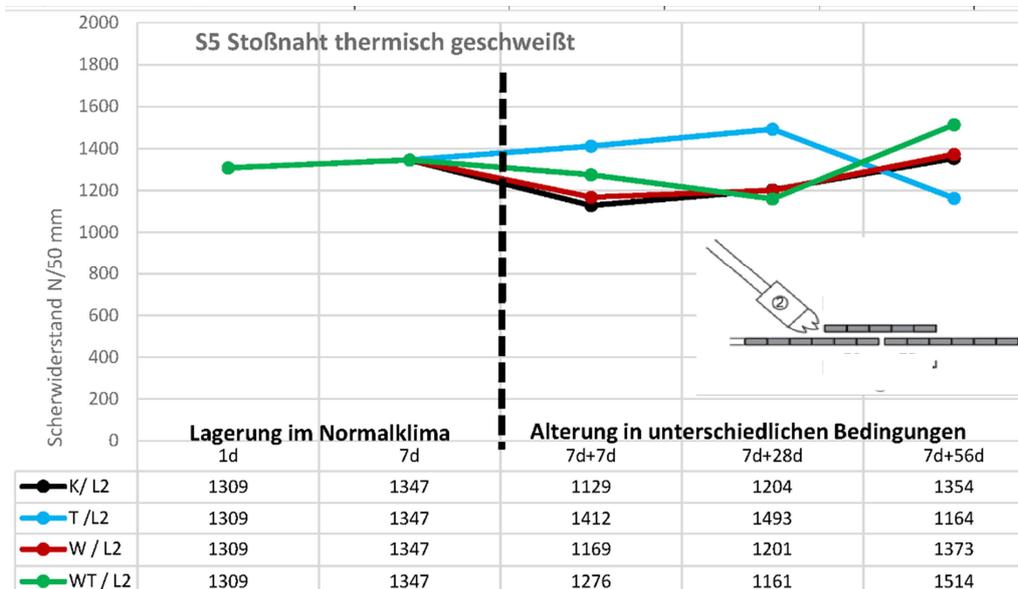


Bild A8-8. S 5 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach

- 1 und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

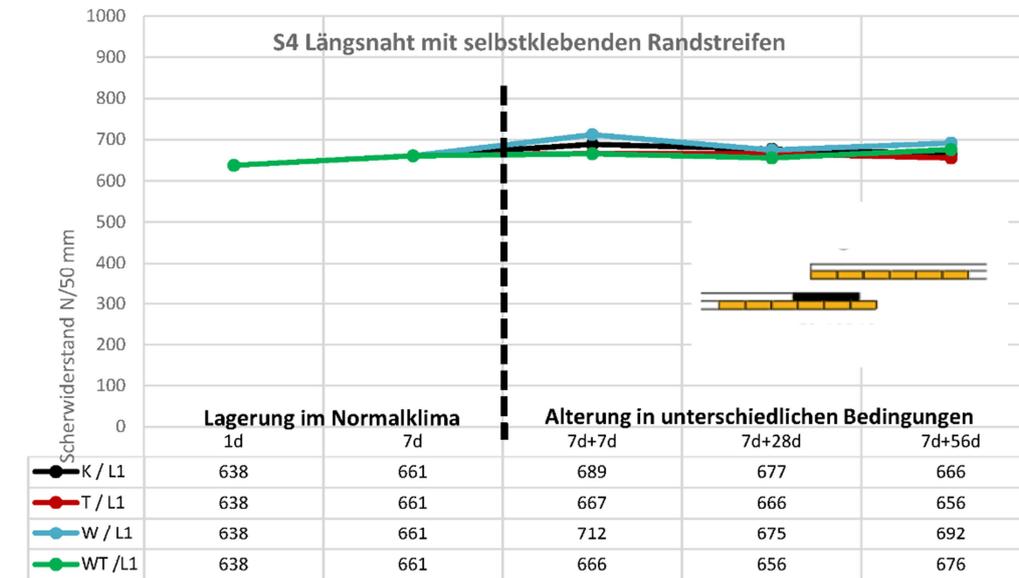


Bild A8-9. S4 – Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1 und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

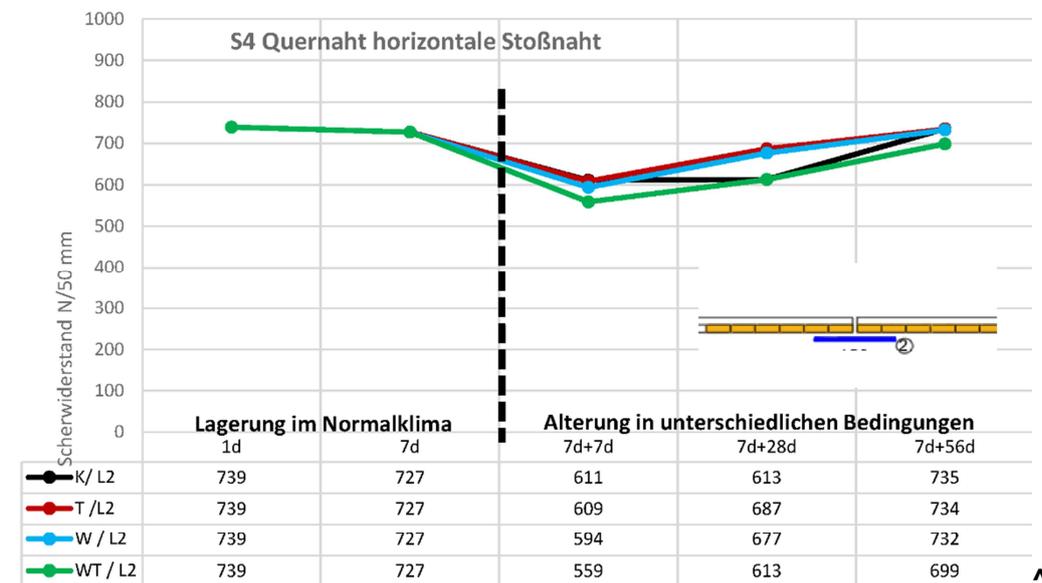


Bild A8-10. S4 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1 und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

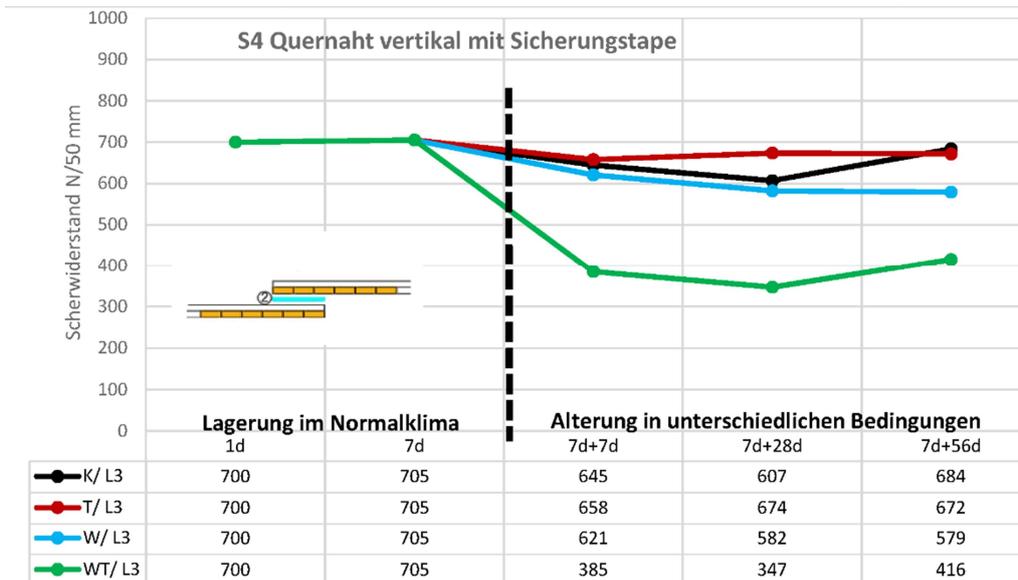


Bild A8-11. S4 – Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1 und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

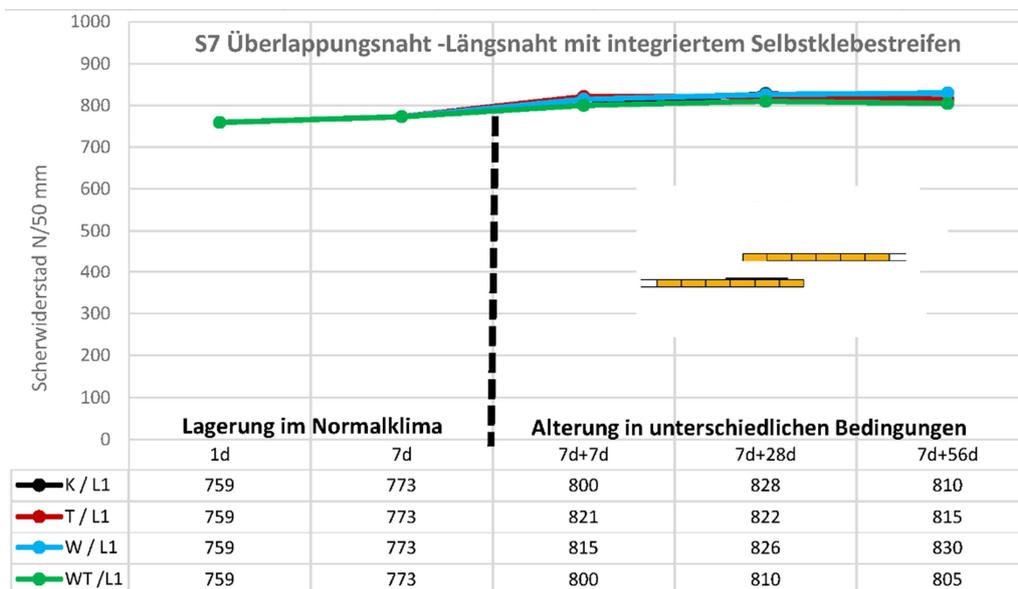


Bild A8-12. S7 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1 und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

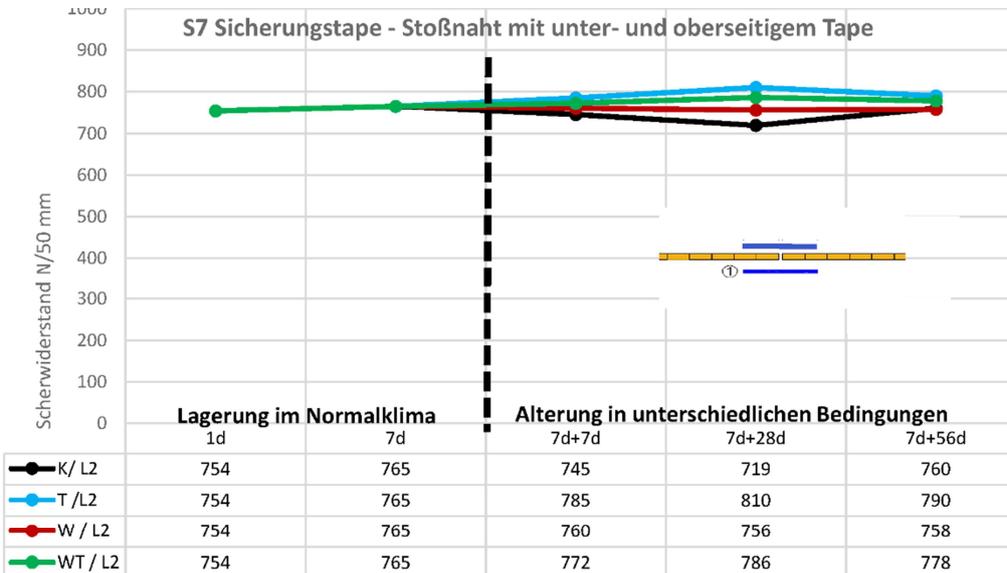


Bild A8-13. S7 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1 und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

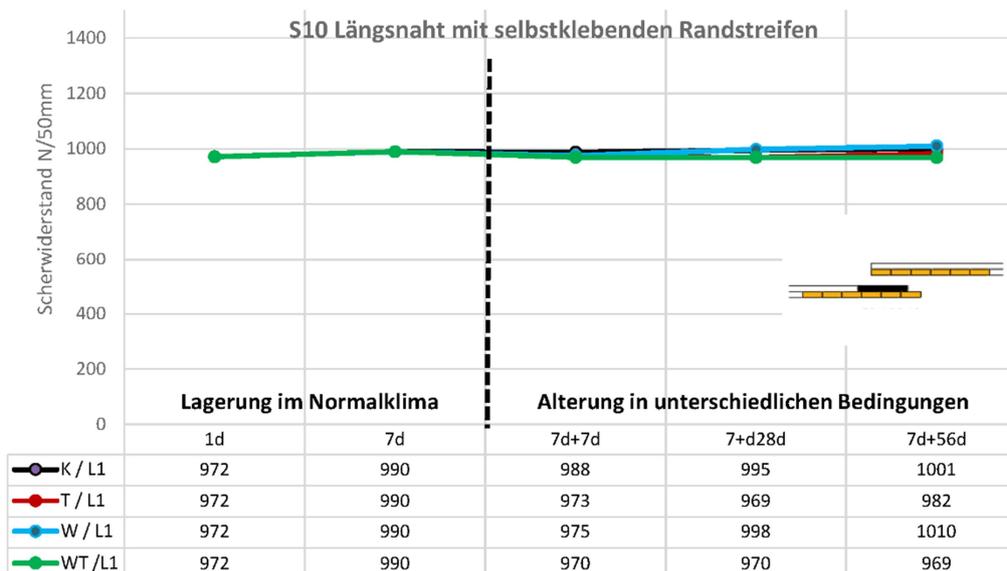


Bild A8-14. S10 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1 und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

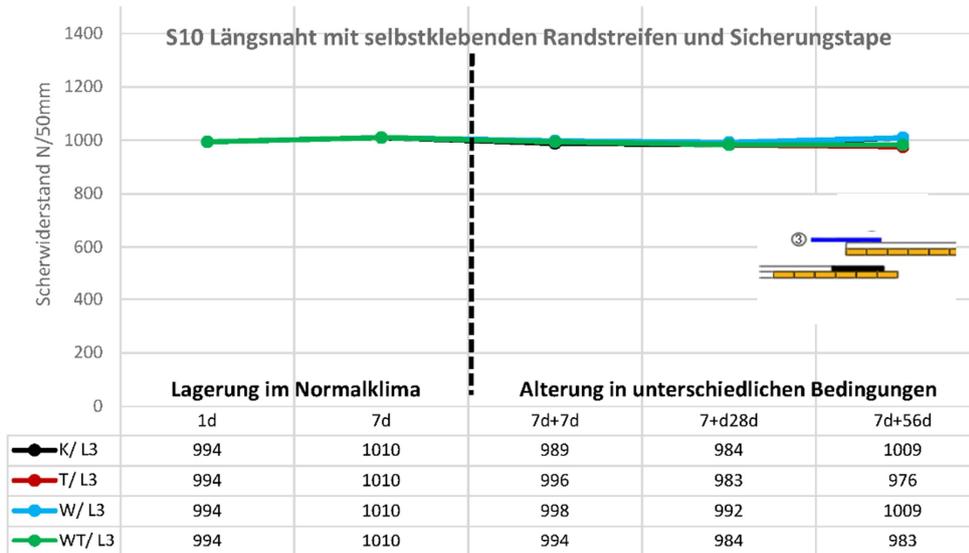


Bild A8-15. S10 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1 und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

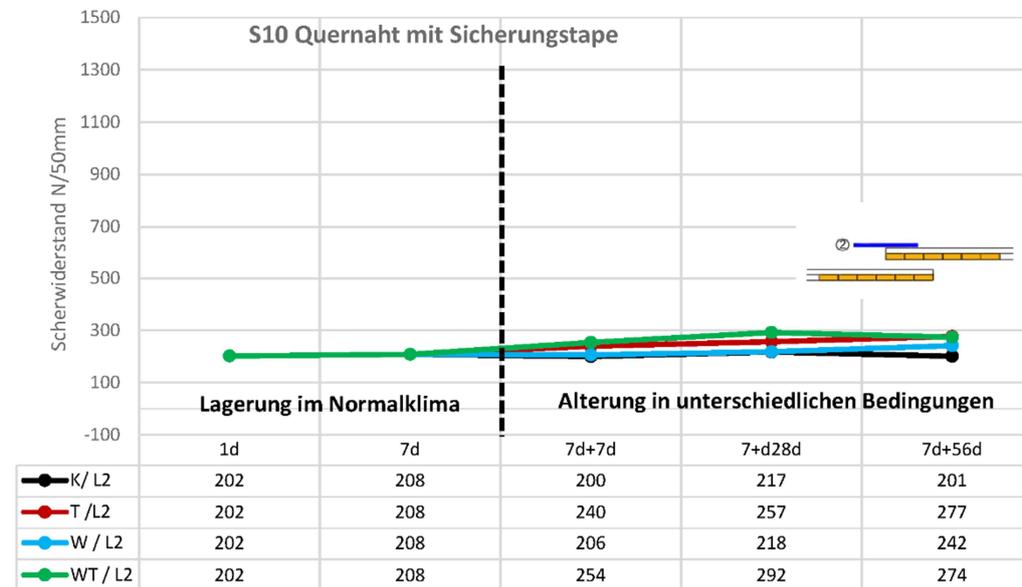


Bild A8-16. S10 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1 und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

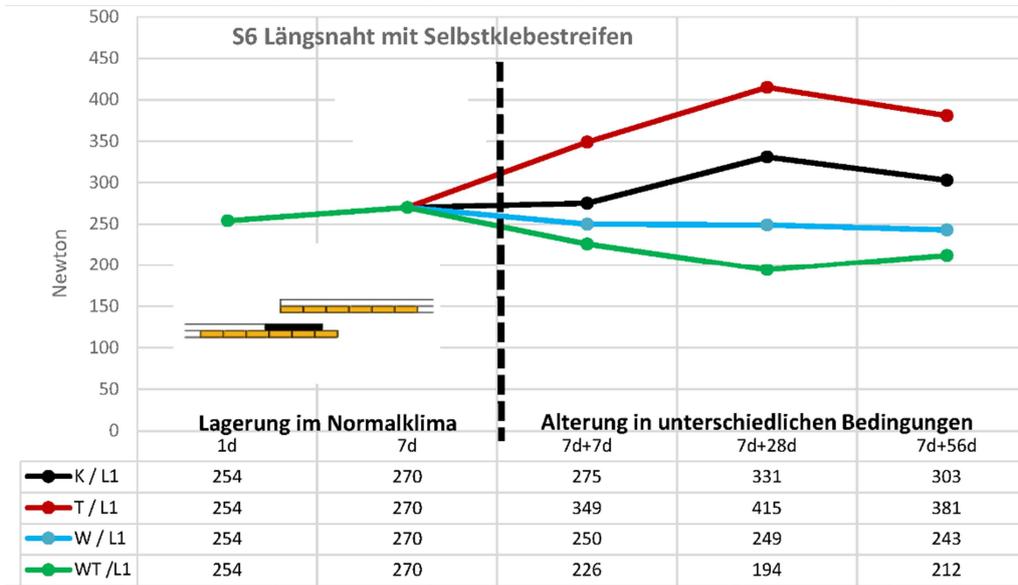


Bild A8-17. S6 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1 und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

