



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# Prüfung und Bewertung der Betonqualität am Bauwerk

**Essais et évaluation de la qualité du béton dans la construction**

**Testing and evaluation of the concrete quality in the construction**

**TFB AG**  
**Dr. Frank Jacobs**  
**Dr. Fritz Hunkeler**  
**Björn Mühlán**

**Forschungsprojekt AGB 2014/008 auf Antrag der  
Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)**

**Juli 2018**

**691**

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)



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Prüfung und Bewertung der Betonqualität am Bauwerk**

**Essais et évaluation de la qualité du béton dans la construction**

**Testing and evaluation of the concrete quality in the construction**

**TFB AG**  
**Dr. Frank Jacobs**  
**Dr. Fritz Hunkeler**  
**Björn Mühlán**

**Forschungsprojekt AGB 2014/008 auf Antrag der  
Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)**

**Juli 2018**

**691**

# Impressum

## **Forschungsstelle und Projektteam**

### **Projektleitung**

Dr. Frank Jacobs

### **Mitglieder**

Dr. Fritz Hunkeler

Björn Mühlán

## **Begleitkommission**

### **Präsident**

Jean-Christophe Putallaz

### **Mitglieder**

Dr. Manuel Alvarez

Stephane Cuennet

Dr. Hansrudolf Ganz

## **KO-Finanzierung des Forschungsprojekts**

Bundesamt für Verkehr BAV

## **Antragsteller**

Arbeitsgruppe Brückenforschung

## **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>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>13</b>
1.1 Allgemeines .....	13
1.2 Stand der Forschung, Forschungsbedarf .....	14
1.2.1 Festigkeit im Bauteil und im separat hergestellten Probekörper .....	14
1.2.2 Dauerhaftigkeit im Bauteil und separat hergestellten Probekörper .....	16
1.2.3 Nachweis der Dauerhaftigkeit gemäss SN EN 206, SIA 262/1 und SN EN 13670 .....	23
<b>2 Vorgehen, Methodik, Lösungsansatz</b> .....	<b>25</b>
<b>3 Ergebnisse</b> .....	<b>27</b>
3.1 Vorbemerkung .....	27
3.2 Betonqualität vom Konformitätsnachweis und Kontrollplan .....	27
3.3 Rohdichte .....	28
3.4 Druckfestigkeit .....	32
3.5 Chloridwiderstand .....	34
3.6 Frosttausalz widerstand .....	36
3.7 Karbonatisierungswiderstand .....	38
3.8 Streuung .....	38
3.9 Betonalter .....	40
3.10 Zerstörungsfreie Prüfungen .....	40
<b>4 Diskussion</b> .....	<b>45</b>
4.1 Vorbemerkung .....	45
4.2 Umwelteinflüsse .....	45
4.3 Chloridwiderstand .....	47
4.3.1 Konformitätsnachweis Betonwerk .....	47
4.3.2 Alterung .....	48
4.3.3 Grenzwert Konformitätsnachweis Betonwerk .....	48
4.4 Karbonatisierungswiderstand .....	49
4.4.1 Konformitätsnachweis Betonwerk .....	49
4.4.2 Alterung .....	49
4.4.3 Grenzwert Konformitätsnachweis Betonwerk .....	50
4.4.4 Frosttausalz widerstand .....	50
4.4.5 Druckfestigkeit .....	51
4.5 Bauwerksprüfungen .....	51
4.5.1 Prüfungen TT-2 .....	51
4.5.2 Prüfungen TT-3 .....	51
4.6 Anforderungen an die Nachbehandlung der SIA 262 sowie die Vorschläge zur Nachbehandlung vom AGB-Bericht 665 überprüft werden .....	52
4.7 Empfehlungen für Prüfungen .....	53
4.8 Forschungsbedarf .....	55
<b>Anhänge</b> .....	<b>57</b>
<b>Glossar</b> .....	<b>93</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>95</b>
<b>Projektabschluss</b> .....	<b>99</b>
<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen</b> .....	<b>105</b>



## Zusammenfassung

Ziel dieser Forschungsarbeit war die Abklärung, wie sehr sich die Betonqualität von separat hergestellten Prüfkörpern von der von Bohrkernen aus Bauteilen unterscheidet. Hierzu wurden separat hergestellte Prüfkörper und Bohrkern aus sechs Bauwerken untersucht. Pro Bauwerk wurden mehrere Bauteile untersucht, die zu verschiedenen Jahreszeiten hergestellt wurden. Damit sollte geklärt werden, ob und ggf. inwieweit sich z.B. die Umgebungsbedingungen auf die Bauteilqualität auswirken. Um den Einfluss der verschiedenen Umgebungsbedingungen möglichst gut zu erkennen, wurden pro Bauwerk jeweils Bauteile mit ähnlicher Geometrie und jeweils ähnlichen Bohrkernlagen untersucht. Bei den untersuchten Bauwerken wurde Tiefbaubeton (Betonart F oder G gemäss SN EN 206) verwendet, der fast immer mit Luftporenbildner hergestellt war und normgemäss nachbehandelt wurde.

Basierend auf den Ergebnissen der Betonprüfungen konnte gezeigt werden, dass

- die Rohdichte im Bauteil zumeist 1 - 2 % unter der im separat hergestellten Würfel lag
- die 28 Tage-Bohrkerndruckfestigkeit im Mittel fast 20 % unter der Würfeldruckfestigkeit lag
- der am Bohrkern bestimmte Chloridmigrationskoeffizient im Mittel fast 50 % höher als der am Würfel bestimmte war
- der an Bohrkernen bestimmte Frosttausalz widerstand ähnlich zu dem am Würfel bestimmten war, wobei die Streuung sehr gross war
- der an Bohrkernen bestimmte Karbonatisierungskoeffizient im Mittel ca. 40 % höher als der an separat hergestellten Prismen war, wobei anzumerken ist, dass nur ein Bauwerk diesbezüglich untersucht werden konnte.

Vor allem bei der Druckfestigkeit, bestimmt an Bohrkernen aus Bauteilen, zeigte sich ein systematischer Einfluss der Umgebungstemperatur. Höhere Temperaturen (ca. 15 °C und mehr) führten zu niedrigeren 28 Tage Druckfestigkeiten als niedrigere Temperaturen (< 5 °C). Bei den Dauerhaftigkeitseigenschaften war dieser Einfluss weniger systematisch ausgeprägt, was auf weitere relevante Einflüsse (z.B. Nachbehandlung) schliessen lässt. Der Temperatureinfluss hängt stark vom Bindemittel ab. D.h. bei anderen Bindemitteln kann sich die Umgebungstemperatur deutlich weniger auswirken.

Die Streuung der Eigenschaften, bestimmt an separat hergestellten Probekörpern, war bei allen Bauwerken ähnlich und auch vergleichbar mit der, die an den Bohrkernen bestimmt wurde.

Bei allen Festbetoneigenschaften ergab sich bei den Bohrkernprüfungen eine Verbesserung mit zunehmendem Alter (28 Tage → ca. ¾ Jahr), wobei diese bei der Druckfestigkeit ca. 20 % sowie beim Chlorid-, Karbonatisierungs- und Frosttausalz widerstand ca. 30 % betrug.

Die zerstörungsfreie Prüfung der Prellhärte ergab wenig aussagekräftige Ergebnisse. Bei der zerstörungsfreien Prüfung der Luftpermeabilität konnte kein für alle Bauwerke geltender, ausgeprägter Zusammenhang zu den Dauerhaftigkeitseigenschaften gefunden werden. Es zeigte sich nur, dass eine Luftpermeabilität (geometrischer Mittelwert) unterhalb von  $0.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  angestrebt werden sollte, um eine ausreichende Dauerhaftigkeit des Betons zu erhalten.

Für die Prüfungsart TT-2 (Bohrkerne aus dem Bauteil, geprüft nach 28 Tagen) können keine anderen Grenzwerte als die heute gültigen Richtwerte vorgeschlagen werden, da zu wenige Ergebnisse vorliegen, um die Betonqualitätsunterschiede zwischen Bohrkernen aus Bauteilen und separat hergestellten Prüfkörpern ausreichend genau zu quantifizieren. Für die Prüfungsart TT-3 (Bohrkerne aus dem Bauteil, geprüft nach > 28 Tagen) können

und sollten die Richtwerte von TT-2 übernommen werden. Da die Einflüsse der Betonzusammensetzung auf die Dauerhaftigkeitseigenschaften bekannt sind, können durchaus Grenzwerte für die Prüfungsarten TT-2 und TT-3 baustellenspezifisch festgelegt werden.

Der in der SN EN 206 enthaltene Grenzwert des Chloridmigrationskoeffizienten für XD3 für die Prüfungsart TT-1 (separat hergestellte Würfel, geprüft nach 28 Tagen) sollte von  $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  auf  $7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  reduziert werden, um den Betonqualitätsunterschied zwischen Bauteil und separat hergestellten Prüfkörper abzudecken.

Die in der SN EN 206 enthaltenen Grenzwerte des Karbonatisierungswiderstandes für XC3/XC4 sowie des Frosttausalz widerstandes für XF4 für die Prüfungsart TT-1 (separat hergestellte Prismen bzw. Würfel, geprüft nach 28 Tagen) sind zweckmässig.

Bei der Bestimmung der 28 Tage Bohrkerndruckfestigkeit können Abweichungen von mehr als 15 % zur Würfeldruckfestigkeit auftreten, auch wenn alle Beteiligten normkonform arbeiteten. Dies sollte bei der Beurteilung der Bohrkerndruckfestigkeit berücksichtigt werden.

Dem Bauherrn wird bei Bauvorhaben empfohlen,

- Prüfungen nur von anerkannten (akkreditierten) Laboren durchführen zu lassen.
- die Ergebnisse von Frisch- und Festbetonprüfungen des Lieferwerkes des Betons einzufordern und auszuwerten.
- Annahmekriterien für Frischbetonkontrollen festzulegen und umzusetzen.
- die Ergebnisse der Frischbetonkontrollen (Ausbreit- oder Setzmass, Luftgehalt und Rohdichte jeweils ohne Aufsatzrahmen, Wassergehalt) des laufenden Bauvorhabens laufend auszuwerten, um zeitnah Hinweise auf die Betoneigenschaften zu erhalten.
- Prüfungen gemäss der Prüfungsart TT-1 (separat hergestellter Prüfkörper) und immer wenn möglich TT-2 (Bohrkerne aus Bauteil) auszuschreiben, um einerseits den Unterschied in der Betonqualität zwischen separat hergestellten Probekörpern und Bohrkernen aus Bauteilen und andererseits die Betonqualität im Bauteil zu ermitteln. Prüfungen gemäss TT-2 sollten, wenn möglich, an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 100 mm (nicht 50 mm) erfolgen.
- eine Nachbehandlungsdauer von mindestens 7 Tagen, auch bei Temperaturen  $> 15 \text{ }^\circ\text{C}$ , zu fordern (Verlängerung im Vergleich zu Tab. 23a der SIA 262), um die Betonqualität nicht zu beeinträchtigen.

Es besteht noch weiterer Forschungsbedarf, um die hier ermittelten Befunde genauer zu quantifizieren. Hierzu sind weitere Bauwerke mit unterschiedlichen Betonsorten und -zusammensetzungen zu untersuchen.

## Résumé

L'objectif de ce travail de recherche était de clarifier la différence de qualité du béton entre des éprouvettes confectionnées séparément et des carottes prélevées sur des éléments d'ouvrage. Des éprouvettes confectionnées séparément ainsi que des carottes prélevées sur six ouvrages différents ont été examinées à cet effet. Pour chacun des ouvrages, des tests ont été effectués sur plusieurs éléments de construction principalement fabriqués à différentes périodes de l'année. De ce fait, il devait être possible de déterminer si et le cas échéant, dans quelle mesure les conditions environnementales avaient une répercussion sur la qualité du béton. Afin d'identifier au mieux l'influence de conditions d'environnement différentes, des investigations ont été conduites pour chacun des ouvrages et à des étapes respectives de réalisation, sur des éléments de géométrie similaire et sur lesquels la localisation des prélèvements de carottes était analogue. Pour tous les ouvrages investigués, avait été mis en oeuvre un béton de génie civil (béton de type F ou G selon la SN EN 206), fabriqué la plupart du temps avec des entraîneurs d'air et soumis à un traitement de cure conforme aux standards.

En se fondant sur les résultats d'essai du béton, il apparaît que

- la masse volumique dans l'élément d'ouvrage se situait souvent entre 1 et 2% au-dessous de celle du cube confectionné séparément
- la résistance à la compression des carottes lors d'un essai à 28 jours se situait en moyenne près de 20% au-dessous de la résistance à la compression des cubes
- le coefficient de migration des chlorures déterminé sur les carottes se situait en moyenne près de 50% au-dessus de celui déterminé sur le cube
- la résistance au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage déterminée sur les carottes était analogue à celle du cube, néanmoins à haute diffusion
- le coefficient de carbonatation déterminé sur les carottes se situait en moyenne env. 40% au-dessus de celui du prisme confectionné séparément, en mentionnant toutefois dans ce contexte qu'un seul ouvrage a pu être investigué.

La dispersion des propriétés du béton durci, déterminée sur des éprouvettes confectionnées séparément, était semblable dans tous les ouvrages et comparable à celle déterminée sur les carottes.

Les essais sur carottes ont révélé une amélioration avec l'âge (28 jours → env. 3/4 an) de toutes les propriétés du béton durci, s'élevant à env. 20% pour la résistance à la compression et env. 30% pour la résistance aux chlorures, à la carbonatation et au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage.

Les essais non destructifs de l'indice de rebondissement n'ont pas livré de résultats pertinents. Lors des essais non destructifs de perméabilité à l'air, aucune corrélation marquée avec les propriétés de durabilité, ni valable pour l'ensemble des ouvrages, n'a pu être trouvée. Il a seulement été montré qu'il y avait tout lieu de tendre à une perméabilité de l'air (moyenne géométrique) située au-dessous de  $0.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  pour obtenir une durabilité suffisante du béton.

Pour le type d'essai TT-2 (carottes prélevées sur l'élément d'ouvrage, essai à 28 jours), il n'y a pas de valeurs limites à proposer autres que les valeurs indicatives valables de nos jours, l'insuffisance de résultats ne permettant pas de quantifier de manière suffisamment précise les différences de qualité du béton entre les carottes prélevées sur les éléments d'ouvrage et les éprouvettes confectionnées séparément. Pour le type d'essai TT-3 (carottes prélevées sur l'élément d'ouvrage, essai à > 28 jours), on peut respectivement adopter les valeurs indicatives du type d'essai TT-2. Comme les influences de la composition du béton sur les propriétés de durabilité sont connues, des valeurs limites pour les types

d'essai TT-2 et TT-3 peuvent tout-à-fait être fixées spécifiquement pour chaque chantier particulier.

Les valeurs limites, contenues dans SN EN 206, du coefficient de migration des chlorures pour XD3 pour le type d'essai TT-1 (cubes confectionnés séparément, essai à 28 jours) devraient être abaissées de  $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  à  $7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  pour pouvoir couvrir la différence de qualité du béton entre les éléments d'ouvrage et les éprouvettes confectionnées séparément.

Les valeurs limites, contenues dans SN EN 206, de la résistance à la carbonatation pour XC3/XC4 ainsi que celles de la résistance au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage pour XF4 pour le type d'essai TT-1 (prismes, resp. cubes confectionnés séparément, essai à 28 jours) sont adéquates.

Lors de la détermination de la résistance à la compression de carottes après 28 jours, des écarts de plus de 15% sont apparus par rapport à la résistance à la compression des cubes, même si tous les intéressés ont travaillé dans le respect des dispositions de la norme. Il y a lieu d'en tenir compte lors de l'appréciation de la résistance à la compression des carottes.

Lors d'un projet de construction, il est recommandé au maître d'ouvrage de:

- ne faire effectuer les essais que par des laboratoires reconnus (accrédités)
- demander et évaluer les résultats d'essais sur le béton frais et le béton durci (de l'usine de production)
- fixer et faire appliquer les critères d'acceptation pour les contrôles du béton frais
- évaluer en permanence les résultats des contrôles du béton frais (étalement- ou affaissement, teneur en air et masse volumique - sans anneau de rehaussement -, teneur en eau) du projet de construction en cours de réalisation, afin d'obtenir des indications actualisées sur les propriétés du béton
- faire un appel d'offres pour les essais de type TT-1 (éprouvettes confectionnées séparément) et, à chaque fois que c'est possible, de type TT-2 (carottes prélevées sur l'élément d'ouvrage), afin de pouvoir déterminer d'une part la différence de qualité du béton entre les éprouvettes confectionnées séparément et les carottes prélevées sur les éléments d'ouvrage et, d'autre part, la qualité du béton dans l'élément de construction. Des essais selon TT- 2 devraient être effectués, à chaque fois que c'est possible, sur des carottes de 100 mm de diamètre (et non de 50 mm)
- d'exiger une durée de cure d'au moins 7 jours même à des températures  $> 15^\circ\text{C}$  (prolongation de la durée en comparaison du tableau 23a de la SIA 262 ), afin de ne pas compromettre la qualité du béton.

Il existe encore un réel besoin d'approfondir les recherches, pour pouvoir quantifier plus précisément les résultats obtenus jusqu'ici. Pour ce faire, d'autres structures avec différents types et compositions de béton doivent être étudiées.

## Summary

The aim of this research project was to determine how much the concrete quality of separately manufactured specimens deviates from that in cores taken from structural members. For this purpose, separately manufactured specimens and cores from six civil engineering constructions were investigated. For each civil engineering construction several structural members were investigated, mostly manufactured in different seasons. Thereby it should be possible to clarify, if and how different environmental conditions influence concrete quality. To identify the influence of different environmental conditions, for each civil engineering construction structural members with similar geometry and similar locations for the cores were investigated. In all constructions being investigated, civil engineering concrete (concrete type F or G according to SN EN 206) were used; mostly air entraining agents were used for the concrete manufacture. The curing of concrete was performed according to the standard SIA 262.

Based on the results of the concrete tests, the following can be stated:

- The density of concrete in the structural member was generally 1 – 2 % lower than that of the separately manufactured specimens.
- The compressive strength of the cores at 28 days was generally nearly 20 % lower than that determined on separately manufactured cubes.
- The chloride migration coefficient, determined on cores, was generally nearly 50 % higher than that determined on separately manufactured specimens.
- The freeze thaw resistance with de-icing salts, determined on cores, was generally similar to that determined on separately manufactured specimens. However, the scatter was very large.
- The carbonation coefficient, determined on cores, was on average nearly 40 % higher than that determined on separately manufactured specimens, whereby it should be noted that this could be only investigated on one civil engineering construction.

Above all, the compressive strength, determined on cores, showed a systematic influence of the environmental temperature. Higher temperatures (approx. 15 °C and more) led to lower 28 day compressive strength than lower temperatures (< 5 °C). The durability properties did not show such a systematic influence. Therefore, it can be concluded that other relevant influences (e.g. curing) are present. The influence of the temperature depends strongly on the binder (cement). This means that other binders could result in a much lower influence from the environmental temperature.

The scatter of the concrete properties, determined on separately manufactured specimens, was similar for all civil engineering constructions and also comparable to that of the cores.

For all hardened concrete properties, determined on cores from structural members, an improvement took place with increasing age (28 days → approx. ¾ year), whereby the compressive strength increased by 20 % and the chloride, carbonation and freeze thaw resistance with de-icing salts increased by approx. 30 %.

The non-destructive testing with the rebound hammer gave few reliable results. No general relationship between the durability properties and the non-destructive air permeability tests could be found. It can be only stated that an air permeability (geometric mean) of less than  $0.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  should be aimed at to obtain a sufficient concrete durability.

For concrete type testing TT-2 (cores from structural members, tested at 28 days) no limiting values other than the actual guidance values can be proposed due to a lack of data. There were insufficient results available to quantify the quality differences between cores from structural members and separately manufactured specimens. For concrete type testing TT-3 (cores from structural members, tested at > 28 days) the guidance values from

TT-2 can and should be used. Due to the fact that the influence of the concrete composition on the durability properties is known, limiting values can be fixed for each particular site for TT-2 and TT-3 testing.

The limiting value for the chloride migration for TT-1 testing (separately manufactured specimens tested at 28 days) in SN EN 206 should be reduced from  $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  to  $7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  to cover the difference in concrete quality between structural members and separately manufactured specimens.

The limiting values for carbonation for XC3/XC4 exposure and freeze thaw with de-icing salt resistance for XC4 exposure in SN EN 206 for TT-1 testing (separately manufactured specimens, tested at 28 days) are appropriate.

The difference in the compressive strength between separately manufactured specimens and cores from structural members can be larger than 15 % (SN EN 13791), even when all persons involved made a good job according to the requirements of the standard. This should be kept in mind when results from core tests are analysed.

It is recommended to the owner for civil engineering works that,

- tests should be only performed by well known (accredited) laboratories.
- the results from fresh and hardened concrete tests from the supplier of the concrete should be requested and evaluated.
- acceptance criteria for fresh concrete tests should be fixed and applied
- the results from fresh concrete tests (flow table or slump test, air content and density without filling frame, water content) of the actual building project should be promptly evaluated in order to obtain information on the concrete properties.
- to tender tests according to TT-1 (separately manufactured specimens) and, whenever possible, according to TT-2 (cores from structural members) to know the difference in concrete quality between structural members and separately manufactured specimens (see section 4.7). TT-2 testing should be performed, whenever possible, on cores with a diameter of 100 mm (not 50 mm).
- the curing lasts at least 7 days, at temperatures  $> 15 \text{ }^\circ\text{C}$ , too (extension compared to Tab. 23a of SIA 262), in order not to impair concrete quality.

Further research is still necessary to quantify the obtained results of this research project in more details. For this purpose, further structures with different concrete types and compositions have to be investigated.

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Zur Herstellung und Kontrolle der Betonausgangsstoffe und des Betons im Betonwerk liegen seit vielen Jahren klare Regelungen für die Beteiligten vor (Tabelle 1). Bei den Beteiligten ist Folgendes festzustellen: Das Betonwerk hat anhand von stichprobenartigen Frisch- und Festbetonprüfungen an Würfeln und Prismen nachzuweisen, dass der hergestellte Beton den Vorgaben der SN EN 206 entspricht. Die Überwachungsstellen kontrollieren die Betonwerke stichprobenartig dahingehend, ob die Vorgaben der SN EN 206 eingehalten werden. Die Überwachungsstellen stellen bei einer erfolgreichen Überwachung den Betonherstellern Zertifikate aus, mit welchen die Betonherstellung nach SN EN 206 bestätigt wird. Es ist bekannt, dass von den Überwachungsstellen temporär Abweichungen von der Norm akzeptiert werden; unklar ist jedoch, wie viele bzw. wie grosse Abweichungen vorhanden sein dürfen, um dennoch ein Zertifikat zu erhalten, da dies im Ermessen der Überwachungsstelle liegt. Somit kann ein Zertifikat teilweise einen falschen Eindruck in der Form erwecken, da eine unvoreingenommene Person davon ausgehen könnte, dass ein Zertifikat bestätigt, dass alles normkonform ist.

**Tabelle 1: Beteiligte im Bauprozess, durchgeführte Prüfungen und Nachweise sowie Normen mit Anforderungen**

Wer	Gegenstand der Prüfung	Norm (Anforderungen)
Bauherr/Planer	Prüf- und Kontrollplan: Prüfungen zumeist an separat hergestellten Probekörpern, vereinzelt Prüfungen an Bohrkernen aus dem Bauteil	SN EN 13670
Unternehmer		SIA 118/262, SN EN 13670
Betonwerk	Konformitätsnachweis: Prüfung an separat hergestellten und zumeist unter Wasser gelagerten Probekörpern	SN EN 206
Zementwerk	Konformitätsnachweise / Leistungserklärung für	
Kieswerk	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zement</li> </ul>	SN EN 197-1
Betonwerk	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gesteinskörnung</li> <li>• Wasser</li> <li>• Zusatzmittel</li> <li>• Zusatzstoff</li> </ul>	SN EN 12620 SN EN 1008 SN EN 934-2, etc. SN EN 450-1, etc.

Neben den o.g. Ungewissheiten bei der Betonherstellung zeigen sich auch Abweichungen zwischen der im Rahmen des Konformitätsnachweises nachgewiesenen Betonqualität und der im Bauteil vorhandenen (z.B. Gouws et al. [10], Concrete Society [6], Jacobs et al. [18]). Ursache hierfür sind die seit Jahrzehnten bekannten Einflüsse auf die Betonqualität durch den Transport, den Einbau und die Nachbehandlung. Zusätzlich beeinflussen noch die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Wind, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchte, ...) die Betonqualität im Bauteil. Auch wenn der Unternehmer sorgfältig arbeitet, können Abweichungen zwischen der Betonqualität im Prüfkörper und der im Bauwerk auftreten. Seit 2015 liegen erste Regelungen in der SN EN 13670 zur Prüfung des Betons auf der Baustelle vor. Die Regelungen sind für die Prüfungen von separat hergestellten Probekörpern praktikabel. Soll jedoch der Beton im Bauteil geprüft werden, was am Zuverlässigsten zur Beurteilung der Qualität (und am Relevantesten für den Bauherrn) wäre, sind die Regelungen wenig bis nicht praktikabel. Es werden zeitaufwendige Vorversuche gefordert, die so nur selten umsetzbar sind.

Zur Überwachung der auf die Baustelle gelieferten Betonqualität und ggf. der im Bauwerk vorhandenen, erstellt der Planer den Kontrollplan und der Unternehmer einen Prüfplan (SIA 118/262). In der seit 2015 gültigen SN EN 13670 sind im nationalen Anhang Hinweise enthalten, welche Anforderungen im Rahmen des Kontroll- und Prüfplans an die Betonqualität gestellt werden können (und sollen), wenn die Herstellung, die Lagerung und die Prüfung analog dem Konformitätsnachweis (an separat hergestellten Prüfkörpern, gelagert unter Wasser) verläuft. Möchte der Planer jedoch nicht die Eigenschaften (Qualität) des Betons im separat hergestellten Würfel, sondern im Bauteil kennen, sind Untersuchungen am Bauteil unerlässlich. Hierzu enthalten die Normen SIA 262/1 und SN EN 13670 Hinweise, die auf der Baustelle jedoch im Regelfall nicht immer umsetzbar sind (siehe Abschnitt 2.3).

Beusch [4] untersuchte, wie es grundsätzlich um das Qualitätsbewusstsein auf dem Bau steht. Gemäss ihm mangelt es bei

- der Motivation der Beteiligten für qualitätssichernde Arbeiten,
- der Vorbildrolle der Bauherren; diese vernachlässigen ihre Aufsichtspflicht,
- der Kenntnis, wie qualitätssichernde Arbeiten geeignet umzusetzen sind
- der notwendigen Zeit wegen zu knapper Fristen, verursacht vor allem durch Planer.

Insgesamt zeigen sich somit verschiedene Ansätze zur Überprüfung der Qualität des vom Betonwerk ausgelieferten Betons. Da die erst seit kurzer Zeit vorhandenen Regelungen zur Überprüfung der Betonqualität im Bauteil gemäss SN EN 13670 kaum umsetzbar sind (siehe Abschnitt 1.2.3), ist auch kaum zu erwarten, dass sehr häufig die Prüfung der eingebauten Betonqualität erfolgt. Dies wäre nur dann überhaupt zu erwarten, wenn klare und einfach anwendbare Regelungen zur Überprüfung der Betonqualität im Bauteil vorliegen.

## 1.2 Stand der Forschung, Forschungsbedarf

### 1.2.1 Festigkeit im Bauteil und im separat hergestellten Probekörper

Es ist seit langem bekannt, dass zwischen der Druckfestigkeit im Probekörper und im Bauteil ein Unterschied besteht und wie gross dieser in etwa ist. Untersuchungen dazu neuerem Datums stammen von der Concrete Society (2004) [6]. Diese untersuchte den Druckfestigkeitsunterschied zwischen separat hergestellten Probekörpern und Bohrkernen aus Platten, Wänden und Blöcken, jeweils hergestellt mit verschiedenen Betonsorten. Das Verhältnis aus Bohrkerndruckfestigkeit zu Druckfestigkeit im separat hergestellten Probekörper variierte im Alter von 28 Tagen zwischen 0.60 und 1.25 (Tabelle 2). Bei allen Mischungen zeigten die Bohrkern aus den Blöcken zumeist die geringsten und die aus den Scheiben die höchsten Bohrkerndruckfestigkeiten. Der Effekt wird zudem durch die Bindemittelart (Zement-, Zusatzstoffart) beeinflusst. Nur ein Teil der Unterschiede konnte mit unterschiedlichen Rohdichten (Verdichtung) und Temperaturen während der Betonhärtung erklärt werden.

Cement	Mixes	Element	28 days	
			Min.	Max.
PC	Lower strength mixes	Block	0.75	0.95
		Slab	1.00	1.25
		Wall	0.85	0.95
	Higher strength mixes	Block	0.60	0.70
		Slab	0.85	1.00
		Wall	0.85	0.95
P/FA-B	Lower strength mixes	Block	0.85	1.10
		Slab	0.80	1.20
		Wall	0.80	1.05
	Higher strength mixes	Block	0.75	1.00
		Slab	0.75	0.95
		Wall	0.80	1.00
P/B	Lower strength mixes	Block	0.70	1.10
		Slab	0.65	1.15
		Wall	0.70	1.00
	Higher strength mixes	Block	0.80	1.05
		Slab	0.90	1.05
		Wall	0.70	1.00
PLC	Lower strength mixes	Block	0.80	0.95
		Slab	0.95	1.05
		Wall	0.85	1.00
	Higher strength mixes	Block	0.60	0.80
		Slab	0.80	0.90
		Wall	0.80	0.95

**Tabelle 2: Verhältnis der Bohrerndruckfestigkeit zur 28 Tage-Würfeldruckfestigkeit, aus Concrete Society (2004) [6];**

**PC:** Beton mit Portlandzement, **P/FA:** Beton mit Portlandzement und Flugasche; **P/B:** Beton mit Portlandzement und gemahlenem Hüttensand, **PLC:** Beton mit Portlandkalksteinzement

rot sind diejenigen Verhältnisse der Bohrerndruckfestigkeit zur 28 Tage-Würfeldruckfestigkeit markiert die geringer als 0.85 sind.

In der Norm SN EN 13791 wurde ein Korrekturfaktor von 85 % für die Bauteildruckfestigkeit aufgenommen, in Kenntnis des oben geschilderten Sachverhalts. D.h. die Druckfestigkeit am Bohrkern (Durchmesser = Länge), welcher aus einem Bauteil stammt, muss 85 % von der deklarierten Druckfestigkeitsklasse erreichen. Wie in Tabelle 2 mit den rot eingerahmten Ergebnissen ersichtlich ist, trifft dieser Korrekturfaktor selbst bei sorgfältig durchgeführten und kleinmasstäblichen Versuchen häufig zu, aber nicht immer.

Rostasy & Ranisch (1990) [27] untersuchten die Druck- und Zugfestigkeit von separat hergestellten Prüfkörpern (150 mm Würfel für Druckfestigkeit, 150 x 300 mm Zylinder, 100 x 400 mm Zylinder und 100 x 150 x 700 mm Prismen für Spaltzugfestigkeit, 100 x 400 mm Zylinder für Druckfestigkeit) und an 100 mm Bohrkernen, die aus kleinen Wänden (Länge, Breite: 1.2 – 1.5 m) gezogen wurden. Ein Teil der Wände wurde im Labor bei 20 °C und 65 % r.F. ein anderer Teil im Freien gelagert. Es zeigte sich kein systematischer Einfluss der Lagerung, sondern nur ein systematischer Einfluss bei der Probenart Bohrkern oder separat hergestellten Prüfkörpern (Tabelle 3). Die mittlere Bohrerndruckfestigkeit betrug 95 % von der Würfeldruckfestigkeit. Bei dem aufgeführten Variationskoeffizienten von 17 % unterschritten somit etwa 20 % der Ergebnisse das 85 %-Kriterium für Bohrkern aus der SN EN 13791. Warum die am Bohrkern aus den Wänden ermittelte Spaltzug- und Zugfestigkeit höher als die am separat hergestellten Prüfkörpern war, wurde richtigerweise als überraschend beurteilt und konnte nicht erklärt werden. Es zeigte sich kein systematischer Einfluss der Nachbehandlung (mit/ohne siebentägige Feuchtigkeitszufuhr im Labor), der Umgebungsbedingungen (nach der Nachbehandlung weiterhin Lagerung im Laborklima oder im Freien) oder der Bohrkernlage (ausen/innen in Wand). Bei der Zugfestigkeit wurde eine grosse Streuung und auch nur in etwa der Hälfte der Fälle eine Normalverteilung festgestellt.

**Tabelle 3: Ergebnisse zur Zug- und Druckfestigkeit, ermittelt an Bohrkernen (Bk) und separat hergestellten Prüfkörpern (sP), aus Rostasy & Ranisch (1990) [27]**

	Druckfestigkeit	Spaltzugfestigkeit	Zentrische Zugfestigkeit
Anzahl [-]	27	85	14
Mittelwert BK/sP [-]	0.95	1.11	1.17
Variationskoeffizient [-]	0.17	0.19	0.43

Soutsos et al. [33] betrachteten den Temperatureinfluss bei 10 – 50 °C Lagerung auf die Druckfestigkeitsentwicklung von Mörtel, der nur mit Portlandzement und bei Portlandzement mit Zugabe von Hüttensand oder Flugasche hergestellt wurde. Es zeigte sich, dass die Lagerung bei 10 °C bei Mörteln nur mit Portlandzement oder auch Hüttensand nach 2 – 4 Monaten zu den höchsten Festigkeiten führte. Im Gegensatz dazu wiesen die bei 10 °C gelagerten flugaschehaltigen Mischungen nach 4 Monaten bei hohen Wassergehalten (w/b 0.60) noch die niedrigsten und die bei w/b 0.40 noch tiefere Druckfestigkeiten als bei 20 und 30 °C (und höhere als bei 40 und 50 °C) Lagerung auf.

Klieger [19] zeigte, dass Beton mit Portlandzement nach einem Jahr Lagerung zwischen -4 und +13 °C höhere Druck- und Biegezugfestigkeiten als bei einer Lagerung bei 23 °C und höher aufwies. Die höchsten Festigkeiten ergaben sich zumeist bei Lagerungstemperaturen von +4 und +13 °C. Die Art des Zementklinkers (wenig C<sub>3</sub>A, viel C<sub>3</sub>S, viel C<sub>2</sub>S) hatte nur einen geringen Einfluss.

Insgesamt belegen diese Untersuchungen, dass Druckfestigkeitsunterschiede zwischen separat hergestellten Prüfkörpern und Bohrkernen aus Bauteilen bestehen. Wie gross die Unterschiede sind, ist nicht klar, auch wenn die SN EN 13791 diese mit 15 % beziffert. Als Gründe für den Unterschied werden unterschiedliche Betonverdichtungen (Bauteil, Würfel) als auch die verschiedenen Lagerungs-(Umgebungs)bedingungen gesehen. Die Grösse des Einflusses der Lagerungs-(Umgebungs)bedingungen hängt vom Bindemittel ab.

### 1.2.2 Dauerhaftigkeit im Bauteil und separat hergestellten Probekörper

Bei den Dauerhaftigkeitseigenschaften ist die Situation anders als bei der Festigkeit. Es liegen nur sehr wenige Informationen zum Einfluss der Bauteilherstellung und dabei insbesondere der Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte) sowie der Art und Dauer der Nachbehandlung im Allgemeinen und noch weniger zu den in der Schweiz angewandten Dauerhaftigkeitsprüfungen vor (z.B. Bager [2], Ehrhardt & Stark [8], Spörel et al. [32]). Folglich war und ist es mit der bestehenden Datenlage nicht möglich, Grenzwerte in der Norm SN EN 13670 für den an Bohrkernen zu erbringenden Nachweis der Betonqualität im Bauteil festzulegen (Prüfungsart TT-2). Auch ist bekannt, dass die erforderliche Nachbehandlungsdauer von den angestrebten Betoneigenschaften abhängt (z.B. Hilsdorf et al. [11], Huber [12], Martin [22]). Dies bedeutet, dass z.B. bei einer Betonsorte eine Nachbehandlung von nur wenigen Tagen ausreichen kann, um den notwendigen Chloridwiderstand zu erreichen, jedoch andere Dauerhaftigkeitsanforderungen (z.B. Frosttausalz-widerstand) bei dieser Betonsorte und dieser Nachbehandlungsdauer möglicherweise nicht erfüllt werden.

Ehrenberg & Feldrappe [7] stellen Untersuchungsergebnisse zu Beton mit Hochofenzement aus Brückenbauwerken vor, der mehrere Jahre nach dem Einbau noch einmal untersucht wurde. Sie zeigen auf, wie wichtig eine ausreichende Nachbehandlung des Betons war. Erfolgte diese nur wenige Tage statt der aufgrund der Witterungsverhältnisse beim Einbau notwendigen 14 und mehr Tage, war im Randbereich des Betons die Kapillarporosität deutlich höher (+10 %) und die Zugfestigkeit deutlich niedriger (-20 %) im Vergleich zum Kernbeton. Dies wurde dann auch als Ursache für die deutliche Abwitterung durch Frosttausalzeinwirkung der Betonoberflächen gesehen.

