



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton

Efficacité et contrôle des méthodes de cure du béton

Efficiency and testing of curing methods of concrete

**TFB AG Wildegg
Dr. Frank Jacobs
Dr. Fritz Hunkeler
Björn Mühlen**

**Forschungsprojekt AGB 2011/001 auf Antrag der
Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)**

November 2014

665

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

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

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

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee. Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton

Efficacité et contrôle des méthodes de cure du béton

Efficiency and testing of curing methods of concrete

**TFB AG Wildegg
Dr. Frank Jacobs
Dr. Fritz Hunkeler
Björn Mühlan**

**Forschungsprojekt AGB 2011/001 auf Antrag der
Arbeitsgruppe Brückenforschung**

November 2014

665

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Frank Jacobs

Mitglieder

Björn Mühlan

Fritz Hunkeler

Begleitkommission

Präsident

Dr. Martin Käser

Mitglieder

Prof. Dr. Albin Kenel

Dr. Walter Kaufmann

Dr. Dario Somaini

Antragsteller

Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	10
	Summary	13
1	Einleitung	17
1.1	Allgemeines	17
1.2	Ziele	17
2	Literatur	19
2.1	Hydratation	19
2.1.1	Einleitung	19
2.1.2	Einfluss der Temperatur	20
2.1.3	Einfluss der Luftfeuchtigkeit bzw. Trocknung	21
2.1.4	Einfluss des Bindemittels	24
2.2	Nachbehandlung gemäss SIA 262	24
2.3	Nachbehandlungsmittel	27
2.4	Schalungseinlagen	32
2.5	Wandeffekt	33
2.6	Betonaustrocknung	34
2.7	Prüftechnische Ermittlung der Nachbehandlungsdauer	36
2.8	Abschätzung der Verdunstungsrate	38
2.9	Fazit	40
3	Versuche	41
3.1	Untersuchungen	41
3.2	Ergebnisse Lagerung 1	43
3.2.1	Frischbetoneigenschaften und Lagerung	43
3.2.2	Festbetoneigenschaften	45
3.3	Ergebnisse Lagerung 2	50
3.3.1	Frischbetoneigenschaften und Lagerung	50
3.3.2	Festbetoneigenschaften	51
3.4	Fazit	53
4	Folgerungen und Empfehlungen	57
4.1	Folgerungen	57
4.2	Empfehlungen	57
4.2.1	Vorbemerkung	57
4.2.2	Fixe Dauer der Nachbehandlung	57
4.2.3	Prüftechnische Ermittlung der Dauer der Nachbehandlung	59
	Anhänge	62
	Abkürzungen	81
	Literaturverzeichnis	83
	Projektabschluss	85
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	88

Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten ist erkannt worden, dass bei Bauwerken aus Stahlbeton die häufigsten Schäden durch eine ungenügende Dauerhaftigkeit und nicht durch eine ungenügende Festigkeit des Betons verursacht wurden. Die Qualität und die Dicke des Überdeckungsbetons bestimmen in den meisten Fällen die Dauerhaftigkeit der Bauwerke gegenüber dem heute dominierenden Schadensmechanismus der Bewehrungskorrosion. In der SN EN 206-1 ist geregelt, wie das Betonwerk die Qualität des hergestellten Betons im Rahmen des Konformitätsnachweises nachzuweisen hat. Die Festbetoneigenschaften müssen an separat hergestellten und zumeist an bis zu 28 Tage in Wasser bei 20 °C gelagerten Prüfkörpern bestimmt werden.

Die Eigenschaften des (Überdeckungs-)Betons hängen jedoch nicht nur von der Betonzusammensetzung sondern auch vom Einbau, den Umgebungstemperaturen und von der Nachbehandlung auf der Baustelle ab. Dabei soll die auf die Baustelle gelieferte Betonqualität nicht wesentlich verschlechtert werden. In der Norm SIA 262:2013 „Betonbau“ sind erstmals detailliertere Vorgaben zur Nachbehandlung von Beton enthalten. Diese sind der EN 13670 entnommen; die Dauer der Nachbehandlung hängt von der Festigkeitsentwicklung (Reaktivität der Bindemittel) und von der Oberflächentemperatur des Betons ab. In der Norm SIA 262, Ziffer 6.4.6.2, wird unter der Nachbehandlung der Schutz von Beton durch Folgendes verstanden bis er eine genügende Festigkeit entwickelt hat: Auswaschen, vorzeitiges Austrocknen durch Sonnenbestrahlung oder Wind, starke Temperaturwechsel, schädliche Erschütterungen.

Im 2015 publizierten nationalen Anhang zur SN EN 13670 „Ausführung von Tragwerken aus Beton“ sind Hinweise zur Prüfung des auf die Baustelle gelieferten Betons enthalten. Diese Hinweise sind umfassend für Prüfkörper, die auf der Baustelle separat hergestellt werden. Für Prüfkörper (Bohrkerne), die aus dem Bauteil entnommen und im Alter von 28 Tagen geprüft werden, werden Richtwerte vorgeschlagen, mit denen beurteilt werden kann, ob die ausgeführte Betonqualität der bestellten entspricht. Da jedoch noch zu wenige Informationen dazu vorliegen, wie sehr sich die Betonqualität im Bauteil von der in separat hergestellten Prüfkörpern unterscheiden kann, muss gemäss Ziffer 8.3 der SN EN 13670 vorab in Eignungsversuchen die Richtigkeit der Richtwerte nachgewiesen werden. Die Richtwerte können und sollen bei Bedarf objektspezifisch angepasst werden.

Mit dem Forschungsprojekt sollten folgende Fragen zur Nachbehandlung, die nur den Schutz vor Austrocknung betreffen, beantwortet werden:

- a) Wird mit dem Konzept zur Nachbehandlung in der Norm SIA 262, welches nur auf der Festigkeitsentwicklung basiert, auch den Dauerhaftigkeitsanforderungen genügend Rechnung getragen? Ist dieses Konzept für die in der Schweiz verwendeten Betone geeignet?
- b) Wird mit der Vorgabe einer bestimmten prozentualen Festigkeit (Nachbehandlungs-kategorie) die gewünschte Wirkung auf die Dauerhaftigkeitseigenschaften erreicht oder führt dies zu unwirtschaftlich langen oder zu zu kurzen Nachbehandlungszeiten?
- c) Welche Nachbehandlungsmethoden und welche Nachbehandlungsdauer führen zu einer ausreichenden Dauerhaftigkeit des Überdeckungsbetons?

Es wurden Betone mit sehr unterschiedlich schnell reagierenden Zementen hergestellt:

- Beton A (CEM I) 42,5 N
- Beton B (CEM III/B) 32,5 R

Der Beton wurde mit einem w/z-Wert von 0.45 hergestellt. Die Prüfkörper (Würfel mit Kantenlänge von 150 mm und Prismen 120 x 120 x 360 mm³) wurden im Labor bei zwei konstanten Klimata (6 °C und 80 % r.F. und 20 °C, 70 % r.F.) gelagert und unterschiedlichen Nachbehandlungen unterzogen:

- unterschiedlich langes Abdecken mit Folie nach der Herstellung
- unterschiedlich lange Lagerung unter Wasser nach dem Ausschalen
- Auftrag eines Nachbehandlungsmittels
- Verwendung von Schalungseinlage; eine Schalungseinlage bewirkt die Entwässe-

rung und folglich eine Verdichtung des Randbetons.

An den Betonen wurden diverse Betoneigenschaften bestimmt: Druckfestigkeit, Karbonatisierungswiderstand, Chloridwiderstand, Frost-Tausalzwiderstand, Wasserleitfähigkeit, Luftpermeabilität.

Zusätzlich wurden Proben bei verschiedenen Temperaturen im Freien gelagert und unterschiedlich nachbehandelt, um zu überprüfen, inwieweit die Laborergebnisse auf die Praxis übertragen werden können. Bei dieser Lagerung wurde zusätzlich Beton A (CEM I) mit einem Luftporenbildner hergestellt, um den Einfluss der Nachbehandlung bei luftporhaltigem Beton zu untersuchen. Zwischen den Prüfkörpern, die bei konstantem Klima im Labor und bei variablem im Freien gelagert wurden, zeigten sich z.T. erhebliche Unterschiede bei den Einflüssen der Nachbehandlungsart und -dauer auf die Eigenschaften. Folgendes zeigte sich:

- Das Konzept zur Nachbehandlung von Beton gemäss SIA 262:2013 (SN EN 13670), das auf der Festigkeitsentwicklung des Betons basiert, ist nicht geeignet, wenn die gleichen Anforderungen an die Dauerhaftigkeit gestellt werden, wie sie in der SN EN 206-1 für den vom Betonwerk zu führenden Konformitätsnachweis verlangt werden.
- Die Vorgaben der SIA 262 in der Tabelle 22 (Nachbehandlungsdauer in Prozent der charakteristischen 28-Tage-Druckfestigkeit) sind dabei ungünstiger als jene in der Tabelle 23 (Nachbehandlungsdauer in Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung und der Temperatur in Tagen). Mit diesen Vorgaben kann es zu zu kurzen und zu zu langen Nachbehandlungsdauern kommen. Bei Temperaturen über etwa 15 °C sind die Nachbehandlungsdauern teilweise zu kurz und bei niedrigeren Temperaturen deutlich zu lange. Dies bedeutet auch, dass die Betoneigenschaften nicht zwangsläufig ungenügend sind, wenn die Nachbehandlungsdauer kürzer als die Vorgaben der Tabelle 22 oder 23 ist.
- Die Wirkung eines Nachbehandlungsmittels war nicht immer ausreichend. Die Schalungseinlage führte immer zu ausreichenden Eigenschaften. Es ist einschränkend anzumerken, dass mit der Schalungseinlage nur wenige Untersuchungen durchgeführt wurden.

Aufgrund der Ergebnisse werden folgende Möglichkeiten gesehen, um die Nachbehandlungsdauer festzulegen:

- Fixe Vorgaben in Tagen für die Nachbehandlungsdauer, in Abhängigkeit von der Betonsorte und unabhängig von der Festigkeitsentwicklung sowie der Lagerungstemperatur. In der Tabelle Z.1 sind dazu Vorschläge enthalten. Diese Angaben müssen mit weiteren Untersuchungen überprüft werden.
 - Bei jeder Betonsorte sind jeweils zwei Niveaus der Eigenschaften angegeben. Das Niveau mit der höheren Zahl (geringerer Widerstand) ist vom Betonwerk anzustreben, um den Konformitätsnachweis aufgrund von Streuungen bei der Betonherstellung und -prüfung zielsicher einzuhalten. D.h. dieses Niveau sollte von jedem Betonwerk, welches Beton nach SN EN 206-1 herstellt, eingehalten werden. Das Niveau mit der niedrigeren Zahl (z.B. 2.5 mm/√a) bedeutet den halben Grenzwert vom Konformitätsnachweis (z.B. 5.0 mm/√a).
 - Für Betone mit mittlerem oder hohem Frost-Tausalzwiderstand, die jedoch ohne Luftporenbildner hergestellt, ergäben sich aufgrund der Versuche sehr lange Nachbehandlungsdauern. Dies muss weiter untersucht werden, weshalb hierzu keine Angaben zur Nachbehandlungsdauer gemacht werden.
- Ermittlung der notwendigen Nachbehandlungsdauer mittels Prüfungen.

Die in der Tabelle Z.1 gemachten Vorschläge wurden mit dem Ziel festgelegt, annähernd die gleichen Dauerhaftigkeitseigenschaften zu erreichen, wie sie in der SN EN 206 1 für den Konformitätsnachweis verlangt werden.

Falls eine ungebrauchte Schalungseinlage verwendet würde, könnte gemäss den wenigen vorliegenden Ergebnissen für die Betonsorten C, D, E, F, G die Nachbehandlung im Alter von 1 Tag beendet werden.

Die prüftechnische Ermittlung der notwendigen Nachbehandlungsdauer berücksichtigt die gewünschten Betoneigenschaften. Bei den Prüfungen ist zu unterscheiden, ob diese zur Beurteilung der Nachbehandlung bereits während oder erst nach Abschluss der Nachbehandlung eingesetzt werden können. Falls die Prüfungen bereits während der Nachbehandlung durchgeführt werden, ist es von Vorteil, wenn diese zerstörungsfrei sind, da die Prüfungen ggf. mehrmals wiederholt werden müssen. Es wird vorgeschlagen, die Anforderungen an die Dauerhaftigkeitseigenschaften am Ende der Nachbehandlung nach denen der Tabelle 6 der SIA 262/1 für die Prüfungsart TT-2 auszurichten. Es werden verschiedene Prüfungen diskutiert.

Tabelle Z.1: Vorschlag für die Nachbehandlungsdauer von Tiefbaubeton für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren mit dem Ziel annähernd gleiche Dauerhaftigkeitseigenschaften zu erhalten, wie beim vom Betonwerk durchzuführenden Konformitätsnachweis verlangt werden. Die Angaben gelten für eine Oberflächentemperatur des Betons zwischen 5 und 25 °C.

Mindestnachbehandlungsdauer [Tage] ^{1), 2)}	
Betonsorte C, XC4(CH), mit einem Karbonatisierungswiderstand von <ul style="list-style-type: none"> • $\leq 2.5 \text{ mm}/\sqrt{a}$ • $\leq 4.0 \text{ mm}/\sqrt{a}$ 	3
	7
Betonsorte D, XC4(CH), XD1(CH), XF2(CH), mit mittlerem Frosttausalz-widerstand, erreicht durch Luftporenbildner, und einem Karbonatisierungswiderstand von <ul style="list-style-type: none"> • $\leq 2.5 \text{ mm}/\sqrt{a}$ • $\leq 4.0 \text{ mm}/\sqrt{a}$ 	3
	7
Betonsorte E, XC4(CH), XD1(CH), XF4(CH), mit hohem Frosttausalz-widerstand, erreicht durch Luftporenbildner, und einem Karbonatisierungswiderstand von <ul style="list-style-type: none"> • $\leq 2.5 \text{ mm}/\sqrt{a}$ • $\leq 4.0 \text{ mm}/\sqrt{a}$ 	3
	7
Betonsorte F, G XC4(CH), XD3(CH), XF2(CH) bzw. XF4(CH), mit hohem Frosttausalz-widerstand, erreicht durch Luftporenbildner, und einem Chloridwiderstand von <ul style="list-style-type: none"> • $\leq 5.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ • $\leq 8.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 	5
	7
¹⁾ Bei mehr als 5 h Verarbeitbarkeitszeit (Zeitraum, während dessen der Beton mit den vorgesehenen Geräten auf der Baustelle verdichtbar ist) ist die Nachbehandlungsdauer angemessen zu verlängern	
²⁾ Bei Temperaturen unter 5 °C ist die Nachbehandlungsdauer um die Zeitspanne zu verlängern, während der die Temperatur unter 5 °C lag	

Résumé

Ces dernières décennies, il a été reconnu que la cause des dommages les plus fréquents sur les ouvrages en béton armé est une durabilité insuffisante et non une résistance mécanique insuffisante du béton. La qualité et l'épaisseur du béton d'enrobage déterminent dans la plupart des cas la durabilité des ouvrages par rapport au principal mécanisme de dégradation d'aujourd'hui qui est la corrosion de l'armature. La SN EN 206-1 règle comment une centrale à béton doit démontrer la conformité du béton produit dans le cadre de son contrôle de production. Les propriétés du béton durci doivent être déterminées sur des éprouvettes confectionnées à part généralement conservées jusqu'à 28 jours dans de l'eau à 20 °C.

Cependant, les propriétés du béton (d'enrobage) dépendent non seulement de la composition du béton, mais aussi de la mise en place, des températures ambiantes et des conditions de cure sur le chantier. Lors de la mise en œuvre d'un béton, sa qualité ne doit pas se dégrader substantiellement. La norme SIA 262:2013 „Construction en béton“ contient pour la première fois des prescriptions détaillées pour la cure du béton. Celles-ci ressortent de la norme EN 13670; la durée de la cure dépend de l'évolution de la résistance (réactivité des liants) et de la température de surface du béton. Dans la norme SIA 262, chiffre 6.4.6.2, la cure est comprise comme étant la protection du béton des sollicitations suivantes jusqu'à ce que le béton atteigne une résistance suffisante: délavage, dessiccation prématurée due au rayonnement solaire ou au vent, fortes variations de température ou vibrations nuisibles..

L'annexe nationale de la norme SN EN 13670 « Exécution des structures en béton », publiée en 2015, contient des précisions concernant le contrôle du béton livré sur chantier. Ces précisions sont exhaustives pour les éprouvettes confectionnées séparément sur le chantier. Pour les éprouvettes (carottes) prélevées sur la structure et testées à l'âge de 28 jours, des valeurs indicatives sont proposées pour évaluer si la qualité du béton exécuté correspond à la qualité exigée. Cependant, vu qu'il y a encore trop peu d'informations concernant l'ampleur de la différence entre la qualité du béton dans la structure et celle du béton des éprouvettes confectionnées séparément, la pertinence des valeurs indicatives doit être vérifiée préalablement selon chiffre 8.3 de la SN EN 13670 au moyen d'essais de convenance. Celles-ci peuvent et devraient être adaptées selon le projet si nécessaire.

Ce projet de recherche tient à répondre aux questions suivantes concernant la cure qui sert uniquement à la protection contre la dessiccation:

- a) Est-ce que le concept de cure de la norme SIA 262, qui ne s'appuie que sur l'évolution de la résistance, tient assez compte des exigences de durabilité? Est-ce que ce concept peut être appliqué aux bétons utilisés en Suisse?
- b) Est-ce qu'avec la prescription d'un certain pourcentage de résistance (classe de cure), l'effet désiré sur les propriétés de durabilité est atteint ou est-ce que ça mène à des durées de cure trop courte ou trop longue et pas économique?
- c) Quelles méthodes et durées de cure permettent d'atteindre une durabilité suffisante du béton?

Des bétons avec deux types de ciment de réactivité très différente ont été évalués :

- Béton A avec CEM I 42,5 N
- Béton B avec CEM III/B 32,5 R

Les bétons ont été produits avec un rapport E/C de 0.45. Les éprouvettes (cubes d'une longueur d'arête de 150 mm et prismes de 120 x 120 x 360 mm³) ont été conservées au laboratoire à deux conditions climatiques distinctes (6 °C et 80 % h.r. et 20 °C, 70 % h.r.) et soumises à différentes méthodes de cure :

- Durées variables de couverture avec une bâche plastique après la mise en place
- Durées variables de conservation sous l'eau après le décoffrage
- Application d'un produit de cure
- Utilisation d'une peau de coffrage de type natte drainante; celle-ci provoque un drai-

nage et donc une densification du béton de surface

Les propriétés suivantes ont été déterminées pour ces bétons: Résistance à la compression, résistance à la carbonatation, résistance aux chlorures, résistance au gel en présence de sels de déverglaçage, perméabilité à l'eau, perméabilité à l'air.

