



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

DOKUMENTATION

NEUES ENTWURFSVER- FAHREN FÜR BETON – PILOTANWENDUNG BEI DER BAHNHOFBRÜCKE TÜSCHERZ

*Ausgabe 2024 V1.01
ASTRA 82024*

Impressum

Autoren / Arbeitsgruppe

Papastergiou Dimitrios	ASTRA N-SSI, Vorsitz
Käser Martin	ASTRA I-West
Spasojevic Ana	ASTRA I-West
Waldis Walter	ASTRA N-SSI
Hunkeler Fritz	Hunkeler Ingenieurberatung, Möriken

Originalsprache

Deutsch

Herausgeber

Bundesamt für Strassen ASTRA
Abteilung Strassennetze N
Standards und Sicherheit der Infrastruktur SSI
3003 Bern

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von www.astra.admin.ch heruntergeladen werden.

© ASTRA 2024

Abdruck - ausser für kommerzielle Nutzung - unter Angabe der Quelle gestattet.

Vorwort

Das Bundesamt für Strassen (ASTRA) untersucht alternative Entwurfsverfahren für Betone, die auch Nachhaltigkeitsindikatoren berücksichtigen können, jedoch keine Vorgaben an die Zusammensetzung enthalten, die bei der Betonleistungsfähigkeit zu Zielkonflikten führen können. Aus diesem Grund wurde ein neues Betonentwurfsverfahren gemäss Entwurf für einen Anhang ND zur SN EN 206 [25] im Rahmen einer Pilotanwendung getestet.

Die Pilotanwendung für die Umsetzung des Anhangs ND bei der Herstellung der neuen Brüstung als Teil des Instandsetzungsprojekts der 126 m langen Bahnhofbrücke der Nationalstrasse 05 in Tüscherz kann als gelungen bezeichnet werden.

Die entwickelte Betonsorte G-ND hat sich als robust erwiesen und erbrachte zufriedenstellende Ergebnisse: gute Verarbeitbarkeit, gute Oberflächenqualität, 28d-Würfeldruckfestigkeit unter dem geforderten Maximalwert von 38 N/mm², ein tiefer E-Modul und damit eine höhere Elastizität, ein hoher Chlorid- sowie ein ausreichender Frost-Tausalz- und Karbonatisierungs-Widerstand. Das Hauptziel, eine dauerhafte Brüstung mit einer feinen Rissverteilung herzustellen, konnte erreicht werden, wie die visuelle Bewertung und der Vergleich mit der Betonsorte G zeigten.

Das bei der Pilotanwendung erprobte Vorgehen kann bei allen verformungsbehinderten Bauteilen wie z.B. bei Wänden von Wannen, Stützmauern, Rückwänden von Galerien, Unterführungen oder Überdeckungen angewendet werden, um eine möglichst feine Rissverteilung zu erreichen.

Neben den technischen Vorteilen des neuen Entwurfsverfahrens für Beton gemäss Anhang ND [25] sind auch die viel geringeren ökologischen Auswirkungen der neu entwickelten Betonsorte G-ND im Vergleich zur Sorte G beachtenswert. Die Reduktion des Zementgehalts um mehr als 20% und die Reduktion des Klinkergehalts um bis zu 70% (je nach verwendeter Zementart) fallen dabei stark ins Gewicht. Dies führt zu einer erheblichen Verbesserung der Nachhaltigkeitseigenschaften (geringerer Energieverbrauch und CO₂-Ausstoss und damit deutlich weniger Umweltbelastungspunkte) gegenüber konventionellen Betonsorten.

Bundesamt für Strassen

Dimitrios Papastergiou
Fachverantwortlicher Kunstbauten

Zusammenfassung

Einleitung und Zielsetzung

Mit den Vorgaben für die Betonzusammensetzung gemäss der heute gültigen Betonnorm SN EN 206 [1] insbesondere für die stärker belasteten Betone für die Expositionsklassen XD und XF, werden oft hohe Festigkeitswerte, d.h. auch hohe Zugfestigkeiten erzielt. Zudem werden die Minimalwerte für die vorgegebenen Mindestdruckfestigkeitsklassen oft und bereits nach wenigen Tagen weit übertroffen. Dies kann in gewissen Fällen unproblematisch sein, führt jedoch, vor allem bei behinderten Verformungen, zu einer Überbeanspruchung der Mindestbewehrung und folglich zu einer unkontrollierten Rissverteilung mit unzulässigen Rissbreiten. Damit wird die Dauerhaftigkeit, die Wasserdichtigkeit (insbesondere bei Bauteilen im Grundwasser) oder die Ästhetik beeinträchtigt und die Mindestbewehrung bleibt weitgehend unwirksam.

Dies veranlasste das Bundesamt für Strassen (ASTRA), alternative Entwurfsverfahren für Betone zu untersuchen, die auch Nachhaltigkeitsindikatoren berücksichtigen können, jedoch keine Vorgaben an die Zusammensetzung enthalten, die bei der Betonleistungsfähigkeit zu Zielkonflikten führen können. Aus diesem Grund wurde das neue Betonentwurfsverfahren gemäss Entwurf für einen Anhang ND zur SN EN 206 [25] im Rahmen einer Pilotanwendung getestet. Die neue Betonsorte soll, wie die Betonsorte G gemäss SN EN 206 [1], die Expositionsklassen XC4(CH), XD3(CH) und XF4(CH) abdecken, aber gleichzeitig ermöglichen, die Druckfestigkeit und damit verbunden die Zugfestigkeit auf einen Maximalwert zu beschränken.

Die Pilotanwendung wurde bei der Instandsetzung der 126 m langen Bahnhofbrücke Tüschierz realisiert. Dabei wurde der w/z-Wert und der Gehalt an Zement- und Zusatzstoffen so gewählt, dass die geforderten Frisch- und Festbetoneigenschaften bestmöglich erreicht werden konnten. Der k-Wert-Ansatz gemäss SN EN 206 [1] wurde nicht berücksichtigt.

Das Hauptziel bei der Entwicklung des neuen Betons mit der Festigkeitsklasse C20/25 bestand darin, einen Beton zu finden, der nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit unter 38 N/mm² und gleichzeitig eine gute Dauerhaftigkeit aufweist, d.h. einen hohen Chlorid-, Frost-Tausalz- und AAR-Widerstand sowie einen ausreichenden Karbonatisierungs-Widerstand. Dieser Beton wurde mit G-ND bezeichnet und für die Leitmauer auf der Seeseite der Brücke eingesetzt. Der Referenzbeton, Beton G gemäss Tabelle NA.5 der SN EN 206 [1], wurde für die bergseitige Leitmauer verwendet.

Ergebnisse und Erkenntnisse

Nach Vorversuchen im Labor und im Betonwerk sowie der Betonage eines Musters wurden im Verlaufe 2021 die beiden Leitmauern ausgeführt. Der Beton G-ND (250 kg/m³ CEM III/B, 25 kg/m³ fein gemahltes Kalksteinmehl, Luftgehalt 4-6 Vol.-%, w/z um 0.60) konnte auf der Baustelle gut verarbeitet werden. Die Details der Zusammensetzung des Betons G-ND gehen aus der Tab. 5.3 hervor. Die mit diesem Beton erreichten Festbetoneigenschaften sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt. Die zeitliche Entwicklung der Festigkeit ist in Abb. 6.4, jene des E-Moduls in Abb. 6.5 dargestellt. Die Unterschiede zwischen dem Beton G und dem Beton G-ND sind erheblich.

Tabelle 0.1: Anforderungen an den Beton G-ND, Prüfergebnisse, Beurteilung / Kommentar

Parameter	Anforderungen	Ergebnis	Beurteilung / Kommentar
Druckfestigkeitsklasse Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen [22]	C20/25, $\leq 38 \text{ N/mm}^2$	$30.8 \pm 4.9 \text{ N/mm}^2$	Erfüllt.
Karbonatisierungswi- derstand [2]	Keine Anforderung	$8.7 \text{ mm/a}^{1/2}$	Nachweis über Modellie- rung
Chloridwiderstand [2]	$\leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$3.6 \text{ m}^2/\text{s}$	Erfüllt.
Frost-Tausalzwider- stand [2]	Hoch	3 x hoch 1 x mittel	Mehrheitlich erfüllt.
AAR-Beständigkeit [2], [6]	Erfüllt. Keine Prüfung bei diesem Projekt, da der Zement CEM III/B verwendet wurde und damit eine gute Beständigkeit gesichert ist.		
Schwinden [24]	Keine Anforderung	ϵ_{CS} (364 d): ca. 0.40 ‰	Ähnlich wie Beton G

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Beton G-ND die gestellten Anforderungen erfüllte. Lediglich beim Frost-Tausalzwiderstand und beim Karbonatisierungswiderstand mussten gewisse Abstriche in Kauf genommen werden. Dazu sind folgende Kommentare zu machen.

Kommentar zum Frost-Tausalzwiderstand

Betone mit CEM III/B sind hinsichtlich der Frost-Tausalzwiderstandes eher weniger robust als z.B. Betone mit CEM I und benötigen i.d.R. einen höheren Luftgehalt und auch eine bessere bzw. längere Nachbehandlung als andere Betone, um die Anforderung an einen hohen Widerstand zu erfüllen.

Kommentar zum Karbonatisierungswiderstand

Der Karbonatisierungswiderstand der Betonsorte G-ND ist wegen des höheren w/z-Wertes und des geringeren Klinkergehaltes beim CEM III/B geschwächt. In einer detaillierten Analyse der Ergebnisse und der Modellierung konnte gezeigt werden, dass der ermittelte Karbonatisierungswiderstand trotzdem ausreichend ist. Massgebend dafür ist die im Vergleich zu den Laborprüfungen deutliche höhere Betonfeuchtigkeit von berechneten Bauteilen und die gegenüber der Norm SIA 262 höher gewählte Überdeckung.

Aus Abb. 6.11 ist ersichtlich, dass die zu erwartende Karbonatisierungstiefe nach 50 Jahren sowohl unter Laborbedingungen als auch im Freien unter geschützten Bedingungen zwischen 30 und 40 mm beträgt. Unter feuchten Bedingungen (80 % RL) ist die Karbonatisierungstiefe viel geringer. Es ist zu erwarten, dass die Karbonatisierungstiefe unter XC4-Bedingungen und unter dem Einfluss von Regen irgendwo dazwischen liegen wird, sehr wahrscheinlich unter 30 mm. Dies ist auch für eine 100-jährige Nutzung ausreichend.

Erscheinungsbild der Betonoberfläche

Die Brüstung mit dem Beton G-ND erschien sehr hell. Deshalb wurde entschieden, die Betonoberfläche mit einer (hydrophobierenden) Imprägnierung leicht abzdunkeln. So sollte vermieden werden, dass die Brüstung von der gegenüber liegenden Seeseite als hell leuchtendes Band hätte wahrgenommen und als störend empfunden werden können.

Visuelle Begutachtung 2022 und 2023

Die Brüstung auf der Bergseite mit dem Beton G (Abb. 6.13) wies 2022 bereits grobe Trennrisse bis 0.3 mm Breite und einem Rissabstand zwischen 1 und 1.2 m auf, Tendenz zunehmend.

Demgegenüber wies die Brüstung auf der Seeseite mit dem Beton G-ND (Abb. 6.16) ein deutlich feineres Rissbild auf. Die grössten Risse waren etwa 0.1 mm breit (Rissabstand 15 – 30 cm). Infolge des viel feineren Rissbildes, des tieferen E-Moduls und des vermutlich etwas geringeren Restschwindens ist hier zudem nur noch eine kleine Zunahme zu erwarten.

Nachhaltigkeit

Der Beton G-ND hat im Vergleich zum Beton G eine deutlich verbessertes Nachhaltigkeitsprofil (Tab. 7.1 bis 7.3). Dies ist vor allem auf die Zementart (tieferer Klinkergehalt) und den reduzierten Zementgehalt im Beton zurückzuführen. Im Vergleich zu einem CEM I-Beton beträgt das Treibhausgaspotenzial (GWP) lediglich 33%, der Energieeinsatz lediglich ca. 50% und die Umweltbelastungspunkte können auf ca. 65% reduziert werden.

Kosten

Die einzigen verlässlichen Vergleiche erlauben die Betonpreise in den Ausschreibungen, da die Preise für die Zemente als wichtiger Kostenfaktor regional und kundenabhängig sind und stark schwanken können. Zudem sind die Preise auch vom aktuellen und zukünftigen Produktportfolio des Herstellers abhängig.

Die Einführung von neuen Betonsorten, wie z.B. ein Beton gemäss Anhang ND [25], bedingen Vorversuche. Diese brauchen Zeit (abhängig von den Dauerhaftigkeitsprüfungen) und verursachen Kosten. Dies muss bei der Ausschreibung und im Werkvertrag sowie bei der Planung der Ausführung berücksichtigt werden. Es ist zu empfehlen, die Vorversuche in einer separaten Position in der Ausschreibung offerieren zu lassen.

Für eine Gesamtbetrachtung sind nicht nur die Kosten für den Beton, sondern für das ganze Bauteil bzw. Bauwerk zu betrachten. So kann ein geringerer Mindestbewehrungsgehalt zu tieferen Kosten führen.

Fazit der Pilotanwendung

Mit der im Rahmen der Pilotanwendung entwickelten Betonrezeptur konnte eine günstige, das heisst langsame Entwicklung der Druckfestigkeit sowie die Beschränkung auf 38 N/mm² nach 28 Tagen erfüllt werden. Zusammen mit dem tiefen E-Modul und der damit höheren Elastizität des Betons konnte eine, im Vergleich zur Betonsorte G, wesentlich feinere Rissverteilung erreicht werden.

Die Verarbeitbarkeit des Frischbetons wie die Oberflächenqualität des fertigen Betons waren gut und erfüllten die Anforderungen bzw. die Erwartungen.

Die feine Risserteilung und die festgestellten Dauerhaftigkeitseigenschaften der Betonsorte G-ND in Kombination mit der Bewehrungsüberdeckung gemäss ASTRA ermöglichte eine Brüstung, die die geplante Nutzungsdauer mit grosser Sicherheit erreichen sollte.

Das bei der Pilotanwendung erprobte Vorgehen kann bei allen anderen verformungsbehinderten Bauteilen wie Konsolköpfen, Wänden von Wannen, Stützmauern, Rückwänden von Galerien, Unterführungen oder Überdeckungen angewendet werden, um eine möglichst feine Rissverteilung zu erreichen.

Die Nachhaltigkeitseigenschaften der Betonsorte G-ND sind erheblich besser als jene der Betonsorte G. Die technischen Anforderungen konnten somit mit einer deutlich verbesserten ökologischen Effizienz (reduzierter Zement- bzw. Klinkergehalt im Beton) erreicht werden.

Die Pilotanwendung hat weiterhin gezeigt, dass dem Kontrollplan eine grosse Bedeutung zukommt. Er muss konsistent sein und von der Bauleitung konsequent umgesetzt werden. Wegen der Bedeutung und den möglichen Auswirkungen sollten nur erfahrene Prüflabors beauftragt werden. Wichtig ist weiter auch, dass die Anzahl der Prüflabors möglichst klein gehalten wird, um die Streuung der Messwerte tief zu halten bzw. eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen und so unnötige Diskussionen auf der Baustelle zu vermeiden.

Verbunden mit dem neuen Entwurfsverfahren und dem damit verfolgten Ziel einer nachhaltigeren Betonbauweise wurden mehrere Forschungsthemen identifiziert. Zum einen handelt sich um weitere Pilotanwendungen für andere Betonanwendungen und andere Betonzusammensetzungen, zur Evaluation von Massnahmen gegen das Bluten und Entmischen und den zugehörigen Prüfverfahren und Kriterien.

Darüber hinaus sind die Grundlagen für die Beurteilung und den Vergleich von ganzen Bauteilen und Bauwerken hinsichtlich der Nachhaltigkeitseigenschaften zu erarbeiten.

Resumé

Introduction et objectif

Les prescriptions relatives à la composition du béton selon la norme actuellement en vigueur sur le béton SN EN 206 [1], en particulier pour les bétons plus fortement sollicités pour les classes d'exposition XD et XF, permettent souvent d'obtenir des valeurs de résistance élevées, c'est-à-dire également des résistances à la traction élevées. De plus, les valeurs minimales pour les classes de résistance minimale à la compression prescrites sont souvent et déjà largement dépassées après quelques jours. Cela, n'est pas problématique dans certains cas, mais conduit, surtout en cas de déformations entravées, à une sollicitation excessive de l'armature minimale et par conséquent à une répartition incontrôlée des fissures avec des largeurs de fissures inadmissibles. La durabilité, l'étanchéité (en particulier pour les éléments de construction dans la nappe phréatique) ou l'esthétique sont ainsi compromises et l'armature minimale reste en grande partie inefficace.

Cela a incité l'Office fédéral des routes (OFROU) à examiner d'autres méthodes de conception des bétons, qui peuvent également tenir compte d'indicateurs de durabilité, mais qui ne contiennent pas de prescriptions relatives à la composition pouvant conduire à des conflits d'objectifs en matière de performance du béton. C'est pourquoi le nouveau procédé de projection de béton a été testé dans le cadre d'une application pilote, conformément au projet d'annexe ND de la norme SN EN 206 [25]. Le nouveau type de béton doit selon la norme SN EN 206 [1], comme le type de béton G, couvrir les classes d'exposition XC4(CH), XD3(CH) et XF4(CH), tout en permettant de limiter la résistance à la compression et donc la résistance à la traction à une valeur maximale.

L'application pilote a été réalisée lors de la remise en état du pont de la gare de Tüscherz, long de 126 mètres. Le rapport eau/ciment et la teneur en ciment et en adjuvants ont été choisis de manière à obtenir au mieux les propriétés requises du béton frais et du béton durci. L'approche de la valeur k selon la norme SN EN 206 [1] n'a pas été prise en compte.

L'objectif principal lors du développement du nouveau béton avec la classe de résistance C20/25 était de trouver un béton qui présente après 28 jours une résistance à la compression inférieure à 38 N/mm^2 et en même temps une bonne durabilité, c'est-à-dire une résistance élevée aux chlorures, au gel-dégel et aux sels de déverglaçage ainsi qu'une résistance suffisante à la carbonatation. Ce béton a été désigné par G-ND et utilisé pour le mur de guidage (parapet) du côté lac du pont. Le béton de référence, le béton G selon le tableau NA.5 de la norme SN EN 206 [1], a été utilisé pour le mur de guidage côté amont.

Résultats et conclusions

Après des essais préliminaires en laboratoire et en centrale à béton et le bétonnage d'un échantillon, les deux murs de guidage ont été réalisés courant 2021. Le béton G-ND (250 kg/m^3 CEM III/B, 25 kg/m^3 de poudre de calcaire finement broyée, teneur en air de 4-6 % en volume, rapport eau/ciment de 0,60) a pu être mis en œuvre facilement sur le chantier. Les détails de la composition du béton G-ND sont donnés dans le tableau 5.3. Les propriétés du béton durci obtenues avec ce béton sont résumées dans le tableau suivant. L'évolution de la résistance en fonction du temps est représentée dans la figure 6.4, celle du module d'élasticité dans la figure 6.5. Les différences entre le béton G et le béton G-ND sont considérables.

Tab. 0.1 Exigences pour le béton G-ND résultats d'essai, évaluation / commentaire

Paramètres	Exigences	Résultats	Appréciation/Commentaire
Classe de résistance à la compression au cube après 28 jours [22]	C20/25, $\leq 38 \text{ N/mm}^2$	$30.8 \pm 4.9 \text{ N/mm}^2$	satisfait
Résistance à la carbonatation [2]	Pas d'exigence	$8.7 \text{ mm/a}^{1/2}$	Vérification par modélisation
Résistance aux chlorures [2]	$\leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$3.6 \text{ m}^2/\text{s}$	satisfait
Résistance au gel et aux sels de déverglaçage [2]	Élevée	3 x élevée 1 x moyenne	Conforme en majorité
Résistance à la RAG [2], [6]	Satisfait. Pas de test pour ce projet, car le ciment CEM III/B a été utilisé et une bonne résistance est ainsi assurée.		
Retrait [24]	Pas d'exigence	ϵ_{cs} (364 d): ca. 0.40 ‰	Similaire au béton G

En résumé, on peut dire que le béton G-ND a satisfait aux exigences posées. Seule la résistance au gel-dégel et la résistance à la carbonatation ont dû faire l'objet de quelques concessions. Les commentaires suivants peuvent être faits à ce sujet.

Commentaire sur la résistance au gel et au dégel

En ce qui concerne la résistance au gel-dégel, les bétons avec CEM III/B sont plutôt moins robustes que, par exemple, les bétons avec CEM I et nécessitent en général une teneur en air plus élevée et également un traitement ultérieur meilleur ou plus long que les autres bétons afin de satisfaire à l'exigence d'une résistance élevée.

Commentaire sur la résistance à la carbonatation

La résistance à la carbonatation du type de béton G-ND est affaiblie en raison du rapport eau/ciment plus élevé et de la teneur en clinker plus faible dans le CEM III/B. Une analyse détaillée des résultats et de la modélisation a montré que la résistance à la carbonatation calculée est malgré tout suffisante. Cela s'explique par l'humidité du béton nettement plus élevée des éléments de construction arrosés par rapport aux essais de laboratoire et par le choix d'un enrobage plus élevé par rapport à la norme SIA 262.

La figure 6.11 montre que la profondeur de carbonatation attendue après 50 ans se situe entre 30 et 40 mm, aussi bien dans des conditions de laboratoire qu'à l'extérieur dans des conditions protégées. Dans des conditions humides (80 % d'humidité relative), la profondeur de carbonatation est beaucoup plus faible. On peut s'attendre à ce que la profondeur de carbonatation dans des conditions XC4 et sous l'influence de la pluie se situe quelque part entre les deux, très probablement en dessous de 30 mm. Cela est également suffisant pour une utilisation de 100 ans.

Aspect de la surface du béton

Le parapet en béton G-ND paraissait très clair. Il a donc été décidé d'assombrir légèrement la surface du béton avec une imprégnation (hydrophobe). Il s'agissait d'éviter que le parapet ne soit perçu comme une bande lumineuse depuis le côté opposé du lac et qu'il ne soit perçu comme gênant.

Expertise visuelle en 2022 et 2023

En 2022, le parapet du côté amont avec le béton G (fig. 6.13) présentait déjà des fissures de séparation grossières d'une largeur maximale de 0,3 mm et une distance entre les fissures comprise entre 1 et 1,2 m, avec une tendance à l'augmentation.

En revanche, le parapet côté lac avec le béton G-ND (fig. 6.16) présentait des fissures nettement plus fines. Les plus grandes fissures avaient une largeur d'environ 0,1 mm (distance entre les fissures : 15 - 30 cm). En raison de l'aspect beaucoup plus fin des fissures, du module d'élasticité plus bas et du retrait résiduel probablement un peu plus faible, il ne faut s'attendre ici qu'à une faible augmentation.

Viabilité environnementale (développement durable)

Le béton G-ND présente un profil de durabilité nettement amélioré par rapport au béton G (tab. 7.1 à 7.3). Cela est principalement dû au type de ciment (teneur en clinker plus faible) et à la teneur réduite en ciment dans le béton. Par rapport à un béton CEM I, le potentiel de gaz à effet de serre (GWP) n'est que de 33%, l'utilisation d'énergie n'est que d'environ 50% et les points de charge environnementale peuvent être réduits à environ 65%.

Coûts

Les seuls éléments de comparaison fiables sont les prix du béton dans les appels d'offres, car les prix des ciments, facteur de coût important, dépendent des régions et des clients et peuvent varier fortement. De plus, les prix dépendent également du portefeuille de produits actuel et futur du fabricant.

L'introduction de nouveaux types de béton, comme par exemple un béton selon l'annexe ND [25], nécessite des essais préliminaires. Ceux-ci prennent du temps (en fonction des tests de durabilité) et engendrent des coûts. Il faut en tenir compte lors de l'appel d'offres et du contrat d'entreprise ainsi que lors de la planification de l'exécution. Il est recommandé de faire figurer les essais préliminaires dans une position séparée de l'offre.

Pour une analyse globale, il ne faut pas seulement considérer les coûts du béton, mais aussi ceux de l'ensemble de l'élément de construction ou de l'ouvrage. Ainsi, un taux d'armature minimal plus faible peut entraîner une baisse des coûts.

Conclusion de l'application pilote

La formule de béton développée dans le cadre de l'application pilote a permis de satisfaire à une évolution favorable, c'est-à-dire lente, de la résistance à la compression ainsi qu'à la limitation à 38 N/mm² après 28 jours. Associé au faible module d'élasticité et donc à l'élasticité plus élevée du béton, il a été possible d'obtenir une répartition des fissures beaucoup plus fine que pour le type de béton G.

L'ouvrabilité du béton frais et la qualité de la surface du béton fini étaient bonnes et répondaient aux exigences et aux attentes.

La répartition fine des fissures et les propriétés de durabilité constatées pour le type de béton G-ND, combinées à l'enrobage des armatures selon l'OFROU, ont permis de réaliser un parapet qui devrait atteindre avec une grande sécurité la durée d'utilisation prévue.

La procédure testée lors de l'application pilote peut être appliquée à tous les autres éléments de construction empêchés de se déformer, tels que les bordures des ponts, les parois de cuvelages, les murs de soutènement, les parois arrière de galeries, les passages inférieurs ou les couvertures, afin d'obtenir une répartition aussi fine que possible des fissures.

Les propriétés de durabilité du type de béton G-ND sont nettement meilleures que celles du type de béton G. Les exigences techniques ont donc pu être atteintes avec une efficacité écologique nettement améliorée (teneur réduite en ciment ou en clinker dans le béton).

L'application pilote a également montré que le plan de contrôle revêt une grande importance. Il doit être cohérent et mis en œuvre de manière conséquente par la direction des travaux. En raison de l'importance et des conséquences possibles, seuls des laboratoires de contrôle expérimentés devraient être mandatés. Il est également important que le nombre de laboratoires de contrôle soit aussi réduit que possible afin de limiter la dispersion des valeurs de mesure et d'obtenir une bonne comparabilité des résultats et d'éviter ainsi des discussions inutiles sur le chantier.

Plusieurs thèmes de recherche ont été identifiés en rapport avec la nouvelle méthode de conception et l'objectif d'une construction en béton plus durable. Il s'agit d'une part de nouvelles applications pilotes pour d'autres applications de béton et d'autres compositions d'argile, pour l'évaluation des mesures contre le ressuage et le démoulage et des méthodes d'essai et critères correspondants.

D'autre part, il convient d'élaborer les bases pour l'évaluation et la comparaison d'éléments de construction et d'ouvrages entiers en ce qui concerne les propriétés des caractéristiques de viabilité environnementale.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Vorwort.....	3
Zusammenfassung	5
Resumé	9
Inhaltsverzeichnis	13
1 Einleitung	15
1.1 Zweck	15
1.2 Geltungsbereich	15
1.3 Adressaten und Adressatinnen	15
1.4 Inkrafttreten und Änderungen	15
2 Ausgangslage.....	16
2.1 Entwicklung der Stahlbetonbauweise	16
2.2 Neue Entwurfsverfahren für Beton nötig	18
2.3 Frischbeton.....	19
2.4 Festbetoneigenschaften	23
2.5 Beschreibung des neuen Entwurfsverfahrens für Beton	25
3 Pilotanwendung bei der Bahnhofbrücke in Tüschierz	30
3.1 Zielsetzung	30
3.2 Beschreibung des Bauwerkes und der Instandsetzungsmassnahmen	30
3.3 Mindestbewehrung zur Kontrolle der Rissbreiten	32
3.4 Anforderungen an die Betone G und G-ND	32
3.5 Beauftragte Labors.....	34
3.6 Anmerkung zur Bestimmung des w/z-Wertes	34
4 Betonsorte G.....	36
4.1 Betonzusammensetzung.....	36
4.2 Frisch- und Festbetonprüfungen	36
4.3 Ergebnisse der Frisch- und Festbetoneigenschaften	36
5 Betonsorte G-ND	38
5.1 Vorarbeiten	38
5.1.1 Vorbemerkung.....	38
5.1.2 Vorversuche im Betonlabor.....	38
5.1.3 Vorversuche im Betonwerk	38
5.1.4 Folgerungen	40
5.2 Muster/Erstprüfung (Herstellung, Eigenschaften)	41
5.2.1 Herstellung	41
5.2.2 Ergebnisse Frisch- und Festbetonprüfungen des Musters	42
5.2.3 Lagerung des Musters	43
5.2.4 Angleichen des Farbtons mit einer Imprägnierung	43
5.3 Ausführung der Betonarbeiten für die seeseitige Brüstung	44
5.3.1 Allgemeines	44
5.3.2 Betonieretappen.....	45
5.3.3 Analyse und Auswertung der Chargenprotokolle.....	46
5.3.4 Ergebnisse der Frischbetonprüfungen (Übersicht)	49
5.3.5 Druckfestigkeit.....	54
5.3.6 Schwinden.....	57
5.3.7 Dauerhaftigkeitseigenschaften	57
5.3.8 Nachbehandlung	59
5.3.9 Applikation der Imprägnierung	60

6	Vergleich der Betonsorten G und G-ND	61
6.1	Aussehen der Oberfläche	61
6.2	Druckfestigkeit	62
6.3	E-Modul.....	63
6.4	Schwinden	64
6.5	Dauerhaftigkeitseigenschaften	65
6.5.1	Allgemein	65
6.5.2	Chloridwiderstand	65
6.5.3	Frost-Tausalzwiderstand.....	66
6.5.4	AAR-Widerstand	66
6.5.5	Karbonatisierungswiderstand	67
6.6	Rissverteilung und Rissbreiten (2022 und 2023).....	68
7	Bewertung der Pilotanwendung und Folgerungen	73
7.1	Erkenntnisse aus der Pilotanwendung	73
7.2	Vergleich der technischen Eigenschaften der Betonsorten G und G-ND.....	74
7.3	Vergleich der Nachhaltigkeitseigenschaften der Betonsorten G und G-ND	74
7.4	Kosten	78
8	Empfehlungen	79
9	Forschungsbedarf	80
	Anhänge.....	81
	Glossar.....	93
	Literaturverzeichnis.....	94
	Auflistung der Änderungen	97

1 Einleitung

1.1 Zweck

Die vorliegende Dokumentation zeigt, wie mit einem neuen Entwurfsverfahren eine Betonsorte entwickelt wurde, welche die Frühschwindriss-Entwicklung bei einseitig verformungsbehinderten Bauteilen wie nachträglich aufbetonierten Leitmauern sehr stark reduziert. Als Nebeneffekt zeigt sich eine sehr gute Verarbeitbarkeit mit verbesserter Sichtbetonqualität und ein reduzierter CO₂-Verbrauch.

1.2 Geltungsbereich

Diese Dokumentation kann für Teile oder ganze Kunstbauten von Infrastrukturanlagen angewendet werden, bei denen mit dem hier dokumentierten neuen Entwurfsverfahren hergestellte Betonrezepturen einzelne Ziele besser erreicht werden können als mit den heute üblichen Tiefbaubetonen.

1.3 Adressaten und Adressatinnen

Diese Dokumentation richtet sich an Bauherren und Betreiber von Strassen mit Kunstbauten.

Die vorliegende Dokumentation richtet sich darüber hinaus an alle Fachpersonen, die mit der Projektierung, Bauausführung und dem Unterhalt von Kunstbauten in Stahlbetonbauweise betraut sind.

Weiter Adressaten sind Hersteller und Lieferanten von Frischbeton, die im Rahmen von Pilotprojekten bereit sind, Bauherren bei der Anwendung solcher leistungsorientierter Konzepte zu unterstützen.

1.4 Inkrafttreten und Änderungen

Dieses Dokument tritt am 01.02.2023 in Kraft. Die «Auflistung der Änderungen» ist auf Seite 97 dokumentiert.

2 Ausgangslage

2.1 Entwicklung der Stahlbetonbauweise

Der Betonbau hat sich stetig verändert und weiterentwickelt. Seit den Anfängen mit Stampfbeton Mitte des 19. Jahrhunderts (zunächst meist unbewehrt, später dann bewehrt) fanden mit der Einführung des Stahl- und Spannbetons sowie dem Ultrahochleistungsbeton ohne und mit Fasern wichtige Entwicklungsschritte statt. Parallel dazu wurden die zugehörigen Regelwerke für die Anwendung erarbeitet [26].

Bis Mitte der 1990er Jahre war in der Schweiz im Wesentlichen nur der Portlandzement verfügbar. Zu dieser Zeit wurde in der Schweiz der Portland-Kalksteinzement CEM II/A-LL eingeführt. Seither ist die Anzahl der in der Schweiz für die Anwendung im Betonbau freigegebenen Zemente stark angestiegen (Abb. 2.1). Im Register des SIA ist der aktuelle Stand aufgeführt [<https://www.sia.ch/de/dienstleistungen/normen/register>]. Generell werden die Zemente heute viel feiner gemahlen als früher. Dies beschleunigt die Festigkeitsentwicklung, was nicht nur Vorteile hat.

