



# **Evaluation des Frosttaumittel- widerstandes von Beton – Ver- gleich von vier Prüfverfahren**

**Evaluation de la résistance au gel en présence d'agents de  
déverglaçage du béton – Comparaison de quatre méthodes  
d'essai**

**Evaluation of the freeze-thaw-resistance of concrete –  
Comparison of four test methods**

**BEVBE, Bonstetten  
Rolf Werner**

**TFB AG, Wildegg  
Dr. Fritz Hunkeler**

**LPM AG, Beinwil  
Urs Mühlethaler  
Camkiet Ly**

**Forschungsprojekt VSS 2011/501 auf Antrag des Schweizerischen Ver-  
bandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



# **Evaluation des Frosttaumittel- widerstandes von Beton – Ver- gleich von vier Prüfverfahren**

**Evaluation de la résistance au gel en présence d'agents de  
déverglaçage du béton – Comparaison de quatre méthodes  
d'essai**

**Evaluation of the freeze-thaw-resistance of concrete –  
Comparison of four test methods**

**BEVBE, Bonstetten  
Rolf Werner**

**TFB AG, Wildegg  
Dr. Fritz Hunkeler**

**LPM AG, Beinwil  
Urs Mühlethaler  
Camkiet Ly**

**Forschungsprojekt VSS 2011/501 auf Antrag des Schweizerischen Ver-  
bandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Projektleitung

R. Werner

### Mitglieder

Dr. F. Hunkeler

U. Mühlethaler

C.t Ly

## Federführende Fachkommission

Fachkommission 5.02: Betondecken, Pflasterungen u. Abschlüsse

## Begleitkommission

### Präsident

U. Stalder

### Mitglieder

R. Neuenschwander

G. Hitz

F. Jauch

A. Rancati

E. Honegger

B. Philippsen

H.-P. Beyeler

M. Käser

## Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

## Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Impressum .....</b>                                                    | <b>4</b>  |
| <b>Zusammenfassung .....</b>                                              | <b>7</b>  |
| <b>Résumé .....</b>                                                       | <b>9</b>  |
| <b>Summary .....</b>                                                      | <b>11</b> |
| <br>                                                                      |           |
| <b>1 Einleitung .....</b>                                                 | <b>13</b> |
| 1.1 Ausgangslage.....                                                     | 13        |
| 1.2 Begriffe .....                                                        | 13        |
| 1.3 Projektziele .....                                                    | 14        |
| 1.4 Projektablauf .....                                                   | 15        |
| <br>                                                                      |           |
| <b>2 Frosttaumittelwiderstand von Beton .....</b>                         | <b>17</b> |
| 2.1 Einleitung.....                                                       | 17        |
| 2.1.1 Entdeckung der Wirkung von Luftporenbildnern .....                  | 17        |
| 2.1.2 Entwicklung der schweizerischen und europäischen Prüfverfahren..... | 17        |
| 2.2 Prüfverfahren und Prüfnormen.....                                     | 22        |
| 2.2.1 Schweizerische Prüfnormen .....                                     | 22        |
| 2.2.2 Europäische Prüfnormen .....                                        | 23        |
| 2.2.3 Vergleich der Prüfnormen .....                                      | 23        |
| <br>                                                                      |           |
| <b>3 Laboruntersuchungen .....</b>                                        | <b>25</b> |
| 3.1 Betonmischungen .....                                                 | 25        |
| 3.2 Frischbetonprüfungen .....                                            | 26        |
| 3.3 Festbetonprüfungen .....                                              | 27        |
| 3.4 Auswertung .....                                                      | 28        |
| 3.4.1 Porenkennwerte und Druckfestigkeit .....                            | 28        |
| 3.4.2 Vergleich der Ergebnisse der FTW-Prüfungen .....                    | 30        |
| 3.4.3 Porenkennwerte und Ergebnisse der FTW-Prüfungen .....               | 35        |
| 3.5 Zusammenfassung.....                                                  | 41        |
| <br>                                                                      |           |
| <b>4 Felduntersuchungen.....</b>                                          | <b>45</b> |
| 4.1 Auslagerung der Versuchsplatten .....                                 | 45        |
| 4.2 Auslagerungsbedingungen .....                                         | 45        |
| 4.3 Ergebnisse .....                                                      | 48        |
| 4.3.1 Visuelle Beurteilung Herbst 2013.....                               | 48        |
| 4.3.2 Visuelle Beurteilung Frühling 2014 .....                            | 51        |
| 4.3.3 Chlorigehalt der Betonplatten nach zwei Wintern .....               | 53        |
| 4.3.4 Mikroskopische Gefügeanalysen des Betons nach zwei Wintern .....    | 56        |
| 4.3.5 Vergleich mit den Ergebnissen der Prüfungen .....                   | 65        |
| 4.4 Zusammenfassung.....                                                  | 65        |
| <br>                                                                      |           |
| <b>5 Praktische Erfahrungswerte .....</b>                                 | <b>67</b> |
| 5.1 Vorgehen.....                                                         | 67        |
| 5.2 Objektdaten und Beurteilungsschema .....                              | 69        |
| 5.3 Ergebnisse von Kunstbauten .....                                      | 70        |
| 5.3.1 Übersicht .....                                                     | 70        |
| 5.3.2 Kanton Bern .....                                                   | 72        |
| 5.3.3 Kanton Graubünden.....                                              | 73        |
| 5.4 Ergebnisse von Betondecken (Strassen und Plätze).....                 | 73        |
| 5.5 Zusammenfassung.....                                                  | 74        |
| <br>                                                                      |           |
| <b>6 Folgerungen und Empfehlungen aus den Untersuchungen .....</b>        | <b>75</b> |

|                                                                     |            |
|---------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Anhänge.....</b>                                                 | <b>79</b>  |
| <b>Glossar.....</b>                                                 | <b>121</b> |
| <b>Literaturverzeichnis.....</b>                                    | <b>123</b> |
| <b>Projektabschluss .....</b>                                       | <b>125</b> |
| <b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen.....</b> | <b>129</b> |

## Zusammenfassung

In den schweizerischen Normen für den Betonbau (SN EN 206-1, SIA 262/1), für Betondecken (SN 640 464) und Spritzbeton SN EN 14487-1 werden zurzeit unterschiedliche Verfahren zur Prüfung des Frosttaumittelwiderstandes von Beton verlangt. Dies führt einerseits zu unterschiedlichen Anforderungen an den Beton für die gleichen Expositionsklassen, andererseits aber auch zu Mehraufwendungen für die Betonhersteller.

Mit dem vorliegenden Projekt wurde versucht, die Beurteilung des Frosttaumittelwiderstandes von Beton von vier, heute in der Schweiz eingesetzten Prüfungen zu vergleichen und mit dem Verhalten in der Praxis zu validieren. Weiter sollte die Anwendbarkeit dieser Prüfungen für Betone mit nicht CEM I-Zementen geprüft werden. Aus den Ergebnissen sollen Empfehlungen für ein Referenzverfahren und Hinweise für den Einsatz der Prüfverfahren abgeleitet werden.

Die Untersuchungen erfolgten an 13 verschiedenen Betonen ohne und mit künstlich eingeführter Luft. Dabei wurden die Zementart (CEM I, CEM II/A-LL oder CEM III/B), der Zementgehalt (300, 320, 425 oder 450 kg/m<sup>3</sup>) und der w/z-Wert (0.39, 0.45 und 0.50) variiert. Neben den Prüfkörpern für die Festbetonprüfungen wurden auch Versuchsplatten (50 x 50 x 15 cm<sup>3</sup>) hergestellt. Für die Bestimmung des Frosttaumittelwiderstandes kamen folgende Prüfungen zum Einsatz:

- SIA 262/1, Anhang C
- TFB-Prüfung, modifiziertes Verfahren gemäss Cementbulletin 10/1986
- BE I FT (diagnostisch) gemäss SN 640464
- BE II FT (physikalisch) gemäss SN 640464.

Insgesamt lassen sich aus den Ergebnissen folgende Erkenntnisse ableiten:

- Jedes Prüfverfahren stimmt durchschnittlich zu ca. 66% mit den anderen Prüfverfahren überein. Die SIA-Prüfung hat mit durchschnittlich 62% die tiefste, das Prüfverfahren BE II FT mit durchschnittlich 67% die höchste Übereinstimmung. Die Prüfverfahren TFB und BE I FT liegen mit durchschnittlich 64% Übereinstimmung dazwischen. Diese Unterschiede können aber nicht als signifikant beurteilt werden.
- Die SIA-Prüfung beurteilt die Betone durchschnittlich 13% strenger bzw. 26% schwächer als die übrigen Prüfverfahren; d.h. durchschnittlich zu 75% gleich oder strenger wie die übrigen Prüfverfahren.
- Die Prüfverfahren TFB und BE I FT bewertet die Betone durchschnittlich 15% strenger bzw. 21% schwächer aus als die übrigen Prüfverfahren, d.h. durchschnittlich zu 79% gleich oder strenger wie die übrigen Prüfverfahren.
- Das Prüfverfahren BE II FT bewertet die Betone durchschnittlich 28% strenger bzw. 5% schwächer aus als die übrigen Prüfverfahren, d.h. durchschnittlich zu 95% gleich oder strenger wie die übrigen Prüfverfahren.

Zusammenfassend kann damit Folgendes festgehalten werden:

- Die BE II FT-Prüfung ist die strengste der Prüfungen, danach folgen die TFB- und die BE I FT-Prüfung und am Ende die SIA-Prüfung. Die Unterschiede zwischen der SIA-, TFB- und BE I-Prüfung sind aber gering.
- Zwischen den Prüfungen sind Unterschiede bis zu einer Klasse relativ häufig (im Mittel ca. 34%). Unterschiede bis zwei Klassen sind Ausnahmen.
- Es gibt keine systematischen Korrelationen zwischen den Bewertungen gemäss den einzelnen Prüfverfahren und den verschiedenen Betonsorten.
- Anwendungsgrenzen für die einzelnen Prüfverfahren hinsichtlich Zementart, -gehalt, Grösstkorn, mit/ohne Luftporenbildner oder Betonart konnten nicht festgelegt werden.

Die Angaben zur prozentualer Übereinstimmung zwischen den Prüfungen ist nur für die geprüften Betone gültig. Für andere Betone, insbesondere bei einem anderen Verhältnis der Anzahl Beton ohne und mit künstlich eingeführter Luft, dürfte sich die Übereinstimmung ändern.

Einige Monate nach der Herstellung wurden die Versuchsplatten neben der Fahrbahn, d.h. in einem Streifen zwischen der Leitplanke und der Lärmschutzwand, bei der Autobahneinfahrt St. Gallen Ost-Buriet/Thal in Fahrrichtung St. Margrethen ausgelagert. Die nach zwei Wintern durchgeführten mikroskopischen Gefügeanalysen zeigten noch keine klare Differenzierung zwischen den verschiedenen Betonen. An den dafür entnommenen Bohrkernen wurden ergänzend die Chloridprofile ermittelt. Es zeigt sich, dass die Chloride bereits über 30 mm tief eingedrungen sind. Auffallend sind der selbstverdichtende Beton mit höheren und die beiden Spritzbetone mit tieferen Chloridgehalten als die übrigen Betone. Ein Einfluss der Zementart konnte (noch) nicht beobachtet werden.

Im Rahmen des Projektes wurden in den Jahren 2013 und 2014 Vertreter verschiedener Kantone und von ASTRA Filialen kontaktiert, um Kunstbauten und Betondecken zu finden, die die Kriterien des Projektes erfüllten. Die angefragten Personen wurden informiert, dass mit den Untersuchungen die Korrelation zwischen den verschiedenen Frosttaumittelprüfungen FTW (SIA, TFB, BE I FT und BE II FT) und dem praktischen Verhalten des Betons überprüft werden soll. Gesucht wurden grössere Objekte (Brücken, Stützmauern, Kreisel, Plätze etc.), bei denen während der Ausführung Frisch- und Festbetonprüfungen durchgeführt wurden und schon einige Jahre alt sind. Die Forschungsstelle hat von den meisten Kantonen der deutschsprachigen und einigen Kantonen der französischsprachigen Schweiz, von den ASTRA Filialen Zofingen und Winterthur und von diversen Einzelpersonen Antworten zu den Anfragen erhalten. Insgesamt ergab sich, dass in den letzten Jahren an neueren Kunstbauten keine Frost- oder Frosttaumittelschäden aufgetreten sind. Dieses Ergebnis ist etwas überraschend, vor allem auch deshalb, da einige Kantone für die Expositionsklasse XF4 keine LP-Betone, sondern nur Betone ohne künstlich eingeführte Luft verwenden. Zugleich ist dieses Ergebnis auch eine Bestätigung dafür, dass mit der Vorgabe eines maximalen w/z-Wertes und der Einführung von Frisch- und Festbetonprüfungen ein wichtiger Schritt zur Verbesserung des Frosttaumittelwiderstandes getan wurde.

Die Forschungsstelle empfiehlt, die an den Versuchsplatten durchgeführten Untersuchungen nach Ablauf von 5 und 10 Jahren zu wiederholen. Damit könnte die Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse bzw. die Frage nach der praktischen Relevanz der verschiedenen Prüfungen beantwortet werden.

## Résumé

Actuellement, les normes suisses pour le béton de structure (SN EN 206-1, SIA 262/1), les couches de surface en béton (SN 640464) et le béton projeté (SN EN 14487-1) demandent des méthodes d'essai différentes pour le contrôle de la résistance au gel en présence de sels de déverglaçage (GDS) du béton. Cela amène d'une part à des exigences hétérogènes pour des bétons de classes d'exposition identiques et d'autre part à des surcroûts de dépenses pour le producteur de béton.

Avec ce projet de recherche, nous avons essayé de comparer l'évaluation de la résistance au gel en présence de sels de déverglaçage du béton de quatre méthodes d'essai actuellement utilisés en Suisse et de la valider avec le comportement observé dans la pratique. En plus, la pertinence des essais pour des bétons avec des ciments autres que CEM I a été investiguée. Les résultats devront servir à fournir des recommandations concernant une méthode de référence ainsi que des indications pour l'utilisation des méthodes d'essai.

Les investigations ont été réalisées sur 13 bétons différents sans et avec air entraîné artificiellement. Lors des essais, le type de ciment (CEM I, CEM II/A-LL ou CEM III/B), le dosage en ciment (300, 320, 425 ou 450 kg/m<sup>3</sup>) et le rapport E/C (0.39, 0.45 et 0.50) ont été variés. En plus des éprouvettes pour les essais sur béton durci, des plaques d'essai (50 x 50 x 15 cm<sup>3</sup>) ont été confectionnées. Les méthodes d'essai suivantes ont été utilisées pour la détermination de la résistance au gel en présence de sels de déverglaçage :

- SIA 262/1, annexe C
- Essai rapide TFB, méthode selon bulletin de ciment 10/1986 modifiée
- BE I FT (détermination diagnostique) selon SN 640464
- BE II FT (essai physique) selon SN 640464

En résumé, les résultats permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Chaque méthode d'essai correspond avec en moyenne 66% aux autres méthodes. L'essai SIA se caractérise avec en moyenne 62% par la plus faible et la méthode BE II FT avec en moyenne 67% par la meilleure correspondance. Les méthodes d'essai TFB et BE I FT se situent entre les deux avec en moyenne 64% de correspondance. Toutefois, ces différences ne peuvent pas être jugées significatives.
- L'essai SIA évalue les bétons en moyenne 13% plus sévèrement, resp. 26% moins sévèrement que les autres méthodes d'essai; c'est-à-dire en moyenne 75% également ou plus sévèrement que les autres méthodes.
- Les méthodes TFB et BE I FT évaluent les bétons en moyenne 15% plus sévèrement, resp. 21% moins sévèrement que les autres méthodes ; c'est-à-dire en moyenne 79% également ou plus sévèrement que les autres méthodes.
- La méthode d'essai BE II FT évalue les bétons en moyenne 28% plus sévèrement, resp. 5% moins sévèrement que les autres méthodes d'essai; c'est-à-dire en moyenne 95% également ou plus sévèrement que les autres méthodes.

En résumé, nous pouvons retenir les points suivants :

- L'essai BE II FT est la méthode la plus sévère, suivie par les essais TFB et BE I FT et enfin l'essai SIA. Les différences entre les essais SIA, TFB et BE I FT sont toutefois faibles.
- Entre les essais, des différences jusqu'à un niveau de classification sont relativement courantes (en moyenne env. 34%). Des différences jusqu'à deux niveaux de classification sont exceptionnelles.
- Il n'y a pas de corrélations systématiques entre l'évaluation selon les différentes méthodes d'essai et les sortes de béton.

- Des limites d'application pour les différentes méthodes d'essai concernant le type et le dosage de ciment, la dimension maximale des grains de granulat, avec/sans entraîneur d'air ou le type de béton n'ont pas pu être mises en évidence.

Les indications en pourcent relatives au degré de correspondance des essais ne sont que valables pour les bétons testés. Pour d'autres bétons, notamment en cas d'une autre proportion du nombre de bétons sans et avec air entraîné artificiellement, le degré de correspondance pourrait changer.

Quelques mois après leur confection, les plaques d'essais ont été déposées à côté de la voie de roulement (sur une bande entre le parapet et les parois anti-bruit) à l'entrée d'autoroute St-Gall Est-Buriet/Thal en direction de St. Margrethen. Les analyses microscopiques du béton réalisées après deux hivers n'ont pas encore montré une différence significative de comportement entre les différents bétons. En plus, les profils de contamination en chlorures ont été déterminés sur les carottes prélevées à ce but. Ces analyses ont montré que les chlorures ont déjà pénétré le béton jusqu'à 30 mm de profondeur. On remarque tout particulièrement les teneurs en chlorures supérieures du béton autoplaçant et inférieures des deux bétons projetés comparé aux autres bétons. Une influence du type de ciment n'a pas (encore) pu être identifiée.

Dans le cadre de ce projet, nous avons contacté en 2013 et 2014 des représentants de plusieurs cantons et des filiales de l'OFROU afin de trouver des ouvrages d'art et couches de surface en béton qui remplissent les critères du projet. Les personnes contactées ont été informées que les investigations ont pour but de vérifier la corrélation entre les différents essais GDS (SIA, TFB, BE I FT et BE II FT) et le comportement dans la pratique du béton. Nous avons recherché des ouvrages d'une certaine taille (ponts, murs de soutènement, giratoires, places, etc.) pour lesquels des essais sur béton frais et durci ont été réalisés lors de la construction et qui ont déjà quelques années. L'organisme de recherche a reçu des réponses à la demande de la plupart des cantons alémaniques et de quelques cantons romands, des filiales OFROU de Zofingue et de Winterthur et de plusieurs personnes individuelles. Globalement, aucune ou que des faibles dégradations liées au gel avec ou sans de sels de déverglaçage n'ont été observées ces dernières années sur des ouvrages d'art récents. Ce résultat est d'autant plus étonnant que certains cantons n'utilisent pas des bétons à l'air entraîné pour la classe d'exposition XF4. En même temps, ce résultat confirme que la prescription d'un rapport E/C maximal et l'introduction des essais sur béton frais et durci sont un pas important dans l'amélioration de la résistance au gel en présence de sels de déverglaçage.

L'organisme de recherche recommande de répéter les investigations réalisées sur les plaques d'essai au bout de 5 et 10 ans. Ainsi, des réponses aux questions relatives à la transmissibilité des résultats et la pertinence

## Summary

Currently, the Swiss standards for structural concrete (SN EN 206-1, SIA 262/1), concrete pavements (SN 640 464) and shotcrete (SN EN 14487-1) specify different test methods for determining the freeze thaw and deicing salt resistance of concrete. This leads to inhomogeneous requirements for concrete of the same exposure class, but also to additional expenses for concrete producers.

With the present project we tried to compare the evaluation of the freeze thaw and deicing salt resistance of concrete of four test methods currently used in Switzerland and to validate with the behavior in practice. Furthermore, the applicability of these tests for concrete mixes with non CEM I cement shall be investigated. The results shall allow to formulate recommendations for a reference test method and indications for the use of the test methods.

13 different concrete mixes with and without entrained air have been investigated. The cement type (CEM I, CEM II/A-LL or CEM III/B), cement content (300, 320, 425 or 450 kg/m<sup>3</sup>) and the w/c ratio (0.39, 0.45 and 0.50) have been varied. Besides the test specimens for the hardened concrete laboratory tests, test slabs (50 x 50 x 15 cm<sup>3</sup>) have been confected. The following test methods have been used for the determination of the freeze thaw and deicing salt resistance:

- SIA 262/1, annex C
- TFB-test, modified version of the method described in Cementbulletin 10/1986
- BE I FT (diagnostic) according SN 640464
- BE II FT (physical) according SN 640464.

The following findings can be derived from the results:

- Every test method agrees at an average of 66% with the other test methods. The SIA test shows at an average of 62% the least, the test method BE II FT at an average of 67% the highest agreement. The TFB and the BE I FT methods lie with an average of 64% in between. However, these differences cannot be considered to be significant.
- The SIA test method evaluates the concrete mixes at an average of 13% more severe, respectively 26% less severe than the other test methods; i.e. at an average of 75% equally or more severe than the other methods.
- The TFB and BE I FT test methods evaluate the concrete mixes at an average of 15% more severe, respectively 21% less severe than the other test methods; i.e. at an average of 79% equally or more severe than the other methods.
- The BE II FT test method evaluates the concrete mixes at an average of 28% more severe, respectively 5% less severe than the other test methods; i.e. at an average of 95% equally or more severe than the other methods.

In summary, the following can be put on record:

- The BE II FT method is the most severe test, followed by the TFB and the BE I FT tests and finally the SIA test. The differences between the SIA, TFB and BE I FT tests are however small.
- Differences up to one level of classification are relatively current between the test methods (at an average of 34%). Differences up to two levels of classification are exceptional.
- There are no systematic correlations between the evaluation according to the different test methods and the concrete mixes.
- No limitation for the use of the different test methods regarding cement type and content, maximum grain size, with or without air entraining agent or concrete type could be found.

The indications regarding the percental degree of correlation of the test methods are only valid for the investigated concrete mixes. For other concrete mixes, especially in the case of a different number ratio of air-entrained and not air-entrained mixtures, the degree of correlation might change.

A few months after their confection the test slabs have been stored beside the carriage way (on a strip between the crash barrier and noise protection wall) at the motorway entry St. Gall east-Buriet/Thal in the direction of St. Margrethen. After two winters, the microscopic examinations of the concrete microstructure have not yet evidenced a significant differentiation between the different concrete mixes. In addition, chloride contamination profiles have been determined on the cores extracted for the microscopic examination. The chloride profiles have revealed a chloride penetration depth of more than 30 mm. It is striking to note that the self-compacting concrete has a higher and the shotcretes have lower chloride contents than the other concrete mixes. An influence of the cement type has not (yet) been observed.

In the framework of the project, representatives of several cantons and FEDRO subsidiaries have been contacted in the years 2013 and 2014 in order to find civil engineering structures and concrete pavements which comply with the project criteria. The persons who have been asked for were informed that the investigations shall check the correlation between the different freeze thaw and deicing salt tests (SIA, TFB, BE I FT and BE II FT) and the behaviour in practice of the concrete. The examples that were searched for are larger objects (such as bridges, retaining walls, roundabouts, squares, etc.) that are a few years old and where tests on fresh and hardened concrete have been conducted during construction. The research entity has received answers from most German speaking and some French speaking cantons, from the FEDRO subsidiaries in Zofingen and Winterthur as well as from several individual persons. In summary, no or only minimal freeze thaw with or without deicing salt damage has been overserved. This fact is surprising, particularly with regard to the fact that some cantons don't use air-entrained concrete for the exposure class XF4. At the same time, it confirms that the prescription of a maximal w/c ratio and the introduction of fresh and hardened concrete tests were an important step towards the improvement of the freeze thaw and deicing salt resistance.

The research entity recommends to repeat the conducted test series on the test slabs after 5 and 10 years. Thus it should be possible to answer the question as to the transferability of the results and the practical relevance of the different test methods.

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Zurzeit werden in den Schweizer Normen SIA 262/1, SN 640 464 und SN EN 14487-1 unterschiedliche Verfahren zur Prüfung des Frosttaumittelwiderstandes von Beton vorgeschrieben. Auf europäischer Ebene gibt es darüber hinaus noch weitere Verfahren. Daraus ergeben sich unterschiedliche Anforderungen für Beton bei gleichen Expositionsklassen. Unklar ist, welches der Verfahren als Referenzverfahren gelten soll und ob und ggf. wie die unterschiedlichen Prüfungen untereinander korreliert werden können.

Bei allen Prüfverfahren fehlt zudem der Bezug zum effektiven Verhalten des Betons am Bauwerk. Alle Prüfungen sind mit Unsicherheiten bezgl. ihrer Anwendbarkeit auf alle Arten von Beton behaftet. Deshalb wurde 2009 im Rahmen einer gemeinsamen Sitzung von Vertretern der Normkommissionen SIA 262 und der damaligen VSS EK 5.02 (heute die NFK 3.6) der Validierungsbedarf der verschiedenen in der Schweiz verwendeten Prüfungen des Frosttaumittelwiderstandes im Vergleich zum Betonverhalten am Bauwerk erkannt. Wegen mangelnder Erfahrung interessierte weiter auch, ob Betone mit nicht CEM I-Zementen für den Einsatz für Betonfahrbahnen ein ausreichendes Frosttaumittelverhalten aufweisen.

Die Schweiz ist mit dieser Fragestellung nicht alleine. Auch in anderen europäischen Ländern (Deutschland, Frankreich, Schweden) sind ähnliche Forschungsarbeiten im Gange. Abschlussberichte dazu liegen aber noch nicht vor.

## 1.2 Begriffe

In der **Tab. 1** sind für das Verständnis wichtige Begriffe definiert.

**Tab. 1** Definition von Begriffen

| Begriffe                                                    | Definition                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Frostwiderstand (FW)                                        | Widerstand des Betons gegen die Einwirkung von Frost (ohne Taumittel oder Tausalze).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Frosttaumittelwiderstand<br>Frosttausalzwiderstand<br>(FTW) | Widerstand des Betons gegen die gleichzeitige Einwirkung von Frost und Taumitteln bzw. Tausalzen.<br>SN 640 464: Frosttaumittelwiderstand bedeutet die Widerstandsfähigkeit von erhärtetem Beton in durchfeuchtetem Zustand, Frostbeanspruchung unter gleichzeitigem Einfluss von Taumitteln ohne Schäden auszuhalten.<br>In diesem Bericht wird der Begriff „Frosttaumittelwiderstand“ verwendet. Er ist allgemeiner als der Begriff „Frosttausalzwiderstand“ und umfasst auch nicht salzartige Enteisungsmittel. Dementsprechend wird in der Regel von der Frosttaumittelwiderstandsprüfung gesprochen. |
| Tausalz                                                     | Salze (z.B. NaCl und CaCl <sub>2</sub> ) zur Verhinderung der Eisbildung bzw. für das Auftauen von Eis.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Taumittel                                                   | Organische (z.B. Glykole, Alkohole und Harnstoff) und anorganische Substanzen zur Verhinderung der Eisbildung bzw. für das Auftauen von Eis.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Lufteinschlüsse                                             | SN EN 206, Ziffer 3.1.3.6:<br>Luftporen, die unbeabsichtigt in den Beton gelangen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Luftgehalt,<br>künstliche Luftporen                         | EN 206, Ziffer 3.1.3.5:<br>mikroskopisch kleine Luftporen, die während des Mischens - im Allgemeinen unter Verwendung eines oberflächenaktiven Stoffes - absichtlich im Beton erzeugt werden; typischerweise kugelförmig oder nahezu kugelförmig sowie mit einem Durchmesser von 10 bis 300 µm.<br>Die Bestimmung des Luftgehaltes im Frischbeton erfolgt gemäss Norm SN EN 12350-7.                                                                                                                                                                                                                      |

**Tab. 1** Definition von Begriffen

| Begriffe                         | Definition                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kapillarporen, $U_E$             | Kapillarporen (wasserfüllbare Hydratationsporen) entstehen wegen des für die Hydratation von Zement nicht benötigten Wassers. Ihr Anteil an der Gesamtporosität des Zementsteins ist abhängig von der Zement- bzw. Bindemittelart, vom Wasserzementwert und vom Hydratationsgrad. Kapillarporen bestimmen im Wesentlichen die Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit eines Betons. Die Grösse der Kapillarporen liegt im Mikrometerbereich. Im Vergleich dazu sind die Gelporen um den Faktor 1000 kleiner.<br>Das Kapillarporenvolumen wird mit der Prüfung gemäss SIA 262/1 (Anhang A und K) oder SN 640 464 bestimmt. |
| Gesamtporosität, $n$             | Gesamtes im Beton vorhandenes Porenvolumen, berechnet aus der Trockenrohddichte. Sie wird mit der Prüfung gemäss SIA 262/1 (Anhang A und K) oder SN 640 464 bestimmt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Hohlraumgehalt, LP               | Gesamtporosität abzüglich den Kapillarporen ( $LP = n - U_E$ ). Bestimmung gemäss SIA 262/1 (Anhang A und K) oder SN 640 464.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Trockenrohddichte, $\rho_{R110}$ | Dichte des Betons nach Trocknung bei 110 °C. Sie wird mit der Prüfung gemäss SIA 262/1 (Anhang A und K) oder SN 640 464 bestimmt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Gesamter Luftporengehalt, A      | Volumen der Luftporen mit $\phi = 0.020 - 4$ mm, berechnet gemäss SN 640 464.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Mikroporenvolumen, $A_{300}$     | Volumen der Mikroporen. Mikroporen sind Poren im Beton mit einem Durchmesser zwischen 20 und 300 $\mu\text{m}$ . Die Bestimmung wird an Dünnschliffen gemäss SN 640 464 vorgenommen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Abstandsfaktor, AF               | SN EN 480-11, Ziffer 3.5<br>Ein errechneter Kennwert für den grössten Abstand eines jeden Punktes im Zementstein von der Peripherie einer Luftpore, der durch den Zementstein hindurch gemessen ist. Die Einheiten sind mm. Die Berechnung dieses Kennwertes basiert auf der Annahme, dass alle vorhandenen Luftporen gleich gross und im Zementstein gleichmässig verteilt sind, indem das Gesamtvolumen und die Gesamtoberfläche des idealisierten Porengefüges dem tatsächlichen Porengefüge gleichgesetzt werden.<br>Die Bestimmung wird an Dünnschliffen gemäss SN 640 464 vorgenommen.                      |

### 1.3 Projektziele

Das Ziel des Projektes ist die Festlegung eines Referenzverfahrens, das für alle Arten von Betonen und Bauwerkstypen – insbesondere auch im Betonstrassenbau – angewendet werden kann. Dabei sollen die Bedingungen für die Anwendung des Referenzverfahrens und alternativer Prüfungen definiert werden (Grenzwerte, Übertragbarkeit, Anwendungsgrenzen). Um dieses Ziel zu erreichen sind folgende Fragestellungen zu behandeln:

- Vergleichende Validierung der Prüfungen am Bauwerk: Überprüfung der Grenzwerte und der Übertragbarkeit der Ergebnisse der verschiedenen Schweizer Verfahren
- Vergleichende Validierung der Prüfungen bei Betonverkehrsflächen
- Anwendbarkeit bei verschiedenartigen Betonen: z.B. Betone mit und ohne künstliche Lufteinführung, Faserbetone, Spritzbetone, SVB etc.
- Anwendbarkeit bei anderen Zementen als CEM I
- Ausarbeiten von Schadenklassen zur einheitlichen Beurteilung von Frosttausalzschäden am Bauwerk.

## 1.4 Projektablauf

Um die Projektziele zu erreichen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Herstellung verschiedener Betone
- Prüfung der Betone mit verschiedenen Prüfverfahren
- Auslagerung von Prüfkörpern im Feld und Untersuchung des Zustandes des Betons nach 2 Wintern
- Kontaktnahme mit Bauherren bzw. Eigentümern von Verkehrsbauten (ASTRA, Kantone) mit Begehungen und Abklärungen mit dem Ziel, die aktuellen Erfahrungen zu sammeln.
- Auswertung
- Berichterstattung.



## 2 Frosttaumittelwiderstand von Beton

### 2.1 Einleitung

#### 2.1.1 Entdeckung der Wirkung von Luftporenbildnern

Nach dem 2. Weltkrieg stellten Fachleute in den USA fest, dass Betonstrassen ein unerklärbares unterschiedliches Beständigkeitsverhalten bei Frosteinwirkung zeigten. Diese Beobachtungen bezogen sich hauptsächlich auf die Oberfläche. Einerseits waren Verkehrsflächen nach Jahren der Nutzung intakt, andererseits wiesen andere Verkehrsflächen bei ähnlicher Betonzusammensetzung und Beanspruchung Abplatzungen auf.

Materialtechnische Abklärungen ergaben, dass die Betone mit intakten Oberflächen, im Gegensatz zu den Betonen mit schadhafte Oberflächen, Luftporen im Zementstein aufwiesen. Weiter gehende Forschungen führten zur Erkenntnis, dass die bei der Zementherstellung verwendeten Mahlhilfen Auslöser für die Luftporenbildung waren. Diese Erkenntnis führte dazu, dass bei frosttausalzbelasteten Betonen mittels chemischen Zusatzmitteln gezielt künstliche Luftporen eingeführt bzw. erzeugt werden. Diese Luftporen mit einem Durchmesser in der Grössenordnung von 0.1 - 1.5 mm dienen zur Druckentlastung bei der Eisbildung des Wassers. Ein erster Forschungsbericht dazu wurde 1956 in den USA veröffentlicht [Powers 1956].

Seit 2001 sind die Luftporenbildner (Abkürzung: LP) in der europäischen Norm SN EN 934-2 genormt.

#### 2.1.2 Entwicklung der schweizerischen und europäischen Prüfverfahren

Beim Bau der ersten Nationalstrassen in den 1960er Jahren stellte sich die Frage, welche Anforderungen an den Frosttausalz widerstand zu stellen sind und wie dieser zu prüfen ist. In der damals aktuellen Betonnorm SIA 162:1968 war lediglich eine Frostprüfung ohne Tausalzeinfluss verankert. Die Prüfung mit einer Dauer von mehreren Monaten war für eine baubegleitende Produktionsüberwachung eher ungeeignet.

Dieser Umstand führte zur Entwicklung der ersten beiden in der Schweiz angewandten Prüfungen zum Nachweis des Frosttausalz widerstandes durch G. Dobrolubov, Betonstrassen AG in Wildeggen und A. Romer, LPM AG in Beinwil am See. Einerseits handelt es sich dabei um ein diagnostisches Bestimmungsverfahren an Dünnschliffen BE I (Prüfdauer 4 Tage), andererseits um ein physikalisches Verfahren mit zyklischer Belastung BE II (Prüfdauer 3 - 4 Wochen).

Diese Verfahren wurden 1976 zur Richtlinie der Norm SN VSS 640 461 „Zementbetonbeläge – Ausführung, Anforderungen“ [SN 1976] erhoben und 1977 in der Zeitschrift „Strasse und Verkehr“ unter dem Titel „Richtlinie zur Bestimmung und Prüfung der Frosttausalzbeständigkeit von Zementbetonen“ publiziert. Im Rahmen der Revision der SN VSS 640 461b [SN 2008] erhielten die beiden Verfahren im Jahre 2009 eine eigene Prüfnorm SN VSS 640 464 [SN 2010]. Sie sind nachfolgend kurz beschrieben:

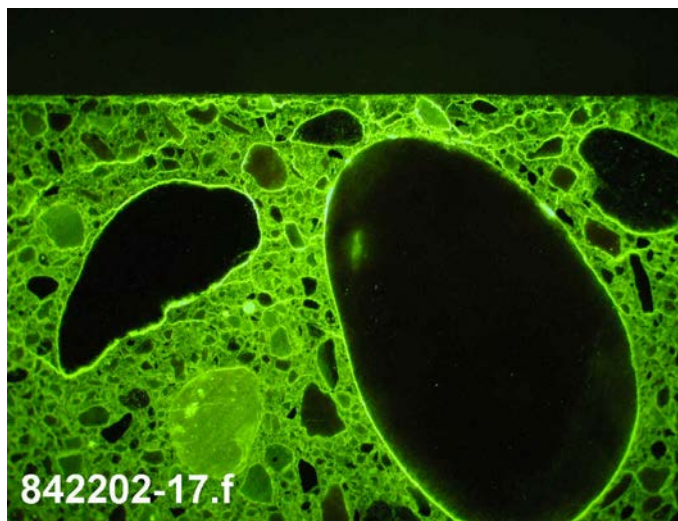
BE I FT (SN 640 464): Es werden die Luftporenkennwerte des Betons mittels mikroskopischer Untersuchung an zwei Dünnschliffen und die Porositätseigenschaften an 4 Bohrkernhälften ( $\varnothing = 50$  mm und Höhe = 85 mm) mit einer Wassersättigungsprüfung ermittelt. Daraus kann ein Widerstandsfaktor berechnet werden, der zusammen mit der mikroskopischen Gefügebeurteilung zur Klassifizierung in einen tiefen, mittleren oder hohen Frosttaumittelwiderstand führt. Die Prüfung dauert 5 Tage. Die Prüfung kann durchgeführt werden, sobald der Beton eine Würfeldruckfestigkeit  $> 5$  N/mm<sup>2</sup> aufweist.

BE II FT (SN 640 464): Prüfkörper (6 Prismen 30 x 30 x 60 mm) werden mit Wasser gesättigt und danach in einer chloridhaltigen Lösung 400 Frost-Tau-Zyklen unterzogen. Temperaturzyklus: +20 / -20 °C. Dauer eines Zyklus: ca. 30 Minuten, Dauer der Prüfung:

8 ½ Tage. Unbeständige Betone reagieren auf die Belastung mit einer anfänglichen Auflösung des Zementsteins und schliesslich einer mehr oder weniger ausgeprägten Rissbildung, was durch die bleibende Verlängerung bzw. Volumenexpansion oder durch Festigkeits- bzw. Elastizitätsmodulabfall gemessen werden kann. Aus den Ergebnissen kann ein Widerstandsfaktor errechnet werden, der zur Klassifizierung in einen tiefen, mittleren oder hohen Frosttaumittelwiderstand führt. Prüfalter: 28 Tage.

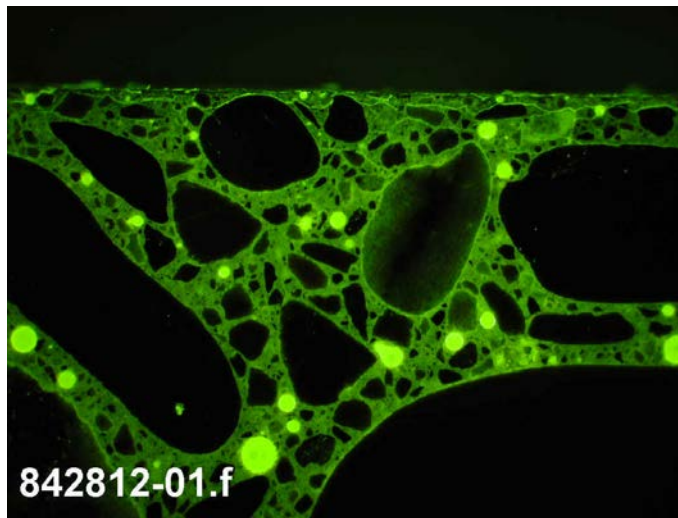
Eine weitere Prüfung wurde 1986 von der TFB AG im Cementbulletin [CB 1986] publiziert. Die Prüfung beginnt normalerweise im Alter 28 Tagen (Mindestalter ca. 14 Tage) und dauert vier Tage. Seit ca. 1998 verwendet die TFB AG ein modifiziertes Verfahren. Es wird hier als TFB-Prüfung bezeichnet. Es wurden einigen Anpassungen beim Prüfablauf vorgenommen und insbesondere die Beurteilungsskala verfeinert. Das Verfahren findet vor allem in der französischen Schweiz Anwendung. Bei der TFB-Prüfung werden Frost-Tauwechsel an wassergesättigten Probekörpern durchgeführt. Für die Prüfung werden in der Regel zwei Bohrkerne (Länge je 100 mm, Ø 50 mm) benötigt. Der Bohrkern wird wassergesättigt und anschliessend entweder in einer Salzlösung (Frosttausalzbeständigkeit) oder Äthylenglykol-Lösung (Frostbeständigkeit) 10 Frosttauzyklen (-25 °C/+20 °C) unterworfen. Der andere Bohrkern dient als Referenzprobe. Danach werden die Proben getrocknet und mit einem fluoreszierenden Harz imprägniert. Zur Beurteilung der Frost- resp. Frosttausalzbeständigkeit wird sowohl die Oberfläche, als auch das Innere der Probe mikroskopisch untersucht. Als Beurteilungsparameter dienen frost(tausalz)bedingte Gefügeschäden (**Abb. 1**). An der Referenzprobe erfolgt der Vergleich zum ursprünglichen, ungefrosten Zustand. Als Resultat wird die Frost- resp. Frosttausalzbeständigkeit in einer 5-stufigen Beurteilungsskala angegeben (schlecht – ungenügend – genügend – gut – hoch). Die Details der Beurteilung sind in der **Tab. 2** zusammengestellt. Die Beurteilung mag auf den ersten Blick eher qualitativer Art sein. Mit der Quantifizierung der Kriterien wird die Beurteilung jedoch reproduzier- und nachvollziehbar.

In der französischsprachigen Schweiz wird die TFB-Prüfung seit 30 Jahren mit Erfolg als Alternative zur SIA-Prüfung eingesetzt [Cuchet 2011].



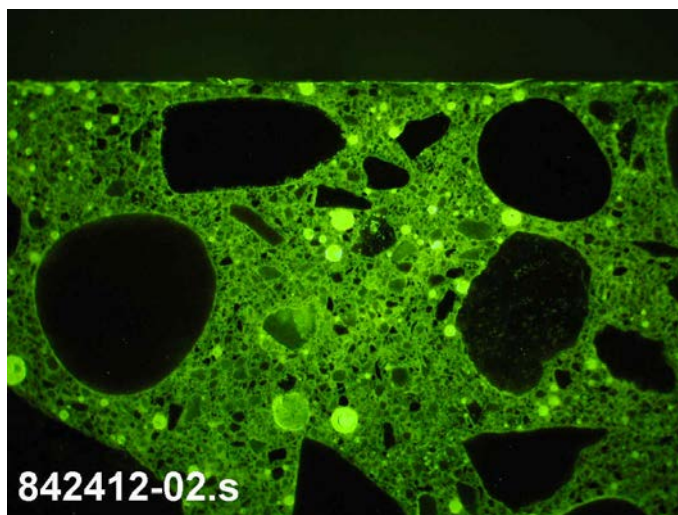
*Beton mit einer „ungenügenden Frostbeständigkeit“:*

*Die Probe weist sowohl Risse entlang der Probenoberfläche als auch Risse und Rissablösungen zwischen Zementstein und Gesteinskorn im Innern der Probe auf.*



*Beton mit einer „genügenden Frostbeständigkeit“:*

*Schwach ausgeprägte, oberflächenparallele Risse zeichnen die Probenoberfläche aus. Im Innern der Probe sind keine Schädigungen sichtbar.*



*Beton mit einer „hohen Frosttausalzbeständigkeit“:*

*Weder an der Oberfläche, noch im Innern sind Risse oder Rissablösungen erkennbar.*

**Abb. 1** Beispiele für die Beurteilung des Frost- und Frosttausalzwiderstandes mit der TFB-Prüfung.

**Tab. 2** Beurteilungskriterien bei der TFB-Prüfung

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |           |                    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----------|--------------------|
| Hoch       | Keine Störungen: Die belastete Probe entspricht der Referenzprobe                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |     |           |                    |
| Gut        | Anzahl Störungen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |           |                    |
|            | Rissansätze                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1-2 | Summe     |                    |
|            | Ansätze für Rissablösungen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 1-2 | maximal 2 |                    |
|            | Sehr geringes Abblättern (kaum begonnen) (Tiefe < 0,5 mm)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |           |                    |
|            | Das Absanden allein darf nicht als Kriterium für das Einstufen in eine niedrigere Klasse verwendet werden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |           |                    |
| Genügend   | Anzahl Störungen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |           |                    |
|            | Rissansätze                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2-3 | Summe     |                    |
|            | Ansätze für Rissablösungen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 4-5 | maximal 5 | Summe<br>maximal 5 |
|            | Risse                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1-2 | Summe     |                    |
|            | Rissablösungen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1-3 | maximal 3 |                    |
|            | Schwach abblättern: Tiefe < 2mm, beginnendes Absanden                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |           |                    |
| Ungenügend | Kriterien für genügenden Widerstand nicht erfüllt                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |     |           |                    |
|            | <ul style="list-style-type: none"><li>• 1 bis 3 lange Risse &gt; 1 cm</li><li>• Ausgeprägtes Abblättern: Tiefe &gt; 2 mm ohne Absanden</li><li>• Ausgeprägtes Abblättern: Tiefe &gt; 2 mm mit Absanden</li><li>• Ausgeprägtes Abblättern: Tiefe &gt; 2 mm mit Absanden und Freilegen der Gesteinskörner &gt; 4 mm</li><li>• Abblättern: Tiefe &gt; 1 mm mit Absanden und Freilegen der Gesteinskörner &gt; 4 mm, sofern sie von tiefer reichenden Rissablösungen begleitet sind.</li></ul> |     |           |                    |
|            | Freilegen der Gesteinskörner > 4 mm ohne ausgeprägtes Abblättern und Rissablösungen kann nicht als Kriterium verwendet werden, sofern; die Probe keine weiteren Anzeichen ungenügender Frosttausalzbeständigkeit aufweist.                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |           |                    |
| Schlecht   | Rissnetz, das die Rissablösungen im Verbundbereich untereinander verbindet. Abplatzungen über grösseren Gesteinskörnern (Tiefe > 5 mm).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |           |                    |

Der SIA verankerte 1989 die von der EMPA in Dübendorf entwickelte Prüfung in der Norm 162/1 (Prüfung Nr. 9). Sie wurde 2003 auch in die Norm SIA 262/1 übernommen. Bei der Prüfung handelt es sich um ein physikalisches Verfahren. Die Prüfkörper (3 Platten 145 x 145 x 50 mm, evtl. 4 Bohrkörper mit Ø 95 mm und Höhe 50 mm) werden mit einer Natriumchloridlösung beaufschlagt und 28 Frost-Tau-Zyklen unterzogen. Aus den abgelösten Betonmassen können Aussagen zum Frost-Tausalz-widerstand abgeleitet werden. Temperaturzyklus: +15 / -15 °C. Dauer eines Zyklus: 12 Stunden, Dauer der Prüfung: 14 Tage. Prüfalter: 28 Tage.

2007 wurden für die Bedürfnisse des Konformitätsnachweises die Ergebnisse von Frosttausalzprüfungen nach dem SIA-Verfahren in der ganzen Schweiz erhoben [Jacobs 2007]. Aufgrund dieser Auswertung wurden die aktuell gültigen Grenzwerte festgelegt (Tabelle NA.9 der Nationalen Elemente zur SN EN 206-1). Auch hier fehlt der Bezug zum Verhalten der geprüften Betone am Bauwerk.

Die TFB AG hat für die Validierung der TFB-Prüfung in den letzten Jahren mehrere Vergleichsreihen mit dem SIA-Verfahren durchgeführt. Die Ergebnisse sind schwierig zu interpretieren, u.a. auch wegen der sehr hohen Streuung des SIA-Verfahrens innerhalb einzelner Prüfserien.

Die LPM überwacht laufend die Korrelation der beiden Prüfungen BE I und BE II und führt seit 2008 Vergleichsversuche mit der SIA-Prüfung zur Validierung der BE I- und BE II-Prüfung durch. Von 2008 – 2010 wurden insgesamt 20 Betone untersucht. Die Ergebnisse sind in der **Tab. 3** zusammengestellt. Weitere Details und die geprüften Betonsorten sind im Anhang zu finden.