En outre, les éprouvettes ont été stockées à l'extérieur à différentes températures et traitées par différentes méthodes de cure, afin de contrôler dans quelle mesure les résultats obtenus en laboratoire sont transposables sur le terrain. Le béton A (CEM I) a été produit avec un entraîneur d'air pour ce stockage à l'extérieur afin d'évaluer l'influence de la cure pour des bétons à air entraîné. Quelques différences significatives dans l'influence du mode et de la durée de cure sur les propriétés du béton ont été mises en évidence entre les éprouvettes stockées au laboratoire dans des conditions climatiques stables et celles stockées à l'extérieur dans des conditions climatiques variables. Vu d'ensemble, les résultats suivants ont été obtenus:

- Le concept de cure selon SIA 262:2013 (SN EN 13670), qui s'appuie sur l'évolution de la résistance du béton, ne convient pas si les exigences de durabilité sur ouvrage sont identiques à celles demandées par la SN EN 206-1 pour l'évaluation de la conformité dans le cadre du contrôle de production interne.
- Les prescriptions du tableau 22 de la SIA 262 (durée de cure pour atteindre un certain pourcentage de la résistance caractéristique à 28 jours) ont un effet plus défavorable que celles du tableau 23 (durée de cure en fonction de la réactivité du béton et des conditions de température). Elles peuvent mener à des durées de cure trop courtes ou trop longues. Lors de températures au-dessus d'environ 15°C, les durées de cure sont parfois trop courtes, et lors de températures plus basses, elles sont bien trop longues. Ceci signifie aussi que les propriétés du béton ne sont pas forcément insuffisantes si la durée de cure est moins longue que les prescriptions des tableaux 22 ou 23.
- L'effet du produit de cure n'était pas toujours suffisant. L'utilisation d'une natte de drainage a toujours mené à des propriétés suffisantes, mais il faut aussi noter que seulement peu d'essais ont été réalisés avec cette technique.

Grace aux résultats, les possibilités suivantes ont été identifiées pour définir la durée de cure:

- Indication de la durée de cure en jours en fonction de la sorte de béton mais indépendamment de l'évolution de la résistance et des conditions de température. Le tableau Z1 contient des propositions à ce sujet. Ces indications sont à vérifier avec d'autres études.
 - Pour chaque sorte de béton, deux niveaux de performance sont donnés. En raison des fluctuations de la production et du contrôle du béton, la centrale à béton doit viser le niveau inférieur correspondant à la valeur supérieure (résistance plus faible) pour remplir avec suffisamment de marge les critères de conformité. Chaque centrale à béton qui produit du béton selon la SN EN 206-1 devrait donc pouvoir respecter ce niveau. La valeur inférieure (niveau supérieur) correspond à la moitié de la valeur limite selon tab. NA.9 de la SN EN 206-1.
 - Les essais ont montré que les bétons présentant une résistance au gel en présence de sels de déverglaçage moyenne ou élevée, produits sans entraîneur d'air, auraient besoin de très longues durées de cure. Ce premier constat nécessite davantage d'investigations, et c'est pour cela que les conclusions en matière de durée de cure de ce projet ne peuvent être appliquées pour ces bétons.
- Détermination de la durée de cure nécessaire moyennant des essais.

Les propositions du tableau Z1 ont été créés avec le but d'atteindre à peu près les mêmes propriétés de durabilité que celles requises dans la SN EN 206-1 pour la preuve de conformité.

En cas d'utilisation d'une natte de drainage neuve, les quelques résultats disponibles in-

diquent que la cure peut être arrêté à l'âge de 1 jour pour les sortes de béton C, D, E, F et G.

La détermination par essai de la durée de cure nécessaire tient compte des propriétés de béton demandées. En cas d'essais pour évaluer la cure, il faut distinguer si ceux-ci peuvent être réalisés déjà pendant ou seulement après la cure. Dans le cas des essais qui peuvent être réalisés déjà pendant la cure, il est avantageux d'utiliser des essais non-destructifs afin de pouvoir les répéter plusieurs fois le cas échéant. Il est conseillé de caler les exigences relatives aux propriétés de durabilité en fin de la période de cure sur celles du tableau 6 de la SIA 262/1 pour le type d'essai TT-2. Plusieurs méthodes d'essai sont discutées.

Tableau Z1: Proposition des durées de cure pour du béton de génie civil avec une durée de service prévue de 50 ans avec le but d'atteindre approximativement les mêmes propriétés de durabilité que celles requises dans le cadre de la preuve de conformité à la centrale à béton. Les indications sont valables pour une température de surface du béton entre 5° et 25°C.

Durée minimale de cure [jours] ^{1), 2)}	
Sorte de béton C, XC4(CH), avec une résistance à la carbonatation de <ul style="list-style-type: none"> • $\leq 2.5 \text{ mm}/\sqrt{a}$ • $\leq 4.0 \text{ mm}/\sqrt{a}$ 	3 7
Sorte de béton D, XC4(CH), XD1(CH), XF2(CH), avec une résistance moyenne au gel en présence de sels de déverglaçage, avec entraîneur d'air, et avec une résistance à la carbonatation de <ul style="list-style-type: none"> • $\leq 2.5 \text{ mm}/\sqrt{a}$ • $\leq 4.0 \text{ mm}/\sqrt{a}$ 	3 7
Sorte de béton E, XC4(CH), XD1(CH), XF4(CH), avec une résistance élevée au gel en présence de sels de déverglaçage, avec entraîneur d'air, et avec une résistance à la carbonatation de <ul style="list-style-type: none"> • $\leq 2.5 \text{ mm}/\sqrt{a}$ • $\leq 4.0 \text{ mm}/\sqrt{a}$ 	3 7
Sorte de béton F, G XC4(CH), XD3(CH), XF2(CH) resp. XF4(CH), avec une résistance élevée au gel en présence de sels de déverglaçage, avec entraîneur d'air, et avec une résistance aux chlorures de <ul style="list-style-type: none"> • $\leq 5.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ • $\leq 8.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 	5 7
¹⁾ Pour une durée d'ouvrabilité (période de temps durant laquelle le béton peut être compacté avec les outils prévus sur le chantier) de plus de 5 h, la durée de cure doit être prolongée de façon adéquate ²⁾ Pour des températures < 5°C, la durée de la cure doit être prolongée du temps durant lequel la température est restée < 5°C	

Summary

In the last decades it has been observed that most structures made out of reinforced concrete were damaged due to insufficient durability and not due to insufficient strength. In most cases, the quality and thickness of the cover concrete (covercrete) determine the resistance of concrete structures against rebar corrosion, which is the dominating deterioration process today. The standard SN EN 206-1 contains rules for the conformity control of concrete for concrete plants. The properties of hardened concrete must be determined on separately manufactured specimens, which in most cases have to be stored under water up to an age of 28 days.

The properties of the covercrete depend not only on the concrete composition but also on the placement, the environmental conditions and the curing on-site. The quality of the concrete delivered to site should not be significantly worsened due to bad workmanship on-site. For the first time detailed guidelines for the curing of concrete are given in the standard SIA 262 :2013 « concrete structures ». These are based on the standard EN 13670. The length of the curing period depends on the development of strength (reactivity of the cement, mineral addition) and the surface temperature of the concrete. In clause 6.4.6.2 of the standard SIA 262 :2013 curing is defined as protection against washout, early drying due to solar radiation or wind, large temperature changes and harmful vibrations.

In 2015 the national annex of the standard SN EN 13670 „execution of concrete structures“ will be published. It contains references to the testing of concrete delivered on-site. The references are comprehensive for specimens which are separately manufactured on-site. For specimens (cores) taken from the structure and tested at an age of 28 days limiting values are proposed to evaluate if the concrete quality in the structure conforms to the concrete quality as ordered. So far, not enough information is available about the difference in the concrete quality of separately manufactured specimens and the structure made thereof. According to clause 8.3 of SN EN 13670 it is therefore necessary to carry out preliminary tests to evaluate the applicability of the proposed limiting values. Based on these tests, the limiting values can and should be adjusted if necessary.

The research project should answer the following questions which are related to one part of the curing: the protection against drying:

- Is the concept for curing according to SIA 262, which is based solely on the strength development also applicable for durability purposes?
- Is the specification of a certain strength (curing class) sufficient to achieve the required durability properties or does it lead to uneconomically long curing periods, or curing periods that are too short?
- Which curing methods and periods are necessary for a sufficient durability of the covercrete ?
-

Concrete having a w/c-ratio of 0.45 was manufactured with cements of different reactivity:

- Concrete A (CEM I 42,5 N)
- Concrete B (CEM III/B 32,5 R)

The specimens (cubes with an edge length of 150 mm or prisms 120 x 120 x 360 mm³) were stored in the laboratory at constant climates (6 °C, 80 % r.F. and 20 °C, 70 % r.F.) under various curing regimes:

- Covered with plastic for different periods of time
- Stored in water for different periods of time
- Application of a curing compound
- Use of controlled permeable formwork to de-water and further compact the covercrete

The following concrete properties were determined: compressive strength, resistance

against carbonation, resistance against chloride ingress, resistance against freeze-thaw and de-icing salt attack, water conductivity, air permeability.

Additionally, specimens were stored outside at various temperatures under various curing regimes. The aim was to check whether the results from the laboratory testing can be transferred to outdoor conditions. In this part concrete containing an air entraining agent was additionally manufactured. The following can be stated :

- Significant differences in the influence of the curing regime on the properties were observed between the specimens stored outside and in the laboratory.
- The concept for the curing of concrete according to SIA 262 :2013 (SN EN 13670), which is based on the strength development, is not suitable for the durability properties, if the target values are those of the conformity control of the concrete plant given in SN EN 206-1.
- The specifications in table 22 of SIA 262 (curing period as function of the percentage of the characteristic 28 days strength) are less appropriate than those in table 23 (curing period in days as function of the strength development and the surface temperature of the concrete). These specifications can result in curing periods that are too short or too long.. At storage temperatures above 15 °C the curing periods are sometimes too short, and for lower storage temperatures too long. This also implies that the concrete properties must not necessarily be insufficient, if the curing period was shorter than those specified in table 22 or 23.
- The efficiency of the curing compound was not always sufficient. The use of controlled permeability formwork always resulted in sufficient concrete properties. It must be mentioned however, that only a few investigations were performed with controlled permeability formwork.

Based on the results the following possibilities are proposed to determine the curing period:

- Specification of the curing period in days, depending on the concrete type and independently of the strength development and storage temperature. This is proposed in table Z1. This must be checked with further investigations.
 - For each type of concrete two levels of the properties are given. The concrete plant must target at the level with the higher number (lower resistance) in order to comply with the requirements of the conformity control which takes into account the scatter in the concrete composition and testing. This means that this level should be reached by every concrete plant, which manufactures concrete according to SN EN 206-1. The level with the lower number (e.g. 2.5 mm/√a) indicates half of the limiting value of the conformity control (e.g. 5.0 mm/√a).
 - Concrete with a medium or high freeze thaw and de-icing salt resistance, but manufactured without an air entraining agent, requires very long curing periods. This must be further investigated. Therefore no specifications for curing periods are stated.
- Determination of the necessary curing period by testing.

The aim of the curing periods proposed in table Z1 is to reach the same durability properties, which are required for the conformity control in the SN EN 206-1 for the concrete plants.

If a new controlled permeable formwork is used, the curing period can be stopped for concrete of type C, D, E, F, G according to SN EN 206-1 at an age of 1 day according to the few investigations made.

The determination of the curing period by testing takes the required concrete properties into account. It must be distinguished between tests carried out during the curing period and after the end of the curing period. If the tests can be used during the curing period, it is advantageous, if they are non-destructive because then they may be repeated several times. It is proposed to set the requirements at the end of the curing period similar to the limiting values given in table 6 of the standard SIA 262/1 for testing or type TT-2. Sever-

als test are discussed.

Table Z1: Proposal for curing periods of engineered concrete for a service life of 50 years with the aim of attaining the durability properties which are demanded by the concrete plant for the conformity control. The durability properties are determined according to SIA 262/1. The numbers are valid for concrete surface temperatures between 5 and 25 °C.

Minimum curing period [days] ^{1), 2)}	
Concrete of type C, XC4(CH), having a carbonation resistance of <ul style="list-style-type: none"> • $\leq 2.5 \text{ mm}/\sqrt{a}$ • $\leq 4.0 \text{ mm}/\sqrt{a}$ 	3 7
Concrete of type D, XC4(CH), XD1(CH), XF2(CH), with a medium freeze thaw and de-icing salt resistance due to usage of an air entraining agent and a carbonation resistance of <ul style="list-style-type: none"> • $\leq 2.5 \text{ mm}/\sqrt{a}$ • $\leq 4.0 \text{ mm}/\sqrt{a}$ 	3 7
Concrete of type E, XC4(CH), XD1(CH), XF4(CH), with a medium freeze thaw and de-icing salt resistance due to usage of an air entraining agent and a carbonation resistance of <ul style="list-style-type: none"> • $\leq 2.5 \text{ mm}/\sqrt{a}$ • $\leq 4.0 \text{ mm}/\sqrt{a}$ 	3 7
Concrete of type F, G XC4(CH), XD3(CH), XF2(CH) resp. XF4(CH), with a high freeze thaw and de-icing salt resistance due to usage of an air entraining agent and a chloride resistance of <ul style="list-style-type: none"> • $\leq 5.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ • $\leq 8.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 	5 7
¹⁾ If the set exceeds 5 hours (and the concrete can be compacted with the foreseen compaction method), the duration should be extended for an appropriate period. ²⁾ For temperatures below 5 °C, the duration should be extended for a period equal to the time below 5 °C	

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

In den letzten Jahrzehnten ist erkannt worden, dass bei Bauwerken aus Stahlbeton die häufigsten Schäden durch eine ungenügende Dauerhaftigkeit und nicht durch eine ungenügende Festigkeit verursacht wurden. Die Qualität und die Dicke des Überdeckungsbetons bestimmen in den meisten Fällen die Dauerhaftigkeit der Bauwerke gegenüber dem heute dominierenden Schadensmechanismus der Bewehrungskorrosion. In der SN EN 206-1 ist geregelt, wie das Betonwerk die Qualität des hergestellten Betons im Rahmen des Konformitätsnachweises nachzuweisen hat. Die Festbetoneigenschaften müssen an separat hergestellten und zumeist an bis zu 28 Tage in Wasser bei 20 °C gelagerten Prüfkörpern bestimmt werden.

Die Eigenschaften des (Überdeckungs-)Betons hängen jedoch nicht nur von der Betonzusammensetzung sondern auch vom Einbau, den Umgebungstemperaturen und von der Nachbehandlung auf der Baustelle ab. Die auf die Baustelle gelieferte Betonqualität darf durch den Einbau und die praktizierte Nachbehandlung nicht wesentlich verschlechtert werden. In der Norm SIA 262:2013 „Betonbau“ sind erstmals detailliertere Vorgaben an die Nachbehandlungsdauer von Beton in Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung des Betons und der Oberflächentemperatur des Betons enthalten. Diese Vorgaben orientieren sich an der Festigkeitsentwicklung (Reaktivität der Bindemittel) und teilweise den Umgebungsbedingungen. In der Norm SIA 262 wird in Ziffer 6.4.6.2 unter Nachbehandlung verstanden, dass der Beton unverzüglich und solange gegen Auswaschen, vorzeitiges Austrocknen durch Sonnenbestrahlung oder Wind, starke Temperaturwechsel und schädliche Erschütterungen zu schützen ist, bis er eine genügende Festigkeit entwickelt hat.

Im voraussichtlich 2015 publizierten nationalen Anhang zur SN EN 13670 „Ausführung von Tragwerken aus Beton“ sind Hinweise zur Prüfung des auf die Baustelle gelieferten Betons enthalten. Diese Hinweise sind umfassend für Prüfkörper, die auf der Baustelle separat hergestellt werden. Für Prüfkörper (Bohrkerne), die aus dem Bauteil entnommen und im Alter von 28 Tagen geprüft werden, werden Richtwerte vorgeschlagen, mit denen beurteilt werden kann, ob die ausgeführte Betonqualität der bestellten entspricht. Da jedoch noch zu wenige Informationen dazu vorliegen, wie sehr sich die Betonqualität im Bauteil von der in separat hergestellten Prüfkörpern unterscheiden kann, muss gemäss Ziffer 8.3 der SN EN 13670 vorab in Eignungsversuchen die Richtigkeit der Richtwerte nachgewiesen werden. Die Richtwerte können folglich und sollen bei Bedarf auch objektspezifisch angepasst werden.

1.2 Ziele

Mit dem Forschungsprojekt sollten vor allem folgende Fragen beantwortet werden:

- d) Wird mit dem Konzept zur Nachbehandlung in der Norm SIA 262, welches nur auf der Festigkeitsentwicklung basiert, auch den Dauerhaftigkeitsanforderungen genügend Rechnung getragen? Ist dieses Konzept für die in der Schweiz verwendeten Betone geeignet?
- e) Wird mit der Vorgabe einer bestimmten prozentualen Festigkeit (Nachbehandlungsklasse) die gewünschte Wirkung auf die Dauerhaftigkeitseigenschaften erreicht oder führt dies zu unwirtschaftlich langen oder zu zu kurzen Nachbehandlungszeiten?
- f) Welche Nachbehandlungsmethoden und welche Nachbehandlungsdauer führen zu einer ausreichenden Dauerhaftigkeit des Überdeckungsbetons?

Im Rahmen dieser Arbeit wurden bei der Nachbehandlung die Aspekte Austrocknung und Lagerungstemperatur auf die Betoneigenschaften betrachtet; d.h. andere Aspekte wie z.B. Einflüsse von Erschütterungen auf jungen Beton oder Minimierung des Einflusses von Rissen auf die Dauerhaftigkeit wurden nicht untersucht.

2 Literatur

2.1 Hydratation

2.1.1 Einleitung

Zement und eventuell vorhandene Zusatzstoffe reagieren mit Wasser und bilden Hydratationsprodukte (Abbildung 1, links); dadurch steift der Frischbeton an, erstarrt und erhärtet. Aus den Zementklinkermineralien Alit (C_3S), Belit (C_2S), Aluminat (C_3A) und Ferrit (C_4AF) entstehen infolge der Hydratation Calciumsilicathydrat (CSH), Calciumaluminathydrat (CAH), Calciumhydroxid und Gelporen. Umso mehr Hydratationsprodukte gebildet werden, d.h. umso mehr Zement und ggf. Zusatzstoffe reagieren, desto dichter wird der Beton. Der Grad der Reaktion wird mit dem Hydratationsgrad angegeben: 0 (kein Zementpartikel ist hydratisiert) bis 1 (alle Zementpartikel sind vollständig hydratisiert). Umso höher der Hydratationsgrad ist, desto mehr Gelporen (Durchmesser ca. 0.5 bis 3 nm) und umso weniger Kapillarporen (Durchmesser ca. 10 nm bis 5 μm) sind vorhanden. Der Gehalt an Luft- oder Verdichtungsporen (Durchmesser ca. 5 μm bis 5 mm) ändert sich infolge der Hydratation nicht.

Da die Luftporen (z.T. unterteilt in Verdichtungsporen und künstliche eingeführte Luftporen) nicht untereinander sondern durch die Kapillarporen verbunden sind, bestimmen im Wesentlichen die Grösse und die Anzahl an Kapillarporen die Durchlässigkeit bzw. Dichtigkeit des Betons gegenüber eindringenden Flüssigkeiten wie z.B. tausalzhaltigem Wasser oder Gasen wie z.B. Kohlendioxid. Beton enthält sehr viel mehr Gel- als Kapillarporen. Da die Gelporen sehr viel kleiner als die Kapillarporen sind, beeinflussen diese jedoch die Durchlässigkeit von Beton sehr viel geringer als die Kapillarporen.

Das Volumen der drei Porenarten (Gel-, Kapillar-, Luftporen) hängt vom w/z-Wert und Hydratationsgrad ab (Abbildung 1, rechts). Unterhalb eines w/z-Wertes von etwa 0.40 (Wert variiert je nach Nachbehandlung geringfügig) und einem Hydratationsgrad von 1 sind bei einem Beton aus Portlandzement keine Kapillarporen vorhanden. Umso weiter der w/z-Wert oberhalb von 0.4 liegt, desto mehr Kapillarporen sind vorhanden. In der Praxis wird zumeist mehr Wasser verwendet, als es einem w/z-Wert von 0.40 entspricht, da dadurch die Verarbeitbarkeit des Frischbetons erleichtert wird und der Beton immer noch die geforderten Eigenschaften aufweist.