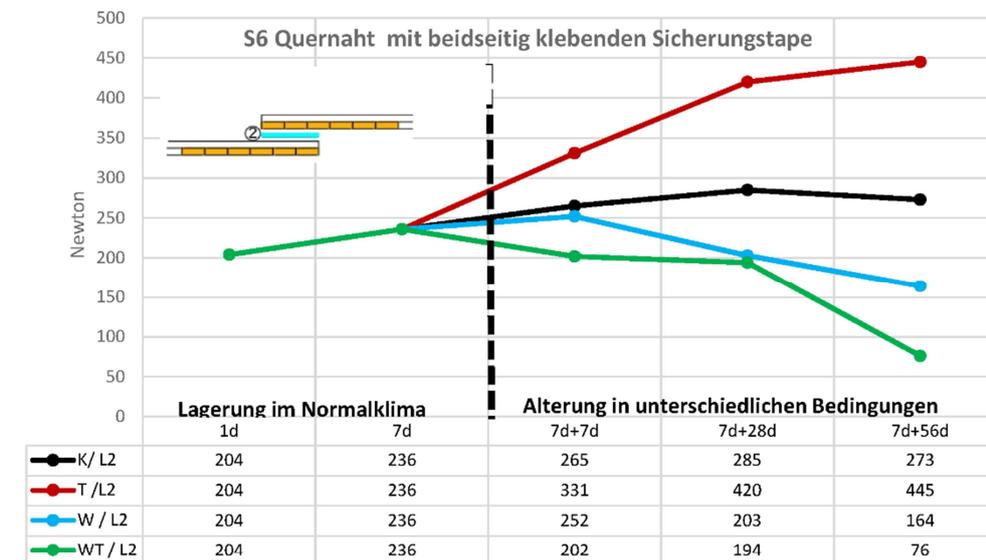


Bild A8-18. S6 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1 und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

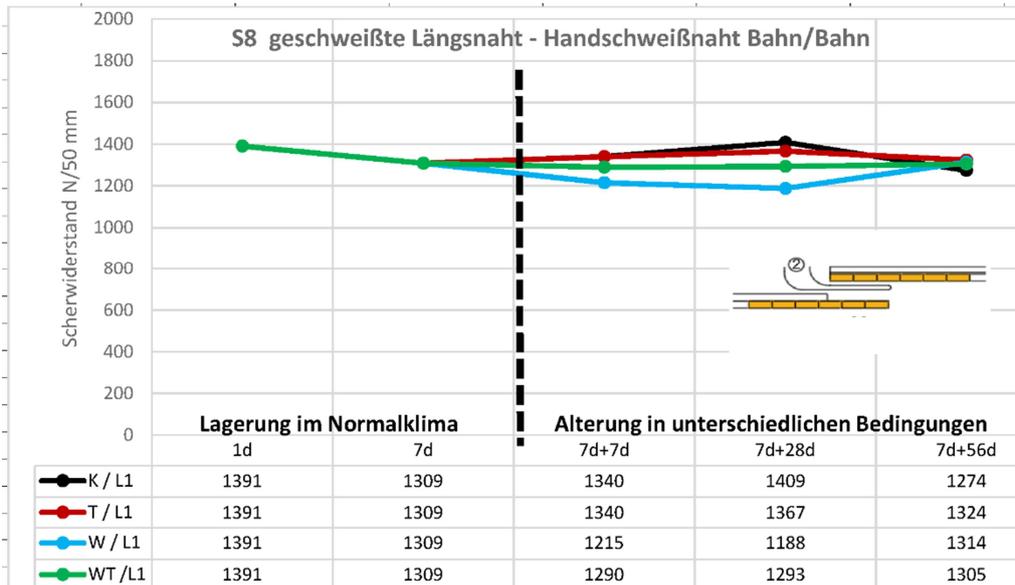


Bild A8-19. S8 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1 und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

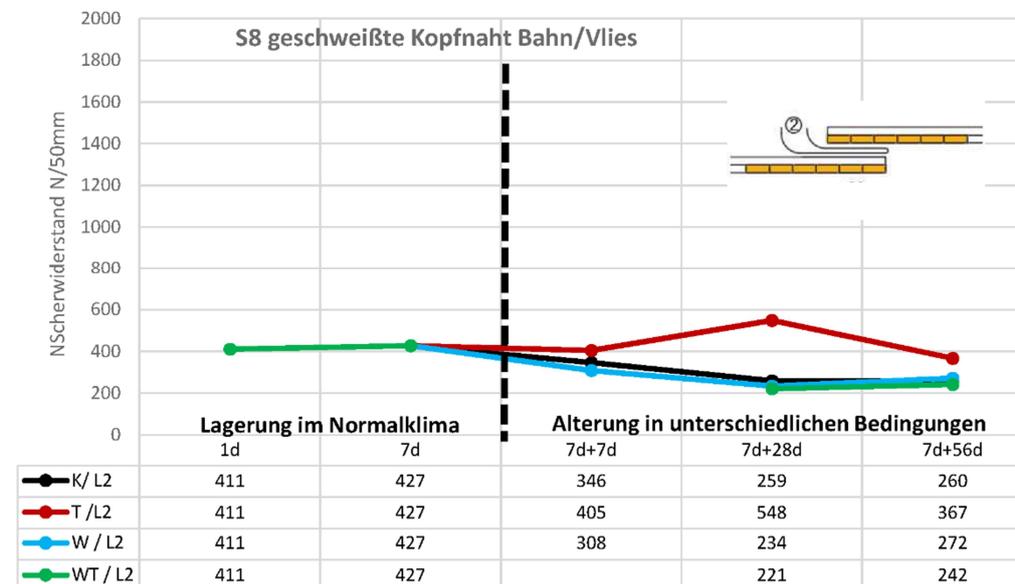


Bild A8-20. S8 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1 und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

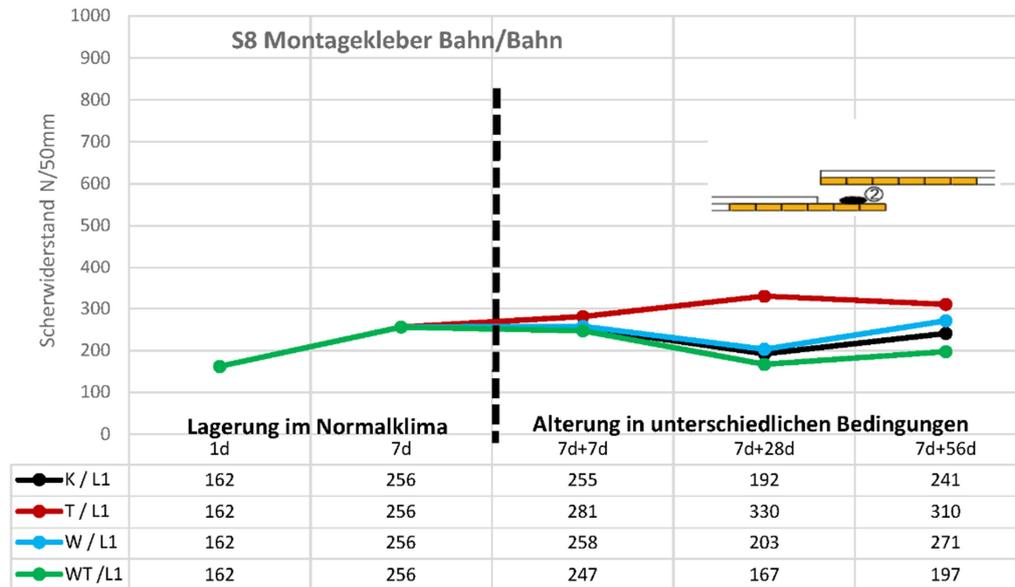


Bild A8-21. S8 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach

- 1- und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

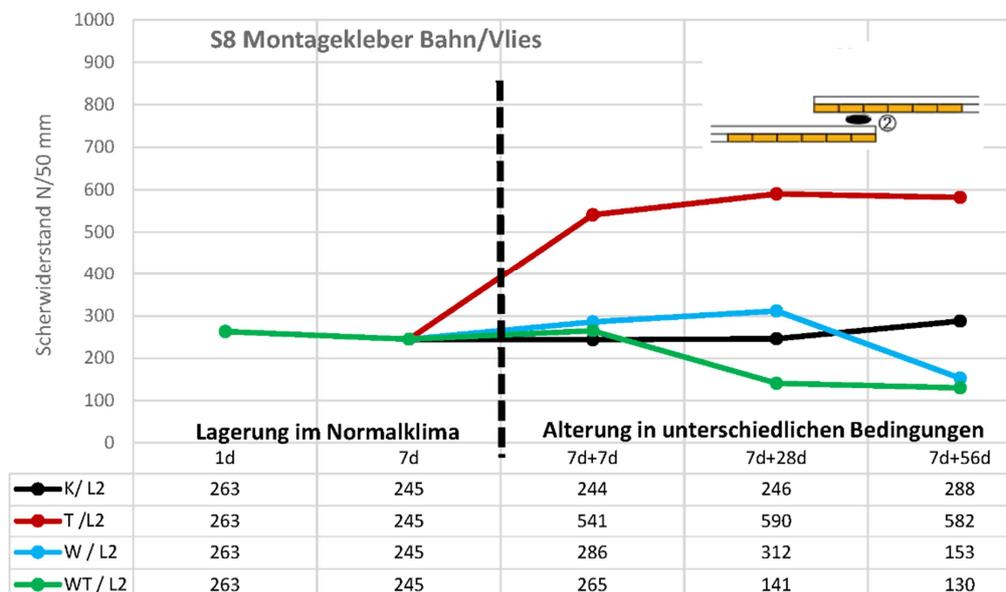


Bild A8-22. S8 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach

- 1- und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

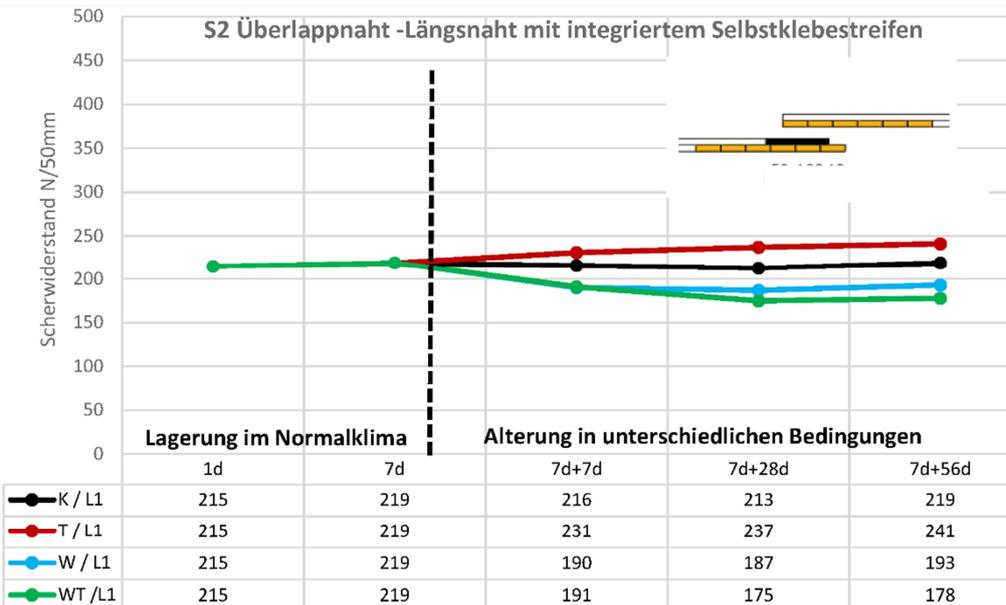


Bild A8-23. S2 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1- und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

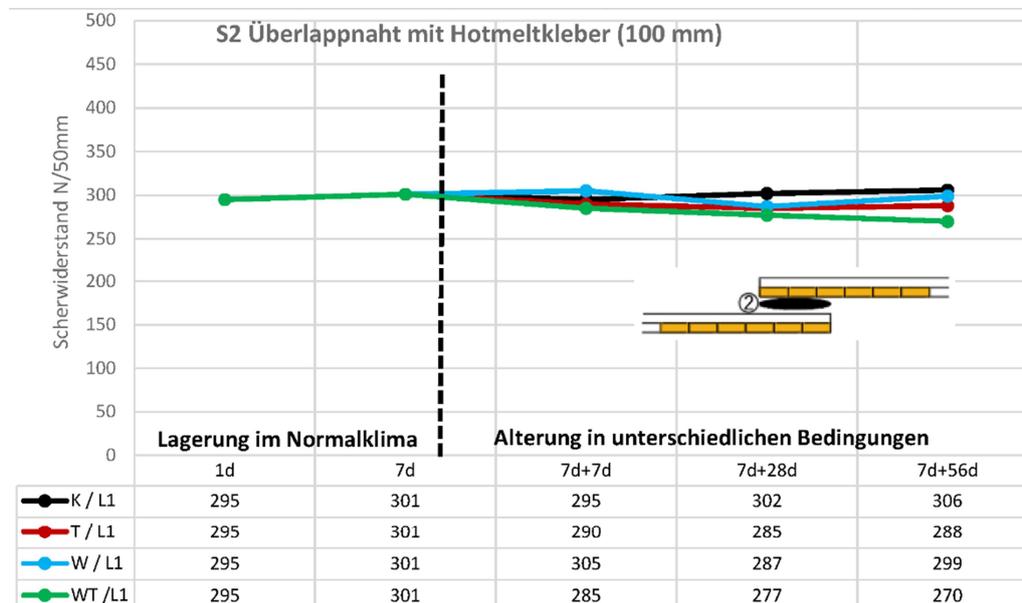


Bild A8-24. S2 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1- und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

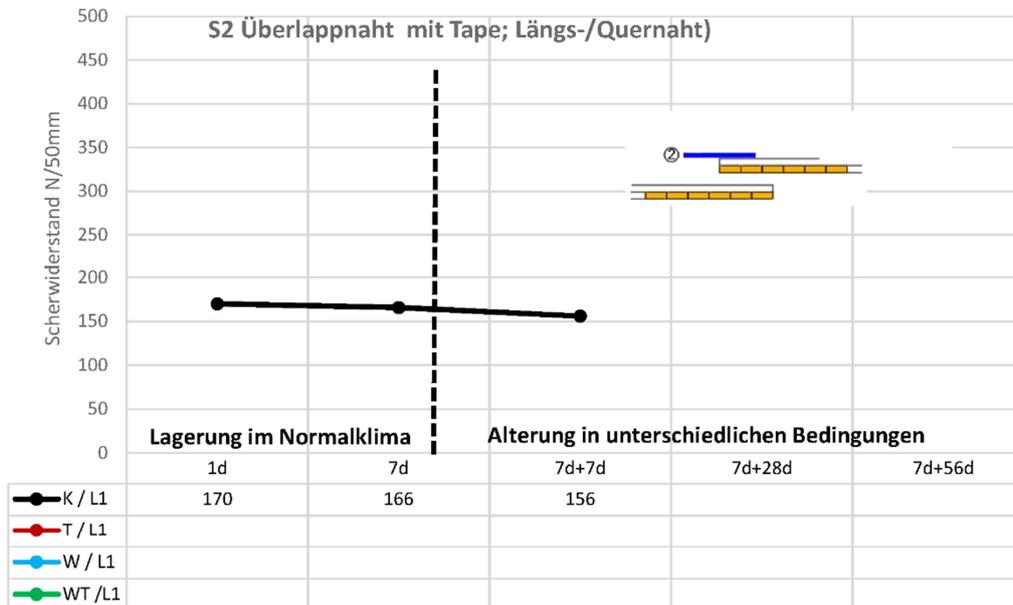


Bild A8-25. S2 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1- und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

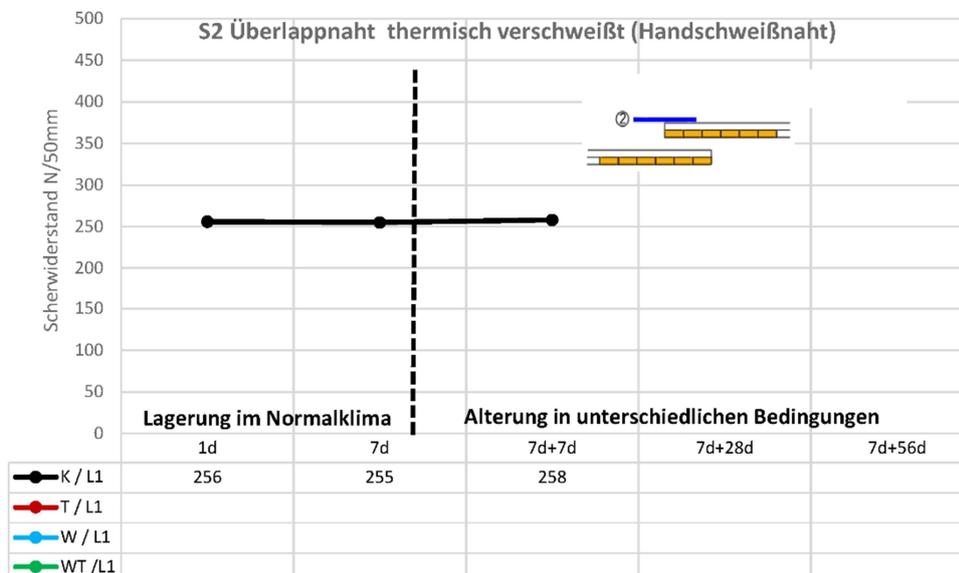


Bild A8-26. S2 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1- und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

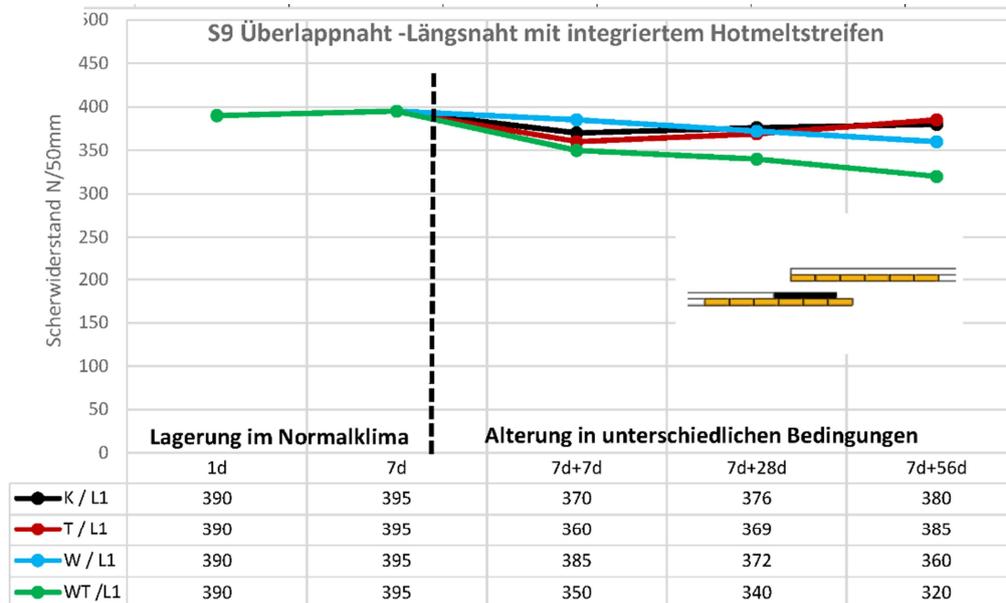


Bild A8-27. S9 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1- und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