**Tab. 3** Ergebnisse der Validierung der BE I und BE II-Prüfung

| SIA<br>im Vergleich zu | Beurteilung des Frosttaumittelwiderstandes |            |              |           |               |         |
|------------------------|--------------------------------------------|------------|--------------|-----------|---------------|---------|
|                        | übereinstimmend                            |            | SIA strenger |           | SIA schwächer |         |
|                        | Anzahl                                     | Prozent    | Anzahl       | Prozent   | Anzahl        | Prozent |
| BE I                   | 11                                         | 55%        | 0            | 0%        | 9             | 45%     |
| BE II                  | 13                                         | 65%        | 1            | 5%        | 6             | 30%     |
| Mittelwert             | 12                                         | <b>60%</b> | 0.5          | <b>3%</b> | 7.5           | 38%     |
| Standardabweichung     | 1.4                                        | 7%         | 0.7          | 4%        | 2.1           | 11%     |

| BE I<br>im Vergleich zu | übereinstimmend |            | BE I strenger |            | BE I schwächer |         |
|-------------------------|-----------------|------------|---------------|------------|----------------|---------|
|                         | Anzahl          | Prozent    | Anzahl        | Prozent    | Anzahl         | Prozent |
|                         | Anzahl          | Prozent    | Anzahl        | Prozent    | Anzahl         | Prozent |
| SIA                     | 11              | 55%        | 9             | 45%        | 0              | 0%      |
| BE II                   | 10              | 50%        | 7             | 35%        | 3              | 15%     |
| Mittelwert              | 10.5            | <b>53%</b> | 8             | <b>40%</b> | 1.5            | 8%      |
| Standardabweichung      | 0.7             | 4%         | 1.4           | 7%         | 2.1            | 11%     |

| BE II<br>im Vergleich zu | übereinstimmend |            | BE II strenger |            | BE II schwächer |         |
|--------------------------|-----------------|------------|----------------|------------|-----------------|---------|
|                          | Anzahl          | Prozent    | Anzahl         | Prozent    | Anzahl          | Prozent |
|                          | Anzahl          | Prozent    | Anzahl         | Prozent    | Anzahl          | Prozent |
| BE I                     | 10              | 50%        | 3              | 15%        | 7               | 35%     |
| SIA                      | 13              | 65%        | 6              | 30%        | 1               | 5%      |
| Mittelwert               | 11.5            | <b>58%</b> | 4.5            | <b>23%</b> | 4.0             | 20%     |
| Standardabweichung       | 2.1             | 11%        | 2.1            | 11%        | 4.2             | 21%     |

Bei 7 von 20 Betonsorten stimmen alle 3 Prüfverfahren bei der Beurteilung überein, bei 13 Betonsorten geben nur 2 Prüfverfahren übereinstimmende Resultate. Ein Zusammenhang mit der Betonzusammensetzung (Zementart und -gehalt, Grösstkorn, Luft oder Betonart) ist nicht erkennbar. Jedes Prüfverfahren stimmt durchschnittlich zu ca. 57% mit den übrigen Prüfverfahren überein. Die SIA-Prüfung hat mit durchschnittlich 60% die höchste, die BE I-Prüfung mit durchschnittlich ca. 53% die tiefste Übereinstimmung. Die BE II-Prüfung liegt mit einer Übereinstimmung von ca. 58% dazwischen.

Die SIA-Prüfung bewertet 3% der Betone strenger, ca. 38% hingegen schwächer als die beiden anderen Prüfverfahren. Die BE I-Prüfung ist hingegen bei 40% der Betone strenger und nur bei ca. 8% schwächer als die anderen Prüfverfahren. Die BE II-Prüfung beurteilt ca. 23% der Betone strenger und 20% schwächer als die übrigen Prüfverfahren. Die Summe der übereinstimmenden und strengeren Beurteilungen liegt bei der SIA-Prüfung bei ca. 63%, bei der BE I-Prüfung bei ca. 93% und bei der BE II-Prüfung bei 81%. Daraus ist zu folgern, dass die BE I-Prüfung das strengste Prüfverfahren ist, gefolgt von der BE II- und der SIA-Prüfung.

1998 erschien der Schlussbericht des europäischen Forschungsprojektes Nr. 3085 „Standard methods for testing the resistance of concrete to freezing and thawing“. In den Schlussfolgerungen wurde zwar empfohlen, die beschriebenen Prüfverfahren in die CEN-Normen einzuführen, aber auch darauf hingewiesen, dass die Prüfverfahren nicht ohne weiteres untereinander vergleichbar sind und der praktische Bezug zum Verhalten der Betone am Bauwerk nicht ausreichend geprüft wurde.

Seit 2006 ist die Technische Spezifikation CEN/TS 12390-9 „Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung“ verfügbar. Ein Entwurf dazu wurde bereits 2002 publiziert. Die TS beschreibt drei Prüfverfahren (Platten-, Würfel- und CF/CDF-Prüfung). Das schwedische Plattenprüfverfahren (auch unter dem Namen Slab-Test bekannt) gilt als Referenzverfahren. Gemäss Ziffer 1 „Anwendungsbereich“ gibt es keine feststehende Korrelation zwischen den Ergebnissen aus den drei Prüfverfahren. Alle Prüfverfahren sollen die deutliche Unterscheidung zwischen schlechtem und gutem

Verhalten ermöglichen. Sie sollen sich jedoch in der Bewertung des Verhaltens in Grenzfällen unterscheiden. Auf Grund unterschiedlicher Auffassungen und der grossen Streuungen konnte die CEN/TS bisher nicht in eine Norm überführt werden. Die federführende Arbeitsgruppe ist überzeugt, dass noch Forschungsarbeiten hinsichtlich dem praktischen Verhalten nötig sind, diese aber unter der Verantwortung der einzelnen Länder durchgeführt werden sollten.

Die erwähnte Arbeitsgruppe beschäftigt sich auch mit der Prüfung von Beton, der durch innere Frost- und Frosttausalzschäden gefährdet ist. Dazu liegt der Technische Bericht CEN/TR 15177 des CEN mit dem Titel „Prüfung des Frost-Tauwiderstandes von Beton – Innere Gefügestörung“ vor [CEN 2006]. Es sind drei Prüfverfahren beschrieben (Balken-, Platten- und CIF-Prüfung). Hinsichtlich Korrelation wird das Gleiche gesagt wie bei der CEN/TS 12390-9.

Bei der Entwicklung einer geeigneten Prüfung wurden in der Schweiz mehrere Forschungsprojekte durchgeführt. Besonders zu erwähnen sind die Arbeiten von Rösli und Harnik [Harnik 1975, Rösli 1979] sowie der Bericht von Kaufmann und Studer [Kaufmann 2000], der auch eine vergleichende Übersicht zu den wichtigsten schweizerischen Prüfverfahren und dem CDF-Test enthält. Die Korrelation der Prüfverfahren mit dem Verhalten in der Praxis wurde damals aber nicht untersucht.

Die Praxistauglichkeit der europäischen Prüfungen wurde vor allem in Deutschland untersucht [Siebel 2005, Stark 2005, Guse 2006]. Im Rahmen eines Verbundforschungsvorhabens des DASTb wurden in den Jahren 2000-2008 die Prüfverfahren CIF und CDF im Labor sowie bei Auslagerungsversuchen überprüft [Müller 2009]. Aus den umfangreichen Untersuchungen wurde geschlossen, dass der aktuelle Grenzwert für die Expositionsklasse XF4 als richtig einzustufen ist. Demgegenüber muss für die Expositionsklasse XF2 noch ein geeignetes Prüfverfahren erarbeitet werden.

Das deutsche Bundesamt für Strassenwesen veröffentlichte 2009 den Bericht zum Forschungsprojekt F1100.2101002 [BAST 2009]: Frost-Tausalz-widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstrassen, in dem auch Modifikationen des CDF-Verfahrens für eine bessere Anwendbarkeit auf Betone mit mittlerer FT-Beständigkeit untersucht wurden. Dabei wurde auch das Verhalten von Betonen mit Flugaschen und Hüttensand untersucht (siehe z.B. [Brameshuber 2004, 2007, 2008, 2010]).

## 2.2 Prüfverfahren und Prüfnormen

### 2.2.1 Schweizerische Prüfnormen

Mit den 2003 publizierten Normen für den Betonbau, Norm SIA 262 und Norm SIA 262/1, wurden die Prüfverfahren der vorhergehenden Norm SIA 162/1, Prüfung Nr. 6 „Porenkennwerte“, Prüfung Nr. 7 „Porosität“, Prüfung Nr. 8 „Frostwechselverhalten“ und Nr. 9 „Frost-Tausalzverhalten“ durch das Verfahren SIA 262/1, Anhang C, „Frosttausalz-widerstand“ ersetzt. Letzteres Prüfverfahren entspricht weitgehend dem Prüfverfahren Nr. 9 der alten Norm SIA 162/1 und wird im Folgenden einfachheitshalber als „SIA-Prüfung“ bezeichnet. Dieses Verfahren wurde mit geringfügigen Anpassungen in die revidierte Norm SIA 262/1, die seit dem 01.08.2013 gültig ist, übernommen.

Beim Inkrafttreten der SN EN 206-1 (01.01.2003) sowie der SIA 262 und SIA 262/1 war noch kein europäisches Prüfverfahren festgelegt, mit Ausnahme der EN 480-11 „Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Prüfverfahren – Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten im Festbeton“. Deshalb wurde die SIA-Prüfung beibehalten.

Am 01.02.2010 ist die Norm SN 640 464 „Betondecken – Prüfmethode zur Bestimmung des Frost- und Frosttaumittelwiderstands“ in Kraft getreten. Sie beschreibt zwei Verfahren, die unter der Bezeichnung BE I F(T) „diagnostische Bestimmung des Frost(taumittel)widerstandes“ (mittels Porenkennwerten) und BE II F(T) „physikalische Prüfung des Frost(taumittel)widerstandes“ schon seit 1977 von der LPM AG durchgeführt

werden. Seit Einführung der Norm SN 640 464 werden sie auch von einigen wenigen anderen Prüfinstituten angeboten. Die genannten Prüfungen des Frosttaumittelwiderstandes (FT) werden hier mit BE I und BE II abgekürzt.

Bei gewissen Bauten könnten grundsätzlich neben diesen Normen auch die SIA-Prüfungen angewendet werden. Dabei ist es möglich, dass die Anforderungen sich unterscheiden. Für die Expositionsklasse XF3 wird z.B. in der SN 640 464 ein hoher Frostwiderstand gemäss BE I/BE II, in Tabelle NA.5 der SN EN 206-1 hingegen nur ein mittlerer Frosttausalzwiderstand gefordert.

Für Spritzbeton nach SN EN 14487-1 „Spritzbeton – Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität“ wird die SIA-Prüfung als Referenzprüfung, die BE I/BE II-Prüfungen als alternatives Prüfverfahren definiert.

Neben der SIA- sowie der BE I- und BE II-Prüfung wird hauptsächlich in der Romandie seit Mitte der 1980er Jahre auch die TFB-Prüfung [CB 1986] eingesetzt.

### 2.2.2 Europäische Prüfnormen

Zurzeit stehen mehrere europäische Prüfnormen zur Verfügung:

In der 2006 publizierten CEN/TS 12390-9 „Prüfen von Festbeton: Frost- und Frosttausalzwiderstand – Abwitterung“ sind die wichtigsten, heute in mehreren europäischen Ländern benutzten Prüfverfahren beschrieben. Das Referenz-Verfahren ist der schwedische „Slab-Test (Swedish standard SS 13 72 44)“. Daneben enthält die Norm als Alternativ-Verfahren auch den „Cube Test“ (Würfel-Verfahren vom VDZ, Düsseldorf) und das CF/CDF Prüfverfahren von Setzer. Letzteres hat sich in Deutschland durchgesetzt.

In den Normen für Betonfertigelemente (z.B. SN EN 1338 „Pflastersteine“, seit dem 01.12.2003 in Kraft) wird ein Prüfverfahren vorgeschrieben, dessen Prinzip vergleichbar ist mit der SIA-Prüfung, bei den Details der Prüfanordnung jedoch leicht abweicht.

### 2.2.3 Vergleich der Prüfnormen

Die verschiedenen aufgeführten schweizerischen und europäischen Prüfverfahren beruhen auf unterschiedlichen Prüfprinzipien und haben spezifische Vor- und Nachteile. Die Schweizer Verfahren wurden diesbezüglich im VSS Bericht Nr. 548 von Kaufmann und Studer [Kaufmann 2000] detailliert beschrieben.

Bei einigen dieser Verfahren wird der Frost(tausalz)widerstand über die Porenkennwerte (Gehalt und Verteilung) und teilweise über das Betongefüge ermittelt. Dazu gehören die alten SIA-Verfahren Nr. 6 und 7, die BE I-Prüfung, das Verfahren nach der SN EN 480-11.

Die übrigen Prüfungen sind physikalische Frostprüfungen, bei denen verschieden gesättigte Prüfkörper unterschiedlich vielen und andersartig definierten Frost-Tauzyklen in verschiedenen Flüssigkeiten oder Beaufschlagungen ausgesetzt werden.

Bei einem Teil der Verfahren wird die äusserlich geschädigte, abgewitterte Betonmenge gemessen: SIA-Prüfung, Slab-Test, CDF-Test, Würfel-Test. Bei anderen Prüfverfahren werden die inneren Schädigungen erfasst, meistens indem der E-Modul-Abfall oder die Längenänderung gemessen wird. Dazu gehören der CIF-Test und die BE II-Prüfung.

Die TFB-Prüfung berücksichtigt sowohl die inneren Schäden, wie auch die äusseren Abwitterungen. Die TFB-Prüfung und bis zu einem gewissen Grad auch die BE I-Prüfung sind die einzigen Verfahren, die eine Aussage zu den Ursachen (z.B. poröse Körner, Gefüge, Luftgehalt) für das Versagen in der Prüfung erlauben.

Die meisten Prüfverfahren werden an Würfeln oder Platten, die im Labor oder im Rahmen von Frischbetonkontrollen auf der Baustelle hergestellt werden, durchgeführt. Prü-

funken an Bauwerksbetonen sind bei der TFB-Prüfung, bei der SIA-Prüfung und bei den BE I/BE II-Prüfungen möglich. Die Bohrkern für die SIA-Prüfung müssen aber einen grossen Durchmesser  $\geq 100$  mm aufweisen und das Ergebnis ist anfällig auf Beschädigungen der Betonoberfläche (Anrisse) bei der Bohrkernentnahme.

Prüfverfahren, die auf der Abwitterung der Betonoberfläche beruhen, erlauben nicht, den Einfluss von inneren Schäden, infolge z.B. Gefügemängeln oder nicht frostbeständigen Gesteinskörnern, zu erfassen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die Prüfanordnung praktisch keine tiefergehenden Schäden als die direkt abgewitterten Bereiche erzeugt werden. Bei problematischen Betonkonzepten, unsachgemässer Verdichtung, bei quellfähigen oder frostunbeständigen Gesteinskörnern oder bei dauerhafter Sättigung des Betons kann deshalb der Frost(tausalz)widerstand nicht immer richtig und sicher beurteilt werden.

Weiterhin bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der Anwendbarkeit der verschiedenen Prüfverfahren für Betone ohne künstlich eingeführter Luft [Kunz 2011].

Die Prüfverfahren werden regional unterschiedlich eingesetzt, so hat sich die TFB-Prüfung vorab in der Westschweiz etabliert, die BE I/BE II-Prüfungen hingegen eher in der Zentralschweiz und Graubünden. Die SIA-Prüfung wird generell im Rahmen des Konformitätsnachweises eingesetzt, jedoch von den Bauherren, insbesondere im Strassenbau, nicht unbedingt gewünscht („zu wenig streng“ oder zu langsam). Kosten, Probenalter zum Zeitpunkt der Prüfungen und Dauer der Prüfverfahren spielen ebenfalls eine Rolle bei der Wahl der Prüfung. Gewünscht wird immer, dass bei einem negativen Resultat die Ursachen geklärt sind und die erforderlichen Korrekturmassnahmen zur Sicherstellung eines hohen Frosttaumittelwiderstandes möglichst rasch eingeleitet werden können.

## 3 Laboruntersuchungen

### 3.1 Betonmischungen

In der **Tab. 4** sind die hergestellten und geprüften Betone aufgeführt. Die Bezeichnung und Zusammensetzung der Betonsorten 1 bis 12 entsprechen den Vorgaben des revidierten nationalen Anhangs der Betonnorm SN EN 206-1/NE:2013 [SIA 2013], die Betonsorten 13 und 14 der Norm SIA 198 [SIA 2004]. Die gewählten Betone sollen einen repräsentativen Querschnitt der in der Schweiz für die Expositionsklassen XF2 (XF3) und XF4 eingesetzten Betone darstellen.

Weitere Details zu den Ausgangsstoffen enthält die **Tab. 5**. Für die Betonsorten 1 bis 12 wurde ein Sand-Kies-Gemisch mit einem gewissen Anteil an gebrochener Gesteinskörnung ( $D_{\max}$  32 mm) verwendet, was für Betone für Betondecken üblich ist. Für die Betonsorten 13 und 14 betrug das Grösstkorn  $D_{\max}$  8 mm. Die Anteile der verschiedenen Fraktion geht aus der **Tab. 6** hervor. Die Sieblinie entspricht den Angaben der Fa. Toggenburger AG, wie sie für Betone für Betondecken verwendet wird.

Die Betonsorten 1 bis 12 wurden im Labor der TFB AG in Wildegg hergestellt. Bei der Betonsorte 8 wurde fälschlicherweise das LP-Mittel nicht zudosiert, was erst später erkannt wurde. Sie kann deshalb als Wiederholung der Betonsorte 7 betrachtet werden, wobei die Fliessmittelgehalte leicht unterschiedlich waren. Die Spritzbetone 13 und 14 wurden von der Firma Greuter AG auf einer Baustelle auf der A1 bei Härkingen am 16.04.2012 bzw. 03.04.2012 hergestellt.

Die Wasseraufnahme der eingesetzten Gesteinskörnungen ist tief und liegt zwischen 0.50 und 0.55 M.-% (**Tab. 7**). Sie wurde bei der Betonherstellung berücksichtigt.

Parallel zu den Würfeln für die Festbetonprüfungen wurden pro Betonsorte je 2 Versuchsplatten (50 x 50 x 15 cm<sup>3</sup>) hergestellt. Ca. 30 bis 45 Minuten nach der Herstellung wurde mit einem Besen mit Kunststoffborsten auf der Oberfläche ein "Besenstrich" angebracht. Danach wurden die Betonoberflächen mit Plastikfolie abgedeckt. 24 Stunden nach der Herstellung wurden die Platten ausgeschalt, leicht bewässert, vollständig in Folie eingepackt und so bis zum 28. Tag gelagert. Bis zum Abtransport wurden die Platten danach in einem Kellerraum zwischengelagert.

**Tab. 4** Übersicht über die untersuchten Betone

| Nr. | Betonsorte             | Zement      | Zementgehalt, kg/m <sup>3</sup> | Konsistenz (Zielwert) | w/z-Wert | LP   |
|-----|------------------------|-------------|---------------------------------|-----------------------|----------|------|
| 1   | D (T1)                 | CEM I       | 300                             | C3                    | 0.50     | Nein |
| 2   | E (T2)                 | CEM I       | 300                             | C3                    | 0.50     | Ja   |
| 3   | D (T1)                 | CEM II/A-LL | 300                             | C3                    | 0.50     | Nein |
| 4   | E (T2)                 | CEM II/A-LL | 300                             | C3                    | 0.50     | Ja   |
| 5   | F (T3)                 | CEM I       | 320                             | C2                    | 0.45     | Nein |
| 6   | G (T4)                 | CEM I       | 320                             | C2                    | 0.45     | Ja   |
| 7   | F (T3)                 | CEM II/A-LL | 320                             | C2                    | 0.45     | Nein |
| 8   | F (T3)                 | CEM II/A-LL | 320                             | C2                    | 0.45     | Nein |
| 9   | F (T3)                 | CEM III/ B  | 320                             | C2                    | 0.45     | Nein |
| 10  | G (T4)                 | CEM III/ B  | 320                             | C2                    | 0.45     | Ja   |
| 11  | weggelassen            |             |                                 |                       |          |      |
| 12  | G (T4)                 | CEM II/A-LL | 320                             | F5                    | 0.45     | Ja   |
| 13  | SC 7 (Spritzbeton)     | CEM II/A-LL | 450                             | F4                    | 0.39     | Nein |
| 14  | SC 7 FTW (Spritzbeton) | CEM II/A-LL | 425                             | F4                    | 0.39     | Ja   |

**Tab. 5** Verwendete Ausgangsstoffe

| Ausgangsstoff       | Bezeichnung                               | Lieferant           |
|---------------------|-------------------------------------------|---------------------|
| CEM I 42,5 N        | CEM I                                     | Holcim (Schweiz) AG |
| CEM II/A-LL 42,5 N  | CEM II/A-LL                               | Holcim (Schweiz) AG |
| CEM III/B 32,5 N-LH | CEM III/B                                 | Holcim (Schweiz) AG |
| Gesteinskörnungen   | Sand, Kies                                | Siehe <b>Tab. 6</b> |
| Zusatzmittel        | Fliessmittel, Luftporenbilder, Verzögerer | BASF, Sika          |

**Tab. 6** Anteil der Fraktionen und Herkunft der Gesteinskörnung

| Gesteinskörnung  | Anteil | Herkunft                                |
|------------------|--------|-----------------------------------------|
| 0-2 mm Brechsand | 3%     | Holcim Kies und Beton AG, Werk Mülligen |
| 0-4 mm Rund      | 33%    | Holcim Kies und Beton AG, Werk Mülligen |
| 4-8 mm Splitt    | 10%    | Toggenburger AG, Winterthur             |
| 8-11 mm Splitt   | 8%     | Toggenburger AG, Winterthur             |
| 11-16 mm Splitt  | 11%    | Toggenburger AG, Winterthur             |
| 16-22 mm Splitt  | 14%    | Toggenburger AG, Winterthur             |
| 8-16 mm Rund     | 8%     | Holcim Kies und Beton AG, Werk Mülligen |
| 16-32 mm Rund    | 13%    | Holcim Kies und Beton AG, Werk Mülligen |

**Tab. 7** Wasseraufnahme der eingesetzten Gesteinskörnungen gemäss SN EN 1097-6:2005

| Wasseraufnahme                                             |                   | Sand<br>0/2 | Kies<br>8/11 | Kies<br>11/16 | Kies<br>16/22 |
|------------------------------------------------------------|-------------------|-------------|--------------|---------------|---------------|
| Scheinbare Rohdichte                                       | Mg/m <sup>3</sup> | 2.69        | 2.7          | 2.7           | 2.69          |
| Rohdichte auf ofentrockener Basis                          | Mg/m <sup>3</sup> | 2.65        | 2.66         | 2.66          | 2.66          |
| Rohdichte auf wassergesättigter oberflächentrockener Basis | Mg/m <sup>3</sup> | 2.67        | 2.68         | 2.68          | 2.67          |
| WA <sub>24</sub>                                           | M.-%              | 0.54        | 0.55         | 0.50          | 0.51          |

## 3.2 Frischbetonprüfungen

Die Betone 1 bis 12 wurden im August/September 2012, die Spritzbetone 13 und 14 im April 2012 hergestellt. Im Rahmen der Frischbetonprüfungen wurden folgende Parameter gemessen:

- Lufttemperatur
- Betontemperatur
- Rohdichte
- Luftgehalt A1
- Konsistenz.

Die Lufttemperatur lag bei der Betonherstellung zwischen 12 und 22 °C, die Frischbetontemperatur zwischen 15 und 23 °C. Die Zielkonsistenz der Betone wurde mehrheitlich erreicht.

Der Luftgehalt lag bei den Betonen ohne LP-Mittel zwischen 0.8 und 1.3 Vol.-%, bei den LP-Betonen bei ca. 3.0 Vol.-%, beim Beton 12 (SVB) bei 6.5 Vol.-%, beim Spritzbeton 13 bei 4.0 Vol.-%, und beim Spritzbeton 14 bei 5.6 Vol.-%.

Sämtliche Ergebnisse sind im **Anhang I** zusammengestellt.

### 3.3 Festbetonprüfungen

Die Würfeldruckfestigkeit (inkl. Rohdichte) wurde gemäss SN EN 12390-3 bestimmt. Weiter wurde der Frosttaumittelwiderstand mit folgenden Prüfungen ermittelt:

- Norm SIA 262/1, Anhang C
- TFB-Prüfung (modifiziertes Verfahren gemäss Cementbulletin [CB 1986])
- BE I FT (diagnostisch) gemäss SN 640464 [SN 2010] (**nachfolgend mit BE I bezeichnet**)
- BE II FT (physikalisch) gemäss SN 640464 [SN 2010] (**nachfolgend mit BE II bezeichnet**).

Weiter wurde für die Betonsorten 3 und 4 der Karbonatisierungswiderstand gemäss SIA 262/1, Anhang I bestimmt.

Bei der Betonsorte 6 mussten die Ergebnisse der SIA-Prüfung nach 28 Tagen verworfen werden, da die Abwitterung viel zu hoch ausfiel und nicht plausibel war (evtl. Verwechslung). Die Prüfung wurde daher mit Reservewürfeln wiederholt.

Die **Tab. 8** gibt einen Überblick über die Resultate der Festbetonprüfungen, die **Tab. 9** über die Porenkennwerte.

Weitere Details sind im **Anhang II** zu finden. In den **Anhängen III und IV** sind die Details der Resultate der BE I- sowie der BE II- und der TFB-Prüfungen zusammengestellt.

**Tab. 8 Druckfestigkeit, Rohdichte und Ergebnisse der FTW-Prüfungen**

| Mischung Nr.                           |                        | 1        | 2     | 3             | 4        | 5     | 6                  | 7             |
|----------------------------------------|------------------------|----------|-------|---------------|----------|-------|--------------------|---------------|
| Würfeldruckfestigkeit                  | N/mm <sup>2</sup>      | 69.7     | 48.3  | 48.9          | 40.0     | 54.7  | 46.8               | 51.0          |
| Rohdichte                              | kg/m <sup>3</sup>      | 2'460    | 2'400 | 2'420         | 2'390    | 2'440 | 2'390              | 2'410         |
| Karbonatisierungskoeff. K <sub>N</sub> | mm/Jahr <sup>1/2</sup> |          |       | 3.4           | 3.9      |       |                    |               |
| <b>Frosttaumittelwiderstand</b>        |                        |          |       |               |          |       |                    |               |
| Norm SIA 262/1, Anhang C               |                        | mittel   | hoch  | nicht erfüllt | mittel   | hoch  | hoch <sup>1)</sup> | nicht erfüllt |
| TFB-Prüfung                            |                        | genügend | gut   | un-genügend   | genügend | gut   | genügend           | schlecht      |
| BE I                                   |                        | tief     | hoch  | mittel        | mittel   | tief  | hoch               | tief          |
| BE II                                  |                        | tief     | hoch  | tief          | tief     | tief  | hoch               | tief          |

**Tab. 8 Druckfestigkeit, Rohdichte und Ergebnisse der FTW-Prüfungen (Fortsetzung)**

| Mischung Nr.                          |                        | 8             | 9             | 10     | 12    | 13                     | 14                |
|---------------------------------------|------------------------|---------------|---------------|--------|-------|------------------------|-------------------|
| Würfeldruckfestigkeit                 | N/mm <sup>2</sup>      | 40.6          | 37.9          | 41.2   | 32.9  | 58.2                   | 59.8              |
| Rohdichte                             | kg/m <sup>3</sup>      | 2'420         | 2'400         | 2'380  | 2'270 | 2'320                  | 2'330             |
| <b>Frosttaumittelwiderstand (FTW)</b> |                        |               |               |        |       |                        |                   |
| Norm SIA 262/1, Anhang C              |                        | nicht erfüllt | nicht erfüllt | mittel | hoch  | hoch                   | hoch              |
| TFB-Prüfung                           | Originaloberfläche     | schlecht      | schlecht      | gut    | gut   | genügend <sup>2)</sup> | gut <sup>3)</sup> |
|                                       | Oberfläche geschnitten |               |               |        |       | gut <sup>2)</sup>      | gut <sup>3)</sup> |
| BE I                                  |                        | tief          | tief          | mittel | hoch  | mittel                 | hoch              |
| BE II                                 |                        | tief          | tief          | tief   | hoch  | mittel                 | hoch              |

<sup>1)</sup> Probenalter 75 Tage; <sup>2)</sup> Probenalter 64 Tage; <sup>3)</sup> Probenalter 77 Tage

**Tab. 9 Porenkennwerte**

| Mischung-Nr.                     |                   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
|----------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Kapillarporen, UE                | Vol.-%            | 9.8   | 11.4  | 10.7  | 12.4  | 11.5  | 11.6  | 14    |
| Gesamtporosität, n               | Vol.-%            | 11.0  | 13.3  | 11.7  | 13.9  | 12.4  | 13.8  | 15.2  |
| Hohlraumgehalt, LP               | Vol.-%            | 1.2   | 1.9   | 1     | 1.5   | 0.9   | 2.2   | 1.2   |
| Trockenrohddichte, $\rho_{R110}$ | kg/m <sup>3</sup> | 2'402 | 2'340 | 2'384 | 2'324 | 2'366 | 2'329 | 2'289 |
| Gesamter Luftporengehalt, A      | Vol.-%            | 2     | 2.4   | 1.9   | 3.0   | 1.1   | 3.0   | 1.1   |
| Gehalt an Mikroporen, A300       | Vol.-%            | 0.5   | 2.0   | 1.0   | 2.0   | 0.5   | 2.2   | 0.7   |
| Abstandsfaktor, AF               | mm                | 0.446 | 0.129 | 0.228 | 0.147 | 0.242 | 0.137 | 0.199 |

**Tab. 9 Porenkennwerte (Fortsetzung)**

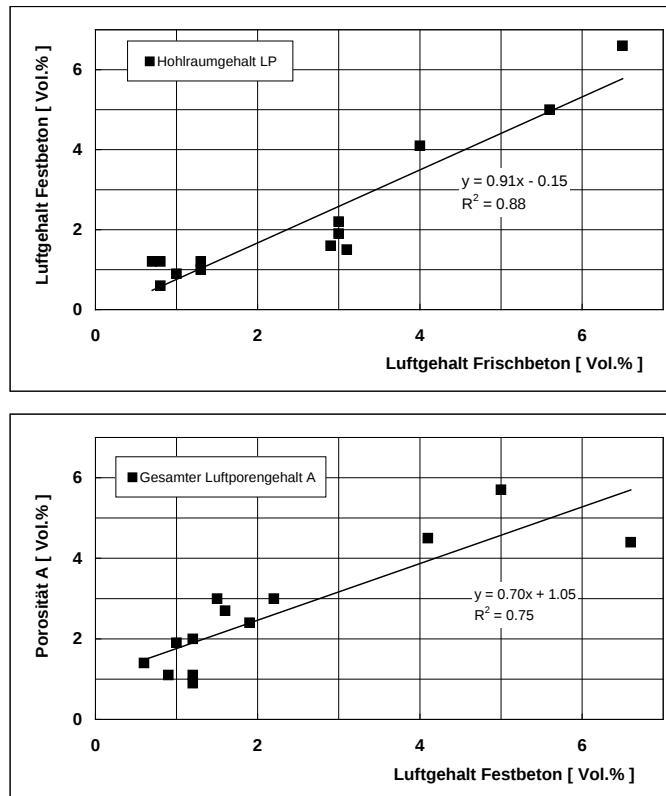
| Mischung-Nr.                     |                   | 8     | 9     | 10    | 12    | 13    | 14    |
|----------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Kapillarporen, UE                | Vol.-%            | 13.7  | 14.3  | 12.8  | 10.2  | 13.3  | 13.5  |
| Gesamtporosität, n               | Vol.-%            | 14.9  | 14.9  | 14.4  | 16.8  | 17.4  | 18.5  |
| Hohlraumgehalt, LP               | Vol.-%            | 1.2   | 0.6   | 1.6   | 6.6   | 4.1   | 5     |
| Trockenrohddichte, $\rho_{R110}$ | kg/m <sup>3</sup> | 2'298 | 2'297 | 2'312 | 2'248 | 2'230 | 2'201 |
| Gesamter Luftporengehalt, A      | Vol.-%            | 0.9   | 1.4   | 2.7   | 4.4   | 4.5   | 5.7   |
| Gehalt an Mikroporen, A300       | Vol.-%            | 0.7   | 0.9   | 1.8   | 2.7   | 1.5   | 2.9   |
| Abstandsfaktor, AF               | mm                | 0.197 | 0.233 | 0.157 | 0.154 | 0.223 | 0.151 |

### 3.4 Auswertung

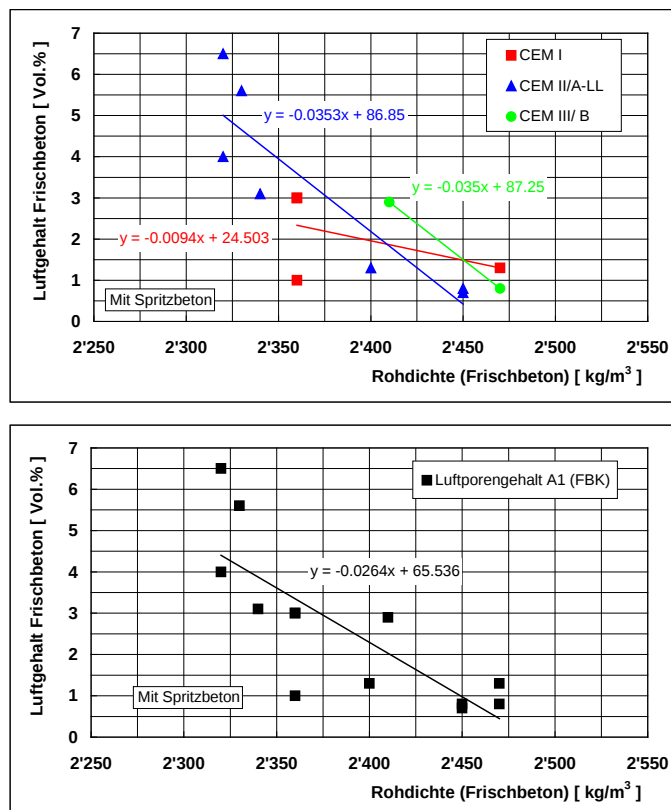
#### 3.4.1 Porenkennwerte und Druckfestigkeit

In **Abb. 2** sind der Luftgehalt des Festbetons (Hohlraumgehalt, LP) gegen den Luftgehalt im Frischbeton A1 bzw. den gesamten Luftporengehalt A dargestellt. **Abb. 3** zeigt den Zusammenhang zwischen Luftgehalt und Rohddichte des Frischbetons und **Abb. 4** jenen zwischen der 28-Tage-Würfeldruckfestigkeit und der Trockenrohddichte  $\rho_{R110}$ . Aus den Abbildungen ergibt sich Folgendes:

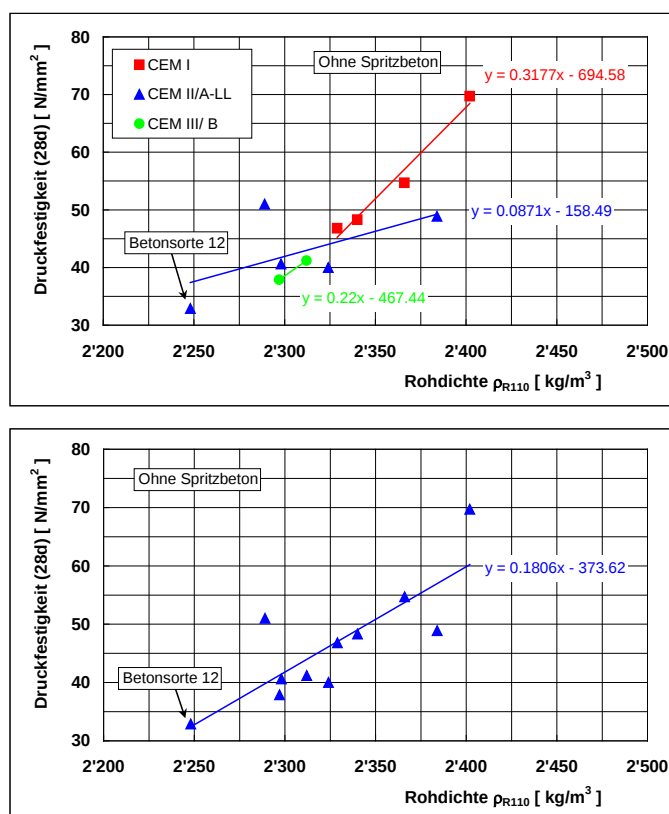
- Zwischen dem Luftgehalt des Festbetons (Hohlraumgehalt, LP) und dem Luftgehalt im Frischbeton A1 besteht eine lineare Beziehung mit einer Steigung von 0.91. Dies bedeutet, dass der Luftgehalt im Festbeton etwas tiefer ist als im Frischbeton (z.B. durch Verlust beim Verdichten der Würfel). Anzumerken ist hier noch, dass bei der Bestimmung des Luftgehaltes kein Aufsatzrahmen verwendet wurde.
- Zwischen dem gesamten Luftporengehalt A und dem Luftgehalt des Festbetons (Hohlraumgehalt, LP) besteht ebenfalls eine lineare Beziehung mit einer Steigung von 0.70 und einem Achsenabschnitt von 1.05.
- Mit zunehmendem Luftgehalt nimmt die Frischbetonrohddichte ab. Die Streuung ist relativ gross (verschiedene Zemente, vibrierte und gespritzte Betone).
- Zwischen der 28-Tage-Würfeldruckfestigkeit und der Trockenrohddichte besteht eine direkte Abhängigkeit.
- Der Karbonatisierungskoeffizient des Betons 3 beträgt 3.5 mm/Jahr<sup>1/2</sup>, jener des Betons 4 liegt bei 3.9 mm/Jahr<sup>1/2</sup>. Der Unterschied ist auf die Wirkung der Luftporen zurückzuführen (siehe dazu [Hunkeler 2012]).



**Abb. 2** Luftgehalt des Festbetons vs. Luftgehalt des Frischbetons A1 (oben) und Luftgehalt des Festbetons vs. gesamter Luftporengehalt A.



**Abb. 3** Luftgehalt des Frischbetons A1 vs. Rohdichte des Frischbetons: Aufgeschlüsselt nach Zementart (oben) und alle Werte (unten).



**Abb. 4** 28-Tage-Würfeldruckfestigkeit vs. Trockenrohddichte  $\rho_{R110}$ : Aufgeschlüsselt nach Zementart (oben) und alle Werte (unten).

### 3.4.2 Vergleich der Ergebnisse der FTW-Prüfungen

Die eingesetzten FTW-Prüfungen verwenden unterschiedliche Begriffe für die Beurteilung. In einem ersten Schritt wurde deshalb die Klassierung des Widerstandes vereinheitlicht und mit Zahlenwerten versehen (**Tab. 10**).

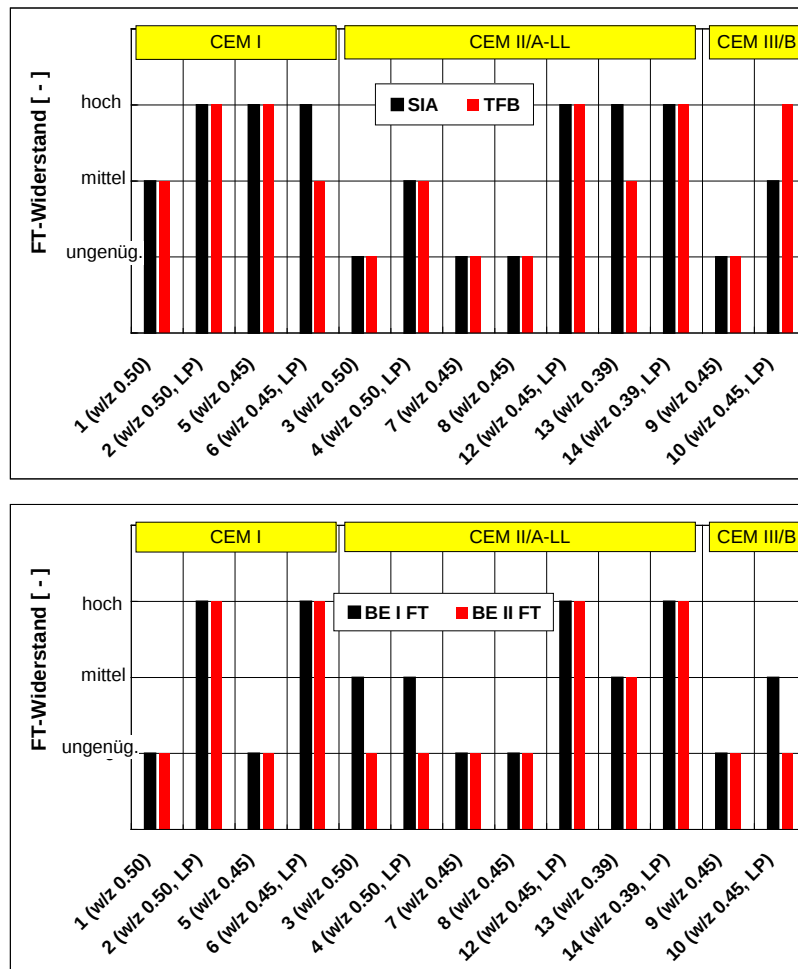
**Tab. 10** Klassierung des Frosttaumittelwiderstandes

| Prüfung                      | Beurteilung         |               |             |
|------------------------------|---------------------|---------------|-------------|
| SIA                          | nicht erfüllt       | mittel        | hoch        |
| TFB                          | schlecht/ungenügend | genügend      | gut/hoch    |
| BE I                         | tief                | mittel        | hoch        |
| BE II                        | tief                | mittel        | hoch        |
| <b>Klassierung (Ranking)</b> | <b>ungenügend</b>   | <b>mittel</b> | <b>hoch</b> |
|                              | <b>0</b>            | <b>1</b>      | <b>2</b>    |

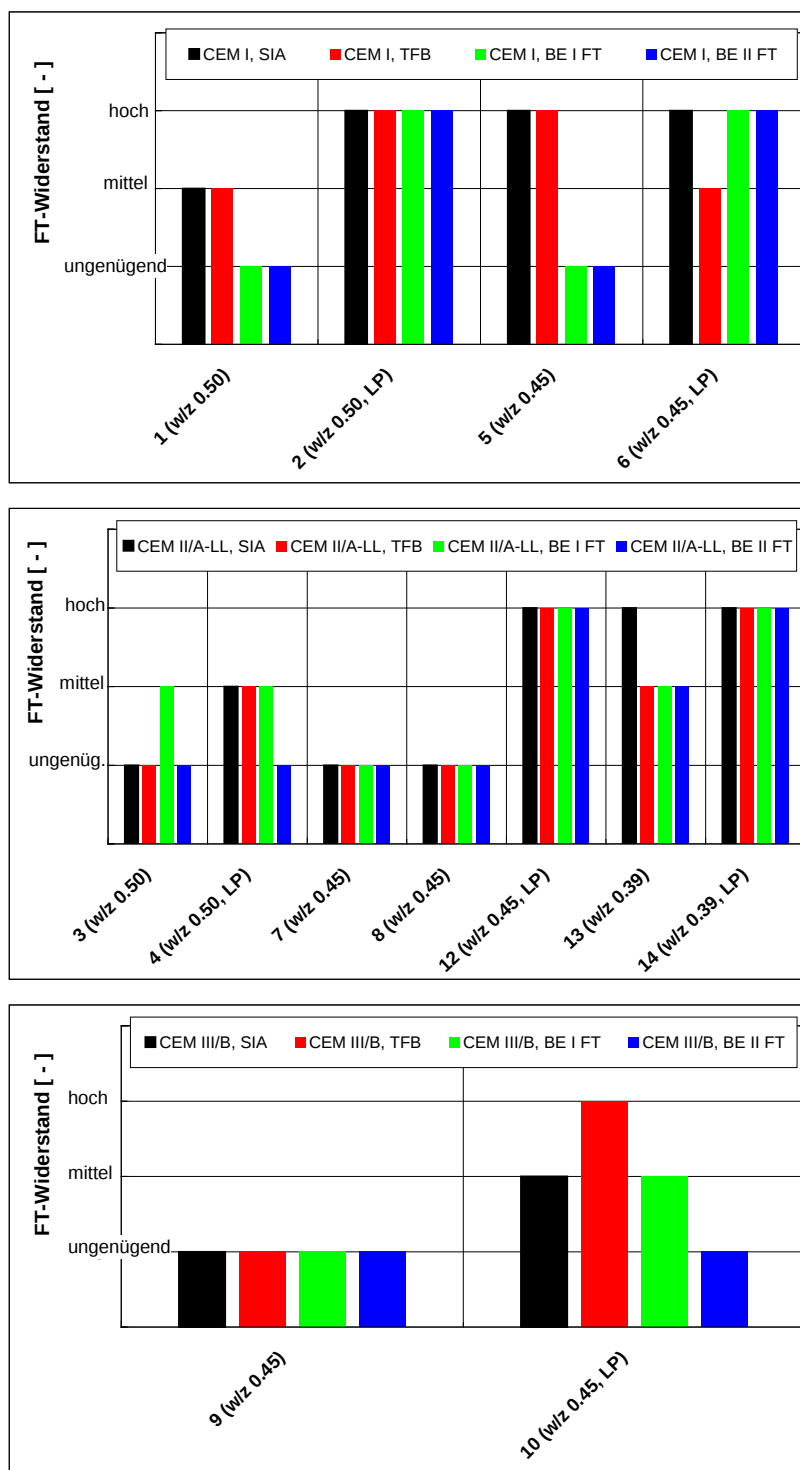
Der Vergleich der Ergebnisse der Prüfungen geht aus **Abb. 5** und **Abb. 6** hervor. Folgendes kann daraus entnommen werden:

- Zwischen der SIA- und der TFB-Prüfung gibt es mehrheitlich eine übereinstimmende Beurteilung. Der Frosttaumittelwiderstand der Betonsorten 6 und 13 wird mit der SIA-Prüfung höher, jener der Betonsorte 10 tiefer beurteilt als mit der TFB-Prüfung.

- Zwischen der BE I- und der BE II-Prüfung gibt es mehrheitlich ebenfalls eine übereinstimmende Beurteilung. Bei den Betonsorten 3, 4 und 10 fällt die Beurteilung nach der BE I-Prüfung um eine Stufe höher aus als jene nach der BE II-Prüfung.
- Bei der Zementart CEM I fällt die Beurteilung durch die BE I- und BE II-Prüfung bei der Betonsorte 1 um eine Stufe, bei der Sorte 5 um zwei Stufen tiefer aus als jene nach der SIA-Prüfung und der TFB-Prüfung. Beide Betonsorten wurden ohne LP-Mittel hergestellt.
- Bei den beiden, abgesehen von der Fließmitteldosierung, identischen Betonsorten 7 und 8 ergibt sich die gleiche Beurteilung in allen Prüfungen, d.h. die Wiederholung der Prüfungen führt zu den gleichen Ergebnissen.
- Bei der Zementart CEM II/A-LL unterscheiden sich die Beurteilungen um maximal eine Stufe. Auffallend ist der mittlere FT-Widerstand bei der BE I-Prüfung bei der Betonsorte 3 und der hohe FT-Widerstand bei der SIA-Prüfung bei der Betonsorte 13.
- Bei der Zementart CEM III/B ist die Beurteilung der Betonsorte 9 (ohne LP) bei allen Prüfungen identisch. Demgegenüber gibt es bei der Sorte 10 (mit LP) sehr grosse Unterschiede.



**Abb. 5** Vergleich des ermittelten Frosttaumittelwiderstandes der Betone, sortiert nach der Zementart: SIA- und TFB-Prüfung (oben) sowie BE I- und BE II-Prüfung (unten).