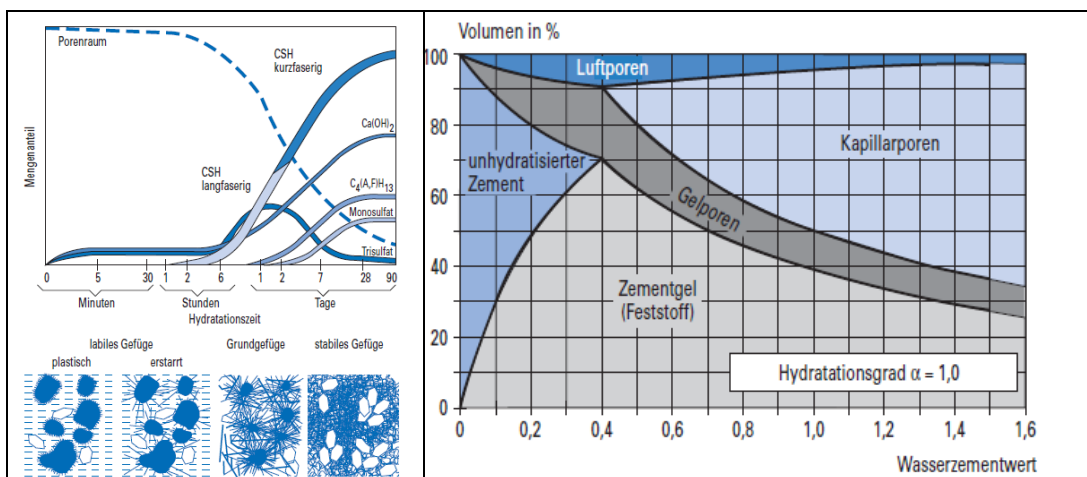


Abbildung 1: Links: Schematische Darstellung der Hydratphasenbildung und der Gefügeentwicklung; rechts: Porositäten in Abhängigkeit vom w/z-Wert; aus [21].

In Abbildung 2 ist das Kapillarporenvolumen in Abhängigkeit vom w/z-Wert und Hydratationsgrad für einen Zementstein aus Portlandzement dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass bei diesem Zementstein ein Kapillarporenvolumen von z.B. 20 % einer Wasserdurchlässigkeit von etwa 5×10^{-14} m/s entspricht. Dieses Kapillarporenvolumen wird z.B. durch einen w/z-Wert von 0.30 und einem Hydratationsgrad von knapp 50 % (0.5) oder

einen Zementstein mit einem w/z-Wert von 0.50 und einem Hydratationsgrad von etwa 90 % (0.9) erreicht. Bei Lagerung bei 20 °C erreicht Beton mit heutigem Portlandzement nach 28 Tagen einen Hydratationsgrad von etwa 80 % und Beton mit Hochofenzement ungefähr einen von 70 % [38]. Mit den früher verwendeten, weniger fein gemahlene Portlandzementen nahm der Hydratationsgrad langsamer zu (Abbildung 4).

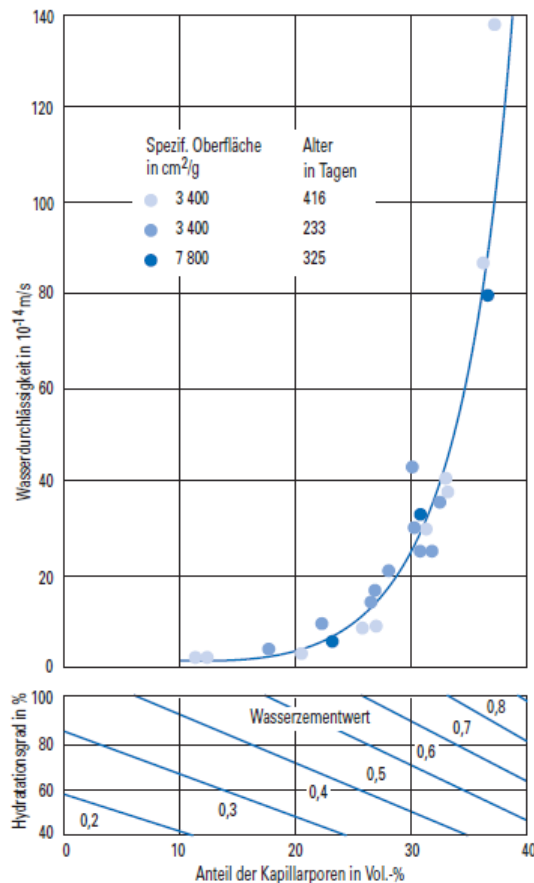


Abbildung 2: Wasserdurchlässigkeit von Zementstein aus Portlandzement in Abhängigkeit von der Kapillarporosität, dem Hydratationsgrad und dem w/z-Wert, aus [21].

Bei einer Trocknungstemperatur von 50 °C werden die Kapillarporen geleert und auch ein Teil der Hydratationsprodukte entwässert. Die sogenannten Gelporen wurden von Powers [3] als verdampfbares Wasservolumen zwischen einer Trocknung bei 50 und 105 °C definiert und nur als Zwischenschichtwasser vom CSH angesehen. In späteren Untersuchungen zeigte sich, dass bei dieser Trocknung auch andere Hydratationsprodukte (CAH) entwässert werden [3]. Bei einer Trocknung bei 1000 °C wird das im CSH und im CH chemisch gebundene Wasser ausgetrieben; zudem zersetzen sich Karbonate aus der Gesteinskörnung, dem Zement und der Betonkarbonatisierung. Durch eine Trocknung bei 50 °C, 105 °C und 1000 °C mit jeweils anschließender Wägung kann abgeschätzt werden, inwieweit der Zement hydratisierte.

2.1.2 Einfluss der Temperatur

Im Bereich von etwa 5 bis 50 °C wurde bei der Hydratation von Zement mit steigender Temperatur beobachtet [4, 5], dass

- die Hydratphasen inhomogener verteilt sind
- die Porosität zunimmt
- das CSH dichter wird
- die Morphologie von Ettringit kubischer wird.

Oberhalb von Temperaturen von etwa 50 °C finden zudem Umwandlungen von Mineralen statt. Monosulfat und Kalzit werden zulasten von Ettringit (Trisulfat) und Monocarbonat gebildet.

Mit steigender Lagerungstemperatur während der Hydratation zeigte sich:

- bei der Wasserpermeabilität von Zementstein
 - 20 → 60 °C: Zunahme um mehr als das 10fache [8]
 - 20 – 60 °C: keine deutliche Änderung (jedoch grosse Streuung) der Wasserpermeabilität [10]
 - 20 – 60 °C: exponentielle Zunahme [11]:
 - 10 → 20 °C: Zunahme < 10 %,
 - 20 → 40 °C: Zunahme ca. Faktor 2
 - 40 → 60 °C: Zunahme ca. Faktor 50
- bei der Chloriddiffusion von Beton [9]:
 - 5 - 20 °C ähnlich
 - 20 → 50 °C: Zunahme um Faktor 2
- bei E-Modul von Zementstein im Alter von mehreren Monaten [11]:
 - 10 → 20 °C: Abnahme um ca. 20 %
 - 20 → 60 °C: Abnahme um ca. 30 %;
- bei der Druckfestigkeit von Beton im Alter von 91 Tagen [12]:
 - 5 - 20 °C: Druckfestigkeit unverändert
 - 20 → 40 °C: Druckfestigkeitsabnahme um 10 – 20 %
- bei der Festigkeit von Mörtel mit CEM II/A-LL im Alter von 91 Tagen je nach Zementart (CEM I, CEM II/A-LL) und Zementwerk [12]:
 - 5 → 40°C: Druckfestigkeitsabnahme um 0 – 20 %
 - 5 → 40°C: Biegezugfestigkeitsabnahme um 10 – 20 %

Bei der Erhärtung von Zementstein, Mörtel und Beton bei Temperaturen zwischen 5 und 60 °C werden somit zumeist mit steigender Temperatur die Durchlässigkeit erhöht und die Festigkeit und der E-Modul erniedrigt.

2.1.3 Einfluss der Luftfeuchtigkeit bzw. Trocknung

Adam [7] fasste Ergebnisse von [6] und [14] zum Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Zementhydratation zusammen (Abbildung 3). Der Masseverlust durch Trocknung bei 105 °C wird vereinfacht als physikalisch gebundenes Wasser (an der Oberfläche angelagertes und in Poren enthaltenes Wasser) definiert (auch wenn genau genommen bereits ein Teil des chemisch gebundenen Wassers freigesetzt wird); die Menge des chemisch gebundenen Wassers (Kristall- und Zwischenschichtwasser der Hydratationsprodukte des Zementes) wurde als Massendifferenz zwischen der Erhitzung auf 1000 °C bestimmt (definiert). Bei den Versuchen zeigte sich Folgendes: Wird die Luftfeuchtigkeit von 100 % auf 90 % reduziert, nimmt die Hydratation des Zementes (die Menge des chemisch gebundenen Wassers) deutlich ab. Unterhalb einer Luftfeuchtigkeit von etwa 80 % verlangsamt sich die Hydratation sehr stark; es wird nur noch weniger als 20 % des maximal möglichen Wassers chemisch gebunden.

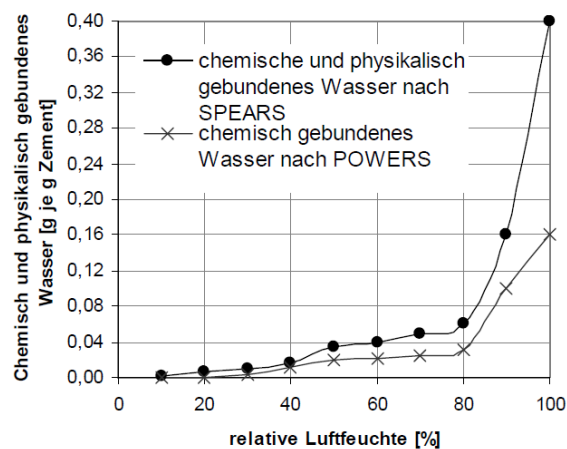


Abbildung 3: Wassergehalt von Proben aus Portlandzement, die verschiedenen relativen Luftfeuchten ausgesetzt wurden, nach Powers [6] und Spears [14], aus [7].

Bentz et al. [22] untersuchten den Einfluss der Austrocknung auf die Hydratation an Ze-

mentleimen aus Portlandzement mit einem w/z-Wert von 0.30 und 0.40. Nach der Herstellung wurden die Leime bei 20 °C und 100 % r.F. bzw. versiegelt gelagert. Zu verschiedenen Zeitpunkten (6 h bis 7 d nach der Herstellung) wurden die Proben auf 90 % r.F. umgelagert. Der Hydratationsgrad wurde durch die Massendifferenz zwischen der Trocknung bei 105 °C und bei 950 °C bestimmt (Abbildung 4). Die durchgehenden Kurven stellen den Verlauf des Hydratationsgrades bei einer durchgehenden Lagerung bei 100 % r.F. dar. Die länger gestrichelten Linien (links deckungsgleich mit der durchgehenden) zeigen den Verlauf des Hydratationsgrades bei versiegelter Lagerung. Die horizontalen, kurz gestrichelten Linien stehen für eine Kapillarporosität von 20 %. Daraus ist ersichtlich, dass der Zementstein bei einem w/z-Wert von 0.40 bei versiegelter Lagerung und bei 100 % r.F. eine identische Hydratationsgradentwicklung aufweist; somit ist der Wassergehalt in der versiegelten Probe ausreichend für die Zementhydratation. Demgegenüber verläuft beim Leim mit einem w/z-Wert von 0.30 die Linie für die versiegelte Lagerung anfänglich gleich und später unterhalb der Linie für die Lagerung bei 100 % r.F. Hier steht also dem versiegelt gelagertem Leim nur anfänglich (ca. 3 Tage), jedoch später nicht mehr genügend Wasser für die Hydratation zur Verfügung. Zudem zeigt sich, wenn eine Kapillarporosität von 20 % erreicht wurde (im linken Bild nach 7 Tagen, im rechten Bild nach 3 Tagen), eine anschließende Umlagerung zu 90 % r.F. die Zementhydratation nicht (w/z = 0.40) bzw. nicht mehr wesentlich (w/z = 0.30) beeinflusste. Die Hydratation des Zementes im Leim mit einem w/z-Wert von 0.30 verläuft insgesamt langsamer und der Hydratationsgrad bleibt niedriger im Vergleich zum Zementleim mit dem w/z-Wert von 0.40. Umso mehr Wasser vorhanden ist, desto schneller verläuft die Hydratation.

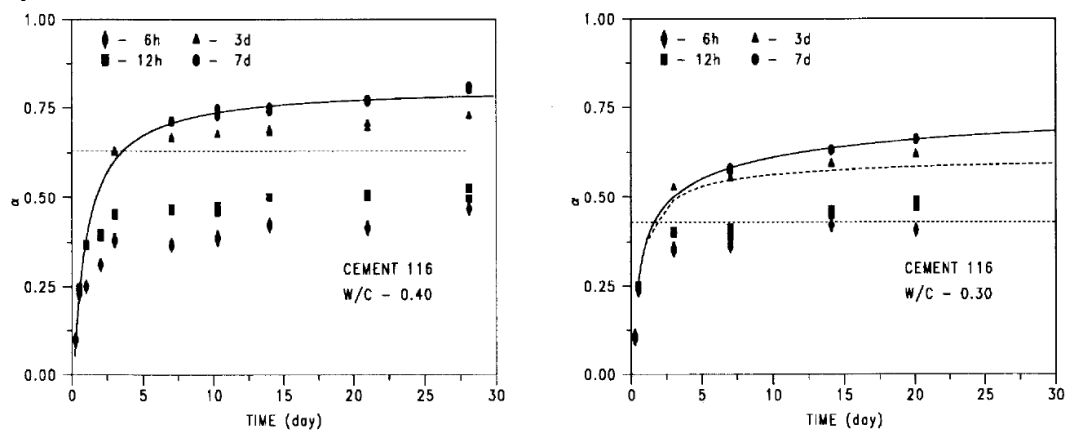


Abbildung 4: Hydratationsgrad α von Zementstein aus Portlandzement mit einem w/z-Wert von 0.40 (links) und 0.30 (rechts) in Abhängigkeit von der Zeit; die Proben wurden zu den angegebenen Zeiten von 100 % auf 90 % r.F. umgelagert, aus [22].

Kern [16] zeigte, dass bei Beton (w/z = 0.60), der nach dem Ausschalen im Alter von 1 Tag bei 85 % und 100 % gelagert wurde, kein Unterschied in der Zementhydratation stattfand. Dies wird dadurch erklärt, dass der Beton bei dem gewählten w/z-Wert so viel Wasser enthielt, dass trotz Austrocknung noch ausreichend Wasser für die Zementhydratation im Beton vorhanden war. Daraus ist zu schliessen, dass Beton mit einem ausreichend hohen w/z-Wert bei der Zementhydratation weniger empfindlich auf eine Austrocknung reagieren kann als Beton mit einem geringeren w/z-Wert.

Parrot [27] lagerte Betonproben (w/z = 0.59) nach dem Ausschalen nach einem Tag bei 20 °C und 60 % r.F. und mass die relative Luftfeuchtigkeit in Löchern, die parallel zur Oberflächen waren und einen unterschiedlichen Abstand von der Betonoberfläche aufwiesen (Abbildung 5). Damit sollte abgeschätzt werden, bis in welche Tiefe die Hydratation des Zementes durch den Wasserverlust infolge Trocknung beeinträchtigt wurde. Es dauerte etwa 1 Woche bzw. 6 Wochen bis in einer Betontiefe von 8 mm die relative Luftfeuchtigkeit auf 90 % bzw. 80 % fiel. Bei einer Luftfeuchtigkeit von 80 % und niedriger wird gemäss Abbildung 3 die Hydratation des Zementes stark beeinträchtigt; in 94 mm Tiefe betrug die relative Luftfeuchtigkeit auch nach 180 Tagen noch 100 %. Die Austrocknung findet somit nur langsam statt, weshalb sich die Nachbehandlung vor allem auf den oberflächennahen Beton (hier in etwa die äussersten 2 cm) auswirkt.

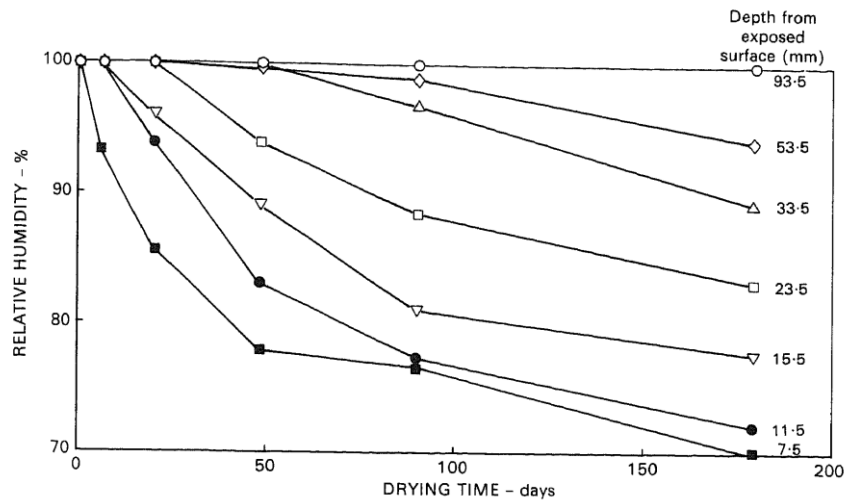


Abbildung 5: Reduktion der relativen Luftfeuchtigkeit in verschiedenen Tiefen von Beton (CEM I, $w/z = 0.59$), der nach dem Ausschalen nach 1 Tag bei $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und 60% r.F. lagerte, aus [27].

Durch Wasserzufuhr in flüssiger Form oder Wasserdampf wird das Austrocknen von Beton gestoppt. Abbildung 6 zeigt, was bei der Zufuhr von Wasserdampf in Form hoher Luftfeuchtigkeit bei 20 Monate altem Beton eintritt: Bei diesem dichten Beton ($w/z = 0.35$) war nach 1 Tag in 8 mm Tiefe die relative Luftfeuchtigkeit auf über 65% gestiegen; es dauerte 14 Tage bis die äussersten 8 mm eine relative Luftfeuchtigkeit von über 85% erreichten. Bei dichten Betonen muss die Wasserzufuhr folglich lange anhalten, um eine ausreichende Tiefenwirkung zu erzielen. Umso poröser der Beton ist, desto schneller dringt die Feuchtigkeit in den Beton ein.

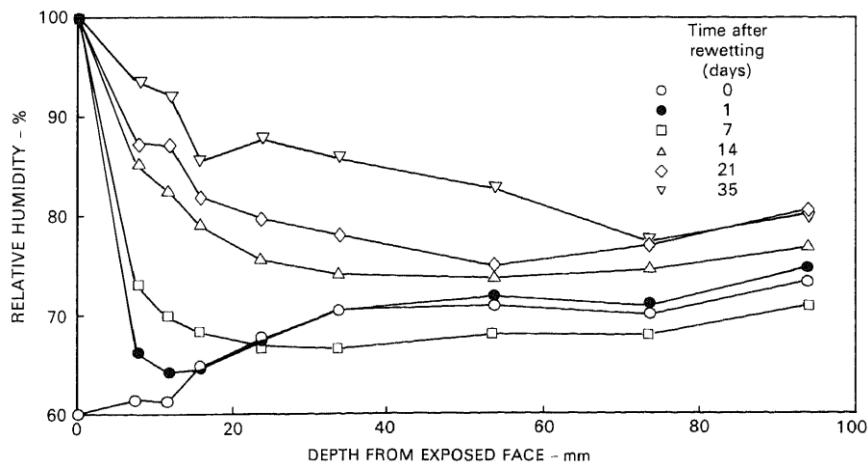


Abbildung 6: Relative Luftfeuchtigkeit von Beton (CEM I, $w/z = 0.35$) nach 20monatiger Lagerung bei $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und 60% r.F. und anschliessender Lagerung bei $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und 100% r.F., aus [27].