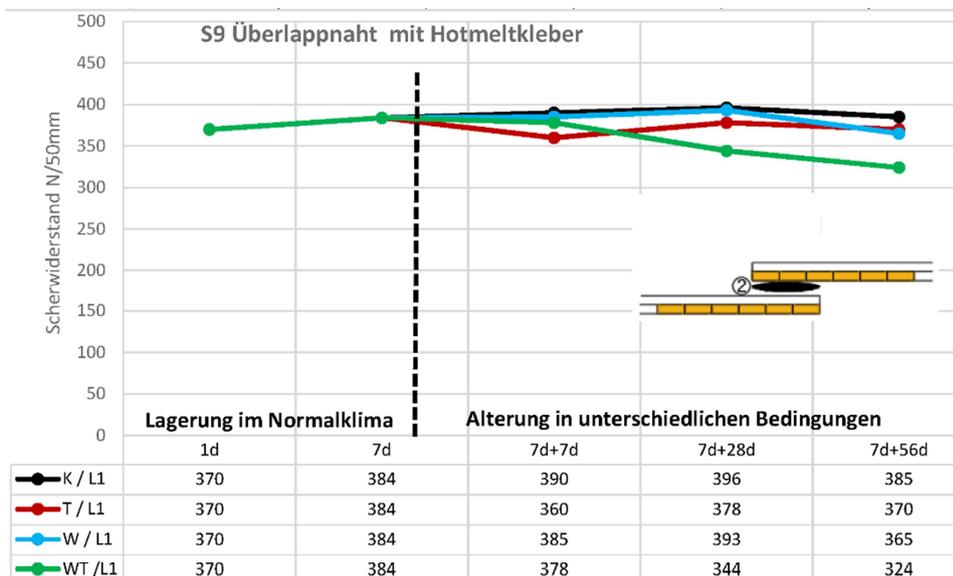


Bild A8-28. S9 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1- und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

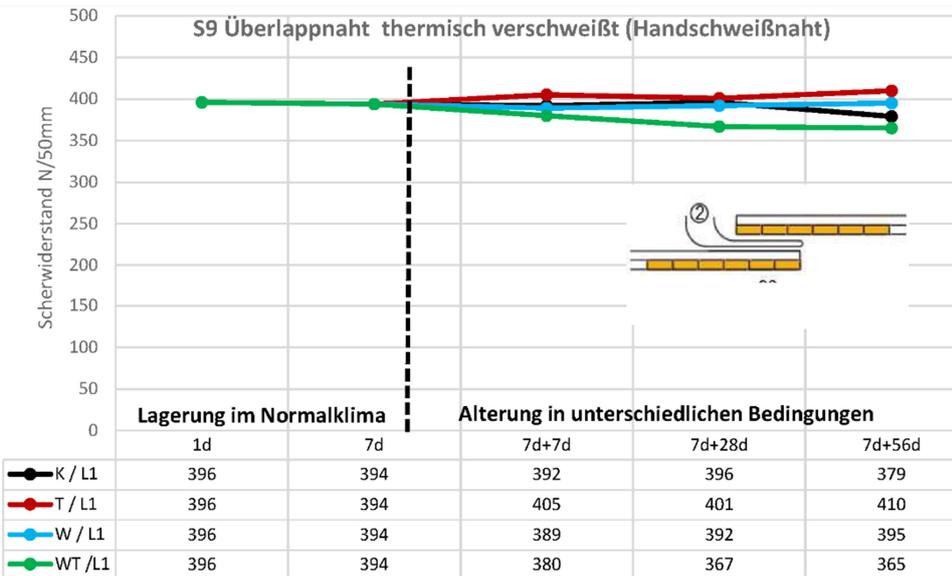


Bild A8-29. S9 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach

- 1- und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

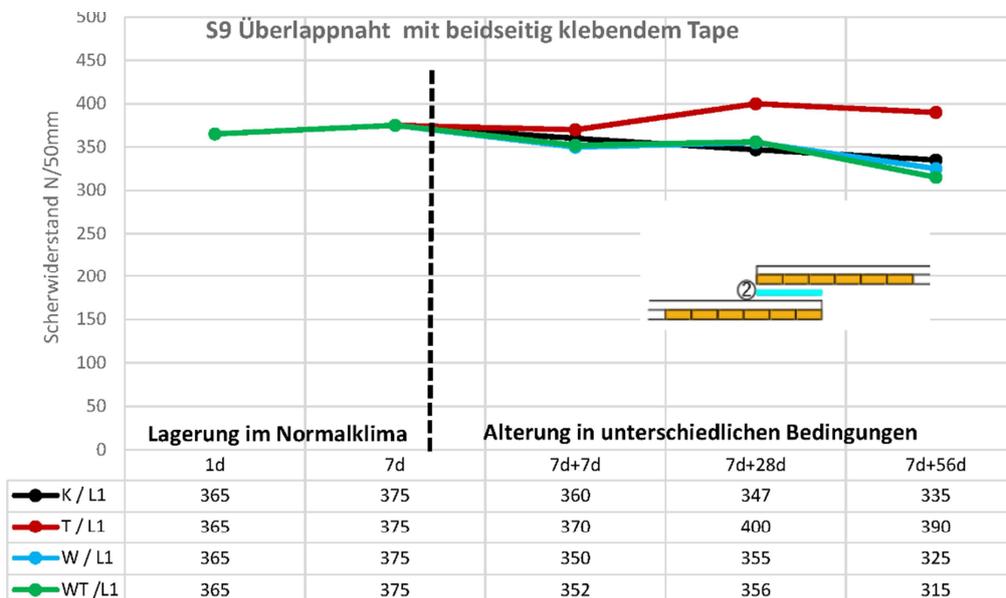


Bild A8-30. S9 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach

- 1- und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
- 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

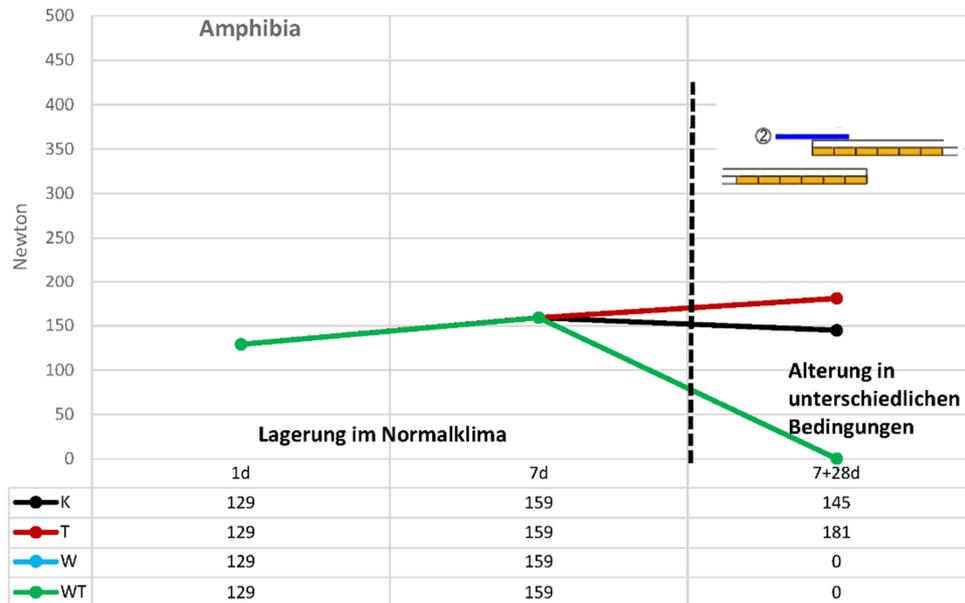


Bild A8-31. S3 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1- und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 28 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 28 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 28 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

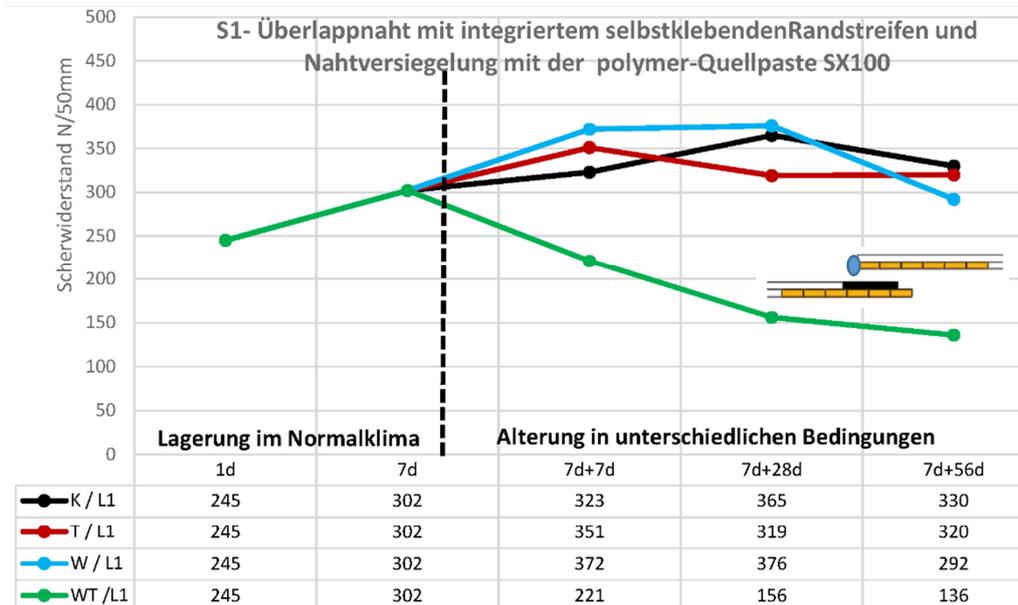


Bild A8-32. S1 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach
 - 1- und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wärmeschrank bei 50 °C (Lagerung T)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
 - 7 d 23/50 + 7 d, 28 d und 56 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

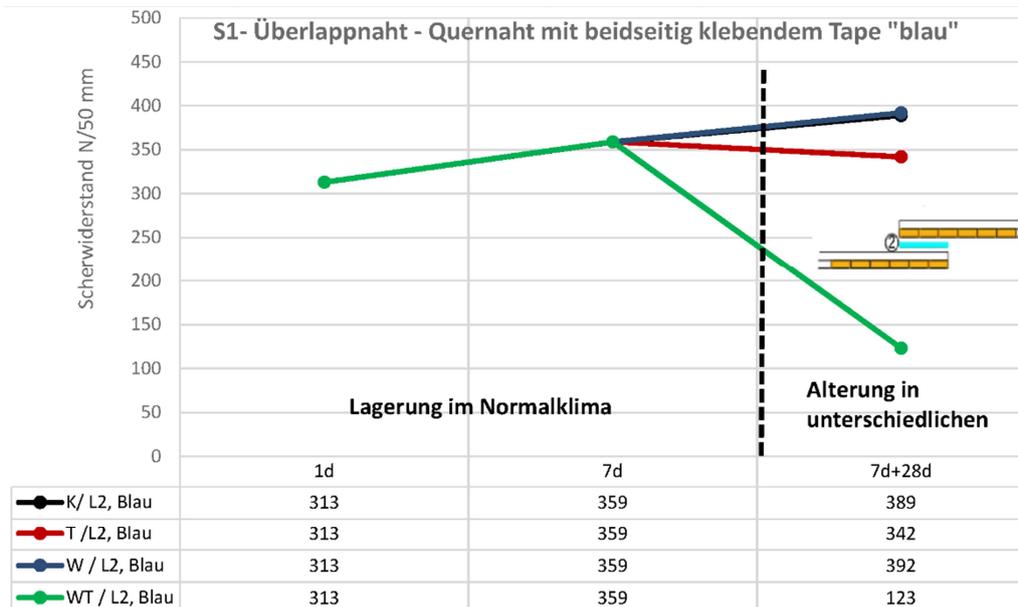


Bild A8-33. S1 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach

- 1- und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
- 7 d 23/50 + 7 d und 28 d im Wärmeschränk bei 50 °C (Lagerung T)
- 7 d 23/50 + 7 d und 28 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
- 7 d 23/50 + 7 d und 28 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)

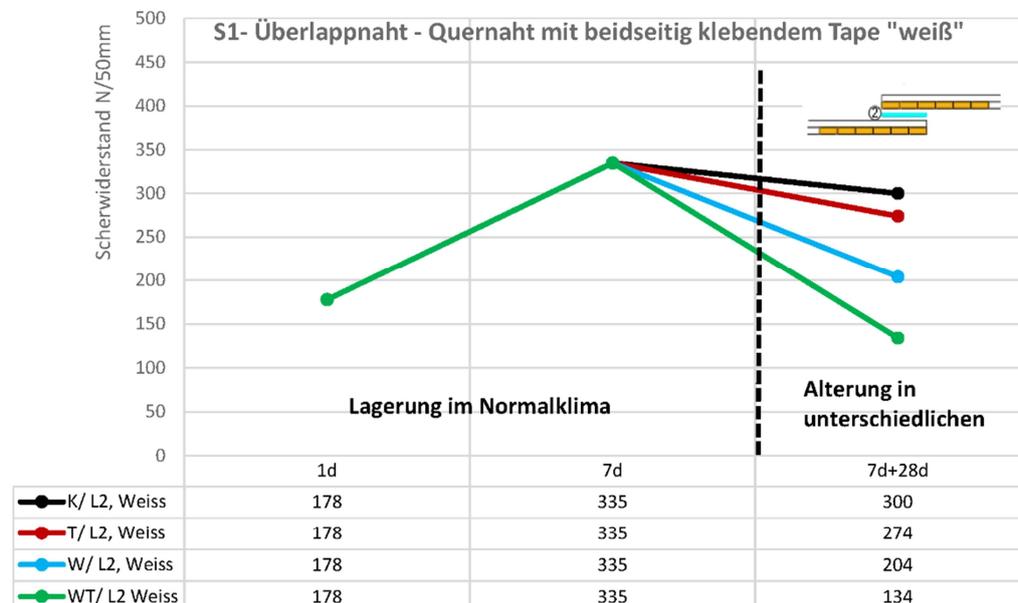


Bild A8-34. S1 Scherzugfestigkeit in N/50 mm nach

- 1- und 7 d Lagerung im Normalklima 23/50 (Lagerung K);
- 7 d 23/50 + 7 d und 28 d im Wärmeschränk bei 50 °C (Lagerung T)
- 7 d 23/50 + 7 d und 28 d im Wasser bei 23/50 (Lagerung W)
- 7 d 23/50 + 7 d und 28 d im Wasser bei 50 °C (Lagerung WT)



a) Verbundseite



b) Wasserseite

Bild A8-35. S5 – T-Stoß Variante 1 (V1); Probe 1
Längsnaht: geschweißt
Quernaht: geschweißt
Nahtüberlappung LN und QN jeweils 80 mm



a) Verbundseite

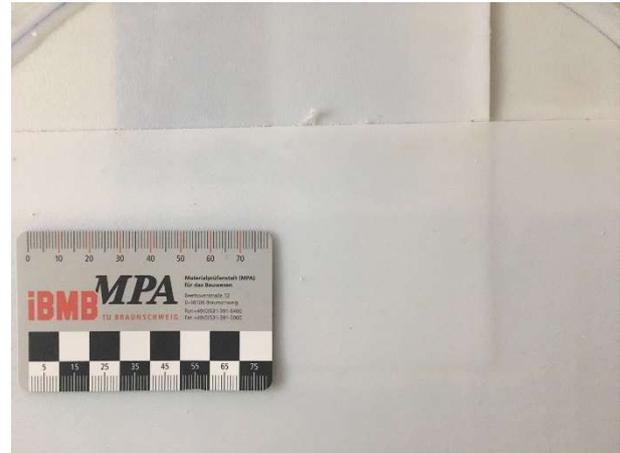


b) Wasserseite

Bild A8-36. S4 – T-Stoß Variante 1 (V1); Probe 1
Längsnaht: integrierter Selbstklebestreifen
Quernaht: einseitiges Kleband (untergeklebt)
Nahtüberlappung Längsnaht: 80 mm
Quernaht: Stoßnaht



a) Verbundseite

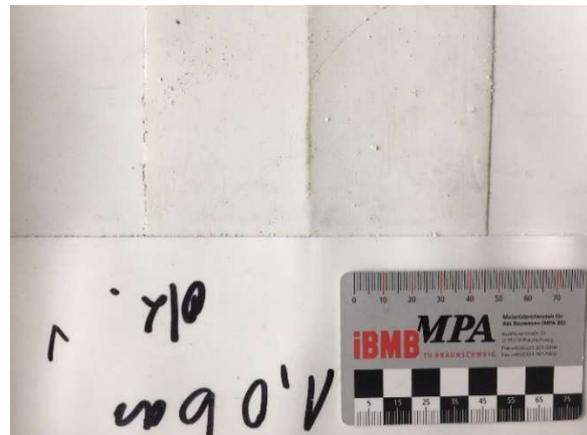


b) Wasserseite

Bild A8-37. S4 – T-Stoß Variante 1 (V2); Probe 1
Längsnaht: integrierter Selbstklebestreifen
Quernaht: einseitiges Klebeband (untergeklebt)
Nahtüberlappung Längsnaht: 80 mm
Quernaht: Stoßnaht



a) Verbundseite

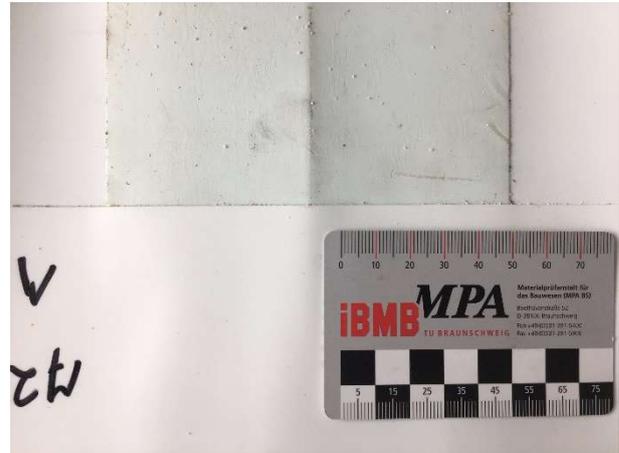


b) Wasserseite

Bild A8-38. S7 – T-Stoß Variante 1 (V1); Probe 1
Längsnaht: integrierter Selbstklebestreifen
Quernaht: einseitiges Klebeband (untergeklebt)
Nahtüberlappung Längsnaht: 80 mm
Quernaht: Stoßnaht



a) Verbundseite



b) Wasserseite

Bild A8-39. S7 – T-Stoß Variante 2 (V2); Probe 1
Längsnaht: integrierter Selbstklebestreifen
Quernaht: einseitiges Klebeband (untergeklebt)
und Absicherung Naht und T-Stoß mit besandetem
Sicherungstape
Nahtüberlappung Längsnaht: 80 mm
Quernaht: Stoßnaht



a) Verbundseite

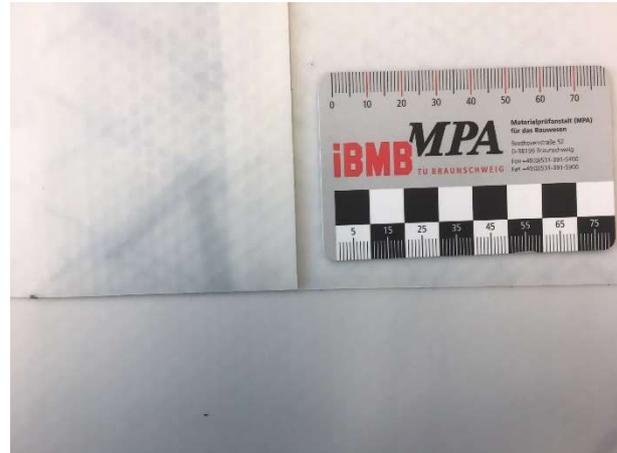


b) Wasserseite

Bild A8-40. S10 – T-Stoß Variante 1 (V1); Probe 1
Längsnaht: integrierter Selbstklebestreifen
Quernaht: einseitiges Klebeband (aufgeklebt)
Nahtüberlappung Längsnaht: 75 mm
Quernaht: 75 mm (Tape mittig mit jeweils 50 mm
Überdeckung geklebt)