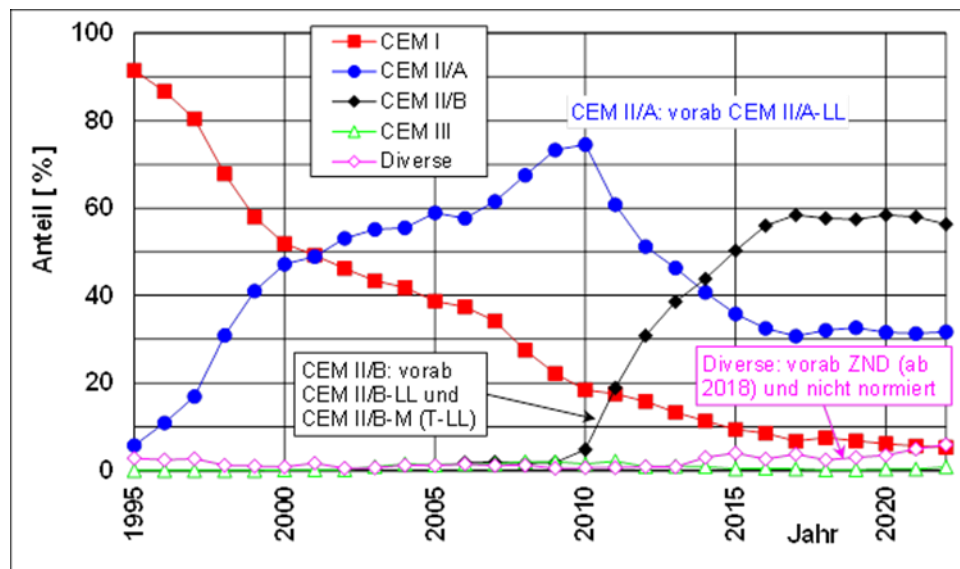


Abb. 2.1 Veränderungen des schweizerischen Zementmarktes (Daten cemsuisse).

Die verschiedenen Zementarten haben unterschiedliche Einflüsse auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften, z.B. Festigkeitsentwicklung, Karbonatisierungs-, Chlorid- und AAR-Widerstand. Während mit den einen Zementarten Betone mit einem hohen Karbonatisierungswiderstand (hohe CaO-Gehalte), aber nicht mit einem besonders guten Chloridwiderstand hergestellt werden können (z.B. CEM II/A-LL), sind diese Eigenschaften bei anderen Zementarten (hohe SiO₂-Gehalte) gerade umgekehrt (z.B. CEM III/B).

Nicht nur bei der Zusammensetzung und den Eigenschaften der Zemente fanden erhebliche Änderungen statt, sondern auch beim Beton:

- Vermehrter Einsatz von reaktiven mineralischen Zusatzstoffen Typ II wie z.B. Flugasche, Silikastaub, Hydrolith F200, Hüttensandmehl;
- Steigende Anforderungen an die Frühfestigkeit, um den Bauprozess zu beschleunigen.
- Steigende Nachfrage nach weichen bis flüssigen Betonen;
- Steigende Nachfrage nach AAR-beständigen Betonen;
- Stetiger Anstieg beim Einsatz von Pumpbeton.

Der Einsatz von Zusatzstoffen im Beton wird in der Schweiz mit dem k-Wert-Ansatz geregelt. Die Details sind in der SN EN 206 [1] festgehalten. Mit dem k-Wert wird die Anrechenbarkeit von Zusatzstoffen als Zementersatz abgemindert. Zum Beispiel beträgt der k-Wert

für Flugasche 0.40. Enthält nun Beton z.B. 40 kg/m³ Flugasche, so darf dies nur zu $0.4 \cdot 40 = 16 \text{ kg/m}^3$ beim Mindestzementgehalt und bei der Berechnung des w/z-Wertes berücksichtigt werden. Dies erhöht den Bindemittelgehalt (Summe aus Zement und Zusatzstoffen Typ II).

Der k-Wert-Ansatz darf weiter nur für bestimmte, frei gegebene Kombinationen von Zement und Zusatzstoffen angewendet werden. Im Zementregister sind diese aufgeführt. In einigen Fällen ist die Anwendung nur für bestimmte Expositionsklassen zulässig. In allen Fällen sind zudem anrechenbare Höchstmengen und maximale Zusatzstoffmengen festgelegt.

Seit der Einführung der Betonnorm SN EN 206 [1] in der Schweiz im Jahre 2000 ist dieses System immer komplizierter und unübersichtlicher geworden. Zudem ist es wegen der Kosten für die Freigabe auch teuer.

Weiche und flüssige Betone neigen zum Bluten und Entmischen. Für diese Frischbetoneigenschaften gibt es zurzeit keine Standardprüfungen. Weitere Ausführungen dazu sind im Kapitel 1.3 enthalten.

In den letzten 20 Jahren wurden in der Schweiz schrittweise Prüfungen für alle relevanten Dauerhaftigkeitseigenschaften eingeführt (Tab. 2.1) und in der Betonnorm SN EN 206 [1], im Merkblatt SIA 2042 [6] und in der SIA 262/1 [2] verankert. Die Grenzwerte sind in der SN EN 206 [1] bzw. im Merkblatt SIA 2042 [6] zu finden.

Tab. 2.1 Einführung der schweizerischen Dauerhaftigkeitsprüfungen. WPK: Werkseigene Produktionskontrolle

Prüfung	Prüfnorm	Grenzwert, Beurteilung	Bemerkung
Karbonatisierungswiderstand (KW)	SIA 262/1, Anhang I	SN EN 206	2013: WPK
Chloridwiderstand (CW)	SIA 262/1, Anhang B	SN EN 206	2003: WPK
Frost-Tausalzwiderstand (FTW); (Abwitterung)	SIA 262/1, Anhang C	SN EN 206	1989: Einführung 2003: WPK
Sulfatwiderstand	SIA 262/1, Anhang D	SN EN 206	2003: Einführung 2013: Freigaberegister
AAR-Beständigkeit	SIA 262/1, Anhang G	SIA 2042, SN EN 206	2012: Einführung (SBB: 2006; ASTRA: 2007) 2012: WPK

Seit mehr als 15 Jahren hat die Nachhaltigkeit von Beton und Betonbauten an Bedeutung gewonnen. Seitdem der Klimawandel und dessen Folgen immer klarer erkennbar wurden, hat der Druck auf den «schmutzigen Baustoff», wie die NZZ am Sonntag im Mai 2022 [28] den Beton bezeichnete, enorm zugenommen.

Der Energieinhalt («graue» Energie) und die gasförmigen Emissionen, vorab der CO₂-Ausstoss, stehen heute im Fokus. Das folgende Zitat:

«In den Zeiten des Überflusses ist der stetig zunehmende Energiekonsum wenig beachtet worden. Nur die aufkommende Sorge um die vielfältigen Beeinträchtigungen der Umwelt hat die Öffentlichkeit langsam für die Energiefragen interessiert.» (Zitat Ende.)

stammt nicht etwa aus den letzten Jahren, sondern aus einem Cementbulletin von 1976 [27]. Das Thema hat seither an Dringlichkeit erheblich gewonnen.

2.2 Neue Entwurfsverfahren für Beton nötig

Die Zementindustrie bemüht sich seit vielen Jahren, neue Zementarten mit immer tieferen Portlandzementklinkergehalten (Klinkerfaktor) auf den Markt zu bringen. Ein weiteres grosses, noch weitgehend ungenutztes Potenzial liegt bei der Betonzusammensetzung. Dies bedingt grundlegende Änderungen in der Betonnorm. Die heutige Betonnorm [1], obwohl über lange Zeit ein entscheidendes und unbestrittenes Element zur Sicherung der Qualität von Betonbauten, erschwert nicht nur, sondern sie verhindert die Entwicklung und Anwendung nachhaltiger und massgeschneiderter Betone.

Beispiele, wo die heutigen normativen Vorgaben technisch bessere, wirtschaftlichere oder ökologischere, d.h. nachhaltigere Lösungen verunmöglichen:

- Reduktion des Zementgehaltes auf das technisch nötige Niveau, z.B. Hochbaubetone, Pfahlbetone;
- Begrenzung der Druckfestigkeit auf bestimmte Werte (z.B. nach 28 oder 56 Tagen), um eine geringere Wärmeentwicklung im Bauteil und/oder eine bessere Rissverteilung zu erzielen;
- Anpassung der Betoneigenschaften an projektbezogenen Anforderungen, z.B. geringere Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand bei erhöhten Überdeckungen oder bei korrosionsbeständigen oder nicht korrodierenden Bewehrungen.

Die heutigen Regelungen in der SN EN 206:2013+A1:2016 [1] sind mehrheitlich seit mehr als 20 Jahren gültig und haben dazu beigetragen, die Betonherstellung und -bestellung zu vereinheitlichen und zu vereinfachen. Ein wichtiger Schritt war die Einführung der Hochbaubetone (Betonarten A bis C) und der Tiefbaubeton (Betonarten D bis G) und in den letzten Jahren der Pfahlbetone (Betonarten P1 bis P4).

Auf dem Weg für einen leistungsorientierten Betonentwurf war die Aufnahme von Vorgaben an die Dauerhaftigkeitseigenschaften und der zugehörigen Prüfverfahren in die Norm SN EN 206 [1] bzw. SIA 262/1 [2] (Tab. 2.1) grundlegend. Diese Entwicklung stellte die Basis für die Freigabeverfahren für die Anwendung von neuen Zementen, Zusatzstoffen und neuen Zement-Zusatzstoff-Kombinationen dar. Die erste Freigabe eines neuen Zementes erfolgte 2005.

Die aktuellen Bestimmungen der SN EN 206 [1] nutzen die heutigen betontechnologischen Kenntnisse und die vorliegenden jahrelangen Erfahrungen mit den Schweizer Prüfverfahren nicht und erschweren zunehmend, das vorhandene Potenzial des Betons bestmöglich zu nutzen. Insbesondere die starren Vorgaben des w/z - bzw. w/z_{eq} -Wertes und des Mindestzementgehaltes sind hinderlich oder sogar kontraproduktiv (z.B. beim AAR- und Sulfatwiderstand oder bei der Hydrationswärme). Der Beton ist durch die heutigen Vorgaben überbestimmt, da sowohl die Zusammensetzung als auch die (Dauerhaftigkeits-)Eigenschaften festgelegt sind.

Die Betonnorm [1] enthält drei Möglichkeiten, wie Zusatzstoffe beim w/z -Wert und beim Mindestzementgehalt angerechnet werden können. Neben dem in der Schweiz gut eingeführten k -Wert-Ansatz (siehe Kapitel 2.1) sieht die Norm weiter das Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit (ECPC) und das Konzept der gleichwertigen Leistungsfähigkeit von Kombinationen aus Zement und Zusatzstoff (EPCC) (Ziffer 5.2.5.3 und 5.2.5.4 EN 206) vor. Für diese Konzepte bestehen in der Schweiz keine Regelungen und dürfen daher nicht angewendet werden. Die im Anhang ND [25] vorgeschlagenen neuen Regelungen gehen wesentlich über die Möglichkeiten der beiden Konzepte hinaus. Im Vergleich zur Schweiz steht den allermeisten CEN-Mitgliedsländern die Einführung von Dauerhaftigkeitsprüfungen bei der werkseigenen Produktionskontrolle noch bevor. Erst dieser Schritt ermöglicht leistungsorientierte Entwurfsverfahren für Beton. Eine Ausnahme stellt hier Frankreich dar.

In Frankreich wurde im Rahmen des nationalen Forschungsprojektes PERFDUB (Approche PERFormantielle de la DURabilité des ouvrages en Béton / PERFORMANCE-based ap-

proach for concrete structures Durability) die Basis erarbeitet, um in Zukunft leistungsbezogene Betone zu bestellen, d.h. Betone ohne Vorgaben an Mindestzementgehalte oder maximale w/z-Werte [30], [31]. Die Regelungen sind im Dokument FD P 18 480 "Béton – Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle" [3] enthalten. Das FD P 18 480 liegt zurzeit als Entwurf vor. Darin werden bei den meisten Expositionsklassen (Ausnahmen XA und XS) keine Vorgaben an Mindestzementgehalte oder w/z-Werte gemacht. Das Dokument soll als Bestandteil in Verträge aufgenommen werden. Es fehlen zurzeit noch Regelungen für den Frischbeton. Unter anderem auch aus diesem Grunde wurden vorerst noch Vorgaben an den Bindemittelgehalt (Zement und Zusatzstoffe ohne k-Wert-Ansatz) und an den Mindestklinkergehalt ($\geq 15\%$) gestellt. Die Möglichkeit, Vorgaben für eine maximal zulässige Druckfestigkeit zu machen, gibt es nicht. Dies liegt gemäss [32] in der Verantwortung des Unternehmers. Regelungen für den Frischbeton sollen in einem nächsten Schritt erarbeitet werden [32]. Das FD P 18 480 enthält weiterhin detaillierte und umfangreiche Regelungen für die Qualitätskontrolle und die zugehörigen Konformitätskriterien.

Die vorstehend erläuterten Schwierigkeiten, das Potenzial der heutigen Betonausgangsstoffe optimal zu nutzen, wurde auch vom Verein der deutschen Zementindustrie VDZ in seinen Mitteilungen, z.B. in [33], angesprochen (Zitat):

"Insofern kann, je nach technischer Anforderung, bereits heute durch den Einsatz CO₂-effizienter Zemente im Beton oder durch den materialsparenden Einsatz von Beton oft klimaschonender gebaut werden. Gleichzeitig gilt es, die notwendigen rechtlichen und normativen Voraussetzungen schaffen, um die breite Anwendung neuer CO₂-effizienter Zemente zu ermöglichen und zu beschleunigen."(Zitat Ende).

Auf diese Probleme wird auch in [34] hingewiesen (Zitat):

"Substantial progress in developing emissions-reduced concretes have been reported in the literature. However, these solutions are only hesitantly being used in practical applications. This on the one hand has to do with the unknown risks going along with new concrete mixtures such as a reduced robustness. On the other hand – and more importantly – incentives and requirements to use new solutions are lacking. This is especially true when looking into the design process of concrete structures, where ecological requirements currently only play a minor role or are completely neglected."(Zitat Ende.)

Mit dem neuen Entwurfsverfahren, wie es im Entwurf für einen neuen Anhang ND zur SN EN 206 [25] beschrieben ist, sollen die oben angesprochenen Probleme beseitigt werden. Das Konzept enthält zwei Kernthemen, nämlich Frischbeton und Festbeton. Diese sollen in den nächsten beiden Kapiteln erläutert werden.

2.3 Frischbeton

Während bei der Prüfung von Festbeton in den letzten Jahrzehnten grosse Fortschritte gemacht wurden, wird der Frischbeton nach wie vor mit den alten Prüfverfahren geprüft. Einzig beim selbstverdichtenden Beton sind neue Prüfungen dazu gekommen.

Es fehlen bis heute anerkannte bzw. standardisierte Verfahren zur Prüfung der Blutneigung und des Entmischungsverhaltens sowie der Pumpbarkeit von Beton.

Die Pumpbarkeit wird hier nicht weiter behandelt. Diesbezüglich wird auf die umfangreichen Arbeiten von Prof. V. Mechtcherine, Institut für Baustoffe, TU Dresden, verwiesen. Eine Übersicht dazu wurde am Betontag 2018 [35] vermittelt. Das aus diesen Arbeiten hervorgegangen Prüfgerät, der so genannte Sliper, ermöglicht eine zweckmässige Prüfung der Pumpbarkeit von Betonen [36].

Nachfolgend sind einige in dieser Arbeit wichtige Begriffe definiert:

- Frischbeton: Beton vor Abbindebeginn des Bindemittels;
- Bluten: Absondern von Wasser (Porenwasser) aus dem Frischbeton;

- Entmischung/Sedimentation (Segregation): Trennung der feinen und groben Betonbestandteile durch Absetzen der (gröberen) Gesteinskörner;
- Robustheit und Stabilität können als Synonyme betrachtet werden. Robuste (stabile) Betone haben eine geringe Neigung zum Bluten und Entmischen;
- Setzen: Absenken des Frischbetons (als Ganzes).

Bluten und Entmischen sind bei den heute eingesetzten weichen bis flüssigen Betonen viel wichtiger als früher. Anfällige Betone sind [37]:

- Betone mit erhöhten w/z-Werten;
- Betone mit (zu) tiefen Leimgehalten (hohe FM-Dosierungen);
- weiche/flüssige Betone (C3, >F4, SVB);
- LP-Betone;
- Pfahlbetone (lange Pfähle → hoher Frischbetondruck).

Tiefe Luft- und Frischbetontemperaturen verstärken die Tendenz zum Bluten und Entmischen (langsamere Hydratation und längere Zeit bis zum Erstarrungsbeginn).

Neben der Robustheit von Frischbeton hat auch die Betonierbarkeit von Bauteilen abgenommen, da diese immer dichter bewehrt werden.

In vielen Ausschreibung wird die Konsistenzklassen C2 (1.25 – 1.11) oder C3 (1.10 – 1.04) verlangt. Erfahrungsgemäss ist das Verdichtungsmass bei sehr weichen Betonen nicht geeignet. In diesen Fällen wäre das Ausbreitmass aber wesentlich zweckmässiger (Abb. 2.2).

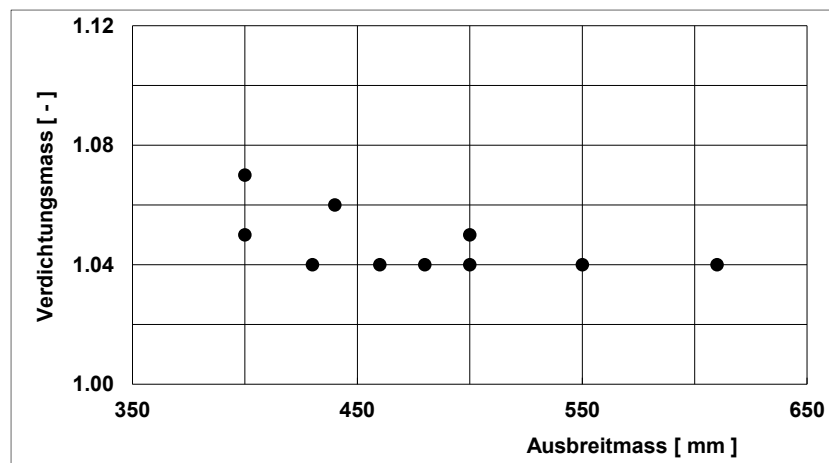


Abb. 2.2 Zusammenhang zwischen Verdichtungsmass und Ausbreitmass [38].

Eine ungenügende Robustheit von Beton (Abb. 2.3) kann sich z.B. als Wasserfilm unter der Bewehrung zeigen, was eine Schwachstelle (→ Korrosion, Verbundeigenschaften) darstellt. Es können bei undichten Schalungsstössen Kiesnester entstehen oder grobe Querschnittsabminderungen bei Pfählen. In [37] sind dazu einige Beispiele gezeigt.

Die Entmischung von Beton wird oft nicht erkannt, da die Zementhaut einen intakten Beton vortäuschen kann. Oftmals führt die Kombination von schwieriger/ungenügender Betonierbarkeit von Bauteilen und nicht robustem Frischbeton zu Problemen (Abb. 2.4 und Abb. 2.5).



a)



b)

Abb. 2.3 a) Bluten von Frischbeton (hier gut zu erkennen als Wasserabsonderung bei der Bestimmung des Ausbreitmasses) sowie b) Hohlräume und poröser Zementstein unter der Bewehrung infolge eines Wasserfilms [37].

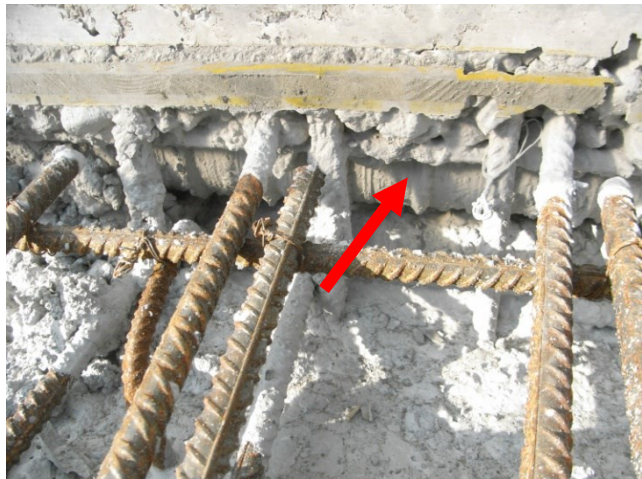


Abb. 2.4 Hohlkasten einer Brücke nach dem Ausschalen [37]. Gut sichtbar ist das nicht einbetonierte Spannglied (roter Pfeil). Fotos F. Hunkeler.



Abb. 2.5 Starke Entmischung bei einem Querträger, sichtbar geworden nach dem Aufrauen der Anschlussfläche zum Bankett. Foto ASTRA.

Um in Zukunft Probleme der oben beschriebenen Art zu reduzieren oder ganz zu vermeiden, braucht es robuste(re) Frischbetone:

- Ausreichender Widerstand gegen Bluten bzw. geringe Blutneigung, d.h. Beton kann das Anmachwasser zurückzuhalten bzw. sondert es nicht ab;
- Ausreichender Widerstand gegen Entmischen bzw. Sedimentation.

Die konkreten Anforderungen an diese beiden Eigenschaften sind abhängig von der Anwendung.

Für die Ausschreibung der Pilotanwendung in Tüschierz wurden – basierend auf den Erfahrungen mehrerer Arbeiten [37] – zwei neue Prüfverfahren mit den provisorischen Bezeichnungen Anhang ND-X und ND-Y ausgearbeitet:

- Anhang ND-X: Bestimmung der Blutwassermenge von Frischbeton unter Druck [39];
- Anhang ND-Y: Bestimmung des Entmischungsmasses von Frischbeton [40].

Die Entwürfe [39,40] können unter <https://ingenieurberatung.ch> heruntergeladen werden. Basierend auf mehreren Arbeiten konnten Vorschläge für Anforderungen gemacht werden (Abb. 2.6).

Die Bestimmung der Blutwassermenge ist auch in einem Leitfaden für das Erstellen von Pfählen beschrieben [41]. Weiter gibt es eine entsprechende Prüfung für Zusatzmittel [10]. Für selbstverdichtende Betone gibt es schon seit längerem die so genannte Sedimentationsstabilitätsprüfung [11], die aber nicht sehr empfindlich und für Rüttelbetone nicht geeignet ist.

Sowohl in Deutschland und Österreich sind Prüfverfahren für das Entmischen und Bluten eingeführt worden [12], [13], [14], [37]. In [29] wurden der Auswaschversuch und das Sedimentationsrohr – ursprünglich für selbstverdichtende Betone entwickelt [11] –, so modifiziert, dass sie auch für Rüttelbetone angewendet werden können. All diese Verfahren sind aber aufwändiger als die Bestimmung gemäss Anhang ND-X und Y [39], [40] und nicht baustellentauglich.

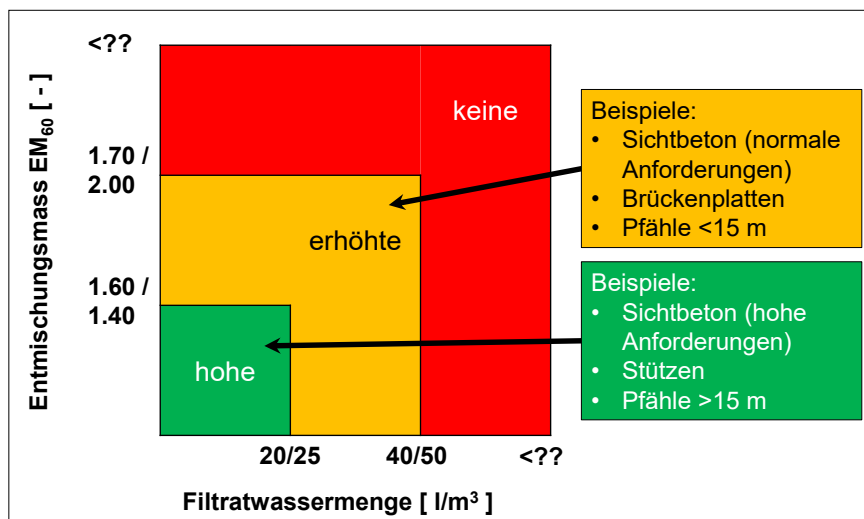


Abb. 2.6 Provisorische Anforderungen (Grenzwerte) zum Bluten und Entmischen von Beton (in Anlehnung an [37]).

2.4 Festbetoneigenschaften

Wie oben festgestellt, gibt es verschiedenen Themen, bei denen die heutige Betonnorm SN EN 206 [1] keine optimalen Lösungen zulässt. Im Rahmen der Pilotanwendung in Tüscherz stand die Begrenzung der Festigkeit im Vordergrund. Dies soll nachfolgend erläutert werden.

Die meisten Bauteile im Strassenbau müssen unter anderem für eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Umwelteinflüssen ausgelegt sein. Um die Anforderungen der Expositionsklassen zu erfüllen, werden in den aktuellen Schweizer Betonnormen [1] Grenzwerte für die Betonzusammensetzung festgelegt, insbesondere für den Mindestzementgehalt und den maximalen w/z-Wert, was oft zu Bauteilfestigkeiten führt, die über den vom Projekt nötigen und geforderten Werten liegen. Die Abb. 2.7a und b zeigen die mittlere 28d Druckfestigkeit über die Zeit der Betonsorten F (gut erkennbar sind die saisonalen Schwankungen) und die Verteilung der Druckfestigkeit der Betonsorte G. Beide Betone sind mit der Festigkeitsklasse C30/37 bestellt worden. Die Betonsorten F und G werden in der Regel für Elemente verwendet, die der Strassenumgebung ausgesetzt sind. Die Ergebnisse der Betonsorte F stammen von einem einzelnen Bauwerk, jene der Betonsorte G von mehreren Bauwerken, hauptsächlich von Brückenelementen und Stützmauern von Baustellen des Bundesamts für Strassen (ASTRA), die in den letzten 10 Jahren ausgeführt wurden. In den Abb. 2.7c und Abb. 2.7d sind die Häufigkeitsverteilung der Werte und die Summenhäufigkeit gezeigt. Bei der Betonsorte F liegen ca. 50% der Werte über 60 N/mm², bei der Betonsorte G sind ca. 50% über 50 N/mm².

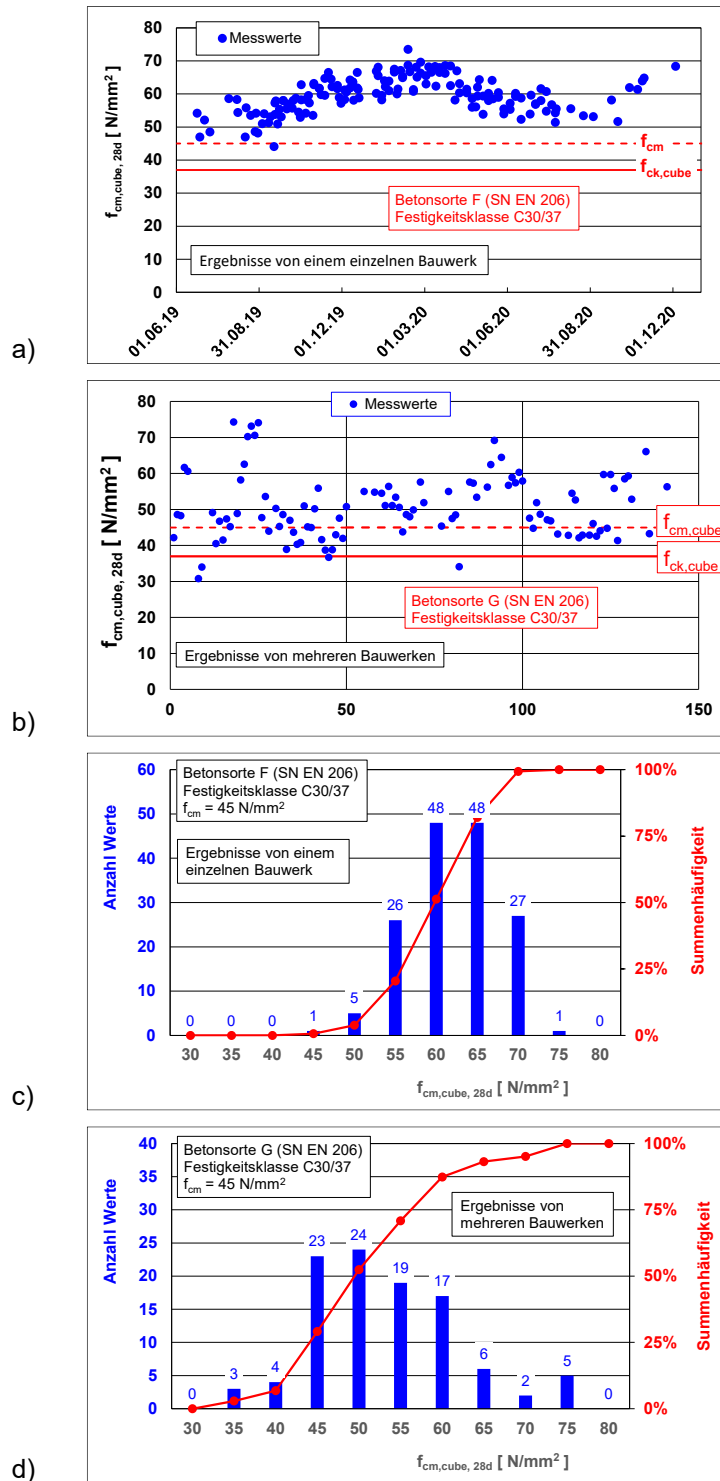


Abb. 2.7 Gemessene Druckfestigkeiten a) der Betonsorte F (Tagbautunnel Letten, Sins/AG: Fundamente und Gewölbe, Messwert = Mittelwert aus drei Würfeln) und b) der Betonsorte G (neuere ASTRA-Baustellen von vier verschiedenen grösseren Betonherstellern in der Westschweiz, Messwert ist meist der Mittelwerte von drei Würfeln). c) und d): Häufigkeitsverteilung und Summenhäufigkeit.

Während die Überfestigkeit bei stark bewehrten Bauteilen oder bei Bauteilen, bei denen der Nachweis der Tragsicherheit eine hohe Druckfestigkeit erfordert, von Vorteil sein kann, kann sie bei der Bemessung der Bewehrung nach der Gebrauchstauglichkeit, insbesondere im Hinblick auf die Risskontrolle bei behinderter Verformung, zu einigen unerwünschten Phänomenen führen. Wenn die Betonzugfestigkeit wesentlich höher ist als der für die Bemessung der Mindestbewehrung verwendete Wert, führt deren Unterschätzung zu einer

Überbeanspruchung der Mindestbewehrung bis hin zu deren Fliessen, wodurch die Rissbildung ausser Kontrolle gerät. Zu grosse Rissöffnungen können die Dauerhaftigkeit des Elements (z.B. Konsolköpfe, Rückwände von Galerien) oder seine Dichtheit im Falle von Wasserdruck (z.B. Wasseraufbereitungsbecken) verschlechtern. Abb. 2.8 zeigt ein Beispiel für ein unerwünschtes Rissbild mit einer unzureichenden Rissverteilung und damit Rissöffnungen, die die Grenzwerte für die Gebrauchstauglichkeit bei den intensiven Expositionsbedingungen überschreiten.



Abb. 2.8 Ungünstige Rissverteilung bei einer Brüstung, mehrheitlich eine Folge der Überfestigkeiten des Betons. Grobe Risse sind rot markiert. Foto M. Käser.

Für die Bemessung der Mindestbewehrung, die eine Risskontrolle ermöglichen soll, sind eine Reihe von Parametern wichtig. In der vorliegenden Arbeit konzentriert sich das ASTRA auf die Zugfestigkeit, die mit der Betondruckfestigkeiten korreliert, da sie einer der Parameter ist, der direkt proportional zur Rissöffnung bzw. -verteilung ist. Der Ansatz, den Bewehrungsgrad präventiv zu erhöhen, ohne eine Kontrolle über die maximal zu erwartende Betonfestigkeit zu haben, ist keine zufriedenstellende oder nachhaltige Lösung, weil gemäss Abb. 2.7 die Festigkeiten sehr weit über dem geforderten Wert liegen können. Zudem ist dies kostentreibend [42]. Weitere Überlegungen dazu enthält der Anhang I.

Die Forschung und Entwicklung richtet daher den Fokus auf alternative Verfahren für den Betonentwurf mit dem Ziel, die Festigkeit auf das erforderliche Niveau zu begrenzen und gleichzeitig die Dauerhaftigkeitsanforderungen zu erfüllen. Mit dem neuen Entwurfsverfahren für Beton gemäss dem Entwurf für einen Anhang ND [25] ist dies weitestgehend möglich.

2.5 Beschreibung des neuen Entwurfsverfahrens für Beton

Mit dem nationalen Anhang ND [25] soll ein einfaches leistungsbasiertes Entwurfsverfahren beschrieben werden, das von den Betonherstellern ohne grosse Schwierigkeit eingeführt werden kann. Es soll ermöglichen, das Potenzial von Beton so zu nutzen, dass die technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Anforderungen des Bestellers bestmöglich erfüllt werden.

Folgende Aspekte sind wichtig:

- Die Regelungen können für alle Arten von Betonen angewendet werden. Für selbstverdichtenden Beton und für Beton mit leichten oder rezyklierten Gesteinskörnungen sind teilweise abweichende Anforderungen zu erfüllen. Auf diese Regelungen wird hier nicht eingegangen;
- Für die Herstellung von Beton dürfen nur Ausgangsstoffe eingesetzt werden, die die Anforderungen der SN EN 206 [1] erfüllen;
- Die Regelungen für Frischbeton stützen sich auf die neuen, im Kapitel 1.3 erläuterten Prüfverfahren zur Charakterisierung des Frischbetons bezüglich Blutneigung und Entmischung;
- Die vorgeschlagenen neuen Regelungen dürfen nur von zertifizierten Betonherstellern angewendet werden. Es könne einzelne oder alle Betone gemäss diesem Anhang hergestellt werden.