Bei Hochleistungsbetonen ($w/z < 0.4$) mit einer hohen Packungsdichte ist einerseits weniger Wasser vorhanden als für eine vollständige Hydratation notwendig ist (der Beton trocknet innerlich aus) und andererseits wird der kapillare Wassertransport im Beton behindert, sodass der Wassernachschub aus dem Betoninneren nicht mehr ausreichend gewährleistet ist. Um die Qualität des Überdeckungsbeton aus Hochleistungsbeton bei ungenügender Nachbehandlung zu verbessern, können z.B. poröse, wasserhaltige Gesteinskörner in den Beton gegeben werden. Trocknet der Beton dann innerlich durch die Hydratation aus, steht dieses Wasser für die weitere Hydratation zur Verfügung. Weber [24] zeigte, dass das in der porösen Gesteinskörnung vorhandene Wasser tatsächlich zur Zementhydratation beiträgt, sodass ein Beton unempfindlicher gegenüber einer äusseren Nachbehandlung war sowie eine höhere Druckfestigkeit als auch ein geringeres Trocknungsschwinden resultierten.

2.1.4 Einfluss des Bindemittels

Viele Untersuchungen wurden an den früher den Zementmarkt dominierenden Portlandzementen durchgeführt. Es werden jedoch u.a. aus ökologischen Gründen immer mehr Zementarten (z.B. Zement mit Hüttensand, Flugasche, Ölschiefer) und Betonzusatzstoffe (z.B. Flugasche, Hüttensand, natürliche Puzzolane) verwendet, die im Vergleich zu Portlandzement oder Portlandkalksteinzement z.T. langsamer reagieren. Betonzusatzstoffe bzw. andere im Zement als Portlandzementklinker enthaltene Bestandteile können die Gefügeentwicklung auf verschiedene Arten beeinflussen [25]:

- mehlfine und vor allem noch feinere Partikel inerter und reaktiver Zusatzstoffe
 - beschleunigen die Zementhydratation (Kristallisationskeime), wodurch sich innerhalb der ersten Tage eine erhöhte Zementklinkerhydratation einstellt
 - verdrängen Wasser aus kleinen Hohlräumen im Feststoffgerüst; dadurch ergeben sich dickere Wasserfilme um die Zementkörner, was die Hydratation beschleunigen kann.
- reaktive Zusatzstoffe führen zu einer zusätzlichen Bildung von CSH
 - Silikastaub reagiert während der ersten Stunden nicht; nach mehreren Tagen hat, je nach pH-Wert des Porenwassers, 20 – 80 % des Silikastaubs reagiert
 - Flugasche reagiert während der ersten Woche nahezu nicht
 - Hüttensand reagiert schneller als Flugasche.

Bei Beton mit hüttensandhaltigen Zementen ist im Regelfall eine längere Nachbehandlung als bei Betonen mit Portlandzementen (z.B. [31], [42]) notwendig, um einen vergleichbar dichten Überdeckungsбетон auszubilden. Dem kann entgegengewirkt werden, in dem z.B. die Reaktivität des Hüttensandes durch feinere Mahlung erhöht wird. Zusätzlich ist zu beachten, dass sich der Einfluss der Temperatur auf die Hydratation von Zement mit Zusatzstoffen oder Zementen der Zementarten CEM II und CEM III anders als bei Portlandzement (CEM I) auswirken kann. Dies gilt es bei Betonierarbeiten vor allem bei niedrigen Temperaturen zu beachten.

2.2 Nachbehandlung gemäss SIA 262

Die Nachbehandlung von Beton ist in der Norm SIA 262:2013 geregelt. Darin heisst es:

- Ziffer 6.4.6.1: Art und Dauer der Nachbehandlung hängen von den Witterungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wind), der Temperatur und der Festigkeitsentwicklung des Betons, der Schalung sowie der Geometrie der Bauteile und den Anforderungen ab.
- Ziffer 6.4.6.2: Der Beton ist unverzüglich und solange gegen Auswaschen, vorzeitiges Austrocknen durch Sonnenbestrahlung oder Wind, starke Temperaturwechsel und schädliche Erschütterungen zu schützen, bis er eine genügende Festigkeit entwickelt hat.
- Ziffer 6.4.6.3: Es sind Massnahmen zu treffen, um den Beginn des Schwindens so lange zu verzögern, bis der Beton eine genügende Zugfestigkeit erreicht hat [...].

Somit wird von der SIA 262 unter Nachbehandlung verstanden:

- Schutz gegen Auswaschung,
- Schutz gegen Austrocknung,
- Schutz vor starken Temperaturwechseln,
- Schutz gegen schädliche Erschütterungen
- Verzögerung des Schwindens.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Schutz vor Austrocknung untersucht. Übliche Schutzmassnahmen gegen das Austrocknen von Beton sind [15]:

- Belassen in der Schalung
- Abdecken mit Folien
- Auflegen wasserspeichernder Abdeckungen
- Aufbringen flüssiger Nachbehandlungsmittel
- kontinuierliches Besprühen mit Wasser,
- Unterwasserlagerung (Fluten) und
- eine Kombination dieser Verfahren.

Tabelle 1 enthält Hinweise zur Anwendung üblicher Schutzmassnahmen gegen Austrocknung.

Tabelle 1: Nachbehandlungsarten bei Beton in Abhängigkeit von der Oberflächen-/Lufttemperatur, aus [15].

Art	Massnahmen	Oberflächen-, Lufttemperatur [°C]					
		< -3	-5 - +5	5 – 10	10 – 15	15 – 25	> 25
Folie oder Nachbehandlungsmittel	+ Wasser zusätzlich: - Holzschalung nässen - Stahlschalung vor Sonne schützen					(X) ²	X
	ggf. zusätzliche Massnahmen, s.o.			X	X	X	
	+ Wärmedämmung Verwendung wärmedämmender Schalung, z.B. Holz sinnvoll, Stahlschalung mit Dämmatten abhängen		X ¹				
	Arbeitsplatz Einhausen, ggf. Beheizung (z.B. Heizstrahler) zusätzlich ¹ : Betontemperatur mind. 3 Tage $\geq +10$ °C	X					
ständig sichtbaren Wasserfilm auf Betonoberfläche vorhalten				(X)	X	X	

1) nicht benetzen; Tau-/Regenwasser fernhalten

2) bei ungünstigen Bedingungen (z. B. starker Wind) und Expositionsclassen XM, XD, XF, XS sinnvoll

In der SIA 262:2013 werden 4 Nachbehandlungsklassen definiert (Tabelle 2). Die Dauer der Nachbehandlung orientiert sich an der Festigkeitsentwicklung. Die Nachbehandlungsklasse 3 wäre z.B. bei bewitterten Fassaden (XC4) und die Nachbehandlungsklasse 4 im Tiefbau z.B. bei der Anwesenheit von Tausalzen (XD3) zu fordern.

Tabelle 2: Dauer der Nachbehandlung für verschiedene Nachbehandlungsklassen gemäss Tabelle 22 der SIA 262:2013;

Nachbehandlungsklassen NBK	1	2	3	4
Dauer (Stunden)	12*	-	-	-
Anteil der charakt. Druckfestigkeit nach 28 Tagen [%]	-	35	50	70
Anforderungen	-	normal	erhöht	hoch
Beispiele	-	XC2	XC4	XD3, XF4

*sofern das Abbinden nicht länger als 5 Stunden dauert und die Betontemperatur an der Oberfläche mindestens 5 °C beträgt.

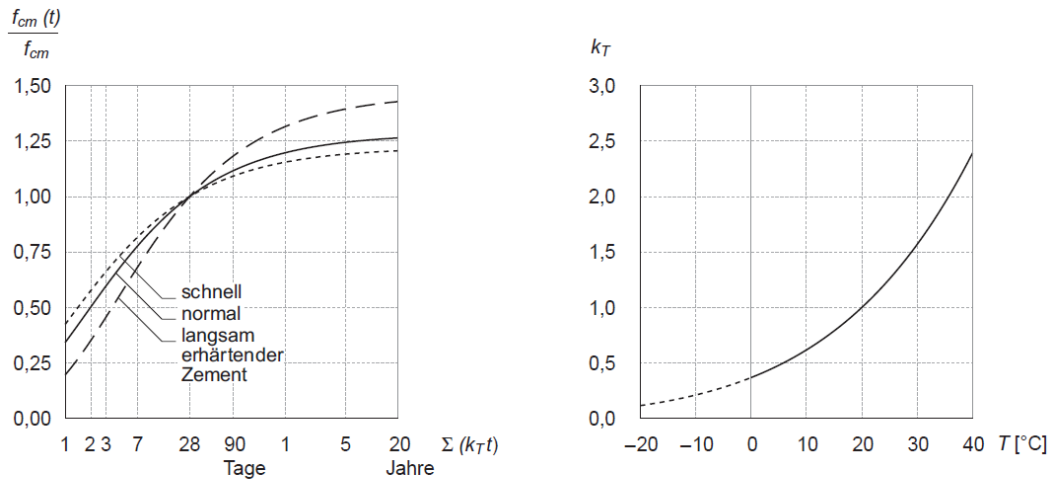
Die Bestimmung der Druckfestigkeit zur Ermittlung der notwendigen Nachbehandlungsdauer kann gemäss Norm SIA 262 mit einem der folgenden Verfahren erfolgen:

1. Berechnung der Festigkeitsentwicklung aus Temperaturmessungen, die bei einer maximalen Tiefe von 10 mm unter der Oberfläche vorgenommen wurden.
2. Berechnung der Festigkeitsentwicklung auf der Grundlage der mittleren Tagestemperatur der Luft
3. Rückprallhammerprüfung (nach Kalibrierung)
4. sonstige erwiesenermassen geeignete Verfahren.
5. falls o.g. nicht vorliegt → Tabelle 23 in der SIA 262 (Tabelle 3)

Bei Verfahren 1 handelt es sich im Prinzip um die Methode der gewichteten Reife. Hierzu

muss vorgängig im Labor der Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Temperatur und der Druckfestigkeit des zu untersuchenden Betons ermittelt werden [40].

Alternativ zu diesem Konzept wird in Tabelle 3 die Nachbehandlungsdauer von der Oberflächentemperatur des Betons und der Festigkeitsentwicklung r bei 20 °C abhängig gemacht. Ersteres ist vom Unternehmer täglich zu messen, letzteres kann beim Betonwerk angefragt werden. Die Festigkeitsentwicklung r wird durch den Quotienten aus der 2 zur 28 Tage Würfeldruckfestigkeit angegeben. Für Beton mit einem schnell und normal erhärtenden Zement beträgt $r \geq 0.5$ für einen mit langsam erhärtenden Zement > 0.30 (Abbildung 7).



- Ohne detailliertere Untersuchung können die Zementarten wie folgt zugeordnet werden:
- schnell erhärtender Zement (Klasse R): CEM 42,5 R, CEM 52,5 N und CEM 52,5 R
 - normal erhärtender Zement (Klasse N): CEM 32,5 R, CEM 42,5 N
 - langsam erhärtender Zement (Klasse S): CEM 32,5 N.

Abbildung 7: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit, Figur 1 der SIA 262.

Tabelle 3: Mindestnachbehandlungsdauer in Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung des Betons, der Temperatur und der Nachbehandlungsklasse (Tabelle 23 der SIA 262).

		Mindestnachbehandlungsdauer [Tage] ¹⁾									
		schnell			mittel			langsam			sehr langsam
Festigkeitsentwicklung bei 20 °C		$r \geq 0.50$			$0.50 > r \geq 0.30$			$0.30 > r \geq 0.15$			$r < 0.15$
Nachbehandlungsklasse		2	3	4	2	3	4	2	3	4	
T _{Oberfläche Beton} ³⁾ [°C]	T ≥ 25	1,0	1,5	3	1,5	2,5	5	2,5	3,5	6	festzulegen
	25 > T ≥ 15	1,0	2,0	5	2,5	4	9	5	7	12	
	15 > T ≥ 10	1,5	2,5	7	4	7	13	8	12	21	
	10 > T ≥ 5 ²⁾	2,0	3,5	9	5	9	18	11	18	30	

¹⁾ Bei mehr als 5 h Verarbeitbarkeitszeit (Zeitraum, während dessen der Beton mit den vorgesehenen Geräten auf der Baustelle verdichtbar ist) ist die Nachbehandlungsdauer angemessen zu verlängern
²⁾ Bei Temperaturen unter 5 °C ist die Nachbehandlungsdauer um die Zeitspanne zu verlängern, während der die Temperatur unter 5 °C lag
³⁾ Alternativ darf die Lufttemperatur, die am Morgen um ca. 7 Uhr im Schatten gemessen wird, verwendet werden.

2.3 Nachbehandlungsmittel

Zur Verbesserung und auch Vereinfachung der Nachbehandlung wurden vor mehr als 50 Jahren Nachbehandlungsmittel entwickelt [2]. Diese sind im Regelfall auf Paraffinbasis und enthalten als Lösemittel Wasser. Nach dem Auftrag des Nachbehandlungsmittels verdunstet das Wasser und es bildet sich ein Film aus Paraffin auf der Betonoberfläche aus, der die Wasserverdunstung aus dem Beton behindert. Auf europäischer Ebene wurde 2007 die CEN/TS 14754-1 [1] herausgegeben, die die Bestimmung der Wasserrückhaltefähigkeit von üblichen Nachbehandlungsmitteln beinhaltet: Auf drei Prüfkörper eines definierten Betons ($w/z = 0.42$) wird das Nachbehandlungsmittel aufgetragen, wenn die Oberfläche mattfeucht ist und der anschliessende Massenverlust während 72 Stunden bei einer Lagerung bei 35 °C und 40 % r.F. gemessen. Zum Vergleich wird der Massenverlust von drei unbehandelten Prüfkörpern während der gleichen Zeitspanne bestimmt. Der Sperrkoeffizient ist dann der Quotient aus der Differenz des Massenverlusts ohne und mit Nachbehandlungsmittel zum Massenverlust ohne Nachbehandlungsmittel. Bei dieser Prüfung wird somit nicht berücksichtigt, wieviel Wasser der Beton vor dem Auftrag des Nachbehandlungsmittels verliert. In der Schweiz wurde diese technische Spezifikation auf den 1.7.2008 als SN CEN/TS 14754-1 in das nationale Regelwerk ohne Änderungen übernommen.

In Deutschland werden die Anforderungen an Nachbehandlungsmittel in den TL NBM-StB 09 umfassender definiert [2]. Es werden verschiedene Typen unterschieden (Tabelle 4). Die Nachbehandlungsmittel AH werden beispielsweise bei der Waschbetonbauweise verwendet und enthalten zusätzlich eine verzögernde Komponente, um den Oberflächenmörtel im Beton ausbürsten zu können. Folgende Eigenschaften der Nachbehandlungsmittel sind nachzuweisen:

- Sperrwirkung entweder „anzugeben“ (Typ BE) oder mindestens 75 % (AH) bzw. 85 % (BH, VH, VM, BM)
- Griffigkeit: Anforderungen für VH, VM
- Trocknungszeit bis Nachbehandlungsmittel abgetrocknet ist und nicht mehr klebt, gilt nicht für Typ AH
- Verwitterungsverhalten, keine Ablösung während der ersten 2 Wochen der Bewitterung nach DIN EN ISO 4982-2); gilt nur für Typen VH und VM

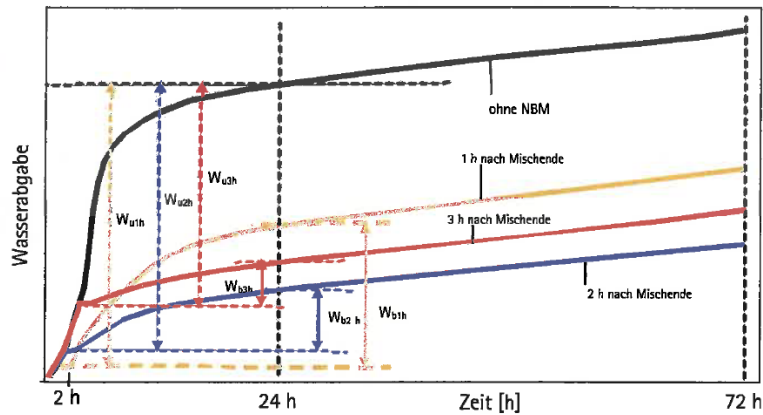
Tabelle 4: Bezeichnung der Nachbehandlungsmittel gemäss TL NBM-StB 09.

Anwendungsbereich		Zeitpunkt des Aufbringens		
		Sofort H	Mattfeucht M	Nach Entschalen E
Beton für Verkehrsflächen [Strassenbeton <u>mit</u> Griffigkeitsanforderungen an die Oberfläche]	V	VH	VM	-
Beton für Verkehrsflächen, Strassenbeton <u>ohne</u> Griffigkeitsanforderungen an die Oberfläche	A	AH	-	-
Allgemeiner Betonbau [Beton für nicht befahrene Bauteile ohne Griffigkeitsanforderungen]	B	BH	BM	BE

In Abbildung 8 ist dargestellt, welchen grossen Einfluss der Auftragszeitpunkt des Nachbehandlungsmittels auf dessen Wirkung hat. Wird dieses bereits 1 Stunde nach Mischende aufgetragen, verdunstet viel Wasser, da sich kein geschlossener Film des Nachbehandlungsmittels auf der noch nassen Betonoberfläche bilden konnte: Das Wasser auf der Betonoberfläche bewegte sich teilweise und zerstört dabei den Nachbehandlungsfilm. Wird erst 3 Stunden nach dem Mischende das Nachbehandlungsmittel aufgetragen, verdunstet ebenfalls viel Wasser, da der Beton während einer relativ langen Zeit nicht vor Austrocknung geschützt wird. Bei dem untersuchten Beton und Lagerungsbedingungen war der Auftrag des Nachbehandlungsmittels nach 2 Stunden am besten (insgesamt geringste Wasserabgabe, siehe blaue Kurve). Da die Wasserabgabe und der Sperrkoeffizient jeweils nur für den Zeitraum vom Auftrag bis 24 Stunden nach Mischende ermittelt werden, hat der Auftrag nach 2 Stunden jedoch weder den nach dieser Konvention berechneten geringsten Wasserverlust noch den höchsten Sperrkoeffizienten. Nach ca. 24

Stunden nach der Betonherstellung unterscheidet sich die Wasserabgabe pro Zeit nur noch kaum für die unterschiedlichen Auftragszeitpunkte.

Idealerweise wird das Nachbehandlungsmittel auf den mattfuchten Beton aufgetragen. In der TL NBM-StB sind Vorgaben zur Ermittlung des zu prüfenden Auftragszeitpunktes enthalten. Der mattfuchte Zustand wird mit einer Art Löschpapier (Lackmuspapier) ermittelt und gilt als erreicht, wenn während 60 Sekunden das Lackmuspapier nach Kontakt mit der Betonoberfläche trocken bleibt.



Auftragszeit des NBM	Wasserabgaben [g]		Sperrkoeffizient [%]
	Auftragszeitpunkt – 24 h nach Mischende	Auftragszeitpunkt – 24 h nach Mischende	
Auftragszeit des NBM	W_u	W_b	S_1
1 h nach Mischende	41,96	21,3	49
2 h nach Mischende	38,5	9,57	75
3 h nach Mischende	32,81	6,36	81

Abbildung 8: Einfluss des Auftragszeitpunktes eines Nachbehandlungsmittels auf die Wasserabgabe von Beton, aus [2].