Gouws et al. [10] untersuchten in Südafrika sechs Bauwerke mit verschiedenen Betonsorten. Die Betonqualität im Würfel (Wasserlagerung) wurde dabei mit der von Bohrkernen aus den Bauwerken anhand der Wasseraufnahme (Abbildung 1), der Sauerstoffpermeabilität (Abbildung 2), der Chloridleitfähigkeit (Abbildung 3) sowie der Druckfestigkeit verglichen. Zwischen der Druckfestigkeit und den drei Dauerhaftigkeitseigenschaften wurde kein Zusammenhang ermittelt. Im Mittel waren

- die Wasseraufnahme, bestimmt am Würfel, 23 % niedriger als diejenige von Bohrkernen aus dem Bauwerk (Abbildung 1).
- der Index der Sauerstoffpermeabilität<sup>1</sup>, bestimmt am Würfel, 7 % höher als derjenige von Bohrkernen aus dem Bauwerk (Abbildung 2).
- die Chloridmigration, bestimmt am Würfel, 29 % niedriger als diejenige von Bohrkernen aus dem Bauwerk (Abbildung 3).

Insgesamt waren somit im Bauteil alle untersuchten Eigenschaften deutlich schlechter als im Probekörper. Zudem wurde bei allen drei Prüfungen eine deutlich grössere Streuung der Betoneigenschaften im Bauwerk als bei den Würfeln ermittelt.

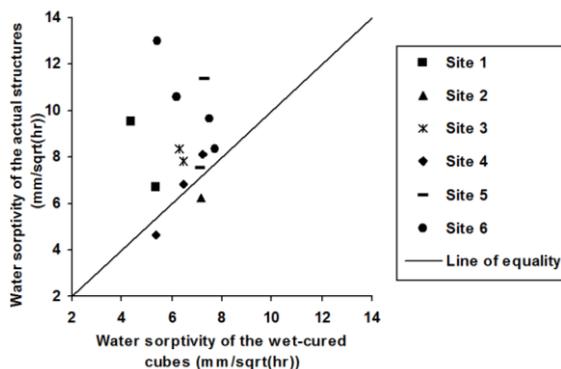


Abbildung 1: Wasseraufnahme, bestimmt an Beton im Würfel (wet-cured cubes) und in Bauteilen (actual structure) bei 6 verschiedenen Objekten (Site 1 - 6), aus Gouws et al. [10]

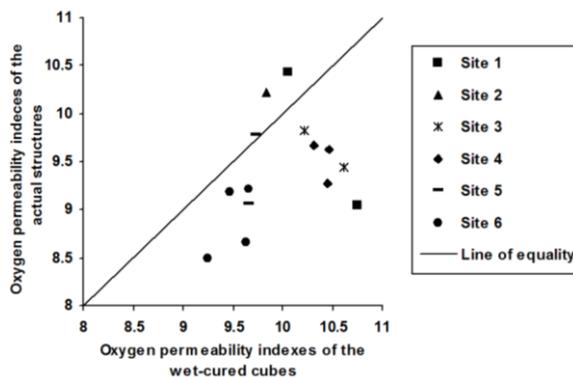


Abbildung 2: Sauerstoffpermeabilitätsindex, bestimmt an Beton im Würfel (wet-cured cubes) und in Bauteilen (actual structure) bei 6 verschiedenen Objekten (Site 1 - 6), aus Gouws et al. [10]

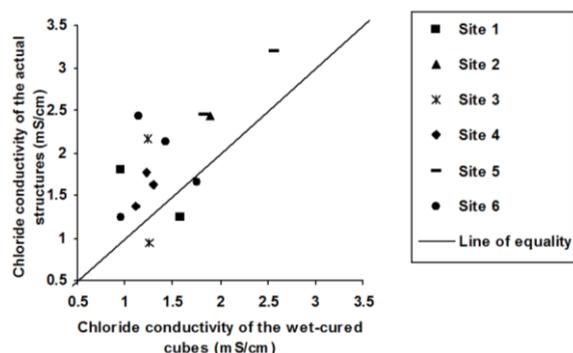
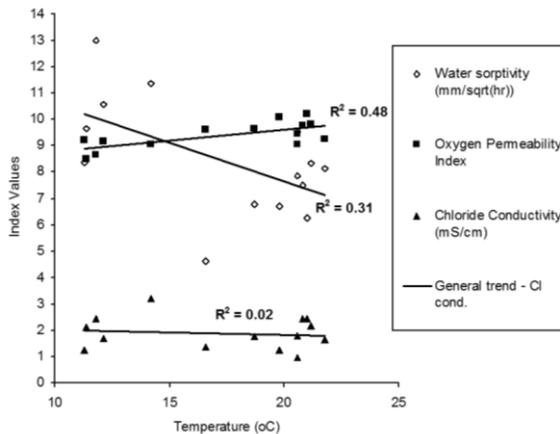


Abbildung 3: Chloridleitfähigkeit, bestimmt an Beton im Würfel (wet-cured cubes) und in Bauteilen (actual structure) bei 6 verschiedenen Objekten (Site 1 - 6), aus Gouws et al. [10]

<sup>1</sup> Der Index entspricht dem Kehrwert der Sauerstoffpermeabilität

In Abbildung 4 sind die o.g. Ergebnisse (Chloridleitfähigkeit, Sauerstoffpermeabilität, Wasseraufnahme) gegenüber der mittleren Lufttemperatur während der ersten 7 Tage nach dem Betonieren aufgetragen. Insgesamt besteht nur ein loser Zusammenhang zwischen der Lagerungstemperatur und den Festbetoneigenschaften. Beim Index der Sauerstoffpermeabilität und der Wasseraufnahme zeigt sich ein geringer Zusammenhang mit der Temperatur. Die Wasseraufnahme nahm mit zunehmender Temperatur ab und der Index der Sauerstoffpermeabilität zu (bzw. die Sauerstoffpermeabilität ebenfalls zu). Später wurde jedoch erkannt, dass dies nicht der Einfluss der Temperatur, sondern der des Einbaus war, da die Verdichtung nicht in allen Bauteilen gleich erfolgte (Alexander [1]).

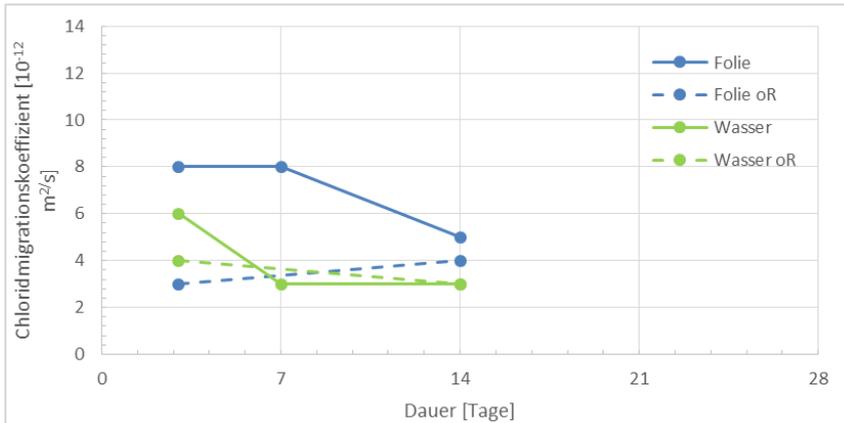


**Abbildung 4: Mittlere Lufttemperatur während der ersten 7 Tage nach der Herstellung und Betoneigenschaften bei 6 verschiedenen Objekten, aus Gouws et al. [10]**

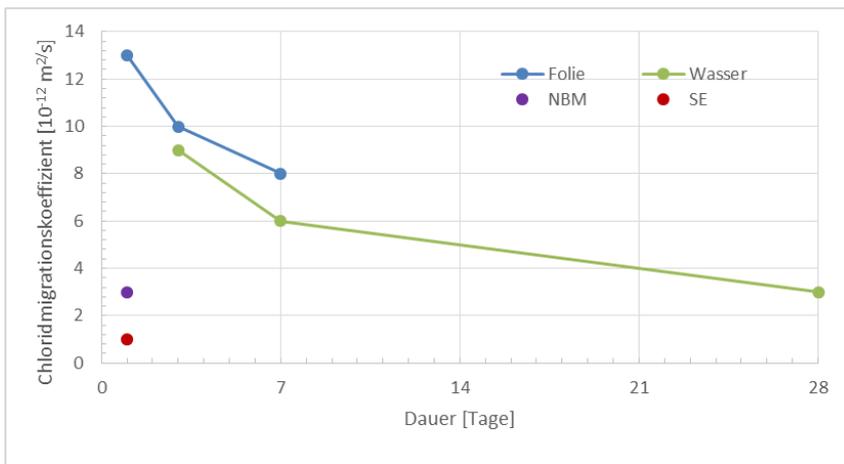
Ehrhard & Stark [8] lagerten Prüfkörper sowohl im Labor bei 20 °C und 65 % r.F. als auch während 21 Tagen im Freien im Herbst bzw. Sommer. Anschliessend erfolgte deren Prüfung. Es zeigten sich höhere Abwitterungsmengen im Frostausalzversuch für die Lagerung im Labor im Vergleich zur Lagerung im Freien. Im Sommer im Freien ausgelagerte Proben wiesen eine leicht niedrigere Abwitterung und die im Herbst ausgelagerten Proben eine deutlich niedrigere Abwitterung als die im Laborklima gelagerten Proben auf.

Beushausen et al. [5] präsentierten Ergebnisse zum Einfluss der Nachbehandlung auf die Druckfestigkeit und verschiedene Dauerhaftigkeitseigenschaften (Porosität, Permeabilität, Chloridleitfähigkeit) von Betonen, hergestellt mit unterschiedlichen Zementarten. Eine Nachbehandlung unter feuchter Jute oder ein Abdecken mit Plastikfolie war demnach effizienter als ein aufgesprühtes Nachbehandlungsmittel. Ein wachsbasiertes Nachbehandlungsmittel waren deutlich weniger wirksam als ein weisspigmentiertes Nachbehandlungsmittel auf (unbekannter) Lösemittelbasis. Betone mit niedriger Druckfestigkeit oder mit hütensand- oder flugaschehaltigem Zement zeigten grössere Einflüsse bei der Nachbehandlungsart als Betone höherer Festigkeit oder mit Portlandzement.

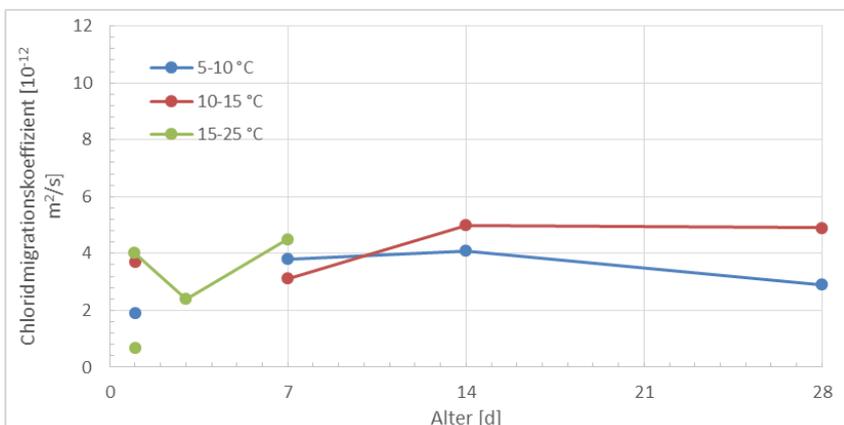
Jacobs et al. (2014) [18] ermittelten einen grossen Einfluss der Lagerungsbedingungen im Labor auf die Festbetoneigenschaften. Bei konstant 6 °C gelagerte Prüfkörper wiesen bei gleicher oder kürzerer Nachbehandlung bessere Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften als bei konstant 20 °C gelagerte Prüfkörper auf (Abbildung 5). Beim Chloridmigrationskoeffizienten ergab sich zusätzlich der bekannte, sehr ausgeprägte Einfluss der Zementart: Beton mit CEM I (Portlandzement) weist einen deutlich höheren Chloridmigrationskoeffizienten (schlechteren Widerstand gegenüber eindringenden Chloriden) als Beton mit CEM III/B (Hochofenzement) auf. Der Einfluss der Nachbehandlungsart und -dauer auf den Chloridmigrationskoeffizienten war bei der 20 °C-Lagerung klarer erkennbar als bei der 6 °C Lagerung. Das Nachbehandlungsmittel und vor allem die Schalungseinlage waren sehr effektiv. Bei einer kurzen (schlechten) Nachbehandlungsdauer zeigte sich ein niedrigerer Chloridmigrationskoeffizient, sofern die äusseren 5 – 10 mm des Betons abgeschnitten wurden. Bei den Prüfungen für den Konformitätsnachweis ist nach SIA 262/1 dieser Randbeton ebenfalls abzuschneiden. Bei einer längeren Nachbehandlung war erwartungsgemäss der Einfluss mit oder ohne Randbeton uneinheitlich und lag im Bereich der Prüfstreuung.



**Abbildung 5:** Chloridmigrationskoeffizient von Beton mit Zement CEM III/B bei Lagerung bei 6 °C (oben) und bei 20 °C (unten) und verschiedenen Nachbehandlungen (unter Folie, in Wasser, NBM: Nachbehandlungsmittel, SE: Schalungseinlage) bei Laborlagerung; oR = ohne Randbeton, aus Jacobs et al. [18]



Bei der Lagerung von Prüfkörpern im Freien statt bei konstanter Temperatur im Labor war der Einfluss der Lagerungstemperatur kaum erkennbar (Abbildung 6). Weder die Lagerungsart noch die Nachbehandlungsdauer hatten einen klaren Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten bei Beton mit CEM III/B (Abbildung 6) und Beton mit CEM I (mit/ohne Luftporenbildner). Als Hauptgrund hierfür wird gesehen, dass die klimatischen Bedingungen bei der Lagerung im Freien relativ stark variierten (Tagesgang Temperatur, variable Luftfeuchtigkeiten, z.T. Niederschläge). Die Zementart wies den grössten Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten auf. Das Nachbehandlungsmittel zeigte vor allem beim Beton mit CEM III/B und teilweise bei den beiden Betonen A mit CEM I mit/ohne Luftporenbildner einen positiven Einfluss (Abbildung 6). Der Beton mit künstlich eingeführten Luftporen wies die höchsten Chloridmigrationskoeffizienten auf.



**Abbildung 6:** Einfluss der Nachbehandlung der Betonsorte B (CEM III/B) und der Lagerungstemperatur auf den Chloridmigrationskoeffizienten, aus Jacobs et al. [14]

Dauer unter Folie bzw. mit Nachbehandlungsmittel (NBM) = Punkte bei 1 d

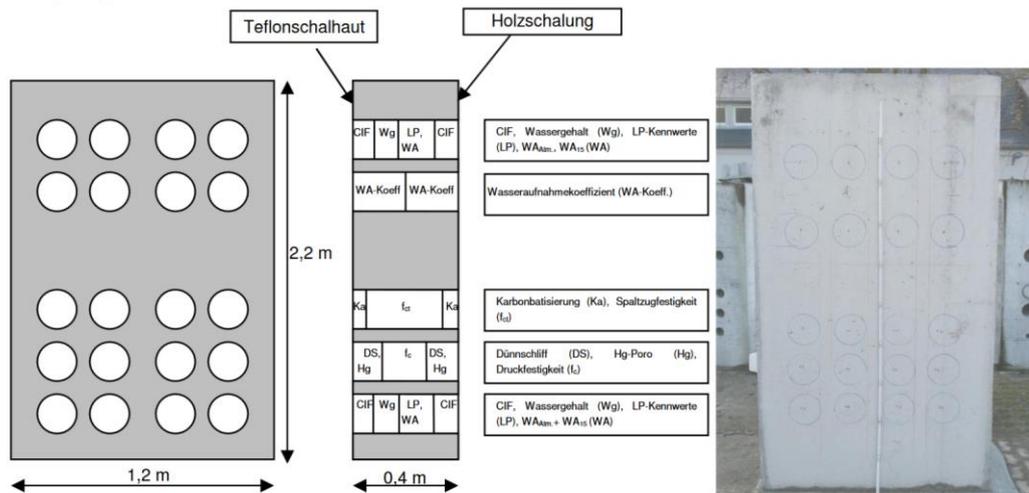
Bentz et al. [3] untersuchten die Hydratation und Gefügeentwicklung von Portlandzement CEM I, Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL (10 % LL) und CEM I mit unterschiedlichen Kalksteingehalten (1 – 18 %) bei 5 bis 50 °C. Sie fanden, dass beim CEM I und  $\geq 5$  % Kalksteinmehl und beim CEM II/A-LL mit abnehmender Temperatur der Anteil Monocarbonat zunahm und das Gefüge dichter wurde.

In einem VSS-Forschungsprojekt (Werner et al. [43]) wurde der Frage nachgegangen, inwieweit die Prüfungen zur Beurteilung des Frost-Tausalzwerstandes die Gegebenheiten der Praxis widerspiegeln. Dabei zeigte sich der erwartete, grosse Einfluss der Exposition auf das Abwitterungsverhalten. Ähnliches wurde auch u.a. in Schiessl & Brandes [28], Ehrhardt & Stark [8] sowie Müller & Guse [23] berichtet.

Schiessl & Brandes (2004) [28] lagerten 12 Betone verschiedener Zusammensetzung im Labor und bewittert sowie unbewittert im Freien. Nach 1 bis 24 Monaten Lagerung bestimmten sie den Frosttausalzwerstand mit dem CDF-Verfahren. Damit sollte geklärt werden, ob ein Alterseinfluss auf den Frosttausalzwerstand besteht, wie es verschiedentlich berichtet wurde (z.B. Petersson [25]). Es zeigte sich, dass bei allen Lagerungen eine signifikante Verbesserung des Frosttausalzwerstandes mit zunehmender Lagerungsdauer auftrat. Bei der Laborlagerung war diese am geringsten und wurde vor allem durch die Karbonatisierung des Randbetons erklärt. Die bewitterte Lagerung im Freien führte zu der grössten Verbesserung des Frosttausalzwerstandes, was vor allem auf die Nachhydratation zurückgeführt wurde. Die Verbesserung des Frosttausalzwerstandes lag bei maximal etwa dem Vierfachen, bezogen auf die Abwitterungsmenge, d.h. deutlich weniger als das worüber Petersson [25] berichtete. Gemäss Petersson [25] lag die Abwitterung im Slab-Test (SN EN 12390-9) nach zwei bis vier Jahren bei Beton mit Luftporenbildner bei nur noch 1/10 und bei Beton ohne Luftporenbildner bei 1/100 von der nach 28 Tagen bestimmten Menge. Als mögliche Gründe für die unterschiedliche Verbesserung des Frosttausalzwerstandes geben Schiessl & Brandes die unterschiedliche Lagerungsdauer und das weniger strenge Prüfverfahren des Slab-Tests an.

Müller & Guse [23] berichten von einer teilweisen Verbesserung des Frost- und Frosttausalzwerstandes von im Freien gelagerten Proben bei einer erneuten Prüfung nach bis zu drei Jahren. Zudem wurde ein Einfluss der Bohrkernlage im Bauteil (Wand) auf den Frost- und Frosttausalzwerstand erkannt. Umso höher der Bohrkern in der Wand (Abstand ab Boden) gezogen wurde, desto höher war die Abwitterung. Die Druckfestigkeit der oben aus den Wänden entnommenen Bohrkern war ca. 16 % niedriger als bei den unten aus der Wand entnommenen Bohrkernen; weder bei der Rohdichte noch der Porengrössenverteilung zeigte sich aber ein Einfluss der Höhenlage. Müller & Guse [23] berichten zudem, dass bei Aussenlagerungen viel weniger starke Temperaturbeanspruchungen und oft geringere Betonsättigungen (< 90 %) als bei Laborprüfungen auftraten. Den höheren Frosttausalzwerstand im höheren Alter erklären sie mit der über 28 Tage hinaus fortschreitenden Hydratation (Gefügeverdichtung) bei frei bewitterten Beton.

Spörel (2010) [30] führte ein Forschungsprojekt zum Einsatz von Mikrohohlkugel durch, in dessen Rahmen neben kleinen Prüfkörpern auch eine 2.0 m x 1.2 m x 0.4 m grosse Wand erstellt wurde (Abbildung 7). In Alter von ca. 3 Monaten wurden Bohrkern mit einem Durchmesser von 150 mm gezogen.



**Abbildung 7: Bohrkerntnahmestellen und Prüfungen an einer Musterwand aus 280 kg/m<sup>3</sup> CEM III/A, 80 kg/m<sup>3</sup> Flugasche, w/z = 0.53, 1.5 kg/m<sup>3</sup> Mikrohohlkugeln, 16 mm Grösstkorn, aus Spörel (2010) [30]**

Bei den Bauteiluntersuchungen zeigte sich, dass

- die Wasseraufnahme der Bohrkerne unter Atmosphärendruck bzw. bei 150 bar aus dem oberen Wandbereich etwa 10 % bzw. 5 % höher als die aus dem unteren Wandbereich war.
- ein erhöhter Porenanteil im Bereich > 0.1 mm im Vergleich zu separat hergestellten Prüfkörpern vorhanden war
- die Druck- bzw. Spaltzugfestigkeiten zwischen 38 und 47 N/mm<sup>2</sup> bzw. 2.7 und 3.4 N/mm<sup>2</sup> relativ deutlich variierten.

Spörel & Müller (2012) [31] und Spörel et al. (2013) [32] stellten Ergebnisse von umfangreichen Untersuchungen zum Einfluss der Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit von Beton vor. Es wurden sieben sechseckige, massige 2 m hohe Blöcke mit drei verschiedenen Betonzusammensetzungen an drei Terminen mit Beton aus einem Transportbetonwerk hergestellt. Der Beton wurde in den 8 m<sup>3</sup> grossen Blöcken jeweils in mehreren Lagen eingebaut. Die Bohrkerne wurden dann so gezogen, dass diese nicht bei Betonierfugen lagen. Als Bindemittel kamen CEM III/A, CEM II/B-S und CEM I mit Flugasche zum Einsatz. Der w/z-Wert lag bei 0.50. Mit Luftporenbildner wurde ein Luftgehalt von ca. 5 % eingestellt. An jeder 2.0 m x 1.2 m grossen Seitenfläche wurde eine Nachbehandlungsart geprüft (Tabelle 4), d.h. dass die Wetterexposition unterschiedlich war. In den Blöcken bzw. an Bohrkerne aus den unteren Hälften der Blöcke wurden der Temperatur- und der Elektrolytwiderstand während mindestens 14 Tagen sowie die Karbonatisierungstiefe, der Wasseraufnahme- und der Chloridmigrationskoeffizient, die Luftpermeabilität sowie der Frost- und Frostausalzwiderstand (Methode CIF, CDF) bestimmt. In Tabelle 5 sind die gefundenen Auswirkungen der Nachbehandlung auf verschiedene Betoneigenschaften dargestellt. Diese Auswirkungen waren nicht immer gleich, weshalb diese als tendenzielle bezeichnet werden.

Beton	Schaldauer	Schalhaut			Optionale Sekundärmaßnahmen			
		filmbe-schichtet	Stahlblech	Schalungs-bahn	NBM Parafin <sup>1)</sup>	Alt. NBM <sup>2)</sup>	Jute+ Folie <sup>2)</sup>	an-nässen
CEM III/A	3 d	x	x	x	x		x	
	7 d	x	x		x		x	
CEM I + FA	3 d	x	x	x	x		x	
	7 d	x	x		x		x	
CEM II/B-S	1 d	x		x				
	3 d	x	x	x	x	x	x	
	7 d	x	x		x		x	x
	14 d	x						

**Tabelle 4: Übersicht über die Nachbehandlungsvarianten, aus Spörel & Müller (2012) [31].**

**Tabelle 5: Tendenzielle Auswirkungen der Nachbehandlung, aus Spörel & Müller (2012) [31]; ↑ Zunahme  
↓ Abnahme → gleichbleibend**

Kennwert	Schalungs-bahn <sup>1)</sup>	Schal-dauer 7 d <sup>1)</sup>	Jute+Folie <sup>2)</sup>		Einfluss Parafin <sup>2)</sup>		Stahlblech <sup>2)</sup>		An-nässen	Al-tern. NBM	
			3 d	7 d	3 d	7 d	3 d	7 d			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Chloridmigrati-onskoeff.	↓	↓	↑	→	↑, → <sup>4)</sup>	↑, → <sup>4)</sup>	→	↓	→ <sup>4)</sup>	↑ <sup>4)</sup>	
Karbonati-sierung	↓	↑, ↓ <sup>4)</sup>	↑	→	↑, → <sup>3)</sup>	→, ↓ <sup>3)</sup>	↑	6)	↓ <sup>4)</sup>	↑ <sup>4)</sup>	
Luftper-meabilität	↓	↓, → <sup>4)</sup>	→ <sup>4)</sup> , ↑ <sup>3)</sup>	↑, → <sup>5)</sup>	↑	→ <sup>4)</sup> , ↓ <sup>5)</sup>	→ <sup>4)</sup> , ↓ <sup>5)</sup>	→, ↓ <sup>5)</sup>	→ <sup>4)</sup>	→ <sup>4)</sup>	
Elektrolyt-widerstand	↑	→	→ <sup>4)</sup>	→, ↓ <sup>4)</sup>	→ <sup>4)</sup>	→	→ <sup>4)</sup>	→, ↑ <sup>4)</sup>	→ <sup>4)</sup>	→ <sup>4)</sup>	
Wasserauf-nahmekoeff.	↓	↓	↓, ↑ <sup>4)</sup>	→, ↑ <sup>5)</sup>	↓, → <sup>4)</sup>	→, ↓ <sup>5)</sup>	↓, ↑ <sup>4)</sup>	→, ↓ <sup>3)</sup>	↓ <sup>4)</sup>	↑ <sup>4)</sup>	
Abwitterung CIF	→	→, ↓ <sup>5)</sup>	→, ↓ <sup>5)</sup>	→	→, ↓ <sup>5)</sup>	→	→, ↓ <sup>5)</sup>	→	→ <sup>4)</sup>	→ <sup>4)</sup>	
Wasserauf-nahme CIF	↓	→	→, ↑ <sup>4)</sup>	→, ↑ <sup>4)</sup>	→	→	→	→	→ <sup>4)</sup>	-	
rel. dyn. E-Modul CIF	→	→, ↓ <sup>3)</sup>	→	→, ↑ <sup>3)</sup>	→, ↓ <sup>3)</sup>	→, ↑ <sup>3)</sup>	→, ↓ <sup>3)</sup>	→, ↑ <sup>3)</sup>	→ <sup>4)</sup>	→ <sup>4)</sup>	
Abwitterung CDF	↓	↓ <sup>7)</sup> , → <sup>4)</sup> , 7)	→ <sup>7)</sup>	↓ <sup>7)</sup>	→ <sup>7)</sup>	↓ <sup>7)</sup> , → <sup>5)</sup> , 7)	→ <sup>7)</sup>	→ <sup>7)</sup> , ↓ <sup>4)</sup> , 7)	↓ <sup>4)</sup> , 7)	↓ <sup>4)</sup> , 7)	
Wasserauf-nahme CDF											
rel. dyn. E-Modul CDF	→ <sup>7)</sup>	→ <sup>7)</sup>	→ <sup>7)</sup>	→ <sup>7)</sup> , ↑ <sup>3)</sup> , 7)	→ <sup>7)</sup>	→ <sup>7)</sup>	→ <sup>7)</sup>	→ <sup>7)</sup>	→ <sup>7)</sup>	→ <sup>4)</sup> , 7)	
WA <sub>Atm.</sub>	↓	→	→	→	→	→, ↑ <sup>3)</sup>	→, ↓ <sup>5)</sup>	→	→ <sup>4)</sup>	↑ <sup>4)</sup>	
WA <sub>15</sub>	↓	→	→, ↓ <sup>5)</sup>	→	↑, ↓ <sup>5)</sup>	↑ <sup>3)</sup> , ↓ <sup>5)</sup>	6)	6)	→ <sup>4)</sup>	↑ <sup>4)</sup>	
Hg-Poro-Messbereich bis 10 mm	Gesamtporosität	↓	↓, → <sup>4)</sup>	↓, → <sup>5)</sup>	6)	→	→	→	→, ↓ <sup>3)</sup>	→ <sup>4)</sup>	→ <sup>4)</sup>
	Medianradius	↑, ↓ <sup>3)</sup>	↓	↓, ↑ <sup>5)</sup>	↑, → <sup>4)</sup>	↓, ↑ <sup>5)</sup>	6)	↑, → <sup>3)</sup>	6)	→ <sup>4)</sup>	↓ <sup>4)</sup>
	Grenzzradius	↓	↑, ↓ <sup>4)</sup>	6)	↑, → <sup>4)</sup>	↓, ↑ <sup>5)</sup>	→, ↑ <sup>5)</sup>	↓, → <sup>5)</sup>	↑, → <sup>4)</sup>	↑ <sup>4)</sup>	↓ <sup>4)</sup>
	0<r<5 nm	↑, → <sup>4)</sup>	↑	→, ↓ <sup>3)</sup>	6)	→, ↑ <sup>5)</sup>	↑, → <sup>4)</sup>	→, ↑ <sup>5)</sup>	↑, → <sup>4)</sup>	→ <sup>4)</sup>	→ <sup>4)</sup>
	5<r<30 nm	→, ↓ <sup>5)</sup>	↑, → <sup>4)</sup>	↑, → <sup>5)</sup>	→, ↑ <sup>4)</sup>	→, ↓ <sup>5)</sup>	→	↑, ↓ <sup>5)</sup>	→, ↑ <sup>4)</sup>	→ <sup>4)</sup>	↑ <sup>4)</sup>
	30<r<1000	6)	→, ↓ <sup>3)</sup>	↓, → <sup>3)</sup>	↓, → <sup>3)</sup>	6)	→	↓	↓, → <sup>3)</sup>	→ <sup>4)</sup>	→ <sup>4)</sup>
	r>1000 nm	→, ↑ <sup>5)</sup>	↓	→, ↑ <sup>5)</sup>	→, ↑ <sup>5)</sup>	6)	→	→, ↑ <sup>5)</sup>	→	→ <sup>4)</sup>	→ <sup>4)</sup>

- 1) bezogen auf dreitägige Schaldauer ohne Sekundärmaßnahme
- 2) jeweils bezogen auf drei bzw. siebentägige Schaldauer ohne Sekundärmaßnahme
- 3) CEM I + Flugasche
- 4) CEM III/B-S
- 5) CEM III/A
- 6) Uneinheitlich in Abhängigkeit des Bindemittels
- 7) Nach 18 FTW, da nach 28 FTW nicht auswertbar

Insgesamt zeigte sich, dass

- der Beton mit CEM III/A nach drei Tagen ca. 40 % und nach 7 Tagen ca. 70 % der charakteristischen Druckfestigkeit C 25/30 aufwies. Bei Beton mit CEM II/B-S oder CEM I und Flugasche waren nach drei Tagen bereits fast 70 % und nach 7 Tagen mindestens 80 % der charakteristischen Druckfestigkeit C 25/30 erreicht.
  - Vergleicht man dies mit den nach SIA 262 geforderten Nachbehandlungsdauern zeigt sich Folgendes:
    - Gemäss SIA 262 (Tab. 22) hat die Nachbehandlung so lange zu erfolgen, bis 35 % bei der Nachbehandlungsklasse (NBK) 2, 50 % bei NBK 3 und 70 % bei NBK 4 von der charakteristischen Druckfestigkeit erreicht wird.
    - D.h. bei diesen Betonen wäre eine maximale Nachbehandlung von 1 Woche gefordert, da dann spätestens alle Betone 70 % (NBK 4) von der charakteristischen Druckfestigkeit erreichten.
- die Verwendung von Schalungsbahnen den grössten (positiven) Effekt hatte
- der Einfluss des Bindemittels auf diverse Betoneigenschaften (z.B. Karbonatisierung, Chloridmigration, Porosität) nur dann gut erkennbar war, wenn keine Schalungsbahn verwendet wurde.
- sich eine Verlängerung der Nachbehandlungsdauer von drei auf sieben Tage zumeist als positiv herausstellte.
- der Einfluss der Nachbehandlungsart oder der Schalungsart beim Ausschalen nach drei Tagen klarer als beim Ausschalen nach sieben Tagen erkennbar war. Als mögliche Gründe hierfür wurden das unterschiedliche Betonalter (Bohrkernentnahme und Prüfung erfolgte nach 4 – 6 Jahren) sowie die unterschiedliche Exposition der Flächen mit verschiedener Nachbehandlung (Wetterseite, wetterabgewandte Seite, ...) angegeben.
  - Durch die Nachbehandlung wurde der Wassergehalt des Betons während der ersten zwei Monate nach der Herstellung mit einer Ausnahme nur im äussersten Zentimeter beeinflusst. Die Ausnahme betrifft die Feuchtezufuhr durch das Annässen durch den Menschen bzw. Tau oder Regen. Dadurch wurde der Feuchtegehalt gemäss den Messungen bis in ca. 3 cm Tiefe beeinflusst.
  - Weder bei der Frost- (CIF) noch der Frostausalzprüfung (CDF) zeigte sich ein klarer Effekt der Nachbehandlung mit einer Ausnahme: Die Schalungseinlage verbesserte den Frost- und Frostausalz widerstand deutlich.

Insgesamt zeigen sich somit auch bei den Dauerhaftigkeitseigenschaften Unterschiede in der Betonqualität zwischen Bohrkernen aus Bauteilen und separat hergestellten Prüfkörpern. Die Unterschiede beruhen auf den gleichen Einflüssen wie bei der Druckfestigkeit. Jedoch ist das Ausmass des Einflusses teilweise unterschiedlich, da die Dauerhaftigkeitseigenschaften im Gegensatz zur Festigkeit stärker vom Bindemittel und zumeist massgeblich von vor allem dem äussersten Millimeter bis Zentimeter bestimmt werden. Bei den Dauerhaftigkeitseigenschaften kann der Unterschied in der Betonqualität zwischen Bohrkernen aus Bauteilen und separat hergestellten Prüfkörpern noch weniger als bei der Druckfestigkeit quantifiziert werden

### 1.2.3 Nachweis der Dauerhaftigkeit gemäss SN EN 206, SIA 262/1 und SN EN 13670

In der SN EN 206 sind die Anforderungen zum Nachweis der Betonqualität (u.a. Frischbeton- und Festbetoneigenschaften) durch das Betonwerk festgelegt (so genannter Konformitätsnachweis). In der SN EN 13670 sind Regelungen zur Prüfung des auf die Baustelle gelieferten Betons durch den Unternehmer und den Bauherrn enthalten und unterscheidet die in Tabelle 6 aufgeführten Prüfungsarten (TT-1 bis TT-3) auf der Baustelle.

**Tabelle 6: Prüfungsarten gemäss SN EN 13670 sowie zugehörige Prüfnormen**

Prüfungsart	TT-1	TT-2	TT-3
Probekörper	Separat hergestellte Probekörper	Bohrkerne aus Bauteil	Bohrkerne aus Bauteil
Herstellung	SN EN 12350-1	SIA 262	SIA 262
Lagerung, Nachbehandlung	SN EN 12390-2	SIA 262	SIA 262
Probenahme	SIA 262/1	SN EN 12504-1	SN EN 12504-1
Prüfung	SIA 262/1	SIA 262/1	SIA 262/1
Prüfalter	28 Tage	28 Tage	>> 28 Tage
Anforderung	Grenzwert SIA 262/1, Tab. 6	Richtwert SN EN 13670, Tab. NA.3	Keine

Für die Prüfungsart TT-1 sind die Prüfungen klar geregelt und deren Ergebnisse anhand der Grenzwerte auch einfach beurteilbar. Für die Prüfungsart TT-2 sind die Regelungen kaum umsetzbar, wie die Formulierung im nationalen Anhang zur Ziffer 8.3 der SN EN 13670 zeigt:

*„Prüfungen gemäss Prüfungsart TT-2 werden für den Nachweis der Eigenschaften am eingebauten Beton eines Bauteils oder Bauwerks angewendet. Sie können als Alternative zu den Prüfungen auf der Baustelle gemäss TT-1 eingesetzt werden. Es gelten die Richtwerte gemäss Tabelle NA.3 dieser Norm. Die Richtwerte gemäss Tabelle NA.3 dürfen nur dann als Grenzwerte verwendet werden, wenn deren Richtigkeit durch Eignungsversuche nachgewiesen wurde. Sie können objektspezifisch angepasst werden.“*

Hintergrund dieser vagen Formulierung ist, dass bis heute nicht ausreichend bekannt ist, wie sich die Betonqualität im Bauteil und separat hergestellten Prüfkörper unterscheidet bzw. unterscheiden kann. Folglich ist es bisher unmöglich, Grenzwerte in der Norm aufzuführen. Der Planer müsste somit bei der Prüfungsart TT-2 gemäss der Norm SN EN 13670 die dort enthaltenen Richtwerte im Rahmen von Eignungsversuchen überprüfen und deren Richtigkeit nachweisen bzw. diese anpassen. Wie oben gezeigt wurde, üben neben der Qualität des Betonherstellers und Unternehmers u.a. die Lagerungs-/Umgebungstemperatur einen grossen Einfluss auf die Betonqualität aus. Folglich müsste der Planer die Eignungsversuche bei verschiedenen Lagerungs-/Umgebungstemperaturen durchführen, um zuverlässige Aussagen zu erhalten. Wegen des grossen (finanzielle und zeitlichen) Aufwands wird dies jedoch selten der Fall sein (können). Zudem zeigt sich, dass die Vielfalt an Zementen und Zusatzstoffen zugenommen hat (Lunk [21]) und zukünftig der Einsatz der Zemente und Zusatzstoffe Änderungen unterliegt. Somit können bestehende Erfahrungen nicht oder nicht einfach auf neue Bauvorhaben übertragen werden.

Für die Prüfungsart TT-3 liegen weder Richt- noch Grenzwerte zur Beurteilung der Ergebnisse von Prüfungen von Bohrkernen aus Bauteilen vor.