**Abb. 6** Vergleich des ermittelten Frosttaumittelwiderstandes der Betone: CEM I (oben), CEM II/A-LL (Mitte) und CEM III/B (unten).

Um eine Korrelation der einzelnen Prüfverfahren untereinander zu erhalten, wurden die Beurteilungen des Frosttaumittelwiderstandes (tief, mittel, hoch) der Prüfverfahren für die 13 Betonsorten miteinander verglichen. Jedes Prüfverfahren wurde dabei als Referenz mit den übrigen Prüfverfahren hinsichtlich der Beurteilung verglichen (übereinstimmende, strengere oder schwächere Beurteilung).

Die Resultate sind in den nachfolgenden **Tab. 11** bis **Tab. 14** zusammengetragen.

**Tab. 11** SIA-Prüfung als Referenz

| Vergleich         | Beurteilung übereinstimmend |            |                             | SIA beurteilt strenger |            |            | SIA beurteilt schwächer |            |                     |
|-------------------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------------------|------------|------------|-------------------------|------------|---------------------|
|                   | Anz.                        | %          | Betonsorte                  | Anz.                   | %          | Betonsorte | Anz.                    | %          | Betonsorte          |
| SIA vs. BE I      | 8                           | 62%        | 2, 4, 7, 8, 9, 10, 12, 14   | 2                      | 15%        | 3, 6 (2)*  | 3                       | 23%        | 1, 5 (2), 13        |
| SIA vs. BE II     | 7                           | 54%        | 2, 3, 7, 8, 9, 12, 14       | 1                      | 8%         | 6 (2)      | 5                       | 38%        | 1, 4, 5 (2), 10, 13 |
| SIA vs. TFB       | 9                           | 69%        | 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 12, 14 | 2                      | 15%        | 6, 10      | 2                       | 15%        | 4, 13               |
| <b>Mittelwert</b> | <b>8</b>                    | <b>62%</b> |                             | <b>1.7</b>             | <b>13%</b> |            | <b>3.3</b>              | <b>26%</b> |                     |
| Standardabw.      | 1                           | 8%         |                             | 0.6                    | 4%         |            | 1.5                     | 12%        |                     |

\* Abweichung von 2 Stufen

**Tab. 12** TFB- Prüfung als Referenz

| Vergleich         | Beurteilung übereinstimmend |            |                              | TFB beurteilt strenger |            |            | TFB beurteilt schwächer |            |                  |
|-------------------|-----------------------------|------------|------------------------------|------------------------|------------|------------|-------------------------|------------|------------------|
|                   | Anz.                        | %          | Betonsorte                   | Anz.                   | %          | Betonsorte | Anz.                    | %          | Betonsorte       |
| TFB vs. BE I      | 7                           | 54%        | 2, 7, 8, 9, 12, 13, 14       | 3                      | 23%        | 3, 4, 6    | 3                       | 23%        | 1, 5 (2)*, 10    |
| TFB vs. BE II     | 9                           | 69%        | 2, 3, 4, 7, 8, 9, 12, 13, 14 | 1                      | 8%         | 6          | 3                       | 23%        | 1, 5 (2), 10 (2) |
| TFB vs. SIA       | 9                           | 69%        | 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 12, 14  | 2                      | 15%        | 4, 13      | 2                       | 15%        | 6, 10            |
| <b>Mittelwert</b> | <b>8.3</b>                  | <b>64%</b> |                              | <b>2</b>               | <b>15%</b> |            | <b>2.7</b>              | <b>21%</b> |                  |
| Standardabw.      | 1.2                         | 9%         |                              | 1.0                    | 8%         |            | 0.6                     | 4%         |                  |

\* Abweichung von 2 Stufen

**Tab. 13** BE I als Referenz

| Vergleich         | Beurteilung übereinstimmend |            |                                 | BE I beurteilt strenger |            |               | BE I beurteilt schwächer |            |            |
|-------------------|-----------------------------|------------|---------------------------------|-------------------------|------------|---------------|--------------------------|------------|------------|
|                   | Anz.                        | %          | Betonsorte                      | Anz.                    | %          | Betonsorte    | Anz.                     | %          | Betonsorte |
| BE I vs. SIA      | 8                           | 62%        | 2, 4, 7, 8, 9, 10, 12, 14       | 3                       | 23%        | 1, 5 (2)*, 13 | 2                        | 15%        | 3, 6 (2)   |
| BE I vs. BE II    | 10                          | 77%        | 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 14 | 0                       | 0%         | --            | 3                        | 23%        | 3, 4, 10   |
| BE I vs. TFB      | 7                           | 54%        | 2, 7, 8, 9, 12, 13, 14          | 3                       | 23%        | 1, 5 (2), 10  | 3                        | 23%        | 3, 4, 6    |
| <b>Mittelwert</b> | <b>8.3</b>                  | <b>64%</b> |                                 | <b>2</b>                | <b>15%</b> |               | <b>2.7</b>               | <b>21%</b> |            |
| Standardabw.      | 1.5                         | 12%        |                                 | 1.7                     | 13%        |               | 0.6                      | 4%         |            |

\* Abweichung von 2 Stufen

**Tab. 14** BE II als Referenz

| Vergleich         | Beurteilung übereinstimmend |            |                                 | BE II beurteilt strenger |            |                      | BE II beurteilt schwächer |           |            |
|-------------------|-----------------------------|------------|---------------------------------|--------------------------|------------|----------------------|---------------------------|-----------|------------|
|                   | Anz.                        | Proz.      | Betonsorte                      | Anz.                     | Proz.      | Betonsorte           | Anz.                      | Proz.     | Betonsorte |
| BE II vs. BE I    | 10                          | 77%        | 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 14 | 3                        | 23%        | 3, 4, 10             | 0                         | 0%        | --         |
| BE II vs. SIA     | 7                           | 54%        | 2, 3, 7, 8, 9, 12, 14           | 5                        | 38%        | 1, 4, 5 (2)*, 10, 13 | 1                         | 8%        | 6 (2)      |
| BE II vs. TFB     | 9                           | 69%        | 2, 3, 4, 7, 8, 9, 12, 13, 14    | 3                        | 23%        | 1, 5 (2), 10 (2)     | 1                         | 8%        | 6          |
| <b>Mittelwert</b> | <b>8.7</b>                  | <b>67%</b> |                                 | <b>3.7</b>               | <b>28%</b> |                      | <b>0.7</b>                | <b>5%</b> |            |
| Standardabw.      | 1.5                         | 12%        |                                 | 1.2                      | 9%         |                      | 0.6                       | 4%        |            |

\* Abweichung von 2 Stufen

Aus den oben dargestellten Resultaten lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Ein einzelnes Prüfverfahren stimmt durchschnittlich zu ca. 66% mit den übrigen Prüfungen überein. Die SIA-Prüfung hat mit durchschnittlich 62% die tiefste, die BE II-Prüfung mit durchschnittlich 67% die höchste Übereinstimmung. Die Prüfverfahren TFB und BE I liegen mit durchschnittlich 64% Übereinstimmung dazwischen. Diese Unterschiede können aber nicht als signifikant beurteilt werden.
- Die SIA-Prüfung beurteilt die Betone durchschnittlich 13% strenger bzw. 26% schwächer als die übrigen Prüfverfahren, d.h. durchschnittlich ca. 75% gleich oder strenger wie die übrigen Prüfverfahren.
- Die TFB und BE I-Prüfung bewertet die Betone durchschnittlich 15% strenger bzw. 21% schwächer als die übrigen Prüfverfahren, d.h. durchschnittlich zu 79% gleich oder strenger wie die übrigen Prüfverfahren.
- Die BE II-Prüfung bewertet die Betone durchschnittlich 28% strenger bzw. 5% schwächer als die übrigen Prüfverfahren, d.h. durchschnittlich zu 95% gleich oder strenger wie die übrigen Prüfverfahren.

Die Angaben zur prozentualer Übereinstimmung zwischen den Prüfungen in den **Tab. 11** bis **Tab. 14** ist nur für die geprüften Betone gültig. Für andere Betone, insbesondere bei einem anderen Verhältnis der Anzahl Betone ohne und mit künstlich eingeführter Luft, dürfte sich die Übereinstimmung ändern.

Im Vergleich zu den Ergebnissen der Validierung der BE I und BE II-Prüfung (siehe **Kap. 2.1.2**) ist die Summe der übereinstimmenden und strengeren Beurteilungen bei der BE I und BE II-Prüfung hier gerade umgekehrt. Bei der Validierungsprüfung betrug diese Summe bei der SIA-Prüfung ca. 63%, bei der BE I-Prüfung ca. 93% und bei der BE II-Prüfung ca. 81%. Die SIA-Prüfung wurde schon damals als schwächste Prüfung beurteilt. Dies ist evtl. auf die unterschiedliche Anzahl der Betone ohne und mit künstlich eingeführter Luft zurückzuführen.

Zusammenfassend kann damit Folgendes festgehalten werden:

- Die BE II-Prüfung ist die strengste der Prüfungen, danach folgen die TFB- und die BE I-Prüfung und am Ende die SIA-Prüfung. Die Unterschiede zwischen der SIA-, TFB- und BE I-Prüfung sind aber gering.
- Zwischen den Prüfungen sind Unterschiede bis zu einer Klasse relativ häufig (im Mittel ca. 34%). Unterschiede bis zwei Klassen sind Ausnahmen.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Prüfverfahren und die Betone mit übereinstimmender Beurteilung gelistet. Aus der **Tab. 15** kann abgeleitet werden, dass bei der Beurteilungssicherheit keine Gesetzmässigkeiten zwischen den einzelnen Prüfverfahren und den verschiedenen Betonsorten beobachtet werden konnten. Somit können auch keine Anwendungsgrenzen für die einzelnen Prüfverfahren hinsichtlich Zementart, -gehalt, Grösstkorn, mit/ohne Luftporenbildner oder Betonart festgelegt werden.

**Tab. 15a) Übereinstimmende Beurteilung von allen vier Prüfverfahren bei 6 Betonen**

| Betonsorte   | 2               | 7                     | 8                     | 9                      | 12                    | 14                        |
|--------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Betonart     | E (T2)          | F (T3)                | G (T4)                | F (T3)                 | G (T4, SVB)           | SC7<br>Spritzbeton<br>FTW |
| Zementtyp    | CEM I<br>42.5 N | CEM II/A-LL<br>42.5 N | CEM II/A-LL<br>42.5 N | CEM III/B<br>32,5 N-LH | CEM II/A-LL<br>42.5 N | CEM II/A-LL<br>42.5 N     |
| Zementgehalt | 300             | 320                   | 320                   | 320                    | 320                   | 425                       |
| Grösstkorn   | 32 mm           | 32 mm                 | 32 mm                 | 32 mm                  | 32 mm                 | 8 mm                      |
| Mit LP       | ja              | nein                  | nein                  | nein                   | ja                    | ja                        |

**Tab. 15b) Übereinstimmende Beurteilung von drei Prüfverfahren bei 2 Betonen**

|              |                    |                    |
|--------------|--------------------|--------------------|
| Betonsorte   | <b>3</b>           | <b>13</b>          |
| Betonart     | D (T1)             | SC7 Spritzbeton    |
| Zementtyp    | CEM II/A-LL 42.5 N | CEM II/A-LL 42.5 N |
| Zementgehalt | 300                | 450                |
| Grösstkorn   | 32 mm              | 8 mm               |
| Mit LP       | nein               | nein               |
| Prüfung      | SIA, TFB, BE II    | TFB, BE I, BE II   |

**Tab. 15c) Übereinstimmende Beurteilung von zwei Prüfverfahren bei 5 Betonen**

|              |                     |                     |                     |              |                     |
|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------|---------------------|
| Betonsorte   | <b>1</b>            | <b>4</b>            | <b>5</b>            | <b>6</b>     | <b>10</b>           |
| Betonart     | D (T1)              | E (T2)              | F (T3)              | G (T4)       | G (T4)              |
| Zementtyp    | CEM I 42.5 N        | CEM II/A-LL 42.5 N  | CEM I 42.5 N        | CEM I 42.5 N | CEM III/B 32,5 N-LH |
| Zementgehalt | 300                 | 300                 | 320                 | 320          | 320                 |
| Grösstkorn   | 32 mm               | 32 mm               | 32 mm               | 32 mm        | 32 mm               |
| Mit LP       | nein                | ja                  | nein                | ja           | ja                  |
| Prüfung      | SIA/TFB, BE I/BE II | SIA/BE I, TFB/BE II | SIA/TFB, BE I/BE II | BE I/BE II   | SIA/TFB             |

### 3.4.3 Porenkennwerte und Ergebnisse der FTW-Prüfungen

Die gewählte Auswertung könnte verfeinert werden, indem z.B. nur die Betone ohne LP und Beton mit LP verglichen würden. Damit könnte die Tatsache berücksichtigt werden, dass einzelne Prüfverfahren für Betone ohne LP eher zu scharf sind. Für eine solch detaillierte Auswertung müsste aber eine grössere Anzahl von Betonen zu Verfügung stehen. Porenkennwerte und Ergebnisse der FTW-Prüfungen

In der **Tab. 16** sind die verschiedenen Kennwerte der geprüften Betone (abgelöste Betonmasse  $m$  nach 28 Zyklen nach der SIA-Prüfung, Trockenrohddichte, Porenkennwerte) und die Ergebnisse der FTW-Prüfungen zusammengefasst.

In den **Abb. 7 bis Abb. 11** sind verschiedene Zusammenhänge graphisch dargestellt. Daraus lassen sich folgende Folgerungen ableiten:

1. Bei Luftgehalten  $\geq 3$  Vol.-% im Frischbeton bzw.  $\geq 2$  Vol.-% im Festbeton nimmt der FT-Widerstand deutlich zu. Unterhalb dieser Werte hängt die Beurteilung teilweise von der Prüfung ab.
2. Bei einer abgelösten Betonmasse  $m$  unter  $600 \text{ g/m}^2$  nach der SIA-Prüfung ist der FT-Widerstand bei allen Prüfungen mittel oder hoch. Ausnahmen sind einzelne Betone, die mit der BE I-Prüfung (Beton 1) und der BE II-Prüfung (Beton 1, 4, 5 und 10) geprüft wurden. Darunter hat es Betone ohne und mit künstlich eingeführten Luftporen. Auffallend ist weiter, dass auch bei einer abgelösten Betonmasse  $m$  unter  $200 \text{ g/m}^2$  der FT-Widerstand mit den anderen Prüfverfahren teilweise nur mit "mittel" beurteilt wird.
3. Zwischen dem FT-Widerstand und dem wasserfüllbaren Porenvolumen, der Gesamtporosität sowie der Trockenrohddichte ergeben sich keine erkennbaren Zusammenhänge. Diese Grössen sind abhängig vom w/z-Wert und vom LP-Gehalt.
4. Ebenfalls keine Korrelation ist zwischen dem FT-Widerstand und der Porosität A, dem Mikroporenvolumen und dem Abstandsfaktor vorhanden.

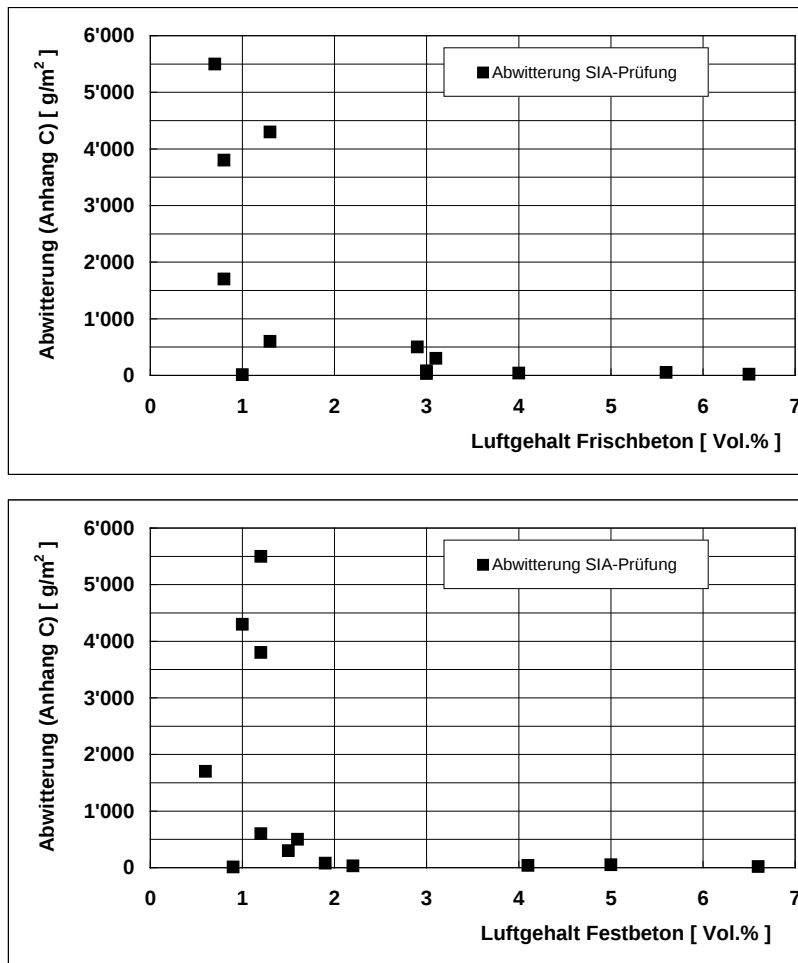
**Tab. 16** Kennwerte und Beurteilung des FT-Widerstandes der Betone

| Beton Nr. | SIA 262/1, Anhang C, g/m <sup>2</sup> | $\rho_{R110}$ , kg/m <sup>3</sup> | Luft A1 (FBK), Vol. % | A <sup>1)</sup> , Vol. % | U <sub>E</sub> , Vol. % | n, Vol. % | LP, Vol. % | A <sub>300</sub> , Vol. % | AF, mm |
|-----------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|------------|---------------------------|--------|
| 1         | 600                                   | 2'402                             | 1.3                   | 2.0                      | 9.8                     | 11.0      | 1.2        | 0.5                       | 0.446  |
| 2         | 80                                    | 2'340                             | 3.0                   | 2.4                      | 11.4                    | 13.3      | 1.9        | 2.0                       | 0.129  |
| 3         | 4300                                  | 2'384                             | 1.3                   | 1.9                      | 10.7                    | 11.7      | 1.0        | 1.0                       | 0.228  |
| 4         | 300                                   | 2'324                             | 3.1                   | 3.0                      | 12.4                    | 13.9      | 1.5        | 2.0                       | 0.147  |
| 5         | 10                                    | 2'366                             | 1.0                   | 1.1                      | 11.5                    | 12.4      | 0.9        | 0.5                       | 0.242  |
| 6         | 30                                    | 2'329                             | 3.0                   | 3.0                      | 11.6                    | 13.8      | 2.2        | 2.2                       | 0.137  |
| 7         | 3800                                  | 2'289                             | 0.8                   | 1.1                      | 14.0                    | 15.2      | 1.2        | 0.7                       | 0.199  |
| 8         | 5500                                  | 2'298                             | 0.7                   | 0.9                      | 13.7                    | 14.9      | 1.2        | 0.7                       | 0.197  |
| 9         | 1700                                  | 2'297                             | 0.8                   | 1.4                      | 14.3                    | 14.9      | 0.6        | 0.9                       | 0.233  |
| 10        | 500                                   | 2'312                             | 2.9                   | 2.7                      | 12.8                    | 14.4      | 1.6        | 1.8                       | 0.157  |
| 12        | 20                                    | 2'248                             | 6.5                   | 4.4                      | 10.2                    | 16.8      | 6.6        | 2.7                       | 0.154  |
| 13        | 40                                    | 2'230                             | 4.0                   | 4.5                      | 13.3                    | 17.4      | 4.1        | 1.5                       | 0.223  |
| 14        | 50                                    | 2'201                             | 5.6                   | 5.7                      | 13.5                    | 18.5      | 5.0        | 2.9                       | 0.151  |

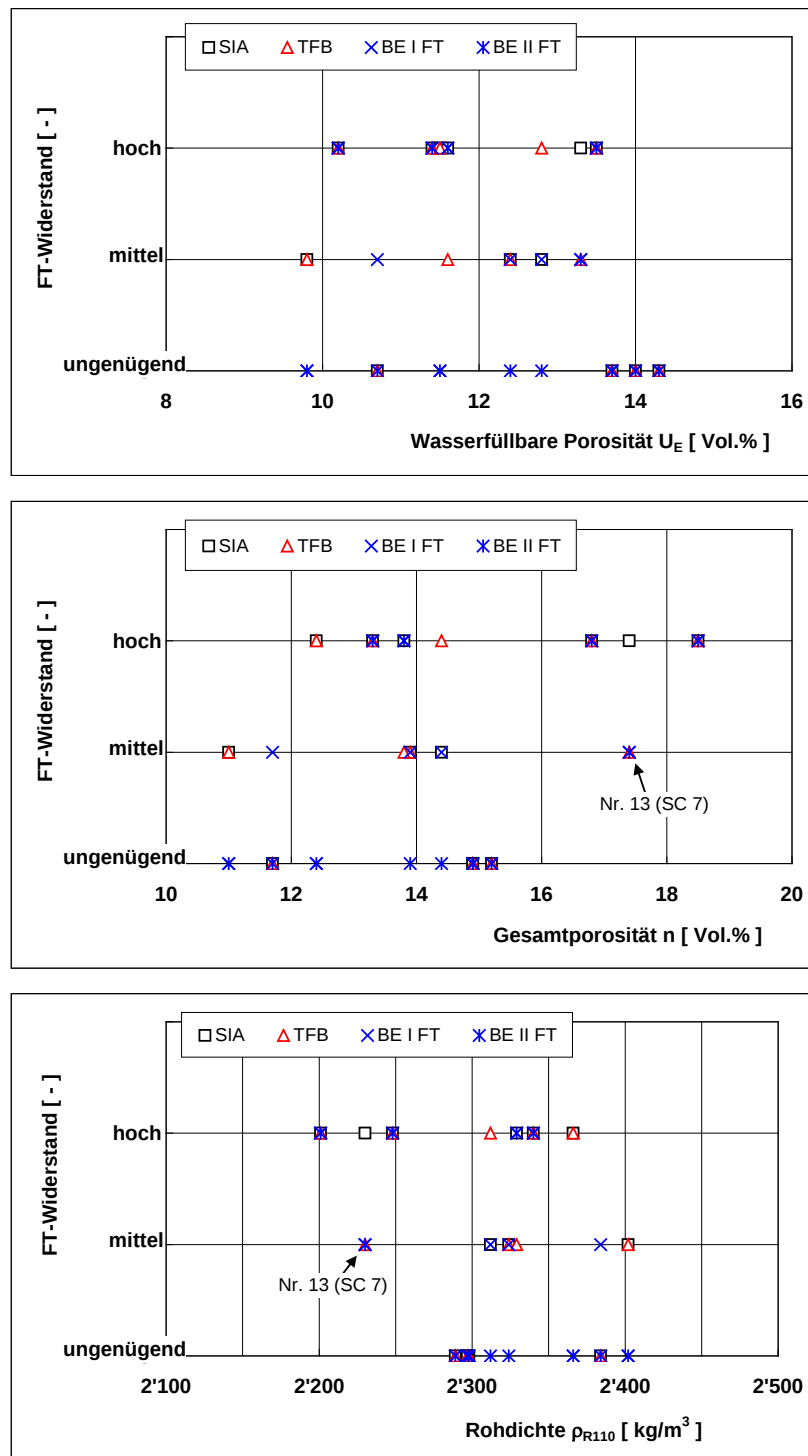
1) Gesamter Luftporengehalt A aus BE I-Prüfung.

**Tab. 17** Kennwerte und Beurteilung des FT-Widerstandes der Betone (Fortsetzung)

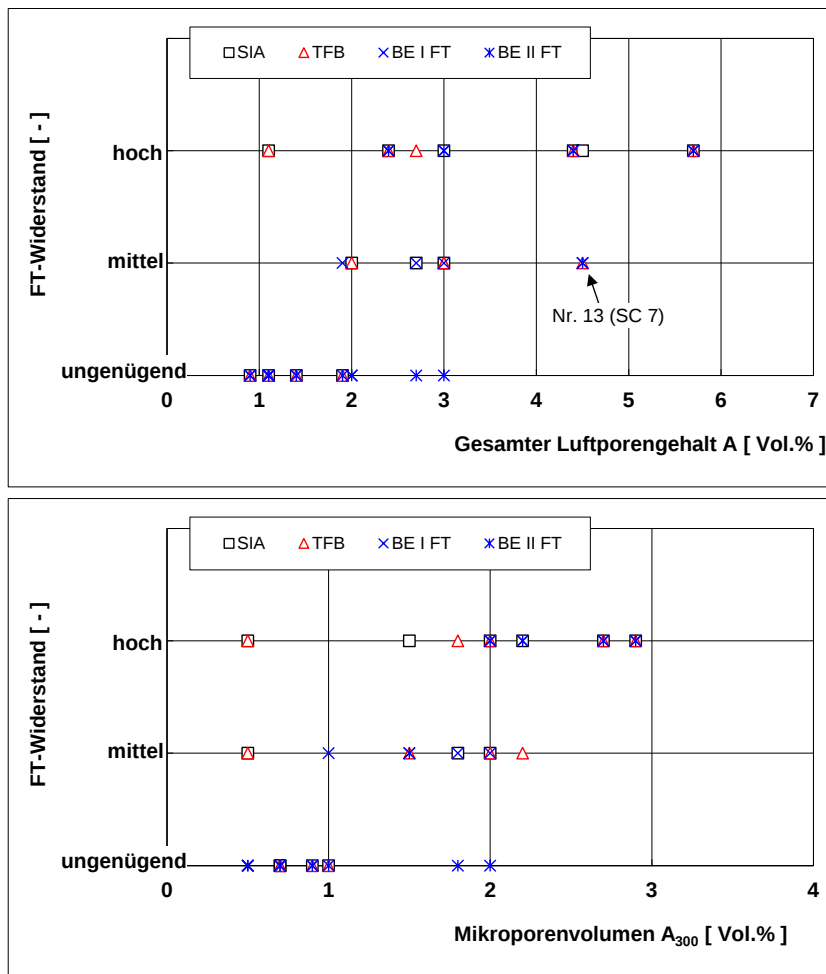
| Beton Nr. | FTW-Prüfung |     |      |       |
|-----------|-------------|-----|------|-------|
|           | SIA         | TFB | BE I | BE II |
| 1         | 1           | 1   | 0    | 0     |
| 2         | 2           | 2   | 2    | 2     |
| 3         | 0           | 0   | 1    | 0     |
| 4         | 1           | 1   | 1    | 0     |
| 5         | 2           | 2   | 0    | 0     |
| 6         | 2           | 1   | 2    | 2     |
| 7         | 0           | 0   | 0    | 0     |
| 8         | 0           | 0   | 0    | 0     |
| 9         | 0           | 0   | 0    | 0     |
| 10        | 1           | 2   | 1    | 0     |
| 12        | 2           | 2   | 2    | 2     |
| 13        | 2           | 1   | 1    | 1     |
| 14        | 2           | 2   | 2    | 2     |



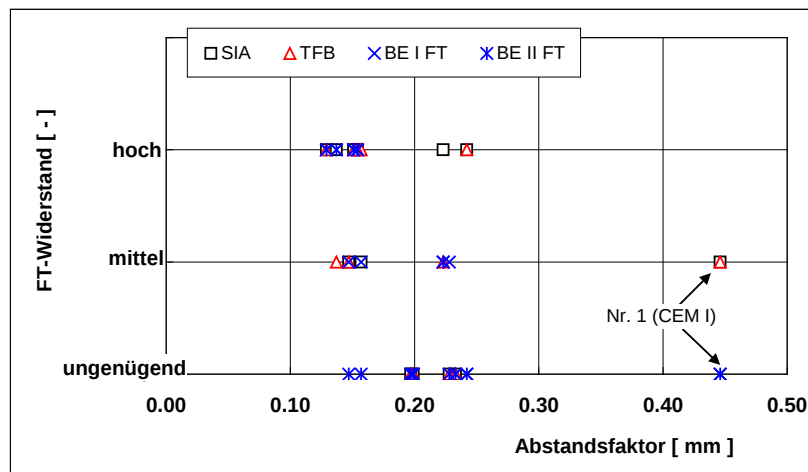
**Abb. 7** Abwitterung (abgelöste Betonmasse  $m$ ) nach der SIA-Prüfung in Abhängigkeit vom Luftgehalt des Frischbetons (oben) und des Festbetons (unten).



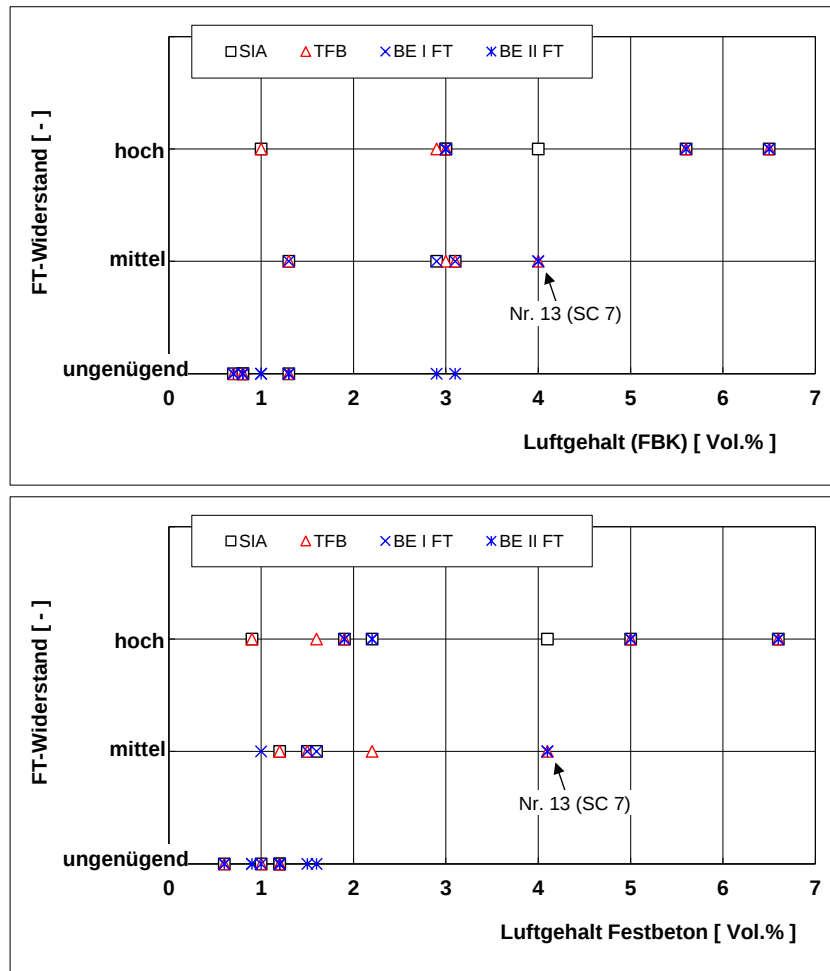
**Abb. 8** Abhängigkeit des FT-Widerstandes vom wasserfüllbaren Porenvolumen (oben), von der Gesamtporosität (Mitte) und der Trockenrohddichte des Betons (unten).

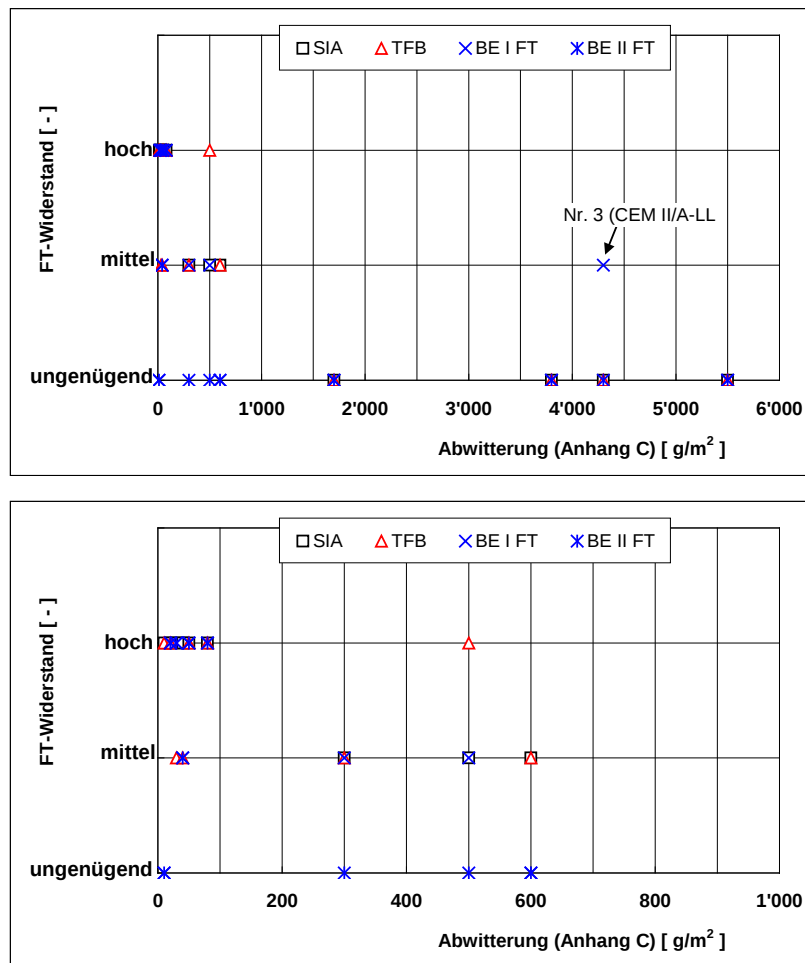


**Abb. 9** Abhängigkeit des FT-Widerstandes vom gesamten Luftporengehalt A (oben) und vom Mikroporenvolumen  $A_{300}$  (unten).



**Abb. 10** Abhängigkeit des FT-Widerstandes vom Abstandsfaktor.





**Abb. 12** Beurteilung des FT-Widerstandes mit den verschiedenen Prüfverfahren in Abhängigkeit von der abgelösten Betonmasse  $m$  nach der SIA-Prüfung. Ausschnitt aus Abbildung.

### 3.5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes wurden 13 Betone mit verschiedenen Zementen und einem w/z-Wert von 0.45 oder 0.50 hergestellt. Neben den üblichen Frisch- und Festbetonprüfungen wurde der Frosttaumittelwiderstand mit vier verschiedenen Prüfverfahren (SIA, TFB, BE I und BE II) geprüft.

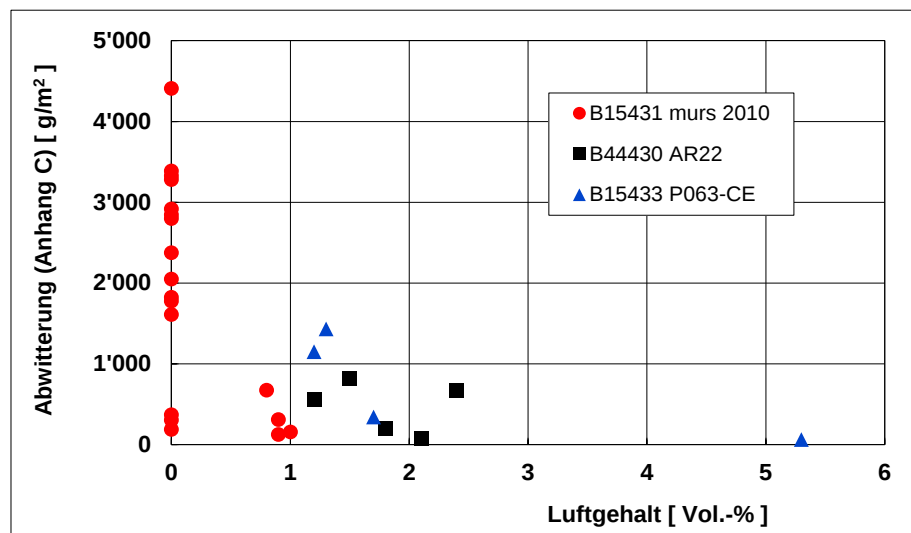
Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

- Abgesehen vom Luftgehalt gibt es zwischen verschiedenen Größen (z.B. Druckfestigkeit, w/z-Wert, Trockenrohichte, wasserfüllbares Porenvolumen, Gesamtporosität, Mikroporenvolumen und Abstandsfaktor) und dem FT-Widerstand keine erkennbaren Beziehungen.
- Bei Luftgehalten  $\geq 3$  Vol.-% im Frischbeton bzw.  $\geq 2$  Vol.-% im Festbeton nimmt der FT-Widerstand deutlich zu. Unterhalb dieser Werte hängt die Beurteilung teilweise von der Prüfmethode ab. Es gibt aber auch Betone, die trotz Luftgehalten  $< 2$  Vol.-% einen hohen FT-Widerstand aufweisen. Diese Beurteilung deckt sich mit Ergebnissen von Baustellenprüfungen (z.B. [Cuchet 2011, Cuchet 2015, Guma 2012]) (**Abb. 13**). Schon in früheren Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei einem Luftgehalt im Frischbeton von mindestens 3 Vol.-% mit der SIA-Prüfung bei 97% der Betone ein ho-

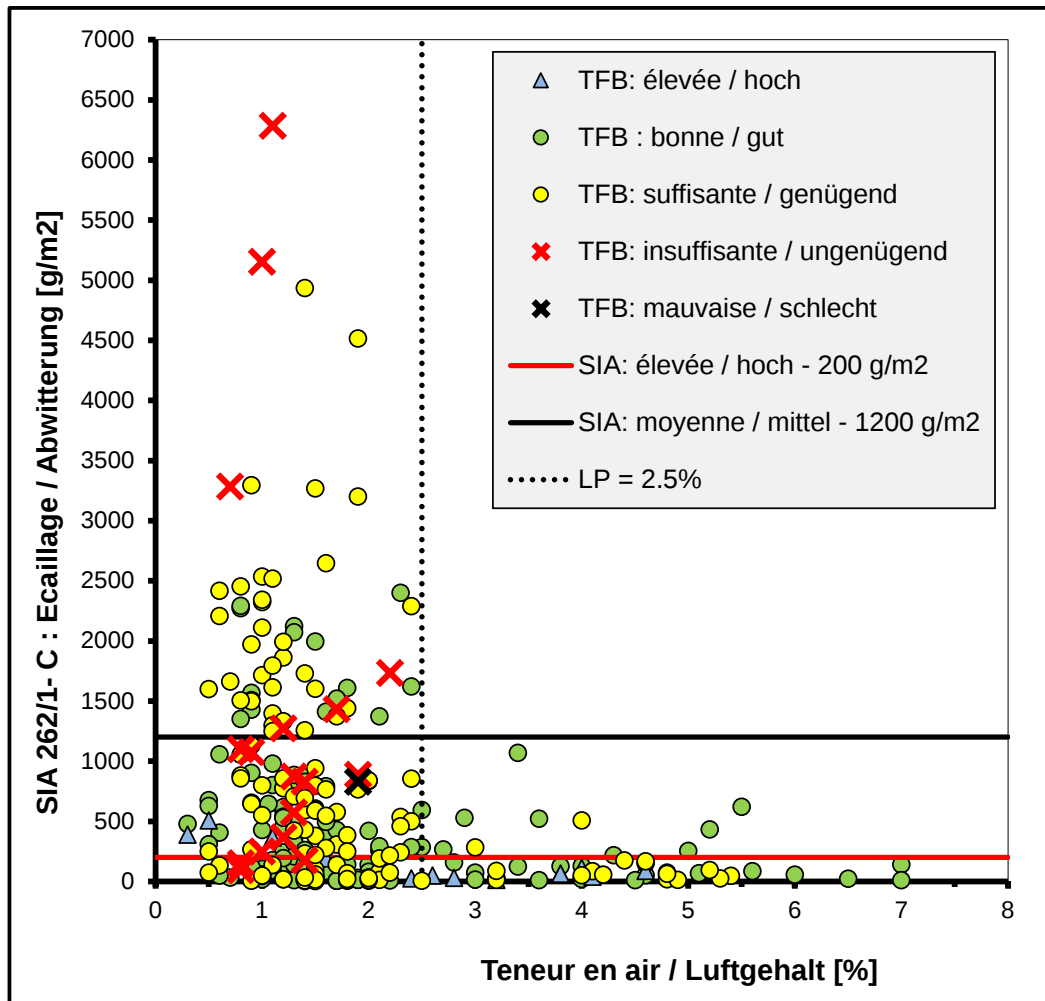
her FT-Widerstand erreicht wird [Jacobs 2007]. Aus **Abb. 13b** könnte weiter geschlossen werden, dass für eine mittlere FT-Beständigkeit der Grenzwert bei der SIA-Prüfung auf 2'000 g/m<sup>2</sup> angehoben werden könnte.

- Ein einzelnes Prüfverfahren stimmt durchschnittlich zu ca. 66% mit den übrigen Prüfungen überein. Die SIA-Prüfung hat mit durchschnittlich 62% die tiefste, die BE II-Prüfung mit durchschnittlich 67% die höchste Übereinstimmung. Die Prüfverfahren TFB und BE I liegen mit durchschnittlich 64% Übereinstimmung dazwischen. Diese Unterschiede können aber nicht als signifikant beurteilt werden.
- Die SIA-Prüfung beurteilt die Betone durchschnittlich ca. 75% gleich oder strenger wie die übrigen Prüfverfahren. Bei der TFB- und der BE I-Prüfung liegt dieser Wert bei 79%, bei der BE II-Prüfung bei 95%. Die BE II-Prüfung ist damit die strengste der Prüfungen, danach folgen die TFB- und die BE I-Prüfung und am Ende die SIA-Prüfung. Die Unterschiede zwischen der SIA-, TFB- und BE I-Prüfung sind gering.
- Zwischen den Prüfungen sind Unterschiede bis zu einer Klasse relativ häufig (im Mittel ca. 34%). Unterschiede bis zwei Klassen sind Ausnahmen.

Die Angaben zur prozentualer Übereinstimmung zwischen den Prüfungen ist nur für die geprüften Betone gültig. Für andere Betone, insbesondere bei einem anderen Verhältnis der Anzahl Betone ohne und mit künstlich eingeführter Luft, dürfte sich die Übereinstimmung ändern.



**Abb. 13a** Abhängigkeit der Abwitterung bei der SIA-Prüfung vom Luftgehalt im Frischbeton [Guma 2012]. Ergebnisse der Prüfungen im Rahmen der Instandsetzung von drei verschiedenen Bauwerken an der Autobahn N09 Vennes-Villeneuve. Betone mit einem w/z-Wert von 0.45. Zemente: CEM I 42,5 N und CEM II/A-LL 42,5 R. Flugasche: 25 bzw. 50 kg/m<sup>3</sup>.



**Abb. 13b** Abhängigkeit der Abwitterung bei der SIA-Prüfung vom Luftgehalt im Frischbeton und Beurteilung mit der TFB-Prüfung [Cuchet 2015]. Bei Betonen mit einem Luftgehalt unter ca. 2.5 Vol.-% kann die Abwitterung in der SIA-Prüfung hoch sein. In vielen Fällen bestehen solche Betone jedoch die TFB-Prüfung. Hohe Luftgehalte führen in der Regel bei beiden Prüfungen zu einem hohen Frosttaumittelwiderstand. Betone mit der Beurteilung „gut“ gemäss TFB-Prüfung weisen in der SIA-Prüfung Abwitterungen bis etwa 2'500 g/m² auf.



## 4 Felduntersuchungen

### 4.1 Auslagerung der Versuchsplatten

Als Auslagerungsort konnte der Streifen neben der Fahrbahn bzw. die Fläche zwischen der Leitplanke und der Lärmschutzwand bei der Autobahneinfahrt St. Gallen Ost-Buriet/Thal in Fahrtrichtung St. Margrethen genutzt werden. Details sind in der Standortskizze im **Anhang 5** zu finden. Wegen der Beschattung durch die Lärmschutzwand werden die Platten lediglich im Sommer in den Morgenstunden besonnt. Den restlichen Tag liegen die Platten im Schatten.

Mit diesem Auslagerungsort war die gewünschte starke Chloridbelastung gewährleistet. Weiter waren die Platten so auch jederzeit zugänglich. Der Auslagerungsort liegt auf 399 m.ü.M. Die erlaubte Höchstgeschwindigkeit auf diesem Abschnitt beträgt 120 km/h.

Bei Betonsorten 1 bis 12 wurden am 6.11.2012 je zwei Versuchsplatten (50 x 50 x 15 cm<sup>3</sup>) auf Kanthölzern ausgelegt (**Abb. 14**). Bei den Spritzbetonen 13 und 14 war es je nur 1 Platte. Zu dieser Zeit hatten die Platten ein Alter von ca. 2 ½ (Betone 1 bis 12) bzw. 8 Monaten (Betone 13 und 14).



**Abb. 14** Auslagerung der Versuchsplatten.

### 4.2 Auslagerungsbedingungen

Altenrhein ist die zum Auslagerungsort nächst gelegene Meteostation von MeteoSchweiz. In Altenrhein wird der Niederschlag erst seit 07.01.2014 gemessen, die Sonnenscheindauer gar nicht. Für diese Daten wurden daher jene der Meteostation St. Gallen genommen. Von MeteoSchweiz wurden daher die Klimadaten von Altenrhein und St. Gallen für die Periode 01.07.2012 bis 31.03.2014 gekauft.

Von Herrn Rudolf Frischknecht, Werkhof Thal (Nationalstrassen Gebiet VI), erhielten wir Angaben zur Anzahl der Einsätze pro Monat mit Räumen und Streuen sowie der Einsätze mit nur Streuen (**Tab. 18**). Beim Streuen wurden gemäss Herrn Frischknecht pro Einsatz 10 g/m<sup>2</sup> Salz ausgetragen.