a) Verbundseite

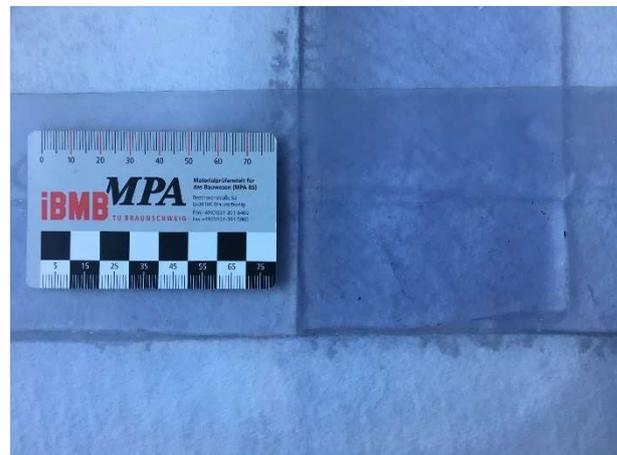


b) Wasserseite

Bild A8-41. S6 – T-Stoß Variante 1 (V1); Probe 1
Längsnaht: integrierter Selbstklebestreifen
Quernaht: beidseitig klebendes Tape
Nahtüberlappung:
- Längsnaht ca. 70 mm
- Quernaht ca. 45 mm



a) Verbundseite



b) Wasserseite

Bild A8-42. S8 – T-Stoß Variante 1 (V1); Probe 1
Längsnaht: verschweißt (Heißluft - Bahn/Bahn)
Quernaht: verschweißt (Heißluft - Bahn/Bahn)
Nahtüberlappung jeweils 85 mm
Nahtbreite: LN 80 mm; QN ca. 50 mm



a) Verbundseite



b) Wasserseite

Bild A8-43. S8 – T-Stoß Variante 2 (V2); Probe 1
Längsnaht: verschweißt (Heißluft - Bahn/Bahn)
Quernaht: verschweißt (Heißluft - Bahn/Verbundseite)
Nahtüberlappung jeweils 85 mm
Nahtbreite: LN 80 mm; QN ca. 50 mm



a) Verbundseite



b) Wasserseite

Bild A8-44. S8 – T-Stoß Variante 3 (V3); Probe 1
Längsnaht: verschweißt (Heißluft - Bahn/Bahn)
Quernaht: Dichtstoff zwischen PVC-glatt (Bahn) und Verbundschicht (Vlies)
Nahtüberlappung: LN 80 mm; QN ca. 50 mm



a) Verbundseite



b) Wasserseite

Bild A8-45. S2 – T-Stoß Variante 1 (V1); Probe 1
Längsnaht: integrierter Selbstklebestreifen
Quernaht: integrierter Selbstklebestreifen mit
verbundseitiger Absicherung des T-Stoßes mit Tape (25 cm x 15 cm)
Nahtüberlappung jeweils 100 mm; Tape 6 bis 8 cm



a) Verbundseite



b) Wasserseite

Bild A8-46. S2 – T-Stoß Variante 2 (V2); Probe 1
Längsnaht: integrierter Selbstklebestreifen
Quernaht: Tape (b = 15 cm)
Bahnenüberlappung jeweils 100 mm; Tape 7,5 cm mittig auf Naht geklebt



a) Verbundseite



b) Wasserseite

Bild A8-47. S2 – T-Stoß Variante 3 (V3); Probe 2
Längsnaht: integrierter Selbstklebestreifen
Quernaht: Hotmeltkleber mit 195 °C
Nahtüberlappung jeweils 100 mm



a) Verbundseite



b) Wasserseite

Bild A8-48. S9 – T-Stoß Variante 1 (V1); Probe 2
Längsnaht: integrierter Hotmeltstreifen (aktiviert über Heißluft)
Quernaht: Hotmeltkleber mit 195 °C
Nahtüberlappung jeweils 100 mm



a) Verbundseite



b) Wasserseite

Bild A8-49. S9 – T-Stoß Variante 2 (V2); Probe 1
Längsnaht: Hotmeltkleber mit 195 °C
Quernaht: Hotmeltkleber mit 195 °C
Nahtüberlappung jeweils 100 mm

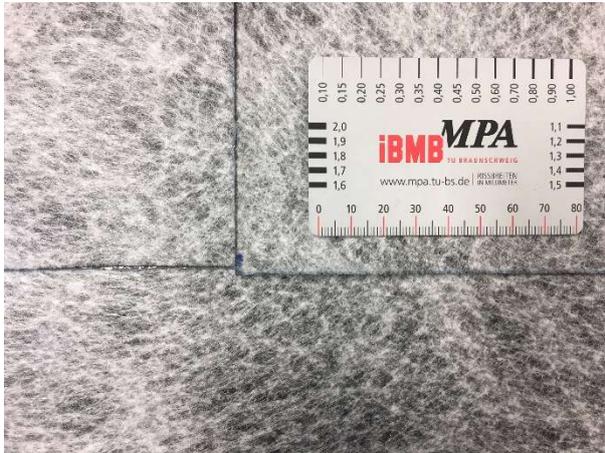


a) Verbundseite



b) Wasserseite

Bild A8-50. S9 – T-Stoß Variante 3 (V3); Probe 1
Längsnaht: Hotmeltkleber mit 195 °C
Quernaht: Hotmeltkleber mit 195 °C
Nahtüberlappung jeweils 100 mm



a) Verbundseite

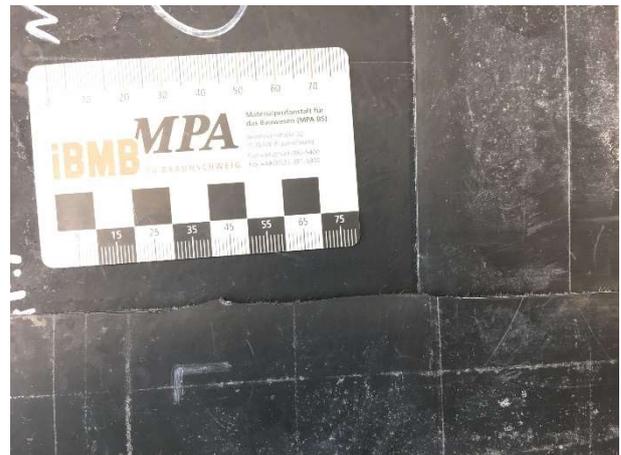


b) Wasserseite

Bild A8-51. S3 – T-Stoß Variante 1 (V1); Probe 1
Längsnaht: Dichtstoff
Quernaht: Dichtstoff
Nahtüberlappung jeweils 50 mm



a) Verbundseite



b) Wasserseite

Bild A8-52. S3 – T-Stoß Variante 2 (V2); Probe 1
Längsnaht: Tape
Quernaht: Tape
Tapebreite: 60 mm – mittig auf Bahnenübergang geklebt
Bahnenüberlappung: 50 mm



a) Verbundseite



b) Wasserseite

Bild A8-53. S1 – T-Stoß Variante 1 (V1); Probe 1

Längsnaht: SK-Rand

Quernaht: Tape beidseitig klebend + Absicherung über Quernaht

Bahnenüberlappung: LN ca. 80 mm; QN ca.100 mm (davon ca. 80 mm beidseitig klebendes Tape und ca. 30 mm Quellpaste

Anhang B: Evaluierung von Praxiserfahrungen

Anhang B1: Einzelergebnisse zur Umfrage zur Planung und Ausführung mit FBV-Systemen

Vorwort zur Umfrage

Die Teilnahme an der Umfrage wurde anonymisiert und keine personen-, hersteller- oder firmenbezogenen Daten erfragt. Die Umfrage war eine Zeitpunktaufnahme, folglich ist es möglich, dass seit der Umfrage sich einige Antwortmöglichkeiten prozentual unterschiedlich verteilen könnten.

Allgemeine Daten

Umfrageumfang: 14 Fragen (ca. 15 min Teilnahmedauer, durchschnittlich 7,5 min bei Abschlussquote 55 %)

Umfragemedien/Zeitraum: surveymonkey (Onlineumfrage) / 15.01.2018 bis 06.04.2018 (ca. drei Monate)

Umfrageveröffentlichung/Collectors: Web-Link → Hinweis im DBV-Rundschreiben, DBV-Homepage, zwei DBV-Newsletter (17.01.2018 und 16.03.2018)

Teilnahmen an der Umfrage: 163 Teilnahmen, davon durchschnittlich 90 abgeschlossene Beantwortungen

Zusammenfassung der Ergebnisse der Umfrage

Frage 1) Sie sind ... (Art des Unternehmens/Funktion des Teilnehmers)

- *Auftragnehmer – Generalunternehmer (GU) / SF-Bau / Rohbau-/Stahlbetongewerk* waren mit 26 % (43) der Teilnehmer am meisten vertreten, *Planer – Tragwerksplaner* zu 19 % (31)
- *Sachverständige und Gutachter* waren zu 10 % (10) und *Fachunternehmen sowie Vertrieb und Hersteller für Abdichtungen und FBV-Systeme* waren zu jeweils 6 – 8 % (10-13) an der Umfrage beteiligt
- auch weitere Gewerke/Funktionen mit geringeren Teilnahmen waren beteiligt (siehe Anhang)

Frage 2) Wie oft haben Sie folgenden Arten von FBV-Systemen bisher bei Projekten verwendet?

- meist *mechanisch-adhäsive FBV-Systeme ohne quellfähigen Dichtstoff*
- Gelegentlich FBV-Systeme mit *adhäsiven drucksensiblen Klebeschichten mit besonderen Eigenschaften*, seltener *mechanisch-adhäsive FBV-Systeme ohne quellfähigen Dichtstoff*

Frage 3) Wie oft haben Sie FBV-Systeme bei den folgenden Beanspruchungsklassen nach DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“ (WU-Richtlinie) eingesetzt?

- FBV-Systeme werden meist bei *Beanspruchungsklasse 1 (ständig oder zeitweise drückendem Wasser)* eingesetzt, jedoch nicht ausschließlich, sondern auch bei *Beanspruchungsklasse 2 ((Bodenfeuchte (kapillar im Boden gebundenem Wasser) und an der Wand frei ablaufendem Wasser)*

Frage 4) Wie oft haben Sie FBV-Systeme bei den folgenden Nutzungsklassen nach DAfStb-Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton“ und DBV-Merkblatt „Hochwertige Nutzung von Untergeschossen“ eingesetzt?

- FBV-Systeme werden meist bei *NK A (keine Feuchtstellen auf der Bauteiloberfläche zulässig (nach „WU-Richtlinie“))* eingesetzt, Anwendungsfälle steigen je höherwertiger die Nutzung ist (z. B. *NK A*** >> NK A⁰*)
- bei *NK B (Feuchtstellen auf der Bauteiloberfläche zulässig)* FBV-Systeme eher seltener eingesetzt

Frage 5) Wie oft wurde der Untergrund der Bodenplatten bei Verwendung von FBV-Systemen auf folgende Arten vorbereitet?

- meist *einfache Sauberkeitsschicht* oder eine *Perimeterdämmung*, gelegentlich *Versätze im Untergrund*

Frage 6) Wie oft kam es zu Schadensfällen (Feuchtigkeitseintrag ins Bauwerk) bei Ihren bisherigen Bauvorhaben mit Beanspruchungsklasse 1 (ständig oder zeitweise drückendes Wasser) und wodurch sind sie, falls der Grund detektiert wurde, entstanden?

- *Schadensfälle* sind selten bis gelegentlich vorkommend
- Schadensursachen können nicht oder nur schwer festgestellt werden
- Stellen an den kein Betondruck oder Verschmutzungen → Schadensfälle
- Kommentar: die Bauwerke sind noch im Bauzustand und noch nicht mit Wasser beaufschlagt worden

Frage 7) Wie würden Sie die folgenden Schwerpunkte bezüglich FBV-Systemen einstufen?

- Problematisch sind alle Antwortmöglichkeiten; am meisten die *Risikoverteilung aufgrund unklarer Regelwerkssituation* sowie die *aktuelle Regelwerkssituation (keine aaRdT, keine geregelte Bauart)*

Frage 8) Wie oft kamen aus folgenden Gründen FBV-Systeme zum Einsatz?

- meist zur *Minimierung des Durchfeuchtungsrisikos bei hohen Nutzungsanforderungen unter Verwendung des Entwurfgrundsatzes „a“ nach DAfStb „WU-Richtlinie“* zum Einsatz
- weitere Hintergründe gelegentlich der Grund für den Einsatz von FBV-Systemen
- selten *chemischer Angriff* bzw. die *Gasbeanspruchung auf das Bauwerk* aufgeführt
- Kommentar: EGS b noch in vielen Ausschreibung in Verbindung mit FBV-Systemen

Frage 9) Wie würden Sie die Notwendigkeit der Anpassung der Planung an FBV-Systeme bei den folgenden Punkten einschätzen?

- dringende Notwendigkeit wird bei der *Aufklärung des Bauherrn (Regelwerkssituation, keine aaRdT, keine geregelte Bauart, Risikoverteilung, ...)* und der *Qualitätsprüfung und -sicherung*
- *auch* alle weiteren Antwortmöglichkeiten notwendig
- Kommentar: „Ganzheitliche Betrachtung des Systems inkl. aller Übergänge und Kombinationen – Zusammenspiel“ muss geklärt sein und „sämtliche Kombinationen auch praxistauglich umsetzbar und geprüft sein“ sowie das FBV-System an die „WU-Konstruktion“ und die Gegebenheiten „anpassbar“ sein und „nicht umgekehrt“

Frage 10) Wie würden Sie den Schwierigkeitsgrad bei folgenden Tätigkeiten mit FBV-Systemen auf der Baustelle einstufen?

- Alle Antwortmöglichkeiten werden als „normal“ bis „schwer/kompliziert“ vom Schwierigkeitsgrad eingestuft
- Besonders kompliziert ist die *FBV-Bahnen sauber zu halten (Verschmutzungen vermeiden), FBV-Bahnen bei niedrigen Temperaturen zu verlegen, andere Gewerke auf die FBV-Systeme zu sensibilisieren, Dehnfugen auszuführen, FBV-Bahnen bei Verschmutzung zu reinigen und die Faltenbildung beim Verlegen zu vermeiden*

Frage 11) Wie oft wurde das FBV-System-/Abdichtungspersonal zuvor geschult (insbesondere Schutz und Vorgehen bei Verschmutzungen und Beschädigungen)?

- das FBV-/Abdichtungspersonal wird meist geschult, teilweise ist es jedoch nicht bekannt

Frage 12) Wie oft wurden die Bewhrer/Armierer und das Betonagepersonal zuvor eingewiesen (insbesondere Schutz und Vorgehen bei Verschmutzungen und Beschädigungen)?

- Das Bewehrungs-/Betonagepersonal wird meist *vor Ort durch Bauleitung/Polier eingewiesen* und gelegentlich *vor Ort durch Hersteller/Systemanbieter eingewiesen*

Frage 13) Wie oft wurden Maßnahmen zu Vermeidung von Schmutzeintrag auf die FBV-Bahnen getroffen?

- Schutzmaßnahmen zur Vermeidung von Schmutzeintrag werden nur selten bis gelegentlich durchgeführt

Frage 13) Weitere Anmerkungen (der Teilnehmer):

- Aus unternehmerischer Sicht (Bauausführung) sollte die FBV auch weiterhin nur als zusätzliche Maßnahme bei WU-Konstruktion eingesetzt werden. FBV als einzige „Abdichtung“, birgt dieses ein hohes Risikopotential, welches zu Lasten des Bauausführenden geht.
- FBV-System nicht realisierbar wegen fehlenden Plänen, Geometrien die für das System FBV nicht geeignet sind, mangelndes Fachwissen der Architekten bzw. Planer und vor überhöhten Erwartungshaltung der Bauherren an das System.
- Frage Dehnfugen wird von keinem Hersteller beantwortet.
- FBV-Systeme nicht schlecht, jedoch passen diese nicht zu alltäglichen, baulichen Gegebenheiten vor Ort (Witterung, hohe Lasten beim Einbau der Bewehrung, Schutz der Folien bis zur Betonage, Zigaretten, etc.). Auch Planer nehmen kaum Rücksicht auf die Schwierigkeiten die den Ausführenden begegnen: Man sollte (wenn möglich) Höhenversätze und Durchdringungen in den Bauteilen vermeiden/minimieren. Jede Voute stellt den Verarbeiter vor Herausforderungen, die minimiert werden sollten (Eckbereiche der Vouten, etc.).
- Hohe Risiken für ausführende Baufirma: Vertraglich/Gewährleistungsrisiko/Extremes Risiko bei erst später folgender Wasserbeaufschlagung (nach erfolgtem Ausbau).

Fragen und Einzelergebnisse der Umfrage

A - Daten zur Art Ihres Unternehmens

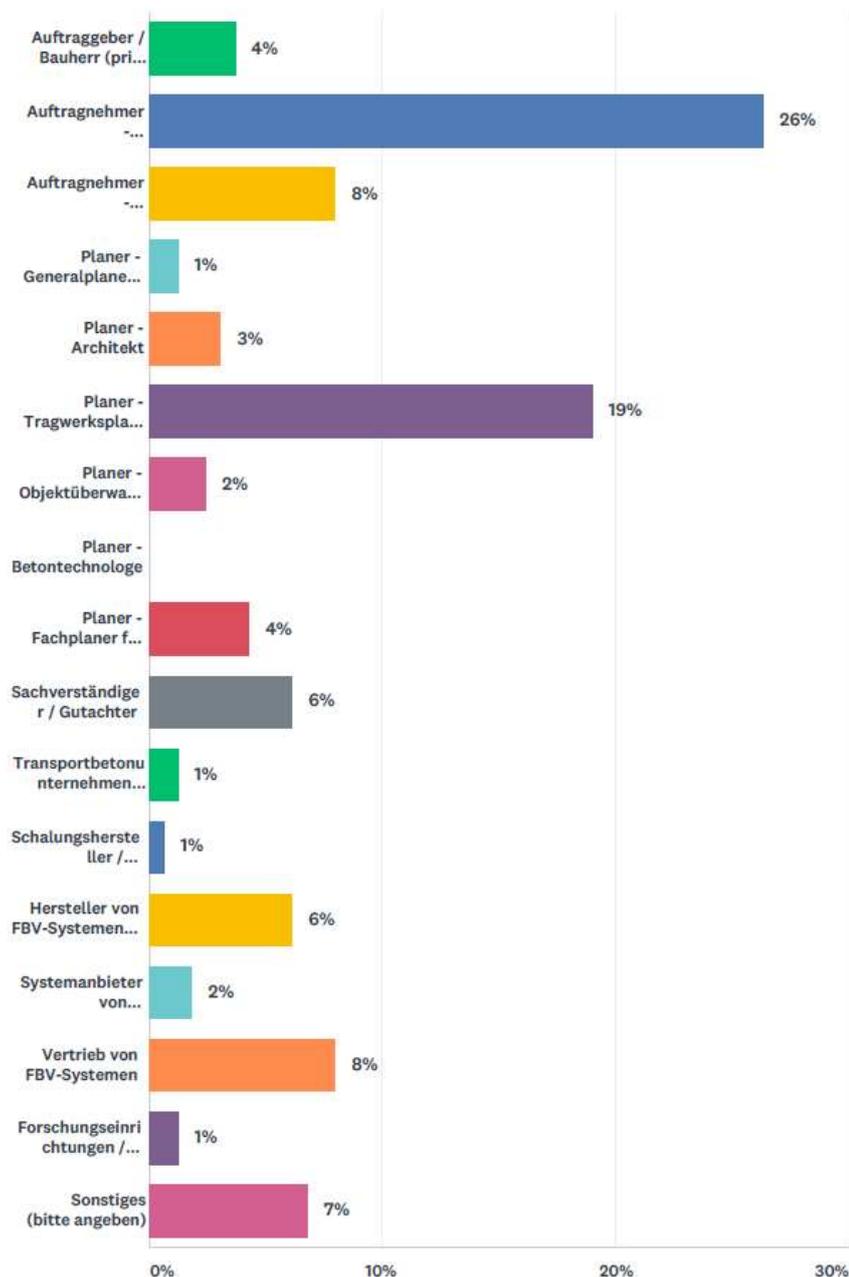
Vielen Dank für Ihr Interesse an der Beantwortung der Umfrage.

Die durchschnittliche Beantwortungsdauer für die Umfrage beträgt etwa 15 min.