Insgesamt zeigt sich somit, dass nur ungenügende Angaben dazu vorliegen, wie im Bauteil die Betonqualität beurteilt werden kann und welche Abweichungen von den Ergebnissen des Konformitätsnachweises zulässig sind.

## 2 Vorgehen, Methodik, Lösungsansatz

Der Bauherr möchte sicher sein, dass im Bauwerk die für die geplante Nutzungsart und –dauer notwendige Betonqualität vorhanden ist. Hierzu wäre eine Prüfung nach TT-2 oder TT-3 notwendig, da die Betonqualität in separat hergestellten Probekörpern (TT-1) von der im Bauteil abweicht und der Unterschied bisher nicht ausreichend quantifiziert werden kann. Erfolgt die Prüfung nach TT-2 (Prüfalter 1 Monat) hätte dies den Vorteil, dass bei Mängeln noch lenkend auf die weiteren Betonierarbeiten eingewirkt, der Mangelverursacher belangt sowie bei Bedarf weitere Überprüfungen und auch allfällige Instandsetzungs-massnahmen kostengünstiger durchgeführt werden könnten.

Es ist gemäss den o.g. Ausführungen und dem heutigen Wissen jedoch in den seltensten Fällen möglich, bei Baustellen die Richtigkeit der Richtwerte der Prüfungsart TT-2 (Prüfalter 28 Tage) zuverlässig und zeitgerecht zu überprüfen. Im Rahmen dieses Projektes sollten deshalb,

- die Betonqualitäten im Bauwerk ermittelt,
- diese mit der Betonqualität vom Konformitätsnachweis verglichen sowie
- die Richtwerte für die Prüfungsart TT-2 überprüft und wenn möglich stattdessen Grenzwerte vorgeschlagen werden.
- Vorschläge für Richt- oder Grenzwerte für die Prüfungsart TT-3 ausgearbeitet werden.
- die Anforderungen an die Nachbehandlung der SIA 262 sowie die Vorschläge zur Nachbehandlung vom VSS-Bericht 665 überprüft werden.

Hierzu wurden Bauwerke ausgewählt, die idealerweise folgenden Anforderungen genügen:

- Im Bauwerk wurde Tiefbaubeton gemäss SN EN 206 eingesetzt (Betonarten D – G)
- Mehrere Ergebnisse vom Konformitätsnachweis des Betons und nicht der Betonfamilie des Betonwerks stehen zur Verfügung
- Ergebnisse von Prüfungen (z.B. TT-1) durch Unternehmer/Bauherr liegen vor.
- Geometrisch ähnliche Bauteile wurden in mehreren Betonieretappen erstellt, die mit der gleichen Betonrezeptur, jedoch zu verschiedenen Jahreszeiten (Umgebungsbedingungen) ausgeführt wurden.
- Die Nachbehandlung war normkonform.
- Die Entnahme von jeweils mehreren Bohrkernen aus idealerweise 4 verschiedenen Betonieretappen ist im Alter von < 28 Tagen (TT-2) als auch im höheren Alter (ca. 1 Jahr) möglich (TT-3).
- Zusätzlich wurde die Bohrkerndruckfestigkeit bei den untersuchten Etappen bestimmt, um den Beton zu charakterisieren und die Aussagekraft dieser Betoneigenschaft für Dauerhaftigkeitsbetrachtungen zu überprüfen.
- Begleitend wurden noch zerstörungsfreie Prüfungen durchgeführt. Dabei handelte es sich um die Luftpermeabilität nach SIA 262/1 und die Prellhärte (und daraus abgeleitete Druckfestigkeit) nach SN EN 12504-1.

Die in Tabelle 7 aufgeführten Bauwerke wurden im Rahmen dieses Projektes untersucht. Für jedes Bauwerk wurde eine Abkürzung mit zwei Buchstaben gewählt (z.B. Ha). Im Anhang sind weitere Informationen zu den untersuchten Bauwerken und Bauteilen enthalten. Zusätzlich ist in der Tabelle angegeben, ob die TFB AG oder ein Drittlabor die Prüfungen durchführte. Die Untersuchungen erfolgten bis auf die untersuchten Decken (Ep, Gr) an vertikalen Flächen.

Die Untersuchungen wurden zumeist an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 50 mm (Druckfestigkeit, Chloridmigrationskoeffizient, Karbonatisierungswiderstand) und 100 mm (Frosttausalz-widerstand) durchgeführt. Beim Bauwerk Ma erfolgten alle Untersuchungen

an Bohrkernen mit 100 mm, beim Bauwerk Ep wurden auch wenige Druckfestigkeitsbestimmungen zusätzlich an Bohrkernen mit 100 mm vorgenommen. Die Bohrkern wurden bei der Prüfungsart TT-2 im Betonalter von 2 - 3 Wochen gezogen, damit die Prüfungen nach den notwendigen Vorbereitungen im Betonalter von 28 Tagen starten konnten.

Der Chloridmigrationskoeffizient wurde im Gegensatz zur SIA 262/1 immer mit Randbeton bestimmt<sup>2</sup>, da dieser Betonbereich besonders von der Nachbehandlung beeinflusst wird.

Bei der Prüfungsart TT-3 erfolgten die Bohrkernentnahmen aus den gleichen Bauteilen wie bei der Prüfungsart TT-2, jedoch war dann der Beton bereits mehrere Monate alt. Nur bei den Bauwerken Ep und Ma war die Prüfungsart TT-3 möglich.

**Tabelle 7: Untersuchte Bauwerke und Prüfungsdurchführungen**

Bauwerk	Bauteil	Zement, Zusatzstoff Typ II	Druckfestigkeits-, sitionsklasse	Expo-Prüfung ... durch ...	
				Frischbeton	Festbeton
Ha	Brüstungen	CEM II/B-M (T-LL)	C30/37 XC4, XD3, XF4	Drittlabor	Würfel: Drittlabor
	Widerlagerwand		C30/37 XC4, XD3, XF4		
Gn	Brüstungen	CEM II/B-M (T-LL)	C30/37 XC4, XD3, XF2	TFB AG	Würfel, Bohrkerne: TFB AG
	Widerlagerwand		C30/37 XC4, XD3, XF2		
Ep	Wände	CEM II/B-M (T-LL)	C30/37 XC4, XD3, XF2	TFB AG	Würfel, Prismen, Bohrkerne: TFB AG
	Decken		C30/37 XC4, XD3, XF2		
Ma	Stützmauer	CEM II/B-M (S-T)	C25/30 XC4, XF2	Drittlabor	Druckfestigkeit Würfel, Bohrkerne: Drittlabor  Dauerhaftigkeitsprüfungen: TFB AG
Gr	Wände	CEM II/A-LL, 40 kg Flugasche	C25/30 XC4, XD1, XF4	TFB AG	Würfel, Bohrkerne: TFB AG
	Decken		C30/37 XC4, XD3, XF4		
Po	Brückenkappe	CEM I, 50 kg Flug- asche	C30/37 XC4, XD3, XF4	Drittlabor	Würfel: Drittlabor  Bohrkerne: TFB AG

<sup>2</sup> Im Gegensatz zur SIA 262/1 wurde die Prüfung ohne Abschneiden der äussersten 5 – 10 mm Beton vorgenommen, da sich gerade in diesem Bereich am ehesten die Umgebungsbedingungen und Nachbehandlung auswirken. Gemäss Jacobs et al. [18] ist bei guter Nachbehandlung der Unterschied zwischen der Prüfung mit und ohne Abschneiden des Randbetons gering.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Vorbemerkung

Die Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen von den verschiedenen Bauwerken werden nachfolgend dargestellt. Zuerst werden die Ergebnisse vom Konformitätsnachweis mit denen von den Baustellenprüfungen verglichen. Anschliessend werden in den Abschnitten 3.3 bis 3.7 die Ergebnisse der Baustellenprüfungen (separat hergestellte Prüfkörper, Bohrkern) ausgewertet. Um Hinweise auf mögliche Unterschiede in der Betonzusammensetzung zu erhalten, werden zuerst die Rohdichten betrachtet bevor auf die Druckfestigkeit und die Dauerhaftigkeitseigenschaften eingegangen wird.

Nachfolgend wird teilweise vom Chlorid- und Frosttausalz widerstand gesprochen. Der in der Prüfung nach SIA 262/1 ermittelte Chloridmigrationskoeffizient bzw. die Abwitterungsmenge bei der Frosttausalzprüfung sind der Kehrwert des Chlorid- bzw. Frosttausalz widerstands.

Die Prüfungen der Bohrkerndruckfestigkeit und des Chloridmigrationskoeffizienten erfolgten beim Bauwerk Ma an jeweils drei Bohrkernen mit 100 mm Durchmesser. Bei den anderen Bauwerken wurden für diese Prüfungen jeweils drei (Druckfestigkeit) bzw. fünf (Chloridmigration) Bohrkern mit einem Durchmesser von 50 mm verwendet. Die möglichen Konsequenzen unterschiedlicher Bohrkern Durchmesser werden am Ende des Abschnitts 3.4 diskutiert.

### 3.2 Betonqualität vom Konformitätsnachweis und Kontrollplan

Bei allen Bauwerken wurde Beton von Transportbetonwerken geliefert, die die Betoneigenschaften mit dem Betonfamilienkonzept nachweisen. Deshalb liegen jeweils nur wenige Ergebnisse zu den Betonzusammensetzungen vor, die im Rahmen dieses Projektes untersucht wurden. Beim Bauwerk

- Ha stimmte die Betonqualität gemäss Konformitätsnachweis mit derjenigen der separat hergestellten Prüfkörper bei der Bauwerkserstellung überein. D.h. der Frosttausalz widerstand war hoch (XF4), die Anforderungen an den Chloridwiderstand (XD3) wurden nicht immer erfüllt und die 28 Tage Druckfestigkeit lag bei etwa 50 N/mm<sup>2</sup>.
- Gn stimmte die Betonqualität gemäss Konformitätsnachweis mit derjenigen der separat hergestellten Prüfkörper bei der Bauwerkserstellung überein. D.h. der Frosttausalz widerstand war fast immer hoch (XF4) und erfüllte die bei diesem Bauvorhaben gestellte Anforderung XF2. Die Anforderungen an den Chloridwiderstand (XD3) wurden immer eingehalten und die 28 Tage Druckfestigkeit lag bei etwa 60 N/mm<sup>2</sup>.
- Gr war die Betonqualität gemäss Konformitätsnachweis teilweise besser als diejenige der separat hergestellten Prüfkörper bei der Bauwerkserstellung. D.h. der Frosttausalz widerstand war beim Beton für die Wände und Decken im Gegensatz zum Konformitätsnachweis nicht immer hoch (XF4). Der Chloridwiderstand (XD3) wurde beim Beton für die Wände nicht immer erreicht, jedoch die bei diesem Bauvorhaben gestellte Anforderung XD1 erfüllt und die 28 Tage Druckfestigkeit lag bei etwa 50 - 60 N/mm<sup>2</sup>.
- Ma stimmte die Betonqualität gemäss Konformitätsnachweis mit derjenigen der separat hergestellten Prüfkörper bei der Bauwerkserstellung überein. D.h. der Frosttausalz widerstand war hoch (XF4), die Anforderungen an den Chloridwiderstand (XD3) wurden erfüllt und die 28 Tage Druckfestigkeit lag bei etwa 40 - 50 N/mm<sup>2</sup>.
- Ep stimmte die Betonqualität gemäss Konformitätsnachweis mit derjenigen der separat hergestellten Prüfkörper bei der Bauwerkserstellung nicht immer überein. D.h. der Frosttausalz widerstand war im Gegensatz zum Konformitätsnachweis nicht immer hoch (XF4), jedoch wurde die bei diesem Bauvorhaben gestellte Anforderung XF2 erfüllt. Die Anforderungen an den Chloridwiderstand (XD3) wurden erfüllt und die 28 Tage Druckfestigkeit lag bei etwa 50 - 60 N/mm<sup>2</sup>.

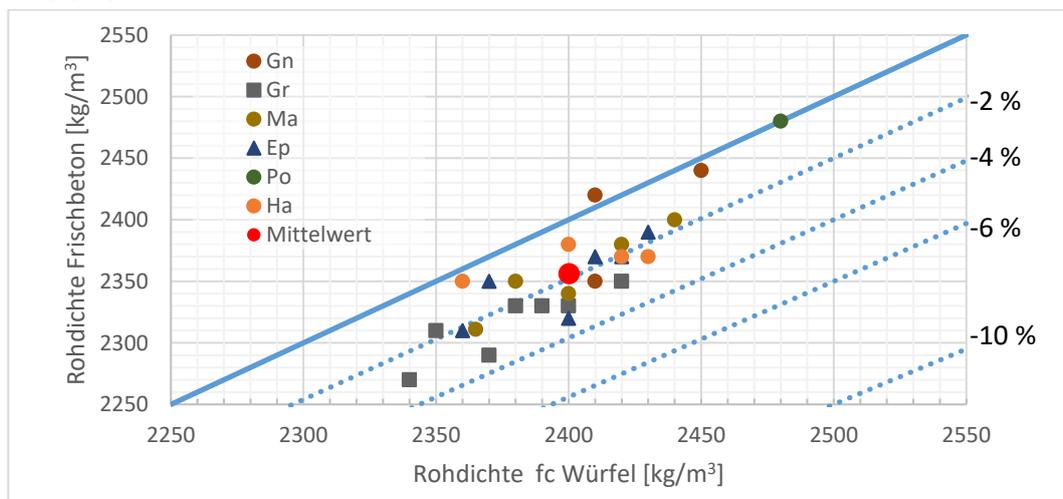
- Po liegen nur wenige Daten vom Konformitätsnachweis vor. Der Beton für dieses Bauwerk wurde im Gegensatz zu den o.g. Bauwerken ohne Luftporenbildner hergestellt und war deshalb für dieses Projekt von Interesse. Es konnte jedoch nur eine Etappe untersucht werden. Dabei zeigte sich, dass der Chlorid- (XD3) und der Frosttausalzstand (XF4) sehr ähnlich im Vergleich zum Konformitätsnachweis war und die 28 Tage Druckfestigkeit bei etwa 60 N/mm<sup>2</sup> lag.

Insgesamt zeigte sich somit, dass die Ergebnisse der Betonprüfungen bei den hier betrachteten Baustellen zumeist mit denjenigen vom Konformitätsnachweis vergleichbar sind. Unterschiede ergaben sich vor allem dort, wo die bestellte Betonqualität geringer als diejenigen vom Konformitätsnachweis war.

### 3.3 Rohdichte

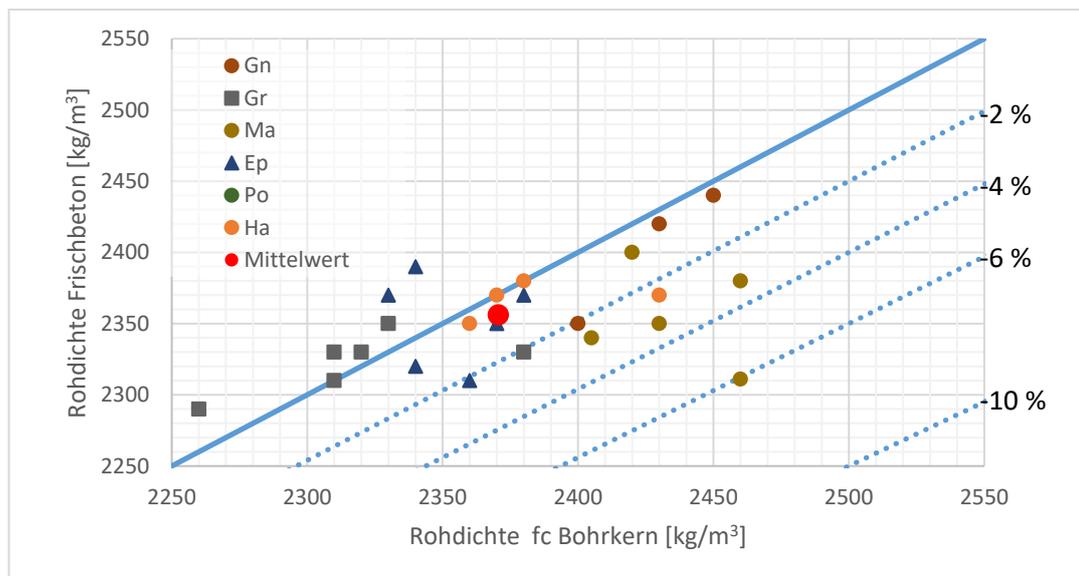
Zwischen der am Frischbeton bestimmten Rohdichte (im Luftporentopf) und der am Würfel nach vierwöchiger Wasserlagerung bestimmten Rohdichte zeigten sich systematische Unterschiede in der Form, dass die am Würfel bestimmte Rohdichte im Mittel um 2 % bzw. 50 kg/m<sup>3</sup> höher war (Abbildung 8). Im Maximum wurde ein Unterschied von fast 100 kg/m<sup>3</sup> (4 %) und im Minimum kein Unterschied ermittelt. Zwischen den einzelnen Bauwerken zeigten sich keine klaren Unterschiede. Als Ursachen für diese systematischen Unterschiede zwischen der Frischbetonprobe mit nicht hydratisiertem Zement und der Festbetonprobe mit weitgehend hydratisiertem Zement wurden gesehen:

- Volumenreduktion des Zementsteins bei der Hydratation (als chemisches Schwinden, Schrumpfen bezeichnet);
  - bei einem Beton mit einem Zementgehalt von 320 kg/m<sup>3</sup> werden ca. 19 l/m<sup>3</sup> (ca. 0.06 cm<sup>3</sup>/g Portlandzement) Poren gebildet, die bestrebt sind, Wasser aus der Umgebung (Wasserbad) aufzunehmen.
  - Dieser Effekt bedingt im Alter von 28 Tagen und je nach Zementart somit eine Rohdichteerhöhung um ca. 0.5 bis maximal 1 %.
- Luftporentöpfe sollen gemäss SN EN 12350-6 und SN EN 12350-7 nicht mit Frischbeton überfüllt werden; beim Füllen von Würfelschalungen findet dies aber zumeist mehr oder weniger stark statt; infolge einer Frischbetonentmischung durch das Verdichten und überfließenden Feinmörtel wird der in der Schalung verbleibende Beton tendenziell an Zementleim abgereichert und somit eine höhere Rohdichte aufweisen.
- Beton in Luftporentöpfen wird tendenziell weniger als der in der Würfelschalung verdichtet.



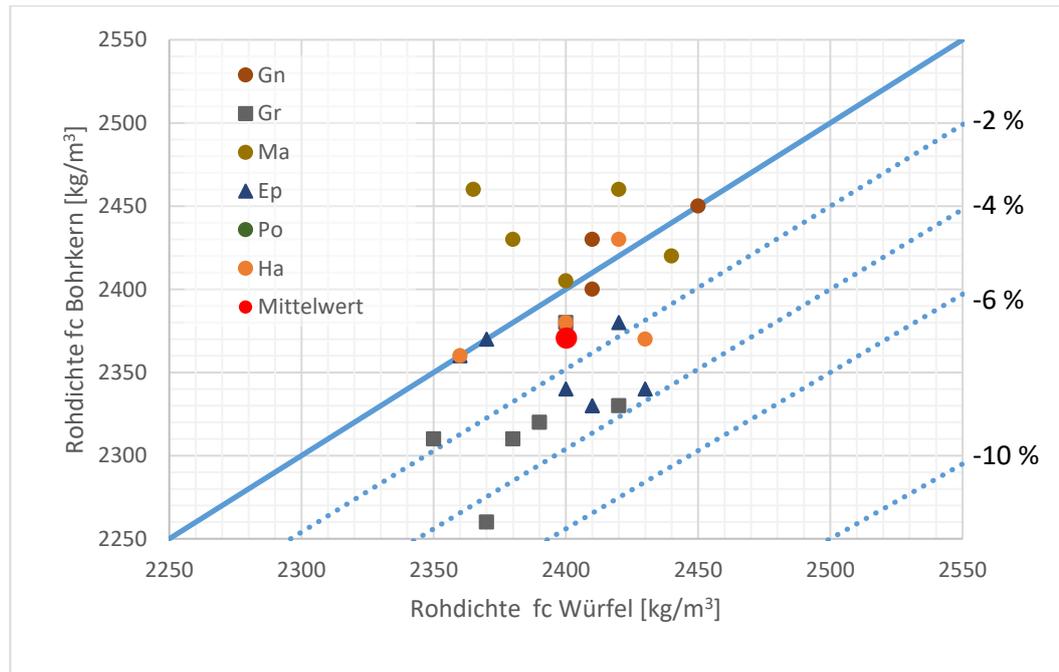
**Abbildung 8: Rohdichte der separat hergestellten Würfel für die Druckfestigkeitsprüfung (fc) und Rohdichte des Frischbetons**

Wird die im Luftporentopf bestimmte Frischbetonrohddichte mit der des Kernbetons (ca. 50 – 100 mm unter Betonoberfläche) im Bauteil verglichen, zeigen sich im Einzelfall grössere (+2 bis -6 %) und beim Mittelwert aller Prüfungen geringe Unterschiede (Abbildung 9). Zudem zeigen sich bauwerksspezifische Einflüsse. Beim Bauwerk Ma weist der Kernbeton die grössten Rohddichteunterschiede zum Frischbeton auf. Hier weist der Kernbeton zumeist eine deutlich höhere Rohddichte als der Frischbeton im Luftporentopf auf, d.h. ist im Bauteil besser verdichtet. Bei den anderen Bauwerken ist die am Frisch- und Kernbeton bestimmte Rohddichte ähnlich. Insgesamt kann daraus geschlossen werden, dass der Kernbeton im Bauteil generell ähnlich bis etwas besser als der Frischbeton im Luftporentopf verdichtet wird.



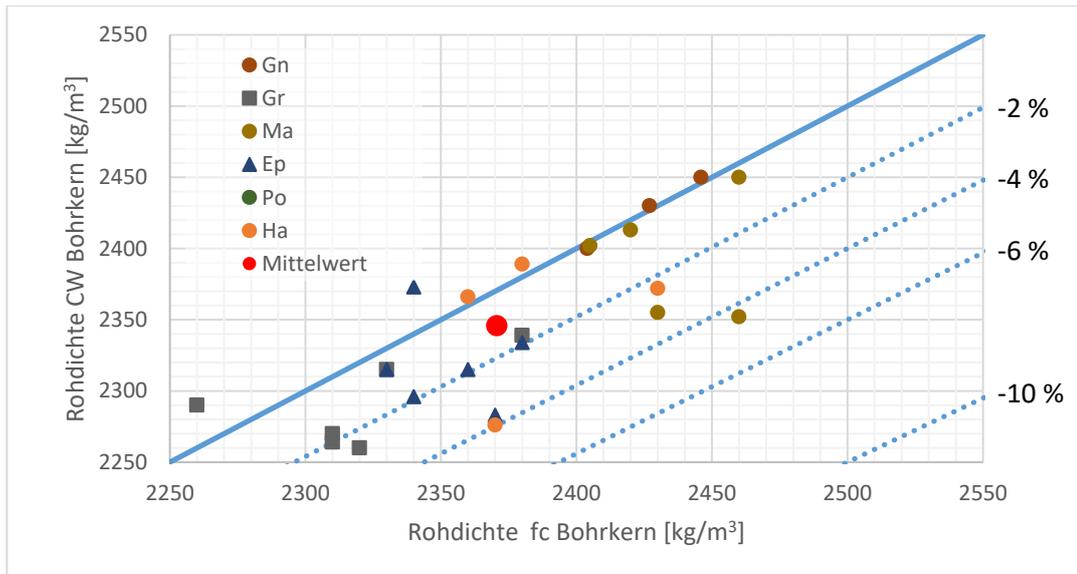
**Abbildung 9: Rohdichte des hinteren Bohrkernabschnitts (Abstand von Betonoberfläche zumeist 50 – 100 mm, Prüfung Druckfestigkeit  $f_c$ ) und Frischbetonrohddichte**

Vergleicht man die Rohdichte des Kernbetons im Bauteil mit der des separat hergestellten Würfels, zeigten sich Unterschiede von im Mittel von etwas über 1 % und im Einzelfall von bis zu ca. 4 % (Abbildung 10). Auch hier fällt das Bauwerk Ma wieder auf. Bei diesem Bauwerk war die am Kernbeton im Bauteil bestimmte Rohddichte höher als im separat hergestellten Würfel; d.h. der Beton im Würfel war weniger gut als der Beton im Bauteil verdichtet. Bei den anderen Bauwerken waren die Würfel ähnlich bis besser als der Kernbeton im Bauteil verdichtet.



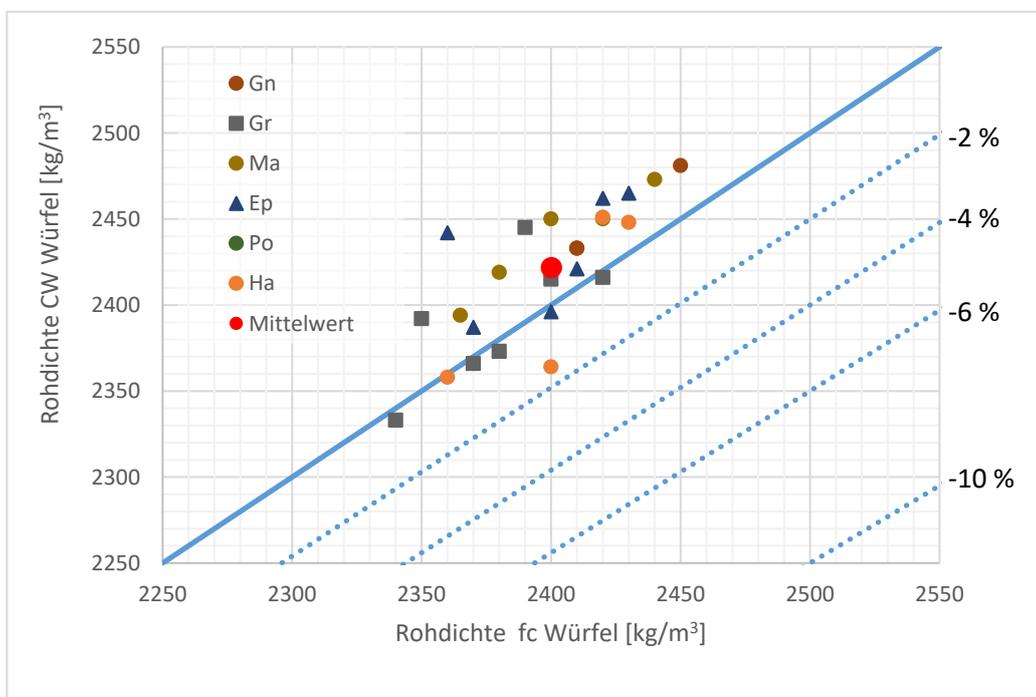
**Abbildung 10: Rohdichte der separat hergestellten Würfel für die Druckfestigkeit ( $f_c$ ) und Rohdichte des hinteren Bohrkernabschnitts (Abstand von Betonoberfläche zu meist 50 – 100 mm, Prüfung Druckfestigkeit  $f_c$ )**

Um zu überprüfen, ob die Betonzusammensetzung im Bauteil mit dem Abstand von der geschalteten Betonoberfläche variiert, sind in Abbildung 11 die am Bohrkern bestimmten Rohdichten des Kernbetons denen des oberflächennahen Betons gegenübergestellt. D.h. ein vorderer (0 – 50 mm oder 0 – 100 mm) wird mit einem hinteren Bohrkernabschnitt (55 – 105 mm oder 105 – 205 mm) verglichen. Im Mittel ist die Rohdichte des hinteren Bohrkernabschnitts ca. 1 % höher als die des vorderen Abschnitts. Hier fällt das Bauwerk Gn auf, bei dem beide Rohdichten bei allen drei Etappen identisch sind. Die Rohdichteunterschiede können verschiedene Gründe haben: Unterschiede in der Zusammensetzung, der Verdichtung des Rand- und Kernbetons und des Hydratationsgrades (unterschiedliche Trocknung). Massgeblich wird vor allem die Zusammensetzung des Betons sein: Im oberflächennahen Beton ist aus geometrischen Gründen der Gehalt an Gesteinskörnung geringer und an Zementstein höher als im Kernbeton. Dieser Effekt geht bis zu einem Oberflächenabstand, der in etwa maximal dem Grösstkorndurchmesser entspricht. Nimmt man die Rohdichteangaben von Jacobs (1994 [15]) für Zementstein, wäre bei den hier untersuchten Tiefbaubetonen eine Rohdichte des Zementsteins mit einem  $w/z$  von 0.45 von etwa  $2000 \text{ kg/m}^3$  zu erwarten. Der mittlere Rohdichteunterschied von  $25 \text{ kg/m}^3$  zwischen dem Kern- und Randbeton würde einer Erhöhung des Zementsteingehaltes in den äussersten 50 mm des Betons um ca.  $50 \text{ l/m}^3$  entsprechen, was plausibel für den geometrischen Effekt ist. Beim Bauwerk Gn wurde der geometrische Effekt wohl vor allem von der besseren Verdichtung des Randbetons kompensiert. Bei den anderen Bauwerken wurde demgegenüber teilweise der geometrische Effekt durch die bessere Verdichtung des Kernbetons verstärkt. Eventuell fand auch eine stärkere Entmischung (Anreicherung an Zementleim) des Randbetons statt.



**Abbildung 11: Rohdichte des hinteren Abschnitts der Bohrkern (Abstand von Betonoberfläche zumeist mindestens 50 mm, Prüfung Druckfestigkeit  $f_c$ ) und Rohdichte des vorderen Abschnitts der Bohrkern (Abstand von Betonoberfläche zumeist 0 bis 50 mm, Prüfung Chloridwiderstand CW)**

Auch an den separat hergestellten Würfeln zeigen sich Rohdichteunterschiede zwischen dem Randbeton im Würfel und dem gesamten Würfel (Abbildung 12). Im Mittel ist die Rohdichte des Randbetons 1 % höher als die des gesamten Würfels. Aus den o.g. geometrischen Gründen wäre es umgekehrt zu erwarten. Als massgeblicher Effekt wäre eine Entmischung des Betons im Würfel denkbar: Da die Bohrkern nicht aus dem obersten Bereich des Würfels gezogen werden, im dem evtl. eine Zementsteinanreicherung infolge Entmischung vorhanden ist, könnten die Bohrkern eine höhere Rohdichte aufweisen.

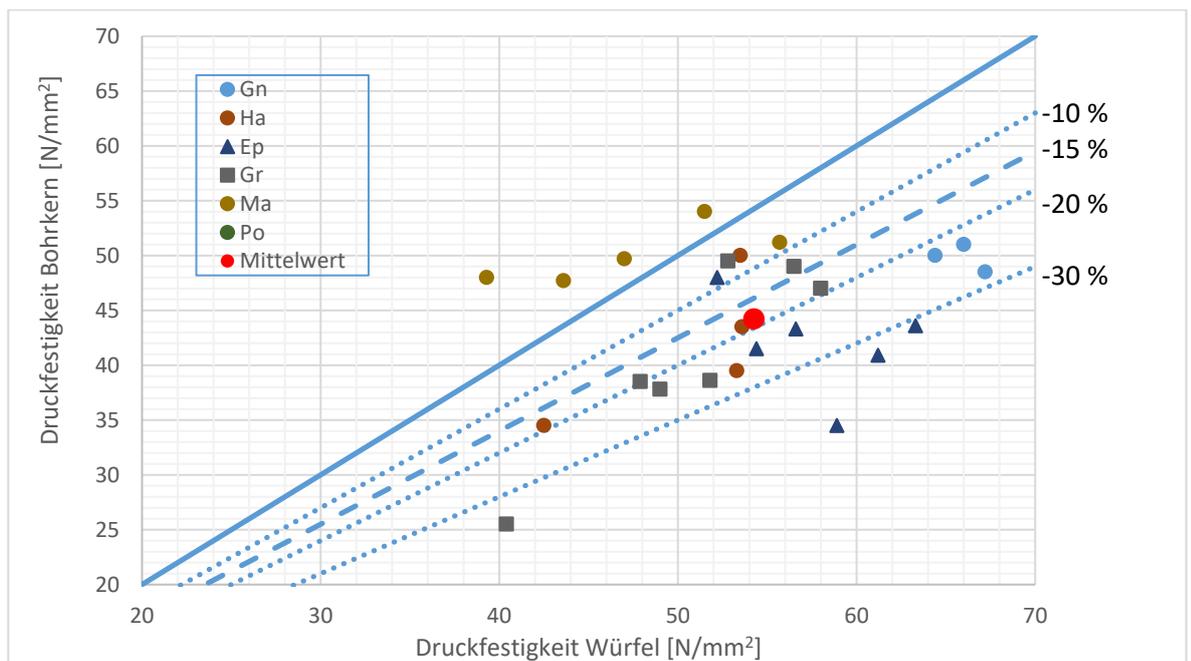


**Abbildung 12: Rohdichte des Würfels für die Druckfestigkeit ( $f_c$ ) und Rohdichte des vorderen Abschnitts der Bohrkern aus dem Würfel (Abstand von Betonoberfläche zumeist 0 bis 50 mm, Prüfung Chloridwiderstand CW)**

### 3.4 Druckfestigkeit

In Abbildung 13 ist die an Bohrkernen aus dem Bauteil bestimmte Druckfestigkeit der am Würfel bestimmten gegenübergestellt. Im Mittel ist die Bohrkerndruckfestigkeit ca. 20 % niedriger als die am Würfel bestimmte Druckfestigkeit. Gemäss SN EN 13791 sind die Unterschiede noch grösser, wenn die unterschiedliche Betonfeuchte berücksichtigt würde. Wassergesättigte Prüfkörper (hier Würfel) weisen eine im Mittel etwa 10 % niedrigere Druckfestigkeiten als «lufttrockene» Prüfkörper (hier Bohrkern) auf. Das Bauwerk Ma fällt dadurch auf, dass nur hier die am Bohrkern bestimmte Druckfestigkeit ähnlich bis höher als die am Würfel bestimmte ist. Die Bohrkern beim Bauwerk Ma wiesen, im Gegensatz zu den anderen Bauwerken, einen Durchmesser von 100 mm auf und wurden im unteren Bereich der Stützmauer gezogen. Durch die Auflast des darüber liegenden Betons wurde anscheinend dieser Bereich verstärkt verdichtet. Zudem wurden beim Bauwerk Ma die Würfel nicht wie bei den anderen Bauwerken unter Wasser sondern an Luft bei 20 °C und > 50 % r.F. gelagert. Dadurch ist die Würfeldruckfestigkeit tendenziell etwas höher als bei Wasserlagerung. Das Bauwerk Ep fällt dadurch auf, dass hier die am Bohrkern bestimmte Druckfestigkeit am stärksten von der am Würfel bestimmten abweicht.

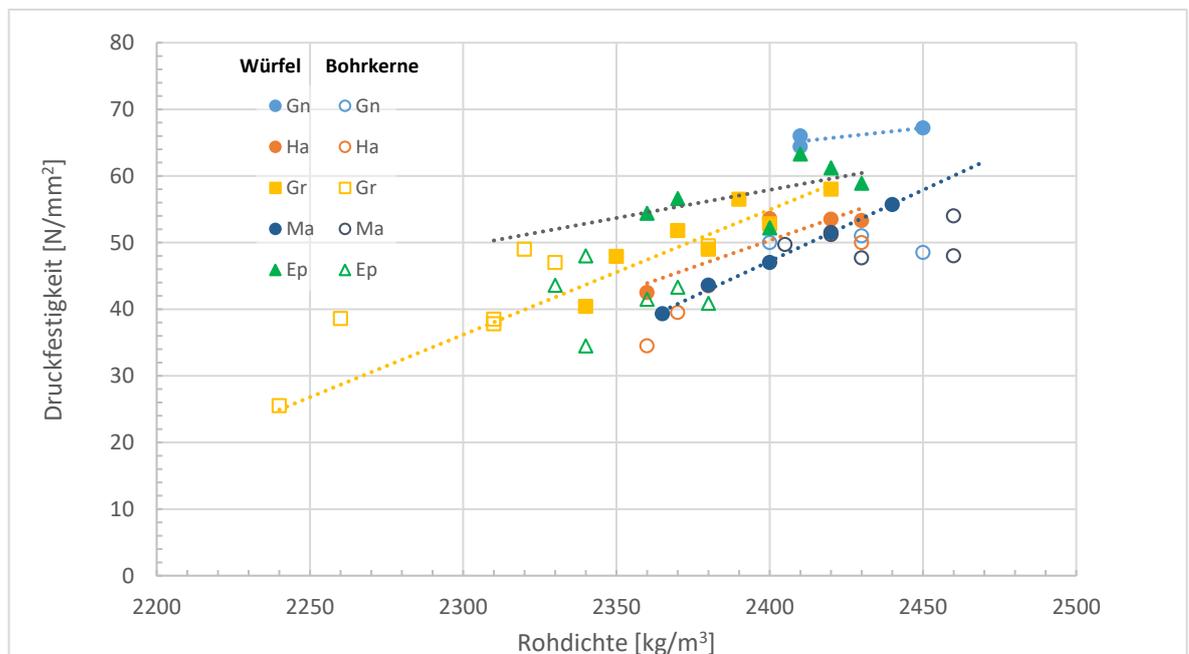
In Abbildung 13 könnte der tendenzielle Eindruck gewonnen werden, dass der Unterschied zwischen der am Würfel und am Bohrkern bestimmten Druckfestigkeit umso grösser wird, desto höher die Druckfestigkeit ist. Nicht publizierte Untersuchungen aus anderen Bauwerken, auch mit Druckfestigkeiten von über 100 N/mm<sup>2</sup>, zeigen jedoch keine Belege für diesen tendenziellen Eindruck. D.h. der hier vorhandene tendenzielle Eindruck beruht wahrscheinlich auf der geringen Datenmenge.