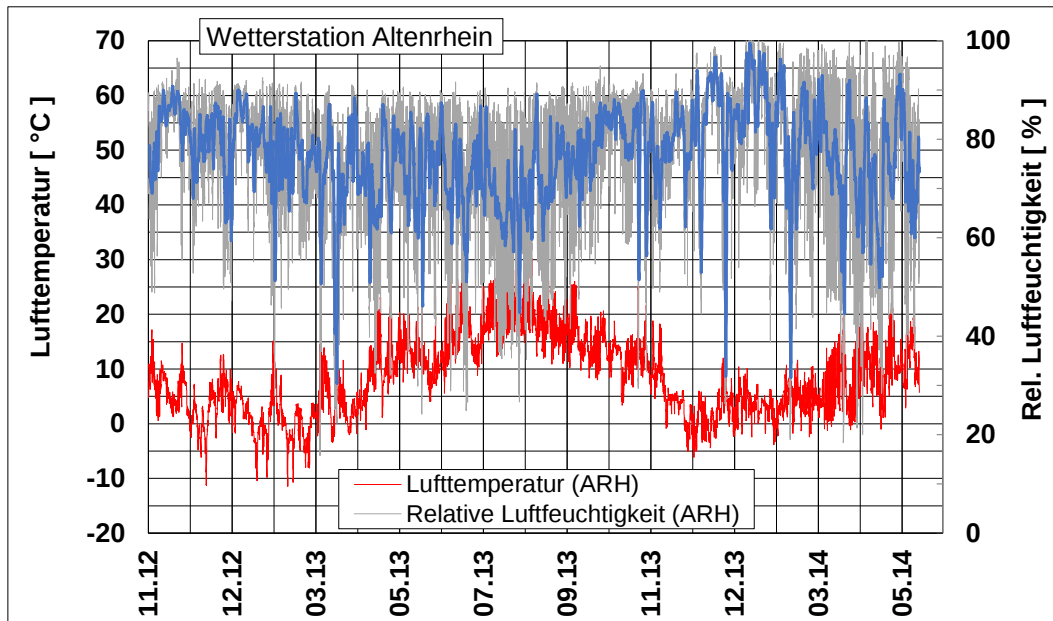
**Tab. 18** Monatliche Anzahl der Einsätze mit Räumen und Streuen sowie mit Streuen (Angaben Werkhof, Herr Frischknecht) seit Beginn der Auslagerung der Platten.

| Zeitraum                             | Räumen + Streuen | NUR Streuen | Total Streuen |
|--------------------------------------|------------------|-------------|---------------|
| November 2012                        | 1                | 2           | 3             |
| Dezember 2012                        | 36               | 6           | 42            |
| Januar 2013                          | 18               | 12          | 30            |
| Februar 2013                         | 37               | 14          | 51            |
| März 2013                            | 4                | 9           | 13            |
| April 2013                           | 0                | 2           | 2             |
| <b>Total 2012/2013</b>               | <b>96</b>        | <b>45</b>   | <b>141</b>    |
| <b>Salzausstrag, g/m<sup>2</sup></b> | <b>960</b>       | <b>450</b>  | <b>1410</b>   |
| November 2013                        | 7                | 2           | 9             |
| Dezember 2013                        | 1                | 10          | 11            |
| Januar 2014                          | 2                | 3           | 5             |
| Februar 2014                         | 0                | 2           | 2             |
| März 2014                            | 0                | 1           | 1             |
| <b>Total 2013/2014</b>               | <b>10</b>        | <b>18</b>   | <b>28</b>     |
| <b>Salzausstrag, g/m<sup>2</sup></b> | <b>100</b>       | <b>180</b>  | <b>280</b>    |

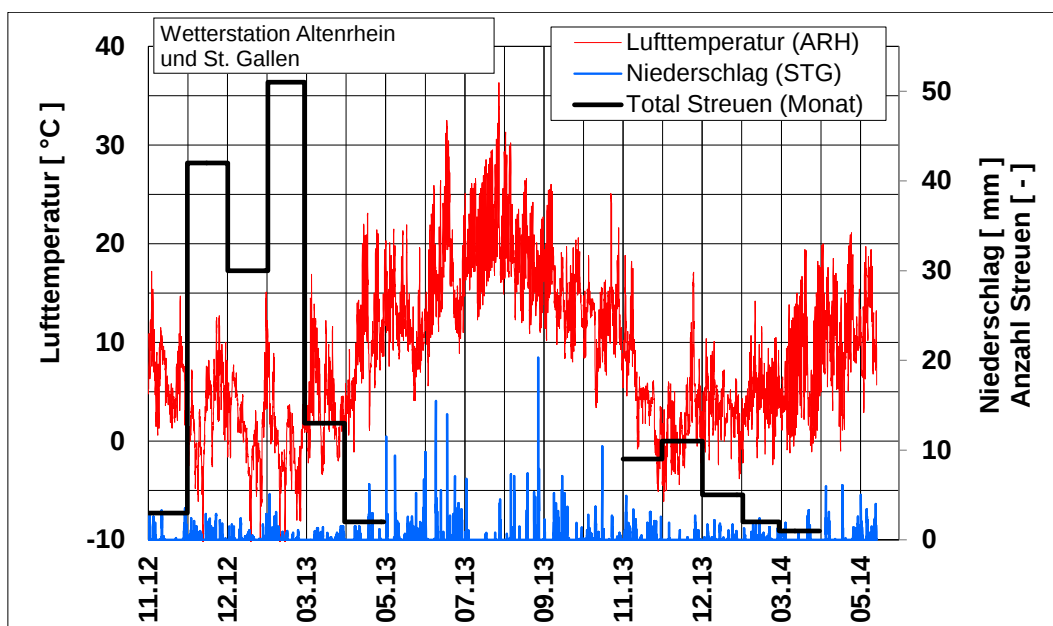
Die **Abb. 15** zeigt den Verlauf der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit, **Abb. 16** den Verlauf der Lufttemperatur, der Niederschläge sowie der Anzahl der Streusalzeinsätze.

Aus den vorhandenen Angaben ergibt sich Folgendes:

- Der Winter 2012/2013 war deutlich kälter als der Winter 2013/2014. Die mittlere Temperatur vom November 2012 bis Ende März 2013 lag bei 2.8 °C, im Folgejahr bei 4.2 °C.
- In den beiden Wintern unterschied sich die mittlere relative Luftfeuchtigkeit nur wenig (2012/2013: 77.9%; 2013/2014: 80.7%).
- Im Winter 2013/2014 (Nov. bis März) gab es mit 335 mm deutlich weniger Niederschläge als in der Vorperiode (494 mm).
- Die Anzahl der Streusalzeinsätze lag im Winter 2013/2014 lediglich bei ca. 20% der Einsätze im Vorjahreswinter; der Streusalzausstrag sogar nur bei etwa 10%.



**Abb. 15** Lufttemperatur (rot) und relative Luftfeuchtigkeit (grau) und gleitender Durchschnitt über 24 Werte (blau) vom Nov. 2012 bis Mai 2014.



**Abb. 16** Lufttemperatur und Niederschlag sowie die Anzahl Streusalzausträge vom Nov. 2012 bis Mai 2014.

Aus den Angaben zur Temperatur wurde die Anzahl der Nulldurchgänge (= Abfall der Temperatur unter 0°C und darauf folgender Anstieg über die Nullgradgrenze) ermittelt (**Tab. 19**). Dazu ist Folgendes zu beachten:

- Die Betontemperatur folgt mit einer gewissen Verzögerung der Lufttemperatur. Da die Betontemperatur nicht gemessen wurde, können keine sicheren Angaben zur Anzahl der effektiven Nulldurchgänge gemacht werden, und wegen des Fehlens des Temperaturprofils, auch nicht zur Gefrietiefe.

- Für die tatsächliche Belastung durch die Frostphase sind neben der Anzahl der Nulldurchgänge auch die Länge der Kältephasen und die dabei auftretenden Minimaltemperaturen zu berücksichtigen. Dies beeinflusst auch die Gefriertiefe.
- Der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Kältephasen beeinflusst die Auftautiefe. Ist der zeitliche Abstand kurz, ist es durchaus möglich, dass der Beton in grösserer Tiefe gar nicht auftauen kann.
- Daraus ist zu folgern, dass das Zählen der Nulldurchgänge der Luft- oder der oberflächlichen Betontemperatur nicht zwingend der effektiven Anzahl Gefrier- und Auftauphasen in einer bestimmten Tiefe entspricht. Temperatur und Dauer einer einzelnen Kälteperiode spielen hier eine wichtige Rolle.
- Die in **Tab. 19** angegebene Anzahl Nulldurchgänge zeigt kein konstantes Bild. Bei Nulldurchgängen mit Temperaturen bis  $\leq -3\text{ °C}$  erscheint der Winter 2013/2014 strenger als der Winter 2012/2013. Dies trifft wohl nicht zu. Betrachtet man hingegen die Nulldurchgänge mit anschliessenden Temperaturen  $\leq -5\text{ °C}$  ist die Beurteilung umgekehrt.
- Zwischen dem Salzaustrag (**Tab. 18**) und der Anzahl der Nulldurchgänge (**Tab. 19**) besteht keine erkennbare Korrelation.

**Tab. 19** Anzahl der Nulldurchgänge vom Nov. 2012 bis Mai 2014.

| Periode                      | Anzahl Nulldurchgänge |                     |                     |                    |
|------------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
|                              | $\leq -5\text{ °C}$   | $\leq -3\text{ °C}$ | $\leq -1\text{ °C}$ | $\leq 0\text{ °C}$ |
| Nov. 2012 - Juni 2013        | 7                     | 10                  | 24                  | 33                 |
| Juli 2013 - Mai 2014         | 2                     | 11                  | 32                  | 56                 |
| Total Nov. 2012 bis Mai 2014 | 9                     | 21                  | 56                  | 89                 |

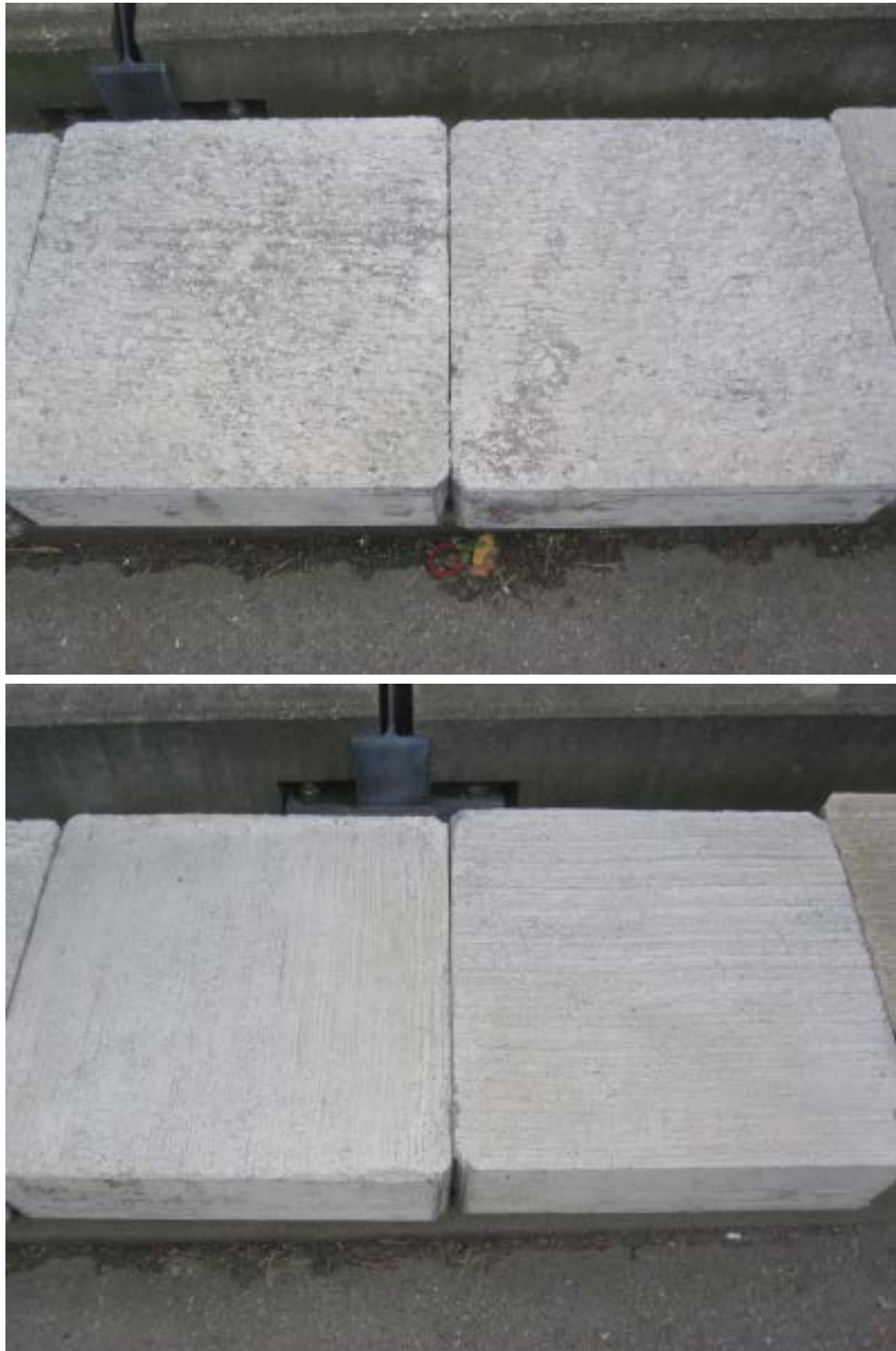
## 4.3 Ergebnisse

### 4.3.1 Visuelle Beurteilung Herbst 2013

Am 18.10.2013 wurden die seit anfangs November 2012 im Freien gelagerten Versuchsplatten visuell begutachtet und der Zustand fotografisch dokumentiert. Sämtliche Platten waren in einem guten Zustand. Die **Abb. 17** zeigt die Oberfläche der Betone mit den höchsten, die **Abb. 18** die Betone mit der tiefsten abgelösten Betonmasse m gemäss SIA-Prüfung.



**Abb. 17** Zustand der Versuchsplatten am 18.10.2013. Oben: Beton 3. Unten: Beton 8.

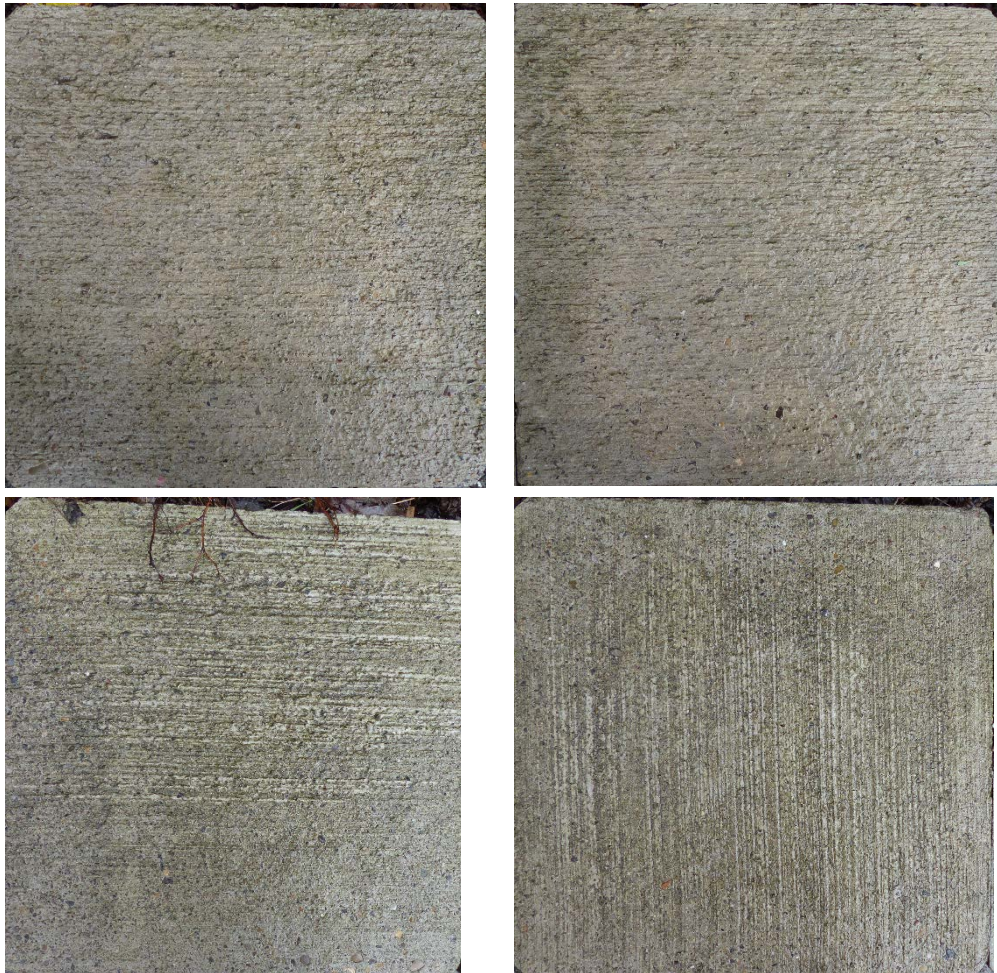


**Abb. 18** Zustand der Versuchsplatten am 18.10.2013. Oben: Beton 5. Unten: Beton 12

### 4.3.2 Visuelle Beurteilung Frühling 2014

Am 14.05.2014 wurden die ausgelegten Platten nach dem zweiten Winter erneut visuell begutachtet. Die **Abb. 19** bis **Abb. 21** zeigen die Oberflächen verschiedener Betone. Visuell konnte bei keiner Platte ein Frosttaumittelangriff beobachtet werden.

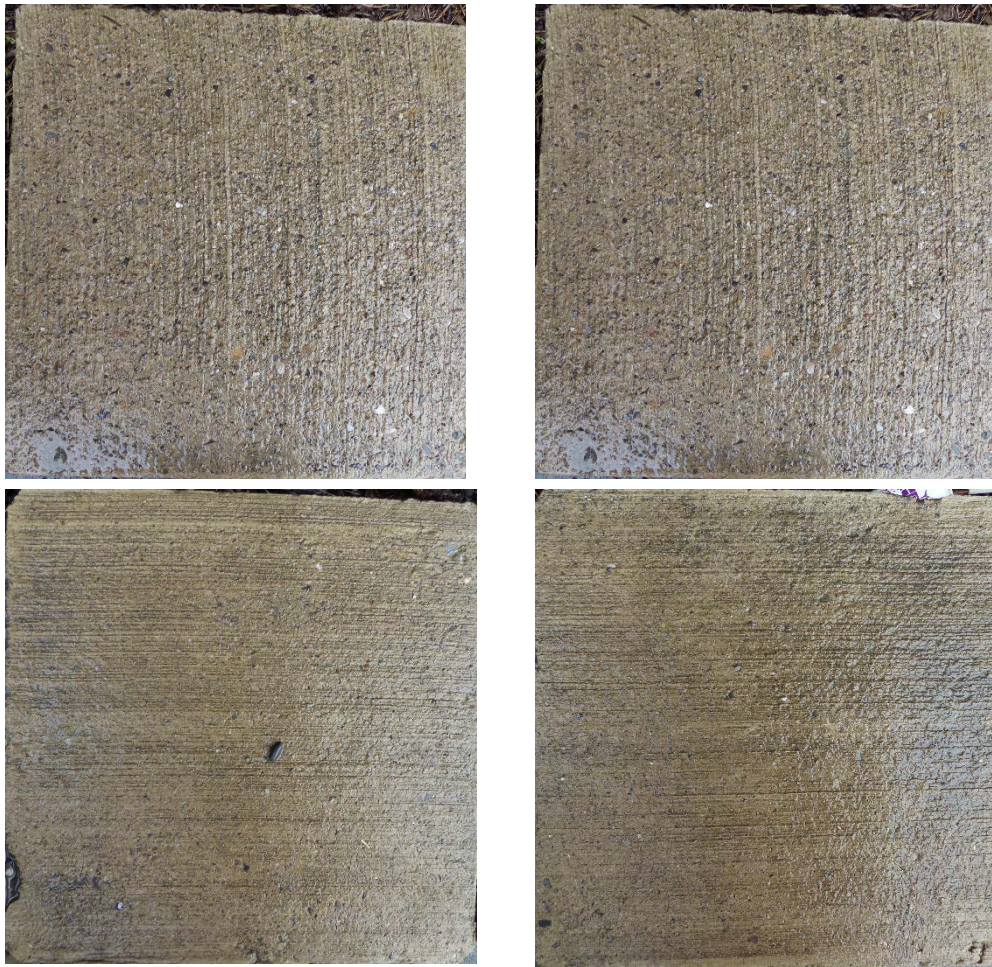
Zur gleichen Zeit wurden auch die Bohrkern für die weiteren Untersuchungen entnommen.



**Abb. 19** Zustand der Versuchsplatten am 14.05.2014. Oben: Beton 3. Unten: Beton 8 (jeweils linke und rechte Platte, Blickrichtung Südwesten).



**Abb. 20** Zustand der Versuchsplatten am 14.05.2014. Oben: Beton 5. Unten: Beton 12 (jeweils linke und rechte Platte, Blickrichtung Südwesten).



**Abb. 21** Zustand der Versuchsplatten der Betone mit CEM III/B und einem w/z-Wert von 0.45 am 14.05.2014. Oben: Beton 9 ohne LP. Unten: Beton 10 mit LP (jeweils linke und rechte Platte, Blickrichtung Südwesten).

#### 4.3.3 Chloridgehalt der Betonplatten nach zwei Wintern

Um die Intensität der Streusalzbeaufschlagung der Platten zu beurteilen und, um sicher zu sein, dass in der Tat Streusalz in den Beton eingedrungen ist, wurden nach zwei Wintern die Chloridprofile an je einem Bohrkern ermittelt.

Die Bohrkern (Ø 50 mm, Länge ≈ 120 mm) für die Chloridanalysen wurden am 14.05.2014 von der lärmschutzwandseitigen Hälfte links entnommen, jeweils 125 mm von den Plattenrändern entfernt (**Abb. 22**). Die Bohrlöcher wurden anschliessend mit einem schnellabbindenden Reparaturmörtel verschlossen.

An diesem Bohrkern wurden die mikroskopische Gefügeanalyse und die Bestimmung des Chloridgehaltes durchgeführt.

Die Chloridanalysen wurden gemäss SN EN 14629, geändertes Verfahren, d.h. mit dem Heisswasser- statt Säureaufschluss, durchgeführt. Die mit Heisswasser bestimmten Chloridgehalte liegen bei ca. 80 – 90% der Werte aus dem Säureaufschluss. Die Ergebnisse sind in der **Tab. 20** enthalten und in **Abb. 23** dargestellt. Es zeigt sich, dass die Chloride bereits über 30 mm tief eingedrungen sind. Auffallend sind der SVB (Beton 12) mit höheren Chloridgehalten und die Spritzbetone (Beton 13 und 14) mit deutlich tieferen

Chloridgehalten als die übrigen Betone. Ein Einfluss der Zementart kann nicht festgestellt werden.

Die Ergebnisse lassen noch keinen Rückschluss auf die Wirkung von künstlich eingeführter Luft auf den Chlorideintrag erkennen.



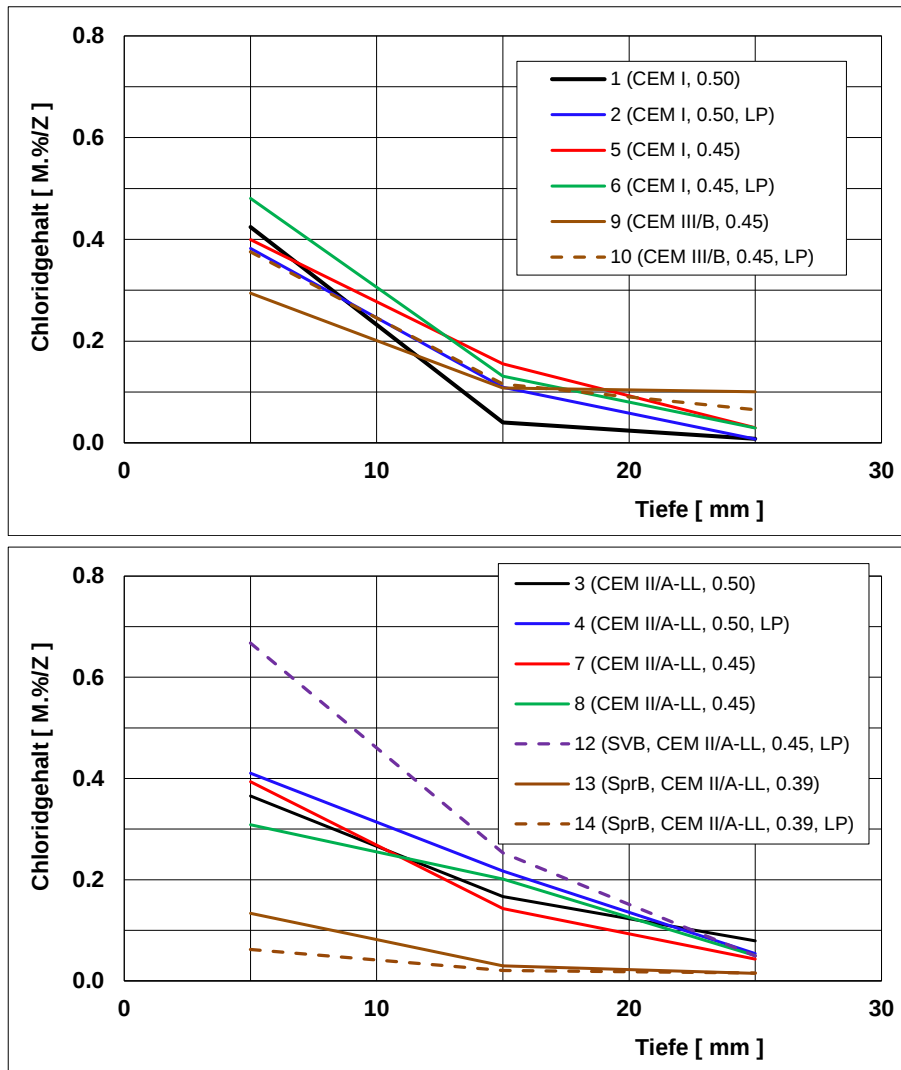
**Abb. 22** Entnahme der Bohrkern am 14./15.05.2014.

**Tab. 20** Chloridgehalt im Frühjahr 2014 nach zwei Wintern

| Beton Nr.                           |            | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
|-------------------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Zementgehalt, kg/m <sup>3</sup>     |            | 300   | 300   | 300   | 300   | 320   | 320   | 320   |
| Trockenrohdichte, kg/m <sup>3</sup> |            | 2'402 | 2'340 | 2'384 | 2'324 | 2'366 | 2'329 | 2'289 |
| Umrechnungsfaktor                   |            | 8.0   | 7.8   | 7.9   | 7.7   | 7.4   | 7.3   | 7.2   |
| Chloridgehalt, M.-%/Z               | 0 - 10 mm  | 0.42  | 0.38  | 0.37  | 0.41  | 0.40  | 0.48  | 0.39  |
|                                     | 10 - 20 mm | 0.04  | 0.11  | 0.17  | 0.22  | 0.16  | 0.13  | 0.14  |
|                                     | 20 - 30 mm | 0.01  | 0.01  | 0.08  | 0.05  | 0.03  | 0.03  | 0.04  |

**Tab. 20** Chloridgehalt im Frühjahr 2014 nach zwei Wintern (Fortsetzung)

| Beton Nr.                                     |            | 8     | 9     | 10    | 12    | 13    | 14    |
|-----------------------------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Zementgehalt, kg/m <sup>3</sup> <sup>4)</sup> |            | 320   | 320   | 320   | 320   | 450   | 425   |
| Trockenrohdichte, kg/m <sup>3</sup>           |            | 2'298 | 2'297 | 2'312 | 2'248 | 2'230 | 2'201 |
| Umrechnungsfaktor                             |            | 7.2   | 7.2   | 7.2   | 7.0   | 5.0   | 5.2   |
| Chloridgehalt, M.-%/Z                         | 0 - 10 mm  | 0.31  | 0.29  | 0.38  | 0.67  | 0.13  | 0.06  |
|                                               | 10 - 20 mm | 0.20  | 0.11  | 0.12  | 0.25  | 0.03  | 0.02  |
|                                               | 20 - 30 mm | 0.05  | 0.10  | 0.07  | 0.05  | 0.01  | 0.02  |



**Abb. 23** Chloridgehalt der Platten im Frühjahr 2014 nach 2 Wintern.

#### 4.3.4 Mikroskopische Gefügeanalysen des Betons nach zwei Wintern

Die Entnahme der Bohrkerns wurde bereits im vorhergehenden Kapitel beschrieben. Die Präparation der Dünnschliffe erfolgte liegend (Breite 50 mm).

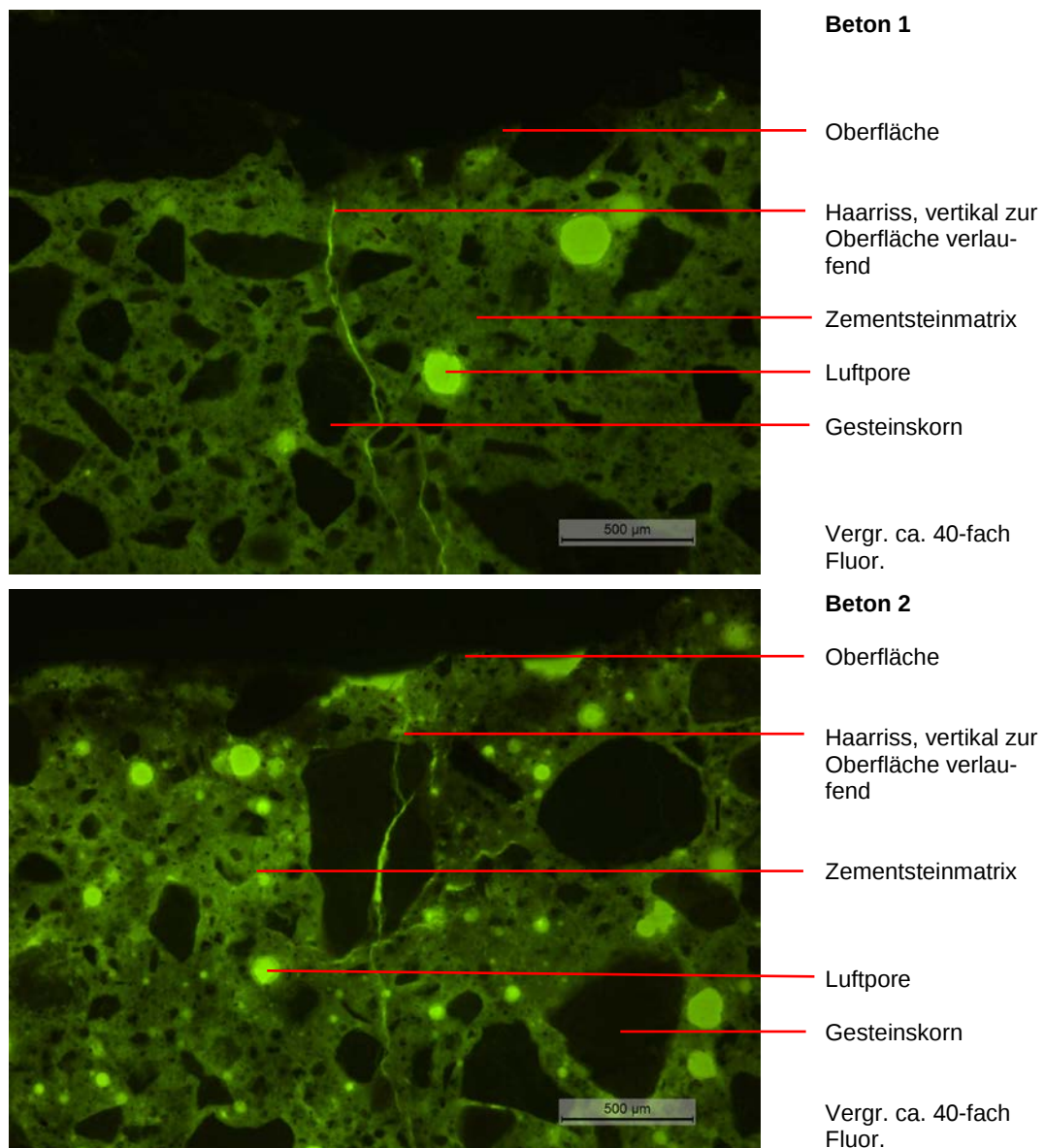
In der **Tab. 21** sind die Ergebnisse der mikroskopischen Gefügeanalysen für jeden Beton beschrieben. Die Tiefe der Bindemittelerosion wurde anhand der vorstehenden Körner gemessen. Die Erosion bezieht sich nur auf das Bindemittel. Soweit ersichtlich liegen keine Kornausbrüche vor. Die verschiedenen Oberflächenrauigkeiten wurden berücksichtigt, indem bei den Erosionsmessungen die „Nulllatte“ auf die, soweit nachvollziehbar, höchsten Erhebungen gelegt wurde.

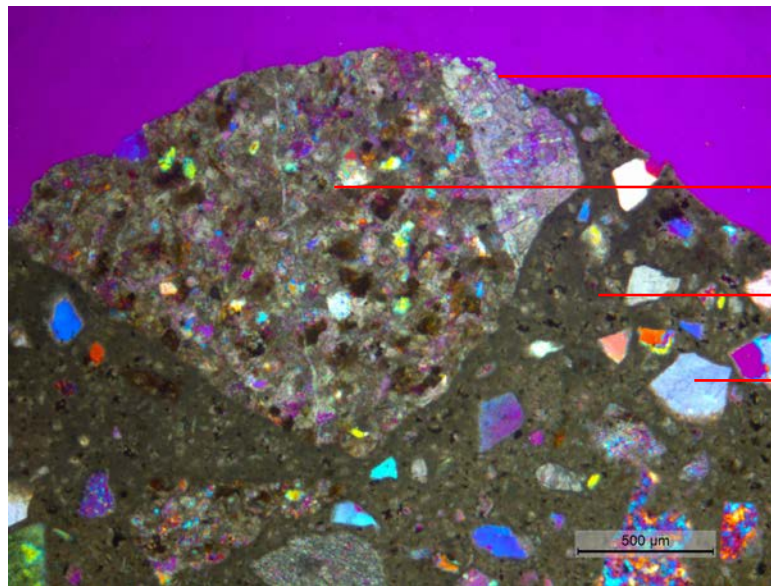
**Tab. 21** Ergebnisse der mikroskopischen Gefügeanalysen

| <b>Beton Gefügebeurteilung bis ca. 30 mm Profiltiefe</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nr.</b>                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 1                                                        | Gesamthaft gute Gefügequalität. Drei vertikal zur Oberfläche verlaufende Haarrisse bis 5 mm Profiltiefe. Keine Rissverfüllungen.<br>An Oberfläche leicht vorstehende Korntextur (Bindemittelerosion). Lokale Karbonatisierung bis maximal 0.3 mm.<br>Mit Ausnahme einer geringen Bindemittelerosion keine Schädigung erkennbar.    |
| 2                                                        | Gesamthaft gute Gefügequalität des LP- Betons. Zwei vertikal zur Oberfläche verlaufende Haarrisse bis 4 mm Profiltiefe. Keine Rissverfüllungen. Karbonatisierungstiefe 0.3 - 0.5 mm.<br>Keine Schädigung erkennbar.                                                                                                                |
| 3                                                        | Grundsätzlich gute Gefügequalität. Keine Luftporeneinführung. Oberfläche mit einem Vertikalriss, Breite < 0.05 mm, bis in eine Profiltiefe von 5 mm reichend.<br>Karbonatisierungstiefe um 0.5 mm.<br>Mit Ausnahme einer geringen Bindemittelerosion keine Schädigung erkennbar.                                                   |
| 4                                                        | Gesamthaft gute Gefügequalität. Die künstlich eingeführten Luftporen sind in wenigen Fällen feinklunkernförmig ausgebildet, speziell im Oberflächenbereich.<br>Wenige Haarrisse vorhanden.<br>Karbonatisierungstiefe 0.3 - 0.5 mm.<br>Mit Ausnahme einer geringen Bindemittelerosion keine Schädigung erkennbar.                   |
| 5                                                        | Grundsätzlich gute Gefügequalität. Keine Luftporeneinführung. Oberfläche mit vergleichsweise höherer Bindemittelkapillarität und Feinklunkern.<br>Keine Risse vorhanden.<br>Karbonatisierungstiefe 0.3 - 0.5 mm.<br>Mit Ausnahme einer geringen Bindemittelerosion keine Schädigung erkennbar.                                     |
| 6                                                        | Gutes Betongefüge mit künstlicher Luftporeneinführung.<br>Keine Risse feststellbar.<br>Karbonatisierungstiefe 0.5 - 1.0 mm.<br>Mit Ausnahme einer sehr geringen Bindemittelerosion keine Schädigung erkennbar.                                                                                                                     |
| 7                                                        | Grundsätzlich gute Gefügequalität. Keine Luftporeneinführung.<br>Von Oberfläche zwei Vertikalrisse, Breiten < 0.05 mm, bis in eine Profiltiefe von 5 mm strahlend. Keine Rissverfüllungen.<br>Karbonatisierungstiefe 0.2 - 1.2 mm.<br>Mit Ausnahme einer geringen Bindemittelerosion keine Schädigung erkennbar.                   |
| 8                                                        | Grundsätzlich gute Gefügequalität. Keine Luftporeneinführung.<br>Oberfläche mit Tendenz zur feinklunkernförmigen Verdichtungs-porenbildung.<br>Karbonatisierungstiefe 0.2 - 1.0 mm.<br>Mit Ausnahme einer geringen Bindemittelerosion keine Schädigung erkennbar.                                                                  |
| 9                                                        | Grundsätzlich gute Gefügequalität. Mit künstlicher Luftporeneinführung.<br>Oberfläche mit Tendenz zur feinklunkernförmigen Verdichtungs-porenbildung und spinnwebartigen Haarrissen. Keine Rissverfüllungen.<br>Karbonatisierungstiefe 0.5 - 4.0 mm.<br>Mit Ausnahme einer geringen Bindemittelerosion keine Schädigung erkennbar. |
| 10                                                       | Gute Gefügequalität des Luftporenbetons.<br>Von Oberfläche zwei Vertikalrisse mit Breiten < 0.05 mm bis in 10 mm Profiltiefe strahlend.<br>Karbonatisierungstiefe 2.0 – 5.0 mm.<br>Mit Ausnahme einer geringen Bindemittelerosion keine Schädigung erkennbar.                                                                      |

**Tab. 21** Ergebnisse der mikroskopischen Gefügeanalysen

|    |                                                                                                                                                                                                                                            |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12 | Hohes Luftporenvolumen mit Tendenz zur Agglomeratbildung.<br>Gesamthaft leicht gestörte Gefügequalität.<br>Maximale Karbonatisierungstiefe 0.5 mm.<br>Mit Ausnahme einer sehr geringen Bindemittelerosion keine Schädigung erkennbar.      |
| 13 | Gutes Betongefüge, mit künstlicher Luftporeneinführung (gemäss Rezept, jedoch keine künstliche Luftporeneinführung).<br>Karbonatisierungstiefe 0.5 - 2.5 mm.<br>Mit Ausnahme einer geringen Bindemittelerosion keine Schädigung erkennbar. |
| 14 | Gutes Betongefüge, mit künstlich eingeführten Luftporen.<br>Keine Karbonatisierungsfront feststellbar.<br>Mit Ausnahme einer sehr geringen Bindemittelerosion keine Schädigung erkennbar.                                                  |

**Abb. 24** Mikroskopische Gefügaufnahme im Fluoreszenzlicht. Beton 1 und 2.



### Beton 3

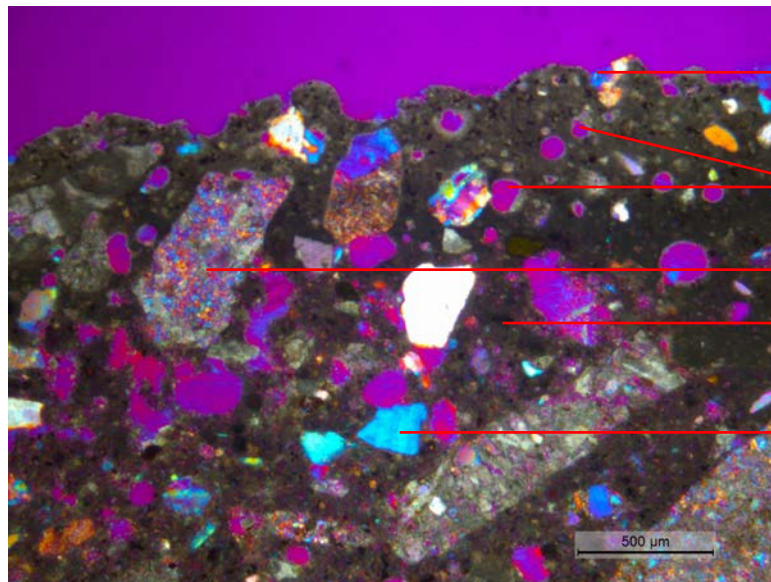
Oberfläche mit vorstehender Kornstruktur

Karbonatisches Mineral

Zementsteinmatrix karbonatisch

Silikatisches Mineral

Vergr. ca. 40-fach Pol.



### Beton 4

Oberfläche mit leicht vorstehender Kornstruktur

Luftporen

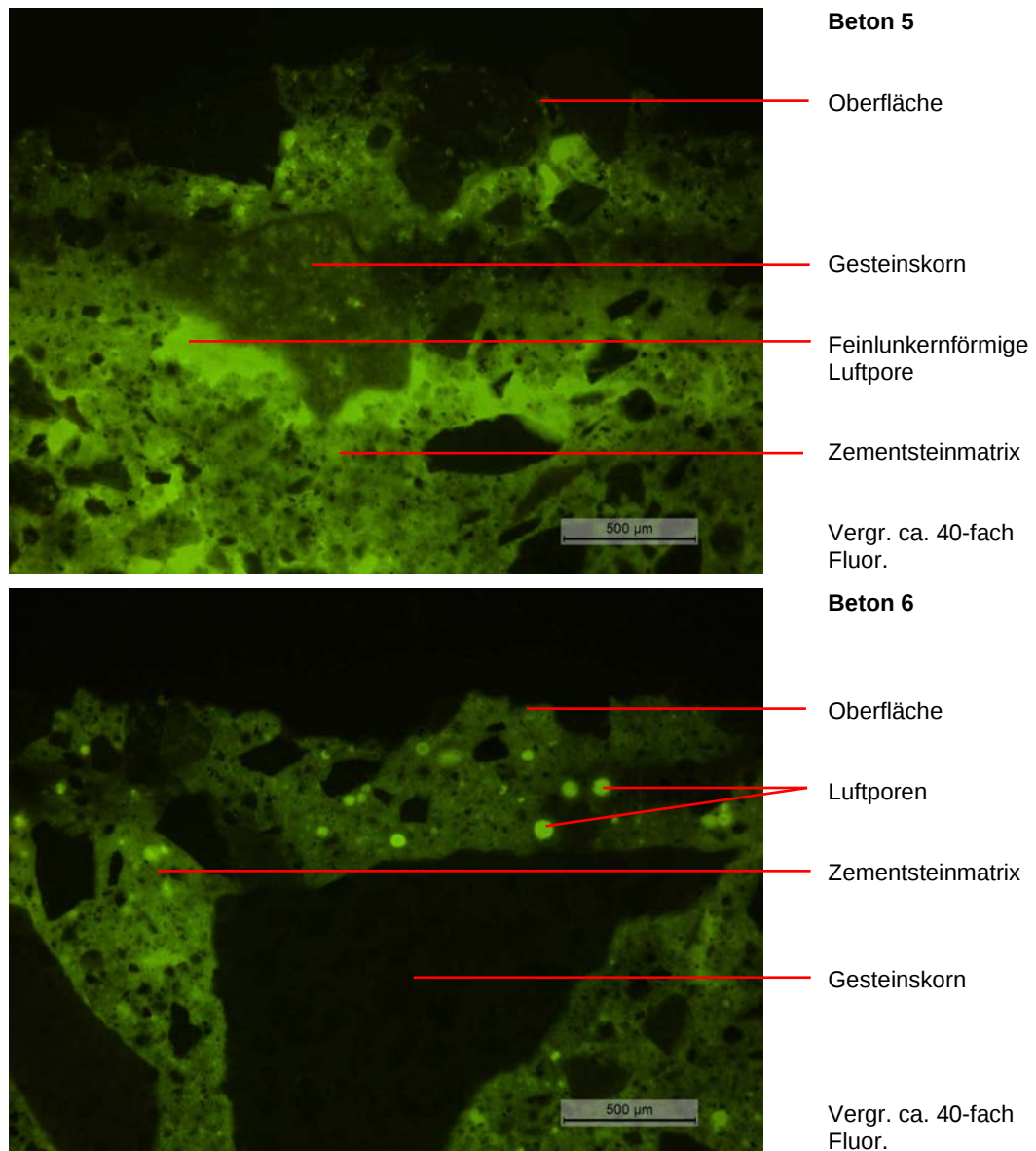
Karbonatisches Mineral

Zementsteinmatrix alkalisch

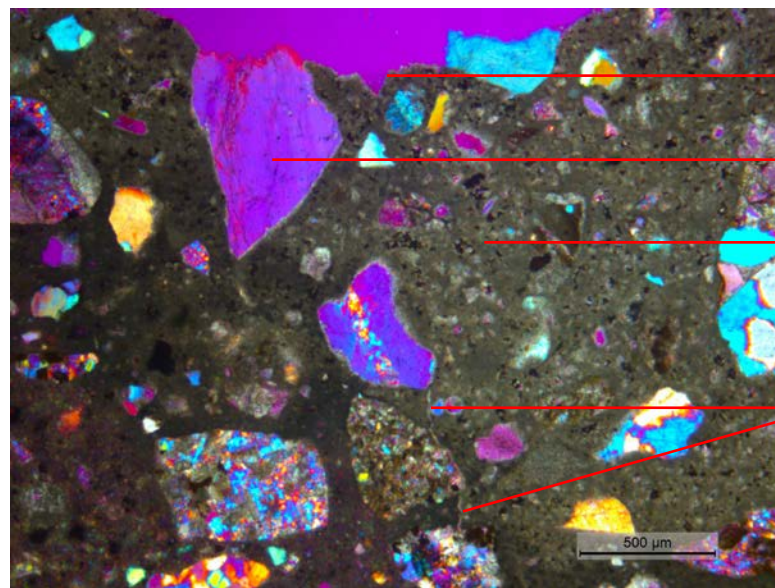
Silikatisches Mineral

Vergr. ca. 40-fach Pol.

**Abb. 25** Mikroskopische Gefügeaufnahme im Polarisationslicht. Beton 3 und 4.



**Abb. 26** Mikroskopische Gefügaufnahme im Fluoreszenzlicht. Beton 5 und 6.



### Beton 7

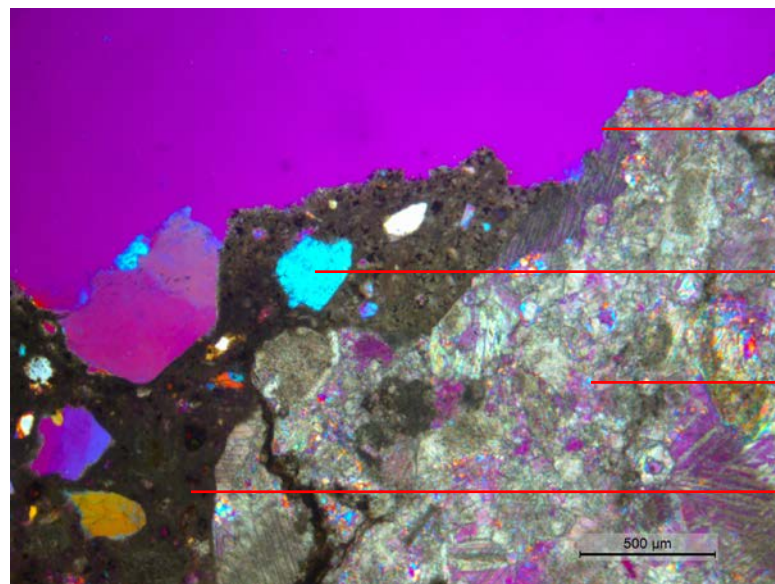
Oberfläche mit vorstehender Korntextur

Silikatisches Mineral

Zementsteinmatrix karbonatisch

Haarriss, vertikal zur Oberfläche verlaufend

Vergr. ca. 40-fach Pol.