Abb. 2.9 zeigt das Schema für die Entwicklung eines neuen Mischungsentwurfs gemäss Anhang ND [25]. Ausgangspunkt ist das Hohlraumvolumen der Gesteinskörnungsmischung, die für die Betonherstellung verwendet werden soll. Dieses muss nach SN EN 1097-3 [15] bestimmt werden. Dann wird das Volumen der Leimzusammensetzung optimiert, um die Anforderungen an den Frisch- und Festbeton zu erfüllen. Die wichtigsten Elemente sind:

- 1) Das Volumen des Leims (L) eines bestimmten Betons muss so sein, dass der Leim das Hohlraumvolumen des verwendeten Gesteinskörnungsgemisches ausreichend füllt und zu robusten Frischbetoneigenschaften führt.
- 2) Die Zusammensetzung des Bindemittels B (Zement und mineralische Zusätze Typ II) und das Volumen des Leims L sowie der w/B-Wert bzw. der w/L-Wert sind so zu wählen, dass alle geforderten Frisch- und Festbetoneigenschaften erreicht werden und der Korrosionsschutz der Bewehrung, falls vorhanden, sichergestellt ist.

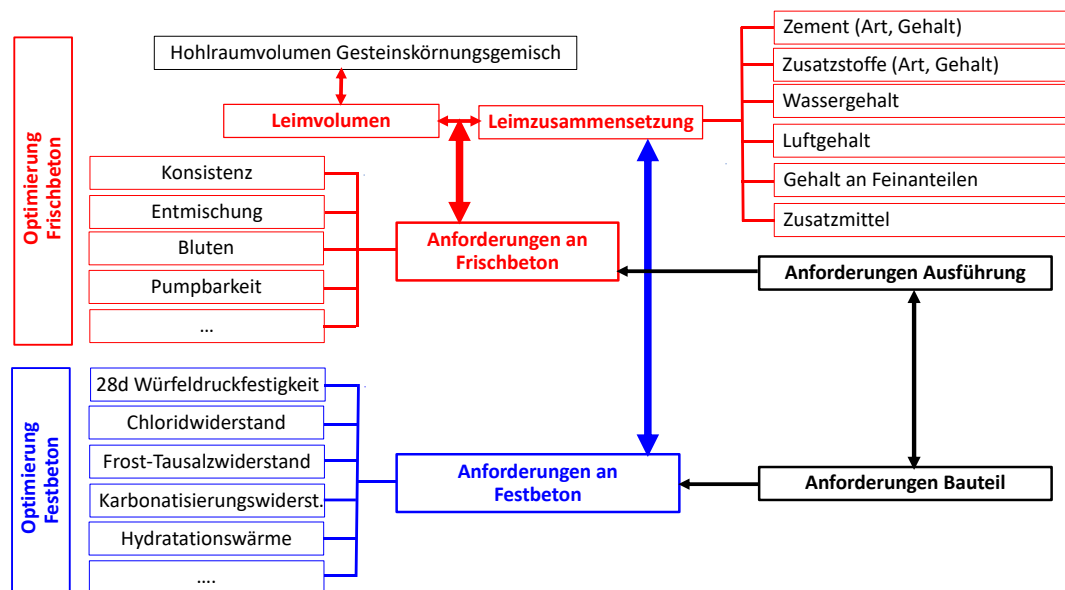


Abb. 2.9 Schema für ein neues Entwurfsverfahren für Betone auf der Grundlage der Bestimmungen im Anhang ND [25].

Die festen bzw. starren Vorgaben für die Mindestzementgehalte, wie sie z.B. in der SN EN 206 [1] mit $z_{\min}$ festgelegt sind, oder auch des Mindestbindemittelgehaltes $B_{\min}$ sind nicht zielführend, um robuste Betone herzustellen. Bei runden oder kantigen/gebrochenen Gesteinskörnungen ist das für einen robusten Beton nötige Mindestleimvolumen unterschiedlich. Selbst bei ähnlichen Gesteinskörnungen kann es unterschiedlich sein (z.B. Oberflächenrauigkeit, effektive Sieblinie). Zur Optimierung der Betonzusammensetzung soll dies daher mit Punkt 1) geregelt werden. So kann ein Betonhersteller die Betonzusammensetzung seinen spezifischen Gegebenheiten anpassen und optimieren.

Unter dem Begriff Hohlraumvolumen (HRV) werden die (luftgefüllten) Hohlräume eines Gesteinskörnungsgemisches, das für die Herstellung des Betons verwendet wird, verstanden. Die Begriffe Hohlraumvolumen und Hohlraumgehalt sind gleichwertig.

Die Abb. 2.10 zeigt die grosse Streubreite bei der für die Betonherstellung in der Regel verwendeten Gesteinskörnung 0/32mm [43]. Die Hohlraumgehalte von gebrochenem Material sind in der Regel >30 Vol.%. Das Zumischen von Beton- oder Mischgranulat gemäss Merkblatt für Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen [4] kann das Hohlraumvolumen zusätzlich verändern. Kündig et al. [43] haben darauf hingewiesen, dass zwischen Hohlraumvolumen und Zementleimbedarf für eine bestimmte Verarbeitbarkeit kein einfacher Zusammenhang besteht, sondern von verschiedenen weiteren Faktoren abhängig ist. Daraus kann geschlossen werden, dass das minimal notwendige Leimvolumen nur mit Versuchen ermittelt werden kann.

Mit dem vorgestellten Konzept gibt es zwei Regelkreise (Abb. 2.9): a) Optimierung der Frischbetoneigenschaften und b) Optimierung der Festbetoneigenschaften. Die beiden Regelkreise sind miteinander verknüpft und sind deshalb immer parallel zu betrachten und zu optimieren.

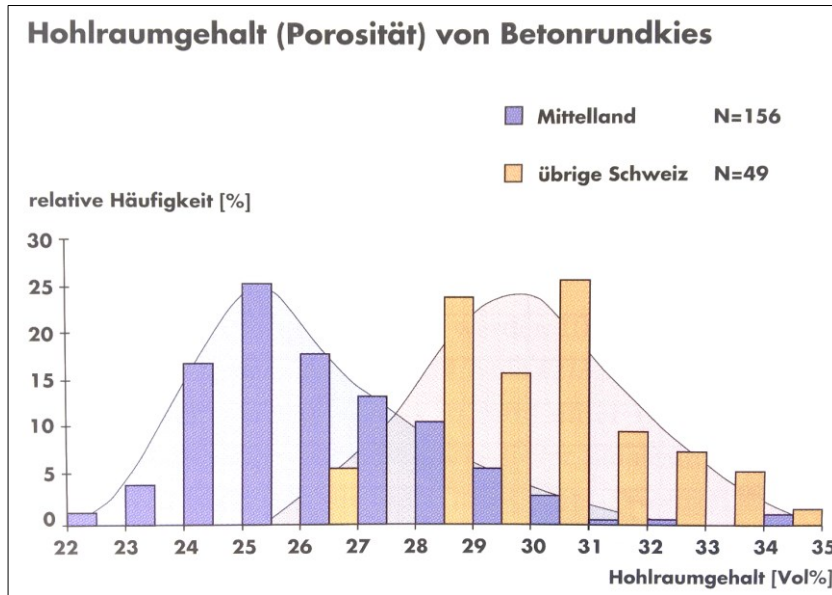


Abb. 2.10 Hohlraumvolumen von Betonkies der Fraktion 0/32 mm von Rundmaterial aus dem Mittelland und der übrigen Schweiz [43].

Das Leimvolumen (L) wird unter Berücksichtigung der Dichte der Leimbestandteile gemäss Gleichung 1 berechnet. Als Leimbestandteile gelten: Zement (z), Zusatzstoffen (ZS), Füller (FÜ), Feststoffe in den Zusatzmitteln (ZM) und dem Zugabewasser (w) sowie einem festgelegten Anteil des Feinanteils der Gesteinskörnung (FG) und einem festgelegten Anteil des Luftgehaltes (LU). Für Füller gilt die Definition gemäss SN EN 12620 [16].

$$L = \frac{z}{\rho_z} + \frac{ZS}{\rho_{ZS}} + \frac{FÜ}{\rho_{FÜ}} + a \cdot \frac{FG}{\rho_{FG}} + \frac{FM}{\rho_{FM}} + \frac{w}{\rho_w} + b \cdot \frac{1000 \cdot LU}{100}; \text{ l/m}^3 \quad \text{Gleichung 1}$$

z, ZS, FÜ, FM und w: Gehalte gemäss Betonrezeptur, kg
FG: Mittelwert des Feinanteilgehaltes, kg
LU: Mittelwert des Luftgehaltes, Vol.-%
P: Dichte, kg/m³
a, b: Konstanten (0 ≤ a, b ≤ 1, z.B. 0.5).

Um einen robusten Frischbeton zu erhalten, muss der Hohlraum eines Gesteinskörnungsgemisches ausreichend mit Leim gefüllt sein. Es gibt bis heute dazu kein standardisiertes Verfahren. Im Anhang ND [25] wird ein einfacher Weg definiert, der auch in der Praxis ohne weiteres auf verschiedene Betonsorten übertragen werden kann.

Gemäss Anhang ND [25] ist das Leimvolumen dann ausreichend hoch, wenn das Ausbreitmass des Frischbetons mit einem bestimmten Gesteinskörnungsgemisch ≥490 mm beträgt. Dieses Leimvolumen wird als Leimvolumen L_{F4} bezeichnet. Das für einen bestimmten Beton geforderte Mindestleimvolumen L_{min} ergibt sich aus Gleichung 2.

$$L_{min} = L_{F4} + 1000 \cdot (\sigma_{HRV} + \sigma_{LU}) + \frac{\sigma_{FG}}{\rho_{FG}}; \text{ l/m}^3 \quad \text{Gleichung 2}$$

Mit:

L_{F4}	Leimvolumen zur Erreichung des Ausbreitmasses $F4 \geq 490$ mm
σ_{HRV}	Standardabweichung des Hohlraumvolumens, Vol.-%
σ_{FG}	Standardabweichung des Feinanteilgehaltes, kg
ρ_{FG}	Dichte der Feinanteile, kg/m ³
σ_{LU}	Standardabweichung des Luftgehaltes, Vol.-%

Diese Regelung wurde gewählt, um den heutigen Anforderungen an weiche bis flüssige Betone nachzukommen und um die Schwankungen beim Hohlraumgehalt und der Feinanteile sowie des Luftgehaltes abzufangen. Mit zunehmender Erfahrung können die zu berücksichtigenden Standardabweichungen evtl. abgemindert werden.

Aus dem Mindestleimvolumen und dem mittleren Hohlraumvolumen wird das Verhältnis $L_{\min}/HRV$ berechnet. Dieses Verhältnis ist der Verfüllungsgrad des Hohlraumvolumens und wird mit HV bezeichnet.

Mit den zurzeit vorliegenden Erfahrungswerten können noch keine gesicherten Hinweise gegeben werden, wie hoch der Verfüllungsgrad des Hohlraumvolumens für die verschiedenen Anwendungen von Beton (z.B. Normalbeton, SVB, Pumpbeton). In den meisten bisherigen Fällen reichte eine Hohlraumverfüllung von 90-100%.

Es ist selbstverständlich, dass zu Beginn ein gewisser Mehraufwand entsteht, bis eine ausreichende Anzahl von Messergebnissen vorliegt und daraus zuverlässige Werte für die Standardabweichungen der verschiedenen Parameter zur Verfügung stehen.

Mit dem neuen Entwurfsverfahren gemäss Anhang ND wird es möglich, neben den üblichen Anforderungen auch spezifische Anforderungen an Festbeton zu stellen, ohne dass Konflikte mit anderen Regelungen in der SN EN 206 [1] auftreten, z.B.:

- Vorgaben an die Festigkeitsentwicklung und die Festigkeit z.B. nach 28 oder 56 Tagen;
- Anforderungen an die Wärmeentwicklung und die Vorgabe von Maximalwerten;
- Anforderungen an den Auslaugwiderstand.

In allen Fällen ist bei solchen Anforderungen – wie auch heute schon – das entsprechende Prüfverfahren festzulegen.

Der Anhang ND [25] enthält weiterhin auch Regelungen zur Erstprüfung und der werkseigenen Produktionskontrolle. Diese werden hier nicht behandelt.

Wichtige Regelungen betreffen den Korrosionsschutz der Bewehrung:

- a) Der Korrosionsschutz der Bewehrung ist sichergestellt, wenn das Verhältnis $w/CaO \leq 2.0$ ist (CaO-Gehalt in kg/m³ Beton). Der nicht reaktive CaO-Gehalt von Füllern wird nicht berücksichtigt.
- b) Ist das Verhältnis w/CaO grösser als 2.0 müssen die Anforderungen gemäss SIA 2049 [17], Ziffer 5.4.7, erfüllt werden. Für die Prüfungen ist anstelle des Zementes der Leim zu verwenden, so wie er für den bestimmten Beton vorgesehen ist.
- c) Die Bedingungen a) und b) müssen nicht eingehalten werden, wenn
 - das Bauteil aus unbewehrtem Beton besteht (Expositionsklasse X0)
 - der Beton für ein Bauteil in der Expositionsklasse XC1 (trocken) eingesetzt wird.
- d) Falls die Bewehrung aus einem nichtrostenden Stahl oder einem nicht metallischen Werkstoff wie z.B. Basalt-, Carbon- oder Glasfasern besteht, können die Bedingungen a) und b) gelockert werden. Die Anforderungen sind von einer Fachperson festzulegen. Zu berücksichtigen sind neben der Betonzusammensetzung z.B.: Exposition, Zusammensetzung des Stahls, Betonüberdeckung, mögliche Rissbreiten und Nutzungsdauer.

Mit den Bedingungen a) und b) soll sichergestellt werden, dass beim Einsatz von herkömmlichem Bewehrungsstahl ein minimaler Korrosionsschutz der Bewehrung auch dann gewährleistet wird, wenn keine Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand (Expositionsklassen XC3 und XC4), Chloridwiderstand (XD1 bis XD3) oder Auslaugwiderstand (XC2, nass oder dauernd feucht, selten trocken) gestellt werden.

Ein minimaler Korrosionsschutz ist dann sichergestellt, wenn sich bei der Hydratation ein ausreichend alkalisches Milieu einstellt und die Bewehrung unter diesen Bedingungen passivieren kann. Diese Anforderung kann z.B. für die Expositionsklasse XC1 (trocken), wo kein signifikantes Korrosionsrisiko besteht (z.B. Innenwände in Gebäuden), von Bedeutung sein. Grundsätzlich könnte man bei (sehr) trockenen Bedingungen sogar auf den minimalen Korrosionsschutz verzichten.

Überlegungen zum maximal zulässigen w/CaO -Wert wurde in einem Bericht zusammengefasst [44]. Darin wurde aufgezeigt, dass selbst bei hohen w/CaO -Werten, d.h. bei Werten um 2.0, noch ein gewisser Karbonatisierungswiderstand vorhanden ist. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass auch in diesen Fällen noch eine Alkalitätsreserve besteht. Daraus kann geschlossen werden, dass der im nationalen Anhang ND [25] festgelegte maximale w/CaO -Wert geeignet ist, um einen ausreichenden Korrosionsschutz zu gewährleisten. Diese Regelung kann z.B. für die Expositionsklasse XC1 (trockene Exposition, kein signifikantes Korrosionsrisiko) und tiefen Anforderungen an die Druckfestigkeit zum Tragen kommen. Bei anderen Expositionsklassen werden meist spezifische Anforderungen an die Betoneigenschaften gestellt, die tiefere w/CaO -Werte zur Folge haben.

3 Pilotanwendung bei der Bahnhofbrücke in Tüscherz

3.1 Zielsetzung

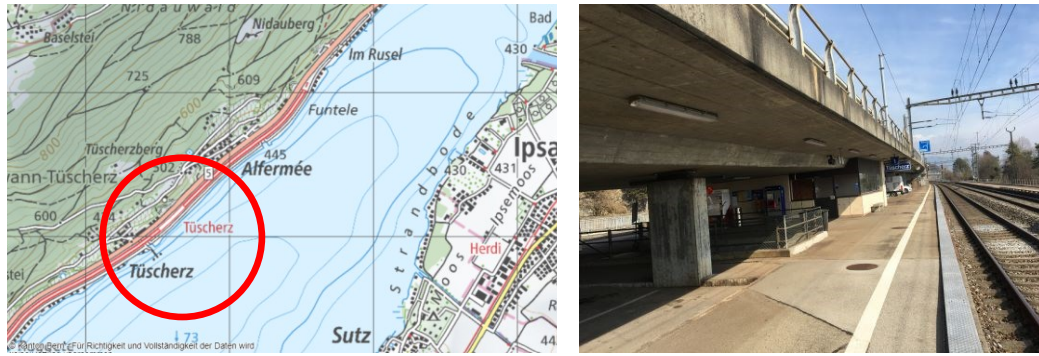
Um die Machbarkeit und die Praxistauglichkeit des im Anhang ND [25] vorgeschlagenen neuen Entwurfsverfahrens zu prüfen, hat das ASTRA eine Pilotanwendung realisiert. Insbesondere ging es darum, über den Labormassstab hinaus zu gehen und die Eignung für die Herstellung (Produktion in einem Betonwerk, Transport und Einbringen) sowie sein Verhalten auf struktureller Ebene bewerten zu können. Das Instandsetzungsprojekt der Brücke der Nationalstrasse 05 am Bahnhof Tüscherz wurde für eine erste Pilotanwendung ausgewählt und der Beton bei einer 126 m langen Brüstung getestet.

In einem Beitrag für den fib-Kongress im Juni 2022 in Oslo wurden die Ergebnisse zusammengefasst [45].

3.2 Beschreibung des Bauwerkes und der Instandsetzungsmassnahmen

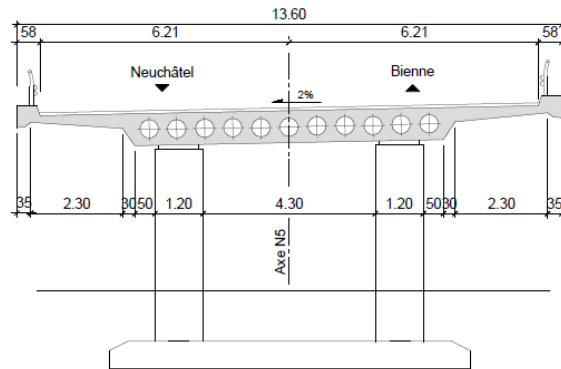
Die Bahnhofbrücke in Tüscherz ist 126 m lang und 13.60 m breit (Abb. 3.1 a,b) und wurde 1969 in Betrieb genommen. Die Brücke wurde 2021 im Rahmen eines ordentlichen Instandhaltungsprogramms erneuert mit dem Ziel, die Betriebssicherheit zu gewährleisten und die Substanz längerfristig zu erhalten.

Die vorhergehende Zustandsanalyse hat gezeigt, dass die strukturelle Sicherheit dieser Spannbetonkonstruktion gewährleistet ist, so dass keine strukturelle Verstärkung erforderlich war. Lediglich die Brüstungen, die nicht mehr den Normanforderungen entsprachen, mussten komplett erneuert werden (Abb. 3.1 c,d). Die neuen Brüstungen wurden gemäss VSS 40 561 [5] für die Rückhalte- bzw. Leistungsstufe H2 konzipiert, hier als 80 cm hohe Brüstung (Höhe Aussenseite: 121 cm) mit aufgesetztem Stahl-Kastenprofil. Diese Geometrie und die Betonierabschnitte von ca. 60 m Länge boten gute Voraussetzungen für die Erprobung einer neuen Betonrezeptur.

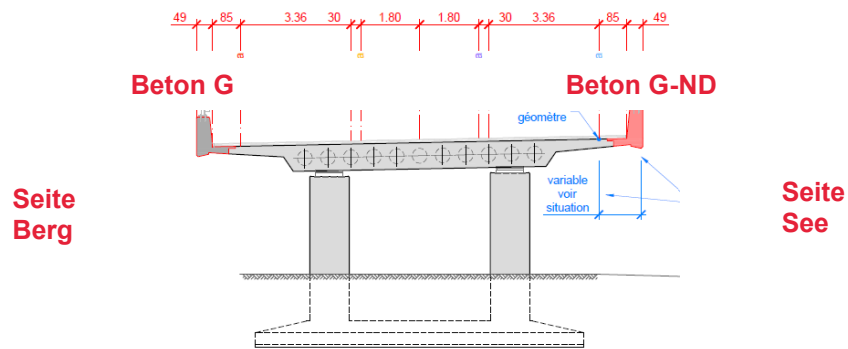


a)

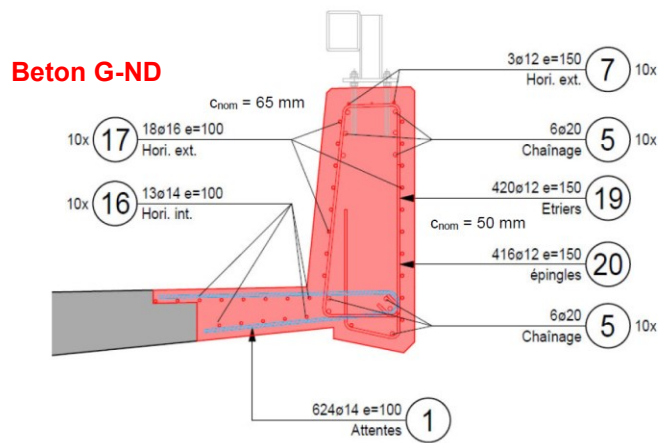
b)



c)



d)



e)

Abb. 3.1 a) Situation der Bahnhofbrücke Tüscherz am nördlichen Ufer des Bielersee im Kanton Bern (Quelle: Geoportal Kanton Bern); b) Ansicht der Brücke über das Bahnhofsgelände vor der Instandsetzung. Blickrichtung Biel; Querschnitt der Brücke c) vor und d) nach der Erneuerung; e) Querschnitt der neuen Betonbrüstung mit $c_{nom} = 65$ mm (Innenfläche) und 50 mm (Aussenfläche).

3.3 Mindestbewehrung zur Kontrolle der Rissbreiten

Neben geeigneten Ausführungsmassnahmen, wie z.B. einer guten Nachbehandlung des Betons, spielt die Mindestbewehrung eine entscheidende Rolle bei der Kontrolle der Rissöffnung und -verteilung. Auch wenn die Mindestbewehrung normkonform bemessen ist, wird die angestrebte Rissverteilung oft nicht erreicht, da in aller Regel die effektive Betonzugfestigkeit deutlich über dem Bemessungswert liegt.

Zur Vorhersage der Rissbildung in Bauteilen können verschiedene Modelle mit unterschiedlicher Komplexität und Genauigkeit verwendet werden. Der Anhang I enthält einige Überlegungen zu diesem Thema.

3.4 Anforderungen an die Betone G und G-ND

Für die Brüstungen, die den Einwirkungen von Karbonatisierung, Frost und Tausalzen ausgesetzt sind (Expositionsklassen XC4, XD3 und XF4), wurden die zwei folgenden Betonsorten ausgeschrieben:

- Für die Brüstung auf der Bergseite: konventionelle Betonsorte G gemäss [1];
- Für die Brüstung auf der Seeseite: Betonsorte G-ND gemäss Anhang ND [25].

Die Restnutzungsdauer wurde auf 50 Jahre festgelegt.

Der Anhang ND [25] war zusammen mit den beiden neuen Prüfverfahren für Frischbeton ein verpflichtender Bestandteil der Ausschreibung und des Werkvertrags.

In den Besonderen Bestimmungen wurden die Anforderungen an die beiden Betone definiert (Tab. 3.1).

Tab. 3.1 Anforderungen an die Betonsorten G und G-ND gemäss Ausschreibung

Beton-sorte	Brüs-tung	Druckfes-tigkeits-klasse	Expositi-onsklas-sen (CH)	Maxi-mal-korn D_{max}	Chlo-ridge-halts-klasse	Konsis-tenz-klasse	Künstliche Luftporen, Vol.-%	FTW-Wi-derstand	AAR-Wider-stand
G	Berg-seite	C30/37	XC4, XD3, XF4	32 mm	Cl 0.10	C3/F4	Gemäss den Gegebenheiten des Herstellers, Empfehlung ca. 3%	hoch	AAR-P3
G-ND	See-seite	C20/25 Zement mit niedriger Hydratationswärme	XC4, XD3, XF4	32 mm	Cl 0.10	F4	Gemäss den Gegebenheiten des Herstellers, Empfehlung ca. 4-5%	hoch	AAR-P3

In den Tab. 3.2 bis Tab. 3.5 sind die Anforderungen an die Betonzusammensetzung sowie an die Frisch- und Festbetoneigenschaften zusammengefasst.

Für den Beton G-ND wurde die Festigkeitsklasse C20/25 festgelegt mit einer Obergrenze für die 28d-Druckfestigkeit von 38 N/mm². Dieser Wert entspricht der mittleren Würfeldruckfestigkeit der nächsthöheren Festigkeitsklasse, C25/30. Die Entwicklung dieser neuen Betonsorte wird in Kapitel 5 beschrieben.

Tab. 3.2 Anforderungen an die Betonzusammensetzung

Ausgangsstoffe	Betonsorte G	Betonsorte G-ND
Basisdokument	SN EN 206 [1]	Anhang ND [25]
Zementart	Gemäss SN EN 206 [1]	Keine Anforderung. Dieses Projekt: CEM III/B
Mindestzementgehalt	$\geq 320 \text{ kg/m}^3$	Keine Anforderung
Zusatzstoffe Typ I und II	Gemäss SN EN 206 [1]	Gemäss SN EN 206 [1]
w/z oder w/z _{eq}	≤ 0.45	Keine Anforderung
k-Wert-Ansatz (Typ I and II)	Gemäss SN EN 206 [1]	Nicht angewendet; k = 1
Luftgehalt	Keine Anforderung. Es liegt in der Verantwortung des Betonherstellers den Luftgehalt so festzulegen, dass die Anforderungen an XF4 erfüllt werden, siehe Tab. 3.4 und Tab. 3.5. Nachweis mit Prüfung.	

Tab. 3.3 Anforderungen an den Frischbeton

Festbetoneigenschaft	Prüfverfahren	Betonsorte G	Betonsorte G-ND
Konsistenzklasse	SN EN 12350-05	F4	F4
Blutwassermenge	Anhang ND-X [39]	Keine Anforderung	$\leq 50 \text{ l/m}^3$
Entmischungsmass	Anhang ND-Y [40]	Keine Anforderung	≤ 2.0

Tab. 3.4 Allgemeine Anforderungen an den Festbeton

Festbetoneigenschaft	Betonsorte G	Betonsorte G-ND
Allgemein	Gemäss SN EN 206 [1]	Gemäss Annex ND [25]
Festigkeitsklasse	C30/37	C20/25
Maximale 28d-Würfeldruckfestigkeit	Keine Anforderung	$\leq 38 \text{ N/mm}^2$
Expositionsklasse (CH)	XC4, XD3, XF4	XC4, XD3, XF4
Maximalkorn	32 mm	32 mm
Chloridgehaltsklasse	0,10	0,10

Tab. 3.5 Dauerhaftigkeitsanforderungen an den Festbeton

Festbetoneigenschaft	Betonsorte G	Betonsorte G-ND
Karbonatisierungswiderstand: SIA 262/1, Anhang I [2]	Keine Anforderung. Keine Prüfung verlangt.	Keine Anforderung ¹⁾ . Prüfung verlangt.
Chloridwiderstand: SIA 262/1, Annex B [2]	$10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
Frost-Tausalzwiderstand: SIA 262/1, Annex C [2]	$m \leq 200 \text{ g/m}^2$ oder $m \leq 600 \text{ g/m}^2$ und $\Delta m_{28} \leq (\Delta m_6 + \Delta m_{14})$	$m \leq 200 \text{ g/m}^2$ oder $m \leq 600 \text{ g/m}^2$ und $\Delta m_{28} \leq (\Delta m_6 + \Delta m_{14})$
AAR-Beständigkeit: MB 2042 [6]	Beton-Performance-Prüfung bestanden	Beton-Performance-Prüfung bestanden. Keine Prüfung bei diesem Projekt, da der Zement CEM III/B verwendet wurde. Siehe Kapitel 6.5.4.

¹⁾ In neuen Projekten könnten Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand gestellt werden.



Abb. 3.2 Abbruch des alten Konsolkopfes und frei legen der Anschlussbewehrung auf der Bergseite. Blickrichtung Neuenburg (Stand am 02.06.2021, Foto F. Hunkeler)

3.5 Beauftragte Labors

Für die Frisch- und Festbetonprüfungen waren mehrere Prüflabors involviert (Tab. 3.6).

Tab. 3.6 Beim Projekt beauftragte Prüflabors

Labor Nr.	Auftraggeber
1	Betonhersteller
2	Unterauftragnehmer und Stellvertretung von Labor 1
3	Bauherr
4	Bauunternehmer
5	Unterauftragnehmer von Labor 4
6	Unterauftragnehmer von Labor 4
7	Unterauftragnehmer von Labor 1

3.6 Anmerkung zur Bestimmung des w/z-Wertes

Die Frischbetonprüfungen wurden von den Labors 1 bis 4 durchgeführt. Beim Vergleich der Ergebnisse müssen die teilweise hohen Vergleichsstandardabweichungen beachtet werden. Insbesondere beim w/z-Wert hat dies erhebliche Auswirkungen auf die Korrelation mit den verschiedenen Frisch- und Festbetoneigenschaften.

Gemäss einem Ringversuch des VAB [46] mit Betonen mit einem w/z-Wert unter 0.45 beträgt die Vergleichsstandardabweichung S_R bei der Bestimmung des w/z-Wertes rund 0.02, die Vergleichbarkeit R rund 0.06. Die Werte für die Wiederholbarkeit sind nur wenig besser.

Daraus muss gefolgert werden, dass die Genauigkeit der Bestimmung des w/z-Wertes wohl oft ungenügend ist, um mit den ermittelten Werten genaue Vergleiche zu machen oder Beurteilungen vorzunehmen. Oft ist es deshalb empfehlenswert, die Chargenprotokolle detailliert auszuwerten. Ggf. sind die daraus ermittelten w/z-Werte genauer und damit verlässlicher.

Im Korrigenda C1 zur Norm SIA 262/1:2019 [7], gültig seit 01.04.2021, wurden gewisse Definitionen geändert. Diese Änderungen wurden von den meisten Labors bis Herbst 2021 noch nicht umgesetzt, d.h. in den meisten Prüfberichten für dieses Projekte wurden noch die alten Begriffe verwendet.

In diesem Bericht werden die neuen Definitionen gemäss [7] verwendet (siehe Kasten).

Der Begriff WA_{24} wird durch w_G ersetzt.

w_0	Wassergehalt von Frischbeton (Summe aus wirksamem Wassergehalt und Wasseraufnahme der Gesteinskörnung), in kg/m^3
w	wirksamer Wassergehalt, in kg/m^3
w_G	vom Betonhersteller deklarierter Wassergehalt in der Gesteinskörnung, in kg/m^3 Beton, für Normal- und Schwergesteinskörnung (entspricht im Maximum dem Wassergehalt, der sich aufgrund der nach SN EN 1097-6 [18] gemessenen Wasseraufnahme der Gesteinskörnung ergibt)

Anzumerken ist, dass neben den im Kontrollplan für den Beton G-ND geforderten Prüfungen auch der Chloridwiderstand bestimmt wurde.

4 Betonsorte G

4.1 Betonzusammensetzung

Beim verwendeten Beton G handelt es sich um den Pumpbeton G 331-0 ($D_{\max}$ 32 mm) aus dem Sortenverzeichnis des Betonherstellers. Der Mindestzementgehalt nach Norm beträgt 320 kg/m^3 , der maximale w/z-Wert 0.45. Er wird mit dem Ausbreitmass F4 angeboten. Der effektive Zementgehalt des Betons betrug 330 kg/m^3 . Es wurde der Zement CEM II/B-M(S-LL) eingesetzt.

4.2 Frisch- und Festbetonprüfungen

In der nachfolgenden Tabelle sind die Vorgaben aus dem Kontrollplan zusammengestellt. Beim Kommentar wurden nur die Prüfungen vom Labor 3 im Auftrag des Bauherrn und jenen vom Labor 4 im Auftrag des Bauunternehmers zusammengezählt.

Tab. 4.1 Vorgaben im Kontrollplan für die Prüfungen der Frisch- und Festbetonprüfungen bei der Betonsorte G

Eigenschaft	Norm	Anzahl	Anforderung	Kommentar bzw. Vergleich zu Kontrollplan
Frischbeton ¹⁾	SN EN 12350 [21]	3	w/z $\leq$ 0.45 AM: F4	Prüfung wurde 2-mal durchgeführt.
Druckfestigkeit	SN EN 12390-3/7 [22]	3d: 2 7d: 1 14d: 1 28d: 4	$f_{ck,cube} \geq 37 \text{ N/mm}^2$ (28 Tage)	Die Vorgaben wurden nicht vollständig erfüllt.
Wasserleitfähigkeit	SIA 262/1, Anhang A. Hier ist wohl die Wassereindringtiefe gemeint	2	Die Anforderungen betreffen die Wassereindringtiefe.	Prüfung wurde nicht durchgeführt.
Frost-Tausalzwyderstand	SIA 262/1, Anhang C	2	Hoch	Prüfung wurde 2-mal durchgeführt.
Schwindmass	SIA 262/1, Anhang C. ersetzt durch SN EN 12390-13 [23]	3	<0.4 ‰ (nach 91, 181, oder 364 Tagen)	Prüfung wurde nicht durchgeführt.
E-Modul	SIA 262/1, Anhang C. Ersetzt durch SN EN 12390-16 [24]	2	Keine Anforderung	Prüfung wurde 2-mal durchgeführt.