Die Daten zu Ihrem Unternehmen sind für die Differenzierung der Ergebnisse erforderlich. Ihre Daten werden hierbei vertraulich behandelt und vor jeglichen Veröffentlichungen anonymisiert.

Q1 Sie sind...

Beantwortet: 163 Übersprungen: 0



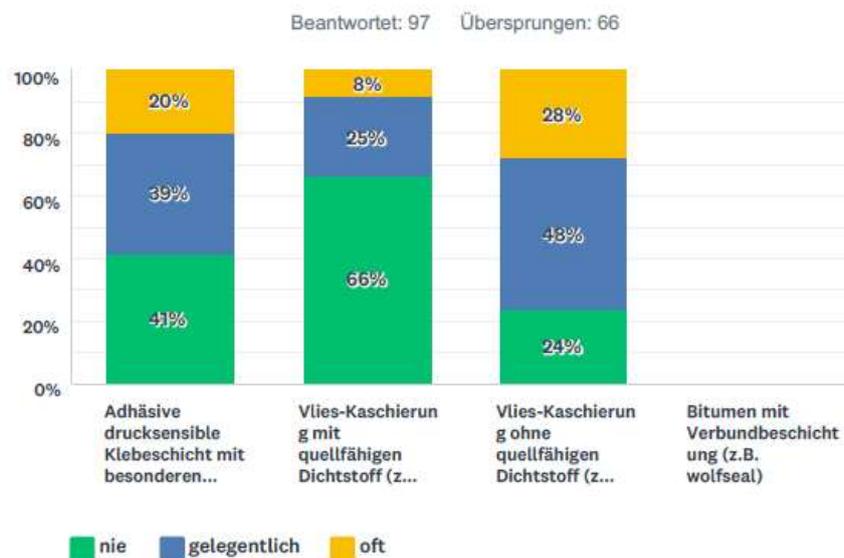
| ANTWORTOPTIONEN | BEANTWORTUNGEN | |
|---|----------------|------------|
| Auftraggeber / Bauherr (privat / öffentlich) | 4% | 6 |
| Auftragnehmer - Generalunternehmer (GU) / SF-Bau / Rohbau-/Stahlbetongewerk | 26% | 43 |
| Auftragnehmer - Fachunternehmen für Abdichtungen / FBV-Systeme | 8% | 13 |
| Planer - Generalplaner (GP) | 1% | 2 |
| Planer - Architekt | 3% | 5 |
| Planer - Tragwerksplaner (TWP) | 19% | 31 |
| Planer - Objektüberwachung (Bauüberwachung, Projektsteuerung, Projektleitung) | 2% | 4 |
| Planer - Betontechnologe | 0% | 0 |
| Planer - Fachplaner für WU-Konstruktionen | 4% | 7 |
| Sachverständiger / Gutachter | 6% | 10 |
| Transportbetonunternehmen /-hersteller | 1% | 2 |
| Schalungshersteller / Schalungstechniker | 1% | 1 |
| Hersteller von FBV-Systemen / Baustoffhersteller | 6% | 10 |
| Systemanbieter von FBV-Systemen | 2% | 3 |
| Vertrieb von FBV-Systemen | 8% | 13 |
| Forschungseinrichtungen / Baustofflabore / Materialprüfanstalten | 1% | 2 |
| Sonstiges (bitte angeben) | 7% | 11 |
| GESAMT | | 163 |

| NR. | SONSTIGES (BITTE ANGEBEN) | DATUM |
|-----|--|------------------|
| 1 | Verband | 16.03.2018 14:31 |
| 2 | Test | 08.03.2018 22:48 |
| 3 | Herstellerverband | 23.01.2018 16:49 |
| 4 | Test Bilgin | 22.01.2018 16:28 |
| 5 | Test | 22.01.2018 14:09 |
| 6 | Dipl. Technikerin HF / Bauleiterin Garantieabteilung | 19.01.2018 14:49 |
| 7 | Baustoffhersteller | 18.01.2018 12:19 |
| 8 | Forschungskordinator | 18.01.2018 10:21 |
| 9 | anerkannte Überwachungsstelle | 17.01.2018 21:52 |
| 10 | Fachplaner WU, FBVs-Hersteller, Gutachter, NU FBVS-Systeme | 17.01.2018 11:31 |
| 11 | Verlag | 17.01.2018 11:04 |

B - Erfahrungen mit FBV-Systemen

Im Umfragekapitel "B" werden Ihre bisherigen allgemeinen Erfahrungen mit Frischbetonverbundsystemen (FBV-Systemen) erfragt.

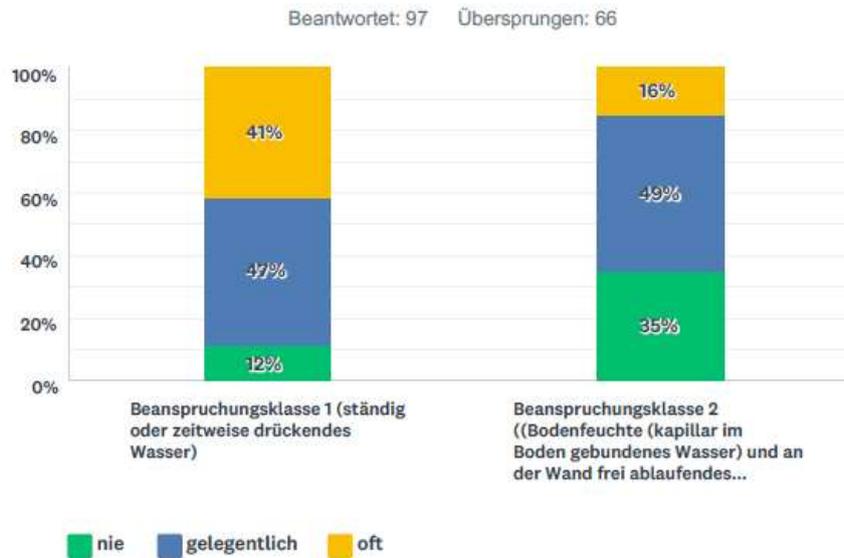
Q2 Wie oft haben Sie folgenden Arten von FBV-Systemen bisher bei Projekten verwendet?



| | NIE | GELEGENLICH | OFT | GESAMT | GEWICHTETER MITTELWERT |
|---|-----------|-------------|-----------|--------|------------------------|
| Adhäsive drucksensible Klebeschicht mit besonderen Eigenschaften (z.B. H-BAU, Preprufe®, WFP Pre-Tec Plus, wolfseal, Zemseal®, ...) | 41% 35 | 39% 33 | 20% 17 | 85 | 0,79 |
| Vlies-Kaschierung mit quellfähigen Dichtstoff (z.B. Amphibia 3000 Grip, DualProof S, Polyfleece SX® 1000, SilverSeal, ...) | 66% 47 | 25% 18 | 8% 6 | 71 | 0,42 |
| Vlies-Kaschierung ohne quellfähigen Dichtstoff (z.B. DualProof light, DualProof T, NIK® Seal FBV, SikaProof®, ...) | 24% 20 | 48% 41 | 28% 24 | 85 | 1,05 |
| Bitumen mit Verbundbeschichtung (z.B. wolfseal) | 0% 0 | 0% 0 | 0% 0 | 0 | 0,00 |

| NR. | SONSTIGES (BITTE PRODUKTNAMEN ANGEBEN) | DATUM |
|-----|---|------------------|
| 1 | Preprufe, Sikaproof | 26.03.2018 12:29 |
| 2 | Wir haben bisher in 2 Bauvorhaben FBV eingesetzt, allerdings liegen mir keine Info's zu den Vlieskaschierungen vor. | 21.03.2018 10:27 |
| 3 | adicon AVS | 16.03.2018 14:03 |
| 4 | PT proof-tec Dichtungsbahn | 30.01.2018 09:46 |
| 5 | Heimo Dichtungsteppich | 17.01.2018 11:38 |
| 6 | NIK-Seal FBVS | 17.01.2018 11:35 |

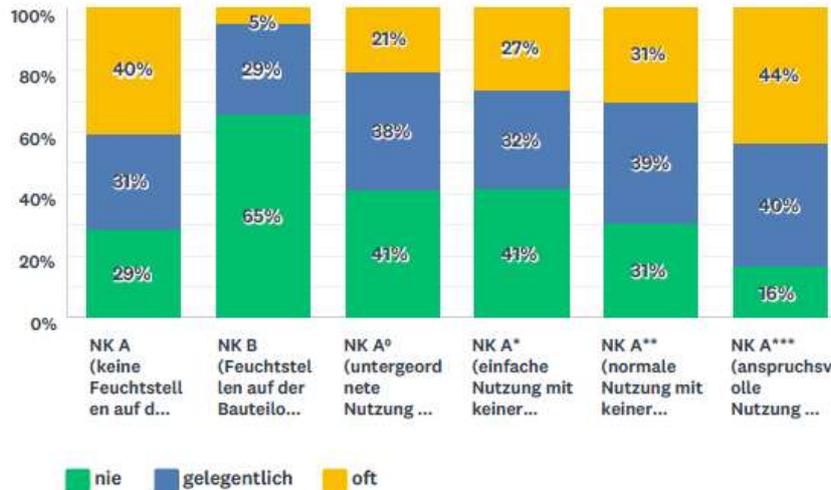
Q3 Wie oft haben Sie FBV-Systeme bei den folgenden Beanspruchungsklassen nach DAfStb-Richtlinie "Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton" (WU-Richtlinie) eingesetzt?



| | NIE | GELEGENLICH | OFT | GESAMT | GEWICHTETER MITTELWERT |
|---|-----------|-------------|-----------|--------|------------------------|
| Beanspruchungsklasse 1 (ständig oder zeitweise drückendes Wasser) | 12% 11 | 47% 44 | 41% 39 | 94 | 1,30 |
| Beanspruchungsklasse 2 ((Bodenfeuchte (kapillar im Boden gebundenes Wasser) und an der Wand frei ablaufendes Wasser)) | 35% 29 | 49% 41 | 16% 13 | 83 | 0,81 |

Q4 Wie oft haben Sie FBV-Systeme bei den folgenden Nutzungsklassen nach DAfStb-Richtlinie "Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton" und DBV-Merkblatt "Hochwertige Nutzung von Untergeschossen" eingesetzt?

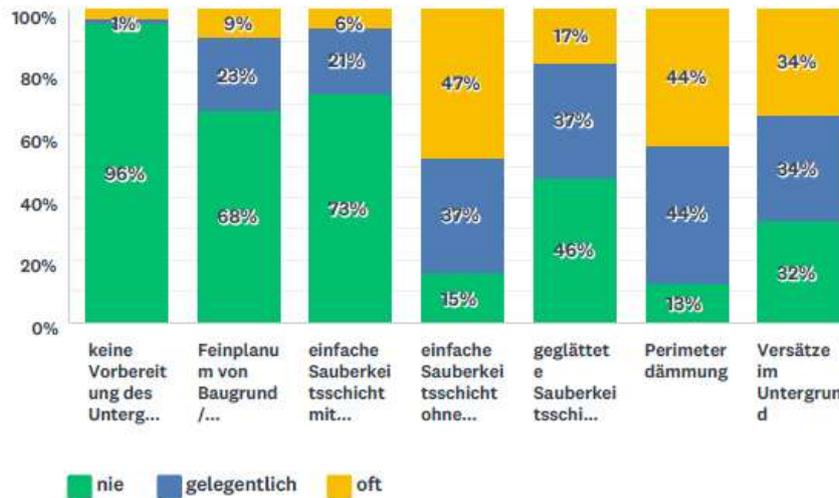
Beantwortet: 95 Übersprungen: 68



| | NIE | GELEGENLICH | OFT | GESAMT | GEWICHTETER MITTELWERT |
|---|-----------|-------------|-----------|--------|------------------------|
| NK A (keine Feuchtstellen auf der Bauteiloberfläche zulässig (nach DAfStb "WU-Richtlinie")) | 29% 24 | 31% 26 | 40% 34 | 84 | 1,12 |
| NK B (Feuchtstellen auf der Bauteiloberfläche zulässig (nach DAfStb "WU-Richtlinie")) | 65% 51 | 29% 23 | 5% 4 | 78 | 0,40 |
| NK A ⁰ (untergeordnete Nutzung mit keiner Zulässigkeit von Feuchtstellen auf der Bauteiloberfläche (nach DBV-Merkblatt "Hochwertige Nutzung von Untergeschossen")) | 41% 30 | 38% 28 | 21% 15 | 73 | 0,79 |
| NK A* (einfache Nutzung mit keiner Zulässigkeit von Feuchtstellen auf der Bauteiloberfläche (nach DBV-Merkblatt "Hochwertige Nutzung von Untergeschossen")) | 41% 31 | 32% 24 | 27% 20 | 75 | 0,85 |
| NK A** (normale Nutzung mit keiner Zulässigkeit von Feuchtstellen auf der Bauteiloberfläche (nach DBV-Merkblatt "Hochwertige Nutzung von Untergeschossen")) | 31% 23 | 39% 29 | 31% 23 | 75 | 1,00 |
| NK A*** (anspruchsvolle Nutzung mit keiner Zulässigkeit von Feuchtstellen auf der Bauteiloberfläche (nach DBV-Merkblatt "Hochwertige Nutzung von Untergeschossen")) | 16% 14 | 40% 34 | 44% 37 | 85 | 1,27 |

Q5 Wie oft wurde der Untergrund der Bodenplatten bei Verwendung von FBV-Systemen auf folgende Arten vorbereitet?

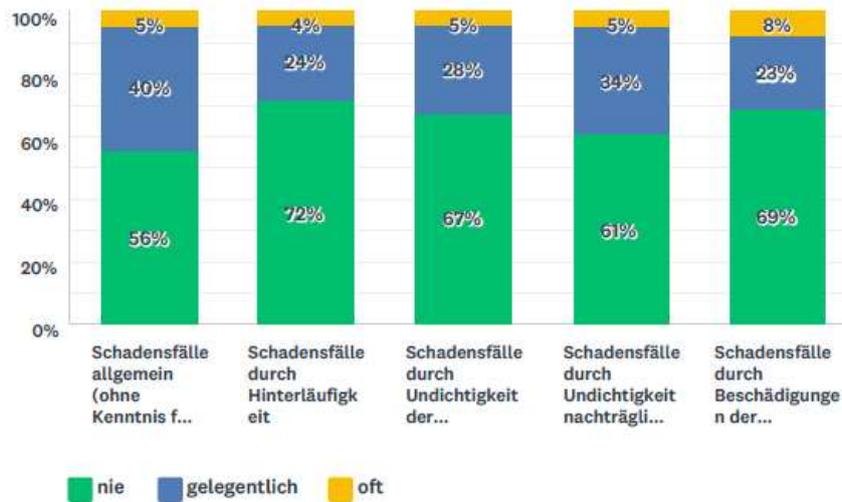
Beantwortet: 94 Übersprungen: 69



| | NIE | GELEGENTLICH | OFT | GESAMT | GEWICHTETER MITTELWERT |
|--|-----------|--------------|-----------|--------|------------------------|
| keine Vorbereitung des Untergrunds (nur Baugrund / grobe Auffüllung) | 96% 66 | 1% 1 | 3% 2 | 69 | 0,07 |
| Feinplanum von Baugrund / Auffüllung | 68% 44 | 23% 15 | 9% 6 | 65 | 0,42 |
| einfache Sauberkeitsschicht mit scharfen Kanten / Graten | 73% 49 | 21% 14 | 6% 4 | 67 | 0,33 |
| einfache Sauberkeitsschicht ohne scharfe Kanten / Grate | 15% 12 | 37% 29 | 47% 37 | 78 | 1,32 |
| geglättete Sauberkeitsschicht (z.B. flügelgeglättet) | 46% 35 | 37% 28 | 17% 13 | 76 | 0,71 |
| Perimeterdämmung | 13% 11 | 44% 38 | 44% 38 | 87 | 1,31 |
| Versätze im Untergrund | 32% 24 | 34% 25 | 34% 25 | 74 | 1,01 |

Q6 Wie oft kam es zu Schadensfällen (Feuchtigkeitseintrag ins Bauwerk) bei Ihren bisherigen Bauvorhaben mit Beanspruchungsklasse 1 (ständig oder zeitweise drückendes Wasser) und wodurch sind sie, falls der Grund detektiert wurde, entstanden?

Beantwortet: 85 Übersprungen: 78



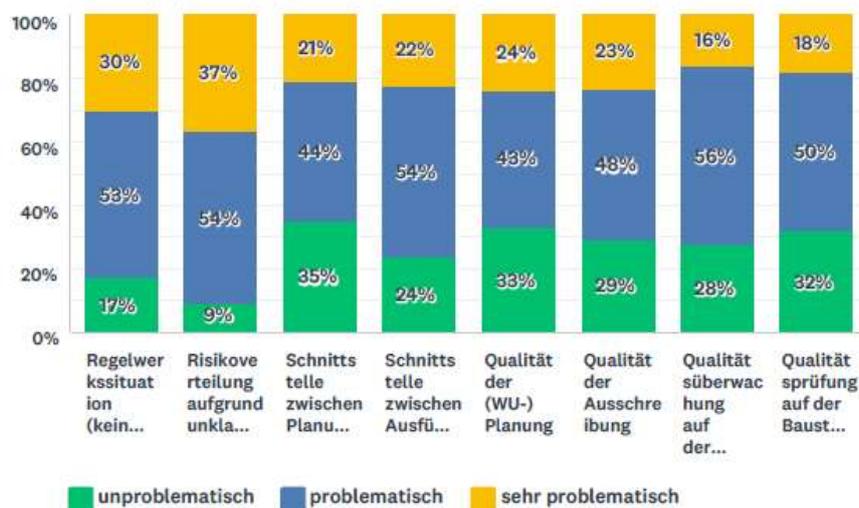
| | NIE | GELEGENLICH | OFT | GESAMT | GEWICHTETER MITTELWERT |
|--|-----------|-------------|---------|--------|------------------------|
| Schadensfälle allgemein (ohne Kenntnis für Gründe der Entstehung) | 56% 45 | 40% 32 | 5% 4 | 81 | 0,49 |
| Schadensfälle durch Hinterläufigkeit | 72% 48 | 24% 16 | 4% 3 | 67 | 0,33 |
| Schadensfälle durch Undichtigkeit der Nahtstellen an Quer- und / oder Längsstößen | 67% 43 | 28% 18 | 5% 3 | 64 | 0,38 |
| Schadensfälle durch Undichtigkeit nachträglich abgedichteter Fehlstellen (z.B. Reparaturen mit Tapes, Durchdringungen, Schalungsankerfehlstellen, ...) | 61% 37 | 34% 21 | 5% 3 | 61 | 0,44 |
| Schadensfälle durch Beschädigungen der FBV-Bahnen (z.B. durch Transport Betonstahlbewehrung, ...) | 69% 44 | 23% 15 | 8% 5 | 64 | 0,39 |

| NR. | SONSTIGES (BITTE ANGEBEN) | DATUM |
|-----|---|------------------|
| 1 | Die Schadensquote ist in Summe extrem gering - etwa unter 2,5%; alle bisher untersuchten Schadensbilder ergaben als Ursache in einigen Fällen eine Fehlanwendung / Fehler bei der Verarbeitung und in den meisten Fällen eine mangelhafte Sauberkeit oder mangelhafte Betonage, was wiederum auf unzureichendes Wissen, Sorgsamkeit, Koordination und Bauüberwachung sowie Qualitätssicherung schließen lässt | 27.03.2018 09:16 |
| 2 | Bis dato sind keine Undichtigkeiten festgestellt worden, da die FBV als zusätzliche Abdichtungsebene auf Kundenwunsch hin gewählt worden ist | 19.02.2018 11:27 |
| 3 | Bauwerk noch im Bau / ohne Wasserbeaufschlagung | 22.01.2018 18:16 |
| 4 | keine Schadensforschung vorgenommen | 22.01.2018 14:09 |
| 5 | Es ist sehr schwer, den Grund / Ursache von auftretenden Undichtigkeiten nach Herstellung der Weißen Wanne festzustellen. Aus diesem Grund können wir hier keine näheren Angaben machen. | 19.01.2018 12:00 |

| | | |
|---|---|------------------|
| 6 | Die Frage kann keiner wahrheitsgemäß beantworten! Dies ist nur möglich bei außenseitigen Untersuchungen der FBV. Wahrheitsgemäß wäre die Antwort: Schadensfälle: gelegentlich, daraus resultierend "Schadensfälle durch Hinterläufigkeit" oft, wobei sich die Hinterläufigkeit auf die Betonkonstruktion bezieht. | 17.01.2018 12:24 |
| 7 | Ausführung und Planung = Stellen an den kein Betondruck ist, Verschmutzungsgrade | 17.01.2018 11:31 |
| 8 | Es liegen noch keine Schadensfälle vor. Das System ist noch nicht sehr weit verbreitet. | 17.01.2018 11:04 |

Q7 Wie würden Sie die folgenden Schwerpunkte bezüglich FBV-Systemen einstufen?