### Beton 8

Oberfläche mit vorstehender Korntextur

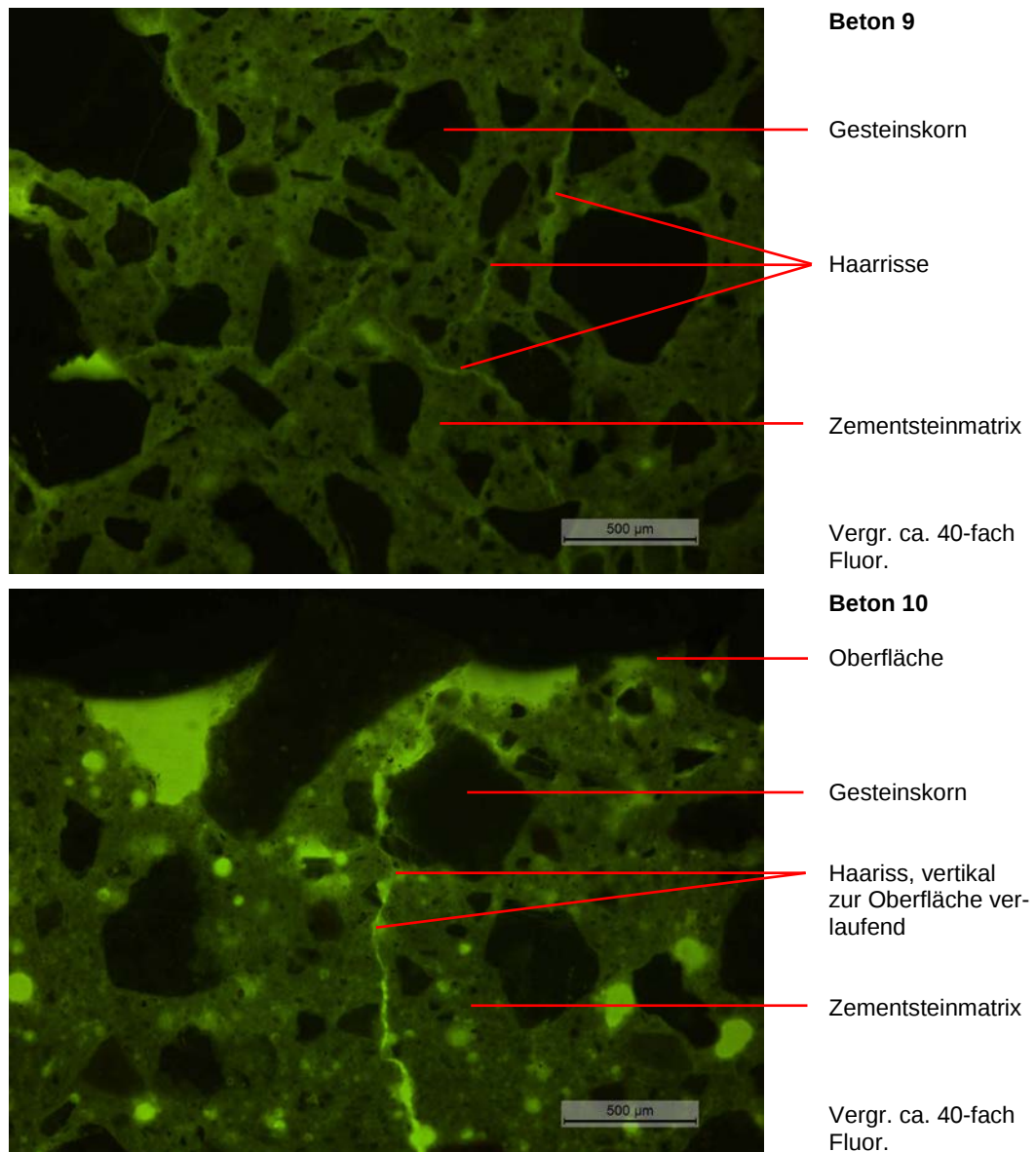
Silikatisches Mineral

Karbonatisches Mineral

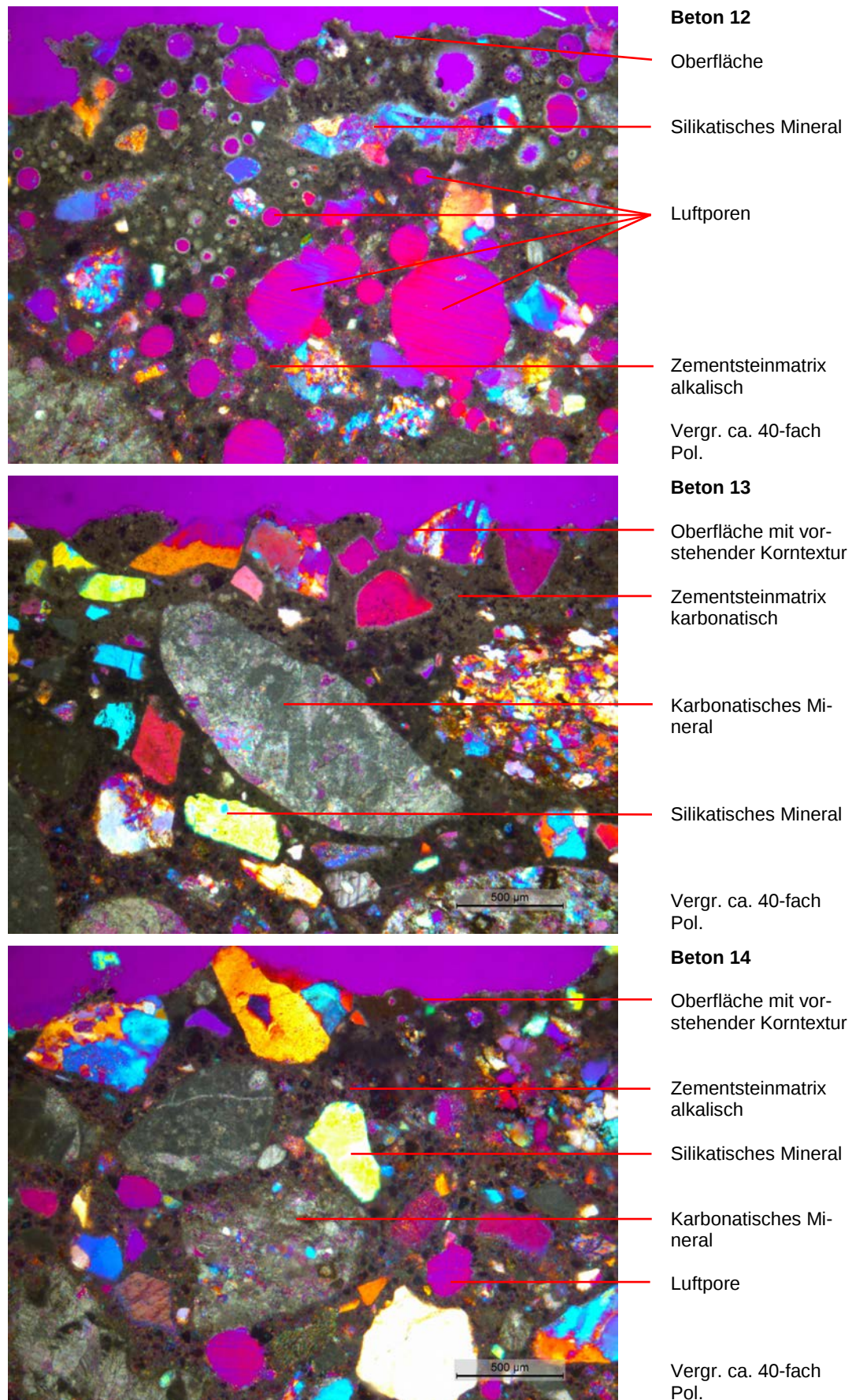
Zementsteinmatrix alkalisch

Vergr. ca. 40-fach Pol.

**Abb. 27** Mikroskopische Gefügeaufnahme im Polarisationslicht. Beton 7 und 8.



**Abb. 28** Mikroskopische Gefügeaufnahme im Fluoreszenzlicht. Beton 9 und 10.



**Abb. 29** Mikroskopische Gefügeaufnahme im Fluoreszenzlicht. Beton 12 bis 14.

Mit Ausnahme der Betone 2 und 12 weisen die Oberflächen eine vorstehende Korntextur bzw. eine leichte Bindemittelerosion auf. Die Platten Nr. 6 und 14 zeigen eine sehr geringe, die Platten Nr. 1, 3, 4, 5, 10 und 13 eine geringe oberflächliche Bindemittelerosion auf. Vergleichsweise liegen bei den Platten Nr. 7, 8 und 9 deutliche Bindemittelerosionen vor, absolut gesehen aber nicht als Schaden zu deklarieren. Die typischen Anzeichen einer Frosttausalzschädigung, geprägt durch flächige Abplatzungen und oberflächenparallele mehrlagige Rissbildungen sind bei keiner Probe zu beobachten. Dazu hat die bis dato erfolgte Exposition zu wenig selektive Auswirkungen auf die Oberflächen. In der **Tab. 22** sind die charakteristischen Oberflächenmerkmale, die sich aus der mikroskopischen Beurteilung an den Dünnschliffen ergeben haben, zusammengestellt.

**Tab. 22** Zusammenfassung der Ergebnisse der mikroskopischen Gefügeanalysen

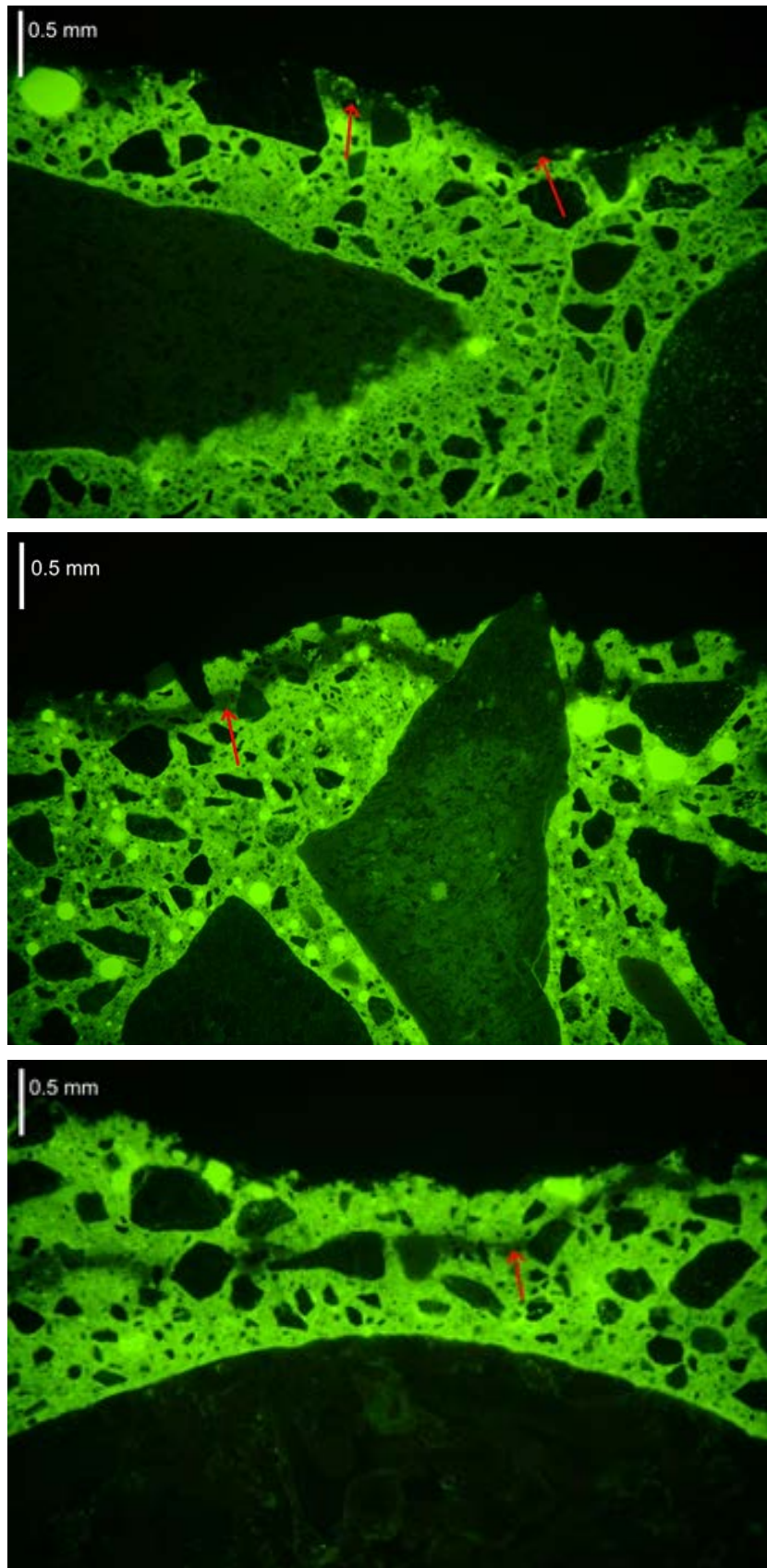
| Bindemittelerosion                                       | Plattennummer      |
|----------------------------------------------------------|--------------------|
| Keine bzw. sehr geringe vorstehende Korntextur, < 0.2 mm | 2, 6, 12, 14       |
| Gering vorstehende Korntextur, < 0.5 mm                  | 1, 3, 4, 5, 10, 13 |
| Deutlich vorstehende Korntextur, 0.5 mm - 1.0 mm         | 7, 8, 9            |

Ausser Beton 12 zeigen alle Betone eine auslaugungsinduzierte Kalkschicht (**Abb. 30**), d.h. die Karbonatisierung ist durch die Auslaugung und nicht durch die CO<sub>2</sub>-bedingte Karbonatisierung verursacht. Daraus kann gefolgert werden, dass die Betonplatten oft bzw. lang nass waren. Die Tiefenlage der Kalkschicht variiert zwischen den Betonen (unterschiedlicher Grad der Bindemittelerosion und Dichtigkeit der Betone). Es ist nicht klar, wie viel Material wirklich abgetragen ist. Beim Beton 1 ist beispielsweise das Material bis auf die Kalkschicht abgetragen, beim Beton 2 verläuft die Kalkschicht meist parallel zur Oberfläche, was darauf hinweisen könnte, dass gar kein Material abgetragen ist, d.h. die beobachtete Rauigkeit gab es von Anfang an wegen der Bearbeitung der plastischen Betonoberfläche. Die grosse Tiefe der Kalkschicht bei Beton 10 (ca. 15-20 mm) ist evtl. eine Folge der hohen Porosität dieses Betons.

Es gibt deutliche Anzeichen für Materialabtrag/Erosion in bestimmten Proben (z.B. Beton 1). Frost-Taumittel induziertes Absanden mit oberflächenparallelen Mikrorissen wurde nicht beobachtet. Eine Frost- bzw. Frosttaumittelschädigung muss sich allerdings nicht zwingend durch oberflächenparallele Risse ankündigen. Besonders in der Anfangsphase der Belastung kommt es zu Erosionen ohne oberflächenparallele Risse, da in dieser 2 - 3 Millimeter dicken Schicht oft eine Bindemittelanreicherung mit höherer Kapillarporosität, ein tieferer Hydratationsgrad sowie ein nicht ganz optimales Porenbild vorliegt. Nach den Erfahrungen der Forschungsstelle werden die typischen, mehrlagigen, oberflächenparallelen Risse durch Frosttaumittelbeanspruchung erst bei einer weitergehenden Belastung mit einem Absanden, d. h. Abtrag mit Kornausbrüchen gebildet. Kornausbrüche traten bei den untersuchten Oberflächen noch nicht ein. Es wäre folglich sinnvoll die aussengelagerten Platten noch 2 - 3 Winterperioden zu beobachten.

Es ist möglich, dass eine Beziehung zwischen Bindemittelerosionsgrad und Verhalten bei den FT-Prüfungen besteht. Dies ist aber noch kein eindeutiger Hinweis darauf, dass die in den Dünnschliffen beobachtete Erosion direkt durch die Frost-Taumiteleinwirkung verursacht wurde. Wasserinduziertes Auslaugen schwächt die Betonoberfläche.

Gemäss Angaben des Herstellers wurde dem Beton 13 kein LP-Mittel zugegeben. Gemäss der mikroskopischen Gefügeanalyse und der Prüfung der Porenkennwerte weist dieser Beton einen LP- Gehalt von über 4 Vol.-% auf. Die Ursache für diese Diskrepanz konnte nicht ermittelt werden.



**Abb. 30** Lage der Kalkschicht an der Oberfläche bei Beton 1 (oben), in einer Tiefe von 0.3 mm beim Beton 2 (Mitte) und in 0 bis 0.8 mm Tiefe bei Beton 3 (unten).

### 4.3.5 Vergleich mit den Ergebnissen der Prüfungen

Die drei Betone 7, 8 und 9 mit der vergleichsweise starken Bindemittelerosion weisen bei allen vier durchgeführten Prüfungen (SIA, TFB, BE I und BE II) einen einheitlich tiefen Frosttaumittelwiderstand auf.

Bei den Betonen 2, 6, 12 und 14 mit keiner oder einer vergleichsweise geringen Oberflächenerosion wurde mit drei Prüfverfahren (SIA, BE I und BE II) ein hoher Frosttaumittelwiderstand gefunden.

Die restlichen Betone 1, 3, 4, 5, 10 und 13 weisen bei den verschiedenen Prüfverfahren unterschiedliche Frosttaumittelwiderstände auf.

Gesicherte Folgerungen, welche der Prüfungen am ehesten das Verhalten der ausgelagerten Platte widerspiegelt, können zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht gezogen werden. Es wird angestrebt, im Rahmen eines Fortsetzungsprojektes, die Platten in einigen Jahren erneut zu begutachten.

Zwischen den Chloridgehalten und den Resultaten aus den vier FTW-Prüfmethoden (SIA, TFB, BE I und BE II) ist keine Korrelation feststellbar.

## 4.4 Zusammenfassung

Mit den 13 Betonen wurden Versuchsplatten (50 x 50 x 15 cm<sup>3</sup>) hergestellt und im Herbst 2012 entlang der Autobahneinfahrt St. Gallen Ost-Buriet/Thal in Fahrrichtung St. Margrethen hinter der Leitplanke zur Bewitterung ausgelegt. Der Auslagerungsort ist jederzeit zugänglich. Er liegt auf 399 m.ü.M. Die erlaubte Höchstgeschwindigkeit auf diesem Abschnitt beträgt 120 km/h.

Wegen der Beschattung durch die Lärmschutzwand werden die Platten lediglich in den Morgenstunden im Sommer besonnt. Den restlichen Tag liegen die Platten im Schatten.

Der Winter 2012/2013 war deutlich kälter als der Winter 2013/2014. Dies zeigte sich auch beim Streusalzaustrag. Im Winter 2012/2013 lag der Austrag bei 1'410 g/m<sup>2</sup>, im nachfolgenden milderer Winter lediglich bei 280 g/m<sup>2</sup>. Die doch starke Chloridbelastung der ausgelegten Platten zeigte sich auch bei den im Frühling ermittelten Chloridprofilen. In den ersten 10 mm lag der Chloridgehalt zwischen ca. 0.1 bis fast 0.7 M.-%. In 10-20 mm Tiefe lag der Gehalt unter 0.3, in 30-35 mm unter 0.1 M.-%.

Die Platten wurden im Herbst 2013 und im Frühling 2014 visuell begutachtet. Bei keiner Platte konnte ein wesentlicher Frosttaumittelangriff beobachtet werden.

Die mikroskopische Gefügeanalyse ergab, dass die Betone mehr oder weniger leicht absanden bzw. eine gewisse Bindemittelerosion zeigen. Die typischen Anzeichen einer Frosttausalzschädigung, geprägt durch flächige Abplatzungen und oberflächenparallele mehrlagige Rissbildungen sind bei keinem Beton zu beobachten.

Die drei Betone 7, 8 und 9 mit der stärksten Bindemittelerosion weisen bei allen vier durchgeführten Prüfungen (SIA, TFB, BE I und BE II) einen tiefen FT-Widerstand auf. Bei den Betonen 2, 6, 12 und 14 mit keiner oder einer vergleichsweise geringen Oberflächenerosion wurde mit drei Prüfverfahren (SIA, BE I und BE II) ein hoher FT-Widerstand gefunden.

Gesicherte Folgerungen, welche der Prüfungen am ehesten das Verhalten der ausgelagerten Platten widerspiegelt, können zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht gezogen werden. Es wird angestrebt, im Rahmen eines Fortsetzungsprojektes, die Platten in einigen Jahren erneut zu begutachten.



## 5 Praktische Erfahrungswerte

### 5.1 Vorgehen

In den Jahren 2013 und 2014 wurden Vertreter verschiedener Kantone und ASTRA Filialen kontaktiert, um Kunstbauten und Betondecken zu finden, die die Kriterien des Projektes erfüllten. Die angefragten Personen wurden informiert, dass mit den Untersuchungen die Korrelation zwischen den verschiedenen Frosttaumittelprüfungen FTW (SIA, TFB, BE I und BE II) und dem praktischen Verhalten des Betons überprüft werden soll. Gesucht wurden grössere Objekte (Brücken, Stützmauer, Kreisel, Plätze etc.), bei denen während der Ausführung Frisch- und Festbetonprüfungen durchgeführt wurden und schon einige Jahre alt sind. Es wurde darauf hingewiesen, dass Angaben zum Luftgehalt und w/z-Wert (bzw. zur Rezeptur) und zum Frosttaumittelwiderstand besonders wichtig sind. Gesucht wurden somit Bauwerke, die nach der Einführung der Norm SIA 162, d.h. nach 1989 gebaut wurden. Mit dieser Ausgabe der Norm wurde die Frost- und Frosttausalz-widerstandsprüfung des SIA eingeführt.

Da es von besonderem Interesse ist, den heutigen Zustand zu beurteilen und mit den damaligen Resultaten zu vergleichen, mussten die gesuchten Objekte die Kriterien der **Tab. 23** erfüllen.

**Tab. 23** Kennwerte und Beurteilung des Frostwiderstandes (FW) und des Frosttaumittelwiderstandes (FTW) der Betone.

| Fall | Einwirkung bzw. Beton für | Künstlich eingeführte Luftporen | Ergebnis der Prüfung des FW oder FTW | Heutiger Zustand des Betons |
|------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| 1    | XF4                       | nein                            | hoch                                 | Keine Schäden               |
| 2    | XF4                       | ja                              | hoch                                 | Schäden                     |
| 3    | XF2                       | nein                            | mittel oder hoch                     | Keine Schäden               |
| 4    | XF2                       | ja                              | mittel oder hoch                     | Schäden                     |

Zu den Fällen 1 bis 4 der **Tab. 23** sind folgende Erläuterungen zu machen:

1. Neuere Bauten, die mit Beton für XF4, der ohne LP hergestellt wurde und die Anforderung an einen hohen FTW erfüllte, heute keine Schäden aufweisen.
2. Neuere Bauten, die mit Beton für XF4, der mit LP hergestellt wurde und die Anforderung an einen hohen FTW erfüllte, heute Schäden aufweisen.
3. Neuere Bauten, die mit Beton für XF2, der ohne LP hergestellt wurde und die Anforderung an einen mittleren (oder hohen) FTW erfüllte, heute keine Schäden aufweisen.
4. Neuere Bauten, die mit Beton für XF2, der mit LP hergestellt wurde und die Anforderung an einen mittleren (oder hohen) FTW erfüllte, heute Schäden aufweisen.

In den Gesprächen mit den Ansprechpartnern wurde immer auch nach auffälligen oder besonderen Vorkommnissen bei der Ausführung oder während der Nutzung gefragt.

Anschliessend an die Grobevaluation folgte bei einzelnen interessanten Objekten eine Begehung und Dokumentation des angetroffenen Zustandes.

Zum Vergleich zeigt **Abb. 31** das Erscheinungsbild der Betonoberfläche mit unterschiedlicher Abwitterung bei der SIA-Prüfung.



$m = 8'372 \text{ g/m}^2$



$m = 6'214 \text{ g/m}^2$



$m = 549 \text{ g/m}^2$



$m = 388 \text{ g/m}^2$



$m = 92 \text{ g/m}^2$



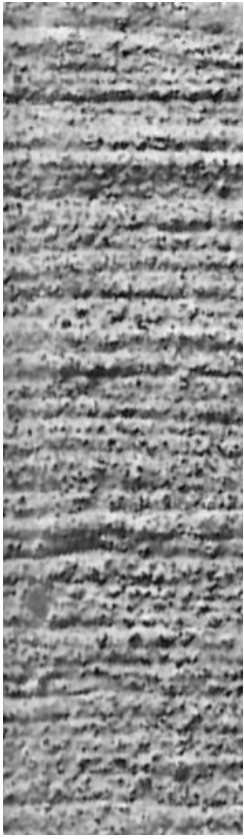
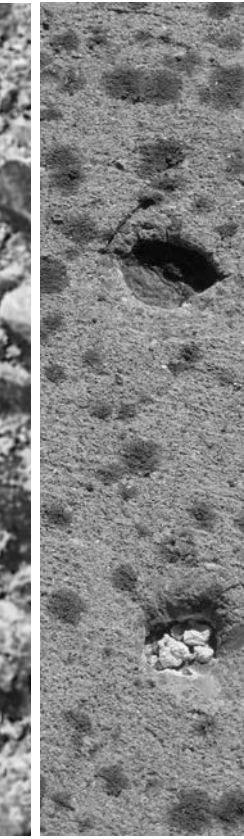
$m = 69 \text{ g/m}^2$

**Abb. 31** Erscheinungsbild der Betonoberfläche mit unterschiedlicher Abwitterung bei der SIA-Prüfung.

## 5.2 Objektdaten und Beurteilungsschema

Bei der Begehung wurden folgende Daten und Angaben erhoben (Details siehe **Anhang VI**):

- Eigentümer
- Objekt
- Baujahr
- Bauteil
- Geographische Ausrichtung
- Neigung der Oberfläche
- Unterlagen
- Exposition nach EN 206-1
- Winterdienst, Taumittel / Intensität
- Absandungsgrad gemäss **Abb. 32**
- Auffälligkeiten Risse, Ausblühungen etc.

|                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |
| 0 mm                                                                               | 1 mm                                                                               | ≥ 4mm                                                                               | Popout                                                                               |
| <input type="checkbox"/> Absandungsgrad 0                                          | <input type="checkbox"/> Absandungsgrad 1                                          | <input type="checkbox"/> Absandungsgrad 4                                           | <input type="checkbox"/> Absandungsgrad P                                            |
| gute, störungsfreie Oberfläche                                                     | mittlere Absandung                                                                 | stärkere Absandung                                                                  | Ausbruch von oberflächennahen Gesteinskörnern                                        |

**Abb. 32** Referenzfotos und Beschreibung für die Beurteilung der FT-Schädigung eines Betons mit einem Maximalkorn  $D_{max}$  von 32 mm.

## 5.3 Ergebnisse von Kunstbauten

### 5.3.1 Übersicht

Die Forschungsstelle hat von den meisten Kantonen der deutschsprachigen und einigen Kantonen der französischsprachigen Schweiz, von den ASTRA Filialen Zofingen und Winterthur und von diversen Einzelpersonen Antworten zu den Anfragen gemäss **Kapitel 5.1** erhalten.

Insgesamt ergab sich, dass in den letzten Jahren an neueren Kunstbauten keine Frost- oder Frosttaumittelschäden aufgetreten sind. Dieses Ergebnis ist etwas überraschend, vor allem auch deshalb, da einige Kantone für die Expositionsklasse XF4 keine LP-Betone, sondern nur Betone ohne künstlich eingeführte Luft verwenden.

So setzt z.B. der Kanton St. Gallen seit ca. 10 Jahren für seine Kunstbauten einen XD3/XF1-Beton ohne Luftporenbildner ein (Angaben von R. Häberli). Die Betonoberflächen werden ggf. hydrophobiert.

Hans de Witte, ehemaliger Mitarbeiter beim Tiefbauamt des Kt. Uri, beobachtete bei Kunstbauten im Reusstal im Kanton Uri, die in den 1960er Jahren gebaut wurden keine Frost- oder Frosttaumittelschäden. Nach seinen Aussagen kann der Frostwiderstand (BE I) damals als mittel, der Frosttaumittelwiderstand (BE II) eher als tief beurteilt werden.

Auch im Kanton Zürich wurden gemäss K. Lang, Ingenieur-Stab des Tiefbauamtes, kaum nennenswerte Frost- oder Frosttausalzschäden beobachtet. Bei zwei Objekten (230-044 ÜF Aspholzstrasse Winterthur: Oberseite des südlichen Längsträgers der Trogrbrücke; 031-004 UF Dägerlenstr. Henggart: Widerlagerwände unter der Fahrbahnplatte) waren Abplatzungen vorhanden (**Abb. 33**).

Falls aber ein Beton mit einem hohen w/z-Wert eingesetzt wird, wie er erfahrungsgemäss nicht für frost- und frost-tausalzgefährdete Bauteile geeignet ist und daher auch nicht eingesetzt werden sollte, sind grobe Schäden keine Überraschung (**Abb. 34**).

Im Rahmen der Ausführung der Halbüberdeckung Zofingen im Jahre 2008 wurde an Bohrkernen aus der Rückwand der Frosttaumittelwiderstand des Betons (w/z 0.50, CEM II/A-LL) mit der TFB-Prüfung ermittelt. Er fiel ungenügend bis genügend aus. Die Begehung am 21.05.2014 ergab keine Hinweise auf FT-Schäden (**Abb. 35**). Dabei hatte sicherlich die Versiegelung im unteren Bereich bzw. die Hydrophobierung im oberen Bereich einen positiven Einfluss.

Weiterhin sind einzelne Fälle bekannt, bei denen kurz vor Wintereinbruch betoniert wurde und der junge und damit auch noch feucht-nasse Beton durch die starke Frosteinwirkung geschädigt wurde.



**Abb. 33** Oberflächliches Absanden und Abplatzungen bei Kunstbauten im Kanton Zürich. Foto K. Lang, TBA Kt. Zürich, April 2014.



**Abb. 34** Rasche und starke Schädigung durch Frost- und Frosttaumiteleinwirkung auf einen für diesen Einsatz ungeeigneten Beton (Beton für die Expositionsklasse XC 2 mit einem w/z-Wert von 0.65). Foto: A. Mongillo Stampbach SA, Delémont.



**Abb. 35** Nordportal der Halbüberdeckung Zofingen (Baujahr 2008), Blickrichtung Süden. Foto: F. Hunkeler.

### 5.3.2 Kanton Bern

Bei Brückenbordüren von älteren Brücken, die ohne LP hergestellt wurden, können gemäss D. Kunz, Verantwortlicher für Kunstbauten, teilweise Absandungen beobachtet werden, was aber nicht als relevant betrachtet wird. Nach seinen Angaben werden im Kanton Bern seit mindestens 2003 die Unter- und Überbauten der Brücken in der Regel mit Betonen ohne LP ausgeführt. An diesen Betonen konnten, abgesehen von einer Ausnahme, keine Schäden beobachtet werden. Die Ausnahme betrifft eine Leitmauer (Überführung in Sonceboz) mit FT-Beton (Anforderung Luftporen > 4 Vol.-%) an der N16, bei der an ein paar Stellen Popouts von Gesteinskörnungen auftraten, die 2004 repariert wurden. Der eingesetzte Beton wurde mit Ausbruchmaterial von einem Tunnel hergestellt. Die entstandenen Popouts waren auf nicht frostbeständige Gesteinskörner zurückzuführen, was die Wichtigkeit nicht nur der Luft, sondern auch der Qualität der Gesteinskörner unterstreicht.

Der Kanton Bern verlangt bei der Expositionsklasse XF4 heute immer LP-haltige Betone. Schäden wurden bis anhin keine festgestellt. Bei der Expositionsklasse XF2 (z.B. Widerlager, Pfeiler, Brückenplatten) werden hingegen seit einigen Jahren nur Betone ohne Luftporenbildner eingesetzt. Dabei wird gefordert, dass diese Betone eine mittlere Frostbeständigkeit gemäss SIA 162/1, Nr. 8 „Frostwechselverhalten“ aufweisen. Bisher hat das Tiefbauamt damit gute Erfahrungen gemacht. Auslöser für diesen Weg war, dass für solche Bauteile in der SN EN 206-1 ein mittlerer FTW verlangt wurde und dies dazu führte, dass auch für diese Betone in aller Regel LP-Mittel eingesetzt wurden.

Bei der Prüfung Nr. 8 (ersetzttes Verfahren, siehe **Kapitel 2.2.1**) wird die Anzahl Frostzyklen  $N$  ermittelt, die zu einem E-Modulabfall von 50% führen, ermittelt:  $N_{50} \geq 100$  (hoch);  $N_{50} \leq 20$  (tief). Die Anforderung „mittel“ (Bereich zwischen tief und hoch) ist in der Norm nicht festgelegt.

Über einen längeren Zeitraum wurden parallel zu dieser Prüfung die TFB-Frost-Prüfung und die Prüfung Nr. 7 (Porosität) gemäss SIA 162/1 durchgeführt. Bei der Prüfung Nr. 7 (ersetzttes Verfahren, siehe **Kapitel 2.2.1**) kann aus den Porenkennwerten die Frostbeständigkeit FS berechnet werden. Die Frostbeständigkeit FS wird mit tief ( $FS \leq 1.0$ ) oder hoch ( $FS \geq 1.5$ ) beurteilt (mittel:  $\leq 1.0$ ;  $\geq 1.5$ ). Der Vergleich der drei Prüfungen ergab bei 11 von 13 Betonen eine Differenz von maximal 1 Klasse (Tab. 24). Zwischen je zwei Prüfungen traten bei zwei Betonen eine Differenz von 2 Klassen auf. Bei der Prüfung Nr. 8 gab es keinen Beton mit einer tiefen Frostbeständigkeit.

**Tab. 24** Ergebnisse der Vergleichsprüfungen

| Beton        | Beurteilung |               |               | 2 Klassen Differenz |
|--------------|-------------|---------------|---------------|---------------------|
|              | TFB-Prüfung | Prüfung Nr. 7 | Prüfung Nr. 8 |                     |
| 1            | ungenügend  | tief          | hoch          | X / X               |
| 2            | genügend    | tief          | mittel        |                     |
| 3            | gut         | mittel        | mittel        |                     |
| 4            | genügend    | hoch          | hoch          |                     |
| 5            | genügend    | hoch          | hoch          |                     |
| 6            | genügend    | mittel        | hoch          |                     |
| 7            | ungenügend  | hoch          | mittel        | X                   |
| 8            | genügend    | mittel        | mittel        |                     |
| 9            | genügend    | mittel        | mittel        |                     |
| 10           | genügend    | tief          | mittel        |                     |
| 11           | gut         | hoch          | mittel        |                     |
| 12           | genügend    | mittel        | hoch          |                     |
| 13           | genügend    | mittel        | hoch          |                     |
| <b>Total</b> | <b>13</b>   | <b>13</b>     | <b>13</b>     | <b>2</b>            |

Im **Anhang VII** sind die Ergebnisse der Begehung im Kanton Bern zusammengestellt.

Alle sechs untersuchten Objekte (unterschiedliche Bauteile, alle Objekte ohne künstliche LP-Einführung und CEM I und mit Winterdienst und Taumittleinsatz) weisen keine bis geringe Frost(taumittel)schäden auf.

Das Objekt UNF Rampe Rawil-Bern Lattigen wurde 2007/08 instand gesetzt (grossflächiger Abtrag bis auf Bewehrung, vorbetonieren), die Wände vom Objekt UNF Werkhof Gesigen wurden beschichtet (Datum der Applikation unbekannt). An diesen zwei Objekten sind folglich allfällige Schäden vor der Instandsetzung / Beschichtung nicht erfasst.

In den erhaltenen Unterlagen sind keine Ergebnisse von Frost(taumittel)prüfungen aufgeführt. Es kann somit keine Aussage über die Korrelation zwischen Schadensentwicklung bzw. zu erwartendes Schadenbild und Prüfergebnis gemacht werden.

### 5.3.3 Kanton Graubünden

Im **Anhang VIII** sind die Ergebnisse der Begehung im Kanton Graubünden zusammengestellt.

Bei den fünf Objekten Landquartbrücke Valzeina, Punt Gelgia, Tunnel Prau Pulté, Tardisbrücke und Pont Camaiéu (Baujahr 1993 – 2002, unterschiedliche Bauteile, alle Objekte mit künstlicher LP-Einführung und CEM I und mit Winterdienst und intensivem Taumittleinsatz) wurden keine bzw. geringe Frost(taumittel)schäden festgestellt, die Beurteilung nach BE I F / FT liefert für alle fünf Objekte einen mittleren bzw. hohen Frost(taumittel)widerstand. Beim Objekt Durchlass Bugnei (mit künstlicher LP-Einführung und CEM I, weder Winterdienst noch Tausalz) sind geringe Frostschiäden vorhanden. Die Beurteilung nach BE I F / FT liefert einen mittleren Frostwiderstand.

Es besteht folglich eine Korrelation zwischen Schadensentwicklung bzw. zu erwartendes Schadenbild am Objekt und Beurteilung nach BE I F / FT: bei allen sechs Objekten kann für einen mittleren bzw. hohen Frost(taumittel)widerstand nach BE I F / FT in den ersten 12 – 20 Jahren ohne grössere Frost(taumittel)schäden gerechnet werden.

## 5.4 Ergebnisse von Betondecken (Strassen und Plätze)

Nach den Kenntnissen von R. Werner gibt es in der Schweiz keine FT-Schäden an den heutigen Betondecken. Der seit anfangs der 1960er verlangte Luftgehalt von 4 Vol.-% und die eingesetzten FTW-Prüfungen führen damit zielsicher zu einer ausreichenden Beständigkeit.

Auch im Kanton Uri wurden an Betonbelägen aus den 1960er Jahren keine FT-Schäden beobachtet (Hans de Witte).



**Abb. 36** Betondecke Rinächt Erstfeld, erstellt in den 1960er Jahre. Foto H. de Witte (Mai 2013).

## 5.5 Zusammenfassung

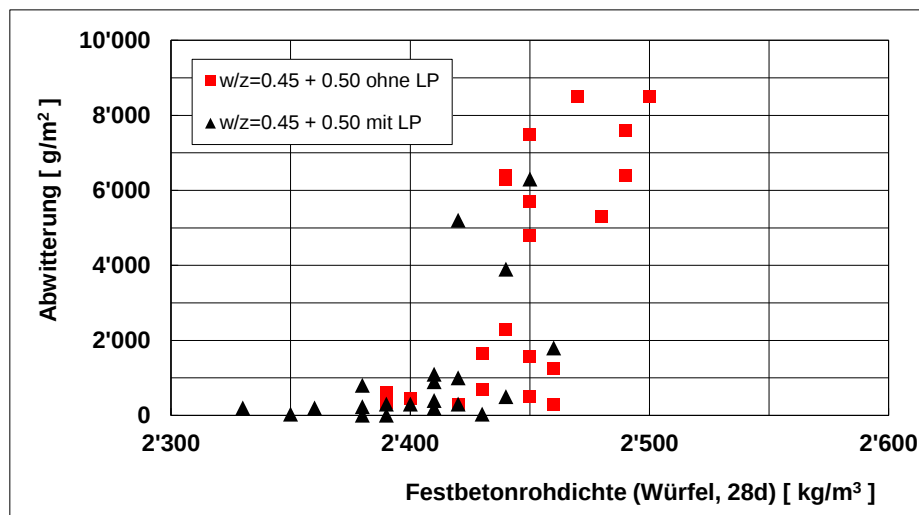
In den Jahren 2013 und 2014 wurden Vertreter verschiedener Kantone und ASTRA Filialen kontaktiert, um Kunstbauten und Betondecken zu finden, bei denen die Korrelation zwischen den verschiedenen Frosttaumittelprüfungen FTW (SIA, TFB, BE I und BE II) und dem praktischen Verhalten des Betons überprüft werden könnte. Gesucht wurden grössere Objekte (Brücken, Stützmauern, Kreisel, Plätze etc.), bei denen während der Ausführung Frisch- und Festbetonprüfungen durchgeführt wurden und schon einige Jahre alt sind, d.h. gemäss der Norm SIA 262:1989 gebaut wurden.

Trotz grossen Anstrengungen und intensiver Suche mit Gesprächen und Begehungen konnten keine Bauwerke oder Bauteile mit wesentlichen FT-Schäden gefunden werden. Dieser Befund ist sehr erfreulich und zeigt, dass die Vorgaben der Norm SIA 262 für Betonbauten (Ausgabe von 1989) und der Norm für Betondecken, die seit 1960 einen Mindestgehalt an künstlich eingeführter Luft und seit 1976 auch einen prüftechnischen Nachweis des Frosttaumittelwiderstandes forderte, sehr wirksam waren.

## 6 Folgerungen und Empfehlungen aus den Untersuchungen

Die umfangreichen Untersuchungen an sehr unterschiedlichen Betonen haben gezeigt, dass der Luftgehalt im Frisch- und Festbeton ein guter Indikator für die Beurteilung des Frosttaumittelwiderstandes von Beton ist. Bei Luftgehalten  $\geq 3$  Vol.-% im Frischbeton bzw.  $\geq 2$  Vol.-% im Festbeton nimmt der Frosttaumittelwiderstand deutlich zu. Unterhalb dieser Werte hängt die Beurteilung teilweise vom Prüfverfahren ab. Es gibt aber auch Betone, die trotz Luftgehalten unterhalb der genannten Grenzwerte einen hohen Frosttaumittelwiderstand aufweisen.

Da zwischen Frosttaumittelwiderstand und Luftgehalt im Festbeton ein Zusammenhang besteht, ist auch eine Korrelation zur Festbetonrohddichte zu erwarten (**Abb. 37**). Bei wiederkehrenden Prüfungen am immer gleichen Beton (konstante Zusammensetzung, gleicher w/z-Wert) kann die Rohddichte eines Würfels bereits nach dem Ausschalen ein gutes Indiz für den zu erwartenden Frosttaumittelwiderstand darstellen. In zeitkritischen Fällen kann dies für eine hilfreiche erste Beurteilung genutzt werden.



**Abb. 37** Zusammenhang zwischen Abwitterung in der SIA-Prüfung und der Festbetonrohddichte. Ergebnisse der TFB AG aus Prüfungen an Betonen mit sehr unterschiedlichen Zementarten.

Der Vergleich der vier betrachteten Prüfverfahren (SIA, TFB, BE I FT und BE II FT) ergab, dass ein einzelnes Prüfverfahren durchschnittlich zu ca. 66% mit den anderen Prüfungen übereinstimmt. Der mögliche Unterschied beträgt in den meisten Fällen eine Klasse (Unterscheidung ungenügend, mittel und gut).

Um die Beurteilungssicherheit der vier Prüfungen hinsichtlich des Frosttaumittelwiderstandes zu vergleichen, kann neben der gleichen Beurteilung auch die strengere Beurteilung berücksichtigt werden. Die SIA-Prüfung beurteilt die Betone durchschnittlich ca. 75% gleich oder strenger wie die übrigen Prüfverfahren. Bei der TFB- und der BE I FT-Prüfung liegt dieser Wert bei 79%, bei der BE II-Prüfung bei 95%. Die BE II FT-Prüfung ist damit die strengste der Prüfungen, danach folgen die TFB- sowie die BE I FT-Prüfung und am Ende die SIA-Prüfung. Die Unterschiede zwischen der SIA-, TFB- und BE I FT-Prüfung sind gering. Es muss hier erneut betont werden, dass diese Ergebnisse von der Art und der Zusammensetzung sowie der Anzahl der geprüften Betone abhängig ist (insbesondere vom Verhältnis der Anzahl Betone ohne zu Betonen mit LP).

Beim Vergleich der vier Prüfungen konnte kein Einfluss des w/z-Wertes, der Zement- oder Betonart beobachtet werden. Eine diesbezügliche Einschränkung oder Empfehlung ist daher nicht nötig.

In der **Tab. 25** werden die vier Prüfungen miteinander verglichen. Neben der Beurteilungssicherheit wurden der Zeitbedarf (= Alter bei Prüfbeginn + Prüfdauer bzw. Zeit bis zum Vorliegen der Prüfergebnisse), Langzeiterfahrung (seit wann die einzelnen Prüfverfahren angewendet werden), Verfügbarkeit einer Norm und die Kosten aufgeführt und bewertet. Für die Bewertung wurden die Punkte 1 bis 4 verteilt, d.h. 4 Punkte für die beste und 1 Punkt für die schlechteste Bewertung. Alle Aspekte wurden gleich gewichtet. Bewertet man allerdings die Kosten oder den Zeitbedarf hoch, ergibt sich ein anderes Ranking. Die Unterschiede sind aber nicht so, dass ein Prüfverfahren im Vergleich besonders stark abfällt.

Der wohl wichtigste Parameter, nämlich die Korrelation mit der Praxis, kann noch nicht in die Beurteilung einfließen. Dazu fehlen zurzeit noch gesicherte Ergebnisse zur Frage, welche der Prüfungen das Verhalten der ausgelagerten Platten am besten widerspiegelt. Die Gesamtbewertung mit einer Empfehlung, welche Prüfverfahren in Zukunft weiter verfolgt werden sollen, kann daher zurzeit nicht gegeben werden. Wichtig erscheint hier aber doch der Vorteil der TFB- sowie der BE I FT- und der BE II FT-Prüfung, dass mit diesen auch das Gefüge mikroskopisch beurteilt wird (Störungen, Verteilung der künstlich eingeführten Luftporen etc.). Es wird empfohlen, das Projekt fortzusetzen. Die Fortsetzung sollte mit dem Monitoring der Temperatur der Luft am Auslagerungsort und des Betons in unterschiedlicher Tiefe der Platten (z.B. 0-10 mm, 20-30 mm, 50 mm) ergänzt werden. Für diese Messungen müssten 2 bis 4 neue Platten hergestellt werden.

**Tab. 25** Vergleichende Bewertung der Prüfungen

| Parameter                                         | BE I              |      | BE II      |      | SIA           |      | TFB                                             |      |
|---------------------------------------------------|-------------------|------|------------|------|---------------|------|-------------------------------------------------|------|
|                                                   |                   | Pkt. |            | Pkt. |               | Pkt. |                                                 | Pkt. |
| Gleiche Beurteilung <sup>1)</sup>                 | 64%               | --   | 67%        | --   | 62%           | --   | 64%                                             | --   |
| Strengere Beurteilung <sup>1)</sup>               | 15%               | --   | 28%        | --   | 13%           | --   | 15%                                             | --   |
| Beurteilungssicherheit<br>Summe                   | 79%               | 3    | 95%        | 4    | 75%           | 1    | 79%                                             | 3    |
| Zeitbedarf (Alter bei Prüf-<br>beginn, Prüfdauer) | 5d<br>(1+4)       | 4    | 36d (28+8) | 3    | 42d (28+14)   | 1    | 38d (24 <sup>2)</sup><br>(28 <sup>2)</sup> +10) | 2    |
| Langzeiterfahrung                                 | Seit 1977         | 3    | Seit 1977  | 3    | Seit ca. 1980 | 2    | Seit 1986                                       | 1    |
| Norm                                              | Seit 2010         | 2    | Seit 2010  | 2    | Seit ca. 1989 | 4    | Keine                                           | 1    |
| Kosten, CHF (2014) <sup>3)</sup>                  | 1'195.-           | 2    | 1'265.-    | 1    | 1'150.-       | 3    | 440.-                                           | 4    |
| Total Punkte ohne Praxis                          | 14                |      | 13         |      | 11            |      | 11                                              |      |
| <b>Ranking 1 ohne Praxis</b>                      | <b>1</b>          |      | <b>2</b>   |      | <b>3</b>      |      | <b>4</b>                                        |      |
| Korrelation mit Praxis                            | offen             |      | offen      |      | offen         |      | offen                                           |      |
| Total Punkte mit Praxis                           | offen             |      | offen      |      | offen         |      | offen                                           |      |
| <b>Ranking 2</b>                                  | <b>Ausstehend</b> |      |            |      |               |      |                                                 |      |

- 1) Aus den **Tab. 11** bis **Tab. 14**.
- 2) Die Prüfung kann auch im Alter von 2 Wochen begonnen werden.
- 3) inkl. Kosten für die Entnahme der nötigen Bohrkerne.

Abschliessend ist festzuhalten, dass zurzeit kein Anlass besteht, die Anforderungen an Beton für die Expositionsklasse XF4 zu ändern. Seit der Einführung der Norm SIA 262 im Jahre 1989 sind praktisch keine Schäden mehr aufgetreten.