¹⁾ Frischbetonprüfungen umfassen: Luft- und Betontemperatur, Konsistenz, Rohdichte, Luftgehalt, Wassergehalt bzw. w/z-Wert.

4.3 Ergebnisse der Frisch- und Festbetoneigenschaften

Die Brüstung auf der Bergseite wurde in zwei Etappen am 24.06.2021 und 07.07.2021 betoniert.

Bei der Etappe 1 wurden insgesamt zwei Frischbetonprüfungen (Labor Nr. 3 und 4) durchgeführt. Bei der Etappe 2 (07.07.2021) wurde lediglich die Druckfestigkeit geprüft (Labor Nr. 4).

Die Frischbetoneigenschaften sind in Tab. 4.2, die Festbetoneigenschaften in Tab. 4.3 zusammengestellt. In den Prüfberichten wird als Rezeptur die Betonsorte G331-8 angegeben. Im Sortenverzeichnis ist diese Betonsorte nicht aufgeführt. Für diesen Beton wurde gemäss Bericht des Labors Nr. 3 der Zement CEM II/B-M (S-LL) von jura cement verwendet. Der Vergleich mit der Betonsorte G-ND erfolgt im Kapitel 5.

Zu den Ergebnissen ist Folgendes anzumerken:

- Die ermittelten Luftgehalte (und damit auch die Frischbetonrohddichten) sind bei den beiden Prüfungen ziemlich unterschiedlich. Die übrigen Frischbetonwerte liegen im erwarteten bzw. geforderten Rahmen.
- Die gemessenen 28d-Würfeldruckfestigkeiten sind deutlich höher als der Mittelwert der Klasse $f_{cm, cube}$ von 45 N/mm². Sie entsprechen eher der Festigkeitsklasse C35/45.
- Die Festigkeitsentwicklung des Betons ist als rasch zu beurteilen.
- Der Beton wies bei den beiden Prüfungen einen hohen Frost-Tausalzwidestand auf.
- Der E-Modul liegt bei ca. 35 kN/mm². Der Beiwert k_E wurde gemäss SIA 262, Ziffer 3.1.2.3, berechnet. Er liegt eher unter dem erwarteten Wert. Die zeitliche Entwicklung wurde daher mit einem k_E -Wert von 10000 berechnet.

Tab. 4.2 Ergebnisse der Frischbetonprüfungen bei der Brüstung auf der Bergseite

Datum	24.06.2021	24.06.2021
Etappe	Etappe 1	Etappe 1
Labor Nr.	3	4
Lieferschein	205337	
Herstellzeit	06:45	
Prüfzeit	07:55	09:30
Rezeptur	G331-8	G331-8
Beton	C35/45	C35/45
Zementart	CEM II/B-M (S-LL)	
Zementgehalt	330	330
Rohdichte	2324	2423
Lufttemperatur, °C	16.6	15
Betontemperatur, °C	25.8	22.4
Luftgehalt, Vol.-%	4.8	2.9
AM, mm	500	495
w/z-Wert	0.44	0.43

Tab. 4.3 Ergebnisse der Festbetonprüfungen bei der Brüstung auf der auf der Bergseite

Datum		24.06.21		24.06.21		07.07.21	
Etappe		Etappe 1		Etappe 1		Etappe 2	
Labor Nr.		3		4		4	
LS		205337					
Druckfestigkeit, N/mm ²							
Alter, Tage		Einzelwerte		Mittelwert (Labor 4)		Festigkeitsentwicklung, %28d	
						E-Modul, berechnet mit k _E = 10000, kN/mm ²	
2		36.9		36.9		63	
4		38.48	45.6	45.6		77	
7		44.91	51.8	51.8		88	
14		48.51	57.4	57.4		97	
28		52.85	58.5	59.3	58.9	100	
Verhältnis 2/28d		0.62		0.62			
Verhältnis 7/28d		0.85	0.89	0.87			
E-Modul N/mm ²		35093	34501	34797			
k _E , berechnet		9040	8888	8964			
Frost-Tausalz widerstand							
Labor Nr.		3	3				
Abwitterung, g/m ²		14	31				
Beurteilung		hoch	hoch				

5 Betonsorte G-ND

5.1 Vorarbeiten

5.1.1 Vorbemerkung

Auf der Grundlage des im **Kapitel 1** beschriebenen Konzepts wurden sowohl im Labor als auch im Betonwerk mehrere Vorversuche durchgeführt, um das Volumen und die Zusammensetzung des Leims zu optimieren. Dazu wurden die Frisch- und Festbetoneigenschaften wiederholt bewertet. Das Hohlraumvolumen der für die Betonversuche verwendeten Gesteinskörnungsmischung betrug 29.5 Vol.-%. Die Anzahl der Silos des Betonherstellers war begrenzt, was die Flexibilität der Rezepturentwicklung einschränkte, so dass nicht alle betontechnologischen Möglichkeiten voll ausgeschöpft werden konnten.

5.1.2 Vorversuche im Betonlabor

Das Labor Nr. 1 hat in den Monaten Februar und März 2021 mehrere Vorversuche in einem Labormischer durchgeführt. Nach dem die Betonzusammensetzung grob geklärt war, wurden die nächsten Vorversuche im Betonwerk durchgeführt.

Für die Betonherstellung wurden der Hochofenzement CEM III/B 42,5 L-LH HS (Juranit) von jura cement eingesetzt. Dieser Zement wurde auch für alle weiteren Versuche und schlussendlich auch für Ausführung beibehalten. Er weist eine niedrige Hydratationswärme auf und wird hier auch deshalb eingesetzt, um einen AAR-beständigen Beton mit hohem Chloridwiderstand herzustellen.

5.1.3 Vorversuche im Betonwerk

Die Vorversuche im Betonwerk wurden im März und April 2021 durchgeführt. In mehreren Stufen wurden die Zementgehalte reduziert und der w/z-Wert erhöht (Tab. 5.1).

Tab. 5.1 Betonherstellung und -zusammensetzung (Uhrzeit ist gerundet)

Datum	Uhrzeit	LS-Nr.	Vol., m ³	Zusatzmittel, % Zem.			Zement, kg/m ³	KSM, kg/m ³	Wasser, l/m ³
				FM	LP	VZ			
10.03.2021	09:27	201349	2	0.30	0.42	0.00	270	-	133.51
25.03.2021	09:01	201932	2	0.31	0.41	0.00	270	-	153.39
25.03.2021	10:50	201953	2	0.20	0.41	0.00	271	-	162.56
27.04.2021	08:11	203157	2	0.21	0.42	0.00	243	25	155.81

Für die Betonherstellung wurden Sande und Kiese verwendet, wie diese vom Betonwerk auch für andere Betone gebraucht werden.

Das Kalksteinmehl (KSM) weist einen Feinanteil ($\varnothing \leq 63 \mu\text{m}$) zwischen 90 und 100% auf. Es ist damit als feines Kalksteinmehl zu bezeichnen. Die Rohdichte liegt zwischen 2.72 – 2.76 g/cm³.

In der Tab. 5.2 sind die Angaben zur Konsistenz und zum w/z-Wert des Frischbetons aufgeführt. Die Definitionen für w_0 , w und w_G sind in Kapitel 2.6 gegeben.

Dieser Tabelle kann entnommen werden, dass die bei der Frischbetonkontrolle bestimmten w/z-Werte (w/z (FBK)) immer tiefer sind als die w_0/z -Werte. Dies ist zu erwarten. Sie können aber sogar tiefer sein als die aus den Chargenprotokollen mit $w_G = 14 \text{ l/m}^3$ berechneten w/z-Werte (w/z (CP)). Dies sollte theoretisch nicht auftreten und wird im Kapitel 5.3.3 analysiert.

Sämtliche Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen werden im Kapitel 5.3 zusammen mit jenen der weiteren Prüfungen (Muster/Erstprüfung, Ausführung) gezeigt und kommentiert. Die Abb. 5.1 zeigt die Fotos der Durchführung der Frischbetonprüfungen.

Der am 27.04.2021 hergestellte Beton hatte noch einen Zementgehalt von 250 kg/m^3 und – zur Aufrechterhaltung eines Mindestleinvolumens – zusätzlich 25 kg/m^3 Kalksteinmehl. Der w/z-Wert lag bei 0.60. Das Kalksteinmehl wurde dabei nicht angerechnet.

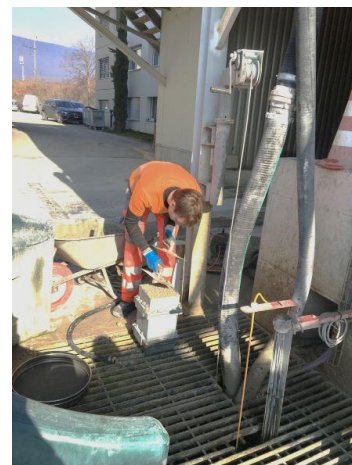
Dieser Beton stellte eine gute Basis für die weiteren Arbeiten dar.

Tab. 5.2 Angaben zum Frischbeton: AM: Ausbreitmass, w₀/z gemäss Chargenprotokoll (CP) und mit den Angaben aus dem Chargenprotokoll berechnet sowie w/z (CP) berechnet mit den Angaben aus dem Chargenprotokoll und einer Wasseraufnahme w_G von 10 bzw. 14 l/m³. w/z-Werte gemäss Frischbetonkontrolle (FBK).

Datum	Konsistenz		w ₀ /z		w/z (CP)		w/z
	Mischerlast	AM, mm	CP	berechnet	w _G = 10 l/m ³	w _G = 14 l/m ³	FBK
10.03.2021	5.1	460	0.49	0.49	0.46	0.44	0.44
25.03.2021	5.0	520	0.57	0.57	0.53	0.52	0.49
25.03.2021	4.9	500	0.60	0.60	0.56	0.55	0.54
27.04.2021	5.0	520	0.64	0.64	0.60	0.58	0.60



a)



b)



c)



d)

Abb. 5.1 Betonprüfungen am 10.03.2021: a) Visuelles Erscheinungsbild. b) Vorbereitung zur Bestimmung des Entmischungsmasses. c) und d) zeigen einzelne Schritte bei der Bestimmung der Blutwassermenge (Fotos F. Hunkeler)

5.1.4 Folgerungen

Die Ergebnisse des am 27.04.2021 durchgeführten Vorversuchs deckten die Erwartungen gut ab und es wurde entschieden, die Rezeptur gemäss Tab. 5.3 für das zu erstellende Muster zu verwenden.

Das mit der Gleichung 1 berechnete Leimvolumen beträgt gemäss Tab. 5.4 rund 290 l/m³ und ist damit praktisch gleich gross wie das Hohlraumvolumen.

Der w/CaO-Wert liegt bei dieser Betonrezeptur zwischen etwa 0.85 bis 1.0 und erfüllt den im Anhang ND [25] genannten oberen Grenzwert (Kapitel 2.5). Für diese Berechnung wurden folgende Annahmen für CEM III/B getroffen [44]:

- Portlandzementklinker:
 - Gehalt im Zement: 35%
 - CaO-Gehalt: 64%
- Hüttensand:
 - Gehalt im Zement: 65%
 - CaO-Gehalt: 30 – 45%.

Tab. 5.3 Rezeptur für Beton G-ND

Betonausgangsstoff	Gehalt	
	kg/m ³ Beton	Anteil, M.-%
CEM III/B	250.0	11%
Kalksteinmehl (ZS Typ 1)	25.0	1%
Gesteinskörnung (trocken) 0-32 mm	1886.0	82%
Zusatzmittel	0.8	0%
Total Feststoffe	2161.8	94%
Luft, Annahme	0	0%
Gesamtwasser inkl. Wasser aus ZM	150.0	6%
Total Beton	2311.8	100%
w/z, berechnet	0.60	
w/(z+KSM), berechnet	0.55	

Tab. 5.4 Berechnung des Leimvolumens

Betonausgangsstoff	Gehalt	Feinanteile in Masseteilen		Dichte	Feinanteile in Volumenteilen	
		M.-%	kg/m ³ Beton		Volumen, Liter/m ³	Vol.-%
CEM III/B	250.0	100	250.0	3.00	83.3	28%
Kalksteinmehl (ZS Typ 1)	25.0	95	23.8	2.70	8.8	3%
Gesteinskörnung (trocken) 0-32 mm	1886.0	0.505	9.5	2.67		
Zusatzmittel	0.8	100	0.8	1.08	0.74	0%
Total Feststoffe	2161.8		284.1		92.9	32%
Luft, Annahme 5%	0.0			0.00	50.0	17%
Gesamtwasser inkl. Wasser aus ZM	150.0	100	150.0	1.00	150.0	51%
Total Beton	2311.8		434.1		292.9	100%
w/z	0.60					
w/(z+KSM)	0.55					
w/Leimvolumen					0.512	

5.2 Muster/Erstprüfung (Herstellung, Eigenschaften)

5.2.1 Herstellung

Am 02.06.2021 wurde das 2 m lange Muster betoniert. Der Querschnitt sowie die Bewehrungsanordnung (Abb. 5.2) wurden dem Querschnitt der eigentlichen Brüstung nachgebildet. Die nachfolgenden Fotos (Abb. 5.3, Abb. 5.4) zeigen die Betonierarbeiten und das Muster nach dem Ausschalen.

Der für das Muster benötigte Beton wurde dazu benutzt, um daran auch die Erstprüfung durchzuführen.

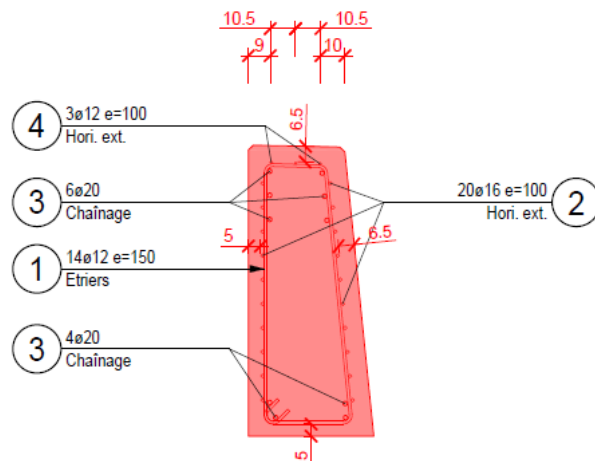
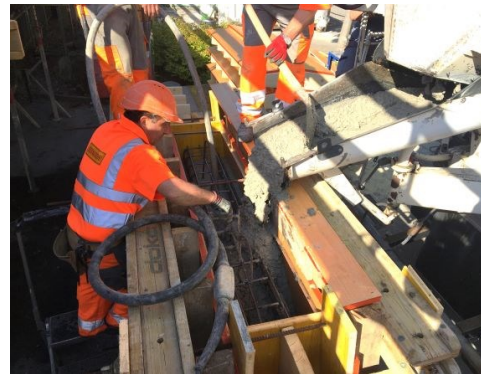


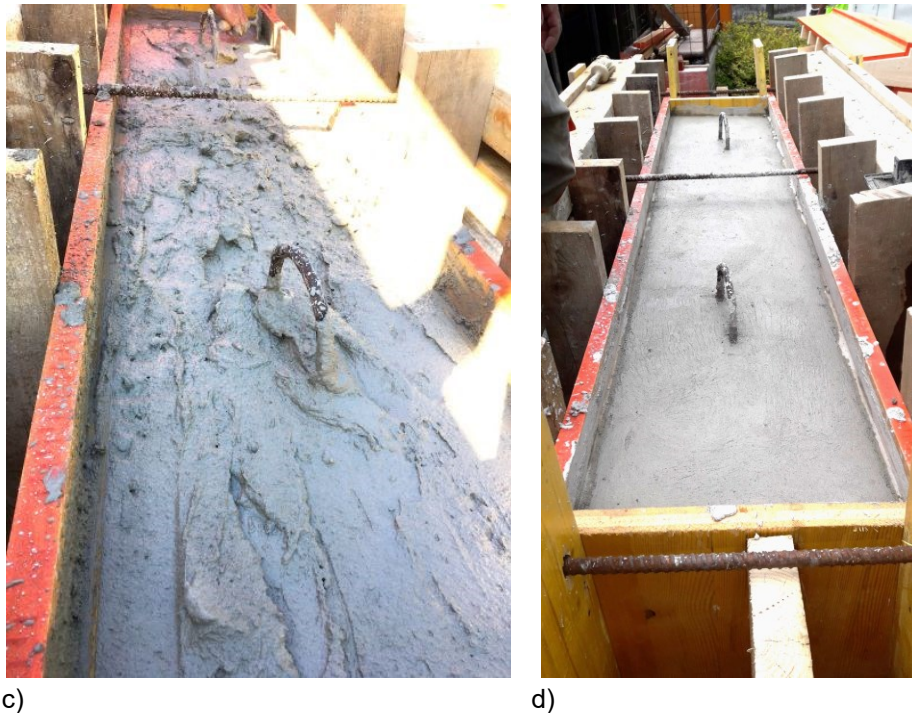
Abb. 5.2 Querschnitt des Musters (Nachbildung eines Brüstungselementes)



a)



b)



c)

d)

Abb. 5.3 Herstellung des Musters auf der Baustelle: a) Geschaltes Muster, b) Einbringen des Betons mit dem Betonmischer, c) Betonoberfläche vor und d) nach dem Abtalschieren (ohne Blutwasser). Fotos a) bis c): F. Hunkeler; Foto d): J.-M. Zweiacker.



a)

b)

Abb. 5.4 Ausgeschaltes Musters auf der Baustelle: a) Hinterseite, b) geneigte Vorderseite. Fotos J.-M. Zweiacker.

5.2.2 Ergebnisse Frisch- und Festbetonprüfungen des Musters

In den nachfolgenden Tabellen sind die Angaben zur Betonzusammensetzung, zu den Frisch- und Festbetoneigenschaften für das Muster aufgeführt. Die Ergebnisse der Festbetonprüfungen werden im Kapitel 6 zusammen mit jenen der anderen Prüfungen dargestellt.

Anzumerken ist, dass neben den im Kontrollplan für den Beton G-ND geforderten Prüfungen auch der Chloridwiderstand und die Spaltzugfestigkeit bestimmt wurden.

Die Bohrerndruckfestigkeit wurde nach 42 Tagen bestimmt. Der Mittelwert lag bei $34.2 \pm 2.9 \text{ N/mm}^2$ und damit unter dem vorgegeben Maximalwert von 38 N/mm^2 nach 28 Tagen.

Tab. 5.5 *Betonherstellung und -zusammensetzung für das Muster (Uhrzeit ist gerundet)*

Datum	Uhrzeit	LS-Nr.	Vol., m ³	Zusatzmittel, % Zem.			Zement, kg/m ³	KSM, kg/m ³	Wasser, l/m ³
				FM	LP	VZ			
02.06.2021	08:55	204507	2	0.21	0.43	0.00	244	25	157.91

Tab. 5.6 *Angaben zum Frischbeton des Musters*

Datum	Konsistenz		w ₀ /z		w/z (CP)		w/z.
	Mischer- last	AM, mm	CP	berechnet	w _G = 10 l/m ³	w _G = 14 l/m ³	FBK
02.06.2021	5.1	500	0.65	0.65	0.61	0.59	0.63

5.2.3 Lagerung des Musters

Um das Verhalten dieses Betons über einen längeren Zeitraum verfolgen zu können (Frost, Karbonatisierung, Druckfestigkeit), wurde das Muster nördlich der Brücke auf einer freien Fläche deponiert (Abb. 5.5). Die geeignete Fläche ist ungefähr Richtung Süden (= Richtung See) ausgerichtet.

Im Unterschied zu den Brüstungen der Brücke werden die Oberflächen des Muster nicht mit streusalzhaltigem Spritzwasser beaufschlagt. Dies beeinflusst die Karbonatisierungsgeschwindigkeit (Wassergehalt im Beton, Auswaschen etc.).

Die Rückseite ist praktisch immer beschattet. Die Karbonatisierungsbedingungen sind damit anders als bei den Brüstungen: Schnellere Karbonatisierung des seeseitigen, langsamere Karbonatisierung des praktisch immer beschatteten bergseitigen Betons.



a)



b)

Abb. 5.5 a) Lagerplatz, b) Muster auf dem Lagerplatz mit den Entnahmestellen der Bohrkern für die Druckfestigkeitsprüfung. Fotos a): J.-M. Zweiacker, Foto b): W. Waldis.

5.2.4 Angleichen des Farbtons mit einer Imprägnierung

Auf Grund der sehr hellen Farbe des Betons wurde entschieden, Lösungen für das Abdunkeln des Betons zu suchen. Von der gegenüber liegenden Seeseite hätte die Brüstung sonst als hell leuchtendes Band wahrgenommen und als störend empfunden werden können.

Die für den Oberflächenschutz zuständige Firma wurde beauftragt, verschiedene Oberflächenschutzsysteme auf das vorhandene Muster aufzubringen (Abb. 5.6). Im Vordergrund stand die Abdunkelung des Betons und nicht die Schutzwirkung gegen Einwirkungen. Zu Beginn standen weitere Systeme zur Diskussion (Beschichtungen gemäss SN EN 1504-2). Aufgebracht wurden schliesslich die folgenden Systeme:

- Sinnodur W2-H und W3 von Sinnotec (nachfolgend als Trauffer Beton Seal P bezeichnet)
- Sikagard 674 Lasur W von Sika.

Das System Trauffer Beton Seal P entspricht einer (hydrophobierenden) Imprägnierung gemäss SN EN 1504-2 [19]. Es ist unempfindlich auf die relative Luftfeuchtigkeit bei der Applikation. Beim Sikagard 674 muss die Luftfeuchtigkeit tiefer als 80% sein. Bei beiden Produkten ist trockenes Wetter Voraussetzung für die Applikation. Gemäss [47] hat das System folgende Vorteile:

- Geringe Veränderung der Betonoberfläche
- Wasserabweisende Wirkung
- Geringe Reduktion der Wasserdampfdurchlässigkeit
- Nicht filmbildend
- Farbton kann mit Pigmenten verändert werden.

Weitere Hinweise zum System Trauffer Beton Seal P und zu dessen Anwendung können dem Bericht [47] entnommen werden.

Am 04.10.2021 wurde der Farbton der beiden Varianten begutachtet und entschieden das System Trauffer Beton Seal P einzusetzen. Mehrere Gründe waren dafür ausschlaggebend:

- Wasserdampfdurchlässigkeit. Bei den stark abdichtenden Oberflächenschutzsystemen wurde die Gefahr der Blasenbildung wegen der Art der Exposition (stark besonnt) als hoch erachtet.
- Anpassung des Farbtons durch Zugabe von Pigmenten leicht möglich.
- Überarbeitung des Systems möglich.

Die Ausführung dieser Arbeiten wird im Kapitel 5.3.9 behandelt.

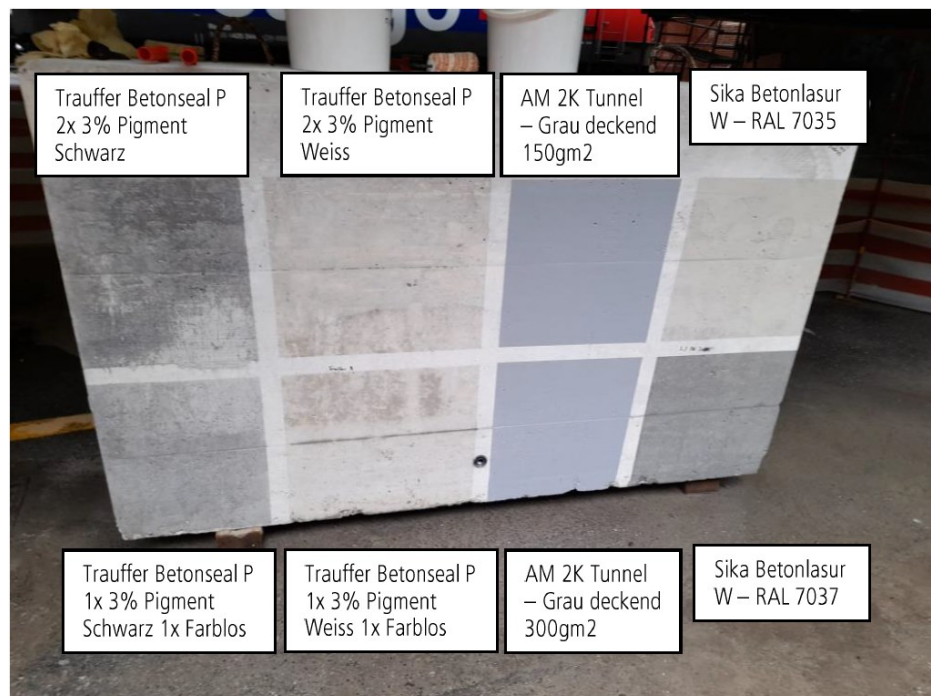


Abb. 5.6 Verschiedene Oberflächenschutzsysteme auf dem Muster [47].

5.3 Ausführung der Betonarbeiten für die seeseitige Brüstung

5.3.1 Allgemeines

In der Tab. 5.7 sind Vorgaben für die Betonsorte G-ND aus dem Kontrollplan zusammengestellt. Beim Kommentar wurden die durchgeführten Prüfungen vom Labor 3 (gemäss Auftrag des Bauherrn) und jenen vom Labor 4 (gemäss Auftrag des Bauunternehmers) berücksichtigt.

Wie schon bei den Vorversuchen und beim Muster wurde zusätzlich der Chloridwiderstand bestimmt.

Im Betonwerk wurden drei Frischbetonprüfungen durchgeführt (2x Labor 1, 1x Labor 2). Krankheits- und ferienbedingte Personalausfälle hatten zur Folge, dass bei der 2. Etappe am 11.10.2021 im Betonwerk keine Frischbetonprüfungen möglich waren.

Bei einigen Prüfungen wurden die Vorgaben des Kontrollplans bzgl. Anzahl gar nicht oder nur teilweise erreicht. Die Wasserleitfähigkeit wurde nie geprüft.

Gemäss Kontrollplan hätten die Blutwassermenge und das Entmischungsmass 7-mal bestimmt werden sollen. Diese Vorgaben wurden nicht erreicht. Für die Labors Nr. 3 und 4 waren diese Prüfungen neu. Labor Nr. 4 führte diese Prüfung auf der Baustelle das erste Mal durch.

Wie im Kapitel 3.5 erwähnt, waren mehrere Labors für die Frisch- und Festbetonprüfungen aufgeboden. Hier ist anzumerken, dass die Ergebnisse vom Prüflabor 4 teilweise erheblich von den Werten der anderen Labors abwichen.

Tab. 5.7 Vorgaben im Kontrollplan für die Prüfungen der Frisch- und Festbetonprüfungen beim Beton G-ND

Eigenschaft	Norm	Anzahl	Anforderung	Kommentar
Frischbeton ¹⁾	SN EN 12350 [21]	7	$w/z \leq 0.45$ AM: F4	Prüfung wurde 6-mal durchgeführt (4x Labor 4, 2x Labor 3).
Blutwasser- menge	Anhang ND-X [39]	7	$BWM \leq 50 \text{ l/m}^3$	Prüfung wurde nur 2-mal durchgeführt (Labor 4)
Entmischungs- mass	Anhang ND-Y [40]	7	$EM \leq 2$	Prüfung wurde nicht durchgeführt.
Druckfestigkeit	SN EN 12390-3/7 [22]	3d: 3 7d: 3 14d: 3 28d: 7 56d: 4	$f_{ck,cube} \leq 38 \text{ N/mm}^2$ (28 Tage)	Die Vorgaben des Kontrollplans wurden nicht vollständig erfüllt.
Wasserleitfähig- keit	SIA 262/1, Anhang A [2]	5	Die Anforderungen betreffen die Wassereindringtiefe.	Prüfung wurde nicht durchgeführt.
Frost-Tausalzwi- derstand	SIA 262/1, Anhang C [2]	5	Hoch	Prüfung wurde nur 2-mal durchgeführt.
Schwindmass	SIA 262/1, Anhang F [2]. Ersetzt durch SN EN 12390-13 [23]	3	$<0.4 \text{ ‰}$	Prüfung wurde nur 2-mal durchgeführt.
E-Modul	SIA 262/1, Anhang G [2]. Ersetzt durch SN EN 12390-16 [24]		Keine Anforderung festgelegt.	Prüfungen wurden 2-mal durchgeführt.

¹⁾ Frischbetonprüfungen umfassen: Luft- und Betontemperatur, Konsistenz, Rohdichte, Luftgehalt, Wassergehalt bzw. w/z-Wert.

5.3.2 Betonieretappen

Die seeseitige Brüstung wurde in drei Etappen betoniert (von Westen nach Osten):

- Etappe 1 am 30.09.2021: 41 m³ Länge ca. 61 m
- Etappe 2 am 11.10.2021: 42 m³ Länge ca. 62 m

- Etappe 3 am 15.10.2021: 4 m³ Länge ca. 3 m.

Bei allen drei Betonieretappen herrschte trockenes Wetter. Mehrheitlich war es sonnig. Die Lufttemperatur lag am 30.09.2021 zwischen 10 und 15 °C, die Betontemperatur um 20 °C. Am 11.10. und 15.10.2021 waren Luft- und Betontemperatur einige Grade tiefer.

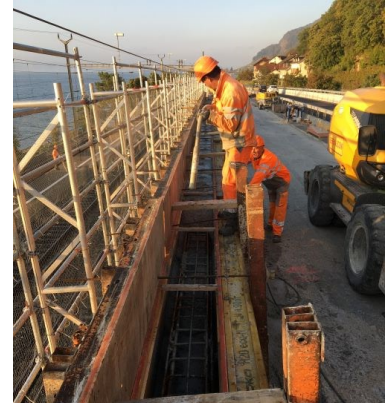


Abb. 5.7 Betonierarbeiten bei der 2. Etappe am 11.10.2021. Fotos F. Hunkeler.

5.3.3 Analyse und Auswertung der Chargenprotokolle

Das Betonwerk hat den Verfassern dieses Berichts sämtliche Chargenprotokolle abgegeben. Diese wurden im Detail ausgewertet. Die entsprechenden Tabellen mit allen Details sind im Anhang II zu finden.

Bei den Betonen für die Ausführung wurden folgende Produkte eingesetzt:

FM:	Master Glenium Sky 744 von Master Builders Solutions
LP:	Master Air 304 von Master Builders Solutions
VZ:	Mapetard D von Master Builders Solutions
Zement:	CEM III/B von jura cement
KSM:	sh_stoneash (Typ I) vom Calcitwerk Schön + Hippelein GmbH + Co. KG, Heidenheim (Lieferant: mt materials ag, Wallisellen. Deklarierter Anteil ≤ 63 µm: 90-100%.

Bei den Vorversuchen wurden teilweise andere Zusatzmittel verwendet. Zu beachten ist weiter, dass bei den Vorversuchen nie Verzögerer eingesetzt wurden. Bei der Ausführung wurden – abgesehen von der 3. Etappe – bei der 1. und 2. Etappe immer Verzögerer zugegeben.

Bei der 1. und 2. Betonieretappe waren je 5 Betonlieferungen nötig (Total 41 und 42 m³), bei der 3. Etappe nur eine einzelne Lieferung (4 m³). Das Betonvolumen pro Lieferung lag zwischen 2 und 10 m³. Eine Lieferung mit 10 m³ Beton wurde aus 4 einzelnen Chargen à 2.5 m³ hergestellt.

Der Zementgehalt lag bei der 1. Etappe mit 5 kg/m³ unter dem Sollwert von 250 kg/m³.

Die Schwankungen bei der Dosierung der Zusatzmittel und des Zementes sind tief.

Das Kalksteinmehl wurde händisch mit 25 kg Säcken zugegeben. Die Dosierung kann deshalb als genau angenommen werden.

Der Wassergehalt schwankte bei der 1. Etappe erheblich. Die Standardabweichung betrug fast 8 l/m³. Bei der 2. Etappe lag dieser Wert mit 0.6 l/m³ sehr viel tiefer.

Die Mischzeiten betrugen gemäss Chargenprotokoll 70 bis 80 Sekunden. Für LP-Betone

ist dies eher kurz. Im Produkteblatt des Herstellers für das Master Air 304 steht: «Zur Erreichung der optimalen Wirkung des Zusatzmittels empfehlen wir eine minimale Nassmischzeit von 90 Sekunden je nach Art und Typ des Mixers.»

Die Mischerlast kann als Mass für die Konsistenz des Betons verwendet werden. Sie variiert vorab bei der 1. Etappe sehr erheblich (4.7 ± 0.4), bei der 2. Etappe deutlich geringer (5.0 ± 0.1) (Tab. 5.8). Auch bei einzelnen Lieferungen der beiden Etappen wiesen die Standardabweichungen grössere Unterschiede auf (Maximalwerte: ± 0.6 bzw. ± 0.4).

Der Wert für w_0/z wurde einerseits den Chargenprotokollen entnommen und andererseits aus den Angaben in den Chargenprotokollen berechnet. Um die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung w_G zu berücksichtigen, wurden die w/z -Werte mit einem Wert für w_G von 10 bzw. 14 l/m³ korrigiert. Die Reduktion liegt zwischen -0.04 und -0.06.

Der Mittelwert des w_0/z (14)-Wertes der 1. Etappe liegt bei 0.57, bei der 2. und 3. Etappe bei 0.58. Die Streuung war bei der 1. Etappe deutlich grösser als bei der 2. Etappe (schwankender Wassergehalt). Die mittlere Abweichung zu den aus den Angaben in den Chargenprotokollen berechneten Werten $w_0/z(\text{ber})$ beträgt -0.06.