**Abbildung 13: Gemittelte 28 Tage Druckfestigkeit, bestimmt an jeweils mindestens drei Bohrkernen aus dem Bauteil und Würfeln**

Um zu überprüfen, ob Rohdichteunterschiede die Druckfestigkeitsunterschiede erklären können, sind in Abbildung 14 die Druckfestigkeiten gegenüber den Rohdichten aufgetragen. Es zeigt sich ein relativ klarer Trend in der Form, dass sowohl am Würfel als auch am Bohrkern zumeist niedrigere Druckfestigkeiten mit niedrigeren Rohdichten einhergehen, auch wenn dies bei den Bohrkernen aus den Bauwerken Ep, Ma und Gn weniger deutlich ist. Die Steigungen der Trendlinien (lineare Regression der am Würfel bestimmten Druckfestigkeiten) pro Bauwerk sind ähnlich. Nimmt man die Trendlinie Gr wird die Druckfestigkeit von ca. 60 auf ca. 25 N/mm<sup>2</sup> bei einer Rohdichteabnahme um ca. 180 kg/m<sup>3</sup> reduziert. Eine Rohdichteabnahme von 180 kg/m<sup>3</sup> entspricht einer Luftgehaltserhöhung um ca. 7

Vol.%. Eine Luftgehaltserhöhung um 7 Vol.-% ergibt gemäss SN EN 13791 eine Druckfestigkeitsreduktion von ca. 60 auf ca. 35 N/mm<sup>2</sup>. D.h. damit kann ein Grossteil dieser Festigkeitsreduktion beim Bauwerk Gr, jedoch nicht der vollständige, erklärt werden. In der SN EN 13791 ist der mittlere Zusammenhang zwischen einer Luftgehalts- und Druckfestigkeitsänderung enthalten. In der Praxis zeigen sich davon Abweichungen nach beiden Seiten. Bei zwei Bauwerken (Gn, Ep) verlaufen die Trendlinien flacher und die mit den Würfelergebnissen aufgestellten Trendlinien treffen dort auch wenig gut für die Bohrkernergebnisse zu. Zudem führt ein und dieselbe Rohdichte im Bauwerk zu einer tendenziell niedrigeren Festigkeit als im Würfel. Dies deutet insgesamt auf weitere massgebliche Einflüsse bei den Bohrkernfestigkeiten hin.



**Abbildung 14: Druckfestigkeit bestimmt an Bohrkernen aus dem Bauteil und Würfeln sowie Rohdichte der jeweiligen Prüfkörper; für die Würfelergebnisse sind Trendlinien eingetragen.**

Als Gründe für Druckfestigkeitsabweichungen zwischen Bohrkernen und Würfeln kommen Unterschiede in der Verdichtung des Betons, in der Hydratation und auch die Bohrkernergebnisse selber in Frage.

- Würde der Festigkeitsunterschied alleine durch die Verdichtung bedingt sein, würde dies z.B. bei einem Druckfestigkeitsunterschied von ca. 10 N/mm<sup>2</sup> (Mittelwert) auf eine Luftgehaltserhöhung von mehreren Prozent hinweisen. Tatsächlich wurden aber Rohdichteunterschiede von im Mittel nur ca. 1 % zwischen den Würfeln und Bohrkernen bestimmt (Abbildung 10), was auf Luftgehaltsunterschiede von nur ca. 1 % hinweist. Somit ist es unwahrscheinlich, dass dies generell die massgebliche Ursache ist. Auch weisen die verschiedenen Steigungen der Trendlinien (Abbildung 14) auf weitere Einflüsse hin. Im Einzelfall können aber durchaus Rohdichteunterschiede massgeblich sein: Beim Bauwerk Ep zeigen sich Druckfestigkeitsunterschiede von ca. 10 bis über 20 N/mm<sup>2</sup>. Die Rohdichteunterschiede (Abbildung 10) weisen auf eine Luftgehaltserhöhung von ca. 2 – 4 % hin, d.h. könnten diese Druckfestigkeitsunterschiede bedingen.
- Als Ursache für die Druckfestigkeitsunterschiede kommen Unterschiede im Hydratationsgrad weniger in Betracht, da bei sommerlichen Bedingungen (die teilweise bestanden) eine ähnliche Hydratationsgeschwindigkeit wie bei 20 °C im Labor zu erwarten ist. Zudem ist bei dem vorhandenen Prüfalter (28 Tage) und den vorhandenen Umweltbedingungen kein so grosser Hydratationsgradunterschied zu erwarten, mit dem alleine oder massgeblich die Druckfestigkeitsunterschiede erklärbar wären.
- Als dritte Ursache für die Druckfestigkeitsunterschiede kommen grundsätzlich auch Einflüsse (Schädigungen) des Bohrkerns beim Bohren/Brechen/Sägen in Frage. Bis auf

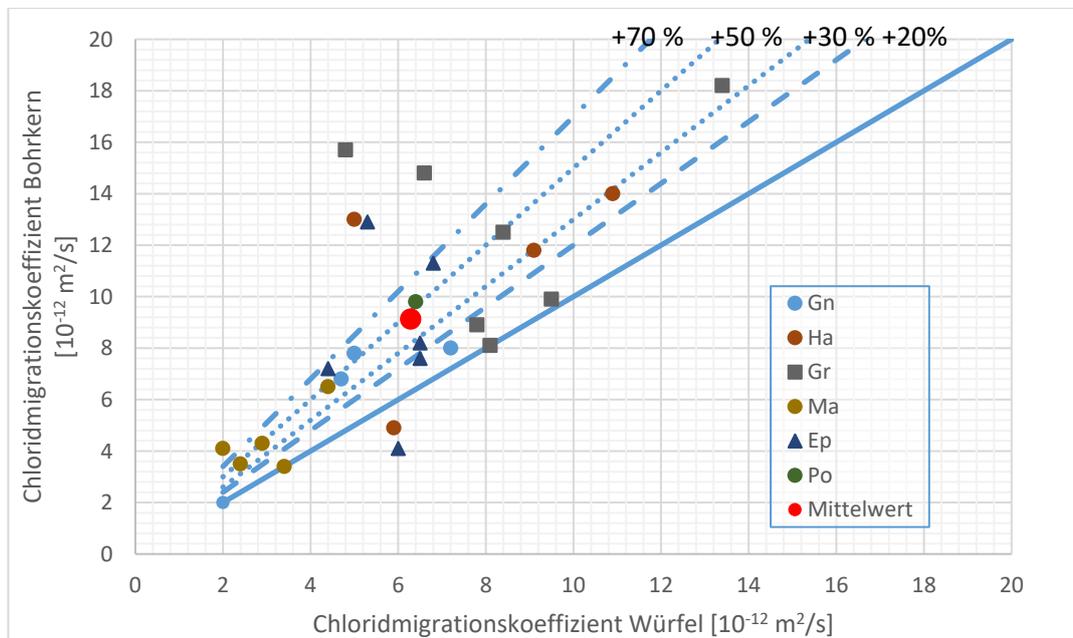
das Bauwerk Ma, bei dem Bohrkerne mit 100 mm Durchmesser und Länge geprüft wurden, wurden sonst immer 50 mm Bohrkerne geprüft. Um dies weiter zu überprüfen, wurden beim Bauwerk Ep (siehe Anhang) bei zwei Etappen sowohl 50 mm als auch 100 mm Bohrkerne gezogen. Bei einer Etappe war die am 100 mm Bohrkern bestimmte Druckfestigkeit im Mittel 11 % höher und bei der anderen Etappe 5 % höher als die am 50 mm Bohrkern bestimmte. Es liegen zu wenige Ergebnisse vor, um eine gesicherte Aussage dazu zu machen, ob Bohrkerne mit 50 mm Durchmesser bei der Probenvorbereitung geschädigt werden (können).

- Turkel & Ozkul [36] fanden bei Würfeln bzw. Bohrkernen von 100 mm Kantenlänge bzw. Durchmesser die höchste und bei kleineren (50 mm) und grösseren (150 mm, 200 mm) Prüfkörpern 10 % und mehr geringere Druckfestigkeiten. Die Abnahme der Druckfestigkeit mit zunehmender Prüfkörpergröße ist ein bekanntes physikalisches Phänomen. Die tiefere Festigkeit der 50 mm-Prüfkörper könnte deshalb mit Schädigungen bei der Prüfkörpervorbereitung erklärt werden.

Als Fazit ist zu ziehen, dass die Druckfestigkeitsunterschiede (Bohrkern zu Würfel) im Mittel 20 % betragen und somit grösser sind als es aufgrund der SN EN 13670 zu erwarten ist (15 %). Als Ursache für die Unterschiede sind neben Verdichtungsunterschieden auch Einflüsse der Umgebungsbedingungen sowie der Bohrkernentnahme und -vorbereitung denkbar.

### 3.5 Chloridwiderstand

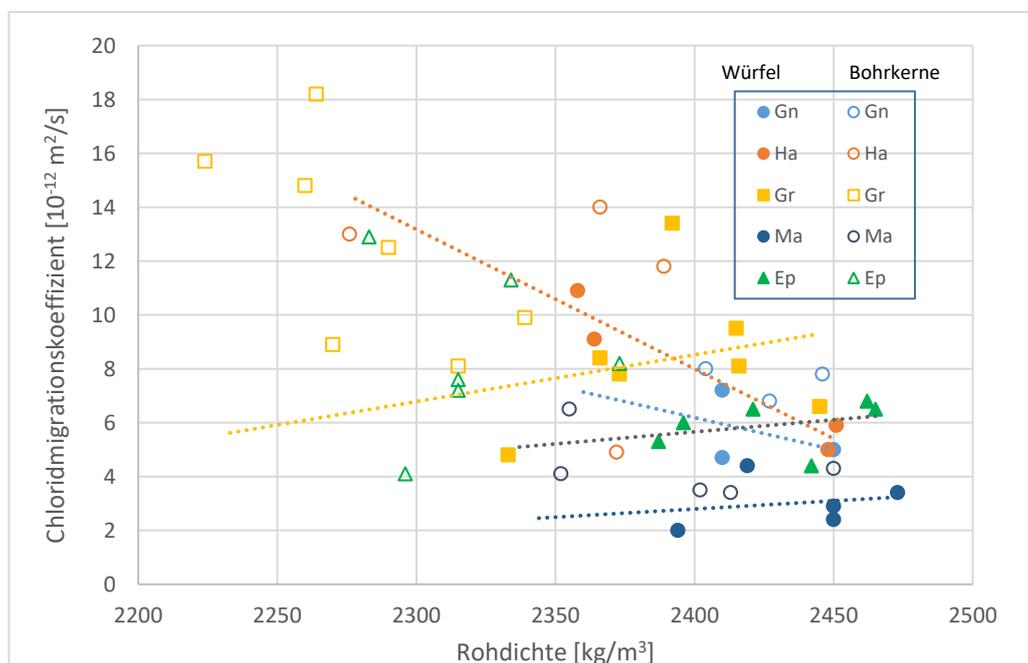
Der am Bohrkern aus dem Bauteil bestimmte Chloridmigrationskoeffizient (Kehrwert des Chloridwiderstandes) war im Mittel ca. 50 % höher als der an Bohrkernen (50 mm Durchmesser) aus Würfeln bestimmte (Abbildung 15). D.h. der Chloridwiderstand des Bauteils ist niedriger als der beim Würfel. Kein Bauwerk fällt durch einen deutlich anderen Zusammenhang zwischen Bohrkernen und Würfel auf. Nur das Bauwerk Ma weist generell die niedrigsten Chloridmigrationskoeffizienten auf. Dies wird vor allem durch den verwendeten Zement (CEM II/B-M (S-T) bedingt, der gemahlene Hüttensand enthält. Bei den anderen Bauwerken wurde CEM II/A-LL oder CEM II/B-M (T-LL) verwendet, d.h. dem Zementklinker wurde neben Kalksteinmehl teilweise auch noch gebrannter Ölschiefer zugefügt.



**Abbildung 15: Chloridmigrationskoeffizient, bestimmt am separat hergestellten Würfel und an Bohrkernen aus dem Bauteil, jeweils mit Randbeton<sup>3</sup>**

<sup>3</sup> Siehe Fussnote 2 auf S. 26

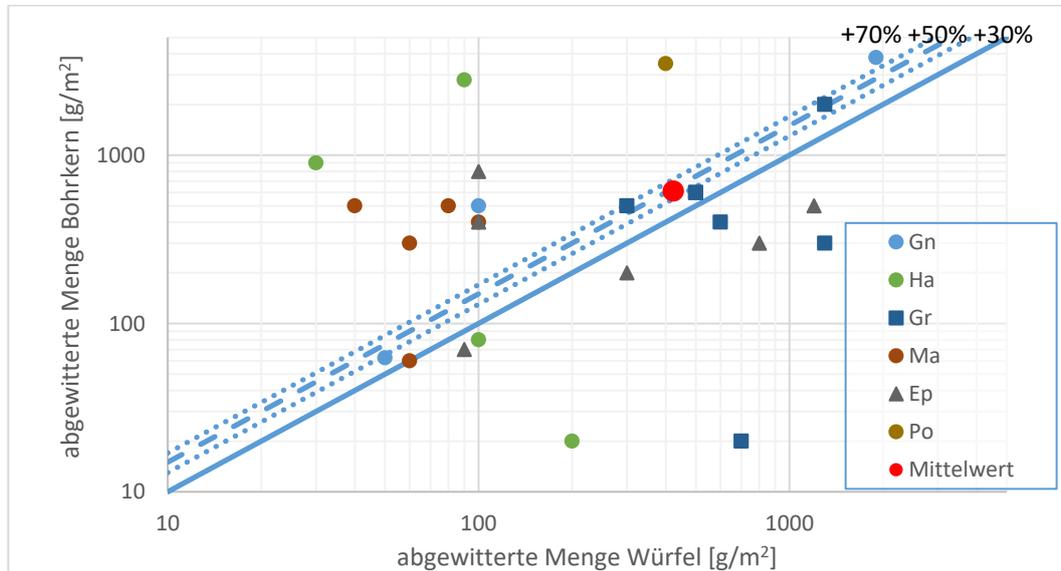
Zwischen der Rohdichte und dem Chloridmigrationskoeffizienten zeigt sich bis auf die Bauwerke Gn und Ha kein Zusammenhang (Abbildung 16). Weitere Einflüsse sind somit von Bedeutung. Theoretisch denkbar wären Unterschiede in der Betonzusammensetzung und den Umweltbedingungen zwischen den geprüften Etappen. Es liegen keine Informationen zu den genauen Betonzusammensetzungen der einzelnen Betonchargen vor, weshalb dies nicht näher überprüft werden kann. Bei den Umweltbedingungen zeigt sich kein klarer Einfluss der Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit oder dem Niederschlag. Ausgeschlossen werden kann aber dennoch nicht, dass die Nachbehandlung auch einen grossen Einfluss hat. In Jacobs et al. (2014) [18] zeigt sich je nach Zementart ein grosser Unterschied bei der Nachbehandlung zwischen Abdecken mit Folie und Unterwasserlagerung. D.h. trotz normkonformer Nachbehandlung mit Folie können sich deutlich höhere Chloridmigrationskoeffizienten im Vergleich zur nicht baustellentauglichen Wasserlagerung für Bauteile ergeben. Hinweise zu Einflüssen durch Schädigungen an den aus den Bauteilen genommenen Bohrkernen (vgl. Bohrkerndruckfestigkeit in Abschnitt 3.4) liegen ebenfalls nicht vor. Beim Bauwerk Ma wurden 100 mm grosser Bohrkern geprüft und auch hier zeigt sich kein Zusammenhang zwischen der Rohdichte und dem Chloridmigrationskoeffizienten.



**Abbildung 16: Chloridmigrationskoeffizient bestimmt an separat hergestellten Würfeln und Bohrkernen aus dem Bauteil und Rohdichte der Prüfkörper, jeweils mit Randbeton; die Trendlinien basieren auf einer linearen Regression der Ergebnisse von Prüfkörpern aus Würfeln**

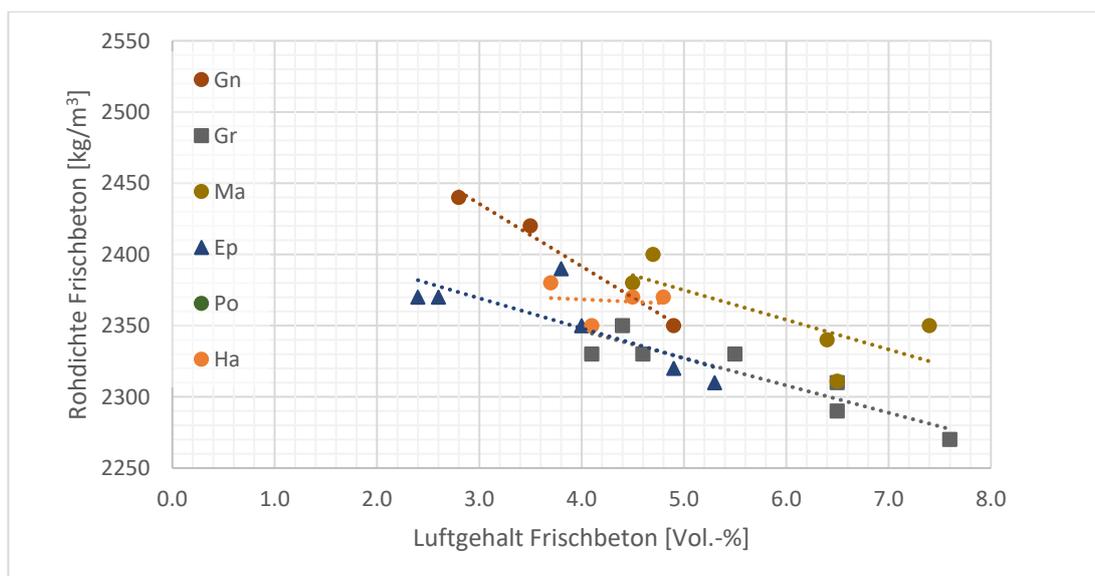
### 3.6 Frosttausalz widerstand

Der an Bohrkernen aus den Bauteilen und an Würfeln bestimmte Frosttausalz widerstand (abgewitterte Menge) streut deutlich und ist nur im Mittel ähnlich (Abbildung 17). Beim gleichen Bauwerk zeigen die Bohrkern im Einzelfall einen höheren aber auch niedrigeren Frosttausalz widerstand als die Würfel. Nur beim Bauwerk Ma wiesen die Bohrkern eine vergleichbare bis höhere Abwitterung als die Würfel auf.



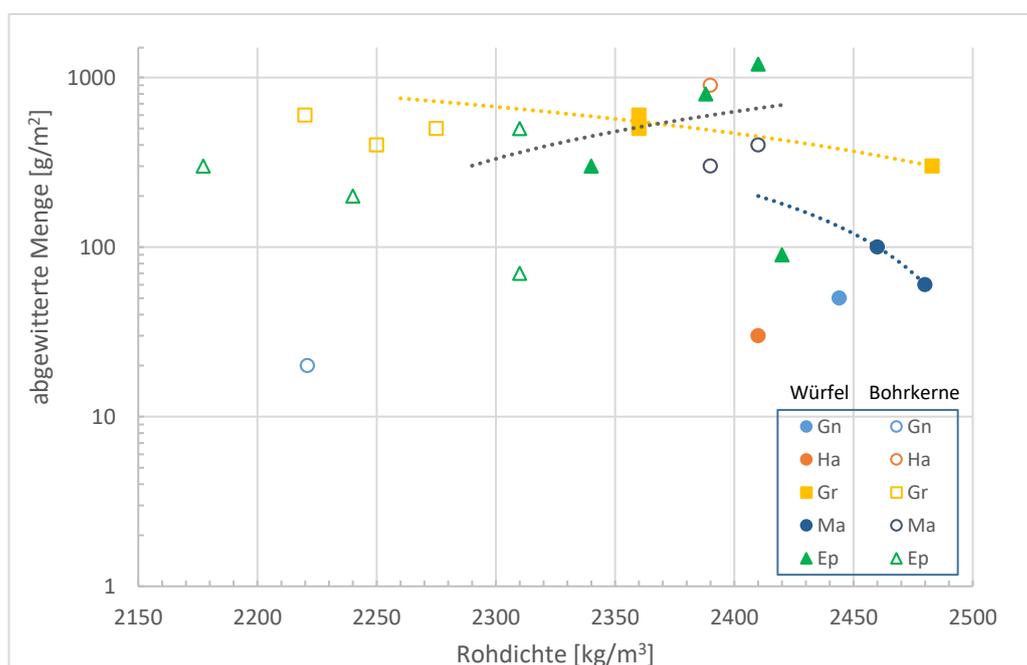
**Abbildung 17: Frosttausalz widerstand (dargestellt als abgewitterte Menge), bestimmt am separat hergestellten Würfel und an Bohrkernen aus dem Bauteil**

Zur Klärung welchen Einfluss der Luftgehalt auf den Frosttausalz widerstand hat, wird zu nächst der am Frischbeton ermittelte Zusammenhang zwischen der Rohdichte und dem Luftgehalt betrachtet (Abbildung 18). Es zeigt sich ein enger Zusammenhang. Zudem verlaufen die Trendlinien für die verschiedenen Bauwerke mit einer Ausnahme (Ha) sehr ähnlich. Der Grund für die Abweichung beim Bauwerk Ha ist nicht bekannt; evtl. liegt dies auch an den geringen Unterschieden im Luftgehalt.



**Abbildung 18: Luftgehalt und Rohdichte vom Frischbeton mit Trendlinien für eine lineare Regression**

In Abbildung 19 ist der Frosttausalz widerstand in Abhängigkeit von der Rohdichte dargestellt. Es sind nur wenige Ergebnisse in dieser Abbildung im Vergleich zur Abbildung 18 dargestellt, da zu Beginn des Projektes die Rohdichte bei den Frosttausalzprüfkörpern nicht bestimmt wurde. Zwei Trendlinien (Ma, Gr) zeigen eher eine nicht zu erwartende, zunehmende Abwitterung mit abnehmender Rohdichte (zunehmendem Luftgehalt) und eine Trendlinie (Ep) den erwartenden, konträren Zusammenhang. Insgesamt ist der Einfluss der Rohdichte hier kaum ausgeprägt. Betrachtet man den von der Abwitterung betroffenen Bereich, zeigt sich Folgendes: Eine Abwitterung von z.B. 250 g/m<sup>2</sup> entspricht einer flächiger Abwitterung von nur 0.1 mm. Deshalb wird als Haupteinfluss auf den Frosttausalz widerstand die Qualität der äussersten Millimeter des Randbetons gesehen. Dieser Randbereich kann durch die Nachbehandlung als auch das Trennmittel beeinflusst werden. In Jacobs et al. (2014) [18] wurde aufgezeigt, dass bei Beton ohne Luftporen die Nachbehandlung einen sehr grossen und bei Beton mit Luftporen einen geringen Einfluss auf die Abwitterung hat. Bei den hier untersuchten Betonen wurde immer Luftporenbildner verwendet und dadurch im Frischbeton Luftgehalte zwischen 2.4 und 7.6 % erhalten. Hier wäre also ein geringer Einfluss der Nachbehandlung zu erwarten.

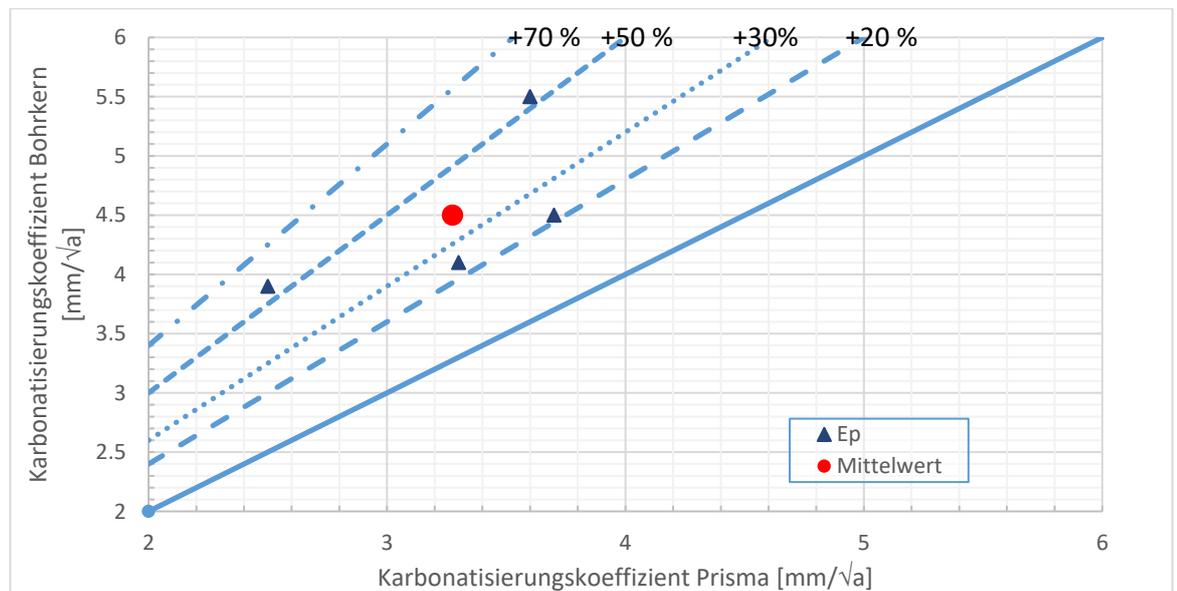


**Abbildung 19: Frosttausalz widerstand (dargestellt als abgewitterte Menge), bestimmt am separat hergestellten Würfeln und an Bohrkernen aus dem Bauteil, in Abhängigkeit von der Rohdichte; die Trendlinien basieren auf einer linearen Regression der Würfelergebnisse**

Bei TFB internen Abklärungen zeigte sich jedoch, dass die Zufuhr an Wasser (nicht Wasserdampf) während der Nachbehandlung bei manchen Betonen mit Luftporenbildner eine Verbesserung und bei anderen Betonen eine Verschlechterung bei der Abwitterung im Frosttausalzprüfung nach SIA 262/1 ergibt. Versuche in der TFB AG mit drei verschiedenen Trennmitteln und ohne Trennmittel zeigten zudem, dass dies keinen Unterschied bei der Abwitterung in der Frosttausalzprüfung nach SIA 262/1 bewirkte. Die Art des Trennmittels oder zu wenig Trennmittel sollte sich somit kaum bemerkbar machen. Zu erwarten wäre, dass durch zu viel Trennmittel die Hydratation von Zement beeinträchtigt werden kann und somit ein poröseres Gefüge im äussersten Randbeton entstehen könnte. D.h. es bestehen neben dem Luftgehalt weitere massgebliche Einflüsse (z.B. Nachbehandlung) auf den Frosttausalz widerstand.

### 3.7 Karbonatisierungswiderstand

Nur bei einem Bauwerk konnten Prismen hergestellt und Bohrkern für die Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes (Kehrwert des Karbonatisierungskoeffizienten) gezogen werden. Bei den vier Prüfungen an Bohrkernen und den separat hergestellten Prismen lag der Unterschied im Mittel bei etwa 40 %. Wird der Karbonatisierungskoeffizient an den Bohrkernen nicht an der geschalteten Prüfkörperseite sondern am Kernbeton bestimmt, lag dieser Karbonatisierungskoeffizient bei 75 – 80 % (Mittelwert 78 %) vom Karbonatisierungskoeffizienten der geschalteten Seite und bei 95 bis 124 % (Mittelwert 108 %) im Vergleich zum am Prisma bestimmten Karbonatisierungskoeffizienten. Der am Bohrkern geprüfte Kernbeton zeigt somit einen zum am Randbeton des Prismas bestimmten, vergleichbaren Karbonatisierungskoeffizienten. Ein Vergleich des Karbonatisierungskoeffizienten mit der Rohdichte ist nicht möglich, da an den Prüfkörpern die Rohdichte nicht bestimmt wurde.



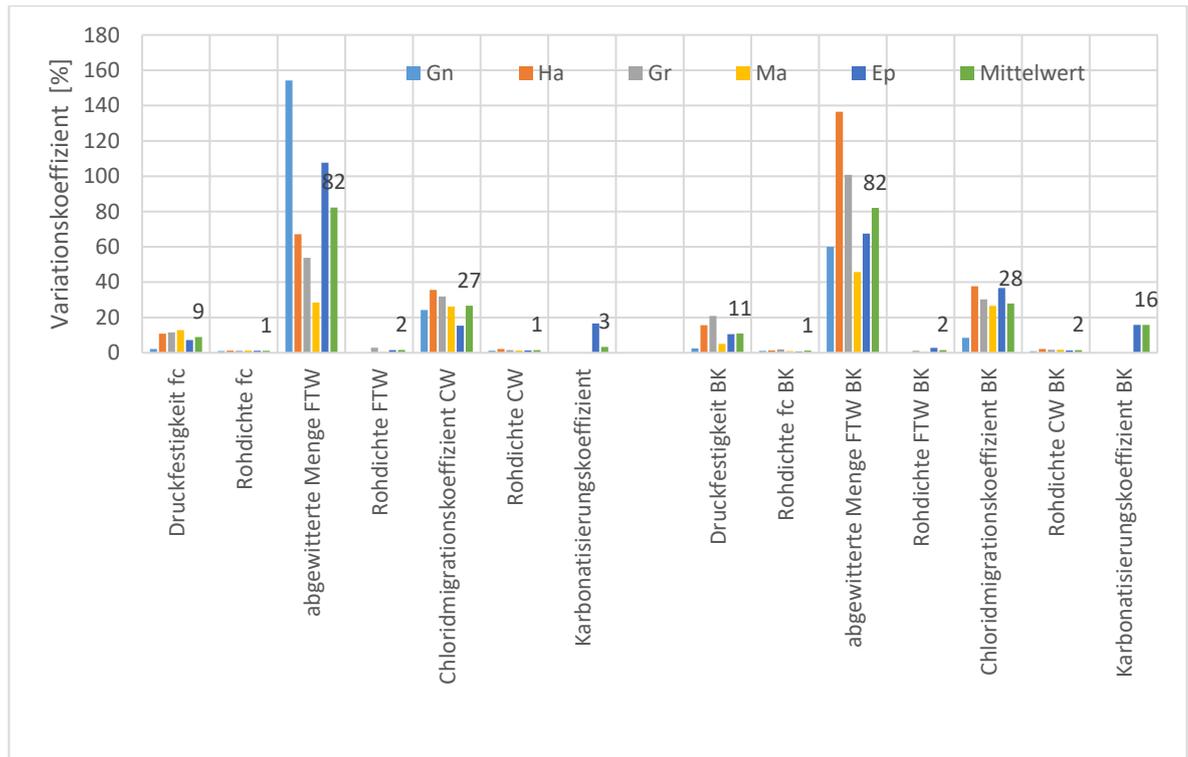
**Abbildung 20: Karbonatisierungskoeffizient, bestimmt am separat hergestellten Prisma und an Bohrkernen aus dem Bauteil**

### 3.8 Streuung

Da die Prüfergebnisse je nach Bauwerk (Beton, Prüfkörperart und untersuchter Etappe) unterschiedlich waren, wurde der Variationskoeffizient pro Bauwerk, Prüfkörperart und Festbetoneigenschaften berechnet, um Hinweise auf die Streuung der Bauteileigenschaften zu erhalten (Abbildung 21). Im Mittel ist bei den einzelnen Eigenschaften der Variationskoeffizient beim Bohrkern und beim separat hergestellten Prüfkörper jeweils sehr ähnlich. Bei der Druckfestigkeit liegt dieser bei ca. 10 %, bei der Rohdichte bei ca. 1 %, beim Frosttausalz widerstand bei ca. 80 %, beim Chloridmigrationskoeffizienten bei ca. 27 %, und beim Karbonatisierungswiderstand (nur 1 Bauwerk!) bei etwa 15 %. Im Einzelfall zeigten sich deutliche Abweichungen von den gemittelten Variationskoeffizienten pro Eigenschaft. Keines der untersuchten Bauwerke fiel aber durch besonders hohe Variationskoeffizienten bei allen betrachteten Eigenschaften auf. Beim Bauwerk Ma waren die Variationskoeffizienten zumeist am niedrigsten.

Leemann et al. [20] bestimmten die Rohdichte, Druckfestigkeit, Chloridleitfähigkeit und Sauerstoffpermeabilität an je zwei Decken- und Wandetappen der Überdeckung Opfikon. Dabei wurden pro Bauteil 60 Bohrkernabschnitte untersucht, um die Streuung im Bauteil in alle drei Richtungen (Tiefe, Höhe/Breite, Länge) zu erfassen. Damit wurden Unterschiede in einzelnen Betonchargen als auch zwischen Betonchargen erfasst. Es zeigten sich keine systematischen Unterschiede der Eigenschaften oder Variationskoeffizienten in Abhängigkeit von der Tiefe. Jedoch zeigten sich in Abhängigkeit von der Bohrkernlage bei

den Eigenschaften und Variationskoeffizienten teilweise systematische Unterschiede. Die Wände weisen einen höheren Variationskoeffizienten bei der Sauerstoffpermeabilität als die Decken auf. Der Variationskoeffizient für die Chloridleitfähigkeit ist leicht höher in vertikaler als in horizontaler Richtung. Die Variationskoeffizienten stimmten bei der Rohdichte und Druckfestigkeit gut mit den hier ermittelten überein (Tabelle 8). Bei der Chlorid- und Wasserleitfähigkeit lagen die Variationskoeffizienten bei 10 und 17 %, d.h. deutlich unter denjenigen, die hier für den Chloridmigrationskoeffizienten (ca. 27 %) bestimmt wurden. Die Variationskoeffizienten für die Luftpermeabilität und den Frostausfallwiderstand waren jeweils am höchsten. Die unterschiedlichen Variationskoeffizienten weisen darauf hin, dass die verschiedenen Eigenschaften in unterschiedlichem Ausmass durch Baustoffinhomogenitäten beeinflusst werden. Würde man folglich nur die Druckfestigkeit bestimmen, könnten Unterschiede in der Dauerhaftigkeit nicht erkannt werden.



**Abbildung 21: Variationskoeffizienten der an separat hergestellten Prüfkörpern und Bohrkernen bestimmten Eigenschaften**

**Tabelle 8: Variationskoeffizienten VK [%] für die Bohrkernergebnisse in Abhängigkeit vom Bauteil, der Eigenschaft und der Lage**

Bauteil	Streuung in Breite/Höhe und Länge				Streuung in Tiefe			
	Decke 1	Decke 2	Wand 1	Wand 2	Decke 1	Decke 2	Wand 1	Wand 2
Rohdichte					1.7	1.4	1.2	0.8
Mittelwert					1.3			
Druckfestigkeit	7.4	8.8	8.5	7.3	10.4	10.7	7.2	10.9
Mittelwert	8.0				9.8			
Chloridleitfähigkeit	8.8	10.7	11.7	9.5				
Mittelwert	10.2							
Sauerstoffpermeabilität	22	39	59	75				
Mittelwert	49							
Wasserleitfähigkeit					14.5	16.7	14.1	20.9
Mittelwert					16.6			

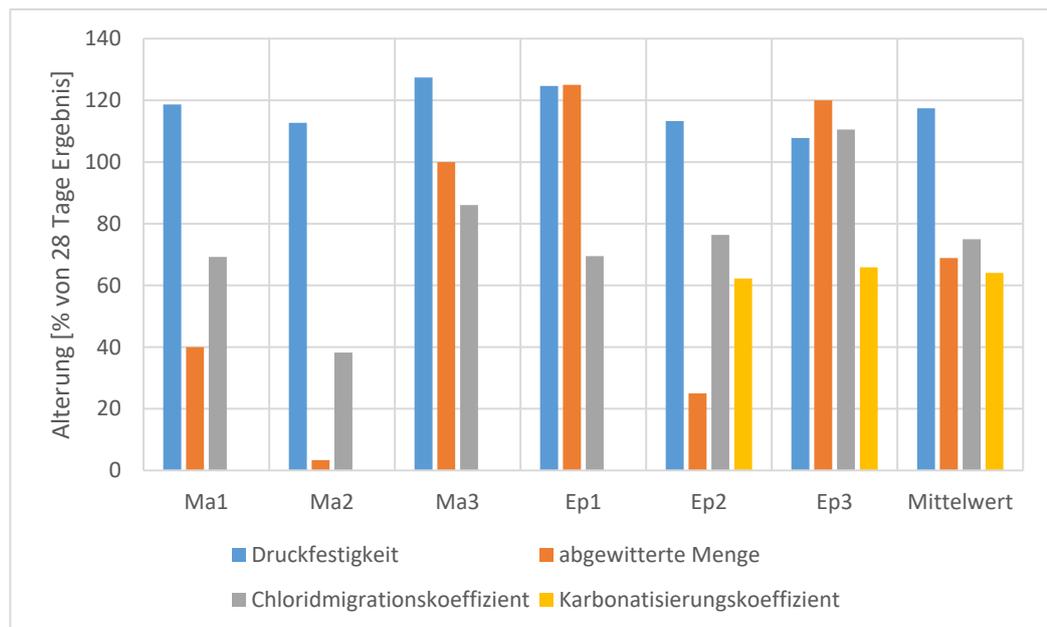
Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich über alle Eigenschaften betrachtet keine systematischen Unterschiede bei den Eigenschaften und deren Streuung im Bauteil innerhalb einer Liefercharge, zwischen verschiedenen Lieferchargen an einem Tag oder über einen längeren Zeitraum zeigten.