Bei höheren Temperaturen (Sommer, Labor) bildet sich der Film des Nachbehandlungsmittels schneller und dichter als bei niedrigeren Temperaturen aus (Abbildung 9 und [29]). Die zwei Kurven „Herbst“ stellen unterschiedliche Austrocknungsbedingungen dar: Bei der oberen Kurve waren die Umgebungsbedingungen trockener, so dass mehr Wasser verdunsten konnte. Folglich zeigte sich die positive Wirkung des Nachbehandlungsmittels im Vergleich zur unbehandelten Probe deutlicher als bei der unteren Kurve. Hier waren die Umgebungsbedingungen feuchter, weshalb auch ohne NBM weniger Wasser verdunstete.

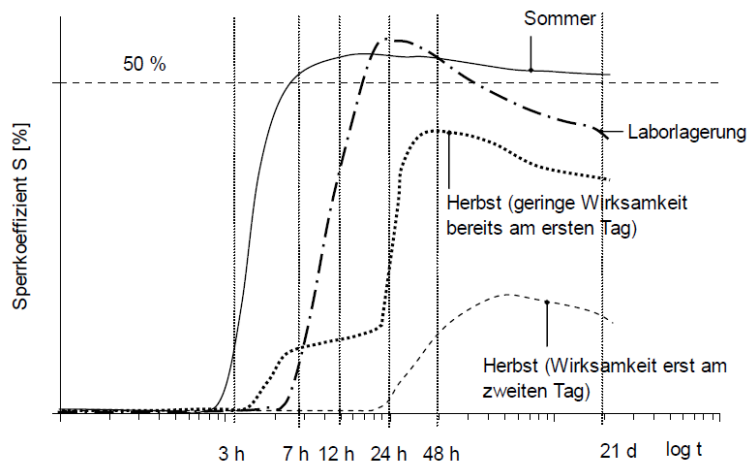


Abbildung 9: Entwicklung des Sperrkoeffizienten bei unterschiedlichen Lagerungen von mit Nachbehandlungsmittel behandelten Betonen, aus [31].

Bei Beton mit texturierter Oberfläche zeigten sich ähnliche Zusammenhänge wie bei glatten Oberflächen (Abbildung 10). Hier erwies sich der Auftragszeitpunkt von 3 h nach der

Texturierung als optimal. Auch zeigte sich, dass die häufig empfohlene Auftragsmenge von 150 g/m² für ebene Flächen ausreichend sein kann, jedoch auf texturierten Flächen (hier Besenstrich) eine grössere Menge (hier 225 g/m²) zweckmässiger war.

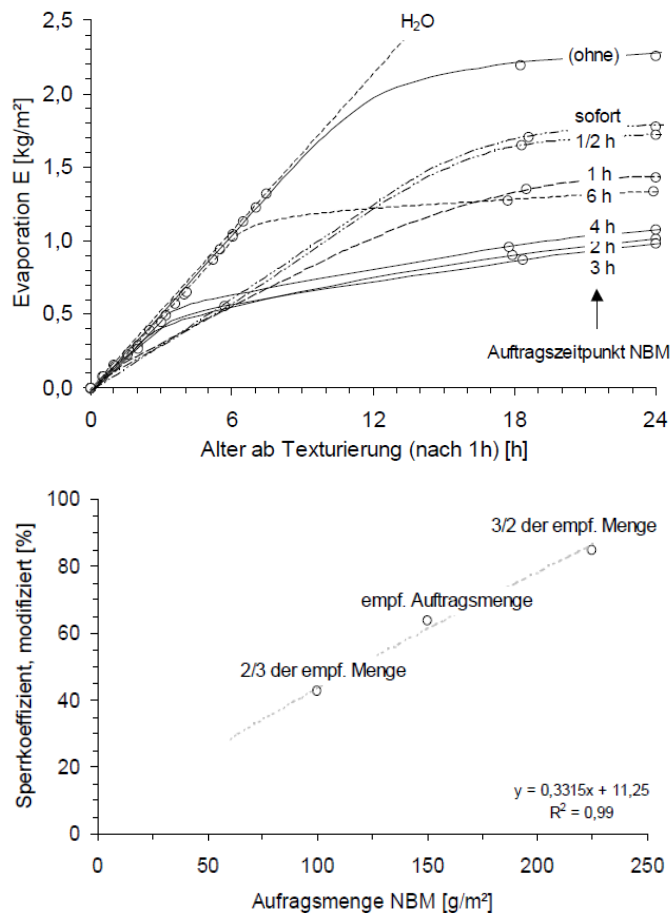


Abbildung 10: Einfluss des Auftragszeitpunktes und der Auftragsmenge eines Nachbehandlungsmittels auf die Verdunstung von einer Betonoberfläche, die mit einem texturiertem Besenstrich hergestellt wurde; zum Vergleich ist die Verdunstung bei einer Wasseroberfläche dargestellt, aus [23].

In [23] wurde die Verdunstung innerhalb der ersten 24 Stunden nach der Betonherstellung in Abhängigkeit von der Nachbehandlung untersucht (Tabelle 5). Die grösste Verdunstung erfolgte ohne eine Nachbehandlung und die geringste bei einer Abdeckung mit feuchter Jute. Beide Nachbehandlungsmittel (Basis Paraffin) reduzierten die Verdunstung im Vergleich zu keiner Nachbehandlung. Da es sich um Einzelversuche handelt, kann nicht beurteilt werden, ob sich beide Nachbehandlungsmittel signifikant in Ihrer Wirkung unterscheiden. Wurde das Nachbehandlungsmittel zu spät oder in zu geringer Menge aufgetragen, verdunstete deutlich mehr Wasser. Bei den Oberflächen ohne Textur fand eine erhöhte Verdunstung statt. Dies wurde dadurch erklärt, dass durch die nach 1 Stunde vorgenommene Texturierung die Oberfläche verdichtet wurde.

Tabelle 5: Einfluss der Nachbehandlung auf die Verdunstung von texturierten Betonoberflächen bei Lagerung bei 20 °C und 65 % r.F., NBM: Nachbehandlungsmittel, aus [23].

Nachbehandlung	Verdunstung [kg/m ² , 24 h]	Bemerkung
Feuchte Jute	0.01	
NBM 1	0.40	
NBM 2	0.48	
Paraffinemulsion 1	0.63	Ohne Textur
Paraffinemulsion 1	0.71	67 % NBM-Menge
Paraffinemulsion 1	1.44	Auftrag nach 10 h
Ohne NBM	1.48	
Ohne NBM	1.58	Ohne Textur

Giese et al. [4] studierten den Einfluss der Nachbehandlung (feuchter Sand, ohne Nachbehandlung, NBM optimal, NBM zu früh appliziert, Normlagerung CDF: 7 Tage Wasser, 21 Tage 20 °C/70 % r.F.), der Lagerung und der Zementart auf die Frostausalzbeständigkeit (CDF-Verfahren). Dabei stellten Sie fest, dass eine Nachbehandlung mit feuchtem Sand am besten war, der Auftragszeitpunkt des Nachbehandlungsmittels einen grossen Einfluss hat und Beton (w/z = 0.44, Luftgehalt 5 Vol.-%) mit den Zementen CEM I 42,5 N und CEM II/A-S 42,5 N am nachbehandlungsunempfindlichsten und Beton mit den Zementen CEM II/B-S 42,5 N und CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N am nachbehandlungsempfindlichsten waren. Als Erklärung für den Zementeinfluss wurde angegeben, dass die nachbehandlungsempfindlichen Zemente eine grössere spezifische Oberfläche (4000 – 5000 cm²/g) als die nachbehandlungsunempfindlichen Zemente (ca. 3100 cm²/g) aufweisen. Durch die hohe Packungsdichte bei hohen Mahlfineheiten kann Wasser aus dem Betoninneren nur schwer an die austrocknende Betonoberfläche gelangen, wodurch sich eine Gefügeschädigung bei einer ungenügenden Nachbehandlung ergibt. Bei der Lagerung im Freien fand insgesamt eine geringere Abwitterung im Frostausalzversuch als bei der Laborlagerung statt, wobei hier der Beton mit CEM II/B-M am nachbehandlungsempfindlichsten war. Das zwischen dem Labor und im Freien unterschiedliche Verhalten wird mit dem konstanten Klima im Labor im Gegensatz zu dem Temperaturzyklen im Freien erklärt, welches eine stetige Austrocknung begünstigt. Wurde die Frostausalzbeständigkeit nicht nach 28 Tagen sondern nach einem Jahr ermittelt, zeigte sich mit einer Ausnahme kein Einfluss der Nachbehandlung auf die Frostausalzbeständigkeit. Die Ausnahme betrifft den Beton mit CEM II/B-M, der ohne Nachbehandlung am stärksten abwitterte.

Ehrhardt & Stark [18] betrachteten auch den Einfluss der Nachbehandlung auf den Frostausalz widerstand. Der am schnellsten reagierende Zement war beim Frostausalz widerstand am unempfindlichsten bezüglich der Nachbehandlung (Abbildung 11). Auch zeigte sich kein Zusammenhang zwischen dem Frostausalz widerstand und der Wasserabgabe. Wurden die Proben statt bei konstantem Klimata im Labor bei variablen Klimata im Freien gelagert, führte dies, wie auch in [4], zu einer geringeren Abwitterung im CDF-Test.

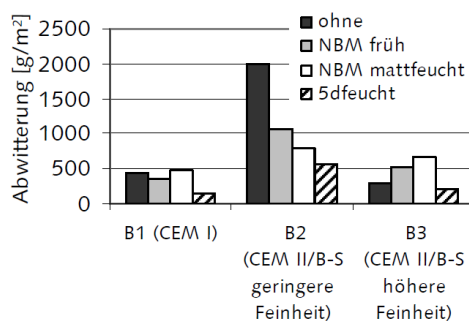


Abbildung 11: Abwitterung von Beton mit verschiedenen Zementen (Blainewerte B1: 3260 cm²/g, B2: 4000 cm²/g, B3: 5890 cm²/g) und Nachbehandlung beim CDF-Test nach 28 Zyklen, aus [18].

In [30] wird ebenfalls auf den positiven Einfluss von Nachbehandlungsmitteln hingewie-

sen, wenngleich eine Lagerung bei 20 °C und 100 % r.F. eine geringere Porosität als bei der Verwendung des Nachbehandlungsmittels ergab (Abbildung 12). Die höhere Porosität bei Auftrag eines Nachbehandlungsmittels im Vergleich zu keiner Nachbehandlung wird dadurch erklärt, dass das im Nachbehandlungsmittel vorhandene Wasser einerseits verdunstet und andererseits aber auch in den Frischbeton eindringt und dadurch den w/z-Wert in den äussersten 0.1 mm des Betons erhöht. Zudem wird spekuliert, ob diese erhöhte Porosität die Ursache dafür ist, dass bei den untersuchten Betonen (CEM I, CEM II/B-S, w/z 0.41 – 0.45, ca. 4.6 % Luftgehalt) bei Beton mit einem NBM eine deutlich höhere Abwitterung im Frosttausalzversuch im Vergleich zum Beton, der bei 20 °C/100 % r.F. gelagert wurde, resultierte. Der Einfluss des Auftragszeitpunkts des Nachbehandlungsmittels in der Zeitspanne zwischen 1 h vor und 1 h nach dem optimalen Zeitpunkt wirkte sich hier wenig aus. Ein Auftrag des Nachbehandlungsmittels auf den noch nassen Beton senkt jedoch dessen Wirksamkeit drastisch (Abbildung 12).

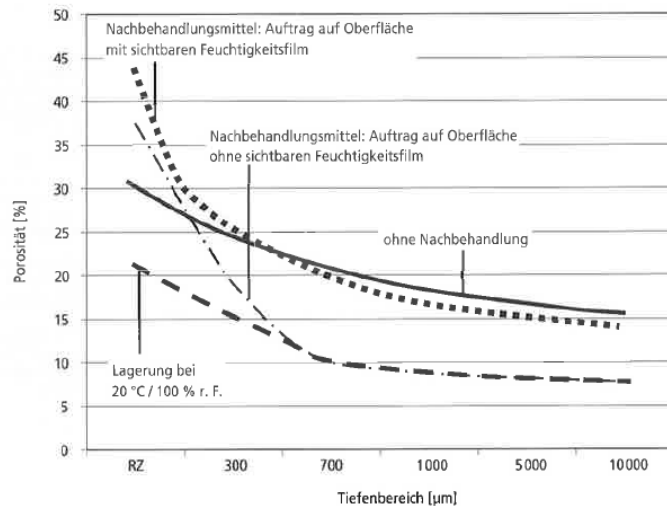


Abbildung 12: Schematische Darstellung unterschiedlicher Nachbehandlungsarten auf die Porosität des Randbetons, aus [30].

Bei Betonen, die im Wasserbau verwendet werden und eine niedrige Hydratationswärmeentwicklung während der ersten Tage sowie einen w/z-Wert von 0.50 aufweisen, wurde der Einfluss der Nachbehandlung auf verschiedene Festbetoneigenschaften untersucht [19]. Es wurden grossformatige Betonkörper (jeweils ca. 8 m³) im Freien betoniert und bei etwa 10 °C gelagert. Eine Verlängerung der Nachbehandlungsdauer von 3 auf 7 Tage bewirkte zumeist keine grosse Verbesserung der Betoneigenschaften. Im Alter von 3 Tagen wurde 52 % und im Alter von 7 Tagen 80 % der charakteristischen Würfeldruckfestigkeit $f_{ck,cube}$ erreicht. Am wirkungsvollsten waren Schalungseinlagen bei erst- oder zweimaliger Verwendung (Abbildung 13). Es zeigte sich kaum ein Einfluss des Schalungsmaterials (Stahl oder Holz) und der Nachbehandlung (feuchte Jute, Nachbehandlungsmittel) auf die Betoneigenschaften.

Martin [42] fand bei Untersuchungen in Südafrika bei sommerlichen Verhältnissen eine positive Wirkung bei einem und eine negative Wirkung bei einem anderen Nachbehandlungsmittel. Bei winterlichen Verhältnissen (8 – 18 °C) wirkten beide Nachbehandlungsmittel schlecht, da diese die Aufnahme von Feuchtigkeit (Regen, Tau) verhinderten.

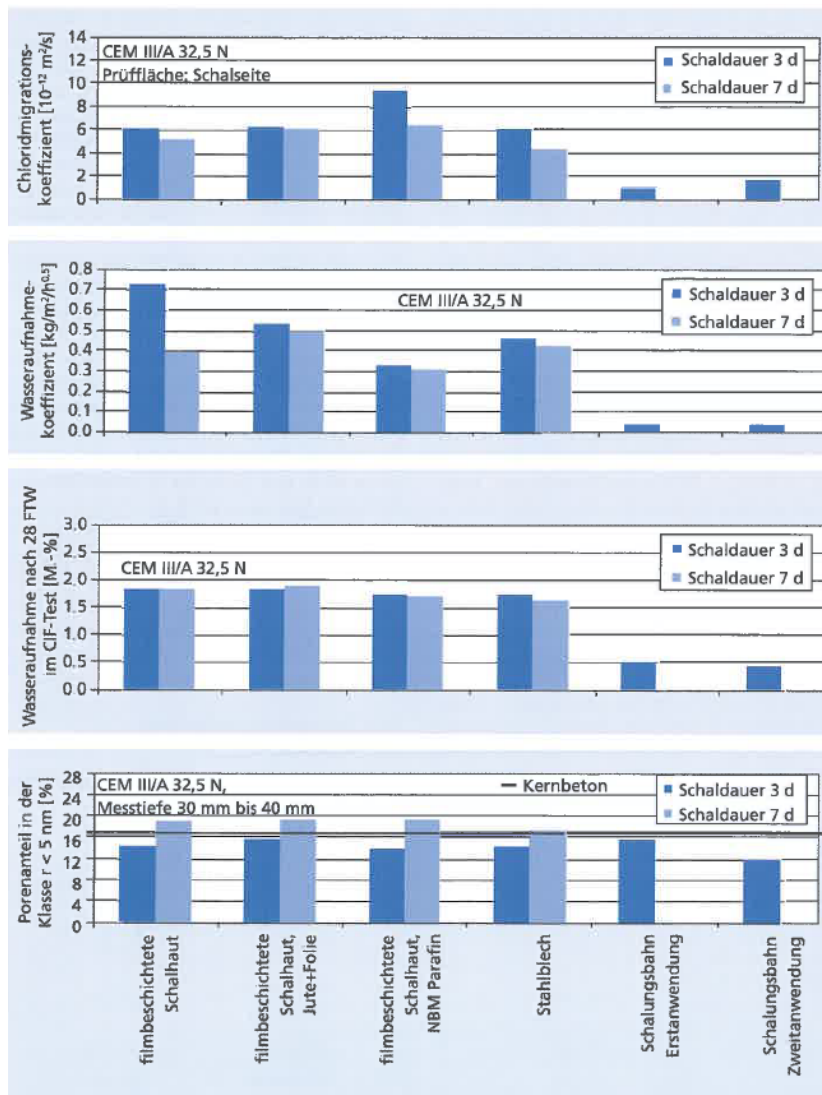


Abbildung 13: Festbetoneigenschaften bei einem Beton C20/25, $w/z = 0.50$, in Abhängigkeit von der Nachbehandlung, aus [19].

2.4 Schalungseinlagen

Als eine weitere Methode zur Verbesserung der Qualität des Randbetons bzw. zur Nachbehandlung können Schalungseinlagen verwendet werden. Dabei handelt es sich um poröse Vliese, die auf der (üblicherweise ebenen) Schalung befestigt werden und durch die poröse Struktur dem an der Schalungsbahn anliegendem Frischbeton Wasser entziehen. Torrent et al. [28] zeigten, dass mit Schalungseinlagen die Qualität des Randbetons verbessert werden kann. Betonwände (CEM I, $w/z = 0.55$, 520 mm Ausbreitmass) wurden so hergestellt, dass auf manchen Schallflächen Schalungseinlagen verwendet wurden. Nach einem Tag wurde der Beton ausgeschalt und im Labor bei 20 °C und 50 % r.F. gelagert. Nach 16 Jahren Lagerung wurden diverse Eigenschaften am Randbeton bestimmt (Tabelle 6). Durch die Schalungseinlage wurde die Betonqualität durchwegs verbessert (niedrigere Luftpermeabilität, niedrigere Karbonatisierungstiefe, niedrigerer Chloridmigrationskoeffizient). Durch die Bestimmung der Wasseraufnahme in verschiedenen Tiefenstufen konnte gezeigt werden, dass bis in eine Tiefe von etwa 5 cm die Wasseraufnahme geringer als die des Kernbetons war und somit die Wirkung der Schalungseinlage entsprechend tief reichte (Abbildung 14). In [19] wird ebenfalls die positive Wirkung von Schalungseinlagen belegt. Schalungseinlagen erwiesen sich bei erst- oder zweimaliger Verwendung (Abbildung 13) am wirkungsvollsten im Vergleich zu anderen Nachbehandlungsarten.

Tabelle 6: Festbetoneigenschaften (Mittelwert, Standardabweichung bzw. Maximum*) nach 16 Jahren, bestimmt an den Seiten mit Holzschalung und mit Schalungseinlage, aus [28].