Beantwortet: 94 Übersprungen: 69



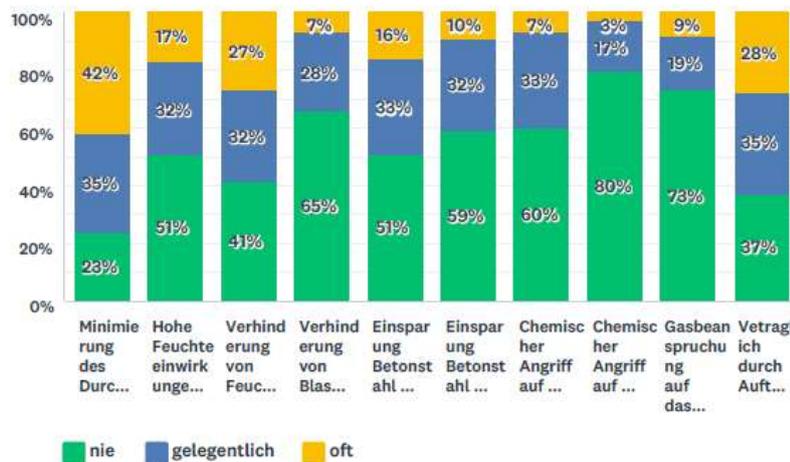
| | UNPROBLEMATISCH | PROBLEMATISCH | SEHR PROBLEMATISCH | GESAMT | GEWICHTETER MITTELWERT |
|---|-----------------|---------------|--------------------|--------|------------------------|
| Regelwerkssituation (keine allgemeine anerkannte Regel der Technik, keine geregelte Bauart) | 17% 15 | 53% 47 | 30% 27 | 89 | 1,13 |
| Risikoverteilung aufgrund unklarer Regelwerkssituation | 9% 8 | 54% 47 | 37% 32 | 87 | 1,28 |
| Schnittstelle zwischen Planung und Bauherr | 35% 30 | 44% 38 | 21% 18 | 86 | 0,86 |
| Schnittstelle zwischen Ausführung und Planung | 24% 21 | 54% 48 | 22% 20 | 89 | 0,99 |
| Qualität der (WU-) Planung | 33% 30 | 43% 39 | 24% 22 | 91 | 0,91 |
| Qualität der Ausschreibung | 29% 26 | 48% 43 | 23% 21 | 90 | 0,94 |
| Qualitätsüberwachung auf der Baustelle | 28% 26 | 56% 53 | 16% 15 | 94 | 0,88 |
| Qualitätsprüfung auf der Baustelle (z.B. Zustandsfeststellungen / Technische Teilabnahme vor und nach Verlegung FBV-Bahnen sowie nach Betonage) | 32% 30 | 50% 47 | 18% 17 | 94 | 0,86 |

C - Planung von FBV-Systemen

Im Umfragekapitel "C" werden Ihre bisherigen Erfahrungen mit der Planung von Frischbetonverbundsystemen (FBV-Systemen) erfragt.

Q8 Wie oft kamen aus folgenden Gründen FBV-Systeme zum Einsatz?

Beantwortet: 87 Übersprungen: 76



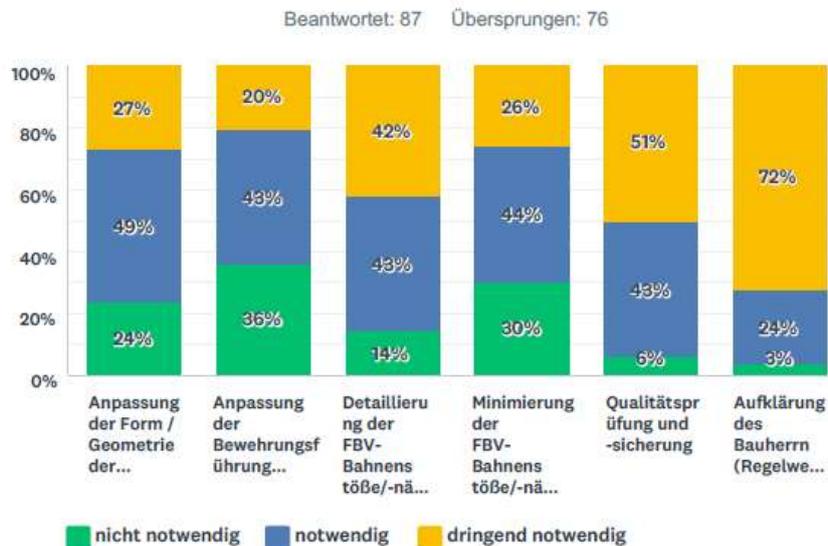
| | NIE | GELEGENLICH | OFT | GESAMT | GEWICHTETER MITTELWERT |
|--|-----------|-------------|-----------|--------|------------------------|
| Minimierung des Durchfeuchtungsrisikos bei hohen Nutzungsanforderungen unter Verwendung des Entwurfsgrundsatzes "a" nach DAfStb "WU-Richtlinie" (z.B. Nutzungsklasse A ⁰ , A [*] , A ^{**} , A ^{***} nach DBV-Merkblatt "Hochwertige Nutzung von Untergeschossen") | 23% 19 | 35% 28 | 42% 34 | 81 | 1,19 |
| Hohe Feuchteinwirkungen auf das Bauwerk und Verwendung des Entwurfsgrundsatzes "b" als Alternative zu Entwurfsgrundsatz "a" nach DAfStb "WU-Richtlinie" (z.B. starke Druckwasserbeanspruchung) | 51% 36 | 32% 23 | 17% 12 | 71 | 0,66 |
| Verhinderung von Feuchtstellen bei Innenräumen mit hohen Nutzungsanforderungen unter Verwendung von Entwurfsgrundsatz "b" aus DAfStb "WU-Richtlinie" (feine Rissverteilung, die sich nicht durch Selbstheilung schließen mussten) | 41% 29 | 32% 23 | 27% 19 | 71 | 0,86 |
| Verhinderung von Blasenbildung in rissüberbrückenden Oberflächenschutzsystemen bei befahrenen WU-Bodenplatten mit äußerem Wasserdruck unter Verwendung von Entwurfsgrundsatz "b" aus DBV-Merkblatt "Parkhäuser und Tiefgaragen" (feine Rissverteilung, die sich nicht durch Selbstheilung schließen mussten) | 65% 47 | 28% 20 | 7% 5 | 72 | 0,42 |
| Einsparung Betonstahl und vorweggenommene Rissabdichtungsmaßnahme bei Innenräumen nach Entwurfsgrundsatz "c" aus DAfStb "WU-Richtlinie" (wenige breite Risse, die (in diesem Fall) nicht nachträglich abgedichtet wurden) | 51% 38 | 33% 25 | 16% 12 | 75 | 0,65 |
| Einsparung Betonstahl mit nachträglicher Rissabdichtung nach Entwurfsgrundsatz "c" aus DAfStb "WU-Richtlinie" (wenige breite Risse, die nachträglich abgedichtet wurden) | 59% 43 | 32% 23 | 10% 7 | 73 | 0,51 |
| Chemischer Angriff auf den Beton aus dem Baugrund / Grundwasser (z.B. kalklösende Kohlensäure etc.) | 60% 42 | 33% 23 | 7% 5 | 70 | 0,47 |
| Chemischer Angriff auf den Beton aus Flüssigkeiten / Stoffen auf die Behälterwände (z.B. Biogas-Fermenter etc.) | 80% 55 | 17% 12 | 3% 2 | 69 | 0,23 |
| Gasbeanspruchung auf das Bauwerk (z.B. Radon etc.) | 73% 51 | 19% 13 | 9% 6 | 70 | 0,36 |
| Vetraglich durch Auftraggeber vorgegeben | 37% 25 | 35% 24 | 28% 19 | 68 | 0,91 |

| NR. | SONSTIGES (BITTE ANGEBEN) | DATUM |
|-----|---|------------------|
| 1 | Es kommen immer noch viele Ausschreibung und Planungen mit dem Entwurfsgrundsatz b auf den Markt. Aus diesem Grund ist es besonders wichtig, hier permanent die Unzulässigkeit des EG b bei hochwertiger Nutzung aufzuklären und sensibilisieren, dass dabei lediglich a oder c herangezogen werden darf. Des Weiteren macht Selbstheilung bei Verwendung von FBVS ohnehin keinen Sinn. | 27.03.2018 09:27 |
| 2 | Vorzugsweiser Einsatz der FBV im Sinne einer Rißprävention, da die nach WU-RiLi- 5.3(7) geforderte Zugänglichkeit in der Praxis in den meisten Fällen nicht realisiert werden kann. Hiermit besteht eins der wesentlichen Problemlagen bei Einsatz von WU-Beton ! | 21.03.2018 12:35 |
| 3 | Auch hier ist die Fragesetllung falsch. Wie wird Bewehrungseinsparung definiert, wenn ich bei NK A nicht EGS b nicht ansetzen darf? Die erforderlichen numerischen Betrachtungen sind durch die Normen und Regelwerke vorgegeben. | 17.01.2018 12:29 |

D - Ausführung von FBV-Systemen

Im Umfragekapitel "D" werden Ihre bisherigen Erfahrungen mit der Ausführung von Frischbetonverbundsystemen (FBV-Systemen) erfragt.

Q9 Wie würden Sie die Notwendigkeit der Anpassung der Planung an FBV-Systeme bei den folgenden Punkten einschätzen?

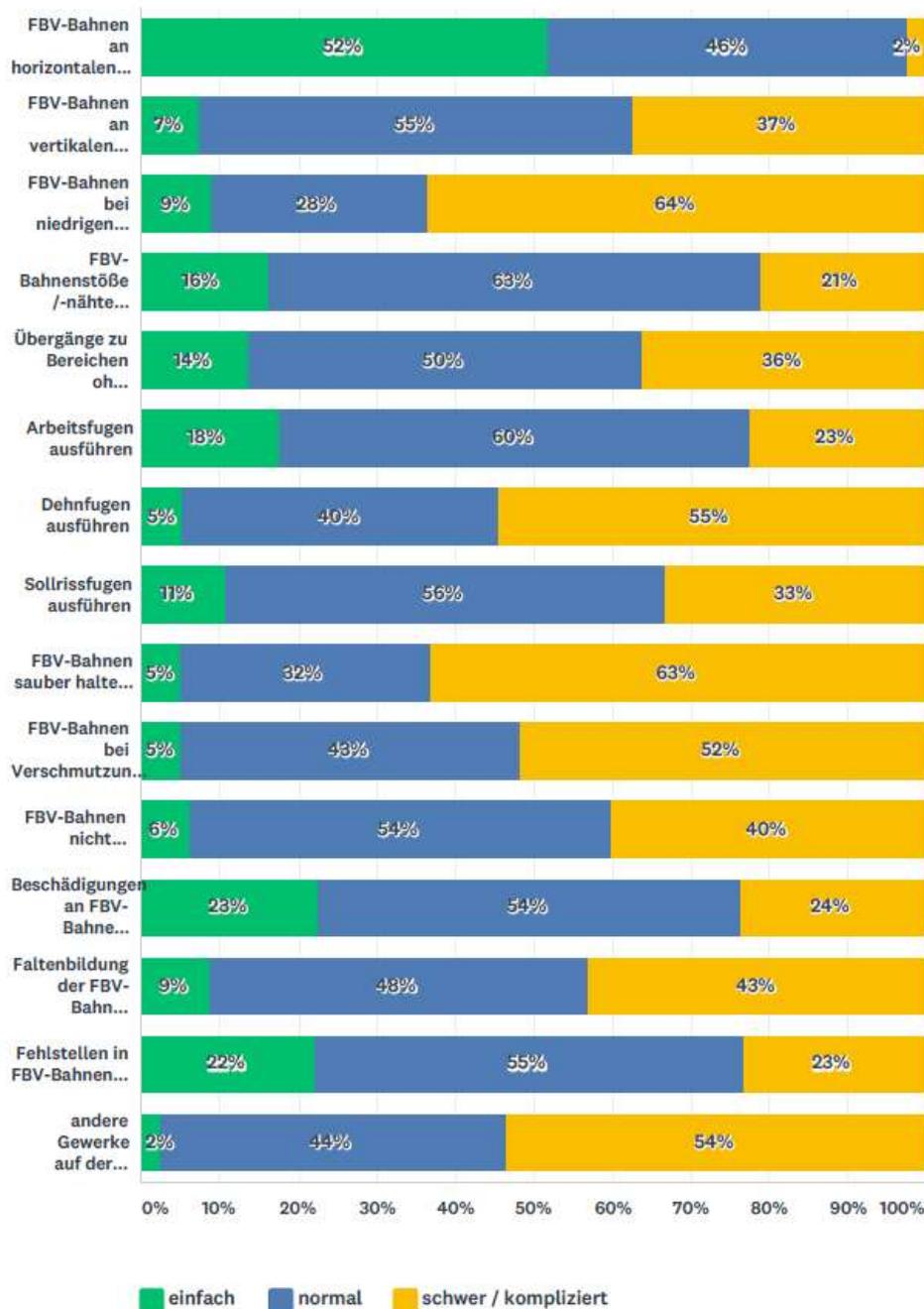


| | NICHT NOTWENDIG | NOTWENDIG | DRINGEND NOTWENDIG | GESAMT | GEWICHTETER MITTELWERT |
|---|-----------------|-----------|--------------------|--------|------------------------|
| Anpassung der Form / Geometrie der WU-Betonkonstruktion an das FBV-System | 24% | 49% | 27% | 85 | 1,04 |
| Anpassung der Bewehrungsführung (Bewehrungsstöße <-> FBV-Bahnenstöße) und den Bewehrungsgrad der Konstruktion | 36% | 43% | 20% | 83 | 0,84 |
| Detaillierung der FBV-Bahnenstöße/-nähte, Durchdringungen, Aufkantung / Versprünge | 14% | 43% | 42% | 83 | 1,28 |
| Minimierung der FBV-Bahnenstöße/-nähte (z.B. durch Verlegepläne) | 30% | 44% | 26% | 84 | 0,96 |
| Qualitätsprüfung und -sicherung | 6% | 43% | 51% | 83 | 1,45 |
| Aufklärung des Bauherrn (Regelwerkssituation, keine anerkannte Regel der Technik, keine geregelte Bauart, Risikoverteilung,...) | 3% | 24% | 72% | 87 | 1,69 |

| NR. | SONSTIGES (BITTE ANGEBEN) | DATUM |
|-----|--|------------------|
| 1 | Ganzheitliche Betrachtung des Systems inkl. aller Übergänge und Kombinationen - Zusammenspiel muss geklärt sein. Sämtliche Kombinationen müssen auch praxistauglich umsetzbar und geprüft sein! | 27.03.2018 09:27 |
| 2 | Die Grundkonstruktion ist die WU-Konstruktion einschl. Bewehrung, Fugendichtbänder und Durchdringungen; FBV muß hieran anpassbar sein und nicht umgekehrt! Die komplexe WU-Konstruktion kann auf keinen Fall nach den Möglichkeiten des ergänzenden FBV ausgerichtet werden. | 21.03.2018 12:35 |
| 3 | Wenn es durch den Objektplaner eine WU-Konzeption gibt ist die Aufklärung des Bauherren regelmäßig kein Problem. Leider ist die Erfordernis dazu noch nicht beim Objektplaner angekommen. | 17.01.2018 12:29 |

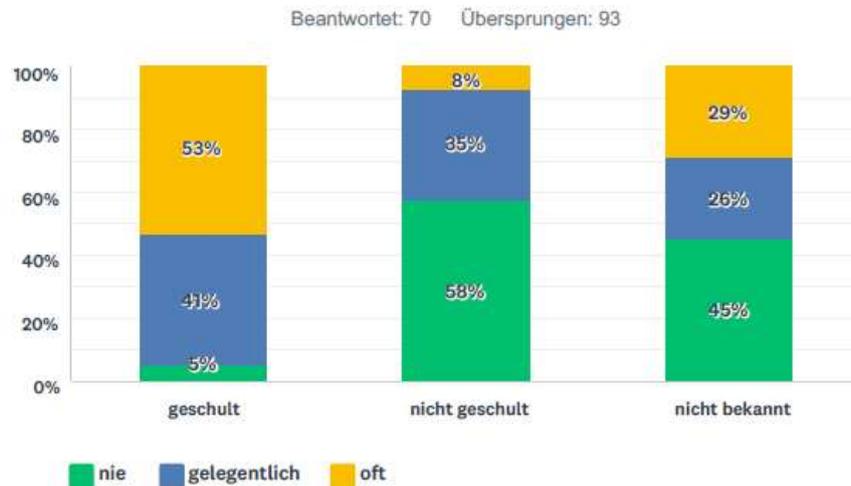
Q10 Wie würden Sie den Schwierigkeitsgrad bei folgenden Tätigkeiten mit FBV-Systemen auf der Baustelle einstufen?