### 3.9 Betonalter

Bei zwei Bauwerken war es möglich auch in einem höheren Betonalter bei jeweils mehreren Etappen erneut Bohrkerne zu ziehen und die Festbetoneigenschaften zu bestimmen. Beim Bauwerk Ep waren die Bohrkerne in etwa 330 Tage und beim Bauwerk Ma 250 Tage alt. Die Druckfestigkeit nahm in dieser Zeit um im Mittel auf etwa 117 % zu (Abbildung 22), was auch sehr gut mit den Angaben der SIA 262 für normal erhärtenden Beton übereinstimmt.

Die Abwitterung bei der Frostausalzprüfung, geprüft im höheren Alter, lag im Mittel bei ca. 70 % vom 28 Tage-Ergebnis. Eine ähnliche Reduktion zeigte sich auch beim Chloridmigrations- und Karbonatisierungskoeffizienten. Mit zunehmender Alterung zeigt sich auch hier (wie auch bei den Literaturergebnissen in Abschnitt 1.2.2) eine Verbesserung des Chlorid-, Karbonatisierungs- und Frostausalzwerstandes. Im Einzelfall kann die Verbesserung jedoch sehr unterschiedlich ausfallen.

Bei der Rohdichte betragen die Unterschiede im Einzelfall maximal 2 % und im Mittel weniger als 1 %; d.h. es zeigten sich erwartungsgemäss keine Einflüsse der Alterung auf die Rohdichte.

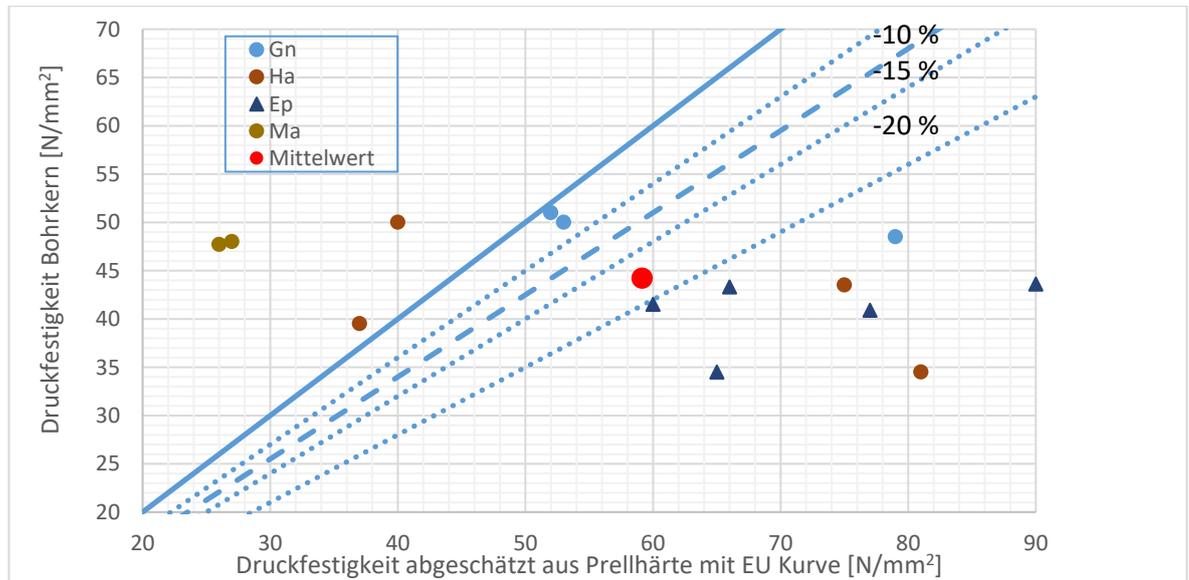


**Abbildung 22: Einfluss der Alterung auf Festbetoneigenschaften (Ma 250 zu 28 Tage, EP 330 zu 28 Tage), bestimmt an Bohrkerne aus Bauteilen;**

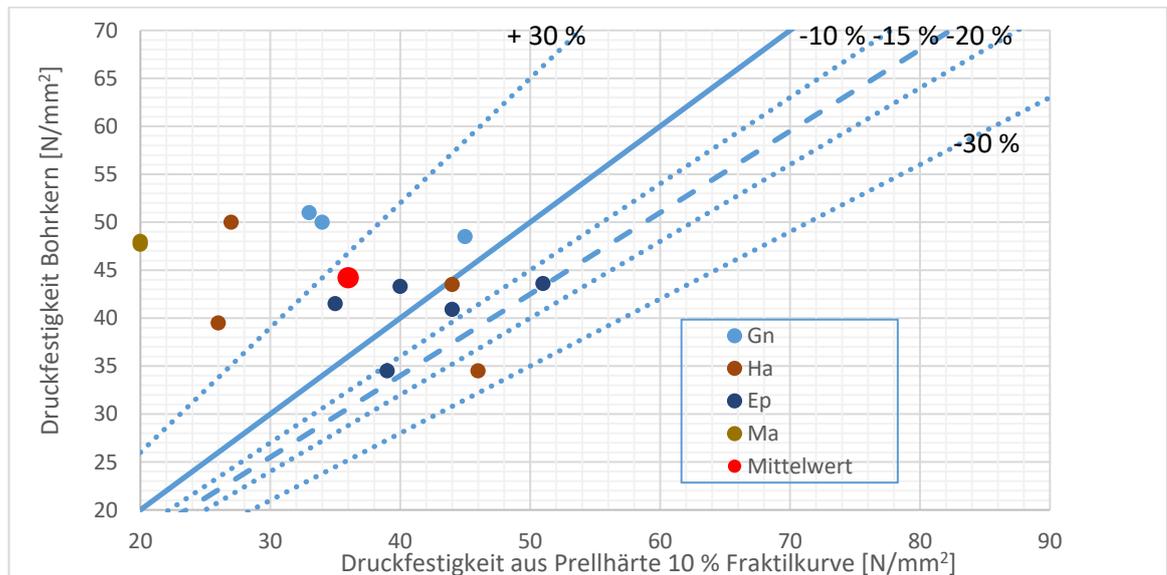
### 3.10 Zerstörungsfreie Prüfungen

Bei vier Bauwerken wurden die Prellhärte nach SN EN 12504-1 und die Luftpermeabilität nach SIA 262/1 bestimmt. Aus logistischen Gründen erfolgte diese zusammen. Da jedoch die Luftpermeabilität nicht an einem jungen, zu nassen Beton bestimmt werden kann (vgl. SIA 262/1, Anhang E, wurde bei Eigenschaften erst in einem Alter von mindestens 2 Monaten bestimmt. Zwischen der aus der Prellhärte abgeschätzten Druckfestigkeit (EU-Kurve d.h. mittlerer Zusammenhang) und der am Bohrkern bestimmten Druckfestigkeit zeigte sich

kein allgemeiner Zusammenhang (Abbildung 23). Auffallend ist, dass sich die Punkte teilweise bauwerksweise gruppieren<sup>4</sup>. Beim Bauwerk Gn zeigt sich bei 2 von 3 Bauteilen eine sehr gute Übereinstimmung, beim Bauwerk Ep war die am Bohrkern bestimmte Druckfestigkeit mehr als 30 % niedriger als die aus der Prellhärte abgeleitete Druckfestigkeit; beim Bauwerken Ma war es konträr dazu und beim Bauwerk Ha sehr variabel. Wird statt des mittleren Zusammenhangs die 10 % Fraktilkurve verwendet, ergibt sich Abbildung 24. D.h. die Streuung bleibt gleich, jedoch liegen die so aus der Prellhärte abgeschätzten Druckfestigkeiten mehrheitlich tiefer als die am Bohrkern bestimmten und somit mehrheitlich auf der sicheren Seite.



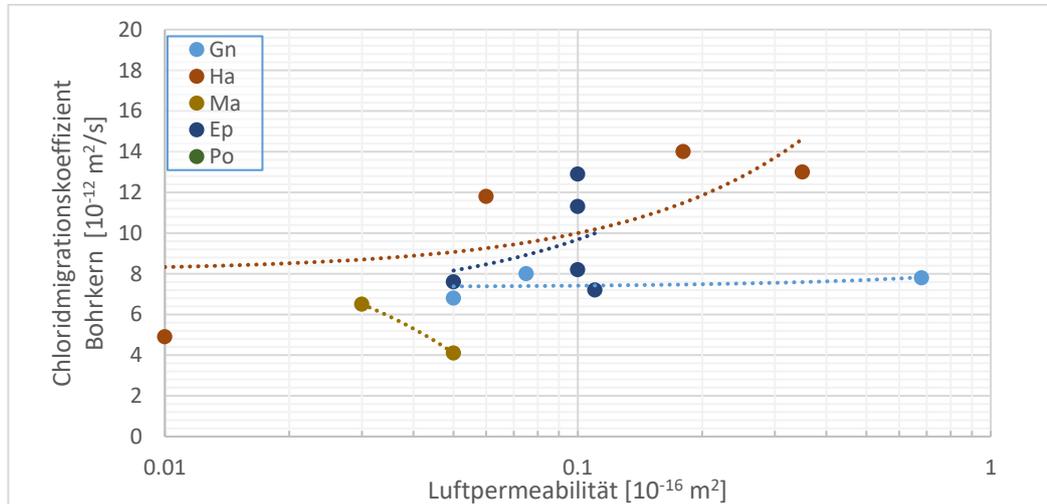
**Abbildung 23: 28 Tage Bohrkerndruckfestigkeit und aus der nach ca. 2 – 3 Monaten mit dem Rückprallhammer bestimmten Prellhärte, EU Kurve) nach SN EN 12504-1 ermittelte Würfeldruckfestigkeit;**



**Abbildung 24: 28 Tage Bohrkerndruckfestigkeit und aus der nach ca. 2 – 3 Monaten mit dem Rückprallhammer bestimmten Prellhärte (10 % Fraktilkurve) nach SN EN 12504-1 ermittelte Würfeldruckfestigkeit;**

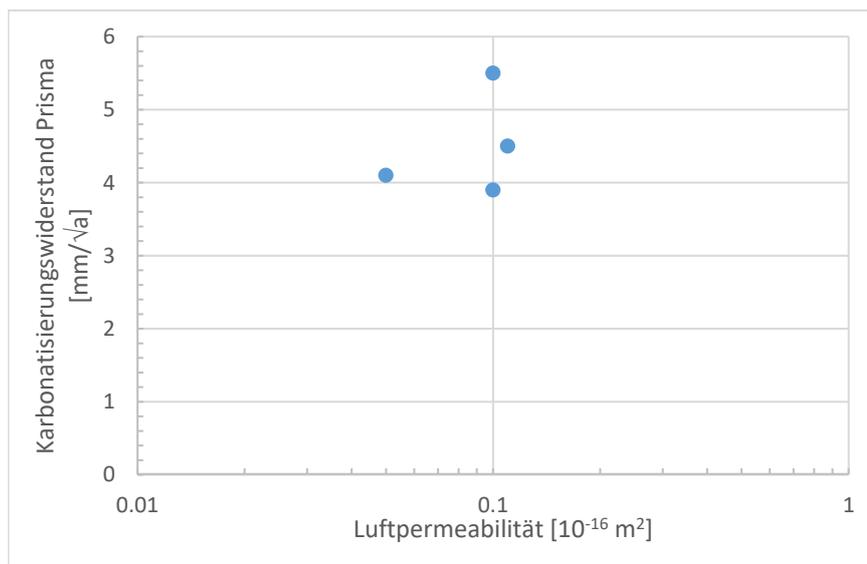
<sup>4</sup> Beim Bauwerk Gr wurde die Prellhärte nicht bestimmt.

Vergleicht man die Ergebnisse der Luftpermeabilität und mit dem am Bohrkern aus dem Bauteil bestimmten Chloridmigrationskoeffizienten, zeigt sich kein allgemeiner Zusammenhang (Abbildung 25). Ein allgemeiner Zusammenhang ist auch nicht zu erwarten, da die Zementart den Chloridmigrationskoeffizienten stark und die Luftpermeabilität geringer beeinflusst. Lag die Luftpermeabilität unterhalb von  $0.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ , lag der Chloridmigrationskoeffizient mit einer Ausnahme unter dem Grenzwert der SN EN 206 für die Exposition XD3 von  $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .



**Abbildung 25:** Am Bohrkern aus dem Bauteil bestimmter 28 Tage Chloridmigrationskoeffizient und geometrischer Mittelwerte<sup>5</sup> von jeweils sechs Luftpermeabilitätsmessungen im Alter von ca. 2 – 3 Monaten; die Linien stellen Trendlinien einer linearen Regression pro Bauwerk dar

Bei der Luftpermeabilität zeigt sich bei den wenigen Ergebnissen kein Zusammenhang zum Karbonatisierungskoeffizienten (Abbildung 26). Lag die Luftpermeabilität bei maximal ca.  $0.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ , lag der Karbonatisierungskoeffizient mit einer Ausnahme unter dem Grenzwert der SN EN 206 für die Exposition XC4 von  $5.0 \text{ mm}/\sqrt{\text{a}}$ .



**Abbildung 26:** Am Bohrkern aus dem Bauteil bestimmter 28 Tage Karbonatisierungskoeffizient und geometrischer Mittelwert von jeweils sechs Luftpermeabilitätsmessungen im Alter von ca. 2 – 3 Monaten

<sup>5</sup> Bei Luftpermeabilitätsmessungen wird häufig der geometrische statt der arithmetische Mittelwert gebildet, damit einzelne (sehr) hohe Werte sich nicht sehr stark auswirken

Insgesamt geben die Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfungen keine sehr aussagekräftigen Informationen über die Druckfestigkeit und die Dauerhaftigkeit. Einzig bei der Luftpermeabilität zeigt sich, dass bei einem geometrischen Mittelwert unter  $0.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  die Wahrscheinlichkeit hoch ist, dass die Anforderungen an den Chloridmigrationskoeffizienten für XD3 und den Karbonatisierungskoeffizienten für XC4 eingehalten werden. Gemäss Jacobs (2006) [16] ist so eine Luftpermeabilität typisch für einen Tiefbaubeton der Betonsorte F oder G.



## 4 Diskussion

### 4.1 Vorbemerkung

Wie in Kapitel 3 gezeigt, bestehen Unterschiede zwischen der Qualität des Betons von separat hergestellten Prüfkörpern und der von Bohrkernen aus Bauteilen. Diese Unterschiede können aber aufgrund der wenigen vorliegenden Daten aus den eigenen und von Dritten durchgeführten Untersuchungen nicht allgemein gültig quantifiziert werden. Somit stellt sich auch die Frage, inwieweit Modellierungen zur Betondauerhaftigkeit zuverlässige Aussagen ergeben können, wenn die im Bauteil vorhandene Betonqualität, bzw. deren Unterschied zur der von separat hergestellten Prüfkörpern, nur ungenügend bekannt ist.

### 4.2 Umwelteinflüsse

In Tabelle 9 sind die mittlere Lufttemperatur und relative Feuchte bei den verschiedenen Bauwerken angegeben, die zwischen dem Betoneinbau und der Bohrkernentnahme 2 - 3 Wochen später herrschten. Daraus ist erkennbar, dass das Ziel erreicht wurde, Betonieretappen zu untersuchen die bei unterschiedlichen Lufttemperaturen hergestellt wurden und erhärteten. Wurde bei der niedrigsten Umgebungstemperatur betoniert und erhärtete Beton anschliessend weiter aus, wurde bei allen Bauwerken eine höhere 28 Tage Druckfestigkeit erzielt als wenn bei den höchsten Lufttemperaturen betoniert wurde und auch erhärten konnte. Beim Chlorid- und Frosttausalz widerstand ist der Temperatureinfluss demgegenüber uneinheitlich. Vergleicht man die erzielten Ergebnisse mit den geforderten Betoneigenschaften zeigt sich Folgendes:

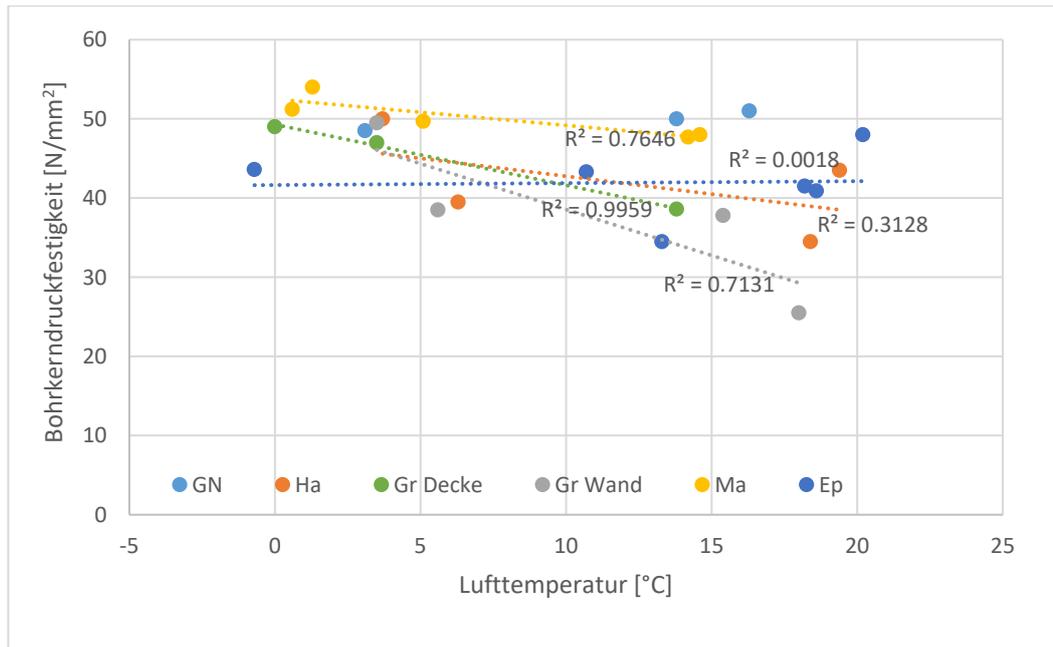
- Die Druckfestigkeitsanforderung wird unter Berücksichtigung der für Bohrkerne zulässigen 15 % Abminderung erfüllt
- Die Anforderungen an den Chloridmigrationskoeffizienten werden mit teilweiser Ausnahme vom Bauwerk Gr immer erfüllt, wenn als Anforderung der Richtwert für TT-2 herangezogen wird.
- Die Anforderungen an den Frosttausalz widerstand (Abwitterung) werden nur teilweise erfüllt, wenn als Anforderung der Richtwert für TT-2 herangezogen wird.

**Tabelle 9: Maximal unterschiedliche<sup>6</sup> Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit bei den verschiedenen Bauwerken sowie zugehörige 28 Tage Betoneigenschaften, bestimmt an Bohrkernen**

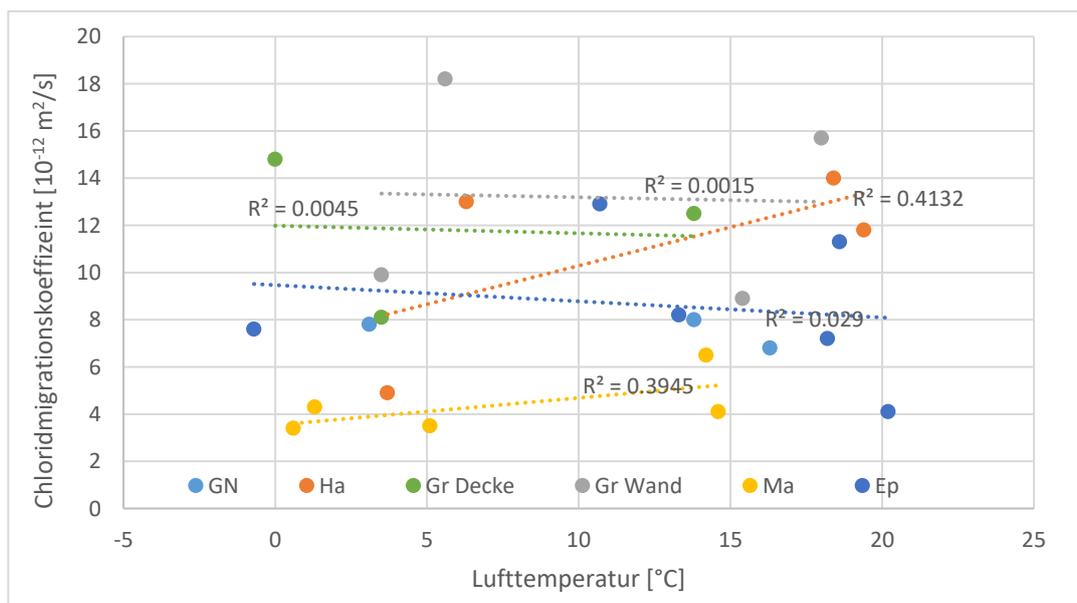
Bauwerk	Ep	Gn	Ha	Ma	Gr Decke	Gr Wand
Minimale / maximale Lufttemperatur [°C]	-1 / +20	3 / 16	4 / 19	1 / 15	0 / 14	4 / 18
Minimale / maximale rel. Luftfeuchte [%]	72 / 91	73 / 89	72 / 89	64 / 86	55 / 85	54 / 78
Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	59 / 48	67 / 51	50 / 44	51 / 48	49 / 39	50 / 26
Geforderte Klasse	C30/37	C30/37	C30/37	C25/30	C30/37	C25/30
Chloridmigrationskoeffizienten [10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	7.6 / 4.1	5.2 / 6.8	4.9 / 12	3.4 / 4.1	15 / 13	10 / 16
Gefordert (TT-2)	12	12	12	-	12	-
Abwitterung Frosttausalz widerstand [g/m <sup>2</sup> ]	500 / 90	1900 / 20	80 / 900	300 / 500	300 / 400	600 / 500
Gefordert (TT-2)	1500	1500	300 (800)	1500	300(800)	300(800)

<sup>6</sup> ; Mittelwert der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit ab dem Betoneinbau bis zur Bohrkernentnahme

In Abbildung 27 zeigt sich, vor allem bei den Bauwerken Ma und Ep ein Einfluss der Lufttemperatur auf die Bohrkerndruckfestigkeit. Jedoch zeigt sich kein Einfluss der Lufttemperatur auf den Chloridmigrationskoeffizienten, mit Ausnahme des Bauwerkes Ma, (Abbildung 28) oder den Frosttausalz widerstand, mit Ausnahme der Bauwerke Ha, Ma, (Abbildung 29). Da jedoch zwischen dem Chloridmigrationskoeffizienten und dem Frosttausalz widerstand bei den Bauwerken Gr, Ma, Gn und Ha ein gewisser Zusammenhang besteht (Abbildung 30), wird daraus geschlossen, dass beim Chloridmigrationskoeffizienten und beim Frosttausalz widerstand andere Effekte den Einfluss der Lufttemperatur überlagern. Als möglicher, massgeblicher Einfluss steht hier die Nachbehandlung im Vordergrund, die sich vor allem bei den äussersten Zentimeter des Betons bemerkbar macht. In grösserer Tiefe, in der die Druckfestigkeit bestimmt wird, ist der Nachbehandlungseinfluss (sehr) gering.



**Abbildung 27: Einfluss der mittleren Lufttemperatur (Betonage bis Bohrkernentnahme) auf die Bohrkerndruckfestigkeit**



**Abbildung 28: Einfluss der mittleren Lufttemperatur (Betonage bis Bohrkernentnahme) auf den Chloridmigrationskoeffizienten**

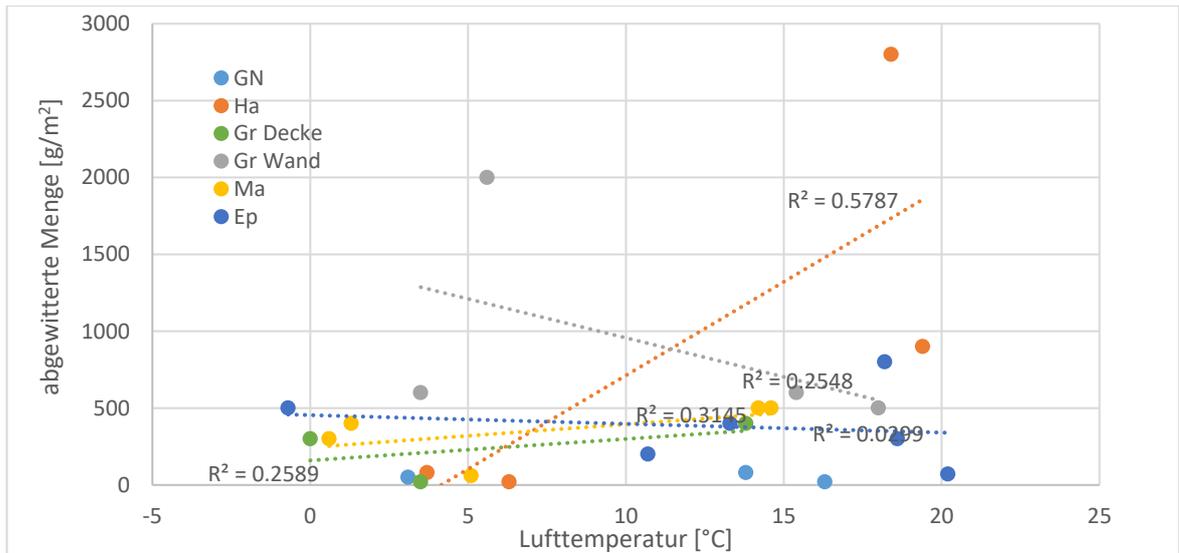


Abbildung 29: Einfluss der mittleren Lufttemperatur (Betonage bis Bohrkernentnahme) auf den Frostausalz widerstand (abgewitterte Menge)

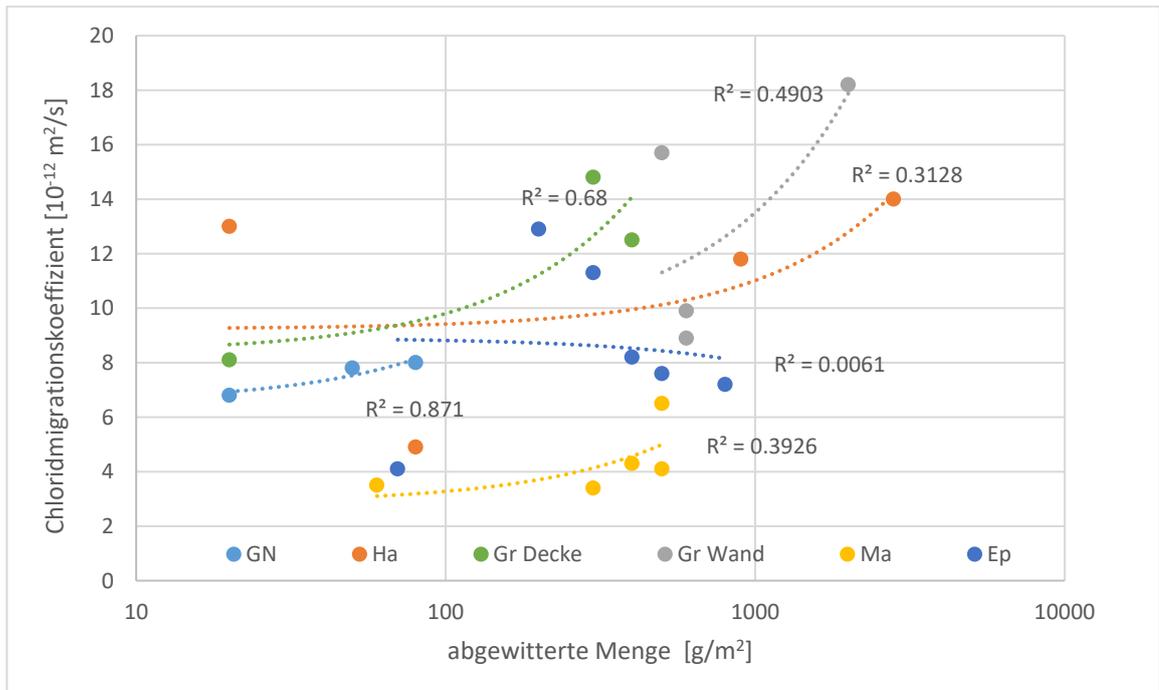


Abbildung 30: Chloridmigrationskoeffizient in Abhängigkeit vom Frostausalz widerstand (abgewitterte Menge)

### 4.3 Chloridwiderstand

#### 4.3.1 Konformitätsnachweis Betonwerk

Gemäss SIA 262/1 liegen bei einem Chloridmigrationskoeffizienten von ca.  $7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  die Wiederhol- bzw. Vergleichsstandardabweichung bei  $0.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  bzw.  $1.7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}^7$ . Die Wiederholstandardabweichung bezieht sich auf eine Prüfungswiederholung am

<sup>7</sup> Hier wird somit angenommen, dass die Chloridmigrationskoeffizienten einer Gauss'schen Verteilung unterliegen.

gleichen Beton im gleichen Labor mit anderen Prüfkörpern, die Vergleichsstandardabweichung bezieht sich auf eine Prüfung an anderer Prüfkörpern aus dem gleichen Beton in einem anderen Labor. D.h. die Streuung durch die wiederholte Herstellung des Betons ist bei diesen Vergleichsstandardabweichungen nicht enthalten.

Jacobs (2016) [17] gibt für ein Betonwerk beim Konformitätsnachweis für eine laufende Produktion mit einem mittleren Chloridmigrationskoeffizienten von  $5.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  eine Standardabweichung von  $1.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  (Variationskoeffizient ca. 35 %) an.

Bei den hier untersuchten Bauwerken wurde für die Prüfungen an den separat hergestellten Prüfkörpern als auch den Bohrkernen aus Bauteilen ein Variationskoeffizient von im Mittel 28 % ermittelt (Abbildung 21). D.h. diese Variationskoeffizienten sind ähnlich wie der vorgenannte von 35 %.

Möchte ein Betonwerk den in der SN EN 206 enthaltenen Grenzwert für den Chloridmigrationskoeffizienten von  $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  zuverlässig einhalten, muss der mittlere Chloridmigrationskoeffizient einen Abstand vom Grenzwert von 2 Standardabweichungen haben und dürfte bei maximal ca.  $6.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  liegen.

### 4.3.2 Alterung

In Abbildung 31 ist der Alterungseinfluss für den Chloridmigrationskoeffizient dargestellt. Die Abnahme des Chloridmigrationskoeffizienten wird dabei mit der Formel  $CM_{28}/CM_n = (t_{28}/t_n)^a$  beschrieben, wobei der 28 Tage Chloridmigrationskoeffizient bei  $t_{28}$  und der im höheren Alter bestimmte bei  $t_n$  eingesetzt wird. Basierend auf den Ergebnissen der untersuchten Bauwerke ergibt sich für  $a$  zwischen 0.1 und 0.2. In Abbildung 31 ist der Alterungseinfluss für den Chloridmigrationskoeffizient für  $a = 0.1$  und 0.2 dargestellt. Die grösste, prozentuale und absolute Änderung findet während des ersten Jahres statt.

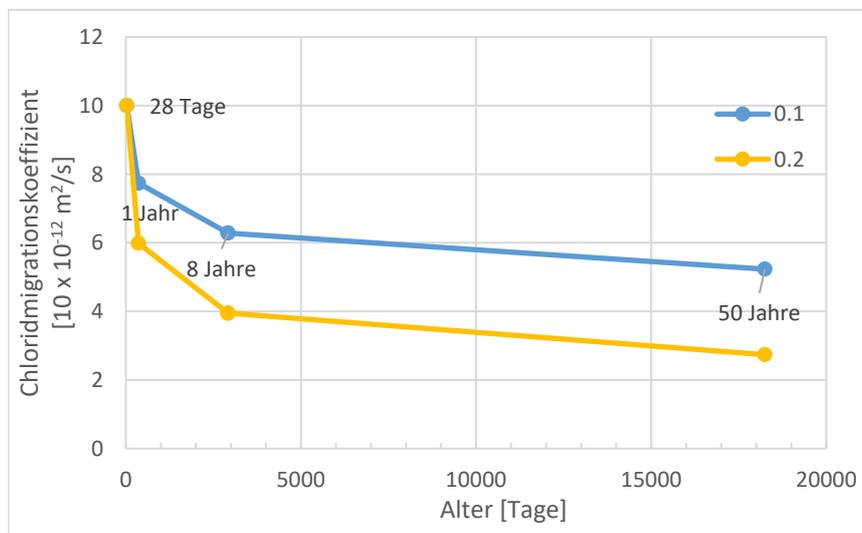


Abbildung 31: Einfluss eines Alterungskoeffizienten von 0.1 und 0.2 auf den Chloridmigrationskoeffizienten

### 4.3.3 Grenzwert Konformitätsnachweis Betonwerk

Hunkeler et al. (2002) [13] schlugen einen Chloridmigrationskoeffizienten von  $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  für die Expositionsklasse XD3 und einer Nutzungsdauer von 50 Jahren für den Konformitätsnachweis des Betonwerkes vor. Dieser Vorschlag beruht auf verschiedenen Annahmen und es wird explizit erwähnt, dass Erfahrungen gesammelt werden müssen, um diesen Wert zu überprüfen. Auch war damals der Unterschied zwischen der Betonqualität im separat hergestellten Prüfkörper und im Bauteil noch weniger bekannt als heute.

Untersuchungen von von Greve-Dierfeld et al. [41] zeigten auf, dass der am Bauteil bestimmte Chloridmigrationskoeffizient maximal ca.  $7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  betragen sollte, damit bei

der für XD3(CH) geforderten Bewehrungsüberdeckung gemäss SIA 262 von  $c_{nom} = 55$  mm die Bauteile im Regelfall eine Nutzungsdauer von 50 Jahren ohne grössere Instandsetzungen erreichen. Für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren sollte der Chloridmigrationskoeffizient etwa die Hälfte von  $7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  betragen.

Gemäss den Angaben in Abbildung 15 war der am Bauteil bestimmte Chloridmigrationskoeffizient (Mittelwert aller Bauteile) nahezu 50 % höher als der am separat hergestellten Prüfkörper. Wenige der im Alter von 28 Tagen untersuchten Bauteile konnten in einem höheren Alter erneut untersucht werden. Gemäss den wenigen Untersuchungen lag der Chloridmigrationskoeffizient nach etwa einem  $\frac{3}{4}$  Jahr bei im Mittel 75 % von dem nach 28 Tagen bestimmten (Abbildung 22).

Würde man einen Chloridmigrationskoeffizienten von  $7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  am Bauteil während dessen Nutzung fordern, könnte man den nach etwa einem  $\frac{3}{4}$  Jahr bestimmten Wert dafür verwenden. Gemäss Abbildung 22 nimmt im höheren Alter ( $> \frac{3}{4}$  Jahr) der Chloridmigrationskoeffizient noch weiter ab. D.h. diese Betrachtung ist noch auf der sicheren Seite. Im Alter von 28 Tagen müsste der am Bauteil bestimmte Chloridmigrationskoeffizienten wegen des noch zu erwartenden Alterseinfluss nur etwa  $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  und der am separat hergestellten Prüfkörper etwa  $\frac{2}{3}$  davon (Abbildung 15), d.h. ca.  $7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , betragen. Diese sich auf nur wenige Bauteilprüfungen abstützenden Überlegungen umfassen nur die mittleren Zusammenhänge. Ein Betonwerk müsste für die Prüfungsart TT-1 (Konformitätsnachweis) einen mittleren Chloridmigrationskoeffizienten von maximal ca.  $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  anstreben, um mit den meisten Prüfergebnissen (ca. 90 %) noch unterhalb eines Chloridmigrationskoeffizienten von  $7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  zu liegen. Bei diesen Überlegungen ist u.a. nicht berücksichtigt, dass einerseits eventuell vermehrt Chloride in den Beton im jungen Alter eingetragen werden und andererseits eine weitere Gefügeverdichtung im Laufe der Jahre noch stattfindet. Gemäss diesen Ergebnissen müsste somit der in der SN EN 206 enthaltene Grenzwert für den Chloridmigrationskoeffizienten für XD3  $7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  und nicht wie in der Norm angegeben  $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  betragen.

## 4.4 Karbonatisierungswiderstand

### 4.4.1 Konformitätsnachweis Betonwerk

Bei den sehr wenigen hier durchgeführten Prüfungen im Alter von 28 Tagen an einer Betonsorte eines Betonwerkes liegt beim Karbonatisierungswiderstand  $K_N(A)$  von 2 – 5 mm/ $\sqrt{a}$  der Variationskoeffizient für separat hergestellten Prüfkörpern bei 3 % bei und für Bohrkernen aus den mit dem Beton hergestellten Bauteilen bei 16 %.

Jacobs (2016) [17] präsentierte Ergebnisse zum Konformitätsnachweis eines Betonwerkes nach SN EN 206 mit einem ähnlichen Karbonatisierungswiderstand (ca. 3 – 5 mm/ $\sqrt{a}$ ) mit einem Vergleichsvariationskoeffizienten von ca. 15 %. Von Greve-Dierfeld & Gehlen [40] ermittelten bei Laborlagerungen ähnliche Variationskoeffizienten. Produziert ein Betonwerk mit diesen Karbonatisierungswiderstand und dieser Streuung, liegen ca. 16 % der Ergebnisse über z.B. (5.0 + 0.8) mm/ $\sqrt{a}$ . D.h. möchte ein Betonwerk den in der SN EN 206 enthaltenen Grenzwert vom Karbonatisierungswiderstand von 5.0 mm/ $\sqrt{a}$  für XC3(CH) und XC4(CH) zuverlässig einhalten, muss es einen mittleren Karbonatisierungswiderstand von maximal ca. 4.2 mm/ $\sqrt{a}$  (ca. 16 % Überschreitungen) bzw. 3.4 mm/ $\sqrt{a}$  (ca. 2 % Überschreitungen) anstreben. Hier wurde vorausgesetzt, dass die Karbonatisierungswiderstände einer Gauss'schen Verteilung folgen.