Eigenschaft	Einheit	Holzschalung	Schalungseinlage
Prellhärte	[-]	46 ± 4.8	54 ± 2.1
Luftpermeabilität	[10 ⁻¹⁶ m ²]	6.6 ± 0.16	0.79 ± 0.14
Maximale Karbonatisierungstiefe*	[mm]	23 / 27	15 / 18
Chloridmigrationskoeffizient	[10 ⁻¹² m ² /s]	29 ± 3.3	18 ± 1.5

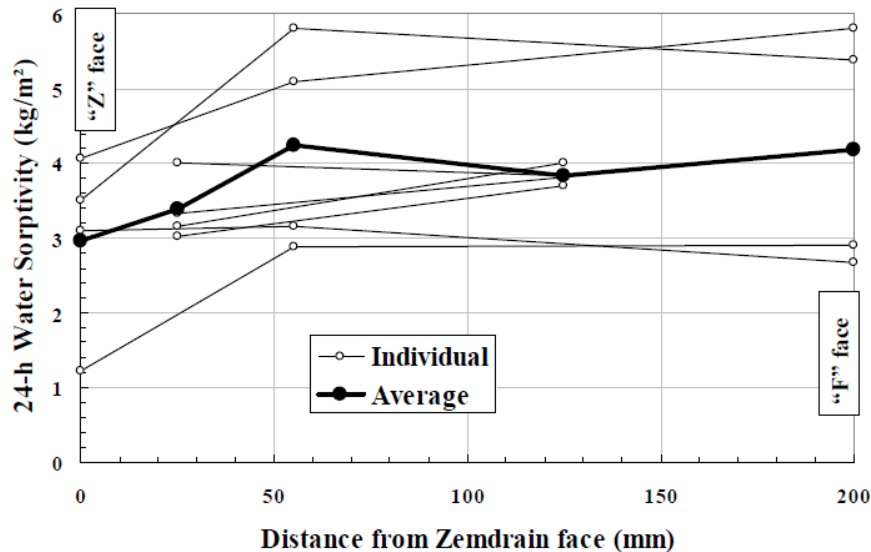


Abbildung 14: Kapillare Wasseraufnahme von Betonscheiben aus verschiedenen Tiefen; die Punkte stellen den Abstand zwischen der ursprünglichen Betonoberfläche und der Aufsaugfläche des Prüfkörpers dar; Z face: Seite mit Schalungseinlage Zedrain; F face: Holzschalung, aus [28].

2.5 Wandeffekt

Bei der Beurteilung von Ergebnissen von Prüfungen ist zu beachten, dass die Betonzusammensetzung und –qualität im Prüfkörper nicht immer isotrop ist. Aus geometrischen Gründen nimmt mit zunehmendem Abstand von der geschalteten Betonoberfläche der Anteil an Zementstein ab und an Gesteinskörnung zu. Adam [7] berechnete die Änderung des Volumenanteils der Gesteinskörnung und des Zementsteins in Abhängigkeit vom Abstand von der Betonoberfläche für vollständig kugelige Gesteinskörnung (Abbildung 15). Ab einem Abstand, der etwa der Hälfte der Grösstkorns entspricht, ist das Verhältnis Zementstein zu Grösstkorn gleich [13]. Umso stärker (z.B. plattiger) die Gesteinskörnung von der Kugelform abweicht, desto grösser wird der Bereich werden, in dem der Volumenanteil der Gesteinskörnung und des Zementsteins im Vergleich zum Kernbeton variiert.

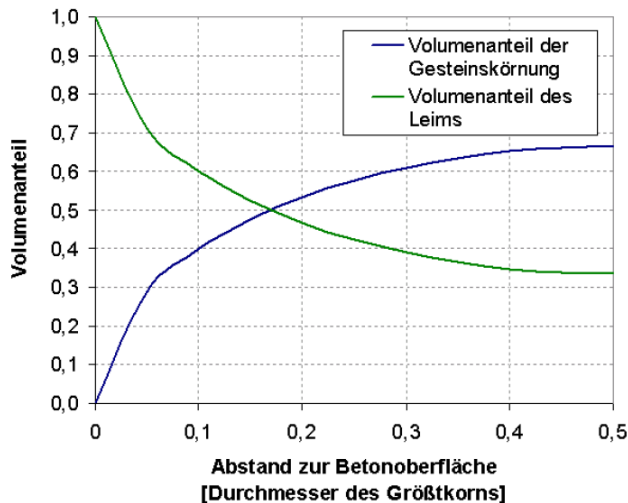
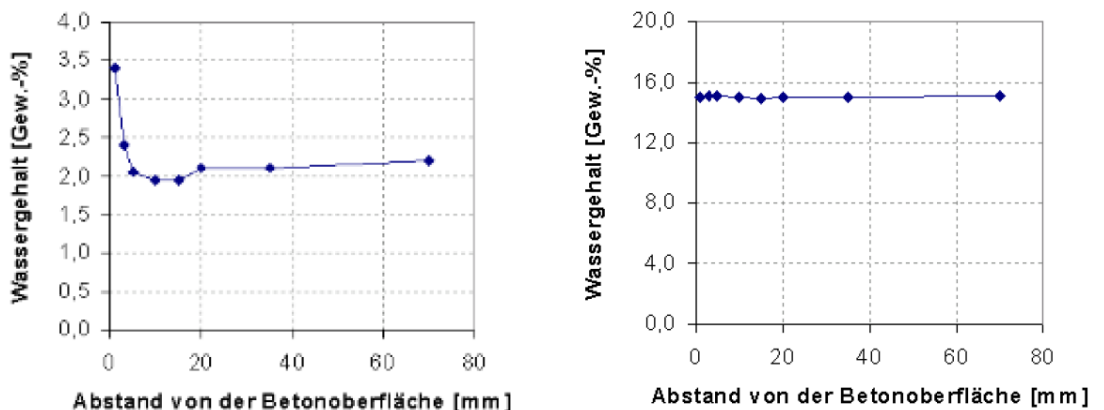


Abbildung 15: Berechnete Änderung des Anteils von Gesteinskörnung und Leim in der Betonrandzone an einem Beispiel ($z=360 \text{ kg/m}^3$, $w = 200 \text{ kg/m}^3$, $g = 1750 \text{ kg/m}^3$), aus [7].

Kern [16] bestimmte durch Trocknung von Bohrmehl den Wassergehalt in Abhängigkeit vom Abstand von der Betonoberfläche (Abbildung 16). Direkt an der Betonoberfläche wird der höchste Wassergehalt, bezogen auf die Betonmasse, bestimmt. Wird der Wassergehalt jedoch auf den Zementgehalt bezogen (bestimmt mit RFA), ergibt sich ein konstanter Wassergehalt. Als Ursache für das Minimum im Wassergehalt, bezogen auf die Betonmasse, bei einem Abstand von etwa 10 mm von der Betonoberfläche wird eine erhöhte Packungsdichte der Gesteinskörnung infolge der Betonverdichtung vermutet.



a) Wassergehalt bezogen auf die gesamte Probenmasse

b) Wasseranteil bezogen auf den reinen Zementgehalt

Abbildung 16: Wassergehalt von Beton in Abhängigkeit vom Abstand von der Betonoberfläche und dem Zementgehalt, [16] aus [7].

2.6 Betonaustrocknung

Steht dem Zement und den reaktiven Zusatzstoffen nicht ausreichend Wasser zur Hydratation zur Verfügung, kann sich kein dichtes Betongefüge entwickeln. Folglich ist es von zentraler Bedeutung den Wasserverlust aus dem Randbeton auf ein zulässiges Maß zu beschränken, um ein ausreichend dichtes Gefüge vom oberflächennahen Beton zu erhalten. In Abbildung 17 ist schematisch der Wasserverlust aus Beton, aufgeteilt in drei Phasen, dargestellt.

In Phase I ist der Beton noch plastisch. Die Verdunstungsrate entspricht in etwa derjenigen einer freien Wasserfläche, da der Nachschub an Wasser aus dem Beton durch die wassergesättigten Kapillaren gesichert ist. Die Wasserabgabe ist proportional zur Zeit. Im Beton ist der Feuchtgradient gering. Die Phase dauert in etwa so lange bis der Beton

erstarrt, d.h. je nach Zement und Umgebungsbedingungen zwischen wenigen Stunden und zumeist maximal 1 Tag. Somit bestimmen alle betontechnologischen Parameter, die das Erstarren beeinflussen, die Dauer der Phase I. Eine langsamer reagierender Zement (Abbildung 18, z.B. infolge geringer Mahlfineinheit, Zusatz von Puzzolan) oder bei Zusatz eines Verzögerers bzw. niedrigeren Temperaturen wird die Dauer der Phase I verlängern. Durch z.B. Fließmittel und einen niedrigeren w/z-Wert wird der Abstand zwischen den Feststoffen im Beton verringert, was die Dauer der Phase I verkürzt. Infolge der Austrocknung in Phase I beginnt sich ein noch geringer Kapillardruck im Frischbeton auszubilden [20]. Die Hydratation kann, je nach verbleibenden Wassergehalt im Beton, beeinträchtigt werden.

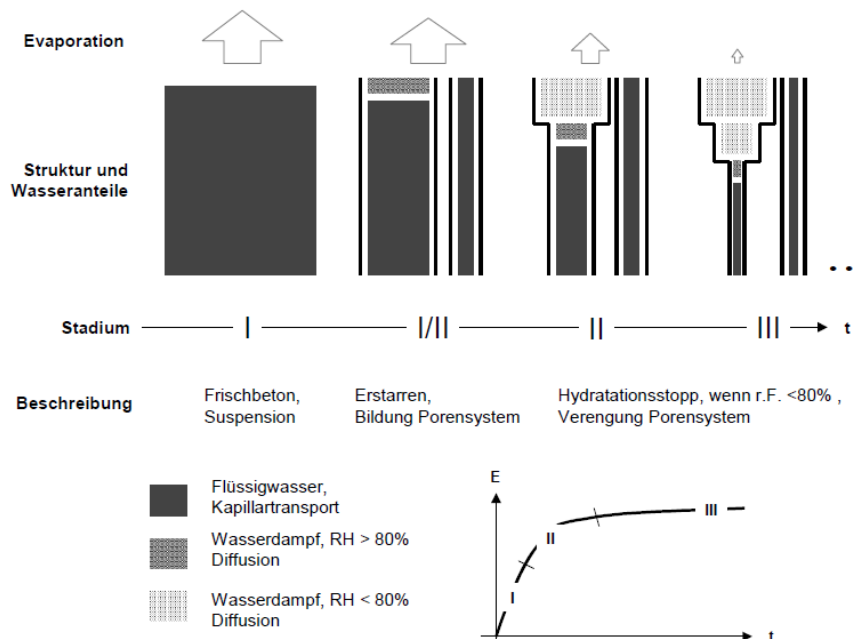


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Verdunstung in den Phasen I bis III, aus [23].

In Phase II ist der Beton erstarrt. Ohne eine geeignete Nachbehandlung bildet sich im Beton ein Feuchtgradient aus und der Trocknungshorizont wandert von der Oberfläche in den Beton hinein, da der Feuchtetransport im Beton geringer als die durch Verdunstung ausgetragene Wassermenge ist. Der Feuchtgradient und Kapillardruck sind umso grösser, je weiter die Luftfeuchtigkeit in der Umgebung unter 100 % liegt, umso weniger Wasser im Beton ist (niedrigerer w/z-Wert), umso weniger und kleiner die Kapillaren sind (niedrigerer w/z-Wert). Die Hydratation wird dadurch gebremst. Unterhalb einer Ausgleichsfeuchte von 85 – 90 % kommt die Hydratation fast zum Stillstand. Umso stärker die Hydratation beeinträchtigt wird, ein desto gröberes, an Kapillarporen reiches Porensystem bildet sich. Die Dauer der Phase II hängt sowohl von betontechnologischen Parametern als auch den Umgebungsbedingungen ab. In Phase II nimmt die Verdunstungsgeschwindigkeit infolge der Gefügeverdichtung (Hydratation) und dem Mangel an Wasser kontinuierlich ab.

In Phase III ist die Wasserabgabe nur noch sehr gering und die Verdunstungsgeschwindigkeit annähernd konstant. In Phase II begann das Trocknungsschwinden und wird in Phase III fortgesetzt. Die Betoneigenschaften werden von der Verdunstung in Phase III zumeist weniger stark beeinflusst als in Phase I oder II. [23] definiert den Zeitpunkt für den Übergang von Phase II in Phase III mit einer Verdunstungsgeschwindigkeit von $0.025 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$, was, je nach Reaktivität des Betons, nach etwa 0.5 – 2 Tagen erreicht wurde.

Durch eine Nachbehandlung gilt es die Austrocknung in Phase I weitgehend und in Phase II vollständig zu unterdrücken sowie in Phase III die Austrocknung solange zu verzögern bis ein ausreichend dichtes Gefüge ausgebildet ist und die gewünschten Eigen-

schaften erreicht werden. D.h. ein Verdunstungsschutz ist vorzusehen. In den Phasen II und III kann eine Wasserzufuhr von Vorteil bzw. notwendig sein, falls z.B. infolge der Hydratation der Beton innerlich austrocknet.

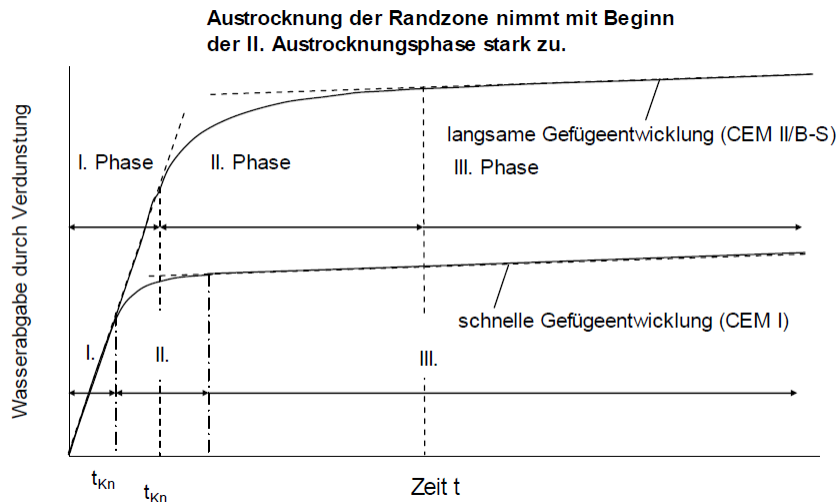


Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf der Wasserabgabe über eine Würfelfläche von Beton mit zwei verschiedenen Zementarten ab der Herstellung bei Lagerung bei 20 °C und 65 % r.F., aus [31].

2.7 Prüftechnische Ermittlung der Nachbehandlungsdauer

Hilfsdorf et al. [17] wiesen darauf hin, dass die Nachbehandlung auf die Anforderungen (Betoneigenschaften) abzustimmen ist. So könnte z.B. die relevante Nachbehandlungsdauer anhand des angestrebten Karbonatisierungswiderstandes, der gewünschten Dichtigkeit des Betons (Luftpermeabilität) oder der Festigkeitsentwicklung festgelegt werden. D.h. in Abhängigkeit von der gewählten Anforderung ist die Nachbehandlung solange fortzuführen, bis die entsprechende Eigenschaft erreicht wird. Die Nachbehandlungsdauern, die erforderlich wären, um den geforderten Karbonatisierungswiderstand oder die Dichtigkeit zu erreichen, sind in Vorversuchen für den jeweiligen Beton zu ermitteln [17]. Die Festigkeitsentwicklung könnte auch ohne Vorversuche bestimmt werden, da diese Eigenschaft direkt am Beton ohne weitere Trocknung schnell ermittelt werden kann. Je nach geforderter Eigenschaft können sich abweichende Nachbehandlungsdauern ergeben. Ähnliches fand auch Martin [42] heraus. Dies widerspricht dem Konzept der Norm SIA 262 zur Nachbehandlungsdauer, die diese nur an der Festigkeitsentwicklung orientiert.

Kern [16] wertete Literatur danach aus, mit welcher Prüfung (Betoneigenschaft) die Qualität der Nachbehandlung ermittelt werden kann. Die Prüfungen erfolgten Wochen nach dem Ende der Nachbehandlung. Mit folgenden Prüfungen wurde die Nachbehandlungsqualität am besten aufgezeigt:

- Karbonatisierungstiefe
- Permeabilität
- Wasserabgabe
- Druckfestigkeit
- Porosität
- Hydratationsgrad

Am wenigsten geeignet waren die Prüfungen

- Verschleiss
- Haftzug
- Nadeleindringung

Eigenschaften, bei denen die Dichtigkeit bzw. Porosität des Betons von grossem Einfluss sind, sind gemäss [16] nachbehandlungsempfindlicher.

Wassermann & Bentur [29] fanden zu Kern [16] z.T. abweichende Erkenntnisse. Bei Untersuchungen an Beton (CEM I, w/z = 0.50), der bei 20 – 30 °C gelagert wurde, zeigte sich nur die Wasseraufnahme und die Luftpermeabilität aber nicht die Druckfestigkeit als geeignet zur Kontrolle der Nachbehandlungsqualität. Zudem fanden sie, dass die Wasserzufuhr zum Beton am wirkungsvollsten zur Verbesserung der Betonqualität war.

In Untersuchungen von Huber [23] wurde die Nachbehandlungsqualität an 150 mm-Würfeln und Prismen (700 x 150 x 150 mm³) anhand verschiedener Eigenschaften geprüft (Abbildung 19). Bei der grössten Verdunstung (schlechtesten Nachbehandlung) waren die Festigkeit und die Prellhärte am niedrigsten sowie die Luftpermeabilität und Karbonisierungstiefe am höchsten. Die Biegezugfestigkeit war bei der Unterwasserlagerung mit Abstand am höchsten, die anderen Nachbehandlungsarten führten insgesamt zu deutlich niedrigeren und ähnlichen Biegezugfestigkeiten. Bei den Proben mit durch Besenstrich texturierten Oberflächen zeigte sich kein klarer Zusammenhang zwischen der Nachbehandlungsqualität und der Rautiefe, der Griffigkeit (SRT-Pendel), dem Prallabrieb (mit Hartgummikugeln) oder der Abwitterung im Frostversuch. Dies deckt sich weitgehend mit den Erkenntnissen von Kern [16].

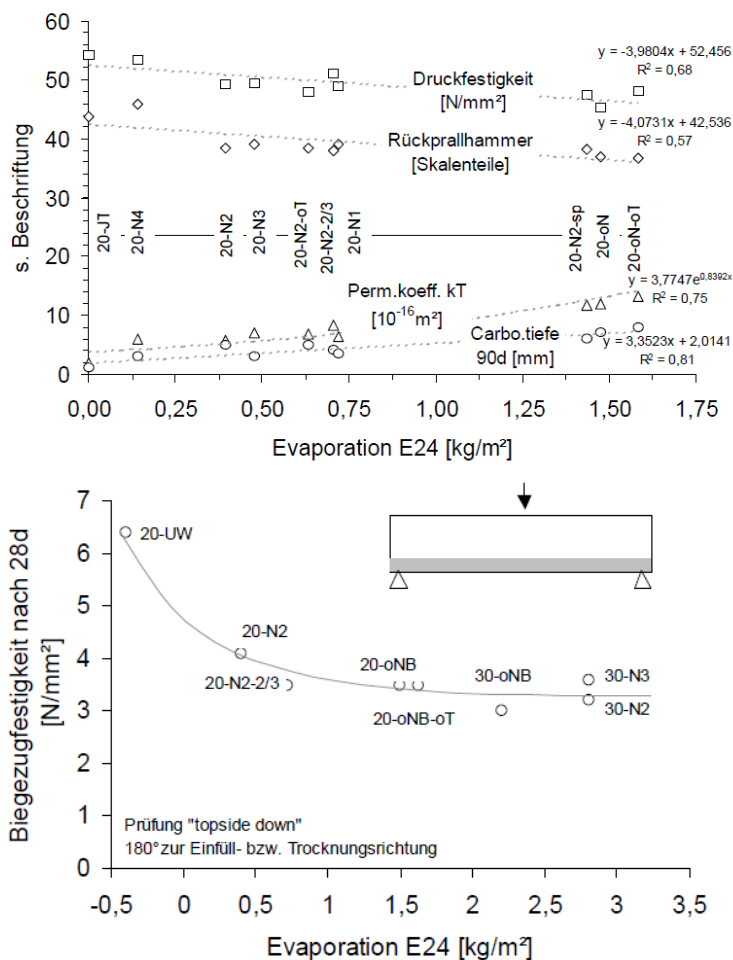


Abbildung 19: Einfluss der Nachbehandlung (JT: Jute, N1-N4: verschiedene NBM, oT: ohne Textur, oN: ohne Nachbehandlung, sp: Auftrag nach 10 h, 2/3: 2/3 der empfohlenen Menge an NBM; UW: unter Wasser) auf Festbetoneigenschaften, bestimmt nach 28 Tagen an getrockneten Proben; nach der Nachbehandlung wurden die Proben bei 20 °C und 65 % r.F. (oberes Bild) bzw. 20 °C/65 % oder 30°C/40 %: unteres Bild) gelagert, aus [23].