Zu überlegen ist, ob für den in der SN EN 206 geforderten mittleren Frost-Tausalz-widerstand für die Expositionsklassen XF2 (und XF3) die SIA-Prüfung zur richtigen Beurteilung führt. Evtl. könnte ganz einfach auch der Grenzwert erhöht werden, siehe **Kapitel 3.5, Abb. 13b**. Gemäss den Erfahrungen im Kanton Bern [Kunz 2011], könnte ggf. die alte Prüfung Nr. 8 der nicht mehr gültigen Norm SIA 162/1 zu einer ausreichend harten Prüfung des Frost-Tausalzwiderstandes für die Expositionsklasse XF2 herangezogen

werden. Damit könnte vermieden werden, dass für Betone für diese Expositionsklasse praktisch immer LP-Mittel eingesetzt werden. Dies verteuert den Beton und macht ihn auch empfindlicher für Störungen und kann z.B. bei erhöhtem Luftgehalt an der Oberfläche von Fahrbahnplatten zu einer ungenügenden Haftung der Grundierung der Abdichtung und zur Blasenbildung führen [Bernhard 2015]. Die Prüfung von XF2-Betonen sollte in einer weiteren Forschungsarbeit untersucht werden.

Auf europäischer Ebene werden für die Prüfung von XF4-Betonen andere Prüfungen eingesetzt. Sobald die entsprechenden europäischen Normen (SN 12390-9 für oberflächliches Abwittern und SN 12390-xx für innere Schädigungen) publiziert werden, sollte in der Schweiz Konsens darüber bestehen, wie diese angewendet werden bzw. welches der schweizerischen Prüfverfahren Vorrang haben soll. Weiter wird in verschiedenen europäischen Ländern ebenfalls nach einer gegenüber der Prüfung der XF4-Betone schwächeren Prüfung für XF2- und XF3-Betone gesucht.



# Anhänge

|             |                                                                       |            |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>I</b>    | <b>Ergebnisse der Frischbetonprüfungen.....</b>                       | <b>81</b>  |
| <b>II</b>   | <b>Ergebnisse der Festbetonprüfungen .....</b>                        | <b>83</b>  |
| II.1        | Teil 1.....                                                           | 83         |
| II.2        | Teil 2.....                                                           | 84         |
| <b>III</b>  | <b>Detaillierte Ergebnisse der Prüfung BE I FT .....</b>              | <b>85</b>  |
| III.1       | Teil 1.....                                                           | 85         |
| III.2       | Teil 2.....                                                           | 86         |
| <b>IV</b>   | <b>Detaillierte Ergebnisse der BE II FT- und der TFB-Prüfung.....</b> | <b>87</b>  |
| IV.1        | BE II FT-Prüfung .....                                                | 87         |
| IV.2        | TFB-Prüfung.....                                                      | 88         |
| <b>V</b>    | <b>Auslagerung der Versuchsplatten .....</b>                          | <b>89</b>  |
| <b>VI</b>   | <b>Datenblatt für Objektaufnahmen .....</b>                           | <b>91</b>  |
| <b>VII</b>  | <b>Begehungen im Kanton Bern.....</b>                                 | <b>93</b>  |
| VII.1       | UNF Werkhof Gesigen .....                                             | 93         |
| VII.2       | UNF Rampe Rawil – Bern Lattigen .....                                 | 95         |
| VII.3       | UEF Rampe Frutigen – Spiez .....                                      | 97         |
| VII.4       | Simmebrücke .....                                                     | 99         |
| VII.5       | Überdeckung Schlosserei .....                                         | 101        |
| VII.6       | Wendeplatte Beerihubel.....                                           | 103        |
| <b>VIII</b> | <b>Begehungen im Kanton Graubünden .....</b>                          | <b>105</b> |
| VIII.1      | Durchlass Bugnei (ID Nr. 3) .....                                     | 105        |
| VIII.2      | Landquartbrücke Valzeina (ID Nr. 4) .....                             | 107        |
| VIII.3      | Punt Gelgia (ID Nr. 5).....                                           | 109        |
| VIII.4      | Tunnel Prau Pulté (ID Nr. 6).....                                     | 111        |
| VIII.5      | Tardisbrücke (ID Nr. 7).....                                          | 113        |
| VIII.6      | Ponte Camaïéu (ID Nr. 10).....                                        | 115        |
| <b>IX</b>   | <b>Details zur Validierung der BE I FT- und BE II FT-Prüfung.....</b> | <b>117</b> |
| IX.1        | Übersicht über die Ergebnisse .....                                   | 117        |
| IX.2        | Geprüfte Betone und Detailergebnisse .....                            | 118        |
| IX.2.1      | Teil 1.....                                                           | 118        |
| IX.2.2      | Teil 2.....                                                           | 119        |
| IX.2.3      | Teil 3.....                                                           | 120        |



# I Ergebnisse der Frischbetonprüfungen

| Beton                        |                   | 1       | 2       | 3           | 4           | 5       | 6       | 7           | 8 <sup>1)</sup> | 9         | 10        | 12          | 13          | 14          |
|------------------------------|-------------------|---------|---------|-------------|-------------|---------|---------|-------------|-----------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| Zementart                    | CEM I             | CEM I   | CEM I   | CEM II/A-LL | CEM II/A-LL | CEM I   | CEM I   | CEM II/A-LL | CEM II/A-LL     | CEM III/B | CEM III/B | CEM II/A-LL | CEM II/A-LL | CEM II/A-LL |
| Zementgehalt                 | kg/m <sup>3</sup> | 300     | 300     | 300         | 300         | 320     | 320     | 320         | 320             | 320       | 320       | 320         | 450         | 425         |
| Maximalkorn D <sub>max</sub> | mm                | 32      | 32      | 32          | 32          | 32      | 32      | 32          | 32              | 32        | 32        | 32          | 8           | 8           |
| w/z-Wert                     | -                 | 0.50    | 0.50    | 0.50        | 0.50        | 0.45    | 0.45    | 0.45        | 0.45            | 0.45      | 0.45      | 0.45        | 0.39        | 0.39        |
| LP                           |                   |         | X       |             | X           |         | X       |             |                 |           | X         | X           |             | X           |
|                              |                   |         |         |             |             |         |         |             |                 |           |           |             |             |             |
| Herstellung                  |                   | 20.8.12 | 20.8.12 | 20.8.12     | 20.8.12     | 20.8.12 | 20.8.12 | 17.9.12     | 17.9.12         | 17.9.12   | 24.9.12   | 24.9.12     | 16.4.12     | 3.4.2012    |
| FM, ViscoCrete 3081 S        | M.-%/Z.           |         |         |             |             |         |         |             |                 |           |           |             |             | 1.00        |
| FM, ViscoCrete 3082          | M.-%/Z.           | 1.40    | 0.80    | 0.40        | 0.00        | 0.90    | 1.00    | 0.40        | 0.60            | 0.00      | 0.00      |             |             |             |
| FM, ViscoCrete 3088          | M.-%/Z.           |         |         |             |             |         |         |             |                 |           |           | 1.40        |             |             |
| LP, Micro Air 302            | M.-%/Z.           |         | 0.25    |             | 0.30        |         | 0.30    |             |                 |           | 0.30      |             |             |             |
| LP, Fro-V5-A                 | M.-%/Z.           |         |         |             |             |         |         |             |                 |           |           | 0.30        |             | 0.10        |
| VZ, SikaTard                 | M.-%/Z.           |         |         |             |             |         |         |             |                 |           |           |             | 1.00        |             |
|                              |                   |         |         |             |             |         |         |             |                 |           |           |             |             |             |
| Lufttemperatur               | °C                | 20.0    | 20.0    | 21.0        | 19.5        | 21.0    | 22.0    | 15.5        | 13.5            | 12.5      | 17.0      | 17.5        | 15.0        | 16.0        |
| Betontemperatur              | °C                | 23.5    | 22.0    | 20.0        | 21.0        | 21.0    | 21.0    | 17.5        | 15.5            | 15.5      | 17.5      | 18.0        | 17.0        | 17.0        |
| Rohdichte                    | kg/m <sup>3</sup> | 2'470   | 2'360   | 2'400       | 2'340       | 2'360   | 2'360   | 2'450       | 2'450           | 2'470     | 2'410     | 2'320       | 2'350       | 2'340       |
| Luft A1                      | Vol. %            | 1.30    | 3.00    | 1.30        | 3.10        | 1.00    | 3.00    | 0.80        | 0.70            | 0.80      | 2.90      | 6.50        | 4.0         | 5.6         |
| Konsistenz                   | - / mm            | 1.10    | 1.09    | 1.07        | 1.12        | 1.07    | 1.11    | 1.13        | 1.12            | 1.14      | 1.30      | 580         | k.A.        | k.A.        |
|                              | Klasse            | C3      | C3      | C3          | C2          | C3      | C2      | C2          | C2              | C2        | C1        | F5          | F4          | F4          |

1) Diese Betonsorte, wurde fälschlicherweise ohne LP-Mittel hergestellt.



## II Ergebnisse der Festbetonprüfungen

### II.1 Teil 1

| Beton                           |                   | 1        | 2     | 3             | 4        | 5     | 6             | 6W <sup>1)</sup>   | 7             | 8             | 9             | 10     | 12    | 13                     | 14                |
|---------------------------------|-------------------|----------|-------|---------------|----------|-------|---------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|--------|-------|------------------------|-------------------|
| Würfeldruckfestigkeit           | N/mm <sup>2</sup> | 69.7     | 48.3  | 48.9          | 40.0     | 54.7  | 46.8          |                    | 51.0          | 40.6          | 37.9          | 41.2   | 32.9  | 58.2                   | 59.8              |
| Rohdichte                       | kg/m <sup>3</sup> | 2'460    | 2'400 | 2'420         | 2'390    | 2'440 | 2'390         |                    | 2'410         | 2'420         | 2'400         | 2'380  | 2'270 | 2'320                  | 2'330             |
| Künstliche LP                   |                   | nein     | ja    | nein          | ja       | nein  | ja            | ja                 | nein          | nein          | nein          | ja     | ja    | nein                   | ja                |
| <b>Frosttaumittelwiderstand</b> |                   |          |       |               |          |       |               |                    |               |               |               |        |       |                        |                   |
| <b>Norm SIA 262/1, Anhang C</b> |                   |          |       |               |          |       |               |                    |               |               |               |        |       |                        |                   |
| $\Delta m_6$                    | g/m <sup>2</sup>  | 10       | 3     | 800           | 10       | 4     | 50            | 9                  | 100           | 1'600         | 300           | 30     | 9     | 17                     | 17                |
| $\Delta m_{14}$                 | g/m <sup>2</sup>  | 100      | 20    | 1'900         | 70       | 4     | 1'000         | 8                  | 1'400         | 2'400         | 400           | 90     | 5     | 15                     | 16                |
| $\Delta m_{28}$                 | g/m <sup>2</sup>  | 400      | 60    | 1'600         | 200      | 7     | 2'900         | 10                 | 2'400         | 1'500         | 1'100         | 400    | 8     | 13                     | 16                |
| m                               | g/m <sup>2</sup>  | 600      | 80    | 4'300         | 300      | 10    | 3'900         | 30                 | 3'800         | 5'500         | 1'700         | 500    | 20    | 40                     | 50                |
| Standardabweichung (m)          | g/m <sup>2</sup>  | 271      | 39    | 1'143         | 220      | 8     | 1'136         | 31                 | 2'139         | 411           | 418           | 87     | 4     | 5                      | 10                |
| Beurteilung                     | -                 | mittel   | hoch  | nicht erfüllt | mittel   | hoch  | nicht erfüllt | hoch <sup>1)</sup> | nicht erfüllt | nicht erfüllt | nicht erfüllt | mittel | hoch  | hoch                   | hoch              |
| <b>TFB-Prüfung</b>              |                   |          |       |               |          |       |               |                    |               |               |               |        |       |                        |                   |
| Originaloberfläche              |                   | genügend | gut   | un-genügend   | genügend | gut   | genügend      | genügend           | schlecht      | schlecht      | schlecht      | gut    | gut   | genügend <sup>2)</sup> | gut <sup>3)</sup> |
| Oberfläche geschnitten          |                   |          |       |               |          |       |               |                    |               |               |               |        |       | gut <sup>2)</sup>      | gut <sup>3)</sup> |
| <b>SN 640 464</b>               |                   |          |       |               |          |       |               |                    |               |               |               |        |       |                        |                   |
| BE I FT                         |                   | tief     | hoch  | mittel        | mittel   | tief  | hoch          | hoch               | tief          | tief          | tief          | mittel | hoch  | mittel                 | hoch              |
| BE II FT                        |                   | tief     | hoch  | tief          | tief     | tief  | hoch          | hoch               | tief          | tief          | tief          | tief   | hoch  | mittel                 | hoch              |

<sup>1)</sup> Probenalter 75d; <sup>2)</sup> Probenalter 64d; <sup>3)</sup> Probenalter 77d

## II.2 Teil 2

| Beton                            |                   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 12    | 13    | 14    |
|----------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Kapillarporen, $U_E$             | Vol. %            | 9.8   | 11.4  | 10.7  | 12.4  | 11.5  | 11.6  | 14    | 13.7  | 14.3  | 12.8  | 10.2  | 13.3  | 13.5  |
| Gesamtporosität, $n$             | Vol. %            | 11    | 13.3  | 11.7  | 13.9  | 12.4  | 13.8  | 15.2  | 14.9  | 14.9  | 14.4  | 16.8  | 17.4  | 18.5  |
| Hohlraumgehalt, LP               | Vol. %            | 1.2   | 1.9   | 1     | 1.5   | 0.9   | 2.2   | 1.2   | 1.2   | 0.6   | 1.6   | 6.6   | 4.1   | 5     |
| Trockenrohddichte, $\rho_{R110}$ | kg/m <sup>3</sup> | 2'402 | 2'340 | 2'384 | 2'324 | 2'366 | 2'329 | 2'289 | 2'298 | 2'297 | 2'312 | 2'248 | 2'230 | 2'201 |
| Gesamter Luftporengehalt, A      | Vol. %            | 2     | 2.4   | 1.9   | 3.0   | 1.1   | 3.0   | 1.1   | 0.9   | 1.4   | 2.7   | 4.4   | 4.5   | 5.7   |
| Gehalt an Mikroporen, $A_{300}$  | Vol. %            | 0.5   | 2.0   | 1.0   | 2.0   | 0.5   | 2.2   | 0.7   | 0.7   | 0.9   | 1.8   | 2.7   | 1.5   | 2.9   |
| Abstandsfaktor, AF               | mm                | 0.446 | 0.129 | 0.228 | 0.147 | 0.242 | 0.137 | 0.199 | 0.197 | 0.233 | 0.157 | 0.154 | 0.223 | 0.151 |

## III Detaillierte Ergebnisse der Prüfung BE I FT

### III.1 Teil 1

| Mischung Nr.                           | 1                                                | 2       | 3                                                       | 4       | 5                                                | 6       | 7                                                       |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------|---------|
| Widerstandsfaktor WFT-P [%]            | < 50                                             | > 80    | 80 - 50                                                 | 80 - 50 | < 50                                             | > 80    | < 50                                                    |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Qualitätsindex Gefüge                  | -3                                               | -3      | -4                                                      | -4      | -4                                               | -5      | -3                                                      |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Gefügequalität                         | gut                                              | gut     | gut                                                     | gut     | gut                                              | gut     | gut                                                     |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Porenabstandsfaktor [mm]               | 0.446                                            | 0.129   | 0.228                                                   | 0.147   | 0.242                                            | 0.137   | 0.199                                                   |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Beurteilung des FT-widerstandes BE I   | tief                                             | hoch    | mittel                                                  | mittel  | tief                                             | hoch    | tief                                                    |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| U <sub>E</sub> [Vol. %]                | 9.8                                              | 11.4    | 10.7                                                    | 12.4    | 11.5                                             | 11.6    | 14                                                      |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| n [Vol. %]                             | 11                                               | 13.3    | 11.7                                                    | 13.9    | 12.4                                             | 13.8    | 15.2                                                    |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| LP [Vol. %]                            | 1.2                                              | 1.9     | 1                                                       | 1.5     | 0.9                                              | 2.2     | 1.2                                                     |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| ρ <sub>R110</sub> [kg/m <sup>3</sup> ] | 2'402                                            | 2'340   | 2'384                                                   | 2'324   | 2'366                                            | 2'329   | 2'289                                                   |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| A [Vol. %]                             | 2                                                | 2.4     | 1.9                                                     | 3.0     | 1.1                                              | 3.0     | 1.1                                                     |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| A <sub>300</sub> [Vol. %]              | 0.5                                              | 2.0     | 1.0                                                     | 2.0     | 0.5                                              | 2.2     | 0.7                                                     |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| AF [mm]                                | 0.446                                            | 0.129   | 0.228                                                   | 0.147   | 0.242                                            | 0.137   | 0.199                                                   |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Makroporosität                         | Anmerkung                                        | Klassif | Anmerkung                                               | Klassif | Anmerkung                                        | Klassif | Anmerkung                                               | Klassif | Anmerkung                                        | Klassif | Anmerkung                                                                | Klassif | Anmerkung                                        | Klassif |
| Porenagglomerate                       | Wenig feinkugelig-isolierte Einzelporen-bildung. |         | Mehrheitlich feinkugelig-isolierte Einzelporen-bildung. |         | Wenig feinkugelig-isolierte Einzelporen-bildung. |         | Mehrheitlich feinkugelig-isolierte Einzelporen-bildung. |         | Wenig feinkugelig-isolierte Einzelporen-bildung. |         | Wenig Porenaggl. Mehrheitlich feinkugelig-isolierte Einzelporen-bildung. | -1      | Wenig feinkugelig-isolierte Einzelporen-bildung. |         |
| Lunkern                                |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Wasserporen                            |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Grobporen                              | Wenig                                            | -1      | Wenig                                                   | -1      | Wenig                                            | -1      | Wenig                                                   | -1      | Wenig                                            | -1      | Wenig                                                                    | -1      | Wenig                                            | -1      |
| Zementsteinkapillarität                |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| qualitativ                             | Geringe, gl.mäss. Kapillarität.                  |         | Geringe, gl.mäss. Kapillarität.                         |         | Mittlere, gl.mäss. Kapillarität.                 | -1      | Mittlere, gl.mäss. Kapillarität.                        | -1      | Mittlere, gl.mäss. Kapillarität.                 | -1      | Mittlere, gl.mäss. Kapillarität.                                         | -1      | Mittlere, gl.mäss. Kapillarität.                 | -1      |
| Risse im Zementstein                   |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| < 0.005 mm breit                       | Keine wesentl. Risse sichtbar.                   |         | Keine wesentl. Risse sichtbar.                          |         | Keine wesentl. Risse sichtbar.                   |         | Keine wesentl. Risse sichtbar.                          |         | Keine wesentl. Risse sichtbar.                   |         | Keine wesentl. Risse sichtbar.                                           |         | Keine wesentl. Risse sichtbar.                   |         |
| ≥ 0.005 mm breit                       |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Zuschlagstoffe                         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Risse                                  |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Porosität                              | Geringe Zuschlags-porosität.                     |         | Geringe Zuschlags-porosität.                            |         | Geringe Zuschlags-porosität.                     |         | Geringe Zuschlags-porosität.                            |         | Geringe Zuschlags-porosität.                     |         | Geringe Zuschlags-porosität.                                             |         | Geringe Zuschlags-porosität.                     |         |
| Glimmer                                |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Verbund Zementstein/Zuschlag           |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Kapillarstörungen                      | Wenig                                            | -1      | Wenig                                                   | -1      | Wenig                                            | -1      | Wenig                                                   | -1      | Wenig                                            | -1      | Wenig                                                                    | -1      | Wenig                                            | -1      |
| Rissablösungen                         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Porenagglomerate                       |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Lunkern                                |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Wasserporen                            |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Hohlräume                              |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Hydratation                            |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                         |         |                                                  |         |                                                                          |         |                                                  |         |
| Bezogen auf Betonalter                 | Lt. red. Hydratationsgrad                        | -1      | Lt. red. Hydratationsgrad.                              | -1      | Lt. red. Hydratationsgrad.                       | -1      | Lt. red. Hydratationsgrad.                              | -1      | Lt. red. Hydratationsgrad.                       | -1      | Lt. red. Hydratationsgrad.                                               | -1      | Guter Hydratationsgrad.                          |         |
| Qualitätsindex Gefüge                  | -3                                               | -3      | -4                                                      | -4      | -4                                               | -4      | -4                                                      | -4      | -4                                               | -4      | -5                                                                       | -5      | -3                                               | -3      |
| Gefügequalität                         | gut                                              | gut     | gut                                                     | gut     | gut                                              | gut     | gut                                                     | gut     | gut                                              | gut     | gut                                                                      | gut     | gut                                              | gut     |
| K <sub>s</sub> [Vol. %]                | 5.0                                              | 6.6     | 5.9                                                     | 7.6     | 6.4                                              | 6.5     | 8.9                                                     | 8.2     | 5.3                                              | 0.41    | 0.26                                                                     | 0.89    | 0.45                                             | 0.83    |
| V <sub>1</sub> [%]                     | 10                                               | 30.6    | 16.3                                                    | 26.8    | 8.5                                              | 33.0    | 8.2                                                     | 5.3     | 0.41                                             | 0.26    | 0.89                                                                     | 0.45    | 0.83                                             | 0.24    |
| V <sub>2</sub> [%]                     | 5.1                                              | 17.9    | 9.0                                                     | 16.5    | 4.7                                              | 18.6    | 5.3                                                     | 0.41    | 0.26                                             | 0.89    | 0.45                                                                     | 0.83    | 0.24                                             | 0.93    |
| WB <sub>1</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]   | 0.50                                             | 1.53    | 0.81                                                    | 1.34    | 0.42                                             | 1.65    | 0.41                                                    | 0.26    | 0.89                                             | 0.45    | 0.83                                                                     | 0.24    | 0.93                                             | 0.26    |
| WB <sub>2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]   | 0.26                                             | 0.89    | 0.45                                                    | 0.83    | 0.24                                             | 0.93    | 0.26                                                    | 0.89    | 0.45                                             | 0.83    | 0.24                                                                     | 0.93    | 0.26                                             | 0.26    |

## III.2 Teil 2

|                                        |                                                 |          |                                                 |                |                                                        |          |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------|----------|
| Mischung Nr.                           | 8                                               | 9        | 10                                              | 12             | 13                                                     | 14       |
| Widerstandsfaktor WFT-P [%]            | < 50                                            | < 50     | 80 - 50                                         | > 80           | 80 - 50                                                | > 80     |
| Qualitätsindex Gefüge                  | -3                                              | -4       | -3                                              | -6             | -5                                                     | -5       |
| Gefügequalität                         | gut                                             | gut      | gut                                             | leicht gestört | gut                                                    | gut      |
| Porenabstandsfaktor [mm]               | 0.197                                           | 0.233    | 0.157                                           | 0.154          | 0.223                                                  | 0.151    |
| Beurteilung des FT-widerstandes BE I   | tief                                            | tief     | mittel                                          | hoch           | mittel                                                 | hoch     |
| U <sub>E</sub> [Vol.%]                 | 13.7                                            | 14.3     | 12.8                                            | 10.2           | 13.3                                                   | 13.5     |
| n [Vol.%]                              | 14.9                                            | 14.9     | 14.4                                            | 16.8           | 17.4                                                   | 18.5     |
| LP [Vol.%]                             | 1.2                                             | 0.6      | 1.6                                             | 6.6            | 4.1                                                    | 5        |
| ρ <sub>R110</sub> [kg/m <sup>3</sup> ] | 2'298                                           | 2'297    | 2'312                                           | 2'248          | 2'230                                                  | 2'201    |
| A [Vol.%]                              | 0.9                                             | 1.4      | 2.7                                             | 4.4            | 4.5                                                    | 5.7      |
| A <sub>300</sub> [Vol.%]               | 0.7                                             | 0.9      | 1.8                                             | 2.7            | 1.5                                                    | 2.9      |
| AF [mm]                                | 0.197                                           | 0.233    | 0.157                                           | 0.154          | 0.223                                                  | 0.151    |
| <b>Makroporosität</b>                  | Anmerkung                                       | Klassif. | Anmerkung                                       | Klassif.       | Anmerkung                                              | Klassif. |
| Porenagglomerate                       | Wenig feinkugelig-isolierte Einzelporenbildung. |          | Wenig feinkugelig-isolierte Einzelporenbildung. |                | Mehrheitlich feinkugelig-isolierte Einzelporenbildung. |          |
| Lunkern                                |                                                 |          |                                                 |                |                                                        |          |
| Wasserporen                            |                                                 |          |                                                 |                |                                                        |          |
| Grobporen                              | Wenig                                           | -1       | Wenig                                           | -1             | Wenig                                                  | -1       |
| <b>Zementsteinkapillarität</b>         |                                                 |          |                                                 |                |                                                        |          |
| qualitativ                             | Mittlere, gl.mäss. Kapillarität.                | -1       | Mittlere, gl.mäss. Kapillarität.                | -1             | Geringe, ungl.mäss. Kapill.                            | -1       |
| <b>Risse im Zementstein</b>            |                                                 |          |                                                 |                |                                                        |          |
| < 0.005 mm breit                       | Keine wesentl. Risse sichtbar.                  |          | Keine wesentl. Risse sichtbar.                  |                | Keine wesentl. Risse sichtbar.                         |          |
| ≥ 0.005 mm breit                       |                                                 |          |                                                 |                | Mischung aus Rissen und Poren.                         | -1       |
| <b>Zuschlagstoffe</b>                  |                                                 |          |                                                 |                |                                                        |          |
| Risse                                  |                                                 |          |                                                 |                |                                                        |          |
| Porosität                              | Geringe Zuschlagsporosität.                     |          | Geringe Zuschlagsporosität.                     |                | Geringe Zuschlagsporosität.                            |          |
| Glimmer                                |                                                 |          |                                                 |                |                                                        |          |
| <b>Verbund Zementstein/Zuschlag</b>    |                                                 |          |                                                 |                |                                                        |          |
| Kapillarstörungen                      | Wenig                                           | -1       | Wenig                                           | -1             | Wenig                                                  | -1       |
| Rissablösungen                         |                                                 |          |                                                 |                |                                                        |          |
| Porenagglomerate                       |                                                 | Wenig    | -1                                              |                | Wenig                                                  | -1       |
| Lunkern                                |                                                 |          |                                                 |                |                                                        |          |
| Wasserporen                            |                                                 |          |                                                 |                |                                                        |          |
| Hohlräume                              |                                                 |          |                                                 |                | Wenig                                                  | -1       |
| <b>Hydratation</b>                     |                                                 |          |                                                 |                |                                                        |          |
| Bezogen auf Betonalter                 | Guter Hydratationsgrad.                         |          | Guter Hydratationsgrad.                         |                | Guter Hydratationsgrad.                                |          |
| Stärker red. Hydratationsgrad.         |                                                 | -2       | Stärker red. Hydratationsgrad.                  |                | -2                                                     |          |
| <b>Qualitätsindex Gefüge</b>           | -3                                              | -4       | -3                                              | -6             | -5                                                     | -5       |
| Gefügequalität                         | gut                                             | gut      | gut                                             | leicht gestört | gut                                                    | gut      |
| K <sub>S</sub> [Vol.%]                 | 8.6                                             | 9.2      | 7.7                                             | 5.1            | 6.2                                                    | 6.8      |
| V <sub>1</sub> [%]                     | 8.1                                             | 9.8      | 23.9                                            | 53.6           | 23.9                                                   | 43       |
| V <sub>2</sub> [%]                     | 5.1                                             | 6.3      | 14.4                                            | 26.9           | 11.1                                                   | 21.6     |
| WB <sub>1</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]   | 0.41                                            | 0.49     | 1.19                                            | 2.68           | 1.44                                                   | 2.58     |
| WB <sub>2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]   | 0.26                                            | 0.32     | 0.72                                            | 1.35           | 0.67                                                   | 1.29     |

## IV Detaillierte Ergebnisse der BE II FT- und der TFB-Prüfung

### IV.1 BE II FT-Prüfung

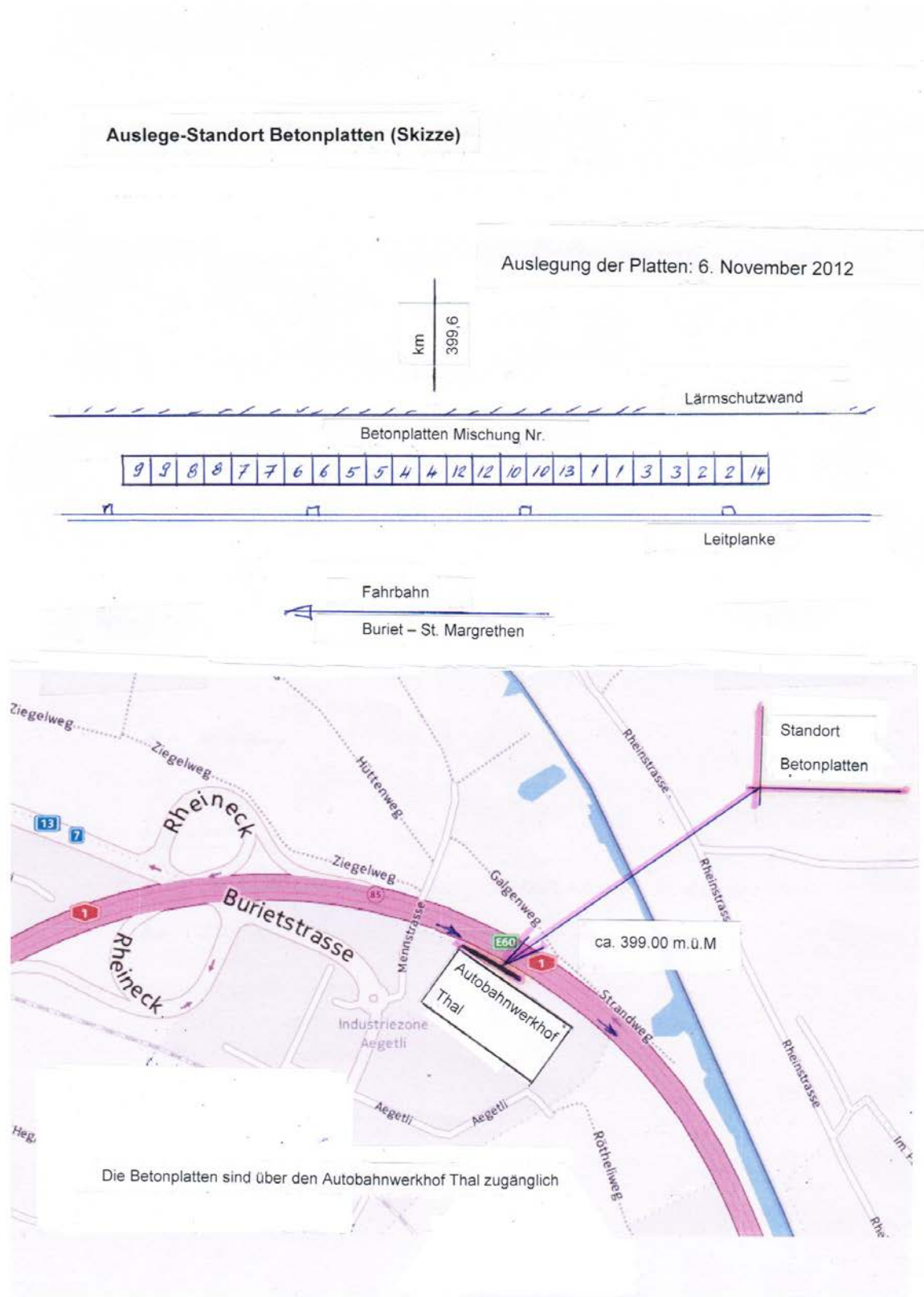
| Mischung Nr.                          | 1                                                                                                                                         | 2                                                                                                                               | 3                                                                                                                                    | 4                                                                                                                              | 5                                                                                                                                         | 6                                                     | 7                                                                                                                              |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| n [-]                                 | 100                                                                                                                                       | 200                                                                                                                             | 100                                                                                                                                  | 100                                                                                                                            | 50                                                                                                                                        | 200                                                   | 50                                                                                                                             |
| $L_n$ [‰]                             | 0.18                                                                                                                                      | 0.24                                                                                                                            | 0.36                                                                                                                                 | 0.16                                                                                                                           | 0.22                                                                                                                                      | 0.21                                                  | 0.28                                                                                                                           |
| K [-]                                 | 0.25                                                                                                                                      | 0.25                                                                                                                            | 0.25                                                                                                                                 | 0.25                                                                                                                           | 0.25                                                                                                                                      | 0.25                                                  | 0.25                                                                                                                           |
| $L_n/K$ [‰]                           | 0.74                                                                                                                                      | 0.96                                                                                                                            | 1.46                                                                                                                                 | 0.63                                                                                                                           | 0.88                                                                                                                                      | 0.87                                                  | 1.15                                                                                                                           |
| $\Delta E_{FT}/E_0$ [%]               | -0.09                                                                                                                                     | 2.82                                                                                                                            | 9.61                                                                                                                                 | -1.61                                                                                                                          | 1.71                                                                                                                                      | 1.57                                                  | 5.34                                                                                                                           |
| WFT-L [%]                             | 50                                                                                                                                        | 97                                                                                                                              | 45                                                                                                                                   | 51                                                                                                                             | 25                                                                                                                                        | 98                                                    | 24                                                                                                                             |
| Beurteilung des FT-widerstandes BE II | tief                                                                                                                                      | hoch                                                                                                                            | tief                                                                                                                                 | tief                                                                                                                           | tief                                                                                                                                      | hoch                                                  | tief                                                                                                                           |
| Befund                                | Alle 6 Prüfkörper nach 100 Zyklen in einem messb. Zustand. Nach 200 Zyklen alle 6 Prüfkörper aufgrund Abwitterungserscheinungen zerstört. | Alle 6 Prüfkörper nach 200 Zyklen in einem messb. Zustand. Nach 400 Zyklen 2 der 6 Prüfkörper aufgrund Kornausbrüchen zerstört. | 4 Prüfkörper nach 100 Zyklen in einem messb. Zustand. Nach 200 Zyklen alle 6 Prüfkörper aufgrund Abwitterungserscheinungen zerstört. | Alle 6 Prüfkörper nach 100 Zyklen in einem messb. Zustand. Nach 200 Zyklen alle 6 Prüfkörper aufgrund Kornausbrüchen zerstört. | Alle 6 Prüfkörper nach 50 Zyklen in einem messb. Zustand. Nach 100 Zyklen alle 6 Prüfkörper aufgrund Abwitterungserscheinungen zerstört.  | 5 Prüfkörper nach 400 Zyklen in einem messb. Zustand. | Alle 6 Prüfkörper nach 50 Zyklen in einem messb. Zustand. Nach 100 Zyklen 3 von 6 Prüfkörper aufgrund Kornausbrüchen zerstört. |
|                                       |                                                                                                                                           |                                                                                                                                 |                                                                                                                                      |                                                                                                                                |                                                                                                                                           |                                                       |                                                                                                                                |
| Mischung Nr.                          | 8                                                                                                                                         | 9                                                                                                                               | 10                                                                                                                                   | 12                                                                                                                             | 13                                                                                                                                        | 14                                                    |                                                                                                                                |
| n [-]                                 | 100                                                                                                                                       | 0                                                                                                                               | 100                                                                                                                                  | 200                                                                                                                            | 200                                                                                                                                       | 200                                                   |                                                                                                                                |
| $L_n$ [‰]                             | 0.11                                                                                                                                      | n. berechenbar                                                                                                                  | 0.91                                                                                                                                 | 0.14                                                                                                                           | 0.49                                                                                                                                      | 0.16                                                  |                                                                                                                                |
| K [-]                                 | 0.25                                                                                                                                      | n. berechenbar                                                                                                                  | 0.25                                                                                                                                 | 0.25                                                                                                                           | 0.32                                                                                                                                      | 0.30                                                  |                                                                                                                                |
| $L_n/K$ [‰]                           | 0.44                                                                                                                                      | n. berechenbar                                                                                                                  | 3.68                                                                                                                                 | 0.55                                                                                                                           | 1.53                                                                                                                                      | 0.53                                                  |                                                                                                                                |
| $\Delta E_{FT}/E_0$ [%]               | -4.24                                                                                                                                     | n. berechenbar                                                                                                                  | 39.52                                                                                                                                | -2.72                                                                                                                          | 10.53                                                                                                                                     | -3.01                                                 |                                                                                                                                |
| Beurteilung des FT-widerstandes BE II | tief                                                                                                                                      | tief                                                                                                                            | tief                                                                                                                                 | hoch                                                                                                                           | mittel                                                                                                                                    | hoch                                                  |                                                                                                                                |
| Befund                                | 4 Prüfkörper nach 100 Zyklen in einem messb. Zustand. Nach 200 Zyklen alle 6 Prüfkörper aufgrund Abwitterungserscheinungen zerstört.      | Alle 6 Prüfkörper nach 50 Zyklen aufgrund Abwitterungserscheinungen zerstört.                                                   | 4 Prüfkörper nach 100 Zyklen in einem messb. Zustand. Nach 200 Zyklen alle 6 Prüfkörper aufgrund Kornausbrüchen zerstört.            | 5 Prüfkörper nach 400 Zyklen in einem messb. Zustand.                                                                          | Alle 6 Prüfkörper nach 200 Zyklen in einem messb. Zustand. Nach 400 Zyklen alle 6 Prüfkörper aufgrund Abwitterungserscheinungen zerstört. | 5 Prüfkörper nach 400 Zyklen in einem messb. Zustand. |                                                                                                                                |

## IV.2 TFB-Prüfung

| Beton                                    | 1                     | 2          | 3                       | 4                     | 5          | 6                     | 7               | 8               | 9               | 10         | 12         | 13 <sup>1)</sup>      | 14 <sup>2)</sup> |
|------------------------------------------|-----------------------|------------|-------------------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|------------|-----------------------|------------------|
| Künstliche LP                            | nein                  | ja         | nein                    | ja                    | nein       | ja                    | nein            | nein            | nein            | ja         | ja         | nein                  | ja               |
| <b>Originaloberfläche</b>                |                       |            |                         |                       |            |                       |                 |                 |                 |            |            |                       |                  |
| Absanden, Korngrösse                     | <1 mm                 | <1 mm      | <1 mm                   | <2 mm                 | <1 mm      | <2 mm                 | >4 mm           | ~4 mm           | >4 mm           | <2 mm      | <4 mm      | <4 mm                 | keine            |
| Abblättern, Tiefe                        | <0.5 mm               | <0.5 mm    | 0.5-1 mm                | <0.5 mm               | <0.5 mm    | 1.5 mm                | >2 mm           | >2 mm           | >2 mm           | <0.5 mm    | <0.5 mm    | 1.5 mm                | <0.5 mm          |
| Rissansätze <sup>3)</sup>                | 2;0                   | 1;0        | 0;3                     | 0;2                   | 0;1        | 0;1                   |                 |                 |                 | 0;1        | 1;0        | 2; 0                  | 1; 0             |
| Ansätze für Rissablösungen <sup>3)</sup> | 1;2                   | -          | 2;3                     | 1;1                   | -          | 1;0                   |                 |                 |                 | 0;1        | -          | 0; 1                  | -                |
| Risse <sup>3)</sup>                      | 1;0                   |            | 2;1                     | 1;0                   | -          | -                     |                 |                 |                 | 1;0        | -          | -                     | -                |
| Rissablösungen <sup>3)</sup>             | 1;1                   | -          | 1;1                     | 1;0                   | -          | -                     |                 |                 |                 | -          | -          | 0; 1                  | -                |
| Bemerkung                                | -                     | -          | -                       | -                     | -          | -                     | Rissnetz        | Rissnetz        | Rissnetz        | -          | -          | -                     | -                |
| <b>Beurteilung</b>                       | <b>genü-<br/>gend</b> | <b>gut</b> | <b>ungenü-<br/>gend</b> | <b>genü-<br/>gend</b> | <b>gut</b> | <b>genü-<br/>gend</b> | <b>schlecht</b> | <b>schlecht</b> | <b>schlecht</b> | <b>gut</b> | <b>gut</b> | <b>genü-<br/>gend</b> | <b>gut</b>       |
| <b>Oberfläche geschnitten</b>            |                       |            |                         |                       |            |                       |                 |                 |                 |            |            |                       |                  |
| Absanden, Korngrösse                     |                       |            |                         |                       |            |                       |                 |                 |                 |            |            | <1 mm                 | keine            |
| Abblättern, Tiefe                        |                       |            |                         |                       |            |                       |                 |                 |                 |            |            | <0.5 mm               | <0.5 mm          |
| Rissansätze <sup>3)</sup>                |                       |            |                         |                       |            |                       |                 |                 |                 |            |            | -                     | 1; 0             |
| Ansätze für Rissablösungen <sup>3)</sup> |                       |            |                         |                       |            |                       |                 |                 |                 |            |            | -                     | -                |
| Risse <sup>3)</sup>                      |                       |            |                         |                       |            |                       |                 |                 |                 |            |            | -                     | -                |
| Rissablösungen <sup>3)</sup>             |                       |            |                         |                       |            |                       |                 |                 |                 |            |            | -                     | -                |
| Bemerkung                                |                       |            |                         |                       |            |                       |                 |                 |                 |            |            | -                     | -                |
| <b>Beurteilung</b>                       |                       |            |                         |                       |            |                       |                 |                 |                 |            |            | <b>gut</b>            | <b>gut</b>       |

<sup>1)</sup> Probenalter 64d; <sup>2)</sup> Probenalter 77d ; <sup>3)</sup> je linke und rechte Seite

## V Auslagerung der Versuchsplatten





## VI Datenblatt für Objektaufnahmen

### Forschungsprojekt VSS 2011/501 Frosttaumittelwiderstand

#### Datenblatt Objektaufnahme

1. Eigentümer .....
2. Objekt: .....
3. Baujahr .....
4. Bauteil: .....
5. Geographische Ausrichtung .....
6. Neigung der Oberfläche .....
7. Unterlagen .....
- .....
- .....
8. Exposition nach EN 206-1: .....
9. Winterdienst, Taumittel / Intensität: .....
10. Absandungsgrad nach Referenz: .....
11. Auffälligkeiten Risse, Ausblühungen etc.: .....
- .....
- .....
12. Anmerkungen: .....
- .....
13. Objektaufnahme: ..... Datum:.....