### 4.4.2 Alterung

Würde man den Alterungseinfluss wieder mit der Formel  $(t_{28}/t_n)^a$  beschreiben, ergäbe sich für die hier ermittelten Ergebnisse ebenfalls (wie auch beim Chloridmigrationskoeffizienten) ein  $a = 0.1 \dots 0.2$ . In Abbildung 31 ist für diese Alterungsfaktoren der Verlauf des Chloridmigrationskoeffizienten dargestellt; der Verlauf des Karbonatisierungskoeffizienten wäre analog. Die grösste, prozentuale und absolute Änderung findet während des ersten Jahres

statt. Von Greve-Dierfeld & Gehlen [40] ermittelten eine sehr ähnliche Abnahme beim Karbonatisierungswiderstand zwischen 28 Tagen und einem ½ bis 1 Jahr. Je nach Zementart lag diese Abnahme in diesem Zeitraum bei 35 bis 77 %.

#### 4.4.3 Grenzwert Konformitätsnachweis Betonwerk

Basierend auf den Untersuchungen von Hunkeler & Lammar (2012) [13] wurden in der SN EN 206 für den Karbonatisierungswiderstand und eine Nutzungsdauer von 50 Jahren ein Grenzwert von  $5.0 \text{ mm}/\sqrt{a}$  für XC4 und XC3 eingeführt. Dieser Grenzwert berücksichtigt diverse Effekte, jedoch nicht den Unterschied zwischen der Betonqualität im separat hergestellten Prüfkörper und im Bauteil.

Von Greve-Dierfeld & Gehlen [40] zeigten auf, dass bei einer XC4(CH)-Exposition und der in der SIA 262 geforderten nominellen Bewehrungsüberdeckung von 40 mm, ein Karbonatisierungswiderstand von maximal ca.  $7 \text{ mm}/\sqrt{a}$  im Prüfalalter von 140 Tagen benötigt würde. Würde man einen Karbonatisierungswiderstand von  $7 \text{ mm}/\sqrt{a}$  am Bauteil während dessen Nutzung fordern, könnte man den nach etwa einem ¾ Jahr bestimmten Wert dafür verwenden. Gemäss den sehr wenigen hier präsentierten Untersuchungsergebnissen lag der Karbonatisierungswiderstand nach etwa einem ¾ Jahr bei im Mittel 60 % von dem nach 28 Tagen bestimmten (Abbildung 22). D.h. im Alter von 28 Tagen dürfte der am Bauteil bestimmte Karbonatisierungswiderstand maximal etwa  $11 \text{ mm}/\sqrt{a}$  ( $1.6 \times 7 \text{ mm}/\sqrt{a}$ ) und der am separat hergestellten Prüfkörper im Prüfalalter 28 Tage etwa 2/3 davon (Abbildung 20), d.h. maximal ca.  $7 \text{ mm}/\sqrt{a}$  betragen. Diese Überlegungen stützen sich nur auf wenige Ergebnisse und umfassen auch nur die mittleren Zusammenhänge. Jedoch deuten diese Überlegungen darauf hin, dass der in der SN EN 206 festgelegte Grenzwert des Karbonatisierungswiderstandes für XC4 von  $5.0 \text{ mm}/\sqrt{a}$  geeignet ist, um mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit keine nennenswerte karbonatisierungsbedingte Bewehrungskorrosion während einer Nutzungsdauer von 50 Jahren bei fachgerecht hergestellten, eingebauten und nachbehandelten Beton zu bekommen.

Gemäss SIA 262/1 und SN EN 206 wird für eine 100jährige Nutzungsdauer ein Grenzwert von 4.0 (XC3) bzw. 4.5 (XC4)  $\text{mm}/\sqrt{a}$  gefordert. Auch diese Grenzwerte sind aufgrund der vorhandenen Daten immer noch als geeignet zu beurteilen.

#### 4.4.4 Frosttausalz widerstand

Gemäss SIA 262/1 liegen bei einem Frosttausalzwiderstand von ca.  $900 \text{ g}/\text{m}^2$  die Wiederhol- bzw. Vergleichsstandardabweichung bei 25 bzw.  $100 \text{ g}/\text{m}^2$ . Jacobs (2016) gibt für ein Betonwerk mit einem mittleren Frosttausalzwiderstand (ausgedrückt als Abwitterungsmenge) von nur  $30 \text{ g}/\text{m}^2$  eine Standardabweichung von  $25 \text{ g}/\text{m}^2$  (Variationskoeffizient ca. 80 %) für eine laufende Produktion an.

Bei den hier untersuchten Bauwerken wurde für die Prüfungen an den separat hergestellten Prüfkörpern als auch den Bohrkernen aus Bauteilen ein Variationskoeffizient von im Mittel 82 % bei Abwitterungsmengen von zumeist  $< 1000 \text{ g}/\text{m}^2$  ermittelt (Abbildung 21). D.h. diese Variationskoeffizienten decken sich mit dem vorgenannten. Produziert ein Betonwerk mit diesen Variationskoeffizienten, müsste der mittlere Frosttausalzwiderstand bei maximal ca.  $100 \text{ g}/\text{m}^2$  liegen, wenn es den in der SN EN 206 enthaltenen Grenzwert von  $200 \text{ g}/\text{m}^2$  zuverlässig einhalten möchte.

Auch für diese Eigenschaft (Abbildung 22) ergibt sich eine Reduktion der abgewitterten Menge zwischen 28 Tagen und einem ½ bis 1 Jahr von ca. 70 %, was einem Alterungsfaktor von 0.1 ... 0.2 entsprechen würde, wobei die Streuung deutlich grösser als beim Karbonatisierungswiderstand und beim Chloridmigrationskoeffizienten war. D.h. beim Frosttausalzwiderstand ist der Alterungseffekt weniger klar ausgeprägt als bei den beiden anderen Dauerhaftigkeitseigenschaften. Auch Literaturergebnisse sind hierzu sehr unterschiedlich, d.h. berichten teilweise von keiner und teilweise einer sehr deutlichen Verbesserung (Abschnitt 1.2.2).

#### 4.4.5 Druckfestigkeit

Bei den hier untersuchten Bauwerken wurde für die Prüfungen an den separat hergestellten Prüfkörpern als auch den Bohrkernen aus Bauteilen ein Variationskoeffizient von im Mittel 9 - 11 % ermittelt (Abbildung 21). Die am Bohrkern aus dem Bauteil bestimmte Druckfestigkeit betrug im Mittel ca. 80 % von der am separat hergestellten Würfel (Abbildung 13). Diese Abweichung ist grösser als die in der SN EN 13791 angegebene (85 %). Geht man davon aus, dass alle Beteiligten bei den im Rahmen dieses Projektes untersuchten Bauteilen sorgfältig gearbeitet haben, muss man damit rechnen, dass bei der Auswertung nach SN EN 13971 ein Risiko besteht, dass Unternehmern teilweise zu Unrecht eine mangelhaft ausgeführte Betonqualität angelastet wird. Andere Untersuchungen (siehe Abschnitt 1.2.1) stützen diese Vermutung.

Die an Bohrkernen aus dem Bauteil bestimmte Zunahme der Druckfestigkeit mit dem Alter stimmte gut mit den Hinweisen in der SIA 262 überein (Abbildung 22).

### 4.5 Bauwerksprüfungen

#### 4.5.1 Prüfungen TT-2

Aufgrund der oben dargestellten Ergebnisse ist es nicht möglich, die in der SN EN 13670 enthaltenen Richtwerte für die Prüfungsart TT-2 (Prüfung von Bohrkernen aus Bauteilen im Alter von 28 Tagen) so in allgemein gültige Grenzwerte umzuwandeln, dass ein gelieferter Beton mit nachweislich bestandener Konformitätsnachweis die Richtwerte bei fachgerechtem Betontransport, -einbau und -nachbehandlung zuverlässig einhält.

Jedoch ist es möglich diese Richtwerte als Grenzwerte baustellenspezifisch zu fordern, da die massgeblichen Einflüsse von der Betonzusammensetzung auf den Chlorid-, Karbonatisierungs- und etwas weniger dem Frosttausalz widerstand bekannt sind. D.h. ein Betonwerk kann den Beton zuverlässig so konzipieren, dass die Grenzwerte eingehalten werden können.

#### 4.5.2 Prüfungen TT-3

Bei den hier vorgestellten Ergebnissen verbesserten sich die Festbetoneigenschaften zwischen 28 Tagen und einem Prüfalter von ca. einem  $\frac{3}{4}$  Jahr nahezu immer. Einzig beim Frosttausalz widerstand gab es zweimal eine leichte Reduktion, d.h. erhöhte Abwitterung. Diese Reduktion liegt aber auch noch im Bereich der üblichen Prüfstreuung.

Basierend auf den vorliegenden Daten könnte für TT-3 (Prüfung von Bohrkernen aus Bauteilen im Alter von > 28 Tagen) der Richtwert von TT-2 übernommen werden.

Da die Prüfungsart TT-3 ein Prüfungsalter von ca. 1.5 Monaten bis Jahrzehnten umfasst, wird es jedoch als nicht sinnvoll angesehen, generell den Richtwert als Grenzwert einzuführen oder generell eine höhere Anforderung als bei der Prüfungsart TT-2 zu fordern. Falls jedoch die Prüfungsart TT-3 bei einem spezifischen Alter erfolgen soll (z.B.  $\frac{1}{2}$  Jahr), kann durchaus für dieses Prüfalter eine spezifische Anforderung an die Dauerhaftigkeit gestellt werden (z.B. unter Berücksichtigung des hier ermittelten Alterungseinflusses von Abbildung 22).

Jedoch ist es möglich die Richtwerte der Prüfungsart TT-2 als Grenzwerte für die Prüfungsart TT-3 baustellenspezifisch zu fordern, sofern ein höheres Prüfungsalter als 28 Tage notwendig ist, da die massgeblichen Einflüsse von der Betonzusammensetzung auf den Chlorid-, Karbonatisierungs- und etwas weniger dem Frosttausalz widerstand bekannt sind. D.h. ein Betonwerk kann den Beton zuverlässig so konzipieren, dass die Grenzwerte eingehalten werden können.

## 4.6 Anforderungen an die Nachbehandlung der SIA 262 sowie die Vorschläge zur Nachbehandlung vom AGB-Bericht 665 überprüft werden.

Mit der Korrektur C1 zur SIA 262 wurden 2017 die Anforderungen an die Nachbehandlung präzisiert. Grundlage dafür waren u.a. die Ergebnisse vom AGB-Bericht 665 (Jacobs et al.) [18]. Die Nachbehandlung ist in der SIA 262 nun wie folgt geregelt:

*6.4.6.7 Normale Anforderungen an die Nachbehandlung genügen, wenn keine besonderen Ansprüche an die Dichtigkeit der Betonrandzone gestellt werden (z.B. XC2). Erhöhte Anforderungen an die Nachbehandlung gelten z.B. bei bewitterten Bauteilen (z.B. XC4) oder bei erhöhten Anforderungen gemäss Ziffer 4.4.2.2.3. Hohe Anforderungen an die Nachbehandlung gelten z.B. bei stark belasteten Bauteilen mit einer langen Nutzungsdauer (z.B. XD3, XF4), bei Verschleissbeanspruchung oder bei hohen Anforderungen gemäss Ziffer 4.4.2.2.3. Für normale Anforderungen an die Nachbehandlung gelten die Ziffern 6.4.6.8 bis 6.4.6.10, für erhöhte und hohe Anforderungen an die Nachbehandlung zusätzlich die Ziffern 6.4.6.11 und 6.4.6.12.*

*6.4.6.8 Die Festigkeitsentwicklung des Betons kann mit einem der folgenden Verfahren genauer bestimmt werden:*

- *Berechnung der Festigkeitsentwicklung aus Temperaturmessungen, die bei einer maximalen Tiefe von 10 mm unter der Oberfläche vorgenommen wurden*
- *Berechnung der Festigkeitsentwicklung auf der Grundlage der mittleren Tagestemperatur der Luft*
- *Rückprallhammerprüfung (nach Kalibrierung)*
- *sonstige erwiesenermassen geeignete Verfahren.*

*6.4.6.9 Berechnungen der Festigkeitsentwicklung sollen auf einem geeigneten Rechenansatz beruhen, der sich für den verwendeten Beton (Art und Gehalt von Zement, Zusatzstoffen, w/z-Wert und Zusatzmitteln) sowie die Temperatur- und Bauteilverhältnisse bewährt hat oder vorgängig ermittelt wurde.*

*6.4.6.10 Wenn keine genauen Ergebnisse zum eingesetzten Beton und keine verlässlichen Schätzwerte gemäss Ziffer 6.4.6.9 vorliegen und bei der Ausführung keine entsprechenden Prüfungen vorgenommen werden, gelten für die Mindestnachbehandlungsdauer die Richtwerte der Tabelle 23. Die Festigkeitsentwicklung eines Betons wird mit  $r$  (Verhältnis der mittleren Druckfestigkeit nach 2 und 28 Tagen:  $r = f_{cm,2} / f_{cm,28}$ ) beschrieben.*

Tabelle 23: Richtwerte für die Mindestnachbehandlungsdauer

		Mindestnachbehandlungsdauer [Tage] <sup>1)</sup>									
		schnell			mittel			langsam			sehr langsam
Festigkeitsentwicklung des Betons bei 20 °C gemäss SN EN 206-1		$r \geq 0,50$			$0,50 > r \geq 0,30$			$0,30 > r \geq 0,15$			$r < 0,15$
Nachbehandlungsklasse (NBK)		2	3	4	2	3	4	2	3	4	
Oberflächen- temperatur des Betons <sup>3)</sup> [°C]	$T \geq 25$	1,0	1,5	3	1,5	2,5	5	2,5	3,5	6	spezielle Anforderungen sind festzu- halten
	$25 > T \geq 15$	1,0	2,0	5	2,5	4	9	5	7	12	
	$15 > T \geq 10$	1,5	2,5	7	4	7	13	8	12	21	
	$10 > T \geq 5$ <sup>2)</sup>	2,0	3,5	9	5	9	18	11	18	30	
<sup>1)</sup> Bei mehr als 5 h Verarbeitbarkeitszeit (Zeitraum, während dessen der Beton mit den vorgesehenen Geräten auf der Baustelle verdichtbar ist) ist die Nachbehandlungsdauer angemessen zu verlängern <sup>2)</sup> Bei Temperaturen unter 5 °C ist die Nachbehandlungsdauer um die Zeitspanne zu verlängern, während der die Temperatur unter 5 °C lag <sup>3)</sup> Alternativ darf die Lufttemperatur, die am Morgen um ca. 07.00 Uhr im Schatten gemessen wird, verwendet werden.											

6.4.6.11 Bei erhöhten und hohen Anforderungen an die Nachbehandlung darf die Nachbehandlungsdauer von Betonen mit schneller oder mittlerer Festigkeitsentwicklung die Vorgaben gemäss Tabelle 23a nicht unterschreiten.

**Tabelle 23a:** Richtwerte für die Mindestnachbehandlungsdauer<sup>1)</sup> bei erhöhten oder hohen Anforderungen an die Nachbehandlung (für Betone mit schneller oder mittlerer Festigkeitsentwicklung)

Beton-sorten gemäss SN EN 206	Anfor- derungen gemäss Ziffer 6.4.6.7	Mindestnachbehandlungsdauer [Tage] in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur T des Betons <sup>3)</sup> [°C]		
		$T \geq 15$	$10 \leq T < 15$	$5 \leq T < 10$ <sup>2)</sup>
B und C	erhöht	3	5	7
B und C D bis G	hoch	5	7	9

<sup>1), 2) und 3)</sup>: Es gelten die Fussnoten der Tabelle 23.

6.4.6.12 Bei erhöhten und hohen Anforderungen an die Nachbehandlung sind für Betone mit langsamer und sehr langsamer Festigkeitsentwicklung die Vorgaben im Einzelfall festzulegen.

6.4.6.13 Wenn die Vorgaben an die Mindestnachbehandlungsdauer gemäss Ziffern 6.4.6.10 und 6.4.6.11 unterschritten werden, muss bei der Ausführung anhand von Prüfungen der Nachweis erbracht werden, dass die an den Beton gestellten Anforderungen erfüllt werden.

Aufgrund der Ergebnisse der untersuchten Bauteile, für die die neuen Regelungen C1 nach SIA 262 noch nicht bestanden, liegen zwar keine klaren Hinweise vor, dass bei manchen Etappen eine ungenügende Nachbehandlung erfolgte. Andererseits kann mit den Ergebnissen aber auch nicht eindeutig eine gut vorgenommene Nachbehandlung belegt werden.

Beim Bauwerk Ha fällt auf, dass der an Bohrkernen aus Bauteilen geprüfte Frostausalz-widerstand (Abbildung 17) sehr variiert. Beide bei sommerlichen Temperaturen hergestellte Etappen führten zu den höchsten Abwitterungen bei der Frostausalzprüfung. Auch beim Chloridmigrationskoeffizient fallen diese beiden Etappen auf (Abbildung 16): Die bei sommerlichen Temperaturen hergestellten Etappen zeigen einen im Vergleich zur Rohdichte um etwa 40 % zu hohen Chloridmigrationskoeffizienten. Bei den zerstörungsfreien Prüfungen fallen diese Etappen jedoch nicht auf (Tabelle 24). Somit könnte vermutete werden, dass möglicherweise die hohen Lufttemperaturen diese Qualitätsminderung massgeblich verursachten, wie es auch die in Jacobs et al. (2014) [18] dargestellten Ergebnisse zeigen. Bei den Festbetoneigenschaften insgesamt ist der Temperatureinfluss aber nicht systematisch (Tabelle 9).

Es bestehen somit Hinweise, dass die in Tab. 23a der SIA 262 aufgeführten Nachbehandlungsdauern bei Temperaturen  $> 15$  °C nicht immer genügend sind (Abbildung 28 bis Abbildung 30). Zweckmässiger wäre für die Betonsorten D – G in Tabelle 23a eine Nachbehandlungsdauer von 7 Tagen zu fordern, worauf bereits in Jacobs et al. (2014) hingewiesen wurde.

Zudem sollte in der SIA 262 die Nachbehandlungsdauer nicht mehr an die Druckfestigkeitsentwicklung gekoppelt werden, worauf ebenfalls bereits in Jacobs et al. (2014) hingewiesen wurde und auch weitere Untersuchungen belegen.

## 4.7 Empfehlungen für Prüfungen

Das Konzept der Betonfamilie zum Nachweis der in der SN EN 206 geforderten Betoneigenschaften wird von den Betonwerken angewandt, da es grosse wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt. Jedoch liegen deshalb für die einzelnen Betonsorten nur wenige Prüfergebnisse vor. Aus Sicht des Bauherrn wäre es von Vorteil, wenn die Anwendung des Betonfamilienkonzepts bei Dauerhaftigkeitsprüfungen eingeschränkt werden würde. Betonfamilien

sollten nicht nur wie in Tabelle NA.15 der SN EN 206 beschrieben bloss aufgrund des w/z-Wertes und Luftgehaltes, sondern auch nur, wenn die gleiche Zement- und Zusatzstoffart verwendet wird.

Auch sollten die Zertifizierungsstellen dazu verpflichtet werden, dass Betonwerke nur Zertifikate erhalten, wenn die wesentlichen Eigenschaften des Betons fortlaufend erreicht werden oder die Abnehmer über diese Abweichungen vom Betonwerk informiert werden müssen. Als wesentliche Eigenschaften werden u.a. die vollständige Einhaltung der Grenzwerte für die geforderten Festbetoneigenschaften als auch die Prüfhäufigkeit und Betonzusammensetzung gesehen. Bei den Frischbetoneigenschaften könnte eventuell weniger streng vorgegangen werden, sofern diese keine negativen Auswirkungen auf die Betonqualität im Bauteil haben. Konkret bedeutet dies, dass der Frischbeton wohl im Einzelfall etwas steifer sein dürfte, aber auf keinen Fall zu flüssig sein darf, um keine Entmischung im Bauteil zu erhalten.

Deshalb wird Bauherrn Folgendes beim Einsatz von Tiefbaubeton (Betonarten D bis G) empfohlen:

- Prüfungen nur von anerkannten (akkreditierten) Laboren durchführen zu lassen
- Die Ergebnisse von früheren Frisch- und Festbetonprüfungen des Betonwerkes einfordern und auswerten.
- Annahmekriterien für Frischbetonkontrollen festzulegen und umzusetzen.
- Die Ergebnisse der Frischbetonkontrollen (Ausbreit- oder Setzmass, Luftgehalt und Rohdichte jeweils ohne Aufsatzrahmen<sup>8</sup>, Wassergehalt) des laufenden Bauvorhabens laufend auszuwerten, um allfällige Hinweise auf ungenügende Betoneigenschaften zu erhalten.
- Prüfung des auf die Baustelle gelieferten Betons mit der Prüfungsart TT-1 vornehmen.
  - Hinweise zu dieser Prüfungsart für die verschiedenen Betoneigenschaften sind im nationalen Anhang der SN EN 13670 enthalten. Die in der SN EN 13670 aufgeführte Prüfungshäufigkeit ist baustellenspezifisch zu überprüfen und ggf. anzupassen. Diese Prüfungsart sollte im Werkvertrag gefordert werden.
  - Ergeben sich ungenügende Eigenschaften, sind Bohrkern dem Bauteil zu entnehmen und zu prüfen.
- Prüfung des im Bauteil eingebauten Betons mit der Prüfungsart TT-2, zusätzlich zur Prüfungsart TT-1. Es bestehen hier zwei Möglichkeiten:
  - Entweder informative Bestimmung der Festbetoneigenschaften an Bohrkernen aus den Bauteilen gemäss Prüfungsart TT-2, um Informationen für verbindliche Forderungen bei späteren Bauvorhaben zu sammeln, oder
  - Forderung der in der SN EN 13670 aufgeführten Richtwerte für die Prüfungsart TT-2 als Grenzwerte. Gemäss den hier gewonnenen Ergebnissen als auch den bereits vorhandenen Erkenntnissen (vgl. Abschnitt 1.2.2) können die Richtwerte sowohl beim Chlorid- als auch Karbonatisierungswiderstand zuverlässig eingehalten werden, wenn die Zementart und ggf. Zusatzstoffart entsprechend gewählt wird. Die Erfahrungen zeigen, dass Luftporenbildner verwendet werden müsste, um den geforderten Frosttausalz widerstand zuverlässig zu erreichen. Ohne den Einsatz von Luftporenbildner bei der Betonherstellung ist es schwieriger zuverlässig einen hohen Frosttausalz widerstand nach SIA 262/1 zu erreichen.
  - Um die Bauteilqualität ausreichend charakterisieren zu können, wird empfohlen mindestens an vier Etappen alle relevanten Eigenschaften zu untersuchen. Da Baustoffinhomogenitäten die Betoneigenschaften sehr unterschiedlich beeinflussen, wäre es gemäss Leemann et al. notwendig, z.B. an mindestens 10 Bauteilbereichen die Dau-

<sup>8</sup> wobei bei der Rohdichte- und Luftgehaltsbestimmung kein Aufsatzrahmen verwendet werden sollte, da sonst vor allem bei sehr weichen Betonen möglicherweise zu hohe Luftgehalte nicht erkannt werden, was zu Festigkeitsproblemen im Bauteil führen könnte

erhaftigkeitseigenschaften zu bestimmen. Auch wenn die sehr wenigen vorliegenden Ergebnisse darauf hindeuten, dass die Eigenschaften innerhalb einer Betoncharge und verschiedenen Betonchargen ähnlich streuen, wird empfohlen sowohl einzelne Etappen mehrfach und auch verschiedene Etappen zu untersuchen.

- Bei der Entnahme und Prüfung von Bohrkernen sollte Folgendes beachtet werden:
  - Bei der Bestimmung der Bohrkerndruckfestigkeit sollte beachtet werden, dass trotz sorgfältiger Arbeit aller Beteiligten es manchmal dazu kommen kann, dass die Bohrkerndruckfestigkeit mehr als 15 % unter der Druckfestigkeit am separat hergestellten Würfel liegen kann. Ob dies für das Bauwerk relevant ist, ist im Einzelfall zu beurteilen. Jedoch sollte mit Bedacht vorgegangen werden, falls dem Unternehmer eine «schlechte Qualität» vorgeworfen würde, falls die Abweichung > 15 % beträgt. Sowohl bei den hier ermittelten Ergebnissen (Abbildung 13) als auch Ergebnissen Dritter (z.B. Tabelle 2) sind Abweichungen von bis zu 30 % (und vereinzelt auch mehr) trotz sorgfältigem Einbau und Nachbehandlung möglich.
  - Bei der Auswahl der Bohrkernentnahmestellen ist zu beachten, dass die Betonqualität im Bauteil deutlich u.a. durch die Bauteilgeometrie und die Frischbetonqualität (u.a. Stabilität) bestimmt wird (vgl. Abschnitt 1.2.1). Bohrkernentnahmestellen sind folglich sorgfältig auszuwählen. Um untereinander gut vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, ist es notwendig, dass die Bohrkernentnahmestellen bei den zu untersuchenden Bauteilen ähnlich angeordnet sind (z.B. Abstand von Boden, gleichzeitige Bohrkernentnahme aus Wänden und Decken nur bewusst wählen).
  - Wenn immer möglich sollten Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm geprüft werden, da verschiedene Hinweise bestehen, dass Bohrkern mit einem Durchmesser von 50 mm zumindest manchmal eine schlechtere Betonqualität als 100 mm Bohrkern ergeben. Die Vorgaben der SN EN 12504-1 bzw. SN EN 13791 sowie der SIA 262/1 bzw. SN EN 13670 sollten entsprechend angepasst bzw. mit Hinweisen versehen werden.
- Bei zerstörungsfreien Prüfungen ist zu beachten:
  - Bei der Luftpermeabilität sollte ein geometrischer Mittelwert von maximal  $0.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  und nicht der in der SIA 262/1 enthaltene Wert (der auch nicht dem geometrischen Mittelwert entspricht) von  $0.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  gefordert werden (vgl. auch Jacobs, 2006). Mit dieser zerstörungsfreien Prüfung könnten viele Bauteile und Betonieretappen mit dem Ziel geprüft werden, um gezielt Bereiche (Stellen) z.B. mit hohen und tiefen Luftpermeabilitäten für Bohrkernentnahmen festzulegen.
  - Die Abschätzung der Druckfestigkeit aus der Prellhärte gemäss SN EN 12504-1 sollte, wenn überhaupt, nur vorgenommen werden, wenn bauwerksspezifisch mittels Bohrkernprüfungen nachgewiesen wurde, dass ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Bohrkerndruckfestigkeit und der aus der Prellhärte abgeleiteten Druckfestigkeit besteht.

## 4.8 Forschungsbedarf

Die Untersuchungen ergaben Hinweise auf Unterschiede zwischen der Betonqualität im separat hergestellten Probekörper und der von Bohrkernen aus Bauteilen. Jedoch konnten die Unterschiede nicht ausreichend genau quantifiziert werden, um für die Prüfungsart TT-2 Grenzwerte vorzuschlagen. Dies bedeutet, dass der Bauherr mit dem Konformitätsnachweis, bzw. Prüfungen nach TT-1, nicht immer sicher sein kann, ob im Bauteil die notwendige Betonqualität vorhanden ist. Dies gilt wahrscheinlich selbst dann, wenn den Empfehlungen in den Abschnitten 4.6 und 4.7 gefolgt würde.

Folglich sollte in weiteren Forschungsarbeiten die Betonqualität im Bauteil und die im separat hergestellten Probekörper bestimmt werden. Dies sollte idealerweise bei Linienbaustellen mit Beton mit verschiedenen Bindemitteln (Zementen) erfolgen, bei denen ca. 8 Etappen zu untersuchen wären. Dabei wären die Einbau-, Nachbehandlungs- und Umgebungsbedingungen möglichst präzise zu erfassen, um weitere Hinweise auf den Einfluss dieser Parameter zu bekommen.

Auch ist dem Astra zu empfehlen, dass vermehrt Prüfungen nach TT-2 (Bohrkernprüfung im Alter von 28 Tagen) und TT-3 (Bohrkernprüfung im Alter von Monaten bis Jahren) bei Bauvorhaben erfolgen. Die so gewonnenen Daten können dann mit weiteren Informationen (siehe Absatz vorher) einer Forschungsstelle zur Auswertung übergeben werden.

## Anhänge

<b>I</b>	<b>Daten zu den Bauwerken.....</b>	<b>59</b>
I.1	Bauwerk Ep.....	59
I.2	Bauwerk Gn.....	66
I.3	Bauwerk Ha.....	73
I.4	Bauwerk Ma.....	78
I.5	Bauwerk Gr.....	85
I.6	Bauwerk Po.....	91



# I Daten zu den Bauwerken

## I.1 Bauwerk Ep

Abbildung 1 zeigt einen Querschnitt des geprüften Bauwerks.

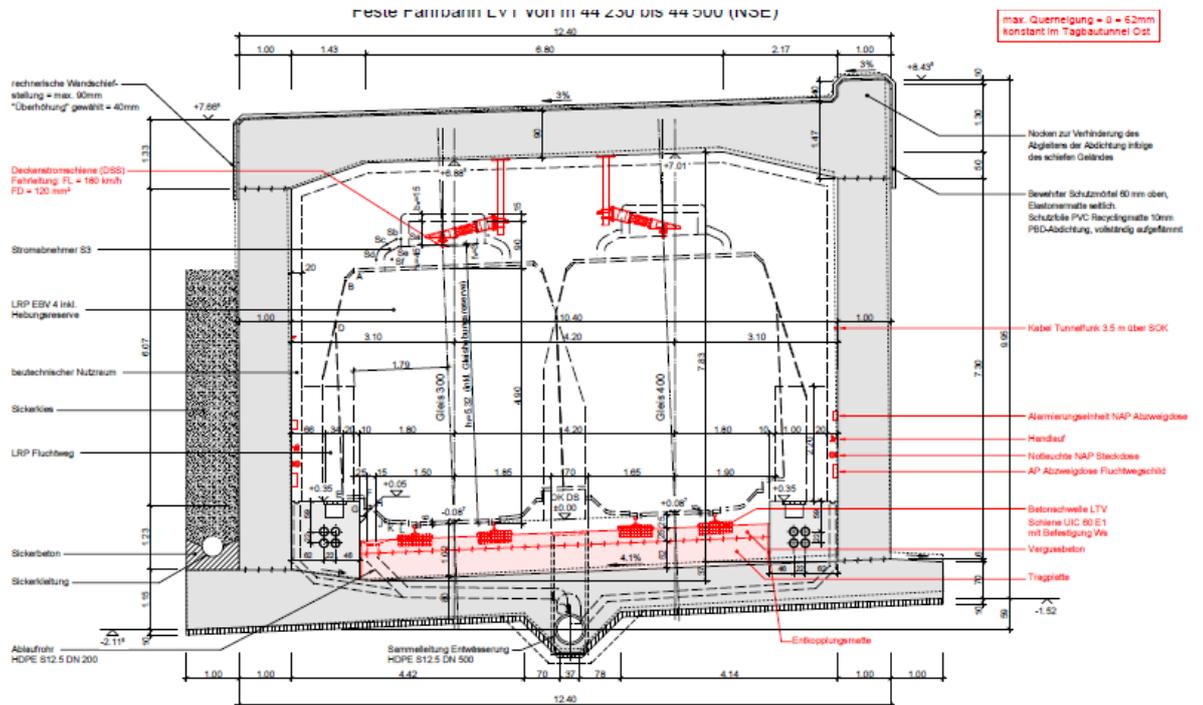


Abbildung 1: Normalprofil des Tagbautunnels Ost im Bereich der Festen Fahrbahn

**Tabelle 1: Bestellte Betonqualität**

Betonsorte	[-]	F	gemäss SN EN 206-1
<b>Frischbeton</b>			
Mindestzementgehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	320*	Normanforderung XD3
Grösstkorn	[mm]	32	
w/z-Wert	[-]	≤ 0.45*	Normanforderung XD3
Luftgehalt	[Vol.-%]	3.0	Zielwert
Chloridgehalt	[-]	Cl 0.1	
Konsistenz	[-]	F4	
<b>Festbeton</b>			
Druckfestigkeit	[-]	C30/37	z.T. auch C40/50
Expositionsklassen	[-]	XD3, XF2, XC4	
Frostausatzwiderstand	[g/m <sup>2</sup> ]	≤ 1200*	Normanforderung XF2
Chloridmigrationskoeffizient	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	≤ 10*	Normanforderung XD3

\*ohne Grenzabweichung

**Tabelle 2: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen der Betonsorte F**

Datum	[dd.mm.yy]	13.5.2016	31.5.2016	17.6.2016
Uhrzeit	[-]	9:22	11:01	9:09
Grösstkorn	[mm]	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	9.6	11.8	14.0
Betontemperatur	[°C]	22.1	21.4	21.0
Luftgehalt	[Vol.-%]	3.0	3.8	5.3
w/z**	[-]	0.47	0.48	0.44
Verdichtungsmass	[mm/-]	410	510	530
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2380	2390	2300
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>				
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	58.9	52.2	54.4
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2430	2370	2360
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	100	400	100
Chloridmigrationskoeffizient	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	6.5	4.0	4.4
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]	2465	2321	2442
Karbonatisierungswiderstand	[mm/a <sup>1/2</sup> ]			3.7
<b>Festbeton 28 Tage – Bohrkerne</b>				
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	34.5	-	41.5
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2340	-	2360
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	400		800
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	8.2	-	7.2
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2373	-	2315
Karbonatisierungswiderstand Aussen (Innen) Seite	[mm/a <sup>1/2</sup> ]			4.5 (3.5)
<b>Festbeton 11 Monate – Bohrkerne</b>				
Druckfestigkeit** Ø 50 / 100 mm	[N/mm <sup>2</sup> ]	43.0 / 47.9		47.0/-
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2370 / 2350		
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	500		200
Rohdichte FTW	[kg/m <sup>3</sup> ]	2600		2310
Chloridmigrationskoeffizient ***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	5.7		5.5
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2273		2345
Karbonatisierungswiderstand Aussen (Innen) Seite	[mm/a <sup>1/2</sup> ]			2.8 (3.4)

\*mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 12 kg/m<sup>3</sup>

\*\* Mittelwert von 3 Prüfkörpern: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkerne mit Ø = l = 100 mm

\*\*\*mit Randbeton

**Tabelle 3: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen der Betonsorte F**

Datum	[dd.mm.yy]	21.6.2016	22.6.2016	6.7.2016	20.7.2016
Uhrzeit	[-]	9:03	9:14	9:01	8:38
Grösstkorn	[mm]	32	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	17.5	20.8	20.7	19.8
Betontemperatur	[°C]	22.5	23.9	26.6	27.2
Luftgehalt	[Vol.-%]	4.9	4.0	5.2	4.9
w/z**	[-]	0.48	0.49	0.47	0.42
AM/Verdichtungsmass	[mm/-]	460	510	540	490
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2340	2380	2310	2320
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>					
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	55.1	50.2	53.1	52.2
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2370	2380	2340	2400
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	300 (hoch)	40	100	90
Rohdichte Scheibe	[kg/m <sup>3</sup> ]				2420
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	5.2	7.4	2.8	6.0
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]	2438	2388	2360	2396
<b>Festbeton 28 Tage – Bohrkerne</b>					
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	-	-	-	48.0
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	2340
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	-	-	-	70
Rohdichte Scheibe	[kg/m <sup>3</sup> ]				2310
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	-	-	-	4.1
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	2296

\*mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 12 kg/m<sup>3</sup>

\*\* Mittelwert von 3 Prüfkörpern: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkerne mit  $\varnothing = l = 100$  mm

\*\*\*mit Randbeton

**Tabelle 4: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen der Betonsorte F**

Datum	[dd.mm.yy]	8.12.2016	17.3.2017	23.5.2017
Uhrzeit	[-]	9:05	8:52	9:03
Grösstkorn	[mm]	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	1	8	16.4
Betontemperatur	[°C]	14	16	24.1
Luftgehalt	[Vol.-%]	2.4	4.0	2.6
w/z**	[-]	0.46	0.49	0.47
AM/Verdichtungsmass	[mm/-]	520 / -	480 / -	510 / -
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2370	2350	2370
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>				
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	63.3	56.6	61.2
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2410	2370	2420
Frosttausalzwiderstand	[g/m <sup>2</sup> ]	1200	300	800
Rohdichte Scheibe	[kg/m <sup>3</sup> ]	2410	2340	2380
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	6.5	5.3	6.8
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]	2421	2387	2462
Karbonatisierungswiderstand	[mm/a <sup>1/2</sup> ]	3.3	3.6	2.5
<b>Festbeton 28 Tage – Bohrkerne</b>				
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	43.6	43.3	40.9
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2330	2370	2380
Frosttausalzwiderstand	[g/m <sup>2</sup> ]	500	200	300
Rohdichte Scheibe	[kg/m <sup>3</sup> ]	2310	2240	2200
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	7.6	12.9	11.3
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2315	2283	2334
Karbonatisierungswiderstand Aussen (Innen) Seite	[mm/a <sup>1/2</sup> ]	4.1 (3.3)	5.5 (4.1)	3.9 (3.1)
<b>Festbeton 300 Tage – Bohrkerne</b>				
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	58.9 (62.0)		
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2350 (2370)		
Frosttausalzwiderstand	[g/m <sup>2</sup> ]	600		
Rohdichte Scheibe	[kg/m <sup>3</sup> ]	2310		
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	8.4		
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2358		
Karbonatisierungswiderstand Aussen (Innen) Seite	[mm/a <sup>1/2</sup> ]	2.7 (2.0)		

\*mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 12 kg/m<sup>3</sup>\*\* Mittelwert von 3 Prüfkörpern: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkerne mit  $\varnothing = l = 50$  mm ( $\varnothing = l = 100$  mm);

\*\*\*mit Randbeton

**Tabelle 5: Meteorologische Daten einer nahe gelegenen Station**

	Niederschlag [mm/h]	relative Feuchte [%]	Wind [km/h]	Lufttemperatur [°C]
<b>13. – 31.5.2016</b>				
Minimum	0.0	28	0.0	4.7
10 % Fraktile	0.0	44	0.10	7.5
Median	0.0	74	3.5	13.3
90% Fraktile	0.5	89	11	22.4
Maximum	11.9	93	19	27.5
<b>17.6. – 4.7.2016</b>				
Minimum	0.0	29	0	10.7
10 % Fraktile	0.0	45	0.1	13.2
Median	0.0	76	2.1	18.2
90% Fraktile	0.3	91	7.2	25.7
Maximum	8.4	93	17.9	33.4
<b>20.7. – 9.8.2016</b>				
Minimum	0.0	27	0.0	11.7
10 % Fraktile	0.0	45	0.1	15.1
Median	0.0	72	1.5	20.2
90% Fraktile	0.0	89	7.0	26.9
Maximum	7.6	93	12.6	33.4
<b>8. – 22.12.2016</b>				
Minimum	0.0	68	0.0	-3.0
10 % Fraktile	0.0	81	0.2	-2.1
Median	0.0	91	1.6	-0.7
90% Fraktile	0.0	93	5.4	1.6
Maximum	0.3	95	11.8	4.4
<b>17. 3. - 6.4. 2017</b>				
Minimum	0.0	28	0.0	1.8
10 % Fraktile	0.0	40	0.1	5.9
Median	0.0	66	1.9	10.7
90% Fraktile	0.0	83	8.8	18.0
Maximum	2.3	90	17.2	22.0
<b>23.5. - 13.6.2017</b>				
Minimum	0.0	21	0.0	5.6
10 % Fraktile	0.0	41	0.2	12.4
Median	0.0	65	2.6	18.6
90% Fraktile	0.0	87	9.5	26.6
Maximum	4.8	92	19.3	31.8

Am 29.9.2016 und 5.10.2017 wurden die Luftpermeabilität und die Prellhärte bestimmt. In Tabelle 6 sind die geometrischen Mittelwerte der Luftpermeabilitäten als auch die aus der Prellhärte abgeschätzte Würfeldruckfestigkeit angegeben. Zur Umrechnung der Prellhärte in die Würfeldruckfestigkeit wurden der Median gebildet und die „EU-Kurve“ verwendet, die den mittleren Zusammenhang zwischen der Prellhärte und der Druckfestigkeit beschreibt. Die Messungen erfolgten im Bereich der Bohrkernentnahmestellen.