Im Gegensatz zu Huber [23] fanden Ehrhardt & Stark [31] keinen Zusammenhang zwischen der Wasserabgabe während der ersten 24 Stunden und den untersuchten Betoneigenschaften, wobei Ehrhardt & Stark [31] nur den Frosttausalz widerstand betrachteten. Dies wurde so gedeutet, dass Huber Eigenschaften untersuchte, die einen grösseren Be-

reich des Randbetons umfassen und sich die Abwitterung im Frosttausalzversuch [31] auf den äussersten Millimeter bzw. Bruchteile davon beschränkt. Zwischen der Porosität ungefähr in diesem Bereich (0.3 – 0.7 mm ab Betonoberfläche) und dem Frosttausalzstand konnte jedoch auch kein Zusammenhang gefunden werden.

Marsh & Ali lagerte unterschiedlich nachbehandelte Betonprismen (250 x 250 x 1000 mm³) mit einer 28 Tage-Würfeldruckfestigkeit von etwa 35 N/mm² während 4 Jahren vor Regen und Sonnenschein geschützt im Freien [26]. Die Nachbehandlung nach dem Ausschalen variierte zwischen „keiner“, Lagerung 2 Tage knapp über 0 °C oder bei ca. 35 °C sowie 3 und 7 Tage unter feuchter Jute. Die Karbonisierungstiefe variierte insgesamt gering und lag zwischen 9.5 und 12.5 mm nach vier Jahren. Die geringste Karbonisierungstiefe wurde bei den Proben mit einer siebentägigen Nachbehandlung mit feuchter Jute und die höchste bei den für 2 Tage bei etwa 35 °C gelagerten Proben ermittelt. Aus diesen und weiteren Untersuchungen folgerten sie, dass

- die Variation der Betoneigenschaften innerhalb von Betonbauteilen grösser als diejenige ist, die durch übliche bzw. fehlende Nachbehandlungen verursacht wurde
- die Zufuhr von flüssigem Wasser am effektivsten ist
- kleine Proben (100 mm Würfel) nicht repräsentativ für Bauteile sind
- die Druckfestigkeit wenig empfindlich auf die Nachbehandlung reagiert.

2.8 Abschätzung der Verdunstungsrate

Zur Illustration verschiedener Einflüsse auf die Austrocknung kann Abbildung 20 verwendet werden: Bei einem 20 °C warmen Beton, der bei 20 °C und 50 % Luftfeuchtigkeit gelagert wird, verdunsten bei einer Windgeschwindigkeit von 20 km/h 0.6 kg/m²·h Wasser. Nimmt man an, dass der Beton ursprünglich 180 kg/m³ Wasser enthielt und das verdunstende Wasser nur aus dem äussersten Zentimeter stammt (der 1.8 kg/m² Wasser enthält), verliert der Beton pro Stunde etwa ein Drittel des Anmachwassers. Umso höher die Luft- und Betontemperatur sowie die Windgeschwindigkeit sind und umso niedriger die Luftfeuchtigkeit ist, desto mehr Wasser verdunstet aus Beton. Es wird dabei weder berücksichtigt, dass sich das Betongefüge infolge Hydratation verdichtet noch welchen Einflüsse unterschiedliche Zemente oder Zusatzstoffe haben. Somit kann Abbildung 20 zu allgemeinen Illustration dienen, aber nicht zu einer präzisen Vorhersage der Wasserverdunstung.

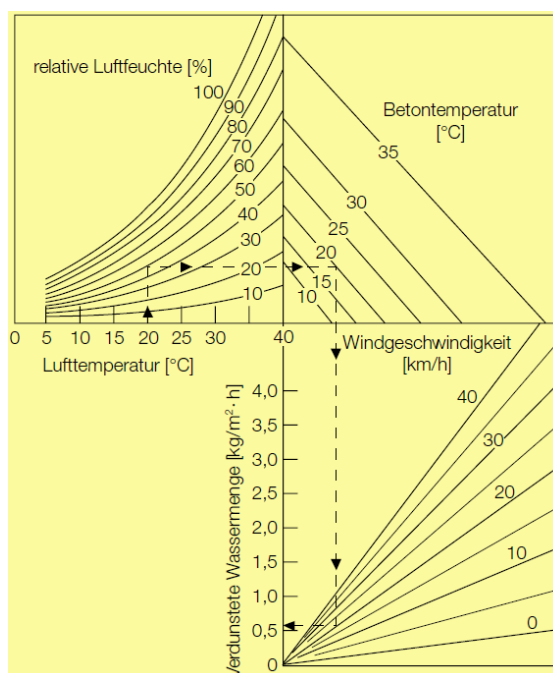


Abbildung 20: Schematischer Zusammenhang zwischen der Temperatur und Feuchtigkeit der Luft, der Betontemperatur und der Windgeschwindigkeit für noch nicht erhärteten (noch plastischen) Beton, aus [15].

Gemäss Abbildung 20 führt eine Änderung der Windgeschwindigkeit von 0 auf 40 km/h zu einer Verzehnfachung der Verdunstung. Für vier Orte sind in Abbildung 21 die mittleren Windgeschwindigkeiten dargestellt. In Zürich treten z.B. Windgeschwindigkeiten von mehr als 3 m/s in deutlich weniger als 5 % der Zeit auf. In den anderen Orten treten Windgeschwindigkeiten zwischen 3 und 5.9 m/s bzw. über 5.9 m/s in bis zu etwa 10 % bzw. 5 % der Zeit auf. Je nach Region kann somit durch die Winde (und insbesondere Föhn) eine verstärkte Wasserdunstung aus dem Beton stattfinden. Erhöht sich die Windgeschwindigkeit von 0 auf ca. 5 bzw. 10 km/h, verdoppelt bzw. verdreifacht sich die Verdunstungsrate (Abbildung 20).

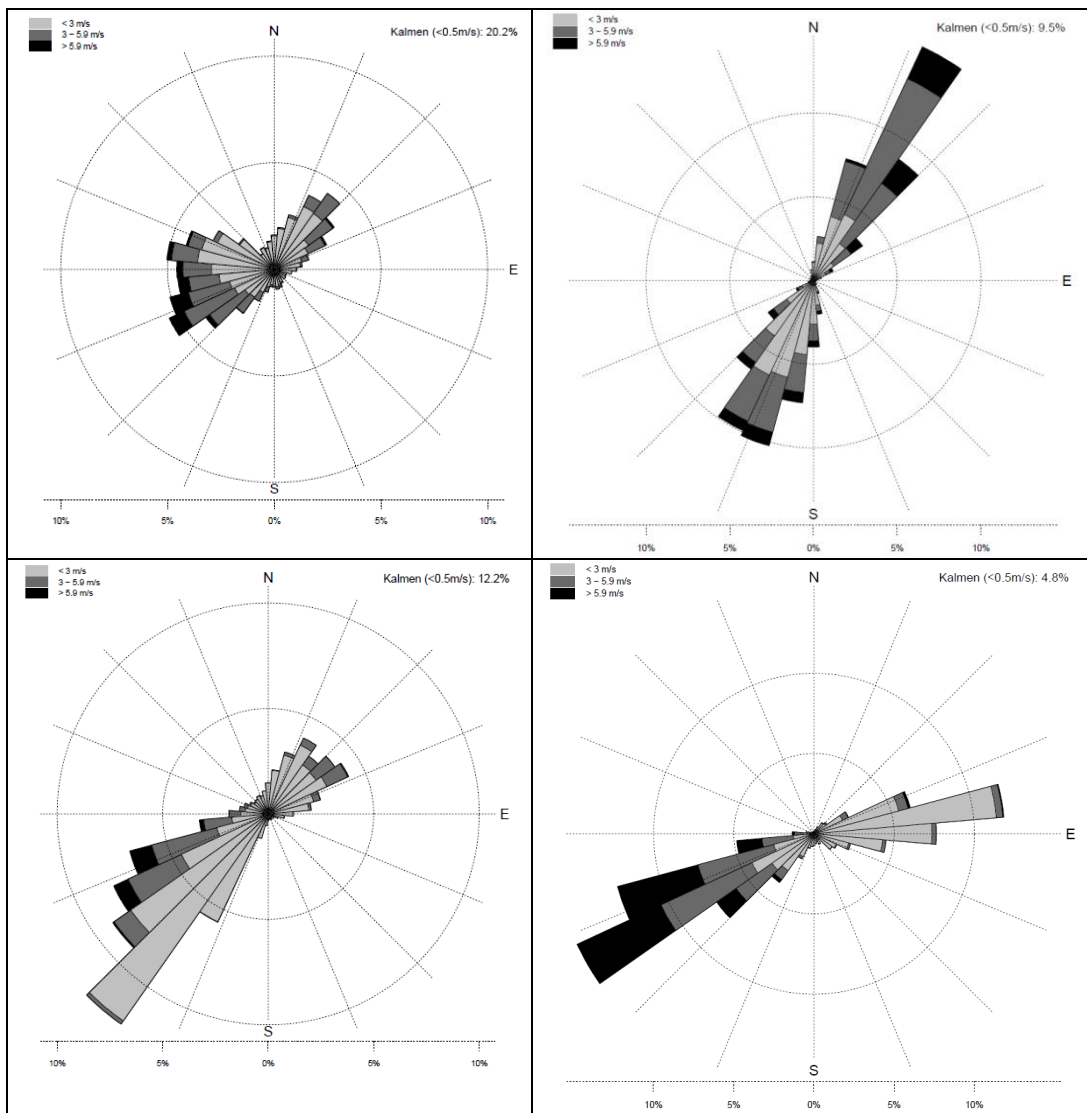


Abbildung 21: Langjährige Jahresmittelwerte der Windrichtung und Windgeschwindigkeit für Zürich-Affoltern (oben links), Chur (oben rechts), Bern (unten links) und Sion (unten rechts), aus [35].

2.9 Fazit

Bei den vorgestellten Untersuchungen wirkten sich folgende Faktoren insgesamt positiv auf die Betonqualität aus:

- Niedrige Lagerungstemperaturen
- Lagerung im Freien mit schwankender Temperaturen und Luftfechtigkeiten
- Schalungseinlagen
- Wasserzufuhr während der Nachbehandlung

Zudem zeigte sich, dass

- von der (mangelnden) Nachbehandlung nur der oberflächennahe Beton beeinflusst wird.
- Beton mit einem hohen w/z-Wert (0.6) aufgrund des hohen Wassergehaltes unempfindlicher auf eine Nachbehandlung reagieren kann als ein Beton mit einem niedrigeren w/z-Wert, da ersterer verdunstendes Wasser durch Wasserzufuhr aus dem Betoninneren teilweise ersetzen kann.
- eine Lagerung bei unter 80 % r.F. die Hydratation des Zementes stark abbremst.
- die Nachbehandlung auf die Art (Reaktivität) des Bindemittels abzustimmen ist.
- Eigenschaften, bei denen die Dichtigkeit bzw. Porosität des Randbetons von grossem Einfluss sind, nachbehandlungsempfindlich sind.

3 Versuche

3.1 Untersuchungen

Es wurden Betone mit zwei sehr unterschiedlich schnell reagierenden Zementen (CEM I und CEM III/B) bei einem w/z-Wert von 0.45 untersucht. Dieser w/z-Wert entspricht „im Mittel“ den geforderten w/z-Werten für die vier Tiefbaubetone mit einem maximal zulässigen w/z-Wert von 0.45 (Betonart F, G nach SN EN 206-1) bzw. 0.50 (Betonart D, E nach SN EN 206-1). Die Betonzusammensetzungen sind in Tabelle 7 aufgeführt. Die Gesteinskörnung stammte vom Kieswerk Mülligen, der Zement CEM I 42,5 N von jura cement und der CEM III/B 32,5 R von Holcim (Schweiz) AG.

Als Probekörper wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm verwendet, da diese einerseits direkt als Prüfkörper zur Druckfestigkeits- und zur Luftpermeabilitätsbestimmung verwendet und andererseits aus gleich nachbehandelten Probekörpern Bohrkerne zur Bestimmung der anderen Festbetoneigenschaften gezogen werden konnten. Würden die Bohrkerne aus Probekörpern mit einer deutlich abweichenden Geometrie zu den Würfeln für die Druckfestigkeit gezogen werden, würde dies zu einem zusätzlichen Einfluss führen, da es von der Geometrie abhängt, welche Temperaturen sich im Beton entwickeln und wie die Austrocknung verläuft. Der Karbonatisierungswiderstand wurde an Prismen der Abmessung 120 x 120 x 360 mm³ ermittelt, da dies den Normvorgaben SIA 262/1 entspricht.

Tabelle 7: Zusammensetzungen der Betone A (mit und ohne künstliche Luftporen) und B.

Sorte	Einheit	A	B	A mit Luft
Zementart		CEM I 42,5 N	CEM III/B 32,5 R	CEM I 42,5 N
Zementgehalt z	[kg/m ³]	320		
Wasser w	[kg/m ³]	144		
Fliessmittel Viscocrete 3082	[% v. z.]	0.10	0.40	0.25
Luftporenbildner FroV5A	[% v. z.]	-	-	0.15
w/z	[-]	0.45		
Gesteinskörnung	[%]	0/2: 12 %, 0/4: 24 %, 4/8: 8 %, 8/16: 24 %, 16/32: 32 %		

Die Frischbetonprüfungen erfolgten gemäss der Normenreihe SN EN 12350. Die Festbetonprüfungen wurden gemäss den Angaben in Tabelle 8 durchgeführt. Die Ergebnisse der Festbetoneigenschaften stellen Einzelwerte (Druckfestigkeit) oder Mittelwerte (Dauerhaftigkeitseigenschaften) dar. Die Anzahl an Prüfkörpern bei den Dauerhaftigkeitseigenschaften wurde gemäss Norm SIA 262/1 gewählt. Die Messung der Luftpermeabilität erfolgte an zwei geschalteten Seitenflächen pro Würfel; aus den zwei Messwerten wurde der geometrische Mittelwert gebildet.

Bei der Prüfung des Chloridwiderstandes und der Wasserleitfähigkeit sind gemäss Norm SIA 262/1 die äussersten 5 – 10 mm abzuschneiden und der darunter befindliche Beton zu prüfen. Da die Nachbehandlung insbesondere die äusserste Betonschicht (max. 1 – 2 cm) beeinflusst (Abbildung 5, Abbildung 12), wurde bei einzelnen Prüfungen diese äusserste Schicht nicht abgeschnitten. Dies ist dann bei den Ergebnissen vermerkt („mit Randbeton“).

Bei der Prüfkörpern zur Bestimmung der Druckfestigkeit wurde das Nachbehandlungsmittel nicht entfernt, bei den anderen Prüfungen wurde es mit einem Mikrofasertuch sorgfältig abgerieben.

Tabelle 8: Festbetonprüfungen und Anforderungen gemäss SN EN 206-1 (Grenzwert für Mittelwert beim Konformitätsnachweis) bzw. SIA 262/1 für die Luftpermeabilität.

Prüfung	Prüfnorm	Anforderung
Druckfestigkeit	SN EN 12390-3	C30/37
Karbonatisierungswiderstand	SIA 262/1, Anhang I	5.0 mm/a ^{1/2}
Chloridwiderstand	SIA 262/1, Anhang B	10 x 10 ⁻¹² m ² /s
Wasserleitfähigkeit	SIA 262/1, Anhang A	10 g/m ² h
Frost-Tausalzwiderstand	SIA 262/1, Anhang C	max. 200 bzw. 600 g/m ²
Luftpermeabilität	SIA 262/1, Anhang E	≤ 0.5 10 ⁻¹⁶ m ²

Die Prüfkörper wurden bei verschiedenen Temperaturen und Luftfeuchten gelagert:

- Lagerung 1 bei konstanten Temperaturen und Luftfeuchten im Labor
- Lagerung 2 bei unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchten im Freien.

Mit den Lagerungen 1 und 2 wurde untersucht, ob und ggf. inwieweit sich zwischen den konstanten Klimata (Lagerung 1) und den variablen Klimata im Freien (Lagerung 2) ähnliche bzw. unterschiedliche Erkenntnisse ergeben.

Folgende Nachbehandlungsarten wurden geprüft:

- Unter Folie während unterschiedlich langer Zeiträume
- In Wasser während unterschiedlich langer Zeiträume
- Schalungseinlage (Zemdrain MD); die Nachbehandlung war nach dem Ausschalen nach 1 Tag beendet.
- Nachbehandlungsmittel (Mastercure 216 mit 150 g/m² Auftragsmenge; zur Kontrolle der Auftragsmenge wurde die Sprühflasche jeweils vor und nach dem Auftrag gewogen); es handelt sich um ein paraffinhaltiges Nachbehandlungsmittel Typ BM und VM-K nach TL NBM-StB für Verkehrsflächen (siehe Abschnitt 2.3).

Die Länge der Nachbehandlung (unter Folie oder in Wasser) wurde auf die Anforderungen der Tabelle 23 der Norm SIA 262 (Tabelle 3) und die Festigkeitsentwicklung abgestimmt. Bei Lagerung 1 wurde die Wasserlagerung miteinbezogen, da dies erfahrungsgemäss die beste Nachbehandlung darstellt. Dies ermöglichte einen Vergleich der Auswirkung der Folien- und Wasserlagerung. Da eine Lagerung unter Wasser im Regelfall auf Baustellen nicht möglich oder wegen Ausblühungen gewünscht ist, wurde diese Art der Nachbehandlung bei der Lagerung 2 weggelassen.

Die Prüfkörper für die Frostausalzwiderstands-, die Chloridwiderstands- und die Wasserleitfähigkeitsprüfung wurden immer vor dem Start 7 Tage unter Wasser bei 20 °C gelagert. Dauerte die Nachbehandlung länger als 21 Tage (selten 28 Tage), wurde somit die Prüfung nicht im Alter von 28 Tagen sondern erst nach 35 gestartet.

Um den von der Norm SIA 262/1 für die Luftpermeabilität geforderten tiefen Feuchtigkeitsgehalt des Betons zu erhalten, wurden die Proben ab dem Alter von ca. 28 Tagen bei 20 °C und 70 % r.F. bis zum Prüfalter von ca. 2 Monaten gelagert.

Zur Überprüfung der Repräsentativität der Lagerungsbedingungen bei den Versuchen sind in Abbildung 22 die langjährigen Monatsmittelwerte der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit für drei Orte im Mittelland dargestellt. Die mittleren Temperaturen variieren zwischen etwa 0 und 20 °C und die mittleren Luftfeuchtigkeiten zwischen 70 und 85 %. Daraus kann geschlossen werden, dass die gewählten Lagerungsbedingungen bei Lagerung 1 (Abschnitt 3.2.1) und 2 (Tabelle 12) für einen Grossteil des Mittellandes typische Klimabedingungen darstellen.