## VII Begehungen im Kanton Bern

### VII.1 UNF Werkhof Gesigen

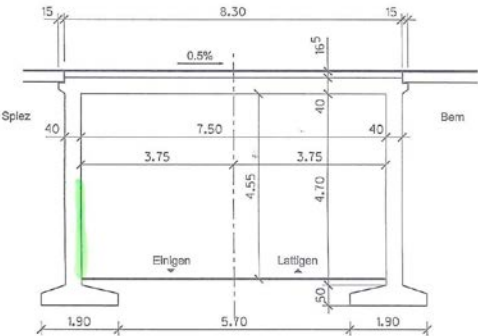
|                                             |                                                                          |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>Allgemeine Angaben</b>                   |                                                                          |
| Eigentümer                                  | ASTRA                                                                    |
| Baujahr                                     | 1969                                                                     |
| Bauwerksnummer                              | T55A                                                                     |
| Standort                                    | 3700 Spiez                                                               |
| Geografische Ausrichtung                    | Nord – Süd, praktisch keine Sonneneinstrahlung                           |
| Höhe m.ü.M.                                 | ca. 610                                                                  |
| Winterdienst, Taumittel / Intensität        | Tausalz intensiv, Sprühnebel                                             |
| Art (Brücke, Tunnel usw.)                   | Unterführung                                                             |
| Bauteil                                     | Wände                                                                    |
| Neigung der Oberfläche                      | Vertikal                                                                 |
| Aufnahmedatum                               | 20.11.2012                                                               |
| Aufnahme durch                              | Urs Mühlethaler                                                          |
| <b>Angaben zum Baustoff</b>                 |                                                                          |
| Zementtyp, -gehalt                          | CEM I ca. 300 kg/m <sup>3</sup>                                          |
| w/z                                         | --                                                                       |
| D <sub>max</sub>                            | --                                                                       |
| Mit / ohne künstliche Luftporeneinführung   | Ohne                                                                     |
| Exposition nach SN EN 206-1                 | --                                                                       |
| Betonqualität (z.B. C30/37 FT)              | --                                                                       |
| <b>Unterhalt</b>                            |                                                                          |
| Präventive Schutzmassnahmen im Neubau       | --                                                                       |
| Instandsetzungsmassnahmen (wann? was?)      | --                                                                       |
| <b>Beurteilung Betonfläche heute</b>        |                                                                          |
| Absandungsgrad nach Referenz                | Absandungsgrad 1, lokal Absandungsgrad 4 im unteren Sockelbereich        |
| Abblättern, Abplatzungen                    | Lokal Abplatzungen im unteren Bereich                                    |
| Popouts                                     | --                                                                       |
| Risse                                       | Wenig Vertikalrisse                                                      |
| Ausblühungen                                | Wenig Kalkausblühungen                                                   |
| Verdacht auf AAR                            | --                                                                       |
| Anmerkungen                                 | Wände beschichtet, blättert ab, Datum Beschichtungsapplikation unbekannt |
| <b>Unterlagen, Dokumente, Informationen</b> |                                                                          |
| Pläne, Skizzen                              | Bauwerksskizze B+S Ing. AG, Bern, 11.04.2006                             |
| Untersuchungsberichte                       | --                                                                       |
| Baujournale                                 | --                                                                       |
| mündlich                                    | Angaben mündlich                                                         |

Skizze

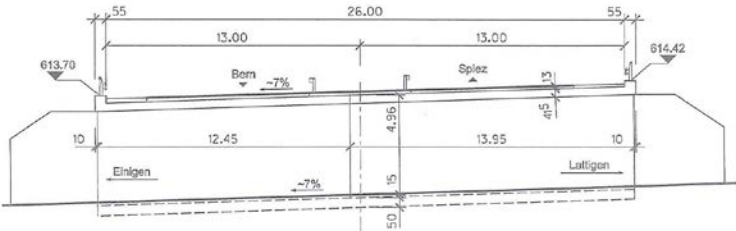
Situation 1:400



Querschnitt 1:100



Längsschnitt 1:200



Bauwerkskizze gezeichnet: B+S Ingenieur AG, Bern, 11.04.2006

| Bauwerks-Nr. | Bauwerksname        | Achse | km    | Kanton | Standort(e) | Baujahr |
|--------------|---------------------|-------|-------|--------|-------------|---------|
| <b>T55A</b>  | UNF Werkhof Gesigen | N6    | 36.81 | BE     | Spiez       | 1969    |

Fotos



Wand Richtung Einigen

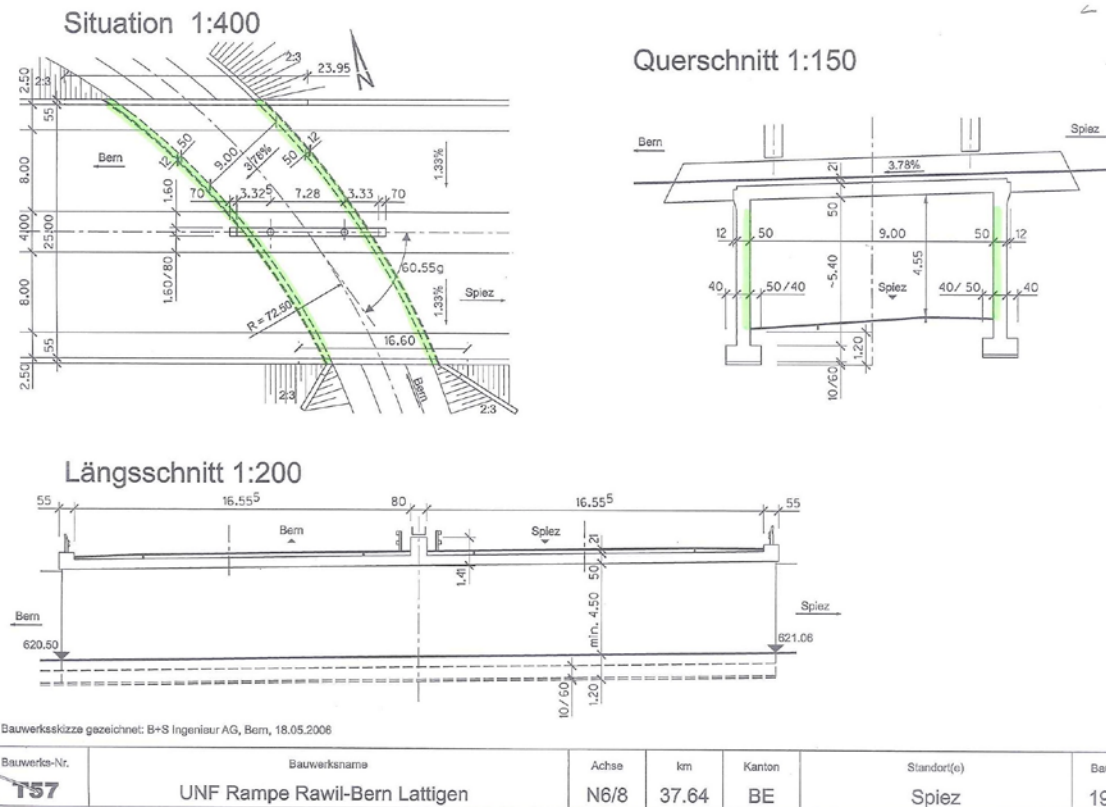


Wand Richtung Einigen

## VII.2 UNF Rampe Rawil – Bern Lattigen

|                                             |                                                                                      |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Allgemeine Angaben</b>                   |                                                                                      |
| Eigentümer                                  | --                                                                                   |
| Baujahr                                     | 1969                                                                                 |
| Bauwerksnummer                              | T57                                                                                  |
| Standort                                    | 3700 Spiez                                                                           |
| Geografische Ausrichtung                    | Ost – West                                                                           |
| Höhe m.ü.M.                                 | ca. 620                                                                              |
| Winterdienst, Taumittel / Intensität        | Tausalz intensiv                                                                     |
| Art (Brücke, Tunnel usw.)                   | Unterführung                                                                         |
| Bauteil                                     | Wände                                                                                |
| Neigung der Oberfläche                      | Vertikal                                                                             |
| Aufnahmedatum                               | 20.11.2012                                                                           |
| Aufnahme durch                              | Urs Mühlethaler                                                                      |
| <b>Angaben zum Baustoff</b>                 |                                                                                      |
| Zementtyp, -gehalt                          | CEM I ca. 300 kg/m <sup>3</sup>                                                      |
| w/z                                         | --                                                                                   |
| Dmax                                        | --                                                                                   |
| Mit / ohne künstliche Luftporeneinführung   | Ohne                                                                                 |
| Exposition nach SN EN 206-1                 | --                                                                                   |
| Betonqualität (z.B. C30/37 FT)              | --                                                                                   |
| <b>Unterhalt</b>                            |                                                                                      |
| Präventive Schutzmassnahmen im Neubau       | --                                                                                   |
| Instandsetzungsmassnahmen (wann? was?)      | 2007/08, grossflächiger Abtrag bis Bewehrung, vorbe-tonieren mit maxit ton 908 FS-TS |
| <b>Beurteilung Betonfläche heute</b>        |                                                                                      |
| Absandungsgrad nach Referenz                | --                                                                                   |
| Abblättern, Abplatzungen                    | Lochfrass                                                                            |
| Popouts                                     | --                                                                                   |
| Risse                                       | Wenig Haarrisse                                                                      |
| Ausblühungen                                | --                                                                                   |
| Verdacht auf AAR                            | --                                                                                   |
| Anmerkungen                                 | Nach Vorbetonierung keine Abplatzungen mehr                                          |
| <b>Unterlagen, Dokumente, Informationen</b> |                                                                                      |
| Pläne, Skizzen                              | Bauwerksskizze B+S Ing. AG, Bern, 18.05.2006                                         |
| Untersuchungsberichte                       | --                                                                                   |
| Baujournale                                 | --                                                                                   |
| mündlich                                    | Angaben mündlich                                                                     |

## Skizze



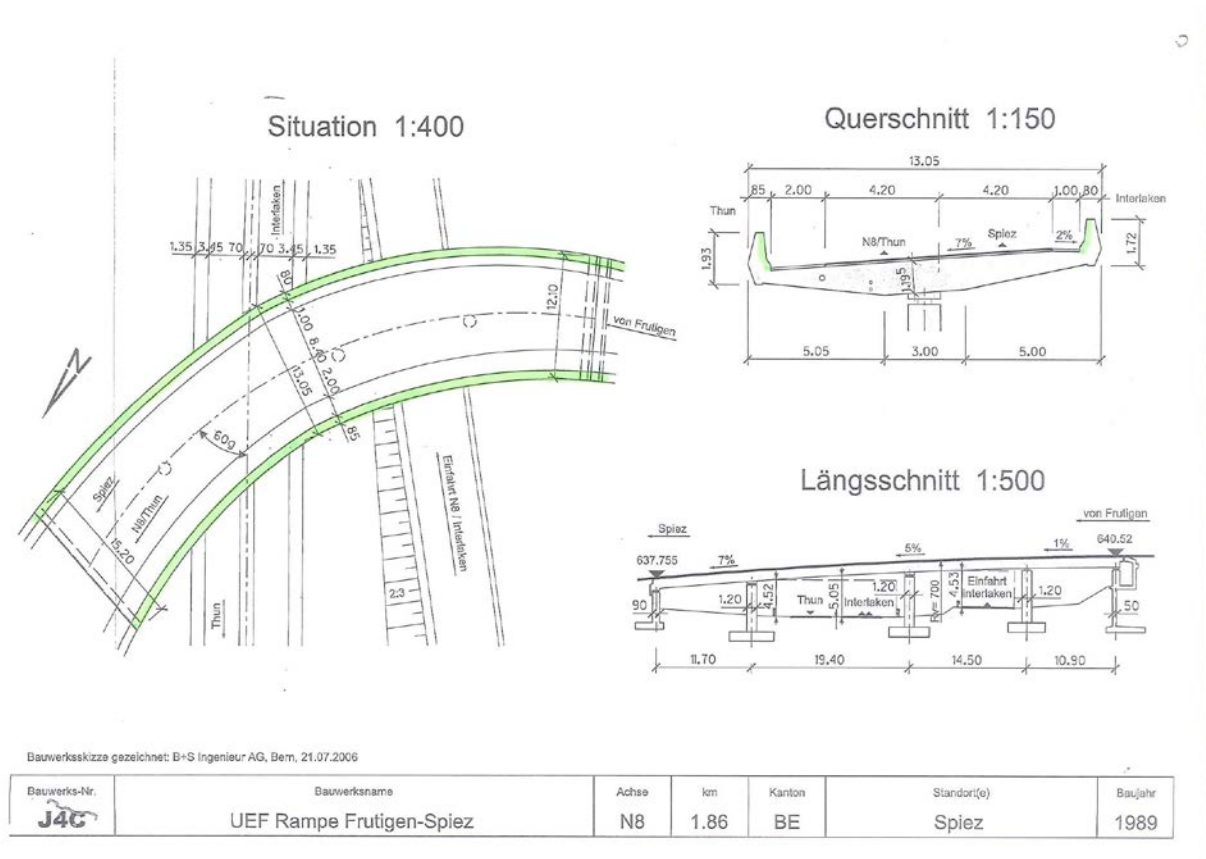
## Fotos



### VII.3 UEF Rampe Frutigen – Spiez

|                                             |                                                                 |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>Allgemeine Angaben</b>                   |                                                                 |
| Eigentümer                                  | --                                                              |
| Baujahr                                     | 1989                                                            |
| Bauwerksnummer                              | J4C                                                             |
| Standort                                    | 3700 Spiez                                                      |
| Geografische Ausrichtung                    | Ost – West                                                      |
| Höhe m.ü.M.                                 | ca. 640                                                         |
| Winterdienst, Taumittel / Intensität        | --                                                              |
| Art (Brücke, Tunnel usw.)                   | Überführung                                                     |
| Bauteil                                     | Bordüre                                                         |
| Neigung der Oberfläche                      | Vertikal / leicht geneigt                                       |
| Aufnahmedatum                               | 20.11.2012                                                      |
| Aufnahme durch                              | Urs Mühlethaler                                                 |
| <b>Angaben zum Baustoff</b>                 |                                                                 |
| Zementtyp, -gehalt                          | CEM I 325 kg/m <sup>3</sup>                                     |
| w/z                                         | --                                                              |
| D <sub>max</sub>                            | --                                                              |
| Mit / ohne künstliche Luftporeneinführung   | Mit                                                             |
| Exposition nach SN EN 206-1                 | --                                                              |
| Betonqualität (z.B. C30/37 FT)              | --                                                              |
| <b>Unterhalt</b>                            |                                                                 |
| Präventive Schutzmassnahmen im Neubau       | --                                                              |
| Instandsetzungsmassnahmen (wann? was?)      | --                                                              |
| <b>Beurteilung Betonfläche heute</b>        |                                                                 |
| Absandungsgrad nach Referenz                | Keine Absandung                                                 |
| Abblättern, Abplatzungen                    | --                                                              |
| Popouts                                     | --                                                              |
| Risse                                       | Wenig Risse                                                     |
| Ausblühungen                                | --                                                              |
| Verdacht auf AAR                            | --                                                              |
| Anmerkungen                                 | Wenige Lunker an der Oberfläche                                 |
| <b>Unterlagen, Dokumente, Informationen</b> |                                                                 |
| Pläne, Skizzen                              | Bauwerksskizze B+S Ing. AG, Bern, 21.07.2006                    |
| Untersuchungsberichte                       | Berichte Technolog. Dienst TBA Kt. BE vom 08.02.89 und 12.01.90 |
| Baujournale                                 | --                                                              |
| mündlich                                    | Angaben mündlich                                                |

Skizze



Fotos



## VII.4 Simmebrücke

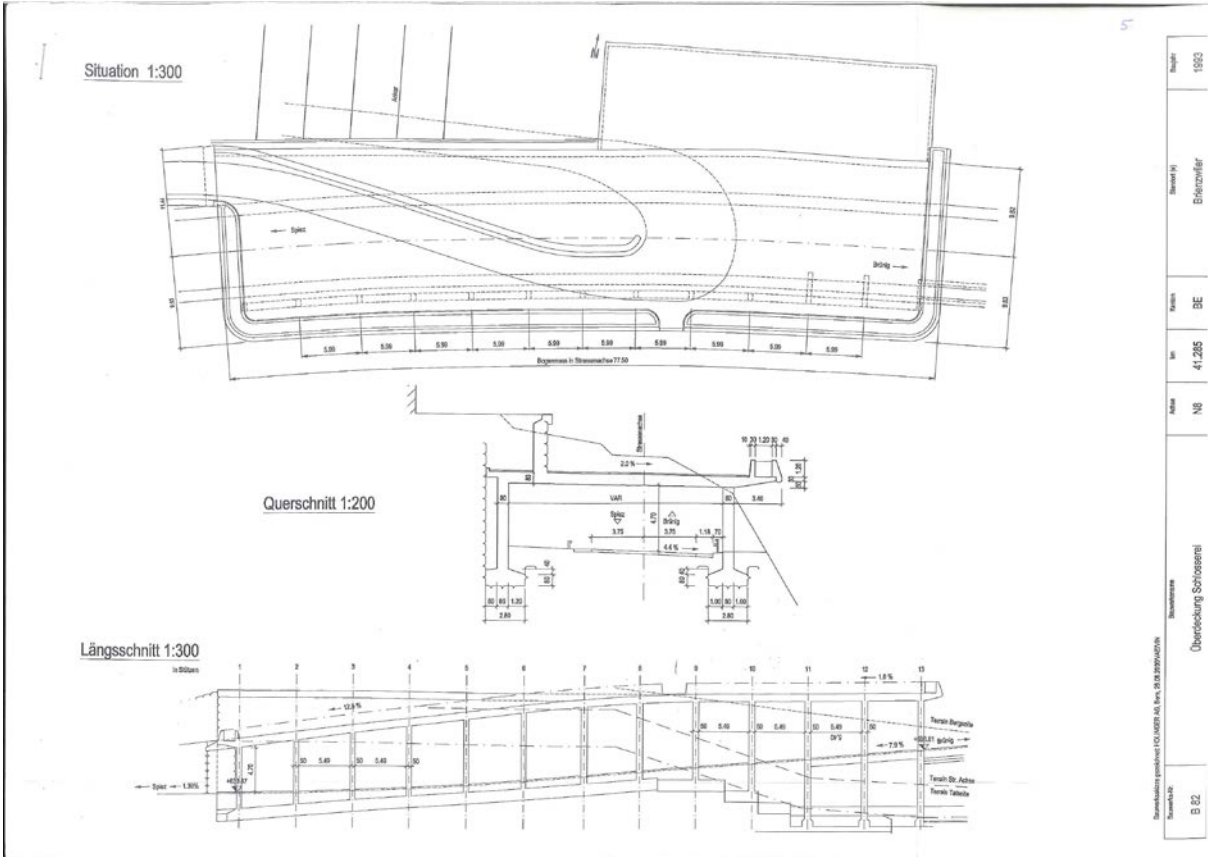
|                                             |                                                                                                 |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Allgemeine Angaben</b>                   |                                                                                                 |
| Eigentümer                                  | ASTRA                                                                                           |
| Baujahr                                     | 2002 - 2003                                                                                     |
| Bauwerksnummer                              | R 14                                                                                            |
| Standort                                    | 3752 Wimmis                                                                                     |
| Geografische Ausrichtung                    | Ost – West, Süd – Nord – Exposition                                                             |
| Höhe m.ü.M.                                 | ca. 636                                                                                         |
| Winterdienst, Taumittel / Intensität        | Taumittel-Sprühanlage. Kalziumchlorid-Sole mit Safe-coat seit 2009 im Einsatz, vorher nur Sole. |
| Art (Brücke, Tunnel usw.)                   | Brücke                                                                                          |
| Bauteil                                     | Brüstungsmauer                                                                                  |
| Neigung der Oberfläche                      | Leicht geneigt                                                                                  |
| Aufnahmedatum                               | 20.11.2012                                                                                      |
| Aufnahme durch                              | Urs Mühlethaler                                                                                 |
| <b>Angaben zum Baustoff</b>                 |                                                                                                 |
| Zementtyp, -gehalt                          | CEM I 42.5 300 kg/m <sup>3</sup> , Flugasche 25 kg/m <sup>3</sup>                               |
| w/z                                         | < 0.45                                                                                          |
| Dmax                                        | --                                                                                              |
| Mit / ohne künstliche Luftporeneinführung   | Mit                                                                                             |
| Exposition nach SN EN 206-1                 | --                                                                                              |
| Betonqualität (z.B. C30/37 FT)              | B 35/25 FT                                                                                      |
| <b>Unterhalt</b>                            |                                                                                                 |
| Präventive Schutzmassnahmen im Neubau       | --                                                                                              |
| Instandsetzungsmassnahmen (wann? was?)      | --                                                                                              |
| <b>Beurteilung Betonfläche heute</b>        |                                                                                                 |
| Absandungsgrad nach Referenz                | Absandungsgrad 0                                                                                |
| Abblättern, Abplatzungen                    | --                                                                                              |
| Popouts                                     | --                                                                                              |
| Risse                                       | Wenig Haarrisse                                                                                 |
| Ausblühungen                                | --                                                                                              |
| Verdacht auf AAR                            | --                                                                                              |
| Anmerkungen                                 | --                                                                                              |
| <b>Unterlagen, Dokumente, Informationen</b> |                                                                                                 |
| Pläne, Skizzen                              | Bauwerksskizze Marchand + Partner AG, Bern, 13.09.2005                                          |
| Untersuchungsberichte                       | --                                                                                              |
| Baujournale                                 | --                                                                                              |
| mündlich                                    | Angaben mündlich                                                                                |



## VII.5 Überdeckung Schlosserei

|                                             |                                                                 |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>Allgemeine Angaben</b>                   |                                                                 |
| Eigentümer                                  | ASTRA                                                           |
| Baujahr                                     | 1993                                                            |
| Bauwerksnummer                              | B 82                                                            |
| Standort                                    | 3856 Brienzwiler                                                |
| Geografische Ausrichtung                    | Ost – West                                                      |
| Höhe m.ü.M.                                 | ca. 635                                                         |
| Winterdienst, Taumittel / Intensität        | Starker Winterdienst                                            |
| Art (Brücke, Tunnel usw.)                   | Überdeckung                                                     |
| Bauteil                                     | Pfeiler Nord / Ost                                              |
| Neigung der Oberfläche                      | Vertikal                                                        |
| Aufnahmedatum                               | 20.11.2012                                                      |
| Aufnahme durch                              | Urs Mühlethaler                                                 |
| <b>Angaben zum Baustoff</b>                 |                                                                 |
| Zementtyp, -gehalt                          | --                                                              |
| w/z                                         | --                                                              |
| Dmax                                        | --                                                              |
| Mit / ohne künstliche Luftporeneinführung   | Mit                                                             |
| Exposition nach SN EN 206-1                 | --                                                              |
| Betonqualität (z.B. C30/37 FT)              | --                                                              |
| <b>Unterhalt</b>                            |                                                                 |
| Präventive Schutzmassnahmen im Neubau       | --                                                              |
| Instandsetzungsmassnahmen (wann? was?)      | --                                                              |
| <b>Beurteilung Betonfläche heute</b>        |                                                                 |
| Absandungsgrad nach Referenz                | Absandungsgrad 0                                                |
| Abblättern, Abplatzungen                    | --                                                              |
| Popouts                                     | --                                                              |
| Risse                                       | --                                                              |
| Ausblühungen                                | --                                                              |
| Verdacht auf AAR                            | --                                                              |
| Anmerkungen                                 | Wenige Lunker                                                   |
| <b>Unterlagen, Dokumente, Informationen</b> |                                                                 |
| Pläne, Skizzen                              | Bauwerksskizze Holinger AG, Bern, 29.08.2006                    |
| Untersuchungsberichte                       | Kt. Strassenbaulabor Bern Nr. 91101, 91107, 91114, 91156, 92098 |
| Baujournale                                 | --                                                              |
| mündlich                                    | Angaben mündlich                                                |

Skizze



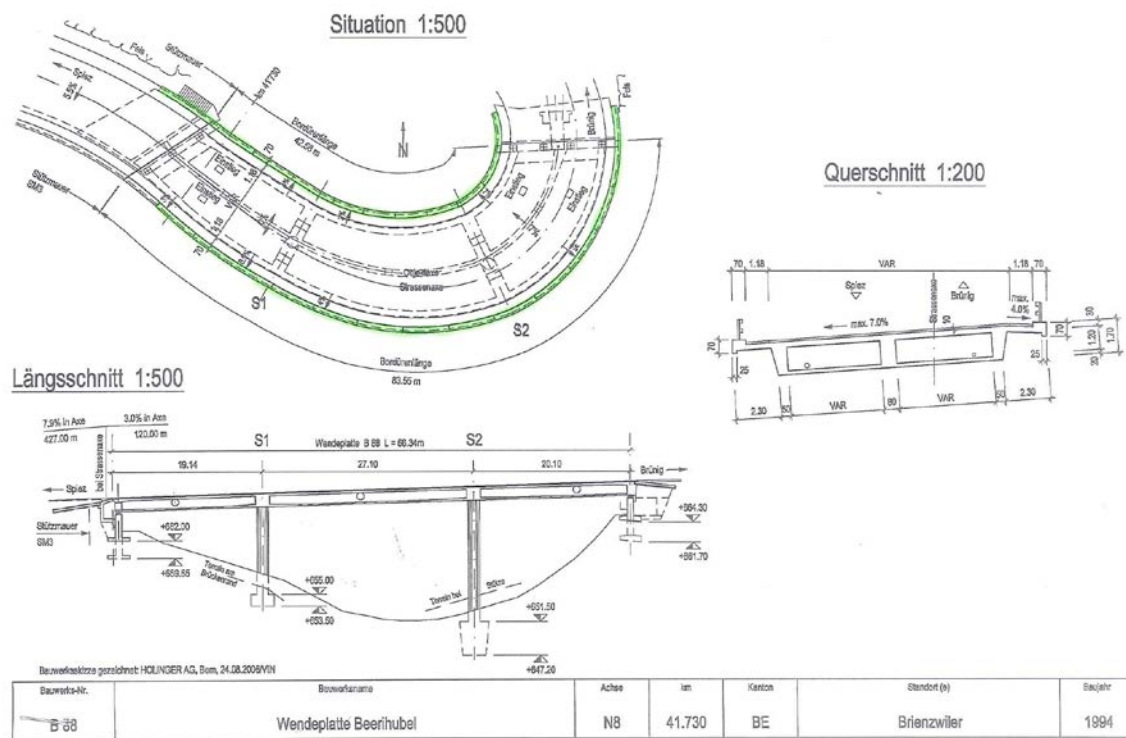
Fotos



## VII.6 Wendeplatte Beerihubel

|                                             |                                                   |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Allgemeine Angaben</b>                   |                                                   |
| Eigentümer                                  | --                                                |
| Baujahr                                     | 1994                                              |
| Bauwerksnummer                              | B 88                                              |
| Standort                                    | 3856 Brienzwiler                                  |
| Geografische Ausrichtung                    | Süd – Nord – Exposition                           |
| Höhe m.ü.M.                                 | ca. 670                                           |
| Winterdienst, Taumittel / Intensität        | Starker Winterdienst                              |
| Art (Brücke, Tunnel usw.)                   | Wendeplatte                                       |
| Bauteil                                     | Bordüren                                          |
| Neigung der Oberfläche                      | Geneigt                                           |
| Aufnahmedatum                               | 20.11.2012                                        |
| Aufnahme durch                              | Urs Mühlethaler                                   |
| <b>Angaben zum Baustoff</b>                 |                                                   |
| Zementtyp, -gehalt                          | 325 kg/m <sup>3</sup>                             |
| w/z                                         | 0.50 – 0.54                                       |
| Dmax                                        | 32 mm                                             |
| Mit / ohne künstliche Luftporeneinführung   | Mit                                               |
| Exposition nach SN EN 206-1                 | --                                                |
| Betonqualität (z.B. C30/37 FT)              | B 35/25 FT                                        |
| <b>Unterhalt</b>                            |                                                   |
| Präventive Schutzmassnahmen im Neubau       | --                                                |
| Instandsetzungsmassnahmen (wann? was?)      | --                                                |
| <b>Beurteilung Betonfläche heute</b>        |                                                   |
| Absandungsgrad nach Referenz                | Absandungsgrad 1                                  |
| Abblättern, Abplatzungen                    | --                                                |
| Popouts                                     | --                                                |
| Risse                                       | Wenig Haarrisse, teils mit Ausblühungen           |
| Ausblühungen                                | Wenig Haarrisse, teils mit Ausblühungen           |
| Verdacht auf AAR                            | --                                                |
| Anmerkungen                                 | --                                                |
| <b>Unterlagen, Dokumente, Informationen</b> |                                                   |
| Pläne, Skizzen                              | Bauwerksskizze Holinger AG, Bern, 24.08.2006      |
| Untersuchungsberichte                       | Kt. Strassenbaulabor Bern Nr. 93266, 93299, 93306 |
| Baujournale                                 | --                                                |
| mündlich                                    | Angaben mündlich                                  |

Skizze



Fotos

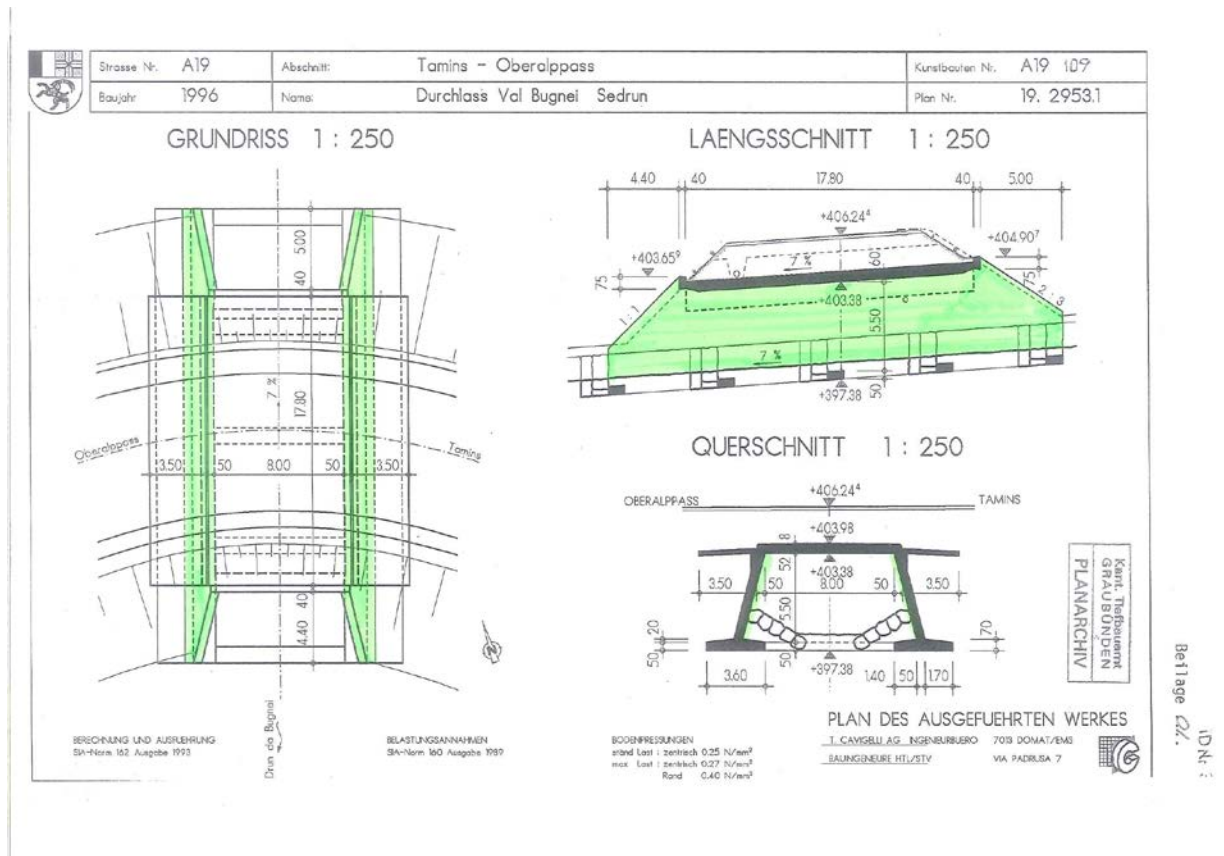


## VIII Begehungen im Kanton Graubünden

### VIII.1 Durchlass Bugnei (ID Nr. 3)

|                                             |                                                                               |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Allgemeine Angaben</b>                   |                                                                               |
| Eigentümer                                  |                                                                               |
| Baujahr                                     | 1996                                                                          |
| Kuba-Nummer                                 | A19 109                                                                       |
| Standort                                    | 7188 Sedrun                                                                   |
| Geografische Ausrichtung                    | Nord – Süd                                                                    |
| Höhe m.ü.M.                                 | Ca. 1400                                                                      |
| Art (Brücke, Tunnel usw.)                   | Brücke                                                                        |
| Winterdienst, Taumittel / Intensität        | --                                                                            |
| Bauteil                                     | Fundament WL Seite Disentis                                                   |
| Neigung der Oberfläche                      | geneigt                                                                       |
| Aufnahmedatum                               | 05.06.13                                                                      |
| Aufnahme durch                              | Gion Hitz, Camkiet Ly                                                         |
| <b>Angaben zum Baustoff</b>                 |                                                                               |
| Zementtyp, -gehalt                          | CEM I 42.5 325 kg/m <sup>3</sup>                                              |
| w/z                                         | 0.48 – 0.52                                                                   |
| Dmax                                        | 32 mm                                                                         |
| Mit / ohne künstliche Luftporeneinführung   | Mit                                                                           |
| Exposition nach SN EN 206-1                 | --                                                                            |
| Betonqualität (z.B. C30/37 FT)              | B 35/25 F                                                                     |
| <b>Unterhalt</b>                            |                                                                               |
| Präventive Schutzmassnahmen im Neubau       | Nein                                                                          |
| Instandsetzungsmassnahmen (wann? was?)      | nein                                                                          |
| Beurteilung Betonfläche heute               | Seite Disentis und Sedrun                                                     |
| Absandungsgrad nach Referenz                | --                                                                            |
| Abblättern, Abplatzungen                    | WL-Wände beidseitig: unterer Eckbereich Abplatzungen                          |
| Popouts                                     | --                                                                            |
| Risse                                       | Keine Frostrisse                                                              |
| Ausblühungen                                | --                                                                            |
| Verdacht auf AAR                            | --                                                                            |
| Anmerkungen                                 | --                                                                            |
| <b>Unterlagen, Dokumente, Informationen</b> |                                                                               |
| Pläne, Skizzen                              | T. Cavigelli AG Ingenieurbüro, Domat/Ems, Plannr. 19.2953.1                   |
| Untersuchungsberichte                       | TBA Kt. GR Labornr. 96 / 37 – 48, Zusammenstellung Betonresultate (Beilage 1) |
| Baujournale                                 | --                                                                            |
| mündlich                                    |                                                                               |

## Skizze



## Fotos



Seite Disentis

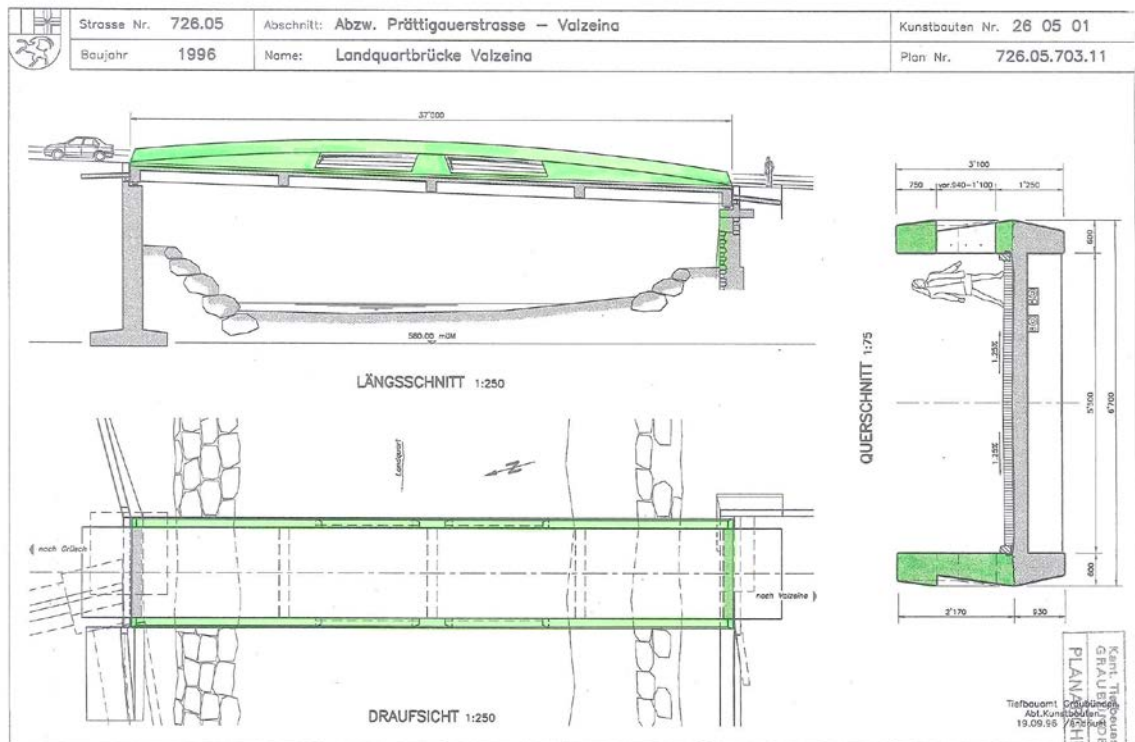


Seite Sedrun

## VIII.2 Landquartbrücke Valzeina (ID Nr. 4)

| Allgemeine Angaben                        |                                                      |                                              |                                                |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Eigentümer                                |                                                      |                                              |                                                |
| Baujahr                                   | 1996                                                 |                                              |                                                |
| Kuba-Nummer                               | 26 0501                                              |                                              |                                                |
| Standort                                  | 7212 Pardisla                                        |                                              |                                                |
| Geografische Ausrichtung                  | Nord – Süd                                           |                                              |                                                |
| Höhe m.ü.M.                               | Ca. 600                                              |                                              |                                                |
| Art (Brücke, Tunnel usw.)                 | Brücke                                               |                                              |                                                |
| Winterdienst, Taumittel / Intensität      | --                                                   | Winterdienst und Taumittel intensiv          |                                                |
| Bauteil                                   | WL Seite Pardisla                                    | Brüstung                                     |                                                |
| Neigung der Oberfläche                    | senkrecht                                            | senkrecht                                    |                                                |
| Aufnahmedatum                             | 05.06.13                                             |                                              |                                                |
| Aufnahme durch                            | Gion Hitz, Camkiet Ly                                |                                              |                                                |
| Angaben zum Baustoff                      |                                                      |                                              |                                                |
| Zementtyp, -gehalt                        | CEM I 42.5 325 kg/m³                                 | CEM I 42.5 350 kg/m³                         |                                                |
| w/z                                       | 0.45 – 0.51                                          | 0.44 – 0.46                                  |                                                |
| Dmax                                      | 32 mm                                                | 32 mm                                        |                                                |
| Mit / ohne künstliche Luftporeneinführung | Mit                                                  | Mit                                          |                                                |
| Exposition nach SN EN 206-1               |                                                      |                                              |                                                |
| Betonqualität (z.B. C30/37 FT)            | B 35/25 F                                            | B 45/35 FT                                   |                                                |
| Unterhalt                                 |                                                      |                                              |                                                |
| Präventive Schutzmassnahmen im Neubau     | Nein                                                 |                                              |                                                |
| Instandsetzungsmassnahmen (wann? was?)    | Nein                                                 |                                              |                                                |
| Beurteilung Betonfläche heute             |                                                      | OW                                           | UW                                             |
| Absandungsgrad nach Referenz              | 0                                                    | Krone: 0 – 1<br>Schal.s.: 0                  | Krone: 1<br>Schal.s.: 0                        |
| Abblättern, Abplatzungen                  | --                                                   | --                                           | --                                             |
| Popouts                                   | --                                                   | Krone: vereinzelt<br>Schal.s.: --            | Krone: vereinzelt<br>Schal.s.: --              |
| Risse                                     | Sehr wenig                                           | Krone: --<br>Schal.s.: horiz.<br>Risse (AAR) | Krone: Längsrisse<br>Schal.s.: horiz.<br>Risse |
| Ausblühungen                              | --                                                   | Krone: --<br>Schal.s.: bei Rissen            | Krone+Schal.s.: bei Rissen                     |
| Verdacht auf AAR                          | --                                                   | Krone: --<br>Schal.s.: bei Rissen            | Krone+Schal.s.: bei Rissen                     |
| Anmerkungen                               | Graffiti                                             | --                                           | --                                             |
| Unterlagen, Dokumente, Informationen      |                                                      |                                              |                                                |
| Pläne, Skizzen                            | TBA Kt. GR Plannr. 726.05.703.11                     |                                              |                                                |
| Untersuchungsberichte                     | TBA Kt. GR Labornr. 96 / 486 – 497, 96 / 1429 - 1440 |                                              |                                                |
| Baujournale                               | --                                                   |                                              |                                                |
| mündlich                                  |                                                      |                                              |                                                |

## Skizze



## Fotos



WL Seite Pardisla

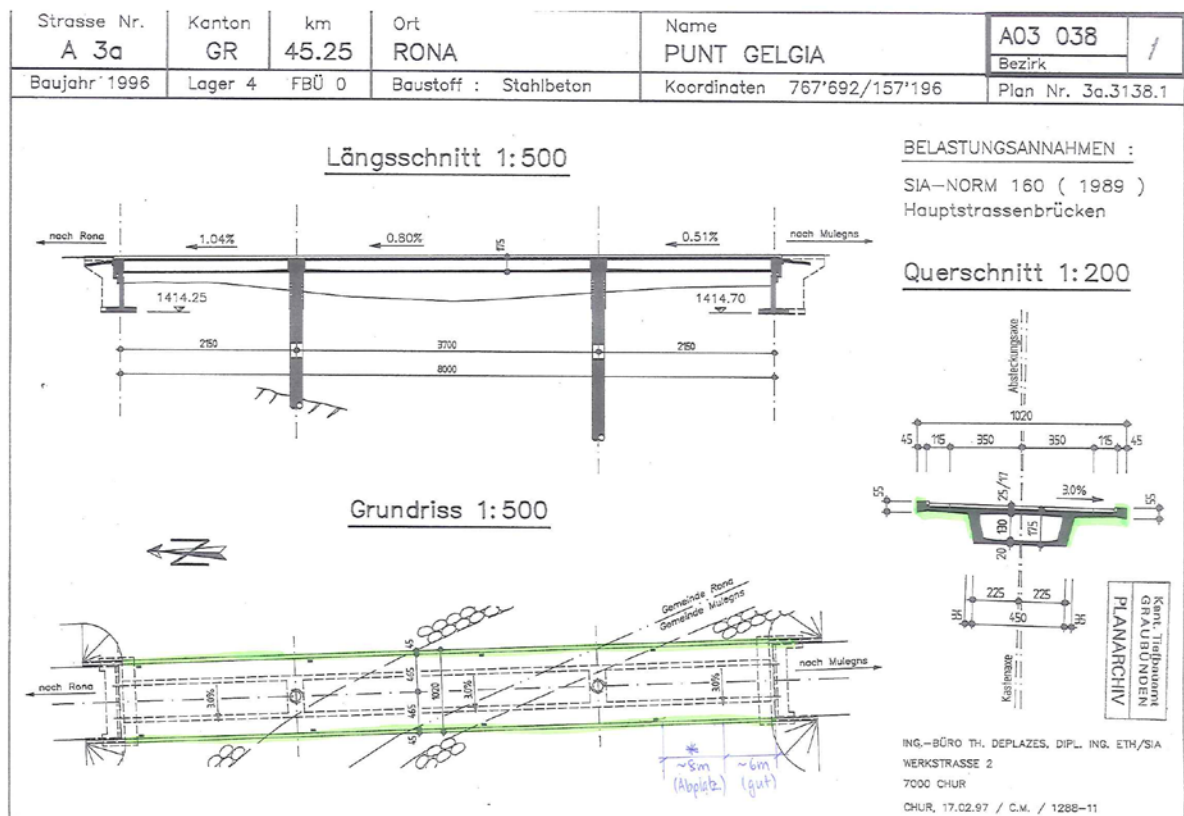


Brüstung unterwasserseitig

## VIII.3 Punt Gelgia (ID Nr. 5)

| Allgemeine Angaben                        |                                                             |                          |            |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------|------------|
| Eigentümer                                |                                                             |                          |            |
| Baujahr                                   | 1996                                                        |                          |            |
| Kuba-Nummer                               | A03 038                                                     |                          |            |
| Standort                                  | 7454 Rona                                                   |                          |            |
| Geografische Ausrichtung                  | Nord – Süd                                                  |                          |            |
| Höhe m.ü.M.                               | Ca. 1400                                                    |                          |            |
| Art (Brücke, Tunnel usw.)                 | Brücke                                                      |                          |            |
| Winterdienst, Taumittel / Intensität      | Winterdienst und Taumittel intensiv                         |                          |            |
| Bauteil                                   | Kordon                                                      | Fahrbahnplatte           |            |
| Neigung der Oberfläche                    | horizontal                                                  | geneigt                  |            |
| Aufnahmedatum                             | 05.06.13                                                    |                          |            |
| Aufnahme durch                            | Gion Hitz, Camkiet Ly                                       |                          |            |
| Angaben zum Baustoff                      |                                                             |                          |            |
| Zementtyp, -gehalt                        | CEM I 42.5 325/350 kg/m³                                    | CEM I 42.5 325/350 kg/m³ |            |
| w/z                                       | 0.46 – 0.51                                                 | 0.45 – 0.47              |            |
| Dmax                                      | 32 mm Juliamaterial                                         | 32 mm Juliamaterial      |            |
| Mit / ohne künstliche Luftporeneinführung | Mit                                                         | Mit                      |            |
| Exposition nach SN EN 206-1               |                                                             |                          |            |
| Betonqualität (z.B. C30/37 FT)            | B 35/25 FT                                                  | B 35/25 FT               |            |
| Unterhalt                                 |                                                             |                          |            |
| Präventive Schutzmassnahmen im Neubau     | Nein                                                        |                          |            |
| Instandsetzungsmassnahmen (wann? was?)    | Nein                                                        |                          |            |
| Beurteilung Betonfläche heute             | UW                                                          | OW                       | Untersicht |
| Absandungsgrad nach Referenz              | 1, bei * 4 (siehe Plan)                                     | 0 – 1                    | --         |
| Abblättern, Abplatzungen                  | --, bei * massiv (z.T. Bewehrung sichtbar)                  | --                       | --         |
| Popouts                                   | Vermehrt, bei * massiv                                      | Wenig                    | --         |
| Risse                                     | --, bei * vorhanden                                         | --                       | --         |
| Ausblühungen                              | --                                                          | --                       | --         |
| Verdacht auf AAR                          | --                                                          | --                       | --         |
| Anmerkungen                               | --                                                          | --                       | --         |
| Unterlagen, Dokumente, Informationen      |                                                             |                          |            |
| Pläne, Skizzen                            | Ing.büro Th. Deplazes Chur; Plan Nr. 3a.3138.1              |                          |            |
| Untersuchungsberichte                     | TBA Kt. GR Zusammenstellung Betonuntersuchungen (Beilage 1) |                          |            |
| Baujournale                               | --                                                          |                          |            |
| mündlich                                  |                                                             |                          |            |

## Skizze



## Fotos



Kordon unterwasserseitig

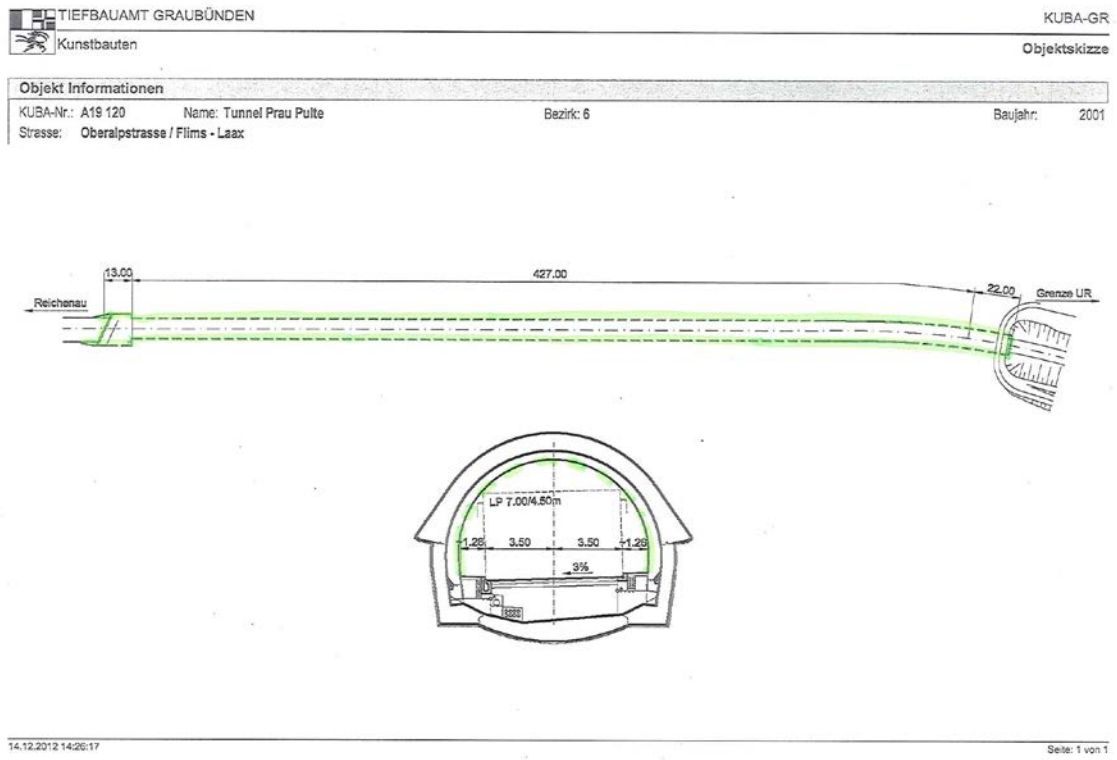


Brückenuntersicht oberwasserseitig

## VIII.4 Tunnel Prau Pulté (ID Nr. 6)

|                                           |                                                                                                                                                     |                                               |                                             |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Allgemeine Angaben                        |                                                                                                                                                     |                                               |                                             |
| Eigentümer                                |                                                                                                                                                     |                                               |                                             |
| Baujahr                                   | 2001                                                                                                                                                |                                               |                                             |
| Kuba-Nummer                               | A19 120                                                                                                                                             |                                               |                                             |
| Standort                                  | Oberalpstrasse / Flims – Laax                                                                                                                       |                                               |                                             |
| Geografische Ausrichtung                  | Nord/Ost – Süd/West                                                                                                                                 |                                               |                                             |
| Höhe m.ü.M.                               | Ca. 1120                                                                                                                                            |                                               |                                             |
| Art (Brücke, Tunnel usw.)                 | Tunnel                                                                                                                                              |                                               |                                             |
| Winterdienst, Taumittel / Intensität      | Winterdienst und Taumittel intensiv                                                                                                                 |                                               |                                             |
| Bauteil                                   | Portal N/O                                                                                                                                          | Portal S/W                                    | Tunnel                                      |
| Neigung der Oberfläche                    | Senkrecht, geneigt                                                                                                                                  | Senkrecht, geneigt                            | gewölbt                                     |
| Aufnahmedatum                             | 05.06.13                                                                                                                                            |                                               |                                             |
| Aufnahme durch                            | Gion Hitz, Camkiet Ly                                                                                                                               |                                               |                                             |
| Angaben zum Baustoff                      |                                                                                                                                                     |                                               |                                             |
| Zementtyp, -gehalt                        |                                                                                                                                                     |                                               |                                             |
| w/z                                       |                                                                                                                                                     |                                               |                                             |
| Dmax                                      |                                                                                                                                                     |                                               |                                             |
| Mit / ohne künstliche Luftporeneinführung |                                                                                                                                                     |                                               |                                             |
| Exposition nach SN EN 206-1               |                                                                                                                                                     |                                               |                                             |
| Betonqualität (z.B. C30/37 FT)            |                                                                                                                                                     |                                               |                                             |
| Unterhalt                                 |                                                                                                                                                     |                                               |                                             |
| Präventive Schutzmassnahmen im Neubau --  | --                                                                                                                                                  | --                                            | Schutzanstrich                              |
| Instandsetzungsmassnahmen (wann? was?)    | --                                                                                                                                                  | --                                            | --                                          |
| Beurteilung Betonfläche heute             |                                                                                                                                                     |                                               |                                             |
| Absandungsgrad nach Referenz              | 0                                                                                                                                                   | Flügelmauer Laax unterer Bereich und Krone: 1 | Rtg.0                                       |
| Abblättern, Abplatzungen                  | --                                                                                                                                                  | --                                            | Lokal Abblättern Beschichtung (Fussbereich) |
| Popouts                                   | --                                                                                                                                                  | --                                            | --                                          |
| Risse                                     | Keine Frostrisse                                                                                                                                    | Keine Frostrisse                              | Keine Frostrisse                            |
| Ausblühungen                              | --                                                                                                                                                  | --                                            | --                                          |
| Verdacht auf AAR                          | --                                                                                                                                                  | --                                            | --                                          |
| Anmerkungen                               | Verkleidung Lärm-schutzelemente                                                                                                                     | --                                            | --                                          |
| Unterlagen, Dokumente, Informationen      |                                                                                                                                                     |                                               |                                             |
| Pläne, Skizzen                            | TBA Kt. GR Objektskizze                                                                                                                             |                                               |                                             |
| Untersuchungsberichte                     | TBA Kt. GR Labornr. 00 / 1727 – 1734, 00 / 2000 – 2003, 01 / 5 – 16, 01 / 1028 – 1035, 832.02 / 246 – 253, 832.03 / 2271 – 2274, 832.04 / 175 - 196 |                                               |                                             |
| Baujournale                               | --                                                                                                                                                  |                                               |                                             |
| mündlich                                  |                                                                                                                                                     |                                               |                                             |