**Tabelle 6: Ergebnisse der Luftpermeabilitäts- und Prellhammermessungen**

Bauteilherstellung	Prüfdatum	Alter [d]	Luftpermeabilität [10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ]	Betonfeuchte Tramex [M.-%]	aus Prellhärte abgeschätzte Würfeldruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
13.5.2016	29.9.16	139	0.10	4.5 – 5.0	65
	5.10.17	510	0.11	4.3 – 4.6	80
17.6.2016	29.9.16	104	0.32	4.5 – 5.0	60
	5.10.17	475	0.04	4.3 – 4.5	80
20.7.2016	29.9.16			nicht zugänglich	
23.5.2017	5.10.17	135	0.02	4.1 - 4.5	77
17.3.2017	5.10.17	202	0.10	4.1 - 4.5	66
8.12.2016	5.10.17	301	0.05	4.5 - 4.8	> 90

**Tabelle 7: Ergebnisse der Bohrkernprüfungen Etappe 38 im Alter von 302 Tagen**

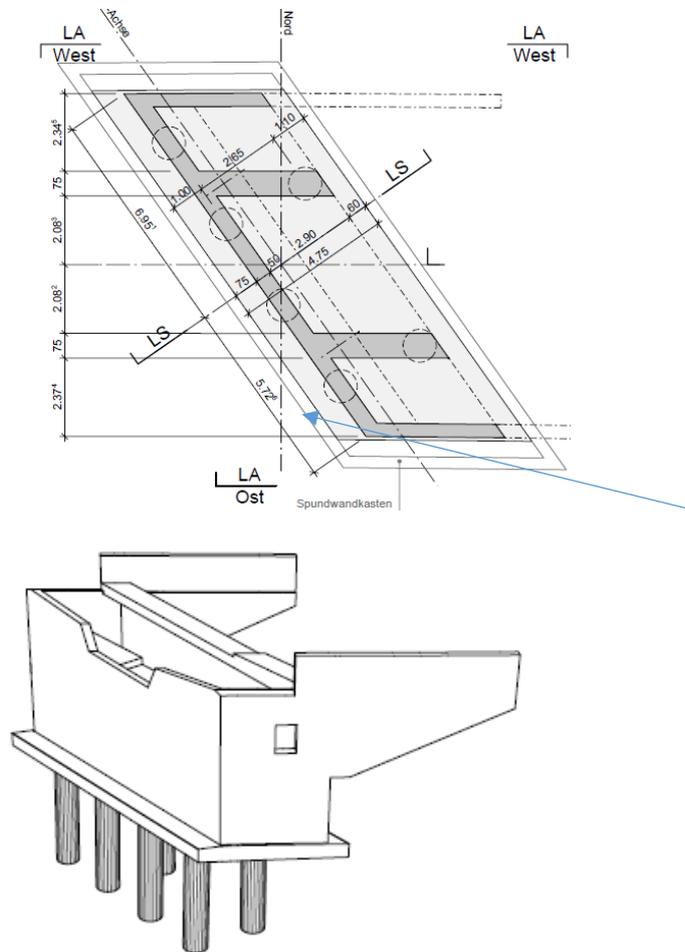
Durchmesser [mm]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	
	Einzel-	Median	Einzel-	Median
100	61.9		2390	
100	62.7		2350	
100	61.5	62.0	2360	2370
50	54.0		2320	
50	61.7		2340	
50	59.0		2340	
50	54.9		2310	
50	64.9	58.9	2420	2350

**Tabelle 8: Ergebnisse der Bohrkernprüfungen Etappe 16 im Alter von 340 Tagen**

Durchmesser [mm]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	
	Einzel-	Median	Einzel-	Mittelwert
100	48.6		2340	
100	47.2	47.9	2360	2350
50	31.8		2320	
50	47.4		2390	
50	49.8	43.0	2390	2370

## I.2 Bauwerk Gn

In nachfolgenden Abbildungen sind die untersuchten Bauteile illustriert.



**Abbildung 2: Grundriss und Ansicht der WL-Kammer Nord; die Bohrkerne wurden auf der Innenseite entnommen**



Abbildung 3:  
Lage der  
Bohr-  
kern-  
ent-  
nah-  
me-  
st-  
el-  
len  
bei  
der  
Stüt-  
z-  
ma-  
uer  
Ost,  
Seite  
West



Abbil-  
dung 4:  
Lage der  
Bohr-  
kern-  
ent-  
nah-  
me-  
st-  
el-  
len  
bei  
der  
Flü-  
gel-  
wand  
West,  
Seite  
Süd

**Tabelle 9: Bestellte Betonqualität**

<b>Eigenschaft</b>	<b>Einheit</b>	<b>Anforderung</b>	<b>Bemerkung</b>
Betonsorte	[-]	F331	gemäss SN EN 206-1
<b>Frischbeton</b>			
Mindestzementgehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	320*	Normanforderung XD3
Grösstkorn	[mm]	32	
w/z-Wert	[-]	≤ 0.45*	Normanforderung XD3
Luftgehalt	[Vol.-%]	3.0	Zielwert
Chloridgehalt	[-]	Cl 0.1	
Konsistenz	[-]	C3	
<b>Festbeton</b>			
Druckfestigkeit	[-]	C30/37	z.T. auch C40/50
Expositionsklassen	[-]	XD3, XF2, XC4	
Frostausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	≤ 1200*	Normanforderung XF2
Chloridmigrationskoeffizient	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	≤ 10*	Normanforderung XD3

\*ohne Grenzabweichung

**Tabelle 10: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen von der Betonsorte F**

Datum	[dd.mm.yy]	4.12.2015	15.12.2015	12.1.2016	14.1.2016
CEM II/B-M (T-LL)	[kg/m <sup>3</sup> ]	340	343	340	340
Grösstkorn	[mm]	32	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	4.9	1.0	5.9	1.8
Betontemperatur	[°C]	16.5	12.5	11.5	12.8
Luftgehalt	[Vol.-%]	5.7	2.8	3.0	2.9
w/z**	[-]	0.44	0.41	0.52	0.49
Ausbreit-/Verdichtungsmass	[mm/-]	470 / -	- / 1.03	- / 1.03	- / 1.02
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2340	2440	2360	2390
<b>Festbeton 7 Tage – Würfel</b>					
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	51.9	-	-	-
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2400	-	-	-
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>					
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	62.3	67.2	61.9	58.9
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2390	2450	2390	2400
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	80	1900	-	-
Chloridmigrationskoeffizient	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	6.8	5.2	-	-
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]	2390	2480	-	-
<b>Festbeton 28 Tage – Bohrkerne</b>					
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	-	48.5	-	-
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	2460	-	-
Frosttausalz widerstand	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	-	50	-	-
Chloridmigrationskoeffizient***	[g/m <sup>2</sup> ]	-	7.8	-	-
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	2446	-	-

\*mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 12 bzw. 14 kg/m<sup>3</sup>

\*\* Mittelwert 2 oder 3 Prüfkörper: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkerne mit  $\varnothing = l = 50$  mm

\*\*\*mit Randbeton in Abweichung zur SIA 262/1

**Tabelle 11: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen von der Betonsorte F**

Datum	[dd.mm.yy]	25.01.16	3.02.16	12.2.16	26.2.16
CEM II/B-M (T-LL)	[kg/m <sup>3</sup> ]	340	340	340	343
Grösstkorn	[mm]	32	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	6.8	4.4	6.6	5.1
Betontemperatur	[°C]	14.2	15.1	16.0	15.0
Luftgehalt	[Vol.-%]	4.2	4.4	4.0	4.7
w/z**	[-]	0.48	0.43	0.41	0.39
Ausbreit-/Verdichtungsmass	[mm/-]	530/1.01	630/1.04	570/1.04	310/1.18
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2350	2360	2380	2360
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>					
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	61.2	58.3	68.5	70.1
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2370	2390	2410	2430

\*mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 12 bzw. 14 kg/m<sup>3</sup>

\*\* Mittelwert 2 oder 3 Prüfkörper: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkerne mit  $\varnothing = l = 50$  mm

**Tabelle 12: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen von der Betonsorte F**

Datum	[dd.mm.yy]	15.4.2016		23.4.2016		
CEM II/B-M (T-LL)	[kg/m <sup>3</sup> ]	340	340	340	340	340
Grösstkorn	[mm]	32	32	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	5.0	2.9	13.3	13.3	13.3
Betontemperatur	[°C]	20.5	19.8	21.6	21.5	21.4
Luftgehalt	[Vol.-%]	5.0	2.9	2.45	3.3	-
w/z**	[-]	0.35		0.40	-	-
Ausbreit-/Verdichtungsmass	[mm/-]	1.03 / 480	600	550 / 1.04	540	430
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2340	2400	2410	2390	-
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>						
3 T-Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	39.0	-	2 T: 28.9	-	-
3 T -Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2380	-	2 T: 2410	-	-
28 T-Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	60.2		67.8	-	-
28 T -Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2380		2450	-	-
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	50				

\*mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 12 bzw. 14 kg/m<sup>3</sup>\*\* Mittelwert 2 oder 3 Prüfkörper: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkern mit  $\varnothing = l = 50$  mm**Tabelle 13: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen von der Betonsorte F**

Datum	[dd.mm.yy]	29.4.2016		9.5.2016	12.5.2016
CEM II/B-M (T-LL)	[kg/m <sup>3</sup> ]	340	340	340	340
Grösstkorn	[mm]	32	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	1.0	4.0	23.2	12.1
Betontemperatur	[°C]	16.2	17.0	23.9	24.3
Luftgehalt	[Vol.-%]	4.5	4.8	4.3	4.9
w/z**	[-]	0.36	-	0.39	0.37
Ausbreit-/Verdichtungsmass	[mm/-]	610	480	390 / 1.16	370 / 1.10
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2380	2360	2350	2350
<b>Festbeton – Würfel</b>					
3 T-Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	41.4	-	44.2 (2 T)	
3 T -Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2360	-	2420 (2 T)	
28 T-Druckfestigkeit Würfel **	[N/mm <sup>2</sup> ]			63.9	64.4
28 T-Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]			2420	2410
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]				50
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]				7.2
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]				2433
<b>Festbeton 28 Tage – Bohrkern</b>					
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]				50.0
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]				2400
Frosttausalz widerstand	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]				80
Chloridmigrationskoeffizient***	[g/m <sup>2</sup> ]				8.0
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]				2404

\*mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 12 bzw. 14 kg/m<sup>3</sup>\*\* Mittelwert 2 oder 3 Prüfkörper: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkern mit  $\varnothing = l = 50$  mm

\*\*\* mit Randbeton in Abweichung zur SIA 262/1

**Tabelle 14: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen von der Betonsorte F**

Datum	[dd.mm.yy]	20.5.2016			1.6.2016	
CEM II/B-M (T-LL)	[kg/m <sup>3</sup> ]	340	340	340	340	340
Grösstkorn	[mm]	32	32	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	7.5	7.5	13.6	14.4	15.2
Betontemperatur	[°C]	18.7	18.8	24.6	20.6	20.4
Luftgehalt	[Vol.-%]	4.9	4.0	5.8	4.1	4.8
w/z**	[-]	0.38	-	-	0.38	
Ausbreit-/Verdichtungsmass	[mm/-]	410 / 1.03	380	380 / -	390 / 1.04	380 / -
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2340	2370	2340	2390	2380
<b>Festbeton 3 Tage – Würfel</b>						
3 T-Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	45.9			44.0 (2 T)	
3 T -Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2410			2420 (2 T)	
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>						
Druckfestigkeit Würfel **	[N/mm <sup>2</sup> ]	60.9			64.0	
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2420			2420	

\*mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 12 bzw. 14 kg/m<sup>3</sup>

\*\* Mittelwert 2 oder 3 Prüfkörpern: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkerne mit  $\varnothing = l = 50$  mm

\*\*\*mit Randbeton in Abweichung zur SIA 262/1

**Tabelle 15: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen von der Betonsorte F**

Datum	[dd.mm.yy]	8.6.2016	20.6.2016	29.6.16	15.7.16
Bauteil	[-]	Flügelwand West, Fahrbahnplatte 7. E		Fahrbahnplatte 8. E	Konsolkopf 5. E
Betonsorte	[-]	F331-0	F331-0	F331-0	F331-0
Lieferschein	[-]	111528	112107	112681	331402
CEM II/B-M (T-LL)	[kg/m <sup>3</sup> ]	340	340	340	340
Grösstkorn	[mm]	32	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	18.1	21.2	22.2	19.1
Betontemperatur	[°C]	26.0	24.4	26.1	24.2
Luftgehalt	[Vol.-%]	3.5	3.9	4.0	4.9
w/z**	[-]	0.39	0.38	0.38	0.42
Ausbreit-/Verdichtungsmass	[mm/-]	430 / 1.03	520 / 1.05	330 / 1.04	540 / < 1.02
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2420	2370	2380	2360
<b>Festbeton 3 Tage – Würfel</b>					
2 T-Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	42.6		46.7	
2 T -Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2400		2440	
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>					
Druckfestigkeit Würfel **	[N/mm <sup>2</sup> ]	66.0	65.8	59.7	49.0
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2410	2410	2420	2370
Frostausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	100			
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	4.7			
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]	2433			
<b>Festbeton 28 Tage – Bohrkern</b>					
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	51.0			
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2430			
Frostausalz widerstand	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	20			
Chloridmigrationskoeffizient***	[g/m <sup>2</sup> ]	6.8			
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2427			

\*mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 12 bzw. 14 kg/m<sup>3</sup>

\*\* Mittelwert 2 oder 3 Prüfkörpern: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkerne mit  $\varnothing = l = 50$  mm

\*\*\*mit Randbeton in Abweichung zur SIA 262/1

**Tabelle 16: Meteorologische Daten einer nahegelegenen Station**

	Niederschlag [mm/h]	relative Feuchte [%]	Wind [km/h]	Lufttemperatur [°C]
<b>15.12. – 7.1.2016</b>				
Minimum	0	63	0	-2.5
10 % Fraktile	0	79	0.1	-0.5
Median	0.1	89	2.6	3.1
90% Fraktile	0	94	6.5	5.4
Maximum	6.4	96	16.9	8.0
<b>12.5. – 1.6.2016</b>				
Minimum	0.0	0	0	0.3
10 % Fraktile	0.0	45	0.1	8.0
Median	0.3	73	4.5	13.8
90% Fraktile	0.8	91	10.9	20.8
Maximum	15.7	93	19	27.5
<b>8.6. – 27.6.2016</b>				
Minimum	0	29	0	10.7
10 % Fraktile	0	51	0.1	12.7
Median	0	83	2.3	16.3
90% Fraktile	1.0	92	8.9	23.6
Maximum	52.8	100	17.9	33.4

Die Prellhärte wurde bei allen Bauteilen am 20.9.2016 an jeweils 9 -11 Stellen bestimmt. Aus der Prellhärte wurde der Median pro Bauteil bestimmt und dann mit der „EU-Kurve“ die mittlere Druckfestigkeit abgeschätzt.

**Tabelle 17: Ergebnisse der Luftpermeabilitäts- und Prellhärtemessungen**

Bauteilherstellung	Luftpermeabilität [10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ]	Betonfeuchte Tramex [M.-%]	Luftpermeabilität [10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ]	Betonfeuchte Tramex [M.-%]	aus Prellhärte abgeschätzte Würfeldruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
					20.9.16	18.10.17
Prüftermin					20.9.16	18.10.17
8.6.2016	0.050	4.5	0.26	3.8 – 4.1	52	52
12.5.2016	0.075	4.5	0.07	3.9 – 4.2	53	80
4.12.2015	0.068	5.5	0.20	3.7 – 4.3	79	87

### I.3 Bauwerk Ha

In nachfolgenden Abbildungen sind die untersuchten Bauteile dargestellt.



Abbildung 5: Leitmauer



Abbildung 6: Widerlagerwand



Abbildung 7: Leitmauer



Abbildung 8: Leitmauer

**Tabelle 18: Bestellte Betonqualität**

<b>Bauteil</b>		<b>Brüstung</b>	<b>Bemerkung</b>
Betonsorte	[-]	G	gemäss SN EN 206-1
NPK-Position	[-]	762	
<b>Frischbeton</b>			
Mindestzementgehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	320*	Normanforderung XD3 (CH)
Grösstkorn	[mm]	32	
w/z-Wert	[-]	≤ 0.45*	Normanforderung XD3 (CH)
Luftgehalt	[Vol.-%]		
Chloridgehalt	[-]	Cl 0.1	
Konsistenz	[-]	C3	
<b>Festbeton</b>			
Druckfestigkeit	[-]	C30/37	
Expositionsklassen	[-]	XD3, XF4, XC4	
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	≤ 200/600*	Normanforderung XF4 (CH)
Chloridmigrationskoeffizient	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	≤ 10*	Normanforderung XD3 (CH)

\*ohne Grenzabweichung

**Tabelle 19: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen bei Wänden; die Frischbetonprüfungen wurden von einem Drittlabor durchgeführt; die Festbetonprüfungen erfolgten durch die TFB AG sofern nicht's anderes erwähnt.**

Datum	[dd.mm.yy]	20.10.2015	5.11.2015	1.12.2015	7.3.2016
CEM II/B-M (T-LL)	[kg/m <sup>3</sup> ]		325	325	340
Grösstkorn	[mm]	32	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]		12.5	9.8	4.8
Betontemperatur	[°C]		17.8	15.8	12.1
Luftgehalt	[Vol.-%]	5.9	3.6	4.5	4.8
w/z*	[-]	0.43	0.42	0.42	0.38
Ausbreitmass	[mm]	520	310	440	440
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2340	2390	2370	2370
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>					
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]		58****	53.3	53.5
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]		2470****	2430	2420
Frosttausalz-widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	300 (hoch)****		200	100
Chloridmigrationskoeff***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]			5.0	5.9
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]			2450	2451
<b>Festbeton 28 Tage – Bohrkern</b>					
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]			39.5	50.0
Rohdichte Bohrkern	[kg/m <sup>3</sup> ]			2370	2430
Frosttausalz-widerstand	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]			20	80
Chloridmigrationskoeff ***	[g/m <sup>2</sup> ]			13.0	4.9
Rohdichte Bohrkern	[kg/m <sup>3</sup> ]			2276	2372

\* mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 15.4 kg/m<sup>3</sup>

\*\* Mittelwert 2 oder 3 Prüfkörper: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkern mit  $\varnothing = l = 50$  mm

\*\*\*mit Randbeton

\*\*\*\*Drittlabor

**Tabelle 20: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen bei Wänden; die Frischbetonprüfungen wurden von einem Drittlabor durchgeführt; die Festbetonprüfungen erfolgten durch die TFB AG.**

Datum	[dd.mm.yy]	14.3.2016	15.3.2016	24.3.2016	29.3.2016	31.3.2016
CEM II/B-M (T-LL)	[kg/m <sup>3</sup> ]	340	350	340	340	340
Grösstkorn	[mm]	32	16	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	5.6	6.7	13.1	13.1	10.0
Betontemperatur	[°C]	12.8	15.4	15.6	17.2	16.3
Luftgehalt	[Vol.-%]	4.7	4.4	6.5	3.2	3.4
w/z*	[-]	0.41		0.42		0.40
Ausbreitmass	[mm]	420	0.41	465	445	460
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2364	2342	2308	2403	2387
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>						
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	53.4	54.8	49.3	51.6	49.8
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2400	2400	2340	2420	2420

\* mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 15.4 kg/m<sup>3</sup>

\*\* Mittelwert 2 oder 3 Prüfkörper: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkern mit  $\varnothing = l = 50$  mm

**Tabelle 21: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen bei Wänden; die Frischbetonprüfungen wurden von einem Drittlabor durchgeführt; die Festbetonprüfungen erfolgten durch die TFB AG.**

Datum	[dd.mm.yy]	15.4.16	15.4.16	18.4.16	2.5.16	2.6.16	2.6.16	14.6.16
CEM II/B-M (T-LL) (+FA)	[kg/m <sup>3</sup> ]	350	350	32	340	340	340	340
Grösstkorn	[mm]	16	16	32	32	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	10.4	11.4	5.9	8.2	15.7	17.6	16.3
Betontemperatur	[°C]	20.9	18.8	17.3	18.4	21.0	24.2	23.8
Luftgehalt	[Vol.-%]	4.4	4.8	4.9	3.2	5.2	5.4	4.2
w/z*	[-]	0.44	0.41	0.42	0.40	0.44	0.45	0.44
Ausbreitmass***	[mm]	410	460	475	420	460/1.06	470	420
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2340	2336	2341	2400	2323	2311	2365
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>								
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	51.0		51.4	62.4			
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2340		2400	2420			

\* mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 15.4 kg/m<sup>3</sup>

\*\* Mittelwert 2 oder 3 Prüfkörper: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkerne mit  $\varnothing = l = 50$  mm

\*\*\* am 2.6.2016 wurde auch das Verdichtungsmass (1.06) bestimmt

**Tabelle 22: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen bei Wänden; die Frischbetonprüfungen wurden von einem Drittlabor durchgeführt; die Festbetonprüfungen erfolgten durch die TFB AG.**

Datum	[dd.mm.yy]	22.6.2016	24.6.2016	27.6.2016	21.7.2016
CEM II/B-M (T-LL) (+FA)	[kg/m <sup>3</sup> ]	340	350	340	350
Grösstkorn	[mm]	32	16	32	16
Lufttemperatur	[°C]	20.6	24.9	16.9	23.2
Betontemperatur	[°C]	24.8	28.8	25.8	29.2
Luftgehalt	[Vol.-%]	3.7	4.1	3.4	3.7
w/z*	[-]	0.43	0.44	0.45	0.41
Ausbreitmass	[mm]	435	380	460	500
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2367	2353	2380	2380
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>					
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]		42.5		53.6
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]		2360		2400
Frostausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]		90		30
Rohdichte Scheibe	[kg/m <sup>3</sup> ]				2410
Chloridmigrationskoeff***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]		10.9		9.1
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]		2358		2364
<b>Festbeton 28 Tage – Bohrkerne</b>					
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]		34.5		43.5
Rohdichte Bohrkern	[kg/m <sup>3</sup> ]		2360		2380
Frostausalz widerstand	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]		2800		900
Rohdichte Scheibe	[kg/m <sup>3</sup> ]				2390
Chloridmigrationskoeff ***	[g/m <sup>2</sup> ]		14		11.8
Rohdichte Bohrkern	[kg/m <sup>3</sup> ]		2366		2389

\* mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 15.4 kg/m<sup>3</sup>

\*\* Mittelwert 2 oder 3 Prüfkörper: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkerne mit  $\varnothing = l = 50$  mm

\*\*\*mit Randbeton

**Tabelle 23: Meteorologische Daten der Station Zürich-Flughafen**

	Niederschlag [mm/h]	Luftfeuchtigkeit [%]	Wind [km/h]	Richtung [°]	mittlere Lufttemperatur [°C]
1. bis 16. Dezember 2015					
Minimum	0	56	0.4	0	-3.4
10 % Fraktile	0.00	69	1.10	51	0.3
Median	0.0	89	4.2	184	6.3
90 % Fraktile	0.0	100	7.9	270	13.5
Maximum	1.7	100	36.7	360	19.1
7. bis 24. März 2016					
Minimum	0	29	0.7	0	-2
10 % Fraktile	0	50	1.8	31	-0.3
Median	0	72	7.2	104	3.7
90 % Fraktile	0	91	14.4	286	8.4
Maximum	1.6	97	24.1	360	14.2
24. Juni bis 14. Juli 2016					
Minimum	0	33	1.1	0	9.7
10 % Fraktile	0	45	3.2	116	13.3
Median	0	79	6.8	247	18.4
90 % Fraktile	0.6	93	12.6	325	25.4
Maximum	10.2	97	20.5	360	31.8
21. Juli bis 9. August 2016					
Minimum	0	35	1.4	0	11.1
10 % Fraktile	0	50	2.9	67	14.8
Median	0	79	6.5	240	19.4
90 % Fraktile	0	94	13.0	338	25.6
Maximum	5.5	99	24.1	360	29.1

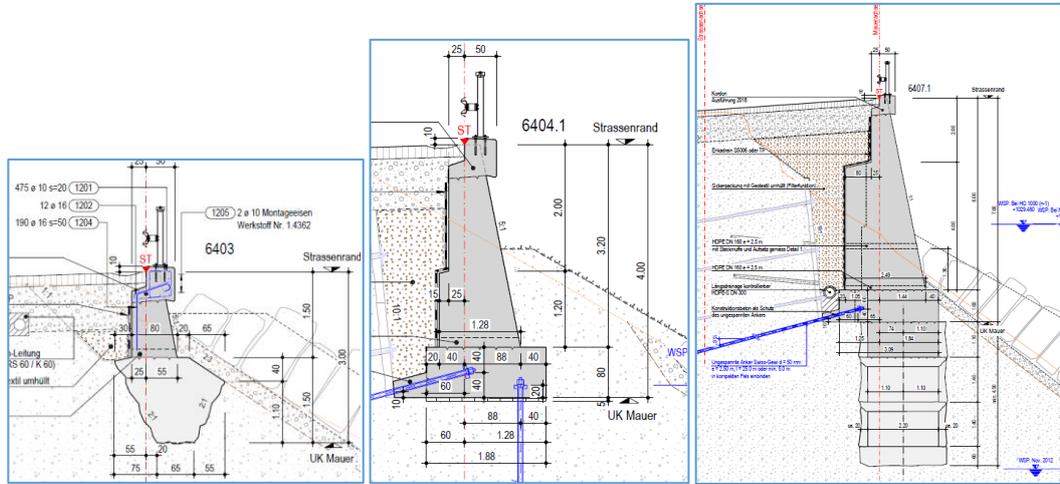
In Tabelle 6 sind die geometrischen Mittelwerte der Luftpermeabilitäten, die Anzahl der Luftpermeabilitätsmesswerte die über den Richtwert für die Luftpermeabilität liegen als auch die aus der Prellhärte abgeschätzte Würfeldruckfestigkeit angegeben. Zur Umrechnung der Prellhärte in die Würfeldruckfestigkeit wurden der Median der Prellhärteergebnisse gebildet und die „EU-Kurve“ verwendet.

**Tabelle 24: Ergebnisse der Luftpermeabilitäts- und Prellhammermessungen**

Bauteilherstellung	Luftpermeabilität [10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ]	Betonfeuchte Tramex [M.-%]	Luftpermeabilität [10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ]	Betonfeuchte Tramex [M.-%]	aus Prellhärte abgeschätzte Würfeldruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
Prüfdatum	20.9.16		18.10.17		20.9.16	18.10.17
1.13.15	0.35	5.0 – 5.5	0.49	3.7 – 4.2	37	44
7.3.16	0.01	5.0 – 5.5	0.31	4.4 – 4.8	40	70
24.6.16	0.18	4.0 – 4.5	0.28	3.6 – 3.9	81	> 90
21.7.16	0.006	4.0 – 4.5	0.11	3.7 – 3.8	75	> 90

## I.4 Bauwerk Ma

In nachfolgender Abbildung sind untersuchte Bauteile dargestellt.



**Abbildung 9: Querschnitte der Mauer bei Laufmeter 740 (links), 1250 und 1370 (rechts)**

**Tabelle 25: Bestellte Betonqualität**

Betonsorte	[-]	F	gemäss SN EN 206-1
<b>Frischbeton</b>			
Mindestzementgehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	300*	Normanforderung XF2
Grösstkorn	[mm]	32	
w/z-Wert	[-]	≤ 0.48	Anforderung TBA
Luftgehalt	[Vol.-%]	4.5 - 8.5	Anforderung Betonwerk
Konsistenz C	[-]	1.10 – 1.25	Anforderung Betonwerk
<b>Festbeton</b>			
Druckfestigkeit	[-]	C25/30	
Expositionsclassen	[-]	XF2	
Frostauszulwiderstand	[g/m <sup>2</sup> ]	≤ 1200*	Normanforderung XF2 Nachweis für TBA erfolgt mit BE I
Chloridwiderstand	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	(10)	keine Anforderung

\*ohne Grenzabweichung

**Tabelle 26: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen**

Datum	[dd.mm.yy]	15.4.2016	20.4.2016	10.5.2016
Uhrzeit	[-]	9:15	10:30	14:25
Grösstkorn	[mm]	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	7	8	19
Betontemperatur	[°C]	13	14	17
Luftgehalt	[Vol.-%]	6.0	6.4	5.3
w/z*	[-]	0.46	0.41	0.43
Verdichtungsmass	[mm/-]	1.15	1.15	1.11
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2358	2343	2348
<b>Festbeton 7 Tage – Würfel</b>				
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	34.6	34.2	32.6
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2393	2409	2372
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>				
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	46.6	47.0	44.6
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2400	2400	2380
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]		60	
Chloridmigrationskoeffizient ***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]		2.4	
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]		2450	
FTW nach D-R	[-]		erfüllt	
<b>Festbeton 28 Tage – Bohrkern</b>				
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	-	49.7	-
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	2405	-
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]		60	-
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	-	3.5	-
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	2402	-

\*mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 12 kg/m<sup>3</sup>\*\* 1 Prüfkörper (7 Tage) oder Mittelwert von 3 Prüfkörpern (28 Tage): Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkern mit  $\varnothing = l = 100$  mm;

\*\*\*mit Randbeton

**Tabelle 27: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen**

Datum	[dd.mm.yy]	27.5.2016	3.6.2016	8.6.2016	15.6.2016	23.6.2016
Uhrzeit	[-]	11:20	16:00	15:45	15:20	15:05
Grösstkorn	[mm]	32	32	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	21	13	21	17	33
Betontemperatur	[°C]	21	18	19	18	22
Luftgehalt	[Vol.-%]	4.6	7.0	6.5	5.7	6.5
w/z*	[-]	0.44	0.48	0.48	0.45	0.41
Verdichtungsmass	[mm/-]	1.12	1.12	1.12	1.11	1.11
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2381	2356	2369	2413	2311
<b>Festbeton 7 Tage – Würfel</b>						
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	32.2		32.9	38.2	29.1
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2453		2399	2459	2385
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>						
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	46.2	42.0	42.2	52.6	39.3
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2410	2390	2380	2420	2360
Frostausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]					40
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]					2.0
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]					2394
FTW nach D-R						
<b>Festbeton 28 Tage – Bohrkern</b>						
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	-			-	48.0
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]	-			-	2470
Frostausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]				-	500
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	-			-	4.1
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	-			-	2352

\*, \*\*, \*\*\*siehe Tabelle 19

**Tabelle 28: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen**

Datum	[dd.mm.yy]	6.7.2016	14.7.2016	22.7.2016	8.8.2016	16.8.2016
Uhrzeit	[-]	16:00	13:15	13:55	15:15	14:10
Grösstkorn	[mm]	32	32	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	29	13	25	27	22
Betontemperatur	[°C]	24	18	22	25	25
Luftgehalt	[Vol.-%]	6.0	5.8	5.2	5.7	5.2
w/z*	[-]	0.41	0.43	0.41	0.43	0.45
Verdichtungsmass	[mm/-]	1.13	1.12	1.13	1.12	1.18
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2308	2379	2358	2391	2404
<b>Festbeton 7 Tage – Würfel</b>						
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	36.4	37.5	34.7	36.1	39.4
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2352	2401	2401	2389	2416
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>						
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	46.3	51.2	46.6	51.5	50.5
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2360	2450	2410	2430	2420

\*, \*\*, \*\*\*siehe Tabelle 19

**Tabelle 29: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen**

Datum	[dd.mm.yy]	24.8.2016	2.9.2016	9.9.2016	16.9.2016	23.9.2016	4.10.2016
Uhrzeit	[-]	10:40	10:45	13:30	13:25	13:10	13:30
Grösstkorn	[mm]	32	32	32	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	21	19	22	20	21	13
Betontemperatur	[°C]	18	20	20	19	20	20
Luftgehalt	[Vol.-%]	7.4	6.5	6.8	4.6	5.0	5.1
w/z*	[-]	0.43	0.47	0.45	0.44	0.44	0.43
Verdichtungsmass	[mm/-]	1.14	1.12	1.13	1.11	1.12	420
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2302	2328	2374	2408	2413	
<b>Festbeton 7 Tage – Würfel</b>							
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]		33.8	34.2	39.3	40.8	35.2
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]		2392	2441	2477	2433	2439
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>							
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	43.6	47.6	53.6	58.4	54.1	56.6
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2380	2390	2420	2460	2440	2450
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	80					
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]	2340					
Chloridmigrationskoeff ***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	4.4					
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]	2419					
<b>Festbeton 28 Tage – Bohrkerne</b>							
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	47.7	45.6		-	-	
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2430	2330		-	-	
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]-	500			-	-	
Chloridmigrationskoeffiz***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	6.5			-	-	
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2355			-	-	
FTW nach D-R BE I						erfüllt	
<b>Festbeton 250 Tage – Bohrkerne</b>							
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	56.6					
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2420					
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	200					
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2300					
Chloridmigrationskoeff ***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	4.5					
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2331					

\*, \*\*, \*\*\*siehe Tabelle 19

**Tabelle 30: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen**

Datum	[dd.mm.yy]	14.10.2016	28.10.2016	9.11.2016
Uhrzeit	[-]	13:15	13:20	13:25
Grösstkorn	[mm]	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	13	14	2
Betontemperatur	[°C]	15	16	13
Luftgehalt	[Vol.-%]	5.0	4.7	4.5
w/z*	[-]	0.45	0.41	0.43
Verdichtungsmass	[mm/-]	460	1.12	1.11
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2406	2398	2379
<b>Festbeton 7 Tage – Würfel</b>				
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]		39.8	34.3
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]		2433	2401
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>				
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	45.0	55.7	51.5
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2450	2440	2420
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]		60	100
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]		2510	2460
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]		3.4	2.9
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]		2473	2445
FT- BE 1	[-]		hoch	
<b>Festbeton 28 Tage – Bohrkerne</b>				
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]		51.2	54.0
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]		2420	2460
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]-		300	400
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]		2400	2410
Chloridmigrationskoeffizient ***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]		3.4	4.3
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]		2413	2452
<b>Festbeton 250 Tage – Bohrkerne</b>				
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]		57.7	68.8
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]		2400	2450
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]-		10	400
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]		2380	2410
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]		1.3	3.7
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]		2412	2404

\*, \*\*, \*\*\*siehe Tabelle 19

**Tabelle 31: Meteorologische Daten einer nahe gelegenen Station, Stundensumme (Niederschlag), -mittel oder -maximum (Böenspitzen);**

	Niederschlag	r.F.	Wind		mittlere Lufttemperatur [°C]
	[mm/h]	[%]	[km/h]	Richtung [°]	
15.4. bis 3.5.2016					
Minimum	0.0	16	0.4	0	-6.3
10 % Fraktile	0.0	31	1.8	63	-0.9
Median	0.0	64	6.1	228	5.1
90 % Fraktile	0.1	91	15.8	297	12.4
Maximum	4.3	99	26.6	360	20.3
23.6. – 14.7.2016					
Minimum	0	17	1.1	0	4.0
10 % Fraktile	0	37	2.5	63	10.0
Median	0	76	4.7	229	14.6
90% Fraktile	0.1	95	10.8	315	23.6
Maximum	10.3	98	27.4	360	29.2
24.8. – 14.9.2016					
Minimum	0	23	1.1		5.1
10 % Fraktile	0	42	2.2		9.5
Median	0	78	4.7		14.2
90% Fraktile	0	96	9.4		23.2
Maximum	10.9	100	30		29.5
28.10. – 18.11.2016					
Minimum	0	33	0.0		-9.4
10 % Fraktile	0	62	1.1		-5.2
Median	0	83	2.9		0.6
90% Fraktile	0	95	6.8		7.2
Maximum	4.6	100	14.0		13.7
9.11. – 25.11.2016					
Minimum	0	54	0.0		-9.4
10 % Fraktile	0	72	1.1		-4.0
Median	0	86	3.2		1.3
90% Fraktile	0	96	7.9		6.9
Maximum	2.3	100	18.4		11.9

Am 28.9.2016 wurden die Luftpermeabilität nach SIA 262/1 sowie die Prellhärte an den Etappen 1195 - 1200 und 1340 - 1345 gemessen. Die erste Etappe war nicht zugänglich (mit Folie eingepackt). In Tabelle 6 sind die geometrischen Mittelwerte der Luftpermeabilitäten als auch die aus der Prellhärte abgeschätzte Würfeldruckfestigkeit angegeben. Zur Umrechnung der Prellhärte in die Würfeldruckfestigkeit wurden der Median gebildet und die „EU-Kurve“ verwendet, die den mittleren Zusammenhang zwischen der Prellhärte und der Druckfestigkeit beschreibt. Die Messungen erfolgten im Bereich der Bohrkernentnahmestellen.