Beantwortet: 83 Übersprungen: 80



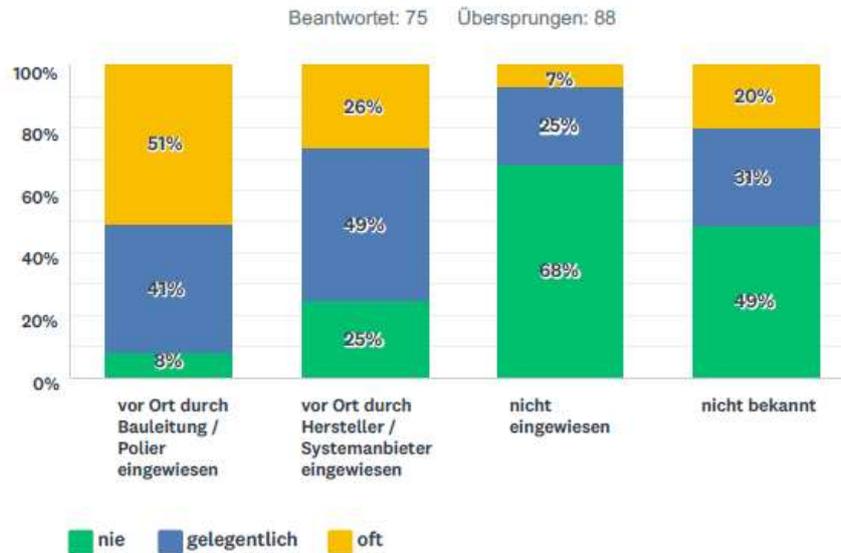
| | EINFACH | NORMAL | SCHWER / KOMPLIZIERT | GESAMT | GEWICHTETER MITTELWERT |
|--|-----------|-----------|-------------------------|--------|---------------------------|
| FBV-Bahnen an horizontalen Flächen verlegen | 52% 43 | 46% 38 | 2% 2 | 83 | 0,51 |
| FBV-Bahnen an vertikalen Flächen verlegen | 7% 6 | 55% 46 | 37% 31 | 83 | 1,30 |
| FBV-Bahnen bei niedrigen Temperaturen verlegen (z.B. geringere Haftungseigenschaften der Selbstklebestöße, höhere Steifigkeit der FBV-Bahnen, ...) | 9% 7 | 28% 22 | 64% 51 | 80 | 1,55 |
| FBV-Bahnenstöße/-nähte ausbilden | 16% 13 | 63% 51 | 21% 17 | 81 | 1,05 |
| Übergänge zu Bereichen ohne FBV-System ausbilden | 14% 11 | 50% 40 | 36% 29 | 80 | 1,23 |
| Arbeitsfugen ausführen | 18% 14 | 60% 48 | 23% 18 | 80 | 1,05 |
| Dehnfugen ausführen | 5% 4 | 40% 31 | 55% 42 | 77 | 1,49 |
| Sollrissfugen ausführen | 11% 8 | 56% 42 | 33% 25 | 75 | 1,23 |
| FBV-Bahnen sauber halten (Verschmutzungen vermeiden) | 5% 4 | 32% 25 | 63% 50 | 79 | 1,58 |
| FBV-Bahnen bei Verschmutzung reinigen | 5% 4 | 43% 35 | 52% 42 | 81 | 1,47 |
| FBV-Bahnen nicht beschädigen | 6% 5 | 54% 44 | 40% 33 | 82 | 1,34 |
| Beschädigungen an FBV-Bahnen beheben / reparieren | 23% 18 | 54% 43 | 24% 19 | 80 | 1,01 |
| Faltenbildung der FBV-Bahnen vermeiden beim Verlegen | 9% 7 | 48% 39 | 43% 35 | 81 | 1,35 |
| Fehlstellen in FBV-Bahnen ausbessern | 22% 17 | 55% 42 | 23% 18 | 77 | 1,01 |
| andere Gewerke auf der Baustelle zur FBV-System-Thematik sensibilisieren | 2% 2 | 44% 36 | 54% 44 | 82 | 1,51 |

Q11 Wie oft wurde das FBV-System- / Abdichtungspersonal zuvor geschult (insbesondere Schutz und Vorgehen bei Verschmutzungen und Beschädigungen)?



| | NIE | GELEGENTLICH | OFT | GESAMT | GEWICHTETER MITTELWERT |
|----------------|-----------|--------------|-----------|--------|------------------------|
| geschult | 5% 3 | 41% 24 | 53% 31 | 58 | 1,48 |
| nicht geschult | 58% 15 | 35% 9 | 8% 2 | 26 | 0,50 |
| nicht bekannt | 45% 14 | 26% 8 | 29% 9 | 31 | 0,84 |

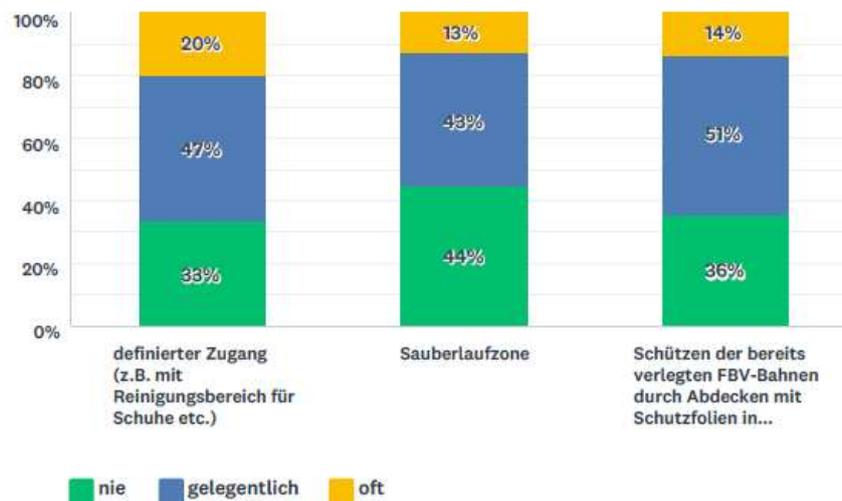
Q12 Wie oft wurden die Bewehrter / Armierer und das Betonagepersonal zuvor eingewiesen (insbesondere Schutz und Vorgehen bei Verschmutzungen und Beschädigungen)?



| | NIE | GELEGENLICH | OFT | GESAMT | GEWICHTETER MITTELWERT |
|---|-----------|-------------|-----------|--------|------------------------|
| vor Ort durch Bauleitung / Polier eingewiesen | 8% 5 | 41% 25 | 51% 31 | 61 | 1,43 |
| vor Ort durch Hersteller / Systemanbieter eingewiesen | 25% 14 | 49% 28 | 26% 15 | 57 | 1,02 |
| nicht eingewiesen | 68% 19 | 25% 7 | 7% 2 | 28 | 0,39 |
| nicht bekannt | 49% 17 | 31% 11 | 20% 7 | 35 | 0,71 |

Q13 Wie oft wurden Maßnahmen zu Vermeidung von Schmutzeintrag auf die FBV-Bahnen getroffen?

Beantwortet: 76 Übersprungen: 87



| | NIE | GELEGENTLICH | OFT | GESAMT | GEWICHTETER MITTELWERT |
|--|-----------|--------------|-----------|--------|------------------------|
| definierter Zugang (z.B. mit Reinigungsbereich für Schuhe etc.) | 33% 25 | 47% 35 | 20% 15 | 75 | 0,87 |
| Sauberaufzone | 44% 31 | 43% 30 | 13% 9 | 70 | 0,69 |
| Schützen der bereits verlegten FBV-Bahnen durch Abdecken mit Schutzfolien in Anschlussfugenbereichen oder Arbeitsbereichen von Personen und Maschinen (z.B. Laufwege, Schwenkbereich Kran mit Betonkübel, Reinigungsplätze, Sägearbeitsbereiche für Schalungen, ...) | 36% 26 | 51% 37 | 14% 10 | 73 | 0,78 |

Q14 Weitere Anmerkungen

Beantwortet: 10 Übersprungen: 153

| NR. | BEANTWORTUNGEN | DATUM |
|-----|--|------------------|
| 1 | 1. Grundsätzlich sind verbindliche/anerkannte Regeln zu erstellen, wie die FBV zu planen ist und welche Anforderungen sie erfüllen kann. Insbesondere ist auch zu klären, wann die Klebeschicht bzw. Vlieschicht einzusetzen ist. 2. Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob der WU-Aufbau überhaupt noch vertreten kann: - unterhalb/außerhalb des WU; FBV mit abdichtender Wirkung - Kernbereich: Wasserundurchlässiger Beton - raumseitig: Dampfsperre (z.B. Bitumenbahn mit AL-Einlage und abdichtender Wirkung) um die Baufeuchte auszuschließen, wenn z.B. Fußbodenoberbeläge aus Weichbelägen (Kautschuk, Lino, Epoxidharz o.ä. nicht ausreichend dampfdiffusionsoffene Beläge geplant sind. Im Ergebnis liegen nun 3 Abdichtungssysteme vor, wobei die Hauptabdichtungsebene WU zusätzlich von unten und oben nochmals "eingepackt" werden muss. Es stellt sich die Frage nach einer grundlegenden Vereinfachung des Abdichtungssystems. | 21.03.2018 12:52 |
| 2 | Aus unternehmerischer Sicht (Bauausführung) sollte die FBV auch weiterhin nur als zusätzliche Maßnahme bei einer fachgerecht konstruierten und ausgeführten WU-Konstruktion eingesetzt werden. Wird die WU-Konstruktion durch die Versprechungen der FBV-Hersteller runtergerechnet und abgespeckt, und dient somit die FBV als einzige "Abdichtung", birgt dieses ein hohes Risikopotential, welches zu Lasten des Bauausführenden geht. | 19.03.2018 15:25 |
| 3 | Dieses Abdichtungssystem ist in der Praxis eigentlich nicht realisierbar. Meist liegt das an fehlenden Plänen, Geometrien die für das System FBV nicht geeignet sind, mangelndes Fachwissen der Architekten bzw. Planer und vor allem an der überhöhten Erwartungshaltung der Bauherren an das System. | 15.03.2018 09:47 |
| 4 | Das System ist nicht schlecht, jedoch passt diese oft nicht zu den alltäglichen, baulichen Gegebenheiten vor Ort (Witterung, hohe Lasten beim Einbau der Bewehrung, Schutz der Folien bis zur Betonage, Zigaretten, etc.). Aber auch die Planer nehmen kaum Rücksicht auf die Schwierigkeiten die den Ausführenden begegnen: Man sollte (wenn möglich) Höhenversätze und Durchdringungen in den Bauteilen vermeiden / minimieren. Jede Voute stellt den Verarbeiter vor Herausforderungen, die minimiert werden sollten (Eckbereiche der Vouten, etc.). | 29.01.2018 10:06 |
| 5 | Ich habe erst vor kurzem meine erste Baustelle mit einem FBV-System abgewickelt. Außerdem bin ich noch Jungbauleiter und hatte mit diesem System im Vorfeld noch keine Berührungspunkte. Aufgrund fehlender Erfahrung mit diesem System habe ich einige Fragen ausgelassen. Ich hoffe ich konnte Ihnen trotzdem helfen. | 26.01.2018 10:44 |
| 6 | Laborprodukt mit guter Lobbyarbeit | 23.01.2018 18:03 |
| 7 | Hohe Risiken für ausführende Baufirma: Vertraglich / Gewährleistungsrisiko / Extremes Risiko bei erst später folgender Wasserbeaufschlagung (nach erfolgtem Ausbau) | 22.01.2018 18:29 |
| 8 | Frage Dehnfugen wird von keinem Hersteller beantwortet, Sauberhaltung der Frischbetonfolie immer sehr kritisch, Abstimmung und Einigung mit Bauherr sehr schwierig, rechtliche Komponente, Planer delegieren teilweise ohne Kenntnisse der Bauweise in die Ausführung | 22.01.2018 14:20 |
| 9 | Die Verfahrensvorgaben öffentlicher Auftraggeber (StLB-Bau, VOB/A u.ä.) sollten bei der weiteren Entwicklung eines Regelwerks Beachtung finden. | 17.01.2018 13:10 |
| 10 | Die Punkte 10 und 11 sind systemabhängig. Glatte Oberflächen und HDPE Trägerbahnen wie Preprufe sind hier weniger anfällig als andere Systeme mit Vlieskaschierung oder FPO, PVC oder PP Trägerbahnen | 17.01.2018 11:35 |

Vielen Dank für Ihre Teilnahme

Wir bedanken uns für Ihre Teilnahme an der Umfrage zu Frischbetonverbundsystemen und wünschen Ihnen weiterhin viel Erfolg bei Ihren Projekten.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden im DBV-Rundschreiben veröffentlicht. Falls Anmerkungen Ihrerseits vorhanden sind, können Sie diese in das Textfeld eintragen.

Anhang B2: Einzelergebnisse zur Umfrage zur Schwachstellen-/Schadensanalyse

Vorwort zur Umfrage

Die Teilnahme an der Umfrage wurde anonymisiert. Die Umfrage war eine Zeitpunktaufnahme, folglich ist es möglich, dass seit der Umfrage sich einige Antwortmöglichkeiten unterschiedlich verteilen könnten.

Allgemeine Daten

Umfrageumfang: 53 Betrachtungspunkte

Umfragemedien/Zeitraum: Word-Dateien / 23.04.2018 bis 20.06.2018 (ca. 2 Monate)

Umfrageveröffentlichung/Collectors: nur bei Mitgliedern aus dem DBV-Arbeitskreis „Frischbetonverbundsysteme“ (HABA-FBV)

Teilnahmen an der Umfrage: sechs Teilnahmen aus FBV-Herstellern, bauausführenden Unternehmen, Ingenieurbüros und Sachverständigenbüros [Codierung (1) – (6)]

Zusammenfassung der Ergebnisse der Umfrage

1 Planung

1.1 FBV-Planung/Abdichtungsplanung

1.1.1 Details geplant?

- (1) Betrifft vom AG übergebene Planunterlagen: bei 1/10 Projekten ja, bei 9/10 nein.
- (3) systembedingt unterschiedlich
- (4) unterschiedlich; teilweise unvollständig

1.1.2 Übergänge Bodenplatte/Wand

- (1) Bei keinem der 10 Projekte Detailplanung durch den AG, Ausführung nach den Verarbeitungshinweisen des jeweiligen Herstellers.
- (3) systembedingt unterschiedlich
- (4) unterschiedlich; teilweise nicht geplant, Problem Werkplanung; teilweise geplant mit Flüssigkunststoff

1.1.3 Übergänge an Bereiche ohne FBV-Systeme (Mindestüberlappungsbereiche?)

- (1) Bei keinem der 10 Projekte Detailplanung durch den AG, Ausführung nach den Verarbeitungshinweisen des jeweiligen Herstellers.
- (3) systembedingt unterschiedlich
- (4) unterschiedlich; teilweise mit Schwarzabdichtung; teilweise mit Flüssigkunststoff

1.1.4 Anschluss Dehnfugenabdichtung (Besonderheiten etc.)

- (1) Für 1/10 Projekten keine Dehnfugenabdichtung vorhanden, für 9/10 Projekten keine Detailplanung durch den AG, Ausführung nach den Verarbeitungshinweisen des Herstellers.
- (4) unterschiedlich; teilweise kombiniert aus Fugenband, FBV und Schwarzabdichtung

1.1.5 Anschluss Fugenabdichtung innen-/außenliegend

- (1) Bei keinem der 10 Projekte Detailplanung durch den AG, Ausführung nach den Verarbeitungshinweisen des Herstellers.
- (4) FBV-Bahn wird/wurde über Fugenabdichtung geführt

1.1.6 Eckausbildung Bodenplatte

- (1) Bei keinem der 10 Projekte Detailplanung durch den AG, Ausführung nach den Verarbeitungshinweisen des Herstellers.
- (3) Gemäß Regeldetail mit systemkonformen, FBV-Tape, Innenecken gefaltet und getaped, ohne Schnitt, um Undichtigkeiten zu vermeiden.
- (4) unterschiedlich; teilweise nicht geplant; teilweise mit Zuschnitt und Tapes geplant durch AG

1.1.7 Stöße FBV-Bahnen (Längs- und Querstöße)

- (1) Bei keinem der 10 Projekte Detailplanung durch den AG, Ausführung nach den Verarbeitungshinweisen des Herstellers. Vereinzelt einzelne Leistungsmerkmale im LV enthalten, z. B. „Stöße zu verkleben oder zu verschweißen“.
- (3) Selbstklebende Längsstöße auf der Bahn, mit doppelseitigen Selbstklebenähten für Verarbeitung auch bei Nässe und tiefen Temperaturen. Querstöße überlappend mit FBV-Tape (gleiche Technologie wie die FBV-Bahn selbst).
- (4) unterschiedlich; teilweise Klebestöße; teilweise vorkonfektionierte Klebestöße

1.1.8 Überlappung FBV-Bahnen

- (1) Bei keinem der 10 Projekte Detailplanung durch den AG, Ausführung nach den Verarbeitungshinweisen des Herstellers.
- (3) systembedingt unterschiedlich – gemäß Randmarkierung auf Selbstklebenaht bzw. gemäß Verlegeanleitung bei geschnittenen Kanten
- (4) gemäß abP

1.1.9 Reparaturstellen (u. a.: selbstklebende Tapes ausreichend hinterlaufsicher? Möglicherweise verbessert ein Primer die Verbindung)

- (1) Bei keinem der 10 Projekte Detailplanung durch den AG, Ausführung nach den Verarbeitungshinweisen des Herstellers.
- (3) systembedingt unterschiedlich
- (4) unterschiedlich; teilweise ungeregelt/ungeplant; teilweise mit Klebetapes und Flüssigkunststoff geplant durch AG

1.1.10 Anschluss/Abdichtung Schalungsanker (Aussparung etc.)

- (1) Bei keinem der 10 Projekte Detailplanung durch den AG, Ausführung nach den Verarbeitungshinweisen des Herstellers. Generell haben wir keine Methode gefunden, die eine faltenfreie FBV-Bahn am Schalungsanker sicherstellt.
- (3) mit systemkonformen und geprüften nachträglich aufgeklebtem Tape, auf gleicher Materialbasis und Kleberbasis wie FBV, systemgeprüfter Übergang
- (4) geplant mit nachträglichem Flüssigkunststoff

1.1.11 Anschluss Einbauteile

- (1) Bei 1/10 Projekten Detailplanung des AG, bei 9/10 Projekten Ausführung nach den Verarbeitungshinweisen des Herstellers.
- (3) gemäß Regeldetail
- (4) geplant mit nachträglichem Flüssigkunststoff

1.1.12 Anschluss Pfähle

- (1) Bei 8/10 Projekten keine Pfähle, bei 1/10 Projekten Detailplanung im Rahmen der Werkplanung durch den AN, bei 1/10 Projekten Detailplanung durch den AG vorgelegt.
- (3) gemäß Regeldetail
- (4) geplant mit nachträglichem Flüssigkunststoff

1.1.13 Schutzmaßnahmen FBV-Bahnen

- (1) Bei keinem der 10 Projekte Detailplanung durch den AG, Ausführung nach den Verarbeitungshinweisen des Herstellers.
- (3) Systembedingt unterschiedlich. Schutz während Bewehrungsarbeiten nicht erforderlich. Anfüllschutz für Perimeterdämmung der Bodenplatte und bei Wänden wird empfohlen, dies sind i. d. R. die ohnehin zum Einsatz kommenden XPS Perimeterdämmungen.
- (4) keine geplant durch AG

1.1.14 Reparatur bei fehlender Zugänglichkeit (hochbewehrte Bodenplatte)

- (1) Bei keinem der Projekte Vorgaben durch den Planer des AG, i. d. R. Mangelanzeige.
- (4) keine geplant durch AG
- (6) Reparaturen nach Bewehrungsverlegung bei mehrlagiger Bewehrung und hohem Bewehrungsgrad nicht mehr möglich.