## Skizze



## Fotos



Portal S/W, Flügelmauer Rtg. Laax



Tunnel Fahrtrichtung S-W

## VIII.5 Tardisbrücke (ID Nr. 7)

|                                               |                                                                            |                            |                                                     |                    |                                      |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| Allgemeine Angaben                            |                                                                            |                            |                                                     |                    |                                      |
| Eigentümer                                    |                                                                            |                            |                                                     |                    |                                      |
| Baujahr                                       | 2002                                                                       |                            |                                                     |                    |                                      |
| Kuba-Nummer                                   | T03 012                                                                    |                            |                                                     |                    |                                      |
| Standort                                      | 7302 Landquart                                                             |                            |                                                     |                    |                                      |
| Geografische Ausrichtung                      | Ost – West                                                                 |                            |                                                     |                    |                                      |
| Höhe m.ü.M.                                   | Ca. 480                                                                    |                            |                                                     |                    |                                      |
| Art (Brücke, Tunnel usw.)                     | Brücke                                                                     |                            |                                                     |                    |                                      |
| Winterdienst, Taumittel / Intensität          | Weder Winterdienst noch Taumittel, ein wenig Sprühnebel                    |                            |                                                     |                    |                                      |
| Bauteil                                       | Stützen Seite Mastrils                                                     | Pfeiler WL Seite Landquart |                                                     |                    |                                      |
| Neigung der Oberfläche                        | Geneigt                                                                    | Geneigt, horizontal        |                                                     |                    |                                      |
| Aufnahmedatum                                 | 05.06.13                                                                   |                            |                                                     |                    |                                      |
| Aufnahme durch                                | Gion Hitz, Camkiet Ly                                                      |                            |                                                     |                    |                                      |
| Angaben zum Baustoff                          |                                                                            |                            |                                                     |                    |                                      |
| Zementtyp, -gehalt                            | CEM I 42.5 350 kg/m³                                                       | CEM I 42.5 350 kg/m³       |                                                     |                    |                                      |
| w/z                                           | 0.43                                                                       | 0.43                       |                                                     |                    |                                      |
| Dmax                                          | 16 mm                                                                      | 16 mm                      |                                                     |                    |                                      |
| Mit / ohne künstliche Luftporenein-Mitführung |                                                                            | Mit                        |                                                     |                    |                                      |
| Exposition nach SN EN 206-1                   |                                                                            |                            |                                                     |                    |                                      |
| Betonqualität (z.B. C30/37 FT)                | B 45/35 F                                                                  | B 45/35 F                  |                                                     |                    |                                      |
| Unterhalt                                     |                                                                            |                            |                                                     |                    |                                      |
| Präventive Schutzmassnahmen im Neubau         | Nein                                                                       |                            |                                                     |                    |                                      |
| Instandsetzungsmassnahmen (wann? was?)        | Nein                                                                       |                            |                                                     |                    |                                      |
| Beurteilung Betonfläche heute                 | Stütze UW                                                                  | Stütze OW                  | WL Wand                                             | WL                 | Pfeiler                              |
| Absandungsgrad nach Referenz                  | 0                                                                          | 0                          | 0                                                   | 0                  | 0                                    |
| Abblättern, Abplatzungen                      | --                                                                         | --                         | --                                                  | --                 | --                                   |
| Popouts                                       | --                                                                         | --                         | --                                                  | Vereinzelt         | --                                   |
| Risse                                         | Seite Nord: spinnennetzartige Risse                                        | --                         | --                                                  | Wenig Schwindrisse | Wenig (keine Frostrisse), b ≈ 0.1 mm |
| Ausblühungen                                  | --                                                                         | --                         | Wenig                                               | --                 | --                                   |
| Verdacht auf AAR                              | --                                                                         | --                         | --                                                  | --                 | --                                   |
| Anmerkungen                                   | --                                                                         | --                         | Lunker (Konter-schalung), lokal leichte Entmischung | --                 | --                                   |
| Unterlagen, Dokumente, Informationen          |                                                                            |                            |                                                     |                    |                                      |
| Pläne, Skizzen                                | --                                                                         |                            |                                                     |                    |                                      |
| Untersuchungsberichte                         | TBA Kt. GR Bericht Nr. 832.02 / 2349-2352, 2529-2532, 2633-2640, 3008-3019 |                            |                                                     |                    |                                      |
| Baujournale                                   | --                                                                         |                            |                                                     |                    |                                      |
| mündlich                                      |                                                                            |                            |                                                     |                    |                                      |

## Skizze

Fehlt

## Fotos



*Stütze Seite Mastrils unterwasserseitig*

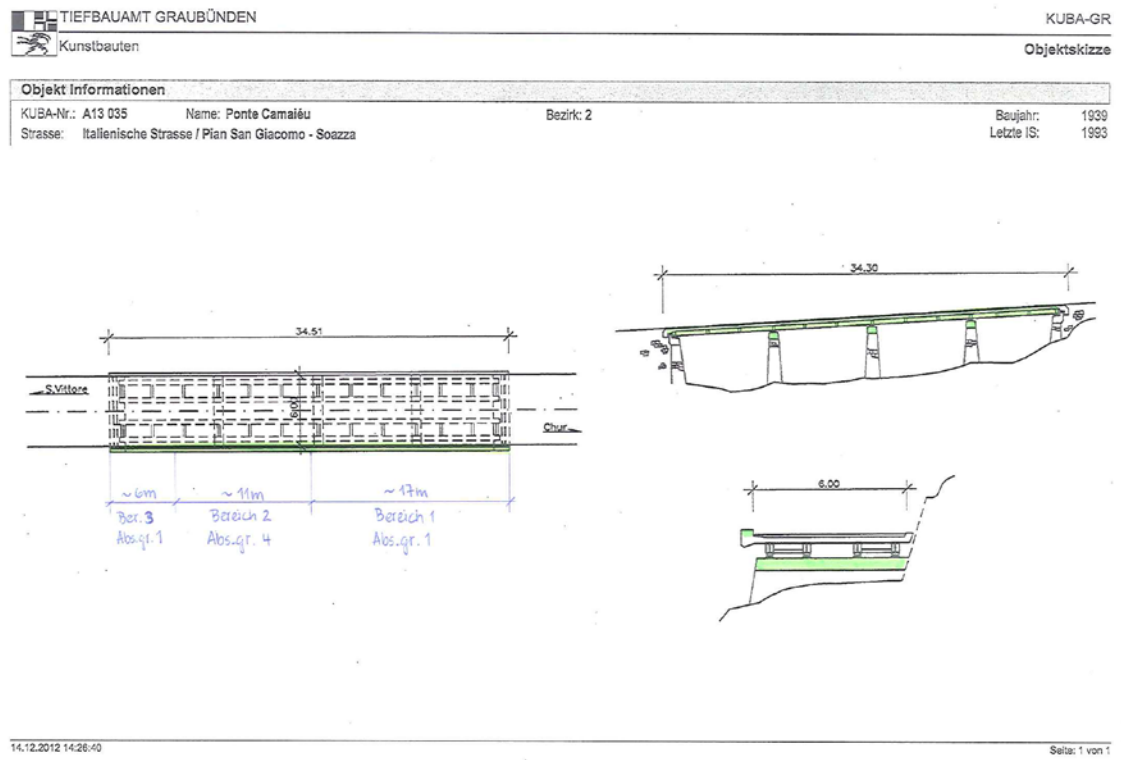


*Widerlager Seite Landquart*

## VIII.6 Ponte Camaiéu (ID Nr. 10)

|                                           |                                                                                                         |                                |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Allgemeine Angaben                        |                                                                                                         |                                |
| Eigentümer                                |                                                                                                         |                                |
| Baujahr                                   | 1993                                                                                                    |                                |
| Kuba-Nummer                               | A13 035                                                                                                 |                                |
| Standort                                  | 6534 San Vittore                                                                                        |                                |
| Geografische Ausrichtung                  | Nord – Süd                                                                                              |                                |
| Höhe m.ü.M.                               | Ca. 960                                                                                                 |                                |
| Art (Brücke, Tunnel usw.)                 | Brücke                                                                                                  |                                |
| Winterdienst, Taumittel / Intensität      | Winterdienst und Taumittel intensiv                                                                     |                                |
| Bauteil                                   | Kordon                                                                                                  | Pfeilerköpfe                   |
| Neigung der Oberfläche                    | Horizontal                                                                                              | Senkrecht                      |
| Aufnahmedatum                             | 05.06.13                                                                                                |                                |
| Aufnahme durch                            | Gion Hitz, Camkiet Ly                                                                                   |                                |
| Angaben zum Baustoff                      |                                                                                                         |                                |
| Zementtyp, -gehalt                        | CEM I 300 – 325 kg/m³                                                                                   | NPC 325 kg/m³                  |
| w/z                                       | 0.40 – 0.45                                                                                             | 0.45                           |
| Dmax                                      | 32 mm                                                                                                   | 32 mm                          |
| Mit / ohne künstliche Luftporeneinführung | Mit                                                                                                     | Mit                            |
| Exposition nach SN EN 206-1               |                                                                                                         |                                |
| Betonqualität (z.B. C30/37 FT)            | --                                                                                                      | B 35/25 FT                     |
| Unterhalt                                 |                                                                                                         |                                |
| Präventive Schutzmassnahmen im Neubau     | Nein                                                                                                    |                                |
| Instandsetzungsmassnahmen (wann? was?)    | Nein                                                                                                    |                                |
| Beurteilung Betonfläche heute             |                                                                                                         |                                |
| Absandungsgrad nach Referenz              | Bereich 1: 1<br>Bereich 2: 4<br>Bereich 3: 1                                                            | --                             |
| Abblättern, Abplatzungen                  | Bereiche 1+3: --<br>Bereich 2: Abplatzungen                                                             | --                             |
| Popouts                                   | Bereich 1+3: wenig<br>Bereich 2: vermehrt                                                               | --                             |
| Risse                                     | --                                                                                                      | --                             |
| Ausblühungen                              | --                                                                                                      | --                             |
| Verdacht auf AAR                          | --                                                                                                      | --                             |
| Anmerkungen                               | --                                                                                                      | Gut geschützt (unter Fahrbahn) |
| Unterlagen, Dokumente, Informationen      |                                                                                                         |                                |
| Pläne, Skizzen                            | TBA Kt. GR Objektskizze 14.12.12                                                                        |                                |
| Untersuchungsberichte                     | TBA Kt. GR Berichtnr. H13/744, TBA Kt. GR Labornr. N 13c / 126 – 131, N 13c / 857 – 862, LPM A-15'020-1 |                                |
| Baujournale                               | --                                                                                                      |                                |
| mündlich                                  |                                                                                                         |                                |

## Skizze



## Fotos



Kordon



Pfeilerkopf

## IX Details zur Validierung der BE I FT- und BE II FT-Prüfung

### IX.1 Übersicht über die Ergebnisse

|                   | Beurteilung übereinstimmend |              |                            | SIA beurteilt strenger |             |            | SIA beurteilt schwächer |              |                       |
|-------------------|-----------------------------|--------------|----------------------------|------------------------|-------------|------------|-------------------------|--------------|-----------------------|
|                   | Anz.                        | Proz.        | Betonsorte                 | Anz.                   | Proz.       | Betonsorte | Anz.                    | Proz.        | Betonsorte            |
| SIA vs. BE I      | 11                          | 55%          | 2, 3-5, 9, 10, 13, 17-20   | 0                      | 0%          |            | 9                       | 45%          | 1, 6-8, 11, 12, 14-16 |
| SIA vs. BE II     | 13                          | 65%          | 3-5, 6-8, 11-13, 16, 18-20 | 1                      | 5%          | 17         | 6                       | 30%          | 1-2, 9*-10, 14-15     |
| <b>Mittelwert</b> | <b>12</b>                   | <b>60.0%</b> |                            | <b>0.5</b>             | <b>2.5%</b> |            | <b>7.5</b>              | <b>37.5%</b> |                       |
| <b>Stand.abw.</b> | <b>1.41</b>                 | <b>7%</b>    |                            | <b>0.7</b>             | <b>4%</b>   |            | <b>2.1</b>              | <b>11%</b>   |                       |

\* Abweichung von 2 Stufen

|                   | Beurteilung übereinstimmend |              |                          | BE I beurteilt strenger |              |                       | BE I beurteilt schwächer |             |            |
|-------------------|-----------------------------|--------------|--------------------------|-------------------------|--------------|-----------------------|--------------------------|-------------|------------|
|                   | Anz.                        | Proz.        | Betonsorte               | Anz.                    | Proz.        | Betonsorte            | Anz.                     | Proz.       | Betonsorte |
| BE I vs. SIA      | 11                          | 55%          | 2, 3-5, 9, 10, 13, 17-20 | 9                       | 45%          | 1, 6-8, 11, 12, 14-16 | 0                        | 0%          |            |
| BE I vs. BE II    | 10                          | 50%          | 1, 3-5, 13-15, 18-20     | 7                       | 35%          | 6-8, 11-12, 16-17     | 3                        | 15%         | 2, 9, 10   |
| <b>Mittelwert</b> | <b>10.5</b>                 | <b>52.5%</b> |                          | <b>8</b>                | <b>40.0%</b> |                       | <b>1.5</b>               | <b>7.5%</b> |            |
| <b>Stand.abw.</b> | <b>0.7</b>                  | <b>4%</b>    |                          | <b>1.4</b>              | <b>7%</b>    |                       | <b>2.1</b>               | <b>11%</b>  |            |

|                   | Beurteilung übereinstimmend |              |                            | BE II beurteilt strenger |              |                   | BE II beurteilt schwächer |              |                   |
|-------------------|-----------------------------|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------|-------------------|---------------------------|--------------|-------------------|
|                   | Anz.                        | Proz.        | Betonsorte                 | Anz.                     | Proz.        | Betonsorte        | Anz.                      | Proz.        | Betonsorte        |
| BE II vs. BE I    | 10                          | 50%          | 1, 3-5, 13-15, 18-20       | 3                        | 15%          | 2, 9, 10          | 7                         | 35%          | 6-8, 11-12, 16-17 |
| BE II vs. SIA     | 13                          | 65%          | 3-5, 6-8, 11-13, 16, 18-20 | 6                        | 30%          | 1-2, 9*-10, 14-15 | 1                         | 5%           | 17                |
| <b>Mittelwert</b> | <b>11.5</b>                 | <b>57.5%</b> |                            | <b>4.5</b>               | <b>22.5%</b> |                   | <b>4.0</b>                | <b>20.0%</b> |                   |
| <b>Stand.abw.</b> | <b>2.1</b>                  | <b>11%</b>   |                            | <b>2.1</b>               | <b>11%</b>   |                   | <b>4.2</b>                | <b>21%</b>   |                   |

\* Abweichung von 2 Stufen

## IX.2 Geprüfte Betone und Detailergebnisse

### IX.2.1 Teil 1

|                                                   | Beton                |                      |                      |                      |                       |                    |                     |
|---------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|
|                                                   | 1                    | 2                    | 3                    | 4                    | 5                     | 6                  | 7                   |
| Zem.typ                                           | CEM II/A-LL<br>42.5N | CEM II/A-LL<br>42.5N | CEM II/A-LL<br>42.5N | CEM II/A-LL<br>42.5N | CEM I 42.5N           | CEM III/B<br>32.5N | CEM II/A-D<br>52.5R |
| Zem.geh. [kg/m <sup>3</sup> ]                     | 370                  | 330                  | 330                  | 340                  | 320                   | 350                | 355                 |
| Zusatzstoff 1                                     | --                   | --                   | --                   | --                   | --                    | --                 | --                  |
| Gehalt [kg/m <sup>3</sup> ]                       | --                   | --                   | --                   | --                   | --                    | --                 | --                  |
| Zusatzstoff 2                                     | --                   | --                   | --                   | --                   | --                    | --                 | --                  |
| Gehalt [kg/m <sup>3</sup> ]                       | --                   | --                   | --                   | --                   | --                    | --                 | --                  |
| Festigkeitsklasse                                 | C50/60               | C35/45               | C30/37               | C30/37               | C25/30                | C30/37             | C50/60              |
| Expo.klasse                                       | XD3                  | XD3                  | XF2                  | XF4                  | XC4, XD1,<br>XD2, XF2 | XC4, XD3,<br>XF4   | XC4, XD3,<br>XF4    |
| Konsistenz                                        | C3                   | C3                   | --                   | --                   | C3                    | --                 | --                  |
| D <sub>max</sub> [mm]                             | 16                   | 32                   | 16                   | 32                   | 32                    | 32                 | 16                  |
| Mit LP                                            | nein                 | nein                 | ja                   | ja                   | ja                    | --                 | --                  |
| VM / AM [- / mm]                                  | 1.04                 | 1.04                 | 1.09 / 450           | 1.10 / 405           | 1.04                  | 470.00             | 430.00              |
| Luftgehalt [%]                                    | 1.1                  | 1.1                  | 5.1                  | 5.7                  | 3.5                   | 3.8                | 3.9                 |
| Frischbetonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ]        | 2430                 | 2460                 | 2330                 | 2341                 | 2388                  | 2371               | 2373                |
| W/Z-Wert                                          | 0.42                 | 0.42                 | 0.43                 | 0.35                 | 0.48                  | 0.40               | 0.41                |
| Herstelldatum                                     | 25.09.2008           | 25.09.2008           | 04.11.2008           | 04.11.2008           | 24.10.2008            | 02.04.2010         | 02.04.2010          |
| Widerstandsfaktor WFT-P [%]                       | < 50                 | < 50                 | > 80                 | > 80                 | 80 - 50               | 80 - 50            | 80 - 50             |
| Porenabstandsfaktor [mm]                          | 0.360                | 0.492                | 0.131                | 0.144                | 0.193                 | 0.212              | 0.237               |
| <b>Beurteilung des FT-<br/>Widerstandes BE I</b>  | <b>tief</b>          | <b>tief</b>          | <b>hoch</b>          | <b>hoch</b>          | <b>mittel</b>         | <b>mittel</b>      | <b>mittel</b>       |
| n [-]                                             | 100                  | 100                  | 200                  | 200                  | 100                   | 200                | 200                 |
| <b>WFT-L [%]</b>                                  | <b>33</b>            | <b>25</b>            | <b>81</b>            | <b>84</b>            | <b>46</b>             | <b>99</b>          | <b>97</b>           |
| <b>Beurteilung des FT-<br/>Widerstandes BE II</b> | <b>tief</b>          | <b>tief</b>          | <b>hoch</b>          | <b>hoch</b>          | <b>tief</b>           | <b>hoch</b>        | <b>hoch</b>         |
| SIA 262/1, Anhang C [g/m <sup>3</sup> ]           | 2500                 | 2200                 | 40                   | 40                   | 700                   | 400                | 100                 |
| <b>Beurteilung des FT-<br/>Widerstandes</b>       | <b>tief</b>          | <b>mittel</b>        | <b>hoch</b>          | <b>hoch</b>          | <b>mittel</b>         | <b>hoch</b>        | <b>hoch</b>         |
| U <sub>E</sub> [Vol. %]                           | 10                   | 9.7                  | 8.9                  | 6.8                  | 10.6                  | 8.3                | 8.4                 |
| n [Vol. %]                                        | 11.9                 | 10.9                 | 13                   | 10.5                 | 13.4                  | 11.2               | 12.6                |
| LP [Vol. %]                                       | 1.9                  | 1.2                  | 4.1                  | 3.7                  | 2.8                   | 2.9                | 4.2                 |
| ρ <sub>R110</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]            | 2339                 | 2372                 | 2342                 | 2418                 | 2332                  | 2349               | 2318                |
| A [Vol. %]                                        | 1.6                  | 0.6                  | 3.8                  | 3.4                  | 3.8                   | 2.9                | 3.6                 |
| A <sub>900</sub> [Vol. %]                         | 0.3                  | 0.1                  | 1.5                  | 1.3                  | 0.9                   | 0.9                | 0.8                 |
| AF [mm]                                           | 0.360                | 0.492                | 0.131                | 0.144                | 0.193                 | 0.212              | 0.237               |
| K <sub>5</sub> [Vol. %]                           | 4.1                  | 4.5                  | 3.7                  | 1.4                  | 5.5                   | 2.8                | 2.8                 |
| V <sub>1</sub> [%]                                | 7.2                  | 2.5                  | 40.1                 | 93.7                 | 16.9                  | 32                 | 29.5                |
| V <sub>2</sub> [%]                                | 3.0                  | 1.1                  | 16.6                 | 19.6                 | 8.8                   | 10.7               | 9.8                 |
| WB <sub>1</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]              | 43                   | 15                   | 241                  | 562                  | 85                    | 192                | 177                 |
| WB <sub>2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]              | 18                   | 7                    | 100                  | 118                  | 44                    | 64                 | 59                  |

## IX.2.2 Teil 2

|                                              | Beton              |                     |                     |                    |                    |                      |
|----------------------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
|                                              | 8                  | 9                   | 10                  | 11                 | 12                 | 13                   |
| Zem.typ                                      | CEM III/B<br>32.5N | CEM II/A-D<br>52.5R | CEM II/A-D<br>52.5R | CEM III/B<br>32.5N | CEM III/B<br>32.5N | CEM II/A-LL<br>42.5N |
| Zem.geh. [kg/m <sup>3</sup> ]                | 355                | 325                 | 355                 | 480                | 450                | 320                  |
| Zusatzstoff 1                                | --                 | Hydrolent           | --                  | Hydrolent          | Hydrolent          | Kibalent             |
| Gehalt [kg/m <sup>3</sup> ]                  | --                 | 15                  | --                  | 50                 | 20                 | 30                   |
| Zusatzstoff 2                                | --                 | --                  | --                  | --                 | --                 | etum Superfib        |
| Gehalt [kg/m <sup>3</sup> ]                  | --                 | --                  | --                  | --                 | --                 | 0.6                  |
| Festigkeitsklasse                            | C30/37             | C50/60              | C50/60              | C30/37             | C30/37             | C30/37               |
| Expo.klasse                                  | XC4, XD3,<br>XF4   | XC4, XD3,<br>XF4    | XC4, XD3,<br>XF4    | XC4, XD3,<br>XF4   | XC4, XD3,<br>XF4   | XC4, XD3,<br>XF4     |
| Konsistenz                                   | --                 | --                  | --                  | SVB                | SF2, SVB           | C3                   |
| D <sub>max</sub> [mm]                        | 16                 | 32                  | 16                  | 8                  | 16                 | 16                   |
| Mit LP                                       | --                 | ja                  | --                  | --                 | --                 | ja                   |
| VM / AM [- / mm]                             | 470.00             | 460.00              | 430.00              | 692.00             | 710.00             | 1.08                 |
| Luftgehalt [%]                               | 3.5                | 3.0                 | 3.2                 | 4.0                | 3.8                | 2.7                  |
| Frischbetonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ]   | 2391               | 2396                | 2396                | 2293               | 2329               | 2298                 |
| W/Z-Wert                                     | 0.42               | 0.45                | 0.43                | 0.41               | 0.42               | 0.41                 |
| Herstelldatum                                | 05.04.2010         | 07.04.2010          | 09.04.2010          | 18.03.2010         | 19.03.2010         | 13.04.2010           |
| Widerstandsfaktor WFT-P [%]                  | 80 - 50            | > 80                | > 80                | 80 - 50            | 80 - 50            | > 80                 |
| Porenabstandsfaktor [mm]                     | 0.246              | 0.164               | 0.150               | 0.299              | 0.200              | 0.107                |
| <b>Beurteilung des FT-Widerstandes BE I</b>  | <b>mittel</b>      | <b>hoch</b>         | <b>hoch</b>         | <b>mittel</b>      | <b>mittel</b>      | <b>hoch</b>          |
| n [-]                                        | 200                | 100                 | 200                 | 200                | 200                | 200                  |
| <b>WFT-L [%]</b>                             | <b>102</b>         | <b>28</b>           | <b>97</b>           | <b>106</b>         | <b>105</b>         | <b>104</b>           |
| <b>Beurteilung des FT-Widerstandes BE II</b> | <b>hoch</b>        | <b>tief</b>         | <b>mittel</b>       | <b>hoch</b>        | <b>hoch</b>        | <b>hoch</b>          |
| SIA 262/1, Anhang C [g/m <sup>2</sup> ]      | 200                | 100                 | 70                  | 800                | 500                | 50                   |
| <b>Beurteilung des FT-Widerstandes</b>       | <b>hoch</b>        | <b>hoch</b>         | <b>hoch</b>         | <b>hoch</b>        | <b>hoch</b>        | <b>hoch</b>          |
| U <sub>E</sub> [Vol. %]                      | 7.9                | 9.3                 | 11.2                | 12.5               | 12.3               | 11.6                 |
| n [Vol. %]                                   | 10.8               | 12.3                | 15.1                | 17.1               | 16.7               | 18.4                 |
| LP [Vol. %]                                  | 2.9                | 3                   | 3.9                 | 4.6                | 4.4                | 6.8                  |
| ρ <sub>R110</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]       | 2338               | 2342                | 2277                | 2133               | 2176               | 2212                 |
| A [Vol. %]                                   | 3.1                | 3                   | 3.7                 | 5.9                | 5.5                | 3.8                  |
| A <sub>300</sub> [Vol. %]                    | 0.7                | 1.3                 | 1.6                 | 0.8                | 1.5                | 2.1                  |
| AF [mm]                                      | 0.246              | 0.164               | 0.150               | 0.299              | 0.200              | 0.107                |
| K <sub>5</sub> [Vol. %]                      | 2.2                | 4.1                 | 5.6                 | 4.6                | 5.1                | 6.1                  |
| V <sub>1</sub> [%]                           | 33.5               | 31.8                | 29.2                | 17.8               | 29.3               | 33.8                 |
| V <sub>2</sub> [%]                           | 9.3                | 13.9                | 14.6                | 6.6                | 12.0               | 17.7                 |
| WB <sub>1</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]         | 201                | 191                 | 175                 | 107                | 176                | 203                  |
| WB <sub>2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]         | 56                 | 83                  | 87                  | 39                 | 72                 | 106                  |

## IX.2.3 Teil 3

|                                              | Beton                |                  |                    |                    |                  |                      |                      |
|----------------------------------------------|----------------------|------------------|--------------------|--------------------|------------------|----------------------|----------------------|
|                                              | 14                   | 15               | 16                 | 17                 | 18               | 19                   | 20                   |
| Zem.typ                                      | CEM II/A-LL<br>42.5N | CEM I 42.5N      | CEM III/B<br>32.5N | CEM III/B<br>32.5N | CEM I 42.5N      | CEM II/A-LL<br>42.5N | CEM II/A-LL<br>42.5N |
| Zem.geh. [kg/m <sup>3</sup> ]                | 290                  | 325              | 450                | 460                | 350              | 370                  | 375                  |
| Zusatzstoff 1                                | Kibalent             | --               | Hydrolent          | Hydrolent          | --               | Silikafume           | --                   |
| Gehalt [kg/m <sup>3</sup> ]                  | 60                   | --               | 40                 | 50                 | --               | 15                   | --                   |
| Zusatzstoff 2                                | etum Superfib        | --               | --                 | --                 | --               | --                   | --                   |
| Gehalt [kg/m <sup>3</sup> ]                  | 0.6                  | --               | --                 | --                 | --               | --                   | --                   |
| Festigkeitsklasse                            | C30/37               | C30/37           | C30/37             | C30/37             | C30/37           | C30/37               | C40/50               |
| Expo.klasse                                  | XC4, XD3,<br>XF4     | XC4, XD3,<br>XF4 | XC4, XD3,<br>XF4   | XC4, XD3,<br>XF4   | XC4, XD3,<br>XF4 | XC4, XD3,<br>XF4     | XC4, XD3,<br>XF4     |
| Konsistenz                                   | C3                   | C2               | SF2, SVB           | SF2, SVB           | F2 / F3          | --                   | F3                   |
| D <sub>max</sub> [mm]                        | 16                   | 32               | 16                 | 8                  | 32               | 32                   | 16                   |
| Mit LP                                       | ja                   | ja               | --                 | --                 | ja               | ja                   | ja                   |
| VM / AM [- / mm]                             | 1.06                 | 1.17             | 680.00             | 680.00             | 390.00           | 1.09 / 360           | --                   |
| Luftgehalt [%]                               | 3.9                  | 3.4              | 2.5                | 4.0                | 3.3              | 3.3                  | --                   |
| Frischbetonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ]   | 2299                 | 2420             | 2369               | 2284               | 2385             | 2376                 | --                   |
| W/Z-Wert                                     | 0.50                 | 0.39             | 0.44               | 0.43               | 0.43             | 0.41                 | --                   |
| Herstelldatum                                | 13.04.2010           | 15.03.2010       | 23.03.2010         | 24.03.2010         | 06.04.2010       | 26.03.2010           | 14.09.2010           |
| Widerstandsfaktor WFT-P [%]                  | 80 - 50              | 80 - 50          | 80 - 50            | 80 - 50            | > 80             | > 80                 | > 80                 |
| Porenabstandsfaktor [mm]                     | 0.139                | 0.174            | 0.258              | 0.353              | 0.128            | 0.177                | 0.139                |
| <b>Beurteilung des FT-Widerstandes BE I</b>  | <b>mittel</b>        | <b>mittel</b>    | <b>mittel</b>      | <b>mittel</b>      | <b>hoch</b>      | <b>hoch</b>          | <b>hoch</b>          |
| n [-]                                        | 200                  | 200              | 200                | 200                | 200              | 200                  | 200                  |
| <b>WFT-L [%]</b>                             | <b>105</b>           | <b>54</b>        | <b>106</b>         | <b>102</b>         | <b>83</b>        | <b>93</b>            | <b>103</b>           |
| <b>Beurteilung des FT-Widerstandes BE II</b> | <b>mittel</b>        | <b>mittel</b>    | <b>hoch</b>        | <b>hoch</b>        | <b>hoch</b>      | <b>hoch</b>          | <b>hoch</b>          |
| SIA 262/1, Anhang C [g/m <sup>3</sup> ]      | 100                  | 80               | 200                | 1000               | 70               | 200                  | 400                  |
| <b>Beurteilung des FT-Widerstandes</b>       | <b>hoch</b>          | <b>hoch</b>      | <b>hoch</b>        | <b>mittel</b>      | <b>hoch</b>      | <b>hoch</b>          | <b>hoch</b>          |
| U <sub>E</sub> [Vol. %]                      | 12.4                 | 9.4              | 11.8               | 10.3               | 10.4             | 10.2                 | 11.9                 |
| n [Vol. %]                                   | 17.3                 | 12.4             | 15.4               | 12.6               | 14.7             | 13.6                 | 18.2                 |
| LP [Vol. %]                                  | 4.9                  | 3                | 3.6                | 2.3                | 4.3              | 3.4                  | 6.3                  |
| ρ <sub>R+10</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]       | 2244                 | 2386             | 2107               | 2167               | 2317             | 2311                 | 2178                 |
| A [Vol. %]                                   | 4.4                  | 3.4              | 4.6                | 3.6                | 3.8              | 4.4                  | 6.3                  |
| A <sub>300</sub> [Vol. %]                    | 1.8                  | 1.1              | 1.0                | 0.5                | 1.7              | 1.4                  | 2.0                  |
| AF [mm]                                      | 0.139                | 0.174            | 0.258              | 0.353              | 0.128            | 0.177                | 0.139                |
| K <sub>S</sub> [Vol. %]                      | 7.3                  | 4.3              | 4.7                | 3                  | 4.9              | 4.1                  | 5.7                  |
| V <sub>1</sub> [%]                           | 25.2                 | 27               | 20.5               | 17.4               | 35.6             | 34.5                 | 34.8                 |
| V <sub>2</sub> [%]                           | 14.7                 | 12.2             | 8.1                | 5.1                | 16.7             | 13.9                 | 16.7                 |
| WB <sub>1</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]         | 138                  | 148              | 123                | 104                | 214              | 207                  | 209                  |
| WB <sub>2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]         | 81                   | 67               | 49                 | 31                 | 100              | 83                   | 100                  |

## Glossar

| Begriff       | Bedeutung                                                                                                  |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A             | Gesamter Luftporengehalt                                                                                   |
| $A_{300}$     | Mikroporenvolumen                                                                                          |
| AAR           | Alkali-Aggregat-Reaktion                                                                                   |
| AF            | Abstandsfaktor                                                                                             |
| AGB           | Arbeitsgruppe Brückenforschung                                                                             |
| ASTRA         | Bundesamt für Strassen                                                                                     |
| B (BM)        | Bindemittel                                                                                                |
| CEN           | Comité européen de normalisation, European Committee for Standardization, Europäisches Komitee für Normung |
| DATEC         | Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni                     |
| DETEC         | Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication                |
| EN            | Europäische Norm                                                                                           |
| FOST          | Forschungsstelle                                                                                           |
| FT            | Frost-Tausalz bzw. Frost-Taumittel                                                                         |
| FT-Beton      | Frosttaumittelbeständiger Beton                                                                            |
| FTW           | Frosttausalzwiderstand bzw. Frosttaumittelwiderstand                                                       |
| LP            | Luftgehalt (Hohlraumgehalt) bzw. Luftporenbildner                                                          |
| n             | Gesamtporosität                                                                                            |
| RL            | Relative Luftfeuchtigkeit                                                                                  |
| SIA           | Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein                                                           |
| SN            | Schweizer Norm der Schweizerischen Normenvereinigung (SNV)                                                 |
| TFB           | TFB AG – Technik und Forschung im Betonbau, Wildeggen                                                      |
| $U_E$         | Kapillarporen                                                                                              |
| UVEK          | Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation                                 |
| VSS           | Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute                                                |
| w/z           | Wasser/Zement                                                                                              |
| $\rho_{R110}$ | Trockenrohddichte                                                                                          |



## Literaturverzeichnis

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BAST 2009        | Bundesanstalt für Strassenwesen, Bericht zum Forschungsprojekt F1100.2101002: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstrassen, Brücken und Ingenieurbau, Heft B70, 2009, pp.36.                                          |
| Bernhard 2015    | A. Bernhard, Schäden bei Brückenabdichtungen und die VSS 640 450, Fachveranstaltung Nr. 154341 „Schäden bei Abdichtungen vermeiden“, TFB AG, Bau und Wissen, 01.04.2015.                                                                                            |
| Brameshuber 2004 | Brameshuber et al., Einfluss von Flugasche auf den Frosttausalzwiderstand von Beton. Aachen ibac. Forschungsbericht Nr. F 759/2, 2004.                                                                                                                              |
| Brameshuber 2007 | W. Brameshuber und F. Spörel, Frostwiderstand (XF1 und XF3) von CEM III-Betonen – Langjährige Auslagerung im Vergleich zu Laborprüfverfahren. Forschungsprojekt F 878, Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen, 2007.                                      |
| Brameshuber 2008 | Brameshuber et al., Einfluss von Flugasche auf den Frosttausalzwiderstand von Beton. Ergänzende Untersuchungen für selbstverdichtende Betone mit hohem Flugaschegehalt. Aachen ibac. Forschungsbericht Nr. F 827, 2008.                                             |
| Brameshuber 2010 | Brameshuber et al. (2010): Frostwiderstand von Luftporenbeton mit Flugasche. Beton Heft Nr. 3, 136-146.                                                                                                                                                             |
| CB 1986          | Prüfung von Festbeton auf Frost und Frost-Tausalz-Beständigkeit, Cementbulletin, Nr. 10, 1986, <a href="http://retro.seals.ch/digbib/view?pid=cem-001:1986-1987:54-55::72">http://retro.seals.ch/digbib/view?pid=cem-001:1986-1987:54-55::72</a>                    |
| CEN 2006         | CEN/TR 15177, Prüfung des Frost-Tauwiderstandes von Beton – Innere Gefügestörung (Testing the freeze-thaw resistance of concrete – Internal structural damage), CEN, 2006.                                                                                          |
| Cuchet 2011      | S. Cuchet, Nouvelles exigences des bétons d'infrastructures, 10e Journée d'information Holcim, 7 septembre 2011, Lausanne.                                                                                                                                          |
| Cuchet 2015      | S. Cuchet et A. Bonvallat, Essais comparatifs de résistance au gel en présence de sels de déverglaçage : méthode SIA 262/1 – Annexe C et méthode TFB (BC 1986 – procédure modifiée), Rapport 5097, 25.06.2015.                                                      |
| Dobrolubov 1977  | G. Dobrolubov und A. Romer, Richtlinie zur Bestimmung und Prüfung der Frosttausalzbeständigkeit von Zementbetonen, Strasse und Verkehr, Heft Nr. 10 und 11, 1977.                                                                                                   |
| Guma 2012        | Guma (De Cérenville Géotechnique SA, Norbert SA, OPAN concept Neuchâtel SA), Travaux anticipées 2011, ROUTES NATIONALES: N09 – Section n°48 / 52, Tronçon Vennes-Villeneuve, Assainissement de murs non ancrés – Rapport sur les bétons à air entraîné, 10.02.2012. |
| Guse 2006        | U. Guse und H.S. Müller, Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse – Bauwerksuntersuchungen. Forschungsbericht 02 30 79 0671 zum Auftrag DASTb V 419, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe (TH), 2006.    |
| Harnik 1975      | A.B. Harnik und A. Rösli, Temperaturschock beim Auftauen von vereistem Beton mit Tausalz, Schweizerische Bauzeitung, Heft 46, Vol. 93, 1975, S. 735-739.                                                                                                            |
| Hunkeler 2012    | F. Hunkeler und L. Lammar, Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen. Forschungsauftrag AGB 2008/012 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB), Bericht VSS Nr. 649, November 2012.                                                    |
| Jacobs 2007      | F. Jacobs und A. Leemann, Betoneigenschaften nach SN EN 206-1, Forschungsauftrag [AGB 2002/004] auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB), Bericht VSS Nr. 615, Dezember 2007.                                                                            |
| Kaufmann 2000    | J. Kaufmann und W. Studer, Schadensmechanismen bei der Frost-Tausalzbeanspruchung von Beton, Forschungsauftrag AGB 81/95, Bericht VSS Nr. 548, Nov. 2000.                                                                                                           |
| Kunz 2011        | D. Kunz, Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton ohne künstlich eingeführte Luftporen – Bericht Ringversuch, Tiefbauamt des Kantons Bern, 05.01.2011.                                                                                                                 |
| Müller 2009      | H.S. Müller und U. Guse, Übertragbarkeit von Frostlaborprüfungen auf Praxisverhältnisse. Beton Heft Nr. 2, 2009, 564-569.                                                                                                                                           |
| Powers 1956      | 1956 in den USA von T. C. Powers „Resistance of Concrete to frost at early ages“ Proc. RI-LEM Symp. Winter Concreting. Session C, 1 - 47 veröffentlicht.                                                                                                            |
| Rösli 1976       | Rösli, Prof. Dr. ETH Zürich (1976) Arbeiten zur Frost – Tausalz – Beständigkeit von Beton.                                                                                                                                                                          |
| Rösli 1979       | A. Rösli und A.B. Harnik, Zur Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton, Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 46, 1979, S. 929-934.                                                                                                                                  |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Setzer 2004 | Setzer et al., Test method of frost resistance of concrete: CIF-Test: capillary suction, internal damage and freeze thaw test – reference method and alternative method A and B. Rilem TC 176-IDC. Materials and Structures, Vol. 37, 2004, pp 743-753. |
| SIA 2004    | Norm SIA 198, Untertagbau – Ausführung, SIA 2004.                                                                                                                                                                                                       |
| SIA 2013    | Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Nationale Elemente NE zur Norm SN EN 206-1:2000, SIA, 2013.                                                                                                                    |
| Siebel 1998 | E. Siebel et al., Schlussbericht des europäischen Forschungsprojektes Nr. 3085 „Standard methods for testing the resistance of concrete to freezing and thawing. Be-TB-1489-4 und -5/1998, pp. 59 (plus Anhänge).                                       |
| Siebel 2005 | E. Siebel et al., Sachstandbericht Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse. Schriftenreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 560, 2005, Beuth Verlag, pp. 109.                                                           |
| SN 1976     | SN 640 461, Zementbetonbeläge – Ausführung, Anforderung, VSS, 1976                                                                                                                                                                                      |
| SN 2008     | SN VSS 640 461b, Betondecken – Konzeption, Ausführung, Anforderungen an die eingebauten Beläge, VSS, 2008.                                                                                                                                              |
| SN 2009     | SN VSS 640 464, Betondecken – Prüfmethode zur Bestimmung des Frost- und Frosttaumittelwiderstands, VSS, 2009.                                                                                                                                           |
| Stark 2005  | J. Stark et al., Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse. Forschungsbericht zum Auftrag DBV 234, F.A. Finger Institut für Baustoffkunde der Bauhaus, Universität Weimar, 2005.                                                  |
| Tang 2004   | L. Tang und P.E. Petersson, Slab test: freeze/thaw resistance of concrete- internal deterioration. Rilem TC 176-IDC. Materials and Structures, Vol. 37, 2004, pp 754-759.                                                                               |

# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 16.05.2015, 09.02.2016

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2011/501  
Projekttitel: Evaluation des Frosttaumittelwiderstandes von Beton im Strassenbau und bei Kunstbauten  
Enddatum: Juni 2015

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Mit dem vorliegenden Projekt wurde versucht, die Beurteilung des Frosttaumittelwiderstandes von Beton von vier, heute in der Schweiz eingesetzten Prüfungen zu vergleichen und mit dem Verhalten in der Praxis zu validieren. Es sind dies die SIA-Prüfung (SIA 262/1, Anhang C), die TFB-Prüfung und die BE I FT- und die BE II FT-Prüfung gemäss SN 640464.

Die Untersuchungen erfolgten an 13 verschiedenen Betonen ohne und mit künstlich eingeführter Luft. Dabei wurden die Zementart (CEM I, CEM II/A-LL oder CEM III/B), der Zementgehalt (300, 320, 425 oder 450 kg/m<sup>3</sup>) und der w/z-Wert (0.39, 0.45 und 0.50) variiert. Neben den Prüfkörpern für die Festbetonprüfungen wurden auch Versuchsplatten (50 x 50 x 15 cm<sup>3</sup>) hergestellt und neben der Fahrbahn, d.h. in einem Streifen zwischen der Leitplanke und der Lärmschutzwand, bei der Autobahneinfahrt St. Gallen Ost-Buriet/Thal in Fahrrichtung St. Margrethen ausgelagert.

Zusammenfassend kann Folgendes festgehalten werden: Die BE II FT-Prüfung ist die strengste der Prüfungen, danach folgen die TFB- und die BE I FT-Prüfung und am Ende die SIA-Prüfung. Die Unterschiede zwischen der SIA-, TFB- und BE I-Prüfung sind aber gering. Zwischen den Prüfungen sind Unterschiede bis zu einer Klasse relativ häufig. Unterschiede bis zwei Klassen sind Ausnahmen. Es gibt keine Gesetzmässigkeiten zwischen den einzelnen Prüfverfahren und den verschiedenen Betonsorten. Anwendungsgrenzen für die einzelnen Prüfverfahren hinsichtlich Zementart, -gehalt, Grösstkorn, mit/ohne Luftporenbildner oder Betonart konnten nicht festgelegt werden.

Die nach zwei Wintern durchgeführten mikroskopischen Gefügeanalysen der ausgelagerten Versuchsplatten zeigten noch keine klare Differenzierung zwischen den verschiedenen Betonen.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

#### Zielerreichung:

Die durchgeführten Untersuchungen haben erlaubt, die vier verschiedenen in der Schweiz eingesetzten Prüfungen für die Beurteilung des Frosttaumittelwiderstandes von Beton für Betondecken und Ingenieurbauwerke, die Taumitteln ausgesetzt sind, zu vergleichen. Die Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass bei keinem der Prüfverfahren Einschränkungen bezüglich Zement- oder Betonart gemacht werden müssen.

Das primäre Ziel, nämlich die Beantwortung der Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse (Validierung) bzw. der Frage nach der praktischen Relevanz der verschiedenen Prüfungen konnte noch nicht beantwortet werden. Der Grund dafür liegt bei den nach zwei Jahren noch fehlenden bzw. noch sehr geringen Schäden an den ausgelegten Versuchsplatten.

#### Folgerungen und Empfehlungen:

Die Forschungsstelle empfiehlt, die an den Versuchsplatten durchgeführten Untersuchungen nach Ablauf von 5 (2017), ggf. erneut noch einmal nach 10 Jahren zu wiederholen.

Weiter müsste die Frage nach der geeigneten Prüfung von XF2-Betone angegangen werden.

#### Publikationen:

Bericht über das Forschungsprojekt mit dem Titel "Evaluation des Frosttaumittelwiderstandes von Beton – Vergleich von vier Prüfverfahren"

Publikationen in Fachzeitschriften folgen nach der Genehmigung des Berichtes durch die Begleitkommission.

#### Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Werner

Vorname: Rolf

Amt, Firma, Institut: BEVBE

#### Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Im Forschungsprojekt wurden die Vergleichsprüfungen an den relevanten Betontypen durchgeführt. Die Systematik um an aussagekräftige und vergleichbare Resultate zu gelangen stimmt. Obwohl das Hauptziel der Forschung (noch) nicht erreicht werden konnte, kann nun mit Sicherheit gesagt werden, dass es betreffend Zementart, -gehalt, Grösstkorn, mit/ohne Luftporenbildner oder Betonart keine Vorbehalte zu allen vier Prüfungen gibt. Ebenfalls ist aus der Forschung ersichtlich wie "streng" die vier Prüfungen im Vergleich zu einander sind.

##### Umsetzung:

Da aus der Forschung die Erkenntnis gewonnen werden konnte, dass alle Prüfungen genügend "streng" sind um den Frost-/Taumittelwiderstand nachzuweisen wäre anzustreben:  
- Einigung zwischen VSS und SIA auf eine Prüfung  
- Prüfung nach EN - Norm (Slab-Test).

An der Sitzung der NFK 3.6 vom 10.11.2015 haben die Teilnehmer signalisiert, dass Gespräche mit dem SIA gewünscht werden und zu einer Einigung Hand geboten werden soll.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Da die Hauptfrage des Forschungsprojekts noch nicht beantwortet werden konnte, sollte die Beobachtungsdauer der erstellten Prüfkörper verlängert werden. Es wäre sicher lohnenswert die Vergleiche der Prüfungen an den Probekörpern in 5 und 10 Jahren nochmals durchzuführen. Es kann erwartet werden, dass hier weitere Erkenntnisse gewonnen werden können. Ein Gesuch für die Weiterführung soll eingereicht werden.

##### Einfluss auf Normenwerk:

Es gibt mit dem aktuellen Wissen keinen Handlungsbedarf (weder VSS noch SIA), da alle Prüfungen zuverlässig nachweisen, wie der Frost-/Taumittelwiderstand des Betons ist. Eine Einigung auf eine Prüfung (gültig für die ganze Schweiz) ist anzustreben. Am besten wäre eine Einigung auf den Slab-Test (Konformität zu den EN - Normen wäre gegeben).

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Stalder

Vorname: Ueli

Amt, Firma, Institut: Walo Bertschinger AG, Zürich

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Fks:



## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen kann unter [www.astra.admin.ch / Dienstleistungen/Forschung im Strassenwesen/Downloads/Formulare](http://www.astra.admin.ch/Dienstleistungen/Forschung%20im%20Strassenwesen/Downloads/Formulare) heruntergeladen werden.