Tab. 5.8 Angaben zum Frischbeton. N: Anzahl Lieferungen; m: Mittelwert; σ : Standardabweichung

Etappe Nr.	N	Konsistenz (Mischerlast)		$w_0/z(\text{CP})$		$w_0/z(\text{ber})$		$w_0/z(14)$		Δ zu $w_0/z(\text{ber})$
		m	σ	m	σ	m	σ	m	σ	
1	5	4.7	0.4	0.63	0.03	0.63	0.03	0.57	0.03	-0.06
2	5	5.0	0.1	0.65	0.01	0.64	0.00	0.58	0.00	-0.06
3	1	4.9	-	0.64	-	0.64	-	0.58	-	-0.06

Aus der Tab. 5.9 geht hervor, dass das Volumen des Zugabewassers bei der 1. Etappe viel stärker schwankt als bei der 2. Etappe. Die Ergebnisse sind in Abb. 5.8 dargestellt. Die Gerade für den Gesamtwassergehalt ist gegenüber jener für den Zugabewassergehalt parallel verschoben, d.h. die Geraden weisen praktisch die gleiche Steigung auf. Daraus darf geschlossen werden, dass die variablen Zugabewassergehalte für die stärker schwankenden w/z-Werte der 1. Etappe verantwortlich waren und nicht der variable Feuchtigkeitsgehalt der Gesteinskörnung (Abb. 5.9). Der schwankende Gesamtwassergehalt verursacht w/z-Unterschiede bis zu 0.06. Bei der 2. Etappe ist dies zu vernachlässigen. In Abb. 5.10 ist der (werksspezifische) Zusammenhang zwischen Ausbreitmass und Konsistenz Mischerlast gezeigt. Zwischen den im Betonwerk und auf der Baustelle gemessenen Werten gibt es keine offensichtlichen Unterschiede. Dies ist vermutlich auf die Wirkung des Verzögerers zurückzuführen.

Tab. 5.9 Detailanalyse des Wassergehaltes (in l/m³) und Auswirkungen auf den w/z-Wert. N: Anzahl Lieferungen; m: Mittelwert; σ : Standardabweichung

Etappe Nr.	N	Feuchtigkeit der GK		Zugabewasser		Total Wasser					Δ w/z
		m	σ	m	σ	m	σ	m - σ	m + σ	Δ	
1	5	47.0	1.1	106.8	8.6	153.8	7.7	146.1	161.5	15.4	0.06
2	5	46.0	0.6	113.9	0.8	159.8	0.6	159.3	160.4	1.2	0.00
3	1										

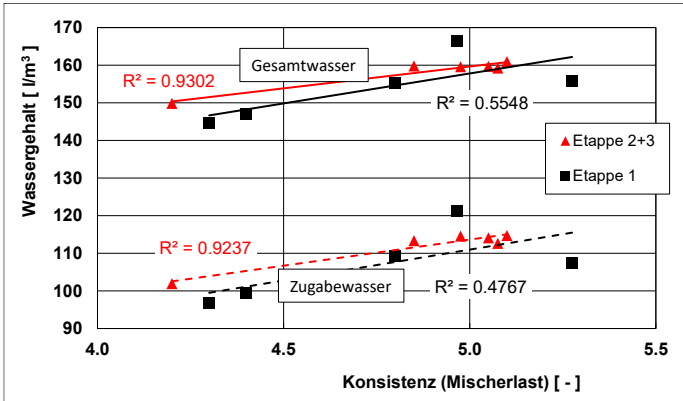


Abb. 5.8 Zusammenhang zwischen Konsistenz (Mischerlast) und Zugabe- und Gesamt-wassergehalt.

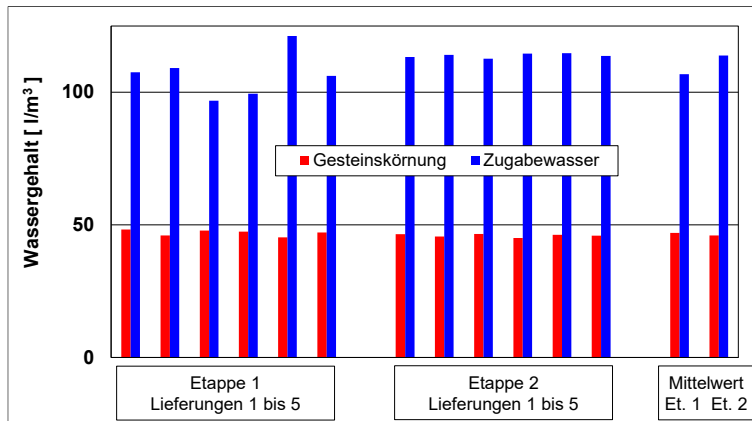


Abb. 5.9 Herkunft des Wassers im Beton bei den verschiedenen Lieferungen bei den Etappen 1 und 2. Bei der Etappe 3 gab es nur eine Lieferung.

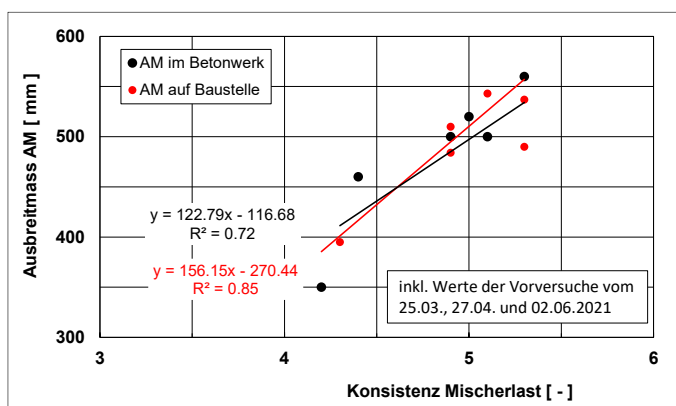


Abb. 5.10 Zusammenhang zwischen Ausbreitmass und Konsistenz (Mischerlast).

5.3.4 Ergebnisse der Frischbetonprüfungen (Übersicht)

Die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen bei den Vorversuchen sind in Tab. 5.10 zusammengestellt. Sämtliche Prüfungen wurden im Betonwerk durchgeführt. Aus diesem Grund ist die Zeitdifferenz zwischen Betonherstellung und Beginn der Frischbetonprüfung gering (rund 10 bis 15 Minuten). Bei einzelnen Prüfungen (z.B. bei der Bestimmung des Entmischungsmasses EM und der Blutwassermenge BMW) war der Beginn i.d.R. etwas verzögert.

In Tab. 5.10 sind folgende Grösse aufgeführt:

$w/z(\text{FBK})$	vom Prüflabor bestimmter w/z -Wert unter Berücksichtigung der Wasseraufnahme w_G der Gesteinskörnung (GK)
$w_0/z(\text{CP})$	in den Chargenprotokollen angegebener Wert
$w_0/z(\text{ber})$	berechnet aus den Angaben in den Chargenprotokollen (Zementgehalt, Wasser von der GK, Zugabewasser), ohne Korrektur für w_G
$w/z(10)$	berechnet aus den Angaben in den Chargenprotokoll (Zementgehalt, Wasser von der GK, Zugabewasser), mit Korrektur für $w_G = 10 \text{ l/m}^3$
$w/z(14)$	wie $w/z(10)$, aber mit $w_G = 14 \text{ l/m}^3$

Wie schon im Kapitel 5.1.3 vermerkt, war bei den ersten Vorversuchen der w/z -Wert zu tief angesetzt. Dieser wurde danach schrittweise erhöht.

Bei der Frischbetonprüfungen wurde für die Bestimmung des w/z -Wertes ($w/z(\text{FBK})$) für die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung, w_G , die vom Betonhersteller angegebenen Werte von 12 und 14 l/m^3 eingesetzt. Der unter Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung ($w_G = 14 \text{ l/m}^3$) aus den Chargenprotokolle berechnete w/z -Wert lag teilweise über den bei der Frischbetonprüfung ermittelten Werten (z.B. LS-Nr. 201932). Dies sollte eigentlich nicht sein. Unten wird noch einmal darauf eingegangen.

Das Entmischungsmass und die Blutwassermenge lagen unter den Vorgaben.

In der Tab. 5.11 sind die Ergebnisse der während der Ausführung der Betonarbeiten durchgeführten Frischbetonprüfungen aufgeführt. Bei den vom Labor Nr. 4 durchgeführten Frischbetonprüfungen wurde anstelle des geforderten Ausbreitmasses das Setzmass bestimmt (Tab. 5.12 und Abb. 5.11). In diesen Fällen wurde basierend auf Abb. 5.11 das Ausbreitmass aus dem Setzmass abgeschätzt. In der Tab. 5.10 ist der Mittelwert aus den beiden Gleichungen aufgeführt.

Tab. 5.10 Ergebnisse der Frischbetonprüfungen bei den Vorversuchen

LS-Nr.		201349	201932	201953	203157	204507
		10.03.21	25.03.21	25.03.21	27.04.21	02.06.21
Herstellung		09:27	09:01	10:50	08:13	08:00
Labor Nr.		1	1	1	1	1
Prüfungsort		BW	BW	BW	BW	BW
Prüfzeit		09:37	09:11	11:00	08:23	08:10
Differenz		00:10	00:10	00:10	00:10	00:10
Lufttemp.	°C	8.0	10.0	12.0	10.0	17
Betontemp.	°C	17.2	11.8	12.0	15.0	19
AM	mm	460	520	500	520	500
Konsistenz Mischer	-	5.1	5.0	4.9	5.0	5.1
Luft	Vol.-%	6.0	6.0	5.0	5.3	6.5
Rohdichte	kg/m ³	2280	2310	2340	2310	2230
w/z (FBK), mit w _G =	- l/m ³	0.44 14	0.49 12	0.54 12	0.60 14	0.63 14
w ₀ /z(ber)	-	0.49	0.57	0.60	0.64	0.65
w ₀ /z(CP)	-	0.49	0.57	0.60	0.64	0.65
w/z(10)	-	0.46	0.53	0.56	0.60	0.61
w/z(14)	-	0.44	0.52	0.55	0.58	0.59
Hinweis ¹⁾		OK	nicht OK	(nicht OK)	OK	OK
BWM	l/m ³			26	20	27
EM	-			1.9	1.5	2.0

¹⁾ Kommentar: w/z (FBK) sollte immer kleiner sein als der aus den Chargenprotokollen ohne Berücksichtigung von w_G und immer grösser als der mit w_G (14 l/m³) berechnete w/z-Wert.

Tab. 5.11 Ergebnisse der Frischbetonprüfungen bei der Ausführung

LS-Nr.		209074	209098	209074	209090	209074	209409	209409	209416	209590
Herstellung	2021	30.09.	30.09.	30.09.	30.09.	30.09.	11.10.	11.10.	11.10.	15.10.
	Zeit	07:10	09:59	06:58	08:45	06:58	06:30	06:30	08:30	09:59
Labor Nr.		1	1	4	4	3	4	3	4	2
Prüfungsort		BW	BW	BS	BS	BS	BS	BS	BS	BW
Prüfzeit		07:25	10:14	07:45	09:45	08:00	07:30	08:00	09:15	10:05
Differenz		00:15	00:15	00:47	01:00	01:02	01:00	01:30	00:45	00:06
Lufttemp.	°C	13	14	13	15	11.7	7	5	7	7.1
Betontemp.	°C	20	22	19	20	21.4	19	14	19	15.7
SM	mm			171	75		135		175	
AM ¹⁾	mm	560	460	(537)	(395)	490	(484)	510	(543)	350
Konsistenz Mischsch	-	5.3	4.4	5.3	4.3	5.3	4.9	4.9	5.1	4.2
Luft	Vol.-%	5.9	6.0	4.0	4.6	5.0	2.5	6.9	2.4	7.2
Rohdichte	kg/m ³	2300	2280	2338	2322	2258	2354	2221	2490	2280
w/z (FBK), mit w _G =		0.63	0.57	0.60	0.60	0.60	0.53	0.58	0.63	0.55
	l/m ³			10	10	14	10	14	10	14
w ₀ /z(ber)		0.64	0.60	0.64	0.59	0.64	0.64	0.64	0.63	0.61
w ₀ /z(CP)		0.64	0.60	0.64	0.59	0.64	0.64	0.64	0.65	0.65
w/z(10)		0.58	0.56	0.58	0.55	0.58	0.60	0.60	0.59	0.60
w/z(14)		0.57	0.54	0.57	0.54	0.57	0.58	0.58	0.57	0.58
Hinweis ²⁾		OK	OK	OK	nicht OK	OK	nicht OK	(OK)	nicht OK	nicht OK
BWM	l/m ³	39								9.3
EM	-	2.2	1.5				2.8		2.7	1.6

¹⁾ Werte in Klammern wurde aus dem Setzmass abgeschätzt (Abb. 5.11).²⁾ Siehe Abb. 5.10 Fussnote 1.

Tab. 5.12 Korrelation zwischen Verdichtungsmass VM und Ausbreitmass AM. Klassenbreiten gemäss SN EN 206 [1]

Bezeichnung	Verdichtungsmass	Ausbreitmass
steif	C0	≥ 1.46
	C1	1.45-1.26
plastisch	C2	1.25-1.11
		F1 340
		F2 350-410
weich	C3	1.10-1.04
flüssig		F3 420-480
		F4 490-550
		F5 560-620
		F6 ≥ 630

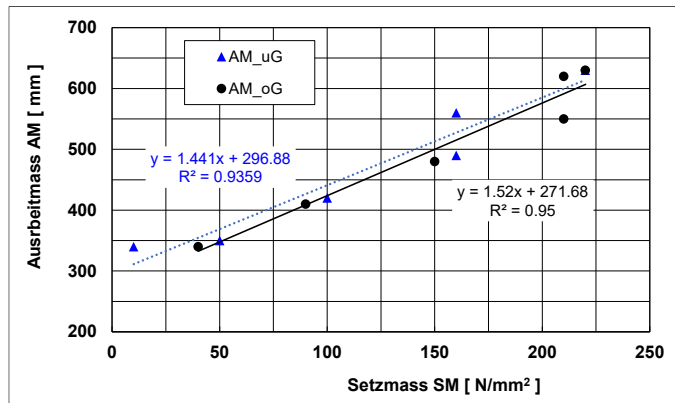


Abb. 5.11 Zusammenhang zwischen Ausbreitmass (obere Grenze AM_oG und untere Grenze AM_uG) und Setzmass SM (Grenzwerte).

Zu den Ergebnissen der Frischbetonprüfungen (Tab. 5.10 und Tab. 5.11) sind einige Kommentare und Erläuterungen nötig.

Der Beginn der Frischbetonprüfungen lag im Betonwerk zwischen 6 bis 15 Minuten nach der Herstellung der letzten Charge. Auf der Baustelle ist die Zeitdifferenz wesentlich grösser und liegt zwischen 45 und 95 Minuten.

Das Entmischungsmass lag teilweise deutlich über dem provisorischen Grenzwert von 2. Auffallend sind die vom Labor Nr. 4 gemessenen Werte. Die Blutwassermenge (hier wurden nur zwei Bestimmungen durchgeführt) lag unter der Vorgabe von 50 l/m³.

Das mit den Betonierarbeiten betraute Personal auf der Baustelle beurteilte den Beton als gut verarbeitbar, ohne dass er Anzeichen von Bluten oder Entmischen gezeigt hätte. Diese konnte auch am Fusse der Schalung auf der Innenseite beobachtet werden.

Die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung wird vom Betonhersteller regelmässig bestimmt. Wenn die Werte für Sand und Kies bekannt sind, was hier der Fall ist, und das Volumen des Zugabewassers korrekt gemessen wurde, sollte der bei Frischbetonprüfung ermittelte w/z-Wert (w/z (FBK)) immer kleiner sein als der w/z-Wert, der aus den Chargenprotokollen und ohne Berücksichtigung von w_G berechnet wurde. Er sollte aber immer grösser als der mit dem Maximalwert von w_G (hier 14 l/m³) berechneten Werten. Wie aus Abb. 5.12 hervorgeht, sind die bestimmten w/z-Werte bei vier Frischbetonprüfungen zu tief und in einem Fall zu hoch. Als Ursache für zu hohe w/z-Werte kommt z.B. ein ungenügendes Trocknen der Frischbetonprobe in Frage. Dies führt zu tiefen Wassergehalten im Frischbeton. Zu hohe w/z-Werte können durch Folgendes verursacht sein:

- 1) Der Feuchtigkeitsgehalt der Gesteinskörnung wurde bei der Einwaage für die Betonherstellung zu tief angesetzt. Auf Grund der Ergebnisse (Kapitel 5.3.3) ist dies eher auszuschliessen.
- 2) Ungewollter Massenverlust beim Trocknen der Frischbetonproben (Spritzer etc.).
- 3) Wasserverbrauch durch die Hydratation, z.B. wenn die Prüfung erst spät, d.h. nach dem Erstarrungsbeginn durchgeführt wird. Bei Prüfungen im Betonwerk kann dies wohl eher ausgeschlossen werden, nicht aber bei jenen auf der Baustelle.

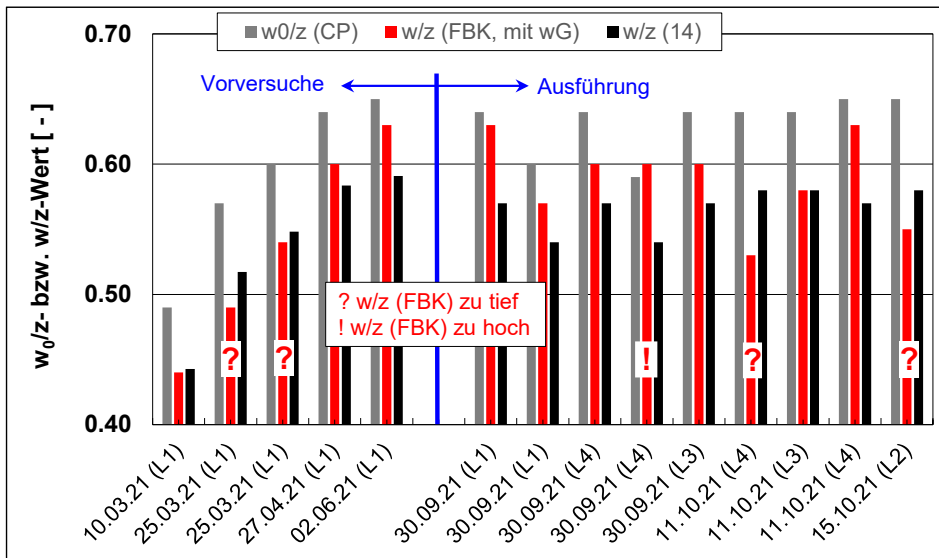


Abb. 5.12 Vergleich der berechneten und bestimmten w/z -Werte bei den Vorversuchen und bei der Ausführung der Betonierarbeiten. Details siehe Tab. 5.10 und Tab. 5.11.

Aus den Abb. 5.13 bis Abb. 5.15, die verschiedenen Korrelationen zeigen, kann Folgendes entnommen werden:

- Zwischen Rohdichte und Luftgehalt besteht – trotz der grossen Streuung – ein klarer Zusammenhang (Abb. 5.13). Die Steigung liegt bei rund -40 kg/m^3 pro 1 Vol.-% Luft. Theoretisch sollte dieser Wert bei rund 50 kg/m^3 liegen.
- Zwischen dem Ausbreitmass und dem w/z -Wert (FBK) besteht kein klarer Zusammenhang (Abb. 5.14). Dies überrascht und hat wohl mehrere Gründe (Zeitpunkt der Messung, Luft- und Betontemperatur, Details der Durchführung). Die Prüfstreuung ist aber wohl nicht relevant. Bei einem Ausbreitmass von 435 mm liegt die Vergleichsstandardabweichung gemäss einem Ringversuch des VAB [46] bei etwa 25 bis 30 mm.
- In Abb. 5.15 ist das Entmischungsmass sowie die Blutwassermenge gegen den w/z -Wert (FBK) dargestellt. Die Werte vom Labor 4 für das Entmischungsmass – dieses Labor hat diese Prüfung das allererste Mal durchgeführt – waren auffällig und wurden nicht berücksichtigt. Höhere w/z -Werte führen tendenziell zu einem höheren Entmischungsmass und zu einer höheren Blutwassermenge.

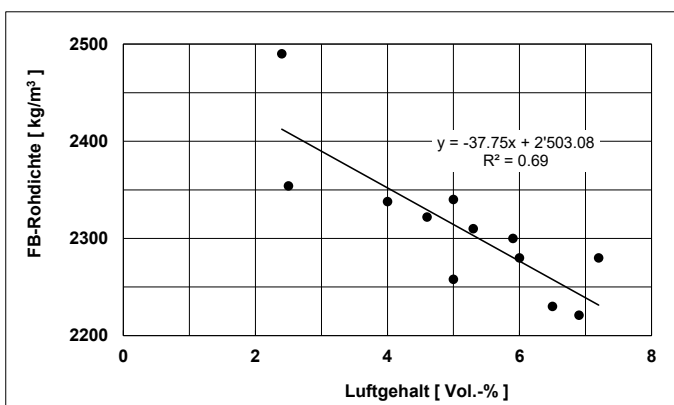


Abb. 5.13 Zusammenhang zwischen Frischbetonrohichte und Luftgehalt.

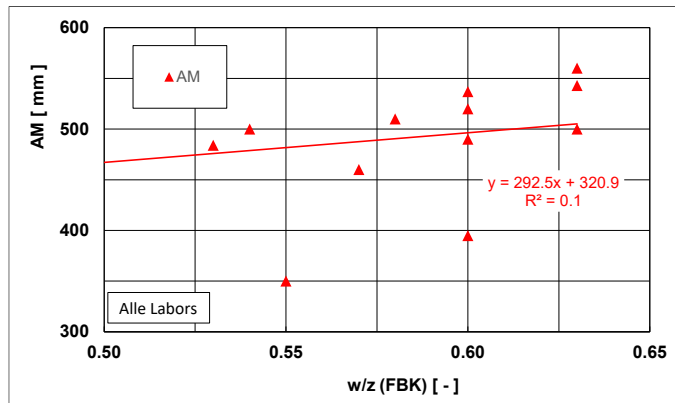


Abb. 5.14 Zusammenhang zwischen Ausbreitmass AM und w/z-Wert (FBK).

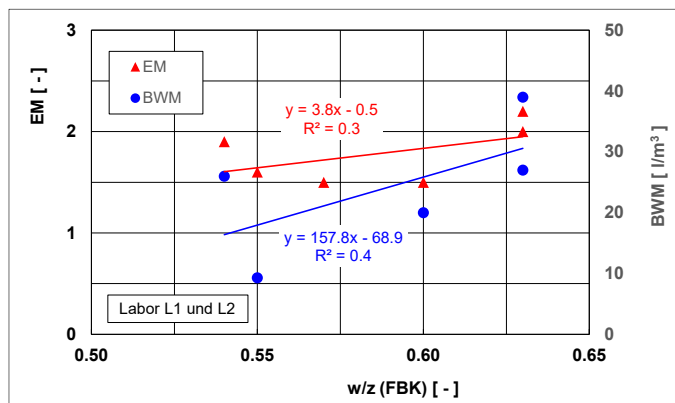


Abb. 5.15 Zusammenhang zwischen Entmischungsmass EM (rechte Skala) sowie Blutwassermenge BMW (linke Skala) und w/z Wert (FBK).

5.3.5 Druckfestigkeit

In der Tab. 5.13 sind die Einzelergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen bei den Vorversuchen und beim Muster aufgeführt, in der Tab. 5.14 die Mittelwerte bei der Ausführung der drei Betonieretappen. Diese Tabellen enthalten die Absolutwerte sowie die auf die 28d-Druckfestigkeit bezogenen Werte.

Sämtliche Werte sind in den Tabellen im Anhang III zu finden.

Das mittlere Verhältnis der 2/28d-Druckfestigkeit liegt bei 30%. Dies entspricht gemäss SN EN 206, Ziffer 7.2, Tabelle 16, einem Beton mit einer langsamen Festigkeitsentwicklung. Nach 7 Tagen werden im Mittel 63% der 28d-Druckfestigkeit erreicht.

Die Festigkeit steigt nach 28 Tagen noch deutlich an: ca. +20% nach 91 Tagen.

Tab. 5.13 Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen bei den Vorversuchen und beim Muster

LS-Nr.	201953	203157	204507	201953	203157	204507
Herstellung	25.03.21	27.04.21	02.06.21	25.03.21	27.04.21	02.06.21
	10:50	08:13	08:00	10:50	08:13	08:00
Labor Nr.	1	1	1	1	1	1
Alter, d	Druckfestigkeit, N/mm ²			Festigkeitsentwicklung in % 28d		
1			2.9			12.4
2		13.9	5.7		35.1	24.5
3						
4						
7	27.4	26.0	15.3	68.7	65.7	65.7
14						
28	39.9	39.6	23.3	100.0	100.0	100.0
56	46.2	44.3	25.7	115.8	111.9	110.3
91			27.6			118.5
Verhältnis 2/28d		0.35	0.24			
Verhältnis 7/28d	0.69	0.66	0.66			

Tab. 5.14 Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen bei der Ausführung. Der Mittelwert wurde aus den Ergebnissen vom 25.03.2021 (10:50) bis 15.10.2021 berechnet.

Alter, d	Mittelwert	Std.abw.	Mittelwert	Std.abw.
	N/mm ²		%	
1	2.9	0.00	12.4	0.00
2	9.8	4.10	29.8	5.32
3	6.4	0.54	23.3	2.37
4	13.0	1.96	41.9	2.59
7	19.6	4.08	63.2	4.99
14	24.3	2.55	84.9	3.76
28	30.8	4.91	100.0	0.00
56	36.9	6.28	119.2	6.68
91	35.8	8.15	122.1	3.67
Verhältnis 2/28d	0.30	0.05		
Verhältnis 7/28d	0.63	0.05		

Aus den folgenden Abbildungen, die verschiedene Korrelationen zeigen, kann Folgendes entnommen werden:

- Bei allen gemessenen Grössen ist die Streuung eher gross, was einerseits auf die Materialstreuung zurückzuführen ist, aber andererseits auch auf die Tatsache, dass mehrere Labors für nur wenige Einsätze (eher geringes verbautes Betonvolumen) involviert waren.
- Zwischen Druckfestigkeit und Rohdichte besteht der erwartungsgemässe Zusammenhang (Abb. 5.16).
- Zwischen Druckfestigkeit und Luftgehalt (Abb. 5.17) ergibt sich die erwartete negative Steigung der Trendlinie.
- Die Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom w/z-Wert liegt im Rahmen der Erwartungen (Abb. 5.18).
- Die Festigkeitszunahme über die Zeit ist vom w/z-Wert und vom Luftgehalt abhängig (Abb. 5.19).
- Die mittlere Festigkeitsentwicklung ist in Abb. 5.20 gezeigt. Der Vergleich mit der Betonsorte G erfolgt im Kapitel 7.

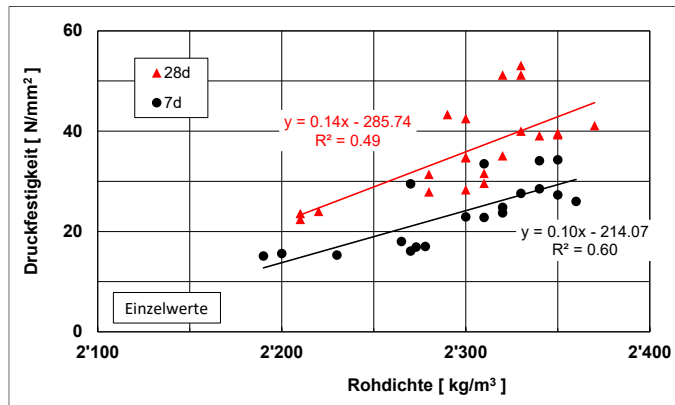


Abb. 5.16 Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Festbetonrohichte der Würfel.

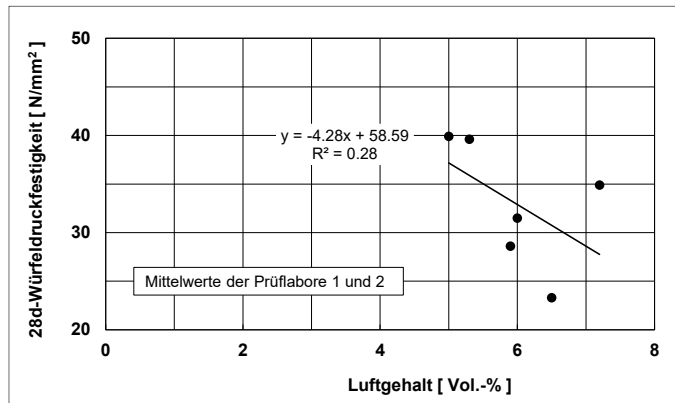


Abb. 5.17 Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Luftgehalt.

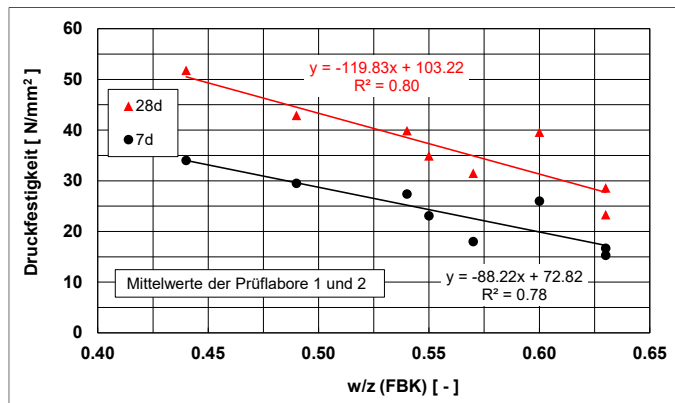


Abb. 5.18 Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom w/z-Wert.

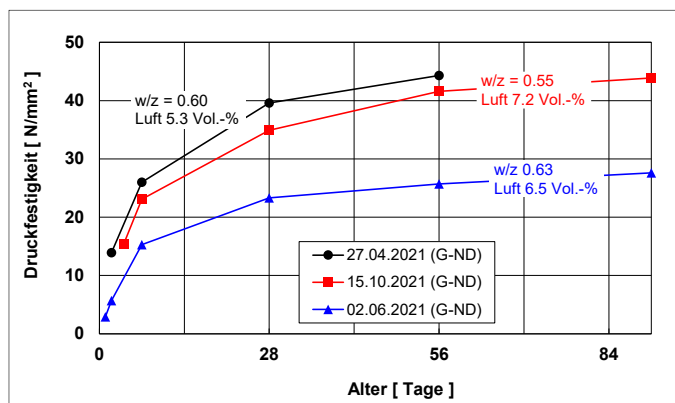


Abb. 5.19 Einfluss des w/z-Wertes und des Luftgehaltes auf die Festigkeitsentwicklung.

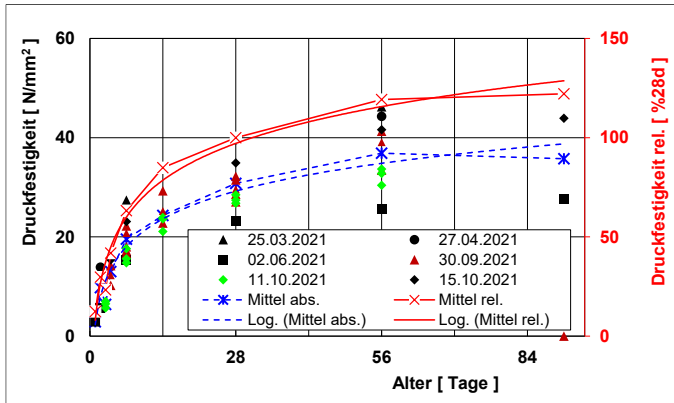


Abb. 5.20 Druckfestigkeitsentwicklung der Betonsorte G-ND: Absolutwerte (abs.) und Mittelwert in % der 28-Tage-Druckfestigkeit (rel.).

5.3.6 Schwinden

Die Schwindmessung der am 02.06.2021 (Muster/Erstprüfung) und am 15.10.2021 (3. Etappe der Ausführung) hergestellten Betone zeigen ein verhältnismässig geringes Schwinden. Das Schwindmass der Betonsorte G-ND mit einem w/z-Wert von 0.63 ist höher als jenes des Betons mit einem w/z-Wert von 0.55. Die Zahlenwerte sind im Anhang IV zu finden. Weitere Ausführungen folgen in Kapitel 6.4.

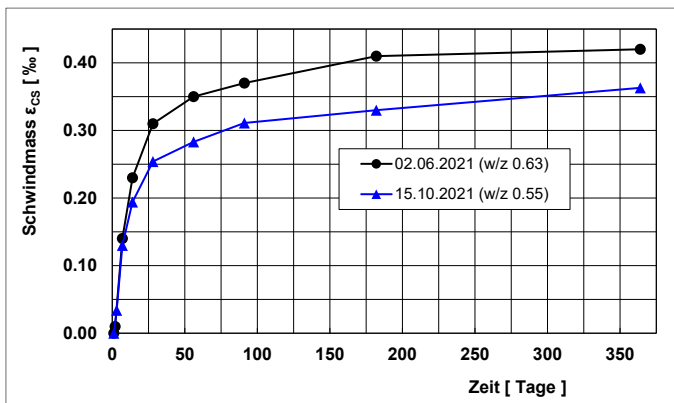


Abb. 5.21 Schwindmass der Betonsorte G-ND.