1.1.15 Besondere Maßnahmen an Vouten/Unterfahrten geplant (Befestigung der FBV-Bahnen, Knicke etc.?)

- (1) Bei keinem der 10 Projekte Detailplanung durch den AG, Ausführung nach den Verarbeitungshinweisen des Herstellers.
- (3) Systembedingt unterschiedlich – System (Trägerbahn) lässt sich leicht falten und knicken, Ausführung bei > Unterfahrten gemäß Regeldetails, falls mechanische Fixierungen erforderlich, können diese mit systemkompatiblen Tape mit FBV-Beschichtung überdeckt werden.
- (4) unterschiedlich; teilweise nicht geplant; teilweise mit örtlichen Zuschnitt und Tapes geplant durch AG

1.1.16 Fehlendes Einvernehmen mit dem Bauherrn ((noch) keine aaRdT, keine geregelte Bauart)

- (1) Einvernehmen bei 3/10 Projekten, bei 4/10 Projekten kein Einvernehmen herstellbar, bei 3 Projekten bauordnungsrechtliche Aspekte nicht geklärt (Ausführung bis 2016). Ergänzend sei folgendes angemerkt:
- a. Bei Projekten mit Ausführung bis ca. Ende 2016 haben wir bauordnungsrechtliche Aspekte gegenüber dem AG nicht geklärt, die Dichtheit entweder durch Verpressen hergestellt bzw. wegen aufstauendem Grundwasser noch keine Wasserbeaufschlagung/Leckage. Bis ca. Ende 2016 haben wir intern den tatsächlichen bauordnungsrechtlichen Status der FBV-Systeme nicht erkannt bzw. nicht richtig eingeschätzt. Hinsichtlich Diskussionen um das FBV-System haben diese Projekte intern den Status „derzeit kein Handlungsbedarf“. Betrifft 6/10 Projekten.
 - b. Bei Projekten mit Ausführung ab 2016 stets Aufklärung bauordnungsrechtlicher Aspekte (keine aaRdT, keine geregelte Bauart, Anwendungs-/Geltungsbereich der abP). Betrifft 4/10 Projekten. Bei derzeit 3/10 Projekten AN-seitige Forderung zur Verlängerung der Gewährleistung (12 – 30 Jahre), 1/10 Projekten noch offen, da Wasserhaltung noch läuft. Generell entsteht bei uns der Eindruck, dass der AG im Vorfeld durch den Planer nicht in der gebotenen Tiefe aufgeklärt wurde und das Risiko nach AN-seitiger Aufklärung auf die ausführende Baufirma über den vertraglich geschuldeten Erfolg auferlegt wird. Dabei wird zu meist die Verwendung eines FBV-Systems pauschal mit der Erwartungshaltung 100%iger Dichtheit gleichgesetzt. Wir lehnen das Begehren der Gewährleistungsverlängerung mit Verweis auf die für WU-Betonkonstruktion geltenden Regelwerke generell ab.
- (4) Aufklärung des Bauherrn oftmals unzureichend/falsch; teilweise geplant als alleinige Dichtmaßnahme ohne WU-Konstruktion

1.2 Tragwerksplanung

1.2.1 Anschlussbewehrung an Arbeitsfugen für Zugänglichkeit der FBV-Bahn optimiert geplant

- (1) bei keinem der 10 Projekte optimierte Planung
- (4) nein, nicht geplant

1.2.2 Fugenabdichtungsplanung auf FBV-System/ -Bahn abgestimmt

- (1) Bei keinem der 10 Projekte war eine besondere Abstimmung auf das FBV-System erkennbar.
- (4) ja, geplant

1.2.3 Abstellelemente an Arbeitsfugen müssen dicht sein

- (1) Keine Abstellelemente mit besonderer Eignung in dieser Hinsicht geplant.
- (4) ja, Fugenblech

1.2.4 FBV-System als alleinige Dichtmaßnahme („Bauarten-abP“)

- (1) 3/10 Projekten waren auf Basis FBV = Bauwerksabdichtung geplant. 6/10 Projekten auf Basis WU-Betonkonstruktion, siehe Frage 1.2.5.
- (4) unterschiedlich; teilweise als alleinige Dichtmaßnahme ohne WU-Konstruktion; teilweise als zusätzliche Maßnahme zur WU-Konstruktion mit planmäßiger Rissverpressung

1.2.5 „gemischte“ Planung (ein bisschen DIN 18533, ein bisschen WU, (möglicherweise „abgespeckte“ WU-Konstruktion); „... das FBV-System wird es schon richten“)

- (1) 1/10 Projekten war nicht als WUBEKO geplant, 8/10 Projekten weichen in der vom AG übergebenen Planung in unterschiedlichem Ausmaß von den Vorgaben der WU-Rili ab. Die Überschneidung mit Frage 1.2.4 bedeutet, dass die Planung teilweise auf (abgespekter) WU-Rili basiert, das FBV-System gedanklich als Bauwerksabdichtung gesehen wird – Gürtel mit Hosenträger. Nur 1/10 Projekten kann nach interner Prüfung eine Planung unter umfassender Einhaltung der WU-Rili attestiert werden. 8/10 Projekten wurden nach NKL A geplant, 1/10 Projekte fehlte die Angabe der NKL. (1/10 nicht als WU geplant.)
- (4) unterschiedlich; teilweise gemischte Planung; teilweise als zusätzliche Maßnahme zur WU-Konstruktion mit planmäßiger Rissverpressung

1.2.6 EGS b) in Kombination mit einem FBV-System (bei NKL A bereits ein Planungsfehler; und zudem technisch i. d. R. nicht sinnvoll)

- (1) Soweit dies aus den Plänen/statischen Unterlagen erkennbar und dokumentiert ist, wurden 9/10 Projekten nach EGS b geplant. (1/10 Projekt ohne WU-Planung.) Das heißt, rechnerische Nachweise der Rissfreiheit für EGS a liegen nicht vor, eine Planung nach EGS c ist nicht dokumentiert bzw. klar erkennbar. In der Regel wird eine Rissbreitenbeschränkung nach WU-Rili, teilweise auch mit Verweis auf das FBV-System mit größerem w_{cal} als nach WU-Rili vorgelegt. Diese Frage kann aber nicht für alle Projekte zweifelsfrei beantwortet werden, da die entsprechenden Unterlagen nicht oder nur teilweise vorliegen.
- (3) Hinweis auf Empfehlung „Münchner Runde“ für Parkgaragen – FBV-System kombiniert mit Weiße Wanne und Rissweitenbegrenzung (EGS b) für Nutzung OS11-Systeme als Parkhausbeschichtung.

1.3 Schalplanung

1.3.1 Verlegeplanung in Schalplanung integriert

- (1) Bei 0/10 Projekten sichtbare Abstimmung zwischen Verlegeplanung und Schalplanung von Seiten des AG. Bei 0/10 Projekten projektbezogene Herstellerangaben zur Verlegerichtung der Bahnen oder Hinweise zur Abstimmung mit der Schalplanung. Generell vermischen wir konkrete Hinweise, welche Punkte des FBV-Systems in welcher Form konkret bei der Schalplanung zu berücksichtigen sind. Dieser Aspekt spielt in den uns bekannten Verarbeitungsrichtlinien keine bzw. keine signifikante Rolle.
- (4) nein

2 Bauausführung

2.1 Einweisung/Schulung

2.1.1 Einweisung/Schulung der Verarbeiter durch den FBV-Hersteller/-Systemanbieter

- (1) bei 2/10 Projekten Schulung eigener Mitarbeiter durch den FBV-Systemanbieter einschließlich Erteilung Zertifikat, bei 8/10 Projekten Verarbeitung durch Verleger als NU mit geschultem Personal
- (2) Baufirmenpersonal trotz Einweisung nicht ausreichend geschult/sensibilisiert
- (3) systembedingt unterschiedlich– Verarbeiter des Systems werden geschult und zertifiziert
- (4) ja

2.1.2 Regelmäßige Betreuung der Ausführung durch FBV-Hersteller/-Systemanbieter

- (1) Keine signifikante Betreuung bei der Ausführung durch den Systemanbieter bei Ausführung durch uns, bei Ausführung durch Verleger ist der Punkt für uns nicht einschätzbar.
- (3) Verarbeiter des Systems werden regelmäßig durch Hersteller/Lieferant betreut (QS-Überwachung und Begutachtung), bei komplexen Bauwerken Einweisung und wiederholte Betreuung.
- (4) ja

2.1.3 Schriftliche Verlegeanweisung auf der Baustelle

- (1) Bei Ausführung durch uns in Form der allgemeinen Verarbeitungsrichtlinie des Systemanbieters, keine projektbezogene Verlegeanweisung (2/10 Projekte), keine Aussage bei Verarbeitung durch Verleger möglich wegen mangelndem Einblick in seine Arbeitsweise (8/10 Projekten).
- (3) Liegen dem Verarbeiter vor und werden i. d. R. auch dem Bauleiter überreicht.
- (4) ja

2.1.4 Schriftliche Unterweisung der anderen auf der Baustelle tätigen Gewerke (Sorgfalt, Sauberkeit, keine Schweiß- oder Flex-Arbeiten, ...)

- (1) Ja, für betroffene Gewerke Flex- und Schweißverbot, insbesondere Verlegung der Bewehrung durch NU.
- (3) Hinweise an Bauleiter, schriftlich in der Verlegeanleitung
- (4) ja, für Bewehrter und Schalungsmitarbeiter

2.2 Verlegung der FBV-Bahnen

2.2.1 Zeitpunkte und Witterungsbedingungen zur Verlegung der FBV-Bahnen

- (1) 6/10 Projekten im Zeitraum April bis August, 4/10 Projekten auch in der kalten Jahreszeit;
- (2) Lunkerfalten infolge nicht ausreichend sorgfältiger Fügung oder Temperaturbeanspruchungen und teilweise allgemein zu geringe Zug-/Klebefestigkeit bei Temperaturbeanspruchungen

2.2.2 Stöße nach Verlegeanweisung (Achtung: bei zu großer Überlappung planmäßige wasserführende Kanäle etc.)

- (1) Bei 10/10 Projekten Ausführung der Stöße nach Verlegeanweisung, keine Hinweise seitens des Herstellers zu Konsequenzen von Abweichungen/Toleranzen der Überlappungsbreite.
- (3) systembedingt unterschiedlich
- (4) gemäß abP mit Vorgabe durch FBV-Planer

2.2.3 Keine Faltenbildung an FBV-Bahnenstößen

- (1) Faltenfreie Ausführung halten wir unter baupraktischen Bedingungen für ausgeschlossen bzw. nicht umsetzbar. Erfahrung bezieht sich auf nur zwei Fabrikate.
- (2) Lunkerfalten infolge nicht ausreichend sorgfältiger Fügung oder Temperaturbeanspruchungen
- (6) FBV-Bahn wirft beim Verlegen abhängig von der Witterung erhebliche Falten, was sich nicht vermeiden lässt. Auf diese Falten wird dann eine mehrlagige Bewehrung verlegt, die auch ein erhebliches Gewicht aufweist. Dadurch werden die Falten zusammengedrückt und schon dadurch kann es nach meiner Auffassung zu Zerstörungen der Folie durch Knicke an den Falten kommen.

2.2.4 Versprünge und Vouten vermeiden/minimieren und bei Unvermeidbarkeit zu erwartende Längenänderung der FBV-Bahnen berücksichtigen

- (2) teilweise zu geringe Klebefestigkeit bei Verlegung über Vouten → Aufplatzen

2.2.5 Am Übergang zu aufgehenden Flächen zu erwartende Längenänderung der FBV-Bahnen berücksichtigen

- (1) Auftraggeberseite keinerlei Hinweise, seit ca. 2016 generell Fuge am Übergang Bodenplatte – Wand mit nachträglicher Dichtung; Probleme bei Vergütung, weil in Verarbeitungsrichtlinie das so nicht als erforderlich dargestellt und AG-seitig als nicht notwendig angesehen wird.
- (4) Übergänge an der Arbeitsfuge mit Flüssigkunststoff

2.2.6 FBV-Bahnen an aufgehenden Flächen ausreichend fixieren und Stöße dicht ausführen

- (2) Unzureichende Wandbefestigungen führen zur Hinterläufigkeit des Betons zwischen Schalung und Bahn.

2.2.7 Verschmutzung auf FBV-Bahnen (betonseitig und in Stoßbereichen etc.) vermeiden

- (1) Wird nach Kräften versucht, ist aber praktisch bei Liegezeiten bis zum Betonieren von > 1 Woche nicht vermeidbar. Übliche Ereignisse, die mit üblichen Methoden (Abdeckung Böschung etc.) nicht in Griff zu bekommen sind: Gewitterregen/Platzregen, „Sandsturm“, Herbstlaub. Ein schönes Gleichnis ist aus Sicht meiner Kollegen ein offen ausgelegtes Klebeband, das für mehrere Wochen vor Verschmutzung zu schützen ist, um dann seine volle Klebewirkung zu entfalten. Besondere Maßnahmen waren: Böschungsschutz, Betreten der FBV-Bahnen nur über besondere Zugänge einschließlich Sauberlaufstrecke mit Gitterrosten,

Belehrung aller gewerblichen Arbeiter mit Arbeiten auf den FBV-Bahnen, regelmäßige Kontrolle der Wirksamkeit der Maßnahmen und Erneuerung der Hinweise. Die Hinweise auf „klinische“ oder „absolute“ Sauberkeit werden von meinen Kollegen sehr kritisch gesehen, da dies auf einer Ort betonbaustelle nicht umsetzbar scheint und eine Reinigung nach dem Verlegen der oberen Bewehrungslage praktisch nicht oder nicht lückenlos möglich ist.

- (2) Überstand FBVS in folgenden Bodenplattenabschnitt unbrauchbar durch Verschmutzung oder sogar Abriss/Ausfransung → Verwahrung erforderlich
- (4) kaum möglich, Bedenkenanmeldung erforderlich

2.2.8 Beschädigungen der FBV-Bahnen (betonseitig und in Stoßbereichen etc.), vermeiden und FBV-Bahnen schützen

- (2) Überstand FBVS in folgenden Bodenplattenabschnitt unbrauchbar durch Verschmutzung oder sogar Abriss/Ausfransung → Verwahrung erforderlich
- (6) Reparaturen nach Bewehrungsverlegung bei mehrlagiger Bewehrung und hohem Bewehrungsgrad nicht mehr möglich

2.2.9 Reparaturpflaster nach Vorgaben verlegen (z. B. ausreichend fest andrücken, ggf. mit Primer vorbereiten, etc.)

- (1) immer nach Herstelleranweisungen
- (4) ja, gemäß Vorgabe des FBV-Planers

2.2.10 Fehlstellen minimieren (an jeder Fehlstelle kann Zementleim ausfließen und damit den Verbund verhindern etc.)

- (1) ja, entspricht pauschal entsprechender Sorgfalt

2.2.11 Untergrund ausreichend vorbereiten/begradigen (eben, frei von spitzen Steinen, Graten, Hohlstellen, ...)

- (1) Bei NKL A Verlegung bei 9/10 Projekten auf Dämmung, 1/10 Projekten war keine WU-Planung bzw. als Bauwerksabdichtung geplant.
- (4) Verlegung auf Sauberkeitsschicht bzw. XPS-Dämmung

2.3 Bewehren und Betonieren

2.3.1 Verschmutzung auf FBV-Bahn stört den Verbund zum Beton (vor Bewehrungsverlegung zu entfernen)

- (2) Feuchtigkeit und Verschmutzungen im Regelfall nicht ausreichend entfernt
- (4) ja, Abstandshalter mit betonreaktiver Beschichtung

2.3.2 Linienförmige Abstandhalter aus Faserzement (versetzt anordnen)

- (1) Bei 10/10 Projekten linienförmige Abstandhalter, versetzte Anordnung sind bis 2018 nicht Bestandteil der Verlegeanweisung gewesen.
- (2) Abstandhalter im Regelfall nicht geeignet in Typ und Anordnung

2.3.3 Wasserfilm/wassergesättigtes Vlies auf FBV-Bahn stört den Verbund zum Beton (Wasseransammlung auf der FBV-Bahn vermeiden)

- (1) Mangels konkreter Vorgaben Absaugen von Wasserlachen mit Nasssauger, Wegtreiben des gesättigten Wasserfilmes mit Druckluft parallel zum Betonagefortschritt. Keine Maßnahmen, wenn kein Wasserfilm auf den Folien sichtbar.
- (2) Feuchtigkeit und Verschmutzungen im Regelfall nicht ausreichend entfernt
- (3) systembedingt unterschiedlich

2.3.4 Vollständige Verdichtung des Betons (Verbundstörungen durch unzureichende Verdichtung etc.)

- (1) Verdichtet wird „wie immer bei WU-Beton“, d. h. keine besondere oder höhere Verdichtung. Aus unserer Sicht ist derzeit nicht erkennbar, ob bei der praxisüblichen Verwendung von Flaschenrüttlern und üblichen Verdichtungsdauern auch der Verbund zwischen Beton und Folie ausreichend hergestellt wird.
- (3) systembedingt unterschiedlich
- (4) WU-Rili musste beachtet werden

2.3.5 Kalte Arbeitsfugen (ungewollte/ungeplante Arbeitsfuge durch Störungen beim Betoniervorgang) vermeiden etc.

2.3.6 An Arbeitsfugen Verschmutzung der FBV-Bahnen vermeiden (sofortige Reinigung und Absaugung des Wassers etc.)

- (1) Ja, mit Nasssauger und Spülwasser/Hochdruckreiniger wird während der Betonage gereinigt, „so gut es geht“. Derzeit ist unbekannt, welcher Reinigungsgrad erreicht werden muss und wie diese Vorgabe kontrolliert werden kann.
- (4) Problem: austretender Zementleim unter der Anschlussbewehrung

2.3.7 Geeignete Konsistenz (gem. Herstellerangabe) wählen (z. B. F6 oder SVB ungeeignet, da kein Verbund)

- (1) Beton wird nach Planvorgabe bestellt. Bei der Bauleitung ist keine besondere Sensibilität bezüglich besonderer/abweichender Anforderungen des FBV-Systems vorhanden. Eine besondere Abstimmung auf die Konsistenzanforderungen des FBV-Systems ist auf keinem Projekt bekannt.
- (3) systembedingt unterschiedlich
- (4) nach WU-Rili ausgeführt und Freigabe der Betonsorte durch den FBV-Fachplaner

3 Nachträgliche Maßnahmen Wände

3.1 Ausschalzeitpunkt richtig festgelegt?

- (4) gelegentlich problematisch

3.1.1 Frühzeitiges Ausschalen kann zu einer Hinterläufigkeit durch „peel-off“ führen etc.

- (1) Senkrechte Flächen werden i. d. R. nach einem Tag ausgeschalt, da Nachbehandlungsdauer nach DIN 1045-3 durch Folie formal eingehalten und innenseitig bei XC1 eine Nachbehandlungsdauer von 12 h regelwerkskonform ausreicht. An Befestigungspunkten (Tackerstellen) kommt es stets zu Fehlstellen/Ablösungen. Je später ausgeschalt wird, desto kleiner sind diese i. d. R.
- (4) großflächiges Abreißen/Ablösen der FBV-Bahnen; Sanierung mit Flüssigkunststoff

3.2 Betonierfehler/Kiesnester in Wandflächen

3.2.1 Abklopfen aller Wandflächen um Betonierfehler/Kiesnester zu finden?

- (1) Zu dieser Prüfmethode liegen keine Erfahrungen vor, haben wir noch nie gemacht. Das Verfahren wird von der Bauleitung/Polier auch nicht als praktikabel eingeschätzt.
- (4) nein, da kein Qualitätssicherungsplan vorhanden war

3.3 Reparaturen an Beschädigungen und Fehlstellen

3.3.1 Allgemein: Reparaturen nicht mit aufgeklebten „Tapes“, sondern mit Flüssigabdichtung?

- (1) meist flüssig, gelegentlich Tapes
- (3) Systembedingt unterschiedlich. Mit Flüssigabdichtung oder systemkonformer und geprüfter, selbstklebender Dichtungsbahn mit gleicher Klebtechnologie wie die FBV-Bahn. Vor der Betonage mit FBV-Tape, größere Beschädigungen mit Passstücken der FB-Bahn und FBV-Tape
- (4) ja

3.3.2 Reparaturen an Schalungsankerfehlstellen

- (1) meist flüssig, gelegentlich Tapes

3.3.3 Reparaturen an Beschädigungsstellen

- (1) meist flüssig, gelegentlich Tapes
- (3) Systembedingt unterschiedlich. Mit Flüssigabdichtung oder systemkonformer und geprüfter, selbstklebender Dichtungsbahn mit gleicher Klebtechnologie wie die FBV-Bahn. Vor der Betonage mit FBV-Tape, größere Beschädigungen mit Passstücken der FBV-Bahn und FBV-Tape
- (4) mit Flüssigkunststoff

3.3.4 Reparaturen an Verbundfehlstellen in der Fläche der FBV-Bahn

- (1) meist flüssig, gelegentlich Tapes
- (3) Systembedingt unterschiedlich. Mit Flüssigabdichtung oder systemkonformer und geprüfter, selbstklebender Dichtungsbahn mit gleicher Klebtechnologie wie die FBV-Bahn.
- (4) mit Flüssigkunststoff

3.3.5 Reparaturen an Verbundfehlstellen in den Stoßbereichen der FBV-Bahn

- (1) meist flüssig, gelegentlich Tapes
- (3) systembedingt unterschiedlich, problematisch bei vliesgebundenen/mechanisch verbundenen Systemen

3.3.6 Reparaturen an den Bahnenstößen (Selbstklebestoß und Tape-Verbindungen)

- (1) meist flüssig, gelegentlich Tapes
- (3) systembedingt unterschiedlich