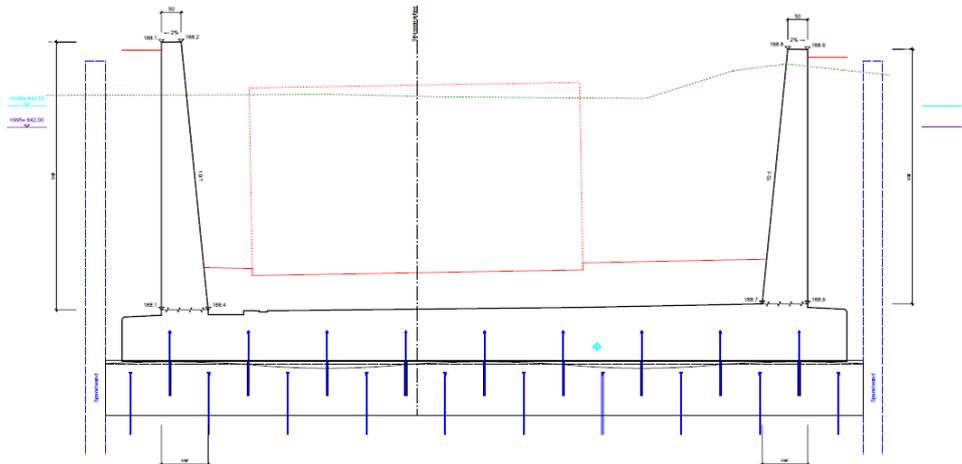
**Tabelle 32: Ergebnisse der Luftpermeabilitäts- und Prellhammermessungen vom 28.9.2016**

Bauteilherstellung	Luftpermeabilität [ $10^{-16}$ m <sup>2</sup> ]	Betonfeuchte Tramex [M.-%]	aus Prellhärte abgeschätzte Würfeldruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
15.4.2016		nicht zugänglich	
23.6.2016	0.05	4.5 – 5.5	27
24.8.2016	0.03	5.0 – 5.5	26
28.10.2016		noch nicht betoniert	
9.11.2016			

## I.5 Bauwerk Gr

In nachfolgender Abbildung sind typische Bauteile dargestellt.

Querschnitt 168, 1:50



Querschnitt 194, 1:50

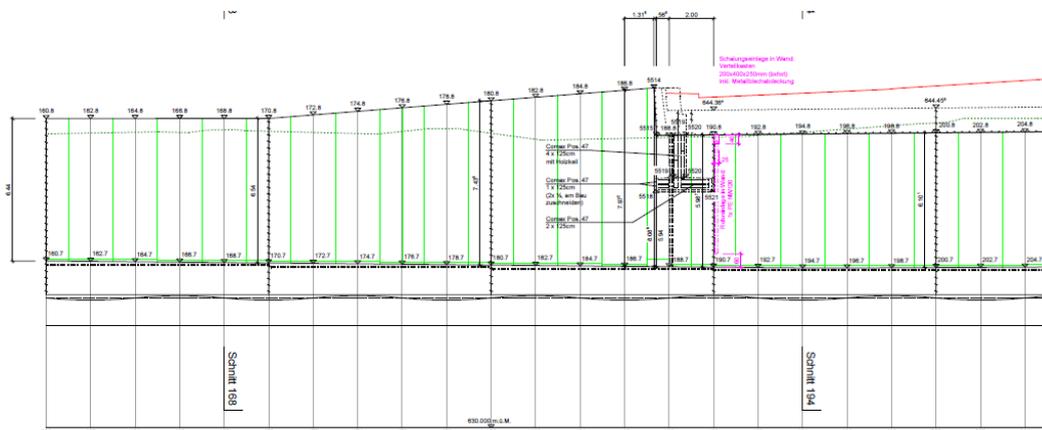
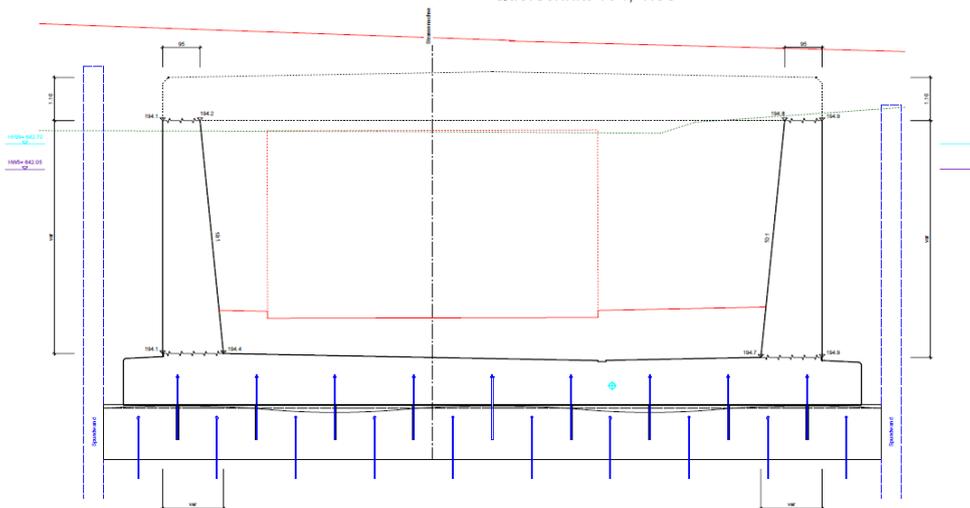


Abbildung 10: Querschnitte und Längsschnitt bei Wänden und Decken

**Tabelle 33: Bestellte Betonqualität**

Bauteil	Einheit	Decke	Wand	Bemerkung
Betonsorte		<b>G</b>	<b>E</b>	gemäss SN EN 206-1
Betonmengen	[m <sup>3</sup> ]	4885	14965	inkl. weiterer Bauteile
NPK-Position	[-]	241.700	241.600, 241.700	
<b>Frischbeton</b>				
Mindestzementgehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	320*	300*	Normanforderung XD
Grösstkorn	[mm]	32	32	
w/z-Wert	[-]	≤ 0.45*	≤ 0.50*	Normanforderung XD
Luftgehalt	[Vol.-%]	-	-	
Chloridgehalt	[-]	Cl 0.1	Cl 0.1	
Konsistenz	[-]	C3 (1.04 – 1.10)*	C3 (1.04 – 1.10)*	
<b>Festbeton</b>				
Druckfestigkeit	[-]	C30/37	C25/30	
Expositionsklasse	[-]	XC4, XD3, XF4	XC4, XD1, XF4	
Frosttausalzstand	[g/m <sup>2</sup> ]	≤ 200 bzw. 600*	≤ 200 bzw. 600*	Normanforderung XF4
Chloridmigrationskoeff	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	≤ 10*	keine	Normanforderung XD
AAR	[-]	AAR 2	AAR 2	

\*ohne Grenzabweichung

**Tabelle 34: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen bei Wänden**

Datum	[dd.mm.yy]	4.11.2015			18.2.2016		14.6.2016
Uhrzeit Herstellung	[h:min]	14:08	14:52	15:31	11:35	12:17	12:54
Lieferschein	[-]	16066	16072	16078	17686	17689	20598
Zement CEM II/A-LL 42.5N	[kg/m <sup>3</sup> ]	300	300	300	300	300	300
Flugasche	[kg/m <sup>3</sup> ]	40	40	40	40	40	40
Grösstkorn	[mm]	32	32	32	32	32	32
Lufttemperatur	[°C]	15.3	11.8	11.1	3.8	4.1	20.3
Betontemperatur	[°C]	19.8	19.1	19.8	13.3	13.6	22.7
Luftgehalt	[Vol.-%]	6.5	6.5	5.0	4.1	6.6	7.6
w/z*	[-]	0.56	0.49	0.45	0.50	0.48	0.46
Ausbreitmass	[mm]	600	530	540	560	550	360
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2280	2280	2340	2360	2300	2270
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>							
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	47.9	-	-	52.8	-	40.4
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2350	-	-	2400	-	2340
Frostausalzstand	[g/m <sup>2</sup> ]	1300	-	-	500	-	300
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	13.4	-	-	9.5	-	4.8
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]	2390	-	-	2415	-	2333
<b>Festbeton 28 Tage - Bohrkerne</b>							
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]		38.5		49.5	-	25.5
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]		2310		2380	-	2240
Frostausalzstand	[g/m <sup>2</sup> ]		2000		600	-	500
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]		18.2		9.9	-	15.7
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]		2260		2339	-	2224

\*mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 12 kg/m<sup>3</sup>\*\* Mittelwert 3 Prüfkörper: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkerne mit  $\varnothing = l = 50$  mm

\*\*\*mit Randbeton

**Tabelle 35: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen bei Wänden**

<b>Datum</b>	<b>[dd.mm.yy]</b>	<b>12.5.2015</b>		
Uhrzeit Herstellung	[h:min]	11:40	12:08	12:21
Lieferschein	[-]	26615	26617	26618
Zement CEM II/A-LL 42.5N	[kg/m <sup>3</sup> ]	300		
Flugasche	[kg/m <sup>3</sup> ]	40		
Grösstkorn	[mm]	32		
Lufttemperatur	[°C]	22.1	22.0	22.1
Betontemperatur	[°C]	18.4	19.1	18.4
Luftgehalt	[Vol.-%]	4.6	6.4	4.3
w/z*	[-]	0.51	-	-
Ausbreitmass	[mm]	480	500	500
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2330	2270	2340
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>				
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	49.0	-	-
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2380	-	-
Frostausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	500	-	-
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]	2360		
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	7.8	-	-
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]	2373	-	-
<b>Festbeton 28 Tage - Bohrkern</b>				
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]		37.8	
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]		2310	
Frostausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]		600	
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]		2220	
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]		8.9	
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]		2270	

\*mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 12 kg/m<sup>3</sup>\*\* Mittelwert 3 Prüfkörper: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkern mit  $\varnothing = l = 50$  mm

\*\*\*mit Randbeton

**Tabelle 36: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen bei Decken;**

Datum	[dd.mm.yy]	20.11.2015			18.2.2016		4.5.2017	
Uhrzeit Herstellung	[h:min]	8:37	9:48	10:58	13:21	6:46	7:59	9:16
Lieferschein	[-]	16560	16566	16573	17693	26409	26414	32098
Zement CEM II/A-LL 42.5N	[kg/m <sup>3</sup> ]	340	340	340	340		340	
Flugasche	[kg/m <sup>3</sup> ]	40	40	40	40		40	
Grösstkorn	[mm]	32	32	32	32		32	
Lufttemperatur	[°C]	11.5	11.5	12.2	9.2	7.3	15.1	14.3
Betontemperatur	[°C]	18.1	16.9	17.2	14.3	16.2	18.2	16.4
Luftgehalt	[Vol.-%]	5.5	5.0	5.8	4.4	5.2	6.5	6.5
w/z*	[-]	0.46	0.54	0.41	0.44	0.47	0.46	0.47
Ausbreitmass	[mm]	630	640	640	500	1.10	1.08	1.06
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2340	2390	2270	2350	2320	2280	2290
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>								
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	56.5	-	-	58.0	-	-	51.8
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	2390	-	-	2420	-	-	2370
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	1300	-	-	700	-	-	600
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	-	-	2360
Chloridmigrationskoeffizient	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	6.6	-	-	8.1	-	-	8.4
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]	2445	-	-	2416	-	-	2366
<b>Festbeton 28 Tage - Bohrkern</b>								
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]		49.0		47.0	-	-	38.6
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]		2320		2330	-	-	2260
Frosttausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]		300		20	-	-	400
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]					-	-	2250
Chloridmigrationskoeffizient ***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]		14.8		9.9	-	-	12.5
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]		2260		2339	-	-	2290

\*mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 12 kg/m<sup>3</sup>\*\* Mittelwert 3 Prüfkörper: Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkern mit  $\varnothing = l = 50$  mm

\*\*\*mit Randbeton

**Tabelle 37: Meteorologische Daten einer nahegelegenen Station**

	Niederschlag	r.F.	Wind		mittlere Lufttemperatur [°C]
	[mm/h]	[%]	[km/h]	Richtung [°]	
<b>4. -23.11.2015</b>					
Minimum	0	39	0.4	0	-4.4
10 % Fraktile	0.0	58	1.8	94	0.40
Median	0.1	78	6.0	170	5.6
90 % Fraktile	0.0	93	14.4	284	11.1
Maximum	7.6	99	46	360	16.1
<b>20.11. – 26.12.2015</b>					
Minimum	0	53	0	0	-7.7
10 % Fraktile	0.0	72	1.4	90	-4.4
Median	0.1	85	5.5	170	0.0
90% Fraktile	0.0	96	9.0	285	4.0
Maximum	7.6	100	46	360	10.4
<b>18.2. – 10.3.2016</b>					
Minimum	0	23	0.4	0	-4.9
10 % Fraktile	0.0	39	1.8	94	-0.93
Median	0.1	71	14.3	198	3.5
90% Fraktile	0.3	94	33.6	288	7.8
Maximum	3.7	97	49	360	12.2
<b>14.6. – 4.7. 2016</b>					
Minimum	0	19	0.7	0	7.3
10 % Fraktile	0	32	2.2	98	11.9
Median	0	65	6.8	266	18.0
90% Fraktile	0	88	25	290	26.9
Maximum	4.7	98	37	360	35.0
<b>4.5. – 21.5.2017</b>					
Minimum	0	17	0.7	0	2.9
10 % Fraktile	0	31	2.2	95	7.2
Median	0	55	11.7	180	13.8
90% Fraktile	0	89	30.6	291	21.2
Maximum	6.3	96	42.5	360	28.9
<b>12.5. – 21.5.2017</b>					
Minimum	0	17	0.7	0	3.2
10 % Fraktile	0	30	1.8	93	7.7
Median	0	54	7.9	138	15.4
90% Fraktile	0	90	28.1	289	22.6
Maximum	6.3	96	39.6	360	28.9

## I.6 Bauwerk Po

Zu diesem Objekt liegen weder Pläne noch Fotos vor.

**Tabelle 38: Ergebnisse der Betonprüfungen**

Datum	[dd.mm.yy]	4.10.2016
Uhrzeit	[-]	
Grösstkorn	[mm]	
Lufttemperatur	[°C]	
Betontemperatur	[°C]	
Luftgehalt	[Vol.-%]	
w/z*	[-]	
Verdichtungsmass	[mm/-]	
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	
<b>Festbeton 7 Tage – Würfel</b>		
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	
<b>Festbeton 28 Tage – Würfel</b>		
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	
Rohdichte Würfel**	[kg/m <sup>3</sup> ]	
Frostausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	400
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]	2490
Schnellfrostausz TFB	[-]	gut
Chloridmigrationskoeffizient	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	6.4
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]	2498
<b>Festbeton 28 Tage – Bohrkern</b>		
Druckfestigkeit**	[N/mm <sup>2</sup> ]	
Rohdichte**	[kg/m <sup>3</sup> ]	
Frostausalz widerstand	[g/m <sup>2</sup> ]	3500
Rohdichte Prüfkörper	[kg/m <sup>3</sup> ]	2480
Schnellfrostausz TFB	[-]	genügend
Chloridmigrationskoeffizient***	[10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	9.8
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2461

\*mit Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung von 12 kg/m<sup>3</sup>

\*\* 1 Prüfkörper (7 Tage) oder Mittelwert von 3 Prüfkörpern (28 Tage): Würfel mit 150 mm Kantenlänge bzw. Bohrkern mit  $\varnothing = l = 100$  mm

\*\*\*mit Randbeton



## Glossar

<b>Begriff</b>	<b>Bedeutung</b>
C <sub>3</sub> A	Tricalciumaluminat, Bestandteil von Zementklinker
C <sub>3</sub> S	Tricalciumsilikat, Bestandteil von Zementklinker
C <sub>2</sub> S	Dicalciumsilikat, Bestandteil von Zementklinker
CW	Chloridwiderstand, Kehrwert des Chloridmigrationskoeffizienten
CM <sub>28</sub> , CM <sub>n</sub>	Chloridmigrationskoeffizient, bestimmt im Betonalter von 28 bzw. n Tagen
FTW	Frosttausalz-widerstand, Kehrwert der abgewitterten Menge in der Frosttausalzprüfung
KW	Karbonatisierungswiderstand, Kehrwert des Karbonatisierungskoeffizienten
NBM	Nachbehandlungsmittel
TT-1	Prüfung von Beton an separat hergestellten Probekörpern, Prüfalter 28 Tage, siehe SN EN 13670
TT-2	Prüfung von Beton an Bohrkernen aus Bauteilen, Prüfalter 28 Tage, siehe SN EN 13670
TT-3	Prüfung von Beton an Bohrkernen aus Bauteilen, Prüfalter > 28 Tage, siehe SN EN 13670
w/b	Massenverhältnis Wasser zu Bindemittel (Zement + reaktiver Zusatzstoff)



## Literaturverzeichnis

- [1.] Alexander, M., 2014, persönliche Mitteilung
- [2.] Bager, D.H., 2009, 25 years exposure – durability and mechanical properties.- 17. Ibaasil, Weimar, 23. – 26.9.2003, 939 – 950.
- [3.] Bentz, D. P., P. E. Stutzman & F. Zunino, 2017, Low-temperature curing strength enhancement in cement-based materials containing limestone powder.- *Materials and Structures*, 50:173
- [4.] Beusch, E., 2006, Massnahmen zur Durchsetzung der Qualitätsanforderungen bei Kunstbauten (Bau, Erhaltung), VSS-Bericht 600
- [5.] Beushausen, H. B. Höhlig & M. Martin, 2016, The influence of curing methods on durability indicators & micro- and macro porosity of concrete.- *fib Symposium Kapstadt, Südafrika*
- [6.] Concrete Society, 2004, In situ concrete strength – An investigation into the relationship between core strength and standard cube strength, Project Report 3.- The Concrete Society, Blackwater, Camberly, Surrey, UK
- [7.] Ehrenberg, A. & V. Feldrappe, 2016, Brückenkappen aus Beton mit Hochofenzement.- *beton* 12, 490-497
- [8.] Ehrhardt, D. & J. Stark, 2009, Einfluss der Nachbehandlung auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton, *ibausil*, Tagungsband Nr. 2, 85 – 92
- [9.] Giese, A., D. Ehrhardt & J. Stark, 2012, Vergleich der Frost-Tausalz-Beständigkeit von CEM II-Zementen im Labor und an Freiflächen, *ibausil*, Poster P 2.34
- [10.] Gouws, S.M., Alexander, M.G. & Maritz, G., 2001, Use of durability index tests for the assessment and control of concrete quality on site.- *Concrete Beton*, No. 98, April 2001, pp 5-16
- [11.] Hilsdorf, H.K., K. Schönlin & F. Tauscher, 1997, Dauerhaftigkeit von Beton: Schlussbericht zum Forschungsauftrag 3114 der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V., *Beton Verlag, Düsseldorf*, 1997
- [12.] Huber, J., 2008, Zur Nachbehandlung von Beton – Auswirkungen des Wasserverlustes durch Evaporation im jungem Alter am Beispiel von Strassenbeton, *Dissertation TU München*
- [13.] Hunkeler, F. & L. Lammar, 2012, Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von betonen.- *VSS-Bericht 649*
- [14.] Hunkeler, F, H. Ungricht & Ch. Merz (2002): Vergleichende Untersuchungen zum Chloridwiderstand von betonen.- *VSS-Bericht 568*
- [15.] Jacobs, F., 1994, Permeabilität und Porengefüge zementgebundener Werkstoffe.- *Building Materials report Nr. 7*, ETH, Aedificatio Publishers IRB Verlag
- [16.] Jacobs, F., 2006, Luftpermeabilität als Kenngrösse für die Qualität des Überdeckungsbetons von Betonbauwerken, *VSS-Bericht 604*
- [17.] Jacobs, F., 2016, Zusammensetzung und Prüfung von Beton – Anforderungen und Vorgehen in der Schweiz.- *beton* 12, 354 - 357
- [18.] Jacobs, F., F. Hunkeler & B. Mühlhan, 2014, Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton.- *VSS-Bericht 665*
- [19.] Klieger, P., 1958, Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength.- *J. American Concrete Inst.*, June, 1063 -1081.
- [20.] Leemann, A., C. Hoffmann, V. Malioka & M.H. Faber (2006): Streuung der Betoneigenschaften in Bauwerken.- *VSS-Bericht 611*
- [21.] Lunk, P., 2013, Praktische Erfahrungen mit den neuen Betonnormen, 19. Holcim Beton-tagung 24.9.2013
- [22.] Martin, M., 2012, The Influence of Curing Techniques and Chemical Admixtures on the Properties of Concrete, *Master Thesis, University of Cape Town, South Africa*

- [23.] Müller, H. S. & U. Guse, 2010, Zusammenfassender Bericht zum Verbundforschungsvorhaben «Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse».- DAFStB, Heft 577
- [24.] Parrot, L.J., 1988, Moisture profiles in drying concrete, *Advances in Cement Research*, Vol. 1, No. 3, 164 – 170
- [25.] Petersson, P.E., zitiert in Schiessl P. & Ch. Brandes
- [26.] Polder, R., C. Andrade, B. Elsener, O. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert & M. Raupach, 2000, Test method for on site measurement of resistivity of concrete, *Materials and Structures*, 33, December, 603-611
- [27.] Rostasy, F. S. & E.H. Ranisch (1990), Altersabhängige Beziehung zwischen der Druck- und Zugfestigkeit von Beton im Bauwerk, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 408
- [28.] Schiessl, P. & Ch. Brandes (2004): Alterungseinfluss auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unterschiedlicher Zusammensetzung, *Forschungsbericht F2011/00*.
- [29.] Spears, R.E., 1983, The 80 Percent Solution to Inadequate Curing Problems ; *Concrete International*, April 1983, 15 – 18
- [30.] Spörel, F., 2012, Untersuchungen zum Einsatz von Mikrohohlkugeln in Beton als Alternative zum Luftporenbeton.- Bericht A39510370002 der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe
- [31.] Spörel, F. & H. Müller, 2012, Untersuchung des Einflusses von Schalung und Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit geschalter Betonflächen massiger Betonbauteile.- Bericht A39510310141 der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe
- [32.] Spörel, F., H. Müller & A. Westendarp, 2013, Einfluss der Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit geschalter massiger LP-Betonbauteile, *beton* 6/2013, 234 – 239
- [33.] Soutsos, M., F. Kanavaris, A. Hatzitheodorou & J. Kwasny (2017): Effect of temperature on the strength development of mortar mixes with GGBS and fly ash.- *Mag. Concrete Res.*, 69, 15
- [34.] Stark, J. & D. Ehrhardt, 2009, CEM II/B-S Zementsysteme im Betonstrassenbau, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FE-Nr. 08.183/2005/LGB, Bauhaus-Universität Weimar, Friedrich August Finger - Institut für Baustoffe, Februar 2009
- [35.] Torrent, R., A. Griesser, F. Moro, & F. Jacobs, 2012, Technical-economic consequences of the use of Controlled Permeable Formwork, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III : 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*, ICCRRR-3, 3-5 September 2012, Cape Town, South Africa, 1330 – 1335
- [36.] Turkel, A. & H. Ozkul, 2010, Size and wall effects on compressive strength of concretes.- *ACI Materials Journal*, July/August, 372 - 379
- [37.] VDB, 2011, Optimierung des Nachbehandlungssystems für Betone mit CEM II/B-S-Zementen, Report 17, Verband Deutscher Betoningenieure e.V.
- [38.] Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2011, Nachbehandlung von Beton, *Zementmerkblatt Betontechnik B8*, 3.2011
- [39.] Von Greve-Dierfeld, S., 2015, Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC-exponierter Stahlbetonbauteile.- *Dissertation TU München, Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen*
- [40.] Von-Greve-Dierfeld, S. & Ch. Gehlen, 2016, Performance based durability design, carbonation, part 1: Benchmarking of European present design rules, part 2: Classification of concrete, part 3: PSF approach and a proposal for the revision of deemed-to-satisfy rules.- *Structural Concrete*, 17, 309 - 328, 523 - 532, 718 - 728
- [41.] Von Greve-Dierfeld, J. Bisschop & Y. Schiegg, 2017, Nichtrostende Bewehrungsstähle zur Verlängerung der korrosionsfreien Lebensdauer von Stahlbetonbauwerken.- *Beton- und Stahlbetonbau*, 112, 601-610
- [42.] Wassermann, R., & A. Bentur, 2013, Efficiency of curing technologies: strength and durability, *Materials and Structures*, Vol. 46, Nr. 11, 1833 – 1842

- [43.] Werner, R., F. Hunkeler, U. Mühlethaler & C. Ly, 2016, Evaluation des Frost-Taumittelwiderstandes von Beton im Strassenbau und bei Kunstbauten.- VSS-Bericht 1554



# 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: Januar 2018

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: AGB 2014/008

Projekttitel: Prüfung und Bewertung der Betonqualität am Bauwerk

Enddatum: 31.12.2017

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Ziel dieser Forschungsarbeit war die Abklärung, wie sehr sich die Betonqualität von separat hergestellten Prüfkörpern von der von Bohrkernen aus Bauteilen unterscheidet. Hierzu wurden separat hergestellte Prüfkörper und Bohrkernkerne aus sechs Bauwerken untersucht. Pro Bauwerk wurden zumeist mehrere Bauteile untersucht, die zu verschiedenen Jahreszeiten hergestellt wurden. Damit sollte geklärt werden, ob und ggf. inwieweit sich z. B. die Umgebungsbedingungen auf die Bauteilqualität auswirken. Um den Einfluss der Umgebungsbedingungen möglichst gut zu erkennen, wurden pro Bauwerk jeweils Etappen mit ähnlicher Bauteilgeometrie und jeweils ähnlichen Bohrkernlagen untersucht. Bei den untersuchten Bauwerken wurde Tiefbaubeton (Betonart F oder G) verwendet, der fast immer mit Luftporenbildner hergestellt war und normgemäss nachbehandelt wurde. Basierend auf den Ergebnissen der Betonprüfungen konnte gezeigt werden, dass

- die Rohdichte im Bauteil zumeist 1 - 2 % unter der im separat hergestellten Würfel lag
- die 28 Tage-Bohrkerndruckfestigkeit im Mittel fast 20 % unter der Würfeldruckfestigkeit lag
- der am Bohrkern bestimmte Chloridmigrationskoeffizient im Mittel fast 50 % höher als der am Würfel bestimmte war
- der an Bohrkern bestimmte Frostausfallwiderstand ähnlich zu dem am Würfel bestimmten war, wobei die Streuung sehr gross war
- der an Bohrkern bestimmte Karbonatisierungskoeffizient im Mittel ca. 40 % höher als der an separat hergestellten Prismen war, wobei anzumerken ist, dass nur ein Bauwerk diesbezüglich untersucht werden konnte.

Vor allem bei der Druckfestigkeit, bestimmt an Bohrkernen aus Bauteilen, zeigte sich ein systematischer Einfluss der Umgebungstemperatur. Höhere Temperaturen (ca. 15 °C und mehr) führten zu niedrigeren 28 Tage Druckfestigkeiten als niedrigere Temperaturen (< 5 °C). Bei den Dauerhaftigkeitseigenschaften war dieser Einfluss weniger systematisch ausgeprägt, was auf weitere relevante Einflüsse (z.B. Nachbehandlung) schliessen lässt. Der Temperatureinfluss hängt stark vom Bindemittel ab. D.h. bei anderen Bindemitteln kann sich die Umgebungstemperatur deutlich weniger auswirken.

Die Streuung der Eigenschaften, bestimmt an separat hergestellten Probekörpern, war bei den Bauwerken ähnlich und auch vergleichbar mit der, die an den Bohrkernen bestimmt wurde. Bei allen Festbetoneigenschaften ergab sich bei den Bohrkernprüfungen eine Verbesserung mit zunehmendem Alter (28 Tage bis ca. 1 Jahr), wobei diese bei der Druckfestigkeit ca. 20 % sowie beim Chlorid-, Karbonatisierungskoeffizienten und Frostausfallwiderstand ca. 30 % betrug. Die zerstörungsfreie Prüfung der Prellhärte ergab wenig aussagekräftige Ergebnisse. Bei der zerstörungsfreien Prüfung der Luftpermeabilität konnte kein für alle Bauwerke geltender, ausgeprägter Zusammenhang zu den Dauerhaftigkeitseigenschaften gefunden werden. Es sollte jedoch eine Luftpermeabilität (geometrischer Mittelwert) unterhalb von  $0,1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  angestrebt werden.

Für die Prüfungsart TT-2 (Bohrkerne aus dem Bauteil, geprüft nach 28 Tagen) können keine anderen Grenzwerte als die heute gültigen Richtwerte vorgeschlagen werden, da zu wenige Ergebnisse vorliegen, um die Betonqualitätsunterschiede zwischen Bohrkernen aus Bauteilen und separat hergestellten Prüfkörpern ausreichend genau zu quantifizieren. Für die Prüfungsart TT-3 (Bohrkerne aus dem Bauteil, geprüft nach > 28 Tagen) können und sollten die Richtwerte von TT-2 übernommen werden. Da die Einflüsse der Betonzusammensetzung auf die Dauerhaftigkeitseigenschaften bekannt sind, können durchaus Grenzwerte für die Prüfungsarten TT-2 und TT-3 baustellenspezifisch festgelegt werden.

Der in der SN EN 206 enthaltene Grenzwert des Chloridmigrationskoeffizienten für XD3 für die Prüfungsart TT-1 (separat hergestellte Würfel, geprüft nach 28 Tagen) von  $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  ist nicht immer ausreichend niedrig, um den Betonqualitätsunterschied zwischen Bauteil und separat hergestellten Prüfkörpern abzudecken. Die in der SN EN 206 enthaltenen Grenzwerte des Karbonatisierungswiderstandes für XC3/XC4 sowie des Frostausfallwiderstandes für XF4 für die Prüfungsart TT-1 (separat hergestellte Prismen bzw. Würfel, geprüft nach 28 Tagen) sind zweckmässig. Bei der Bestimmung der 28 Tage Bohrkerndruckfestigkeit können Abweichungen von mehr als 15 % zur Würfeldruckfestigkeit auftreten, auch wenn alle Beteiligten normkonform arbeiteten. Dies sollte bei der Beurteilung der Bohrkerndruckfestigkeit berücksichtigt werden. Dem Bauherrn wird bei Bauvorhaben empfohlen:

- Prüfungen nur von anerkannten (akkreditierten) Laboren durchführen zu lassen.
- die Ergebnisse von Frisch- und Festbetonprüfungen des Lieferwerkes des Betons einzufordern und auszuwerten
- Annahmekriterien für Frischbetonkontrollen festzulegen und umzusetzen.
- die Ergebnisse der Frischbetonkontrollen (Ausbreit- oder Setzmass, Luftgehalt und Rohdichte jeweils ohne Aufsatzrahmen, Wassergehalt) des laufenden Bauvorhabens laufend auszuwerten, um zeitnah Hinweise auf die Betoneigenschaften zu erhalten.
- Prüfungen gemäss der Prüfungsart TT-1 (separat hergestellter Prüfkörper) und immer wenn möglich TT-2 (Bohrkerne aus Bauteil) auszuschreiben, um einerseits den Unterschied in der Betonqualität zwischen separat hergestellten Probekörpern und Bohrkernen aus Bauteilen und andererseits die Betonqualität im Bauteil zu ermitteln. Prüfungen gemäss TT-2 sollten, wenn möglich, an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 100 mm (nicht 50 mm) erfolgen.
- eine Nachbehandlungsdauer von mindestens 7 Tagen, auch bei Temperaturen > 15 °C, zu fordern (Verlängerung im Vergleich zu Tab. 23a der SIA 262), um die Betonqualität nicht zu beeinträchtigen.

Es besteht noch weiterer Forschungsbedarf, um die hier ermittelten Befunde genauer zu quantifizieren.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

**Zielerreichung:**

Die gesetzten Ziele wurden erreicht, soweit dies mit dem vorhandenen Budget bzgl. Untersuchungen möglich war.

**Folgerungen und Empfehlungen:**

Es bestehen teilweise erhebliche Unterschiede zwischen der Betonqualität im Bauteil und separat hergestellten Prüfkörpern, wobei durch eine mehrmonatige Nacherhärtung im Bauteil die 28 Tage Dauerhaftigkeitseigenschaften des separat hergestellten Prüfkörpers in etwa erreicht werden.

Die Richtwerte für die Prüfungsart TT-2 der SN EN 13670 konnten überprüft und bestätigt werden. Für die Prüfungsart TT-3 konnten neu Richtwerte vorgeschlagen werden. Zudem konnten Hinweise zur Überarbeitung der Nachbehandlungsregelung in der SIA 262, des Grenzwertes für XD3 in der SN EN 206 abgegeben werden.

Bauherren sollten die Betonqualitätskontrollen nicht nur am Würfel sondern auch im Bauteil vornehmen und eine mindestens siebentägige Nachbehandlung, auch bei Lufttemperaturen über 15 °C, fordern.

**Publikationen:**

Jacobs, F. (2016): Zusammensetzung und Prüfung von Beton.- Anforderungen und Vorgehen in der Schweiz.- beton 12, 354 - 357

Jacobs, F. (2018): Genauigkeiten von Frischbetonprüfungen.- akzeptiert zur Publikation in beton

Jacobs, F. (2018): Beurteilung der Betonqualität durch Prüfungen am Prüfkörper und am Bauteil.- eingereicht als Vortrag bei ibausil, 2018

Präsentation ausgewählter Ergebnisse bei Veranstaltungen der TFB AG und von "Bau und Wissen" in Wildegg.

**Der Projektleiter/die Projektleiterin:**

Name: Dr. Jacobs

Vorname: Frank

Amt, Firma, Institut: TFB AG

**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:

La commission d'accompagnement relève que les résultats de la recherche satisfont aux objectifs fixés et que la recherche livre une contribution et des apports importants, notamment dans les domaines suivants :

- mise en évidence et compréhension des différences parfois considérables de la qualité du béton mesurée d'une part sur les éprouvettes d'essai confectionnées durant la phase de construction et, d'autre part, sur les échantillons prélevés ultérieurement sur l'ouvrage;
- développement au cours du temps des qualités du béton, y compris l'influence des conditions environnementales;
- types d'essais à effectuer et procédures d'essais;
- fixation de valeurs indicatives à satisfaire lors d'essais.

La commission souligne en outre que, si l'étendue et le budget du projet de recherche - notamment le volume des essais réalisables - ne pouvaient suffire à traiter de manière exhaustive l'ensemble de la problématique, les conclusions de l'étude permettent de plus d'identifier les éléments nécessitant encore de futurs approfondissements respectivement des précisions complémentaires.

#### Umsetzung:

Les conclusions de la recherche fournissent aux maîtres d'ouvrage, aux projecteurs et aux fournisseurs des données et des recommandations extrêmement utiles pour la réalisation de l'ouvrage, sa planification et son suivi, en particulier en ce qui concerne :

- la commande d'essais et la livraison de résultats d'essais;
- l'analyse et l'évaluation des résultats d'essais;
- la cure du béton.

Les résultats obtenus permettent également d'influer sur l'actualisation de dispositions normatives.

#### weitergehender Forschungsbedarf:

Afin d'identifier et de quantifier de manière encore plus précise les influences sur la qualité du béton d'un élément d'ouvrage, il conviendra encore de déterminer cette qualité :

- sur un plus grand nombre d'ouvrages;
- pour un nombre d'étapes supérieur à quatre,

et de la comparer avec la qualité mesurée sur les éprouvettes d'essais confectionnées séparément.

#### Einfluss auf Normenwerk:

Les résultats du présent projet de recherche doivent servir à la vérification des valeurs limite pour XD3 de la SN EN 206 ainsi que du concept de familles de béton pour les essais de durabilité; ils doivent aussi servir à l'introduction, dans la SN EN 13670, de valeurs indicatives pour le type d'essai TT-3 ou encore à vérifier les dispositions en matière de cure du béton de la SIA 282.

### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Putalaz

Vorname: Jean-Christophe

Amt, Firma, Institut: Canton du Valais, Département de la mobilité, du territoire et de l'environnement (DMTE)

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

Siau, le 24 avril 2018







## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter <https://www.astra.admin.ch> (Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare) heruntergeladen werden.