5.3.7 Dauerhaftigkeitseigenschaften

In den Tab. 5.15 und Tab. 5.16 sind die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfungen zusammengestellt. Geprüft wurden folgende Eigenschaften:

- KW: Karbonatisierungswiderstand
- CW: Chloridwiderstand
- FTW: Frost-Tausalzwiderstand

Tab. 5.15 Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfungen bei den Vorversuchen und der Erstprüfung (Muster)

LS-Nr.	201953	203157	204507
Herstellung	25.03.21	27.04.21	02.06.21
	10:50	08:13	08:00
Labor Nr.	1	1	1
KW, mm/a ^{1/2}	6.5	6.5	9.8
CW, m ² /s	4.8 · 10 ⁻¹²	3.0 · 10 ⁻¹²	6.8 · 10 ⁻¹²
Labor Nr.	2	2	7
FTW, g/m ²	390	140	887
	hoch	hoch	mittel

Tab. 5.16 Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfungen während der Ausführung

LS-Nr.	209074	209098	209074	209090	209074	209409	209409	209416	209590
Herstellung	30.09.	30.09.	30.09.	30.09.	30.09.	11.10.	11.10.	11.10.	15.10.
	07:10	09:59	06:58	08:45	06:58	06:30	06:30	08:30	09:59
Labor Nr.	1	1	4	4	3	4	3	4	2
KW, mm/a ^{1/2}	9.6	7.8							9.5
Labor Nr.	1		5			5			2
CW, m ² /s	5.7 · 10 ⁻¹²		2.3 · 10 ⁻¹²			2.8 · 10 ⁻¹²			3.6 · 10 ⁻¹²
Labor Nr.	2		6			6			2
FTW, g/m ²	290		1539			145			180
	hoch		mittel			hoch			hoch

Aus den Ergebnissen ergibt sich Folgendes:

- Der bei der Ausführung geprüfte Beton G-ND weist einen mittleren Karbonatisierungswiderstand von 8.7 mm/a^{1/2} auf. Dieser Wert liegt deutlich über dem heutigen Grenzwert, welcher für XC4, eine Nutzungsdauer von 50 Jahren und eine normgemäße Bewehrungsüberdeckung c_{nom} von 40 mm gilt. Es ist hier zu betonen, dass die Bewehrungsüberdeckung im vorliegenden Fall wesentlich höher ist (siehe Kapitel 6.5).
- Der Beton G-ND hat bei allen Prüfungen den Grenzwert für den Chloridwiderstand von $10 \cdot 10^{-12}$ m²/s sicher erfüllt. Der Mittelwert der bei der Ausführung geprüften Betone liegt bei $3.6 \cdot 10^{-12}$ m²/s.
- Bei drei von vier Prüfungen erreichte der Beton G-ND einen hohen, bei einer Prüfung nur einen mittleren Frost-Tausalzwidestand.

Die Abhängigkeit des Karbonatisierungswiderstandes vom w/z-Wert ist – trotz der hohen Streuung – ähnlich wie jene aus einem 2019 abgeschlossenen Forschungsprojekt [48] (Abb. 5.22a). Die Trendlinie liegt allerdings leicht höher. Die Abhängigkeit von der Druckfestigkeit entspricht den Erwartungen (Abb. 5.22b).

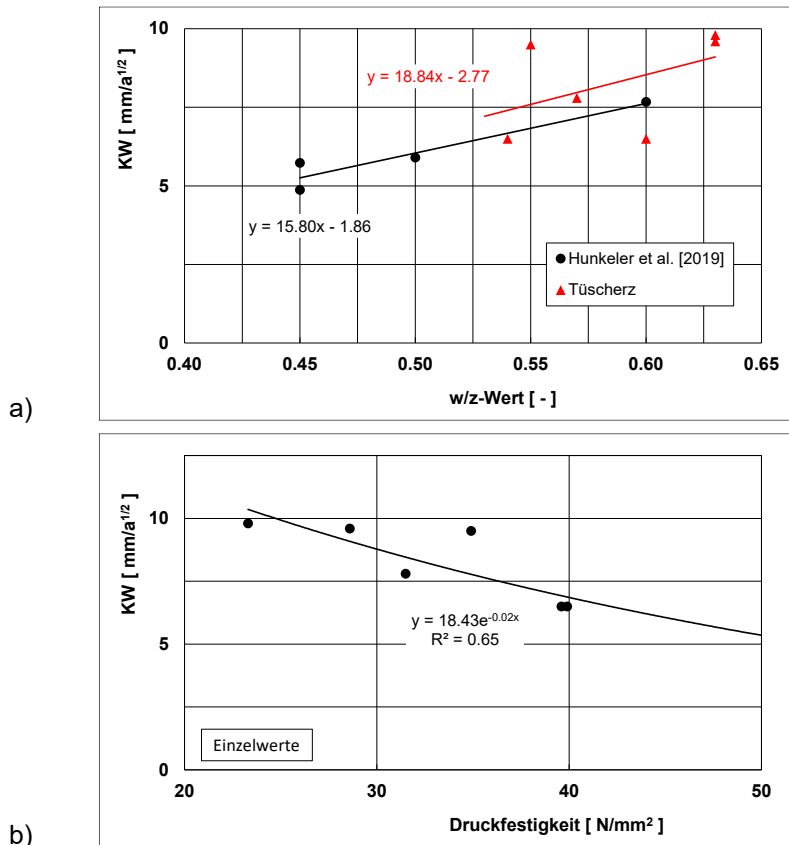


Abb. 5.22 Abhängigkeit des Karbonatisierungswiderstandes KW a) vom w/z-Wert und b) von der Druckfestigkeit.

5.3.8 Nachbehandlung

In den Besonderen Bestimmungen, Anhang 7.4, wurde festgelegt, dass die Brüstung auf der Seeseite erst nach 6 Tagen ausgeschalt und danach bis zu einem Alter von 28 Tagen nachbehandelt werden soll.

Gemäss Angaben der Bauleitung wurde die Schalung nach 7 Tagen entfernt und danach bis zum 27. (1. Etappe) bzw. zum 28. Tage nachbehandelt.

Anlässlich der Begehung am 04.10.2021 war allerdings die Brüstung der 1. Etappe schon fast vollständig ausgeschalt (siehe Abb. 6.1). Damit wäre der Beton nur 5 Tage in der Schalung gewesen.

Abb. 5.23 zeigt die mit Matten abgedeckte Brüstung der am 30.09.2021 betonierten 1. Etappe der Seeseite. Die Fotos wurden am 11.10.2021 aufgenommen. Sie zeigen, dass der untere Teil der Brüstung der Innen- und Aussenseite nicht vollständig abgedeckt ist. Die Matten sind im unteren Teil auch nicht anliegend und lassen eine gewisse Luftzirkulation zu.

Bei der dritten Etappe (15.10.2021) war es schwierig, die Nachbehandlungsdauer einzuhalten, da gemäss Vereinbarung mit der SBB das Gerüst auf der Gleisseite am Wochenende vom 05.11. bis 08.11.2021 abgebaut werden musste.



a)



b)

Abb. 5.23 Nachbehandlung der Brüstung auf der Seeseite: a) Innenseite und b) der Aussenseite. Fotos: F. Hunkeler vom 11.10.2021.

5.3.9 Applikation der Imprägnierung

Gemäss Angaben und Bericht des Unternehmers [47] wurde das Oberflächenschutzsystem auf den Brüstungen der Berg- und Seeseite wie folgt aufgebracht:

- Reinigen des Untergrundes mit Hochdruckreiniger (Entfernen loser Teile, Staub und Schmutz)
- 1. Imprägnierung mit Sinnodur W2-H: 150kg/m² mit 3% Pigment Keim Black
- 2. Imprägnierung mit Sinnodur W2-H: 150kg/m² mit 3% Pigment Keim Black
- 1. Versiegelung mit Sinnodur W3-Plus (farblos): 0.150kg/m²
- 2. Versiegelung mit Sinnodur W3-Plus (farblos): 0.150kg/m².

Fotos der Applikation sind nicht verfügbar.

6 Vergleich der Betonsorten G und G-ND

6.1 Aussehen der Oberfläche

Die Betonoberfläche der seeseitigen Brüstung mit dem Beton G-ND ist mehrheitlich geschlossen und weist – abgesehen von der Oberseite bzw. der Krone – wenige Lunker auf (Abb. 6.1). Der Beton war sehr hell und zeigte kaum Verfärbungen oder Schlieren. Ausbesserungen waren keine nötig.

Im Gegensatz dazu wies die nördliche Brüstung einen inhomogenen Farbton auf. An verschiedenen Stellen waren Ausbesserung nötig (Abb. 6.2).

Weitere Fotos werden im Kapitel 6.6 gezeigt.



Abb. 6.1 Erscheinung der Betonoberfläche der südseitigen Brüstung nach dem Ausschalen. Fotos F. Hunkeler vom 04.10.2021.



Abb. 6.2 Innenseite der Brüstung auf der Bergseite. Foto ASTRA vom 28.03.2022.



Abb. 6.3 Aussenseite der Brüstung auf der Seeseite. Foto ASTRA vom 28.03.2022.

6.2 Druckfestigkeit

Die Abb. 6.4 zeigt die wesentlich raschere Druckfestigkeitsentwicklung des Beton G im Vergleich zum Beton G-ND. Zu beachten ist zudem die fast doppelt so hohe 28d-Druckfestigkeit beim Beton G im Vergleich zum Beton G-ND (58.9 gegenüber 30.8 N/mm²).

Das Verhältnis der 2/28d-Druckfestigkeit liegt beim Beton G leicht über 0.60, beim Beton G-ND beträgt es lediglich etwa 0.30, d.h. rund die Hälfte. Nach 7 Tagen liegt das Verhältnis 7/28d beim Beton G bei knapp 90%, beim Beton G-ND bei etwas über 60%.

Der Wert von 0.30 beim Beton G-ND ist tief und entspricht gemäss SN EN 206 [1], Ziffer 7.2, Tabelle 16, einem Beton mit einer langsamen Festigkeitsentwicklung.

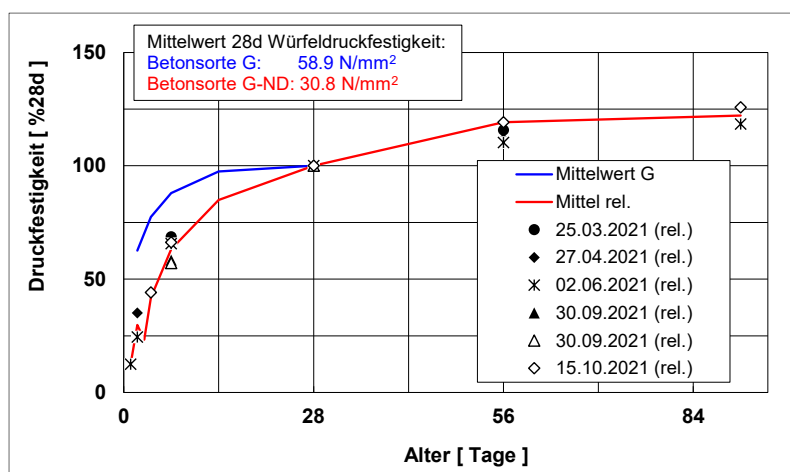


Abb. 6.4 Vergleich der Druckfestigkeitsentwicklung der Betonsorte G und G-ND.

6.3 E-Modul

Der E-Modul wurde bei den Betonsorten G (Brüstung Bergseite) und G-ND (Brüstung Seeseite) bestimmt. Aus den gemessenen Werten wurde der Beiwert k_E zur Bestimmung des E-Moduls gemäss Gleichung 3 (SIA 262 [9], Ziffer 3.1.2.3.3) berechnet. Die Werte sind im Anhang V zu finden. Der Mittelwert für k_E liegt mit rund 9500 im Rahmen des Erwartungswertes für kalkhaltige Gesteinskörnungen (8000 bis 10000).

$$E_{cm} = k_E \sqrt[3]{f_{cm}} \quad \text{Gleichung 3}$$

Berechnet man aus dem Mittelwert der gemessenen Druckfestigkeiten und mit $k_E = 10000$ den zeitlichen Verlauf des E-Moduls der beiden Betonsorten (Tab. 6.1) ergeben sich die in Abb. 6.5 gezeigten Verläufe. In den ersten Tagen ist der E-Modul des Betons G über 50% höher als jener von Beton G-ND. Hinweis: Diese Unterschiede sind temperaturabhängig und bei tiefen Temperaturen wohl grösser als bei wärmeren Bedingungen.

Der im Vergleich zum Beton G deutlich tiefere E-Modul des Beton G-ND ist ein signifikanter Vorteil im Zusammenhang mit der Rissbildung verformungsbehinderter Bauteile (Wände, Mauern, etc.).

Tab. 6.1 Vergleich der zeitlichen Entwicklung des E-Moduls der Betonsorten G-ND und G (berechnet mit $k_E = 10000$) und die berechnete Differenz

Alter, Tage	Beton G-ND	Beton G	Differenz	
			kN/mm ²	%
1	14.3	-	-	-
2	21.4	33.3	11.9	56
3	18.6	-	-	-
4	23.5	35.7	12.2	52
7	26.9	37.3	10.3	38
14	29.0	38.6	9.6	33
28	31.3	38.9	7.6	24
56	33.3	-	-	-
91	32.9	-	-	-

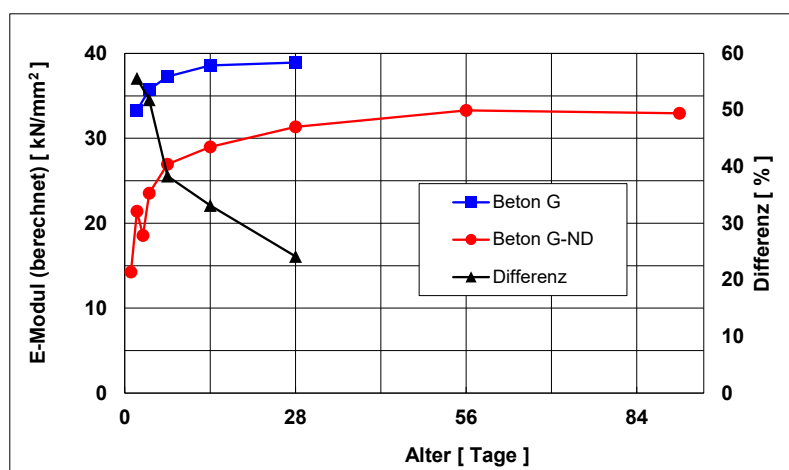


Abb. 6.5 Zeitlicher Verlauf des E-Moduls der Betone G und G-ND.

6.4 Schwinden

Das Schwindmass der Betone G und G-ND ist nicht sehr unterschiedlich, wie aus Abb. 6.6 hervorgeht. Der Wert für die Sorte G-ND passt gut in das Gesamtbild. Von der Betonsorte G wurden im Rahmen dieses Projektes keine Prüfungen durchgeführt. Dass der Unterschied gering ist, kann auf das ähnliche Zementsteinvolumen zurückgeführt werden. Der Beton G hat ein Zementsteinvolumen von 255, der Beton G-ND ein Zementsteinvolumen von etwa 230 l/m³. (vgl. Abb. 6.7).

Auch in eigenen Untersuchungen [49] konnte nachgewiesen werden, dass das Zementleimvolumen eine grössere Bedeutung auf das Schwindmass hat als der w/z-Wert (Abb. 6.8). Darüber hinaus wurde bei dieser Arbeit keine klare Beziehung zwischen Schwindmass und Druckfestigkeit gefunden.

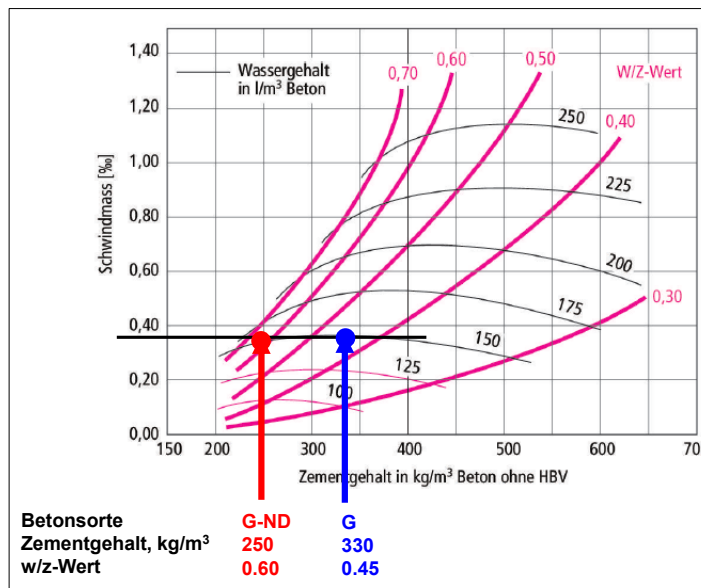


Abb. 6.6 Endschwindmass in Abhängigkeit vom Zement- und Wassergehalt sowie w/z-Wert [50]. Eingetragen sind die Werte der Betonsorte G-ND (w/z-Wert 0,60 und einem Zementgehalt von 250 kg/m³) und der Betonsorte G (w/z-Wert 0,45 und einem Zementgehalt von 330 kg/m³).

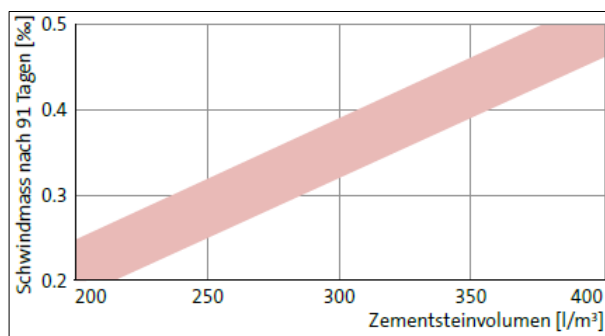


Abb. 6.7 Trockenschwindmass in Abhängigkeit vom Zementsteinvolumen für Betone mit CEM I und CEM II-Zementen gemäss SIA 262/1 [2] nach 91 Tagen [51].

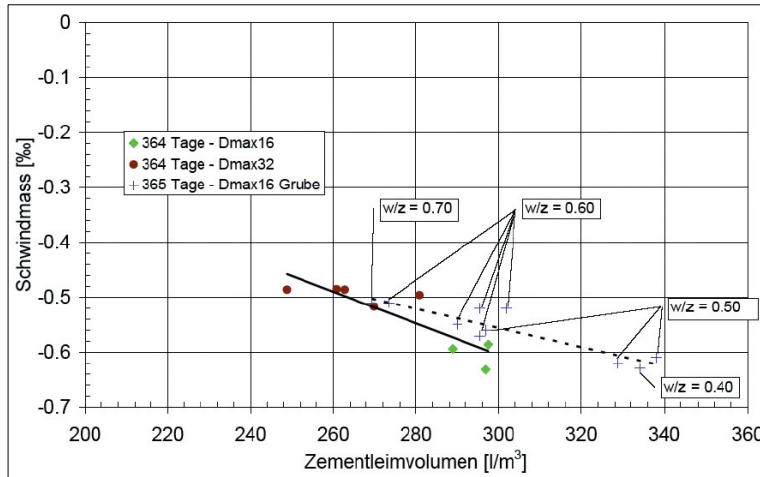


Abb. 6.8 Schwindmass in Abhängigkeit vom Zementleimvolumen [49].

6.5 Dauerhaftigkeitseigenschaften

6.5.1 Allgemein

Die Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons G-ND sind, abgesehen vom Karbonatisierungswiderstand, ähnlich wie beim Beton G und erfüllen mehrheitlich die Normanforderungen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass es bei der Betonsorte G gemäss SN EN 206 [1] keine Anforderung an den Karbonatisierungswiderstand gibt und dieser deshalb auch nicht bestimmt werden muss.

6.5.2 Chloridwiderstand

Der Chloridmigrationskoeffizient (Kehrwert = Chloridwiderstand) der Betonsorte G-ND ist wegen der verwendeten Zementart CEM III/B trotz erhöhtem w/z-Wert tief. Alle Werte lagen deutlich unter dem geforderten Grenzwert von $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Aus Abb. 6.9 geht hervor, dass der Chloridmigrationskoeffizient von CEM III/B-Betonen mit abnehmender Druckfestigkeit bzw. zunehmendem w/z-Wert viel weniger stark zunimmt als Betone mit z.B. CEM I. Mit anderen Worten: Der Chloridwiderstand von CEM III/B-Betonen reagiert weniger empfindlich auf w/z-Änderungen als z.B. CEM I-Betone.

Die Ergebnisse eines Ringversuche des VAB [52] bestätigen diese Aussage (Tab. 6.2).

Im Übrigen verbessert sich der Chloridwiderstand von Betonen mit CEM III/B mit dem Alter wesentlich stärker als jener von Betonen mit anderen Zementarten.

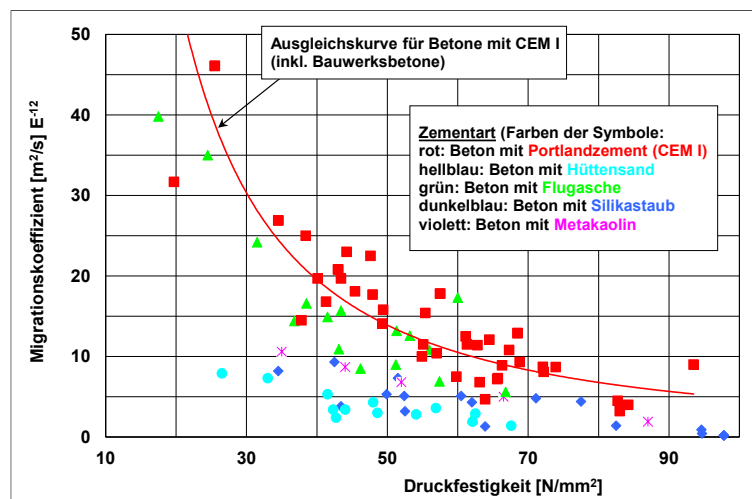


Abb. 6.9 Chloridmigrationskoeffizient (Mass für den Chloridwiderstand) in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit verschiedener Betonsorten Daten von [53]. Das damals eingesetzte Prüfverfahren ist weitgehend deckungsgleich mit der Prüfung nach SIA 262/1 [2], Anhang B. Betone mit hüttensandhaltigen Zementen weisen über den ganzen Druckfestigkeitsbereich deutlich tiefere Chloridmigrationskoeffizienten (= höhere Chloridwiderstände) auf als z.B. CEM I-Betone.

Tab. 6.2 Chloridmigrationskoeffizient von Betonen mit CEM I und CEM III/B. Ergebnisse eines Ringversuchs des VAB [52].

Parameter		Beton 1	Beton 2	Beton 3
Zementart		CEM III/B	CEM I	CEM I
Zementgehalt	kg/m ³	340	340	280
w/z-Wert	-	0.45	0.45	0.65
Druckfestigkeit	N/mm ²	52.8	52.5	34.5
Chloridmigrationskoeffizient				
• Mittelwert	m ² /s, x10 ⁻¹²	2.1	7.2	15
• Standardabweichung	m ² /s, x10 ⁻¹²	1.6	1.7	3.1

6.5.3 Frost-Tausalzwiderstand

Betone mit CEM III/B sind hinsichtlich der Frost-Tausalzwerstandes eher weniger robust als z.B. Betone mit CEM I und benötigen i.d.R. einen höheren Luftgehalt und auch eine bessere bzw. längere Nachbehandlung als andere Betone, um die in der SN EN 206 [1] geforderten Grenzwerte zu erfüllen. Dies hat verschiedene Gründe. Von der nördlichen Brüstung liegen keine Ergebnisse zum Frost-Tausalzwerstand vor, weshalb ein direkter Vergleich nicht möglich ist.

In langjährigen Feldversuchen in St. Margrethen [54], [55] konnten bei CEM III/B-Betonen ohne und mit künstlich zugeführten Luftporen hinsichtlich der Frost-Tausalzbeständigkeit keine signifikanten Schwächen oder Unterschiede zu Betonen mit anderen Zementarten gefunden werden.

6.5.4 AAR-Widerstand

Im Gegensatz zu vielen anderen Zementarten führt der Einsatz von CEM III/B zu AAR-beständigen Betonen. Auf Grund der langjährigen positiven Erfahrung wurde bei diesem Projekt auf eine Prüfung verzichtet. Von der nördlichen Brüstung liegen keine Ergebnisse zum AAR-Widerstand vor, weshalb ein direkter Vergleich nicht möglich ist.

6.5.5 Karbonatisierungswiderstand

Der Karbonatisierungswiderstand der Betonsorte G-ND ist wegen des höheren w/z-Wertes und des geringeren Klinkergehaltes beim CEM III/B geschwächt. Er ist mit einem Mittelwert um $9 \text{ mm/a}^{1/2}$ weit über dem aktuellen Grenzwert von $5 \text{ mm/a}^{1/2}$ für die Expositionsklasse XC4, einer Nutzungsdauer von 50 Jahren und einer nominellen Überdeckung von 40 mm. Hier ist anzumerken, dass nach der Erhöhung des Grenzwertes für die Expositionsklasse XC3 [7] auch bei der Expositionsklasse XC4 eine Anpassung angezeigt wäre.

Um die Auswirkungen des geringeren Karbonatisierungswiderstandes besser abzuschätzen, wurden die Prüfergebnisse detailliert ausgewertet. In der Abb. 6.10a ist zu erkennen, dass beim Laborversuch das Wurzelzeitgesetz nicht perfekt erfüllt ist. Der Karbonatisierungskoeffizient nimmt mit der Zeit ab, wie dies in Langzeitstudien unter geschützten Expositionsbedingungen (XC3) in Wildegg und auch an anderen Orten sehr gut beobachtet werden konnte [47]. Die Analyse der Laborergebnisse der Prüfungen für dieses Projekt (Abb. 6.10b) ergab eine gemittelte Steigung von etwa -0,11. In Abb. 6.11 ist die Karbonatisierungstiefe als Funktion der Zeit für verschiedene Expositionsbedingungen dargestellt. Die Einzelheiten der Berechnungen sind in [48] dargelegt. Aus Abb. 6.11 ist ersichtlich, dass die zu erwartende Karbonatisierungstiefe nach 50 Jahren sowohl unter Laborbedingungen als auch im Freien unter geschützten Bedingungen zwischen 30 und 40 mm beträgt. Unter feuchten Bedingungen (80 % RL) ist die Karbonatisierungstiefe viel geringer. Es ist zu erwarten, dass die Karbonatisierungstiefe unter XC4-Bedingungen und unter dem Einfluss von Regen irgendwo dazwischen liegen wird, sehr wahrscheinlich unter 30 mm.

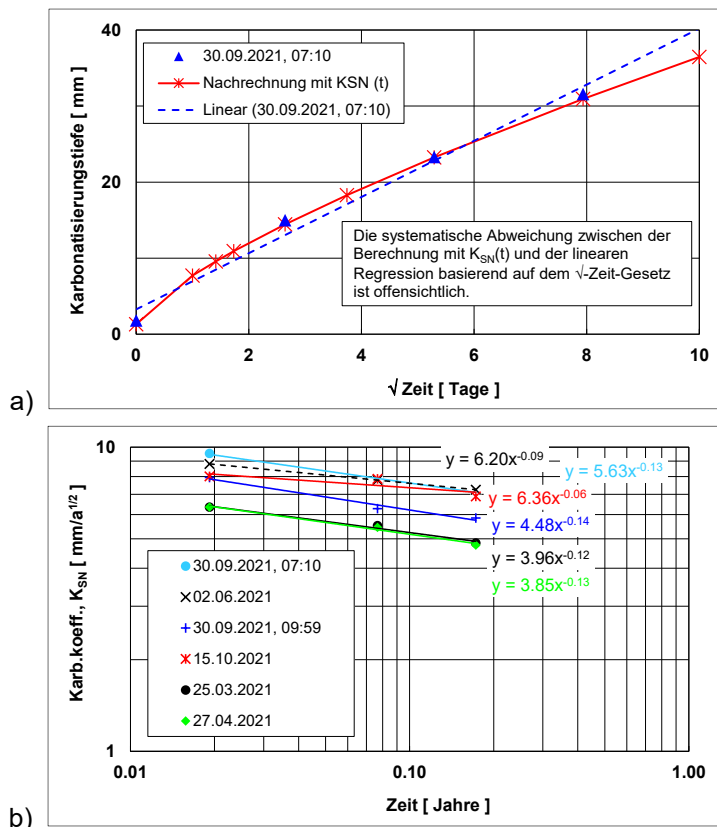


Abb. 6.10 a) Analyse des zeitlichen Verlaufes der Karbonatisierung: Vergleich zwischen dem $\sqrt{\text{Zeit}}$ -Gesetz und mit einem zeitabhängigen Karbonatisierungskoeffizienten; b) Zeitabhängiger Karbonatisierungskoeffizient unter Standardprüfbedingungen. Die Details sind in [48] erläutert.

Der Korrosionsprozess kann unter der kombinierten Wirkung der Karbonatisierung der Betondeckung und des Chlorideintrages bis zur Bewehrung früher beginnen als ohne Chlorideinwirkung. Chloridbelastete Bauteile (XD1 und XD3) sind wegen dem gleichzeitigen Eintrag von Wasser und Chloriden sowie der hygroskopischen Wirkung der eingedrungenen Salze im Beton deutlich feuchter als unbewitterte (XC3) oder bewitterte Bauteile

ohne Chlorideintrag (XC4). Dadurch wird die Karbonatisierungsgeschwindigkeit und die Eindringtiefe der Karbonatisierungsfront reduziert.

Zusammen mit dem vorhandenen hohen Chloridwiderstand des Betons der seeseitigen Brüstung ist daher davon auszugehen, dass dies während der Lebensdauer von 50 Jahren nicht zu Problemen führen wird, da die Bewehrungsüberdeckung auf der stark exponierten Innenseite $c_{nom} = 65 \text{ mm}$ beträgt. Zudem ist auch anzunehmen, dass mit zunehmender Überdeckung die Korrosionsgeschwindigkeit und das Risiko für Abplatzungen abnimmt.

Basierend auf diesen Überlegungen wurden bei den Betonsorten F und G gemäss SN EN 206 [1] bis anhin keine Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand gestellt. Bei diesen Betonsorten steht der Chloridwiderstand im Vordergrund. Bei den Betonsorten D und E hingegen wird keine Anforderung an den Chloridwiderstand gestellt, wohl aber an den Karbonatisierungswiderstand. Diese Differenzierung sollte überprüft werden. Ggf. ist die Art der Beanspruchung der Bewehrung zu berücksichtigen.

Bei der kombinierten Wirkung von Karbonatisierung und Chlorideintrag besteht bei Bauteilen mit einer langen Nutzungsdauer (>50 Jahre) noch Forschungsbedarf (z.B. Modellierung, Untersuchungen an alten Bauten mit unterschiedlichen Zementarten, Einfluss der Intensität der Chloridbelastung, z.B. über die Höhe von Galerierückwänden oder Stützmauern).

In besonderen Fällen könnte ganz oder teilweise auch eine nichtrostende oder nichtmetallische Bewehrung in Betracht gezogen werden.

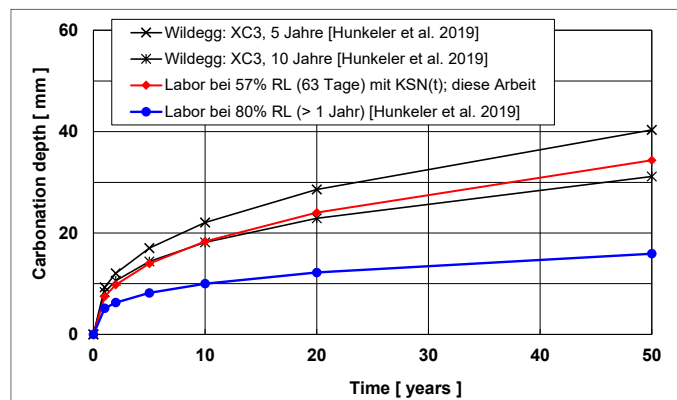


Abb. 6.11 Berechnete Karbonatisierungstiefe als Funktion der Zeit für verschiedene Expositionsbedingungen. Die Expositionsbedingung XC3 wurde in einem speziellen Behälter (Stevenson-Screen) nachgestellt.

6.6 Rissverteilung und Rissbreiten (2022 und 2023)

Bereits im Januar 2022 wurde von der Bauleitung festgestellt, dass die Brüstung Nord mit dem Beton G ein unregelmässiges Rissbild aufweist mit Rissbreiten, die mit blossen Auge auch aus der Distanz zu erkennen waren. Auf der seeseitigen Brüstung waren zu dieser Zeit mit blossen Auge oder nach einem Niederschlag noch keine Risse sichtbar.

Am 30.03.2022 fand eine Begehung der Brücke und der Brüstungen auf der Berg- und Seeseite statt. Teilnehmer: Vertreter des Bauherrn, Bauleitung und Verfasser dieses Berichts. Die zweite Begehung am 25.01.2023 bestätigte die Erkenntnisse der ersten Begehung.

Die Aussenseiten der Brüstung auf der Berg- und der Seeseite der Brücke waren nur vom Boden aus zu betrachten. Die Seeseite war besonnt, die Bergseite dagegen war beschattet. Bei den Innenseiten war es umgekehrt: seeseitige Brüstung beschattet, bergseitige Brüstung jedoch besonnt.

Abb. 6.12 zeigt die Seeseite der Brücke mit Blick Richtung Biel. Die Brüstung wirkt homogen und nach der Oberflächenbehandlung deutlich zurückhaltender, d.h. weniger hell als zuvor bzw. abgedunkelt.



Abb. 6.12 Ansicht der Bahnhofbrücke Tüschierz nach der Instandsetzung. Blickrichtung Biel. Foto F. Hunkeler vom 28.03.2022.

Aus den Abb. 6.13 und Abb. 6.14 geht hervor, dass die Brüstung auf der Bergseite mit dem Beton G ein ungünstiges Rissbild aufweist (weniger, dafür breitere Trennrisse bis 0.3 mm). Diese sind auf der Aussen- und Innenseite deutlich erkennbar. Bei einigen Rissen sind auch bereits Kalkausblühungen und Verfärbungen aufgetreten. Demgegenüber weist die Brüstung auf der Seeseite mit dem Beton G-ND keine, oder wenn, dann deutlich feinere Risse auf. Die grössten Risse waren 0.1 mm breit (Abb. 6.15 und Abb. 6.16). Kalkausblühungen sind keine vorhanden.



Abb. 6.13 Aussenseite der Brüstung auf der Bergseite mit Rissen und Ausblühungen. Foto ASTRA vom 28.03.2022.

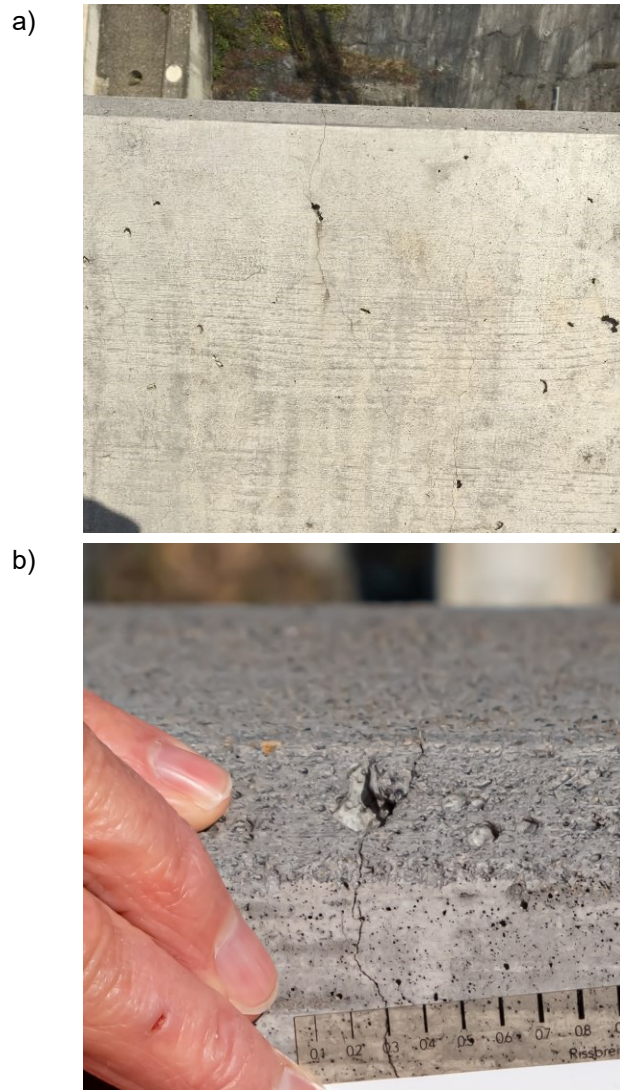
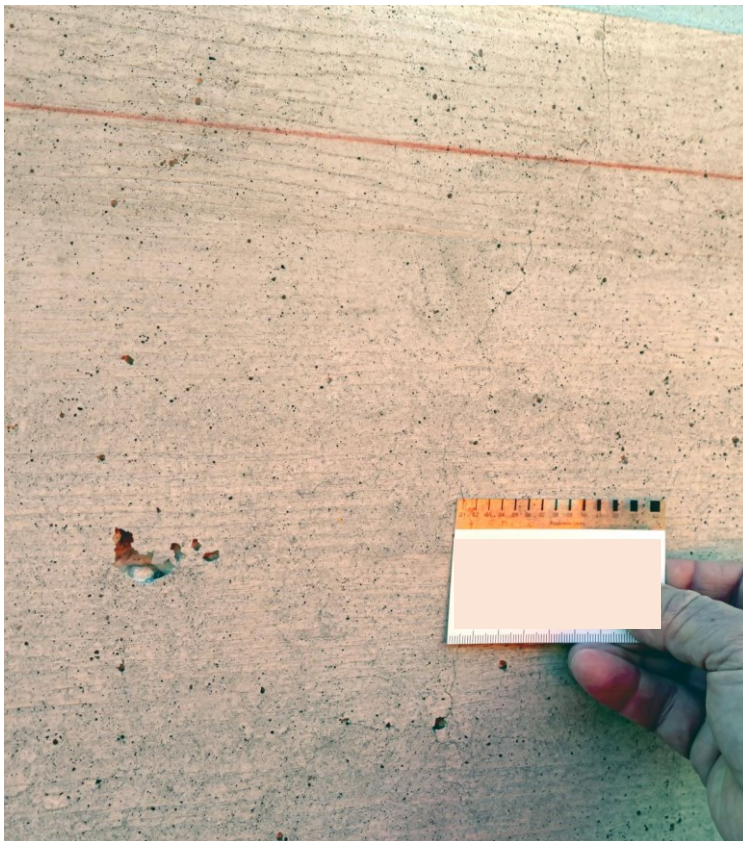


Abb. 6.14 a) Innenseite der Brüstung auf der Bergseite mit Rissen b) Rissbreite bis 0.3 mm. Foto a) F. Hunkeler und Foto b) ASTRA vom 28.03.2022.



a)



b)

Abb. 6.15 a) Innenseite der Brüstung auf der Seeseite mit feinen Rissen; b) Rissbreite bis 0.1 mm. Fotos ASTRA vom 28.03.2022.



a)



b)

Abb. 6.16 a) Aussenseite der Brüstung auf der Seeseite: a) Sehr feine vertikale Risse bis Oberkante; b) Sehr feine netzartige Risse im mittleren Bereich. Fotos ASTRA vom 28.03.2022.

7 Bewertung der Pilotanwendung und Folgerungen

7.1 Erkenntnisse aus der Pilotanwendung

Im Rahmen der Pilotanwendung wurden die Betonsorte G für die Brüstung auf der Bergseite und im Vergleich dazu die Betonsorte G-ND für die Brüstung auf der Seeseite der Bahnhofbrücke in Tüschierz eingesetzt. Diese Arbeiten wurden im Rahmen der Instandsetzung der Brücke ausgeführt.

Mit der Pilotanwendung konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, basierend auf dem Anhang ND [25] einen Beton zu entwerfen, der die Anforderungen des Bestellers weitestgehend erfüllen konnte.

Die entwickelte Betonsorte G-ND enthielt im Vergleich zu der für solche Bauteile üblicherweise eingesetzten Betonsorte G wesentlich weniger Zement (250 anstelle von mindestens 320 kg/m³). Zudem war der w/z-Wert deutlich höher (ca. 0.60 anstelle von 0.45).

Das Leimvolumen der Betonsorte G-ND betrug rund 290 l/m³ und war etwa so gross wie der Hohlraumgehalt. Der Verfüllungsgrad des Hohlraums war damit rund 100%. In früheren Untersuchungen konnten auch bei Werten unter 100% noch gut verarbeitbare Betone hergestellt werden. Diese Parameter sind zusammen mit dem Verhältnis Wasser/Leimvolumen (hier 0.512) in Zukunft wichtige Kenngrössen für die Entwicklung und Optimierung von neuen Betonen.

Das Verhältnis w/CaO betrug rund 0.90 und ist damit noch weit unter dem für den Korrosionsschutz wichtigen Grenzwert von 2.0 (siehe Kapitel 2.5).

Die Konsistenz des Frischbetons schwankte bei der ersten Etappe erheblich und mehr als bei den späteren Etappen. Sie war aber immer noch zufriedenstellend. Die Ursache der Schwankungen konnte auf den variablen Zugabewassergehalt zurückgeführt werden. Dies hat nichts mit dem Betonentwurf zu tun. Bei der Betonsorte G ist der Zugabewassergehalt etwa ähnlich.

Der Widerstand gegen das Bluten und Entmischen erfüllte die erhöhten Anforderungen gemäss Abb. 2.6 und damit auch die Projektanforderungen. Bei beiden Eigenschaften haben hohe w/z-Werte negative Auswirkungen.

Mit der entwickelten Betonrezeptur konnte eine günstige, das heisst langsame Entwicklung der Druckfestigkeit sowie die Beschränkung auf 38 N/mm² nach 28 Tagen erfüllt werden. Es konnte so – zusammen mit anderen Einflüssen (siehe Kapitel 7.2) – eine wesentlich feinere Rissverteilung erreicht werden.

Geringe Abstriche mussten beim Frost-Tausalzwiderstand in Kauf genommen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies nicht zu Problemen führen wird. Erwartungsgemäss war der Karbonatisierungswiderstand deutlich kleiner als bei der Betonsorte G. Aufgrund der erhöhten Bewehrungsüberdeckungen, die vom ASTRA für solche Bauteile gefordert werden, hat dies mit grosser Wahrscheinlichkeit keine negativen Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit.

Insgesamt kann damit festgehalten werden, dass das Hauptziel der begrenzten Festigkeit nach 28 Tagen bei gleichzeitig guten bis sehr guten Dauerhaftigkeitseigenschaften erreicht wurde.

Der helle Farbton der Betonsorte G-ND wurde entsprechend den Vorstellungen des Bestellers mit einer «Lasur» leicht abgedunkelt. Das gleiche Oberflächenschutzsystem wurde auch auf der Brüstung der Bergseite mit der Betonsorte G appliziert. Damit konnten auch

die ästhetischen Anforderungen erfüllt werden. Anmerkung: Bei der Entwicklung der Betonrezeptur war der Farbton kein Kriterium.

Auf Grund von technischen Einschränkungen im Betonwerk konnte das Potenzial des neuen Betonentwurfsverfahrens noch nicht vollständig genutzt werden. Darüber hinaus erlaubten die zeitlichen Randbedingungen keine längere Vorversuchs- bzw. Vorbereitungsphase.

Bei den Betonprüfungen waren mehrere Labors beteiligt, was sich bei der Vergleichbarkeit der Ergebnisse eher negativ ausgewirkt hat.

7.2 Vergleich der technischen Eigenschaften der Betonsorten G und G-ND

Zwischen den beiden Betonsorten G und G-ND wurden keine grundlegenden Unterschiede bei den Frischbetoneigenschaften beobachtet. Die Verarbeitbarkeit der Betonsorte G-ND wurde vom Einbauteam gelobt.

Im Kapitel 6 wurden die Ergebnisse der Festbetonprüfungen bei den beiden Betonsorten G und G-ND miteinander verglichen und besprochen. Zusammenfassend kann hier Folgendes festgehalten werden:

- Die Brüstung auf der Seeseite mit der Betonsorte G-N weist weniger Lunker auf jene auf der Bergseite mit der Betonsorte G.
- Der Farbton der Betonsorte G-ND war noch etwas heller als jener der Betonsorte G.
- Die Beschränkung der Druckfestigkeit der Betonsorte G-ND auf 38 N/mm² konnte eingehalten werden. Die Betonsorte G liegt mit über 50 N/mm² wesentlich höher.
- Die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit und des E-Moduls sind bei der Betonsorte G-ND wesentlich langsamer.
- Das Schwindmass der Betonsorte G-ND ist wegen des reduzierten Leimvolumens eher tief – der geringe Zementgehalt kompensiert den erhöhten w/z-Wert – und ist ähnlich wie bei der Betonsorte G.
- Aufgrund der unterschiedlichen Zementarten und der unterschiedlichen Gehalte ist die Hydratationswärme der beiden Betonsorte deutlich unterschiedlich. Konkrete Messungen dazu liegen nicht vor. Die deutlich geringere Hydratationswärme des Betons G-ND ist sicher von Vorteil, da dies die thermisch bedingte Rissbildung entsprechend verringert.

Die Brüstung auf der Bergseite mit dem Beton G weist bereits grobe Trennrisse bis 0.3 mm Breite mit einem Rissabstand zwischen 1 und 1.2 m auf, Tendenz zunehmend. Demgegenüber weist die Brüstung auf der Seeseite mit dem Beton G-ND ein deutlich feineres Rissbild auf. Die grössten Risse waren etwa 0.1 mm breit (Rissabstand 15 – 30 cm). Infolge des viel feineren Rissbildes, des tieferen E-Moduls und des vermutlich etwas geringeren Restschwindens ist hier zudem nur noch eine kleine Zunahme zu erwarten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit dem neuen Beton das gesetzte Ziel erreicht werden konnte.

7.3 Vergleich der Nachhaltigkeitseigenschaften der Betonsorten G und G-ND

Neben den technischen Vorteilen des neuen Entwurfsverfahrens für Beton gemäss Anhang ND [25] sind auch die geringeren ökologischen Auswirkungen der neu entwickelten Betonsorte G-ND im Vergleich zur Sorte G, wie sie in der SN EN 206 geregelt ist, beachtenswert. Die Reduktion des Zementgehalts um mehr als 20% und die Reduktion des Klinkergehalts um bis zu 70% (je nach der für den Vergleich verwendeten Zementart) fallen dabei stark ins Gewicht. Dies führt zu einer erheblichen Verbesserung der Nachhaltigkeits-

eigenschaften (geringerer Energieverbrauch und CO₂-Ausstoss) gegenüber konventionellen Betonsorten. Das Treibhausgaspotenzial von CEM III/B liegt bei rund 280 kg CO₂-eq./Tonne (Abb. 7.1). Dieser Wert entspricht ziemlich genau dem Wert, den Holcim für ihren Hochofenzement CEM III/B 42,5 L-LH/SR (NA) angibt [56]. Im Wert der Holcim sind 54 kg CO₂-eq. aus der Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung nicht enthalten.

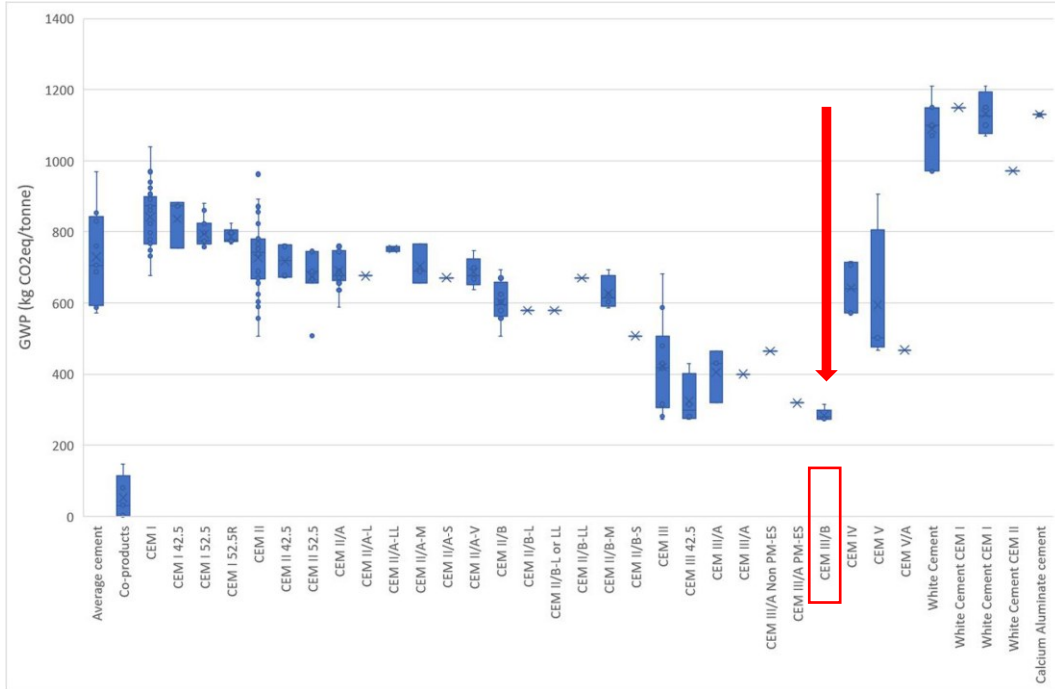


Abb. 7.1 Treibhausgaspotenzial verschiedener Zemente [57].

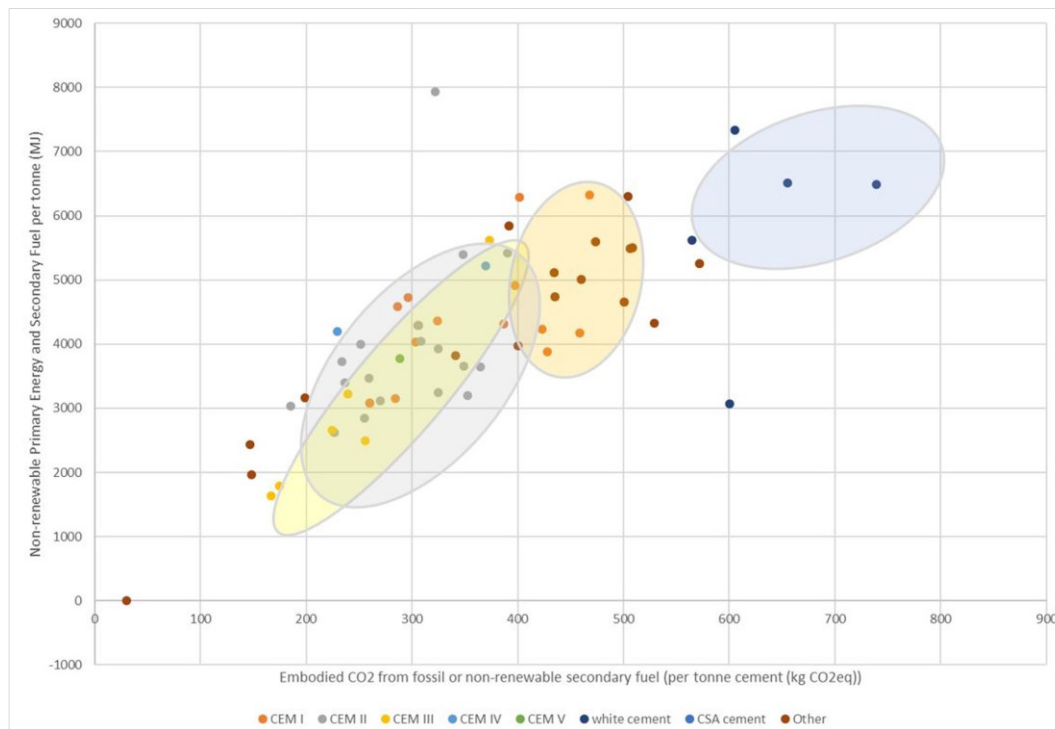


Abb. 7.2 Energieverbrauch vs. Treibhausgaspotenzial von verschiedenen Zementen [57].

Mit den Angaben zur Umweltdeklaration gemäss SN EN 15804 können das Treibhausgaspotenzial und der Energieeinsatz für die Herstellung der Betone G und G-ND grob abgeschätzt werden. In den Angaben in Tab. 7.1 und Tab. 7.2 wurden lediglich Art und Gehalt der Zemente im Beton berücksichtigt. Die Werte für den Beton G-ND liegen wesentlich unter jenen der möglichen Betone mit anderen Zementen.

Tab. 7.1 Treibhausgaspotenzial (GWP) der G und G-ND mit verschiedenen Zementen und einem Kalksteinmehl (ohne Betone andere Ausgangsstoffe wie z.B. Gesteinskörnung und Zusatzmittel). Basis: Zusammensetzung gemäss Tab. 3.2 und Tab. 5.3

Zementart	Referenz	Treibhausgaspotenzial GWP, kg CO ₂ -eq./Tonne bzw. bzw. pro m ³ Beton			Rangfolge
		Ausgangsstoff	Beton G	Beton G-ND	
CEM I	[58]	678	217		100%
CEM II/A ¹⁾	[58]	589	188		87%
CEM II/B ¹⁾	[58]	557	178		82%
CEM III/B	[57]	280		71	33%
KSM	[59]	25			

¹⁾ Zusammenfassung verschiedener Zementarten in einer Gruppe.

Tab. 7.2 Energieeinsatz für die Betone G und G-ND mit verschiedenen Zementen und einem Kalksteinmehl (ohne andere Ausgangsstoffe wie z.B. Gesteinskörnung und Zusatzmittel). Basis: Zusammensetzung gemäss Tab. 3.2 und Tab. 5.3

Zementart	Referenz	Total erneuerbare und nicht erneuerbare Energie, MJ/Tonne bzw. pro m ³ Beton			Rangfolge
		Ausgangsstoff	Beton G	Beton G-ND	
CEM I	[58]	3894	1246		100%
CEM II/A ¹⁾	[58]	3276	1048		84%
CEM II/B ¹⁾	[58]	3106	994		80%
CEM III/B	[57]	2422 ²⁾		606	49%
KSM	[59]	k.A.			

¹⁾ Zusammenfassung verschiedener Zementarten in einer Gruppe.

²⁾ Dieser Wert beinhaltet sämtliche erneuerbare und nicht erneuerbare Primärenergie und sowie die Energie von Sekundärstoffen und Sekundärbrennstoffen

Die Stadt Zürich hat zusammen mit der KBOB den Betonrechner entwickelt [60]. Damit können die Umweltauswirkungen von einem m³ Beton berechnet werden. In der Tab. 7.3 sind die Ergebnisse für die Betonsorte F (Zusammensetzung wie Betonsorte G, aber ohne künstliche Luftporen) zusammengestellt. Die Ergebnisse sind nicht direkt vergleichbar mit jenen in den vorherigen Tabellen, sie zeigen aber, dass die Rangfolgen für die verschiedenen Parameter identisch sind und dass der Zement CEM III/B mit dem tiefsten Klingerhalt die geringsten Umweltauswirkungen aufweist.

Tab. 7.3 Umweltauswirkungen gemäss Betonrechner [60] für die Betonsorte F. THG-E: Treibhausgasemissionen; GE: Graue Energie = nicht erneuerbare Primärenergie; UBP: Umweltbelastungspunkte

Zement		THG-E		GE ²⁾		UBP	
Art	Gehalt	CO ₂ -eq./m ³	Rangfolge	kWh Öl-eq./m ³	Rangfolge	UBP/m ³	Rangfolge
CEM I	320	283	100%	534	100%	254514	100%
CEM II/A ¹⁾	320	252	89%	492	92%	234646	92%
CEM II/B ¹⁾	320	246	87%	519	97%	230060	90%
CEM III/B	320	143	51%	506	95%	189496	74%
	250	120	42%	433	81%	165954	65%

¹⁾ Zusammenfassung verschiedener Zementarten in einer Gruppe.

²⁾ Dieser Wert beinhaltet nur die nicht erneuerbare Primärenergie.

Zur Charakterisierung der ökologischen Effizienz eines Betons wurden verschiedene Kenngrößen vorgeschlagen:

- Von Müller [61] wurde die CO₂-Intensität eines Betons als Vergleichsgrösse vorgeschlagen. Dabei wird der „CO₂-Gehalt“ im Beton auf die erreichte Betondruckfestigkeit bezogen;
- Krauss [62] schlägt demgegenüber vor, die Bindemittelintensität als Basis zu nehmen.

Beide genannten Kenngrößen sind unzulänglich, da diese lediglich die Druckfestigkeit berücksichtigen, nicht jedoch die Dauerhaftigkeit bzw. die Lebensdauer eines Betonbaus. Haist [63] hat dazu das Nachhaltigkeitspotential Ω vorgeschlagen (Gleichung 4):

$$\text{Nachhaltigkeitspotenzial } \Omega = \frac{\text{Druckfestigkeit } f_{ck} \cdot \text{Lebensdauer } t_{SL}}{\text{Treibhausgaspotenzial } GWP} \quad \text{Gleichung 4}$$

Bei diesem Ansatz müssen die Mindestanforderungen an f_{ck} und t_{SL} erfüllt werden. Dieser Ansatz ist interessant, setzt aber eine gesicherte Modellierung der Lebensdauer der verschiedenen Betone voraus.

Kenngrößen, die die Druckfestigkeit in der oben ausgeführten Art berücksichtigen, sind für die hier beschriebene Pilotanwendung wohl nur mit Einschränkungen anwendbar, da es ja nicht das Ziel war, hohe Druckfestigkeiten zu erzielen.

In Zukunft reicht es nicht mehr, die technische und ökologische Effizienz vom Beton als Baustoff zu kennen. Vielmehr müssen Betonbauten als Ganzes betrachtet und beurteilt werden. Dazu fehlen heute noch das geeignete und allgemein anerkannte Instrumentarium sowie akzeptierte Verfahren oder Kenngrößen. Im CEN/TC 104 laufen Arbeiten in der WG19, um in einem Leitfaden die heute möglichen Massnahmen aufzuzeigen [8]. Alle Massnahmen basieren auf den folgenden zentralen Nachhaltigkeitszielen:

- Sofortige und drastische Reduzierung der CO₂-Emissionen als Massnahme für den Klimaschutz;
- Vorsorgemassnahmen für die bereits bestehenden Folgen des Klimawandels ergreifen;
- Ressourcenschonung und Materialoptimierung.

In Teil 2, Kapitel 5.3 [8] wird auf das Spannungsfeld zwischen den heutigen Normen und den neuen Bedürfnissen hingewiesen (Zitat):

“Until now, the durability design of concrete structures according to current EN 1992-1-1, EN 206, EN 13670 and EN 13369 uses a concept in which the performance is verified primarily with Deemed-to-Satisfy (DtS) rules (concrete composition, concrete cover) based on experience. The concrete sector has expressed a need to amend the current concept to permit alternative verification by performance testing of concrete.” (Zitat Ende.)

In drei Szenarien werden die heutige Situation (Szenarium 1) und die zukünftigen Möglichkeiten dargelegt (Abb. 7.3). Das Szenarium 3 kommt dem Vorgehen im Anhang ND [25] am nächsten. Eine wichtige Abweichung ist die, dass im Anhang ND [25] nicht nur die Dauerhaftigkeit betrachtet wird, sondern auch die mechanischen Eigenschaften (z.B. zulässige maximale Druckfestigkeit).

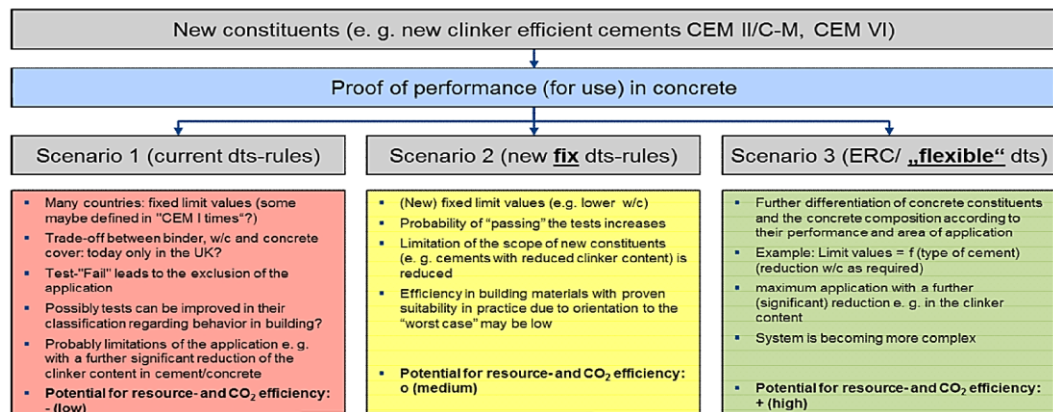


Abb. 7.3 Nachweis der Dauerhaftigkeit: Von der heutigen Praxis zum System mit den Widerstandsklassen (Exposure Resistance Classes ECR) [8]. Die so genannten Deemed-to-satisfy rules (dts) umfassen die Vorgaben an die Betonzusammensetzung und die Überdeckung, wie dies in den heutigen Normen üblich ist.

7.4 Kosten

Zum Einfluss der Zementart auf die Kosten der Betone können keine gesicherten Aussagen gemacht werden, da die Preise für die Zemente regional und kundenabhängig sind und stark schwanken können. Zudem sind die Preise auch vom aktuellen und zukünftigen Produktportfolio des Herstellers abhängig. Die Hersteller publizieren daher schon seit längerem keine Preislisten mehr. Die einzigen verlässlichen Vergleiche erlauben die Betonpreise in den Ausschreibungen. Bei der Pilotanwendung waren die Preise pro m³ Beton G und G-ND ähnlich. Grob lässt sich sagen, dass zwischen den günstigsten Zementen (CEM II/A-LL und CEM II/B-LL) mit Preisen zwischen etwa 120-160 CHF/Tonne und den teuersten Zementen (CEM I 52,5 R, CEM II/B-M (S-T), CEM III/B) mit Preisen zwischen 160 und 220 CHF/Tonne grosse Unterschiede möglich sind. Es ist zu beachten, dass die günstigen Zemente eher im Hochbau, die teuren eher im Tiefbau eingesetzt werden. Innerhalb dieser Gruppen sind die Preisunterschiede daher geringer. Ein Preisdifferenz von CHF 40 bis 60.- bewirkt eine Preisdifferenz von etwa CHF 10 bis 20.- pro m³ Beton.

Die Einführung von neuen Betonsorten, wie z.B. ein Beton gemäss Anhang ND [25], bedingen Vorversuche. Diese brauchen Zeit (abhängig von den Dauerhaftigkeitsprüfungen) und verursachen Kosten. Dies muss bei der Ausschreibung und im Werkvertrag sowie bei der Planung der Ausführung berücksichtigt werden. Es ist zu empfehlen, die Vorversuche in einer separaten Position in der Ausschreibung offerieren zu lassen.

Für eine Gesamtbetrachtung sind nicht nur die Kosten für den Beton, sondern für das ganze Bauteil bzw. Bauwerk zu betrachten. So kann ein geringerer Mindestbewehrungsgehalt zu tieferen Kosten führen.

8 Empfehlungen

Das im Rahmen der Pilotanwendung getestete Betonentwurfsverfahren eignet sich für diverse weitere Anwendungen. Zu nennen sind z.B.:

- 1) Bauteile im Tiefbau mit normalen Anforderungen an die Druckfestigkeit, jedoch hohen Anforderungen an die Rissbildung und -verteilung, wie z.B.: Konsolköpfe, Brüstungen, Stützmauern, Rückwände von Galerien, Widerlager, Grundwasserwannen, unbewehrte Innenschalen von Tunnels. Evtl. in Kombination mit 3).
- 2) Pfahlbeton, vorab für Pfähle unter Wasser: Betone mit reduziertem Zementgehalt und Festigkeit.
- 3) Betone mit niedriger Hydratationswärme oder massige Bauteile. Evtl. in Kombination mit 1).
- 4) AAR-beständige Betone: freie Gestaltung der Betonzusammensetzung.
- 5) Hochbau: Betone mit reduziertem Zementgehalt. Das Reduktionspotenzial ist bei den Betonsorte A bis C unterschiedlich.
- 6) Ganz allgemein für projektbezogene Anforderungen, d.h. massgeschneiderte Betone für bestimmte Bauvorhaben oder mit bestimmten Eigenschaften. Hier können der Zeitbedarf und die Kosten für die Vorversuche ggf. ins Gewicht fallen. Der Preis pro m³ Beton kann zu Beginn leicht erhöht sein.

Es kann davon ausgegangen werden, dass mit den neuen Betonrezepturen nach Anhang ND [25] auch verbesserte Nachhaltigkeitseigenschaften einhergehen.

Wenn bereits im Planungsprozess und bei der Bemessung Betone mit geringerer Früh- und Endfestigkeit oder mit einem massgeschneiderten bzw. angepassten Widerstand bei den Dauerhaftigkeitseigenschaften in Betracht gezogen werden, könnten zudem auch Anforderungen an den ökologischen Fussabdruck der Beton gestellt werden. Dabei ist auch der Einsatz nichtmetallischer oder nichtrostender Bewehrung bei den Expositionsklassen XD3 (in der Regel mit XF4 verbunden) zu prüfen.

Die nachfolgenden Empfehlungen für Forschungsarbeiten sollen helfen, die Bereitschaft für weitere Anwendungen zu fördern.

Zudem sollten die Fachleute der Planung, Ausführung und Betonherstellung entsprechend geschult werden.

9 Forschungsbedarf

In Anbetracht der Dringlichkeit (Image des Betons und des Betonbaus, Klimawandel und die Forderung nach energie- und emissionsarmen Bauprodukten und Bauwerken) sollte alles unternommen werden, um nachhaltige Betone zielsicher herzustellen und anzuwenden.

Bei verschiedenen Themen besteht ein Forschungsbedarf, aber auch die Notwendigkeit, neu entwickelte Betone oder Vorgehensweise in Pilotanwendungen zu testen:

- Evaluation des neuen Betonentwurfsverfahren für andere Betonanwendungen (z.B. Pfahlbetone) und für andere Betonzusammensetzungen (z.B. mit anderen Zementarten und Zusatzstoffen) zur Optimierung der Eigenschaften, z.B. Chlorid- und Karbonatisierungswiderstand oder Hydratationswärme.
- Betone mit weiteren Zementarten in Kombination mit inerten und reaktiven Zusatzstoffen und ggf. reduziertem w/z-Wert.
- Evaluation von Massnahmen zur Reduktion des Blutens und Entmischens.

Bei den im Anhand ND [25] vorgeschlagenen Prüfverfahren besteht Forschungsbedarf mit folgenden Zielsetzungen:

- Anhang ND-X [39]: Prüfung von Betonen mit einem hohen Leimvolumen und/oder kleinem Grösstkorn der Gesteinskörnung. Einfluss der Zeit auf das Ergebnis in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung.
- Anhang ND-Y [40]: Details der Ausführung, z.B. Durchmesser des Vibrators, Einfluss der Zeit auf das Ergebnis in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung.
- Prüfnorm zur Bestimmung des Sättigungspunktes bei Fließmitteln, z.B. Methodik und Prüfverfahren.

Darüber hinaus sind die Grundlagen für die Beurteilung und den Vergleich von ganzen Bauteilen und Bauwerken hinsichtlich der Nachhaltigkeitseigenschaften zu erarbeiten (siehe Kapitel 7.3).

Anhänge

I	Überlegungen zur Mindestbewehrung.....	83
II	Tabellen zu Kapitel 4.3.3.....	86
III	Tabellen zu Kapitel 4.3.5.....	89
IV	Tabellen zu Kapitel 4.3.6.....	91
V	Tabellen zu Kapitel 5.3.....	92

I Überlegungen zur Mindestbewehrung

Hinweis: Die nachfolgenden Ausführungen basieren i.W. auf dem Referat von A. Kenel anlässlich einer Veranstaltung der TFB AG, Wildegg, am 27.11.2012 [42].

Gemäss SIA 262 [9] kann die Rissöffnung direkt mit der Zugspannung σ_s in der den Riss überbrückenden Bewehrung korreliert werden. Zu Beginn der Rissbildung muss σ_s auf einen zulässigen Wert, $\sigma_{s,adm}$, begrenzt werden, der hauptsächlich von den gestellten Anforderungen (normal, erhöht, hoch gemäss SIA 262, Ziffer 4.4.2) und dem Bewehrungsdurchmesser und -abstand abhängt. Im Falle einer axialen Zugbeanspruchung, z.B. einer eingespannten durchgehenden Stützmauer oder Brüstung, die einer aufgezwungenen Verformung infolge Schwinden oder/und Temperaturänderung ausgesetzt ist, kann die minimale Bewehrungsmenge, $A_{s,min}$, grundsätzlich mit der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$A_{s,min} \cdot \sigma_{s,adm} \geq f_{ctd} \cdot A_{ct,i} \quad \text{Gleichung 5}$$

Dabei ist $A_{ct,i}$ die Fläche der gerissenen Beton-Querschnittsfläche und f_{ctd} der Bemessungswert der Betonzugfestigkeit. Somit ist die Minimalbewehrung eine direkte Funktion der Betonzugfestigkeit. Wenn die effektive Zugfestigkeit deutlich höher ist als der für die Bemessung angenommene Wert, führt der unzureichende Bewehrungsquerschnitt zu einem vorzeitigen Fließen der Bewehrung und zur Bildung von wenigen Rissen mit unkontrollierten Rissöffnungen anstelle des erwarteten/erwünschten Rissbildes mit gleichmässig verteilten feinen Rissen.

Für Beton der Festigkeitsklasse $\leq C50/60$ kann die mittlere Zugfestigkeit aus der Druckfestigkeit nach Gleichung 6 abgeschätzt werden (siehe EN 1992-1-1 [20]). Abb. I.1 zeigt die Korrelation dieser Gleichung mit Versuchsergebnisse.

$$f_{ct} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \text{Gleichung 6}$$

Dabei sind:

- f_{ct} Zugfestigkeit des Betons
- f_{ck} Zylinderdruckfestigkeit des Betons

Die direkte Bestimmung der Zugfestigkeit ist prüftechnisch nicht einfach. Der direkte Zugversuch oder der Keilspaltversuch sind sehr aufwändig und für den Alltag nicht geeignet. Der Biegezugversuch liefert deutlich zu hohe Werte. Als Kompromiss kann der Stempel-druckversuch betrachtet werden. Er ist einfach durchzuführen und führt zu Ergebnissen, die zwar höher sind als die Werte aus dem direkten Zugversuch. Die Abweichungen sind aber für viele praktische Anwendungen noch in einem akzeptablen Rahmen (Abb. I.1).

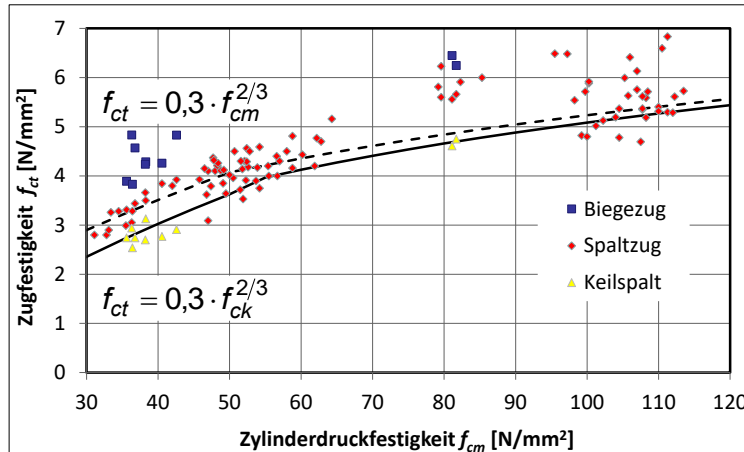


Abb. I.1 Vergleich der prüftechnisch ermittelten Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der mittleren Zylinderdruckfestigkeit f_{cm} [42].

Der Betonhersteller richtet sein Augenmerk in der Regel auf die 28-Tage-Druckfestigkeit. Damit er diese jederzeit sicher erreicht, muss er ein gewisses Vorhaltemass einhalten. Dieses ist u.a. von der Streuung der Eigenschaften der Ausgangsstoffe (inkl. Porosität/Wasseraufnahme) und von den Herstellungsbedingungen.

Mit dem angestrebten Vorhaltemass weist der hergestellte Beton immer eine deutlich höhere Druckfestigkeit als der Minimalwert der Festigkeitsklasse auf. Es gilt dann die Gleichung 7. Eine Beschränkung der Druckfestigkeit ist in der SN EN 206 [1] nicht vorgesehen und mit den Vorgaben bzgl. Mindestzementgehalt und maximalem w/z-Wert auch nicht möglich.

$$f_{ck,0} \leq f_{ck,sup} \quad \text{Gleichung 7}$$

$f_{ck,0}$ Zylinderdruckfestigkeit der Festigkeitsklasse

$f_{ck,sup}$ Zylinderdruckfestigkeit des gelieferten Betons

In [42] wurde basierend auf Gleichung 8 der Mehraufwand für die Mindestbewehrung abgeschätzt. Aus Abb. I.2 ist ersichtlich, dass bei der Verdoppelung der Zylinderdruckfestigkeit eine über 50%-ige Erhöhung der Mindestbewehrung erforderlich ist.

$$\frac{A_{s,min,sup}}{A_{s,min,0}} \cong \frac{f_{ctd,sup}}{f_{ctd,0}} = \frac{0,3 \cdot f_{ck,sup}^{2/3}}{0,3 \cdot f_{ck,0}^{2/3}} = \left(\frac{f_{ck,sup}}{f_{ck,0}} \right)^{2/3} \quad \text{Gleichung 8}$$

$A_{s,min, sup}$ notwendige Querschnittsfläche der Minimalbewehrung für die Zugfestigkeit des gelieferten Betons

$A_{s,min 0}$ notwendige Querschnittsfläche der Minimalbewehrung für die Zugfestigkeit des Betons einer Festigkeitsklasse

$f_{ctd,0}$ Bemessungswert der Zylinderdruckfestigkeit der Festigkeitsklasse

$f_{ctd,sup}$ Bemessungswert der Zylinderdruckfestigkeit des gelieferten Betons

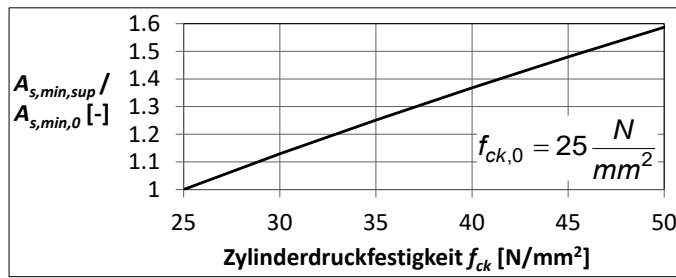


Abb. 1.2 Abschätzung des Mehraufwandes für die Bewehrung wegen der Überfestigkeiten des gelieferten Betons [42]] am Beispiel mit $f_{ck,0} = 25 \text{ N/mm}^2$.

II Tabellen zu Kapitel 4.3.3

Tab. II.1 Betonherstellung und -zusammensetzung (Uhrzeit ist gerundet) für die 1. Etappe.
A: 1. Charge; B: letzte Charge, D: Zeitdifferenz zwischen der ersten und letzten Charge.

Datum	Uhrzeit			LS-Nr.	Vol., m ³	Zusatzmittel, %Zem.			Zement, kg/m ³	KSM, kg/m ³	Wasser, l/m ³
	A	B	Δ			FM	LP	VZ			
30.09.2021	06:58	07:11	00:13	209074	10	0.20	0.42	0.31	244	25	155.7
30.09.2021	08:11	08:17	00:06	209084	7	0.20	0.42	0.31	245	25	155.2
30.09.2021	08:55	09:03	00:08	209090	10	0.20	0.42	0.31	245	25	144.6
30.09.2021	09:47	09:57	00:10	209098	7	0.20	0.41	0.31	245	25	147.0
30.09.2021	11:13	11:20	00:07	209108	7	0.20	0.40	0.33	246	25	166.5
Total					41						
Mittelwert						0.20	0.41	0.31	245		153.8
Std.abw.						0.00	0.01	0.01	0.54		7.7

Tab. II.2 Betonherstellung und -zusammensetzung (Uhrzeit ist gerundet) für die 2. Etappe.
A: 1. Charge; B: letzte Charge, D: Zeitdifferenz zwischen der ersten und letzten Charge.

Datum	Uhrzeit			LS-Nr.	Vol., m ³	Zusatzmittel, %Zem.			Zement, kg/m ³	KSM, kg/m ³	Wasser, l/m ³
	A	B	Δ			FM	LP	VZ			
11.10.2021	06:31	06:38	00:07	209409	10	0.19	0.40	0.30	250	25	159.8
11.10.2021	06:52	06:58	00:06	209410	10	0.20	0.40	0.30	249	25	159.7
11.10.2021	08:31	08:38	00:07	209416	10	0.20	0.40	0.30	253	25	159.2
11.10.2021	10:04	10:12	00:08	209418	10	0.20	0.39	0.30	253	25	159.6
11.10.2021	10:43	10:43	00:00	209420	2	0.20	0.39	0.31	251	25	160.9
Total					42						
Mittelwert						0.20	0.40	0.30	251		159.8
Std.abw.						0.00	0.00	0.00	1.5		0.6

Tab. II.3 Betonherstellung und -zusammensetzung (Uhrzeit ist gerundet) für die 3. Etappe.
A: 1. Charge; B: letzte Charge, D: Zeitdifferenz zwischen der ersten und letzten Charge.

Datum	Uhrzeit			LS-Nr.	Vol., m ³	Zusatzmittel, %Zem.			Zement, kg/m ³	KSM, kg/m ³	Wasser, l/m ³
	A	B	Δ			FM	LP	VZ			
15.10.2021	09:56	10:00	00:04	209590	4	0.20	0.41	0.00	248	25	149.8

Tab. II.4 Detailanalyse der Konsistenz aus Mischerlast

1. Etappe	Konsistenz (Mischerlast)					
	Lieferschein (LS)-Nr.					Alle Chargen
Charge	209074	209084	209090	209098	209108	
1. Charge	4.5	3.9	4.1	5.0	5.0	
2. Charge	5.1	5.1	4.9	4.1	5.0	
3. Charge	5.7	5.4	3.5	4.1	4.9	
4. Charge	5.8		4.7			
Mittelwert	5.3	4.8	4.3	4.4	5.0	4.7
Std.abw.	0.5	0.6	0.5	0.4	0.0	0.4
2. Etappe	209409	209410	209416	209418	209420	
1. Charge	5.0	5.0	4.6	4.9	5.1	
2. Charge	5.3	5.0	5.2	5.0		
3. Charge	4.9	5.0	5.3	4.9		
4. Charge	4.2	5.2	5.2	5.1		
Mittelwert	4.9	5.1	5.1	5.0	5.1	5.0
Std.abw.	0.4	0.1	0.3	0.1	0.0	0.1
3. Etappe	209590					
1. Charge	4.3					
2. Charge	4.1					
Mittelwert	4.2					
Std.abw.	0.1					

Tab. II.5 Angaben zum Frischbeton der 1. Etappe

Datum	Konsistenz (Mischerlast)		w ₀ /z		w/z (CP)	
	Mittelwert	Std.abw.	CP	berechnet	w _G = 10 l/m ³	w _G = 14 l/m ³
30.09.2021	5.3	0.5	0.64	0.64	0.60	0.58
30.09.2021	4.8	0.6	0.63	0.63	0.59	0.58
30.09.2021	4.3	0.5	0.59	0.59	0.55	0.53
30.09.2021	4.4	0.4	0.60	0.60	0.56	0.54
30.09.2021	5.0	0.0	0.68	0.68	0.64	0.62
Mittelwert	4.7	0.2	0.63	0.63	0.59	0.57
Std.abw.	0.4		0.03	0.03	0.03	0.03
Differenz			0.000		-0.016	
Differenz zu w/z berechnet					-0.04	-0.06

Tab. II.6 Angaben zum Frischbeton der 2. Etappe

Datum	Konsistenz (Mischerlast)		w ₀ /z		w/z (CP)	
	Mittelwert	Std.abw.	CP	berechnet	w _G = 10 l/m ³	w _G = 14 l/m ³
11.10.2021	4.9	0.4	0.64	0.64	0.60	0.58
11.10.2021	5.1	0.1	0.64	0.64	0.60	0.58
11.10.2021	5.1	0.3	0.65	0.63	0.59	0.57
11.10.2021	5.0	0.1	0.65	0.63	0.59	0.58
11.10.2021	5.1	0.0	0.66	0.64	0.60	0.59
Mittelwert	5.0	0.1	0.65	0.64	0.60	0.58
Std.abw.	0.1		0.01	0.00	0.016	0.00
Differenz			-0.011		-0.016	
Differenz zu w/z berechnet					-0.04	-0.06

Tab. II.7 Angaben zum Frischbeton der 3. Etappe

Datum	Konsistenz (Mischerlast)	w ₀ /z		w/z (CP)	
		CP	berechnet	w _G = 10 l/m ³	w _G = 14 l/m ³
15.10.2021	4.9	0.64	0.64	0.60	0.58
Differenz		-0.015		-0.016	
Differenz zu w/z berechnet				-0.04	-0.06

Tab. II.8 Detailanalyse des Wassergehaltes der 1. Etappe

Datum	Wassergehalt, l/m ³		
	Feuchtigkeit der GK	Zugabewasser	Total
30.09.2021	48.2	107.5	155.7
30.09.2021	46.0	109.2	155.2
30.09.2021	47.8	96.8	144.6
30.09.2021	47.5	99.5	146.9
30.09.2021	45.3	121.2	166.5
Mittelwert m	47.0	106.8	153.8
Std.abw. σ	1.1	8.6	7.7
m – σ	45.8	98.3	146.1
m + σ	48.1	115.4	161.5
Differenz	2.3	17.1	15.4
Differenz w/z-Wert	0.01	0.07	0.06

Tab. II.9 Detailanalyse des Wassergehaltes der 2. Etappe

Datum	Wassergehalt, l/m ³		
	Feuchtigkeit der GK	Zugabewasser	Total
11.10.2021	46.5	113.3	159.8
11.10.2021	45.6	114.1	159.7
11.10.2021	46.6	112.7	159.2
11.10.2021	45.0	114.6	159.6
11.10.2021	46.2	114.7	160.9
Mittelwert m	46.0	113.9	159.8
Std.abw. σ	0.6	0.8	0.6
m – σ	45.4	113.1	159.3
m + σ	46.6	114.7	160.4
Differenz	1.2	1.6	1.2
Differenz w/z-Wert	0.00	0.01	0.00

III Tabellen zu Kapitel 4.3.5

Tab. III.1 Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen bei den Vorversuchen und beim Muster

LS-Nr.	201349	201932	201953	203157	204507
Herstellung	10.03.21	25.03.21	25.03.21	27.04.21	02.06.21
	09:27	09:01	10:50	08:13	08:00
Prüflabor	1	1	1	1	1
Alter, d	Druckfestigkeit, N/mm ²				
1					2.9
2				13.9	5.7
3					
4					
7	34.0	29.5	27.4	26.0	15.3
14					
28	51.8	42.9	39.9	39.6	23.3
56	59.6		46.2	44.3	25.7
91	59.1				27.6
Verhältnis 2/28d				0.35	0.24
Verhältnis 7/28d	0.66	0.69	0.69	0.66	0.66

Tab. III.2 Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen bei der Ausführung. Der Mittelwert wurde aus den Ergebnissen vom 30.09.2021 (10:50) bis 15.10.2021 berechnet.

LS-Nr.	209074	209098	209074	209090	209074	209409	209409	209416	209590	Mittelwert (25.03. bis 15.10.21)
Herstellung	30.09.	30.09.	30.09.	30.09.	30.09.	11.10.	11.10.	11.10.	15.10.	
	07:10	09:59	06:58	08:45	06:58	06:30	06:30	08:30	09:59	
Prüflabor	1	1	4	4	3	4	3	4	2	
Alter, day	Druckfestigkeit, N/mm ²									
1										2.9
2										9.8
3						7.0	5.7	6.5		6.4
4			12.3	14.2	10.2				15.4	13.0
7	16.7	18.0	20.8	22.2	17.2	15.6	17.63	14.8	23.1	19.6
14			25.2	29.3	22.8	23.9	23.65	21.1		24.3
28	28.6	31.5	29.6	32.2	27.1	27.4	28.49	26.8	34.9	30.8
56			39.1	41.3	33.4	32.8	33.67	30.4	41.6	36.9
91									43.9	35.8
Verhältnis 2/28d										0.30
Verhältnis 7/28d	0.58	0.57	0.70	0.69	0.64	0.57	0.62	0.55	0.66	0.63

1) Mittelwert aus den Ergebnissen vom 25.03.2021 (10:50) bis 15.10.2021

Tab. III.3 Entwicklung der Druckfestigkeitsprüfungen bei den Vorversuchen und Muster

LS-Nr.	201953	203157	204507
Herstellung	25.03.21	27.04.21	02.06.21
	10:50	08:13	08:00
Prüflabor	1	1	1
Alter, day	Festigkeitsentwicklung in % 28d		
1			12.4
2		35.1	24.5
3			
4			
7	68.7	65.7	65.7
14			
28	100.0	100.0	100.0
56	115.8	111.9	110.3
91			118.5

Tab. III.4 Entwicklung der Druckfestigkeit bei der Ausführung. Der Mittelwert wurde aus den Ergebnissen vom 25.03.2021 (10:50) bis 15.10.2021 berechnet.

LS-Nr.	209074	209098	209074	209090	209074	209409	209409	209416	209590	Mittelwert (25.03. bis 15.10.21)
Herstellung	30.09.	30.09.	30.09.	30.09.	30.09.	11.10.	11.10.	11.10.	15.10.	
	07:10	09:59	06:58	08:45	06:58	06:30	06:30	08:30	09:59	
Prüflabor	1	1	4	4	3	4	3	4	2	
Alter, d	Festigkeitsentwicklung in % 28d									
1										12.4
2										29.8
3						25.5	20.0	24.3		23.3
4			41.6	44.1	37.8				44.1	41.9
7	58.4	57.1	70.3	68.9	63.7	56.9	61.9	55.2	66.2	63.2
14			85.1	91.0	84.2	87.2	83.0	78.7		84.9
28	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
56			132.1	128.3	123.5	119.7	118.2	113.4	119.2	119.2
91									125.8	122.1

IV Tabellen zu Kapitel 4.3.6

Tab. IV.1 Ergebnisse der Schwindprüfungen des Betons vom 02.06.2021 (Muster)

Datum	Alter, Tage	Schwindmass ϵ_{cs}		
		Prisma P1	Prisma P2	Mittelwert
03.06.2021	1	0.00	0.00	0.00
04.06.2021	2	0.01	0.01	0.01
09.06.2021	7	0.16	0.12	0.14
16.06.2021	14	0.25	0.22	0.23
30.06.2021	28	0.32	0.30	0.31
28.07.2021	56	0.36	0.33	0.35
01.09.2021	91	0.38	0.36	0.37
01.12.2021	182	0.42	0.40	0.41
01.06.2022	364	0.43	0.41	0.42

Tab. IV.2 Ergebnisse der Schwindprüfungen des Betons vom 15.10.2021 (3. Etappe)

Datum	Alter, Tage	Schwindmass ϵ_{cs}		
		Prisma P1	Prisma P2	Mittelwert
16.10.2021	1	0.000	0.000	0.000
18.10.2021	3	0.036	0.032	0.034
22.10.2021	7	0.130	0.130	0.130
29.10.2021	14	0.192	0.196	0.194
12.11.2021	28	0.250	0.258	0.254
10.12.2021	56	0.284	0.282	0.283
14.01.2022	91	0.306	0.316	0.311
15.04.2022	182	0.326	0.334	0.330
14.10.2022	364	Ausstehend		

V Tabellen zu Kapitel 5.3

Tab. V.1 E-Modul der Betonsorte G

Betonierdatum	24.06.2021	07.07.2021
Verwendung	Etappe 1	Etappe 2
Labor Nr.	5	5
E-Modul, kN/mm ²	35.1	34.5
kE, berechnet	9040	8888

Tab. V.2 E-Modul der Betonsorte G-ND

Betonierdatum	02.06.2021	30.09.2021	11.10.2021
Verwendung	Muster	Etappe 1	Etappe 2
Labor Nr.	1	5	5
E-Modul, N/mm ²	23.9	33.7	31.3
kE, berechnet	8368	10892	10387

Glossar

Abkürzung	Bedeutung
AM	Ausbreitmass
BS	Baustelle
BW	Betonwerk
BWM	Blutwassermenge
CP	Chargenprotokolle
d	Day (Tag)
EM	Entmischungsmass
FBK	Frischbetonkontrolle
FG	Feinanteilgehalt
FM	Fliessmittel
FÜ	Füllergehalt
G	Betonsorte G gemäss SN EN 206 [1]
G-ND	Betonsorte G-ND gemäss Anhang ND [25]
GK	Gesteinskörnung
HRV	Hohlraumvolumen
KSM	Kalksteinmehl
L	Leimvolumen
L _{F4}	Leimvolumen zur Erreichung des Ausbreitmasses F4 ≥490 mm
L _{min}	Mindestleimvolumen
LP	Luftporenbildner oder Luftporen
LS	Lieferschein
LU	Luftgehalt
ND	Entwurf für einen Nationaler Anhang ND [25] zur SN EN 206 [1]
SM	Setzmass
SVB	Selbstverdichtender Beton
VM	Verdichtungsmass
VZ	Verzögerer
w	Wasser
z	Zement
ZS	Zusatzstoff
p	Dichte
σ	Standardabweichung

Literaturverzeichnis

Normen

[1]	SN EN 206:2013+A2:2021, Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, SIA, 2022.
[2]	SIA 262/1, Betonbau – Ergänzende Festlegungen, SIA 2019.
[3]	Fascicule de documentation FD P 18 480 2022, Béton – Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle, AFNOR, Publikation in Vorbereitung.
[4]	SIA 2020, Merkblatt für Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen, SIA 2021.
[5]	VSS 40 561, Passive Sicherheit im Strassenraum – Fahrzeug-Rückhaltesysteme, VSS, 2021.
[6]	SIA 2042, Merkblatt Vorbeugung von Schäden durch die Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) bei Betonbauten, SIA 2012. Revidierte Fassung 2022.
[7]	SIA 262/1-C1:2021, Betonbau – Ergänzende Festlegungen – Korrigenda C1 zur Norm SIA 262/1:2019, gültig seit 01.04.2021, SIA, Zürich, SIA 2021.
[8]	Sustainable building with concrete – Part 1 - Practical guidance, CEN/TC 104, Doc. N 2199, 2021-12-16. Sustainable building with concrete – Part 2 – Further potential for optimization, CEN/TC 104, Doc. N 2200, 2021-12-16.
[9]	SIA 262, Betonbau, SIA, 2013.
[10]	SN EN 480-4, Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Prüfverfahren - Teil 4: Bestimmung der Wasserabsonderung des Betons (Bluten)
[11]	Prüfung von Frischbeton SN EN 12350 – Teil 11: Selbstverdichtender Beton - Bestimmung der Sedimentationsstabilität im Siebversuch, SIA 2010.
[12]	Merkblatt „Weiche Betone mit Konsistenz $\geq F 59$ “, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik ÖVBB, 2009.
[13]	Richtlinie «Selbstverdichtender Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb-Richtlinie), 2003 und 2012.
[14]	Merkblatt «Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton», Deutscher Beton- und Bautechnik Verein e.V.: Januar 2014.
[15]	SN EN 1097-3, Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt, SIA 1998.
[16]	SN EN 12620 +A1:2008, Gesteinskörnungen für Beton, VSS 1998/2008.
[17]	SIA 2049, Anforderung an neue Zemente, SIA 2004.
[18]	SN EN 1097-6, Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen –Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; VSS 2013.
[19]	SN EN 1504-2, Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 2: Oberflächenschutzsysteme für Beton, SIA 2014.
[20]	SN EN 1992-1-1, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, SIA 2004.
[21]	SN EN 12350: Prüfung von Frischbeton. Teile 1 bis 7. Details siehe [1]
[22]	SN EN 12390: Prüfung von Festbeton. Teil 3 und 7. Details siehe [1]
[23]	SN EN 12390 13: Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul), SIA 2022.
[24]	SN EN 12390 16: Prüfung von Festbeton - Teil 16: Bestimmung des Schwindens von Beton, SIA 2019.

Publikationen

[25]	Regelungen für das leistungsbezogene Entwurfsverfahren, Anhang ND zur SN EN 206:2013+A1:2016 (bzw. SN EN 206:2013+A2:2021) "Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität", Entwurf vom 03.08.2020. Download: https://ingenieurberatung.ch/#publikationen .
[26]	F. Hunkeler, Stampfbeton – Farbiger Beton – Aquarell in Beton, Betontag 2018, Veranstaltung Nr. 184301, Bau und Wissen, TFB AG, 31.01.2018
[27]	Cementbulletin, Betonbau und Energiekonsum, Jahrgang 44, Nr. 2. Febr. 1976.
[28]	R. Nestler, Schmutziger Baustoff, NZZ am Sonntag, 01.05.2022, Seite 47.

- [29] Ch. Begemann, M. Haist und L. Lohaus, Prüfverfahren zur Bewertung der Mischungsstabilität von Beton unter Rüttelwirkung, 60. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton 28. und 29. Oktober 2019, Hannover
- [30] S. Chanut et al., PERFDUB French research project on performance-based approach to assess concrete structures durability – Outcomes of durability indicators variability studies, fib Congress 2022, Oslo, 13.06. – 16.06.2022.
- [31] L. Linger et al., Outcomes and conclusion of PERFDUB French research project on performance-based approach for justifying concrete structures durability, fib Congress 2022, Oslo, 13.06. – 16.06.2022.
- [32] F. Cussigh, Persönliche Mitteilung, 03.06.2022.
- [33] Mitteilungen Nr. 178, 2021.
- [34] M. Haist et al., Climate Limit State (CLS) for building structures – a possible companion of ULS, SLS and durability limit states, fib Congress, Oslo, 13.-16.06.2022.
- [35] V. Mechtcherine, Steuerung und Prüfung der Pumpbarkeit von Beton, Betontag 2018, Veranstaltung Nr. 184301, Bau und Wissen/TFB AG, Wildegg, 2018.
- [36] Information zum Sliper sind auf der Webseite des Herstellers zu finden: http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Rheologie:Sliper_bestimmt_die_Pumpfaehigkeit_von_Beton.
- [37] F. Hunkeler, Weiche Betone – Rasche Prüfung der Blutneigung und des Entmischungsverhaltens, Betontag 2017, Veranstaltung Nr. 174301, Bau und Wissen/TFB AG, Wildegg, 2017.
- [38] NK 286 Ostumfahrung Bad Zurzach – Ergebnisse der Prüfungen des Betons für die Anprallwand, Hunkeler Ingenieurberatung, Bericht 20-105 vom 20.04.2022, Kanton Aargau, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Tiefbau, Aarau. Nicht publiziert.
- [39] F. Hunkeler, Bestimmung der Blutwassermenge von Frischbeton unter Druck, Anhang X, Prüfnorm zum Anhang ND, Entwurf vom 05.08.2020. Download: <https://ingenieurberatung.ch/#publikationen>.
- [40] F. Hunkeler, Bestimmung des Entmischungsmasses von Frischbeton, Anhang Y, Prüfnorm zum Anhang ND, Entwurf vom 05.08.2020. Download: <https://ingenieurberatung.ch/#publikationen>.
- [41] EFFC/DFI, "Guide to tremie concrete for deep foundations", European Federation of Foundation Contractors (EFFC) and Deep Foundation Institute (DFI), 2018.
- [42] A. Kenel, Überfestigkeiten – Auswirkung und Massnahmen, Fachveranstaltung Bau und Wissen Nr. 134151, Risse im Beton – Das Streitthema auf der Baustelle, TFB AG, Wildegg, 27.11.2012.
- [43] Kündig et al., Die Mineralischen Rohstoffe der Schweiz, Schweizerische Geotechnische Kommission, 1997.
- [44] F. Hunkeler, Überlegungen zum maximal zulässigen w/CaO-Wert gemäss Anhang ND, Ziffer ND.5.14, Bericht Nr. 21-103, FSKB Fachverband der Schweizerischen Kies- und Betonindustrie, 2021. Der Bericht kann auf Anfrage abgegeben werden.
- [45] F. Hunkeler, A. Spasojevic und M. Käser, A new concrete mix design – Pilot application for a road bridge parapet, fib Congress 2022, Oslo 12.06. - 16.06.2022.
- [46] S. Frey, Ringversuch Frischbetonkontrolle, Schlussbericht VAB, 2014.
- [47] Trauffer AG Bautenschutz, Projekt NB69 Pont de Tüschierz – Oberflächenschutz Brückenbrüstung mit farblicher Angleichung, Brienz, 23.06.2022. Der Bericht kann beim Unternehmer angefordert werden.
- [48] F. Hunkeler und S. von Greve-Dierfeld, Karbonatisierungswiderstand von Beton und Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung im karbonatisierten Beton, VSS-Bericht Nr. 696, April 2019.
- [49] F. Jacobs, F. Hunkeler, L. Carmine, A. Germann und Th. Hirschi, Schwinden von Beton, der bauingenieur, Nr. 3, 2008, S. 14-19.
- [50] Cementbulletin, Dauerhafte Bauwerke dank geringem Schwinden? (Teil 1), Jahrgang 69, Nr. 4, April 2001.
- [51] Betonpraxis – Der Weg zum dauerhaften Beton, Holcim (Schweiz) AG, 6. Auflage 2014.
- [52] VAB/ALA, Ringversuch Chloridwiderstand, 2010.
- [53] F. Hunkeler, H. Ungricht und Ch. Merz, Vergleichende Untersuchungen zum Chloridwiderstand von Betonen, VSS-Bericht Nr. 568, 2002.
- [54] R. Werner, F. Hunkeler, L. Mühlethaler und C. Ly, Evaluation des Frosttaumittelwiderstandes von Beton – Vergleich von vier Prüfverfahren, VSS-Bericht 1554, Februar 2016
- [55] F. Stoller und F. Hunkeler, Evaluation des Frosttaumittelwiderstands von Beton – Übertragbarkeit und praktische Relevanz, VSS-Bericht 1693, Oktober 2020
- [56] Umweltdokumentation nach ISO 14025 und EN 15804 für den Hochofenzement CEM III/B 42,5 L-LH/SR (na), Holcim (Deutschland) GmbH, 2019.

-
- [57] J. Anderson and A. Moncaster, Embodied carbon of concrete in buildings, Part 1: analysis of published EPD, Buildings and Cities, 1(1), 2020, p. 198–217.
-
- [58] Umweltdeklaration nach SN EN 15804 für die Zemente CEM I, CEM II/A (Zusammenfassung verschiedener Zementarten) und CEM II/B (Zusammenfassung verschiedener Zementarten), Download 09.10.2022.
-
- [59] M. Merk, mt materials ag, Wallisellen, persönliche Kommunikation, 09.10.2022.
-
- [60] Betonrechner – Hintergrundbericht – Version 2.0, Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle Nachhaltiges Bauen und Fachstelle Ingenieurwesen, Zürich. Link zum Rechner: <https://treeze.ch/de/rechner>.
-
- [61] Ch. Müller, Konzepte zur Herstellung von ressourceneffizienten Betonen am Beispiel Zement, Ressourceneffizienter Beton – Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis, 15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 14. März 2019
-
- [62] H.-W. Krauss, Entwurfs- und Bewertungskonzepte für CO₂-reduzierte Betone, Betontechnologie – aktuelle Themen und Erkenntnisse, Berufliche Weiterbildung FSKB, 13.04.2021 und 10.11.2021.
-
- [63] M. Haist, Nachhaltiger Beton – Methoden zur Bewertung des Nachhaltigkeitspotenzials von Baustoffen, Internationale Natureplus Fachkonferenz, Berlin, 06.06.2016.
-

Auflistung der Änderungen

Ausgabe	Version	Datum	Änderungen
2024	1.01	20.06.2024	Einfügen detaillierte Zusammenfassung in Deutsch und in Französisch
2023	1.00	01.02.2023	Inkrafttreten Ausgabe 2023