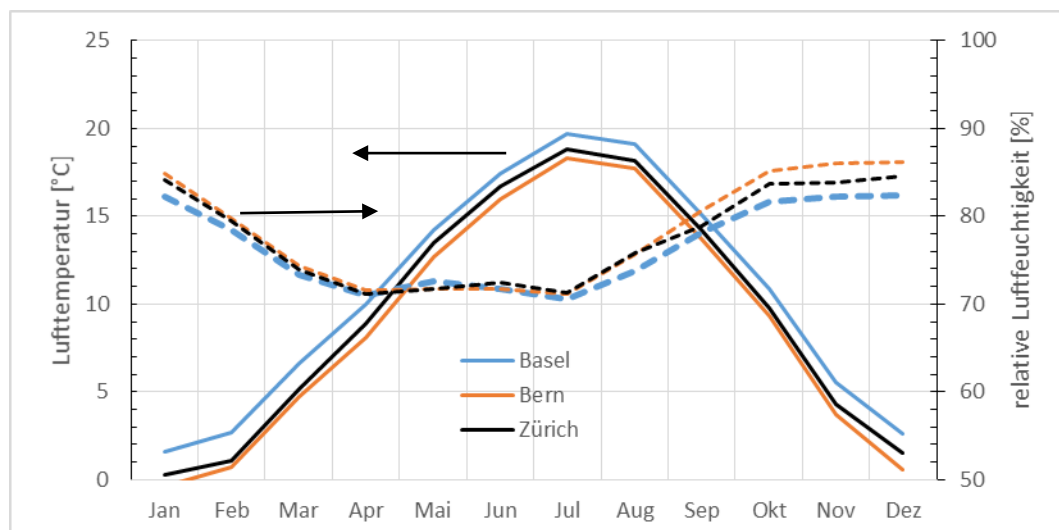


Abbildung 22: Langjährige Monatsmittelwerte der Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, aus [35].

3.2 Ergebnisse Lagerung 1

3.2.1 Frischbetoneigenschaften und Lagerung

Für die Untersuchungen bei Lagerung 1 wurden die Betonsorten A und B mit den Zusammensetzungen gemäss Tabelle 7 hergestellt und die in Tabelle 9 aufgeführten Frischbetoneigenschaften ermittelt. Die Lagerung erfolgte bei 20 °C und 60 % r.F. bzw. 6 °C und 80 % r.F. Die Lufttemperatur variierte mit ± 1 °C und die Luftfeuchtigkeit mit ± 3 %. Nach dem Ende der Nachbehandlung bei Lagerung 1 lagerten die bei 20 °C gelagerten Proben bei 20 °C / 70 % r.F. und die bei 6 °C gelagerten bei 6 °C / 80 % r.F. Beton A wies eine Druckfestigkeit auf, die mindestens einer Druckfestigkeitsklasse C35/45 und Beton B diejenige die ungefähr C25/30 entspricht. Die niedrige Druckfestigkeit des Betons B wurde durch die ungewöhnlich langsame Reaktivität der ersten gelieferten Zementprobe verursacht und ist nicht typisch für den Zement CEM III/B. Bei der zweiten Lieferung war der Zement CEM III/B deutlich reaktiver (Tabelle 11).

Tabelle 9: Frischbetoneigenschaften und Druckfestigkeiten der Betone A und B.

Beton	Einheit	A (CEM I)	B (CEM III/B)
Datum	[-]	13.3.12, 8. Und 10.10.12	19.3.12; 22. Und 31.10.12
Rohdichte	[kg/m ³]	2420 – 2460	2410 – 2450
Luftgehalt	[Vol.-%]	1.3 – 1.5	1.0 – 1.3
Ausbreitmass	[mm]	350 – 390	300 – 410
Lagerung		20 °C, 70 % r.F. und 6 °C und 82 % r.F.	
Druckfestigkeit f_{cw2}	[N/mm ²]	33	6
Druckfestigkeit f_{cw28}	[N/mm ²]	59	39
$r = f_{cw2}/f_{cw28}$	[-]	0.57	0.16

In Abbildung 23 ist die Entwicklung der Druckfestigkeit mit der Zeit bei 20 °C Lagerung unter Folie dargestellt. Der Beton A (CEM I) erreichte nach einem Tag bereits mehr als 70 % der charakteristischen Druckfestigkeit, beim Beton mit CEM III/B dauert dies (mit dem reaktiveren CEM III/B aus der 2. Lieferung) ca. 4 Tage. Vergleicht man die Druckfestigkeitsentwicklungen und die daraus resultierenden Nachbehandlungsdauern gemäss Tabelle 22 der SIA 262 (Tabelle 2) mit den Nachbehandlungsdauern der Tabelle 23 der SIA 262 (Tabelle 3), zeigen sich deutliche Unterschiede (Tabelle 10). Wird die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit als Basis für die Dauer der Nachbehandlung genommen, sind sehr viel kürzere Nachbehandlungsdauern als gemäss Tabelle 23 der SIA 262 möglich.

Tabelle 10: Erforderliche Nachbehandlungsdauern gemäss Tabellen 22 und 23 der Norm SIA 262 für die Betone A und B mit den Zementen der jeweils 2. Lieferung, bei Lagerung bei 20 °C; sind in der 2. Spalte (Tabelle 22) in Klammer die am Ende der Nachbehandlung zu erreichenden Druckfestigkeiten (Prozent von charakteristischer Druckfestigkeit, hier 37 N/mm²) angegeben.

Nachbehandlungs-kategorie	Nachbehandlungsdauer [Tage] nach	
	Tabelle 22	Tabelle 23
Beton A (CEM I)		
2	< 1 (35 %)	1
3	< 1 (50 %)	2
4	< 1 (70 %)	5
Beton B (CEM III/B)		
2	2 (35 %)	5
3	3 (50 %)	7
4	4 (70 %)	12

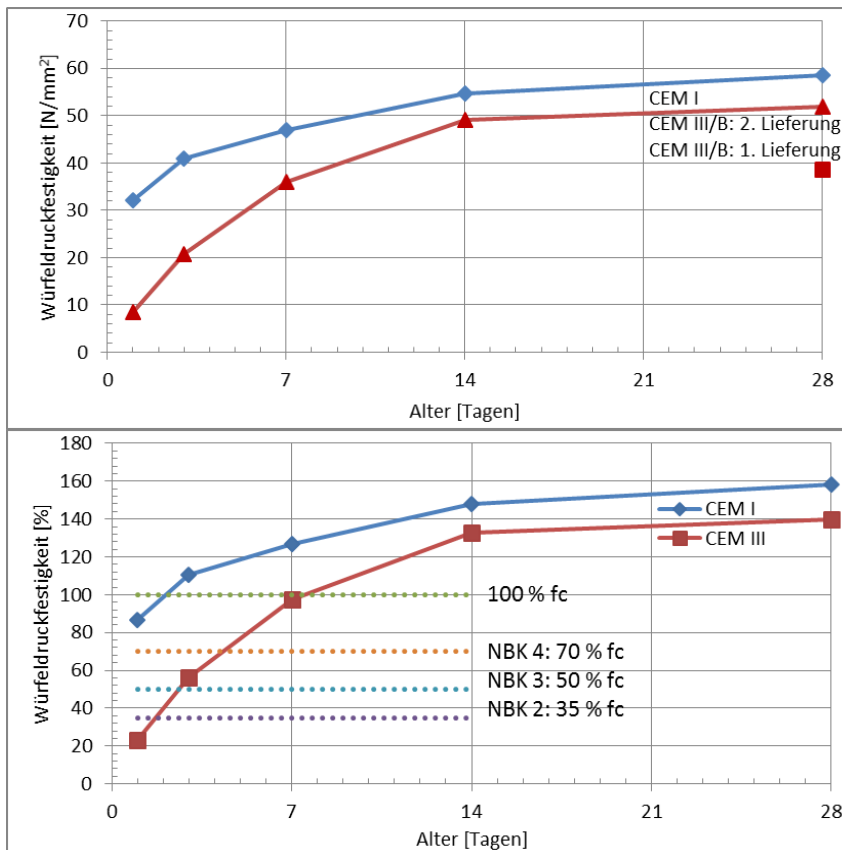


Abbildung 23: Würfeldruckfestigkeit der Betonsorten A (CEM I) und B (CEM III/B) in Abhängigkeit von der Zeit bei 20 °C Lagerung unter Folie im Labor mit Zement der jeweils zweiten Anlieferung; zum Vergleich ist im oberen Bild die 28 Tage-Druckfestigkeit von Beton B nach 28 Tagen mit CEM III/B der 1. Lieferung dargestellt; fc: charakteristische Würfeldruckfestigkeit von 37 N/mm².

Die nachfolgenden Ergebnisse sind in Abhängigkeit von der Dauer der Nachbehandlung dargestellt. Wurden Schalungseinlagen oder Nachbehandlungsmittel verwendet, sind die Ergebnisse mit dem Alter 1 Tag dargestellt, da das Nachbehandlungsmittel 1 Tag nach der Herstellung auf die Schafflächen aufgetragen wurde oder die Nachbehandlung mit der Schalungseinlage 1 Tag nach der Herstellung (mit dem Ausschalen) beendet wurde. Weitere Abbildungen sind im Anhang enthalten.

3.2.2 Festbetoneigenschaften

Sowohl bei der Lagerung bei 6 °C als auch bei 20 °C nahm bei Beton A und B die Druckfestigkeit mit zunehmender Nachbehandlungsdauer zumeist kaum zu (Abbildung 24). Die niedrigsten Druckfestigkeiten wurden bei der kürzesten Lagerung unter Folie und die höchsten bei 7 bis 28tägiger Wasserlagerung erzielt. Bei der schlechtesten Nachbehandlung bei 6 °C wurden höhere Druckfestigkeiten als bei der besten Nachbehandlung bei 20 °C erzielt. Die Lagerung bei 6 °C führte beim Beton A (CEM I) zu etwa 10 % und beim Beton B (CEM III/B) zu etwa 20 % höheren Druckfestigkeiten als die Lagerung bei 20 °C. Dies stimmt mit Untersuchungen von [12], [33] und [36] überein. Beton B (CEM III/B) wies bei allen Nachbehandlungen deutlich niedrigere Druckfestigkeiten als Beton A (CEM I) auf, was mit der Zementfestigkeitsklasse begründet werden kann. Die 28 Tage-Druckfestigkeit des Betons B mit CEM III/B in Abbildung 24 ist niedriger als die in Abbildung 23 dargestellte. Die Ursache hierfür ist, dass die erste Lieferung des Zementes CEM III/B (Versuchsergebnisse in Abbildung 24) zu einer geringeren 28 Tage-Beton-druckfestigkeit (ca. 40 N/mm²) als die zweite Lieferung mit ca. 55 N/mm² (Versuchsergebnisse in Abbildung 23) führte.

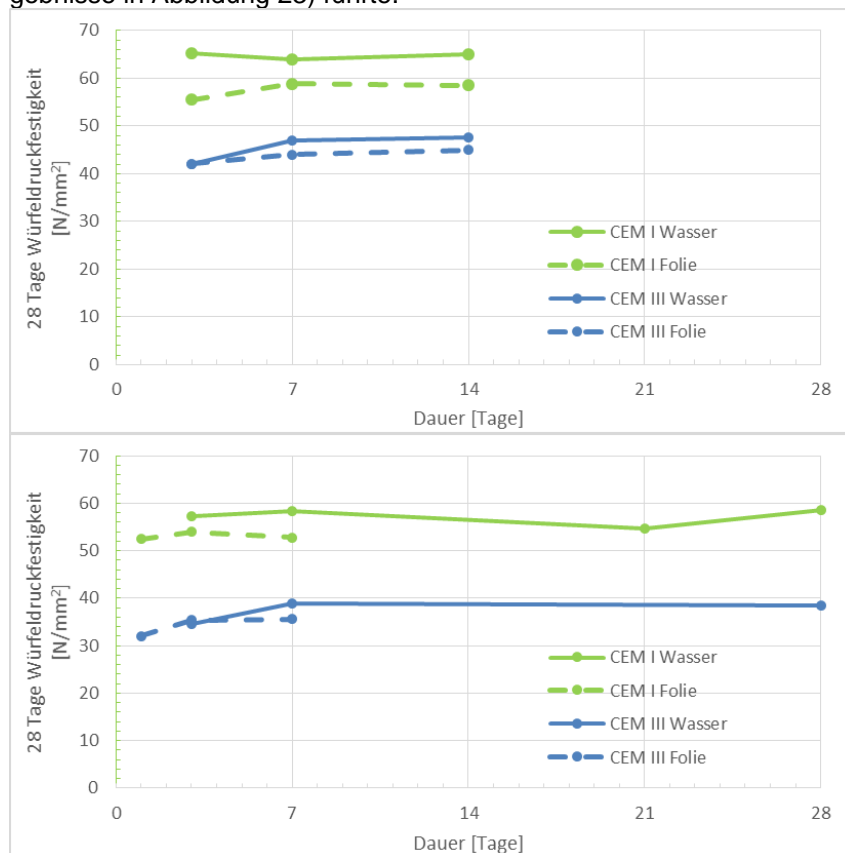


Abbildung 24: 28 Tage Würfeldruckfestigkeit der Betonsorten A und B in Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur (oben 6 °C, unten 20 °C) und der Nachbehandlungsart und -dauer bei Laborlagerung.

Bei der Wasserleitfähigkeit zeigte sich ein ähnliches Bild wie bei der Druckfestigkeit. Bei der Lagerung bei 6 °C resultierten bei beiden Betonen niedrigere Wasserleitfähigkeiten als bei der Lagerung bei 20 °C (Abbildung 25, Abbildung 37). Ein Einfluss der Nachbehandlungsdauer auf die Wasserleitfähigkeit zeigte sich bei der Lagerung bei 6 °C kaum, jedoch bei der 20 °C-Lagerung. Sowohl die Schalungseinlage als auch das Nachbehandlungsmittel wirkten sich positiv aus. Wurde der Randbeton, wie in der Norm SIA 262/1 gefordert, abgeschnitten, war die Wasserleitfähigkeit beim Beton A (CEM I) zumeist ca. 25 % niedriger im Vergleich zur nicht normkonformen Prüfung mit Randbeton. Beim Beton B (CEM III/B) zeigte sich nur bei der Unterwasserlagerung eine geringere Wasserleitfähigkeit, wenn der Randbeton abgeschnitten wurde. Der Einfluss des Randbetons kann folgende Ursachen haben:

- Einfluss der Nachbehandlung auf die Qualität des Randbetons
- geometrischer Effekt: Der Randbeton weist aus geometrischen Gründen einen höhe-

ren Anteil an Zementstein und Mörtel und einen geringeren an Gesteinskörnung im Vergleich zum randferneren Beton (Abstand $\geq D_{max}$) auf (siehe auch Abbildung 15).

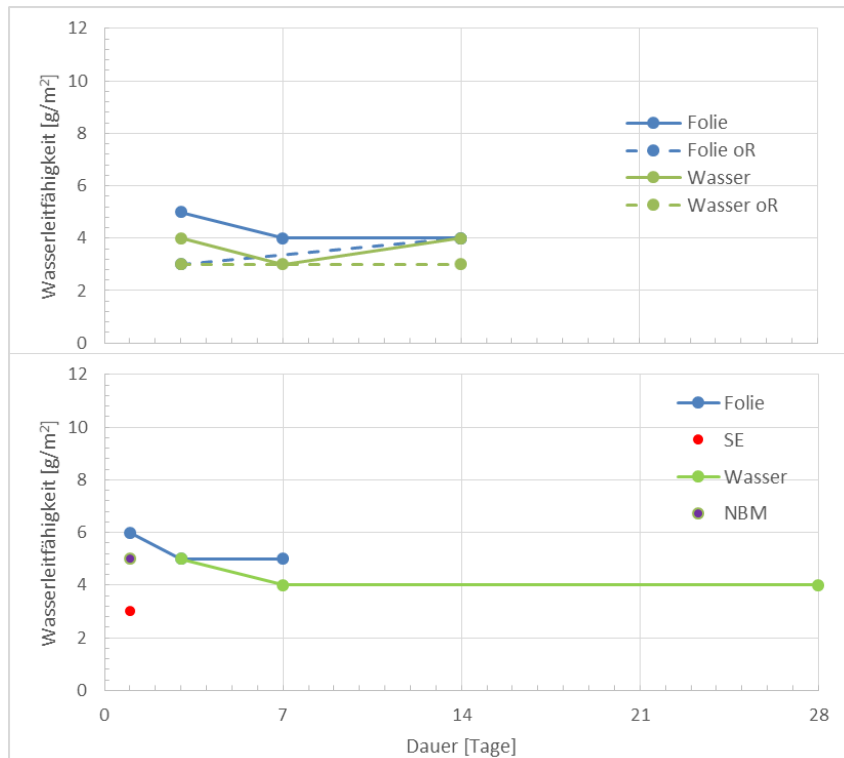


Abbildung 25: Wasserleitfähigkeit der Betonsorte A (mit CEM I) in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsart und -dauer beim einer Lagerungstemperatur von 6 °C (oben) und 20 °C (unten); oR: ohne Randbeton.

Der Gehalt an Hydratationsporen war beim Beton A (CEM I) ähnlich wie beim Beton B (CEM III/B) (Abbildung 39). Die Lagerungstemperatur von 20 °C führte im Vergleich zu der bei 6 °C bei beiden Betonen zu leicht höheren Gehalten (ca. 5 – 10 %) an Hydratationsporen. Ein Einfluss der Nachbehandlungsart und -dauer war kaum erkennbar. Die Schalungseinlage wirkte sich klar positiv, das Nachbehandlungsmittel jedoch kaum aus. Wurde der Randbeton, wie in der Norm SIA 262/1 gefordert, abgeschnitten, war im Vergleich zur Prüfung mit dem 5 – 10 mm dicken Randbeton der Gehalt an Hydratationsporen im Schnitt etwa 5 – 10 % niedriger. Weitere Hinweise zum Einfluss des Randbetons wurden bei der Wasserleitfähigkeit diskutiert (s.o.).

Beim Chloridmigrationskoeffizienten ergab sich der bekannte, sehr ausgeprägte Einfluss der Zementart. Beton mit CEM I weist einen deutlich höheren Chloridmigrationskoeffizienten (schlechteren Widerstand gegenüber eindringenden Chloriden) als Beton mit CEM III/B auf (Abbildung 26, Abbildung 42). Der Einfluss der Nachbehandlungsart und -dauer auf den Chloridmigrationskoeffizienten war bei der 20 °C-Lagerung klarer erkennbar als bei der 6 °C Lagerung. Sowohl die Schalungseinlage als auch das Nachbehandlungsmittel waren sehr effektiv. Bei einer kurzen Nachbehandlungsdauer wurden bei der Prüfung an Prüfkörpern ohne Randbeton ein zumeist niedrigerer Chloridmigrationskoeffizient als bei der Prüfung von Prüfkörpern mit 5 – 10 mm Randbeton ermittelt. Bei einer längeren Nachbehandlung war der Einfluss mit/ohne Randbeton uneinheitlich und lag im Bereich der Prüfstreuung.

Die Zementart hatte erwartungsgemäss auch einen deutlichen Einfluss auf den Karbonatisierungskoeffizienten (Abbildung 27, Abbildung 44). Beton A (CEM I) wies auch ohne Nachbehandlung einen geringeren Karbonatisierungskoeffizienten, d.h. grösseren Widerstand gegenüber der Karbonatisierung, als Beton B (CEM III/B), auch bei bester Nachbehandlung auf. Bei beiden Betonen wirkte sich eine längere Nachbehandlung zumeist positiv auf den Karbonatisierungskoeffizienten aus. Eine Lagerung unter Wasser wirkte sich ebenfalls positiv aus. Sowohl die Schalungseinlage als auch das Nachbehandlungsmittel

fürten bei Beton B (CEM III/B) zu einem niedrigen Karbonatisierungskoeffizienten, bei Beton A (CEM I) jedoch nicht (Abbildung 43, Abbildung 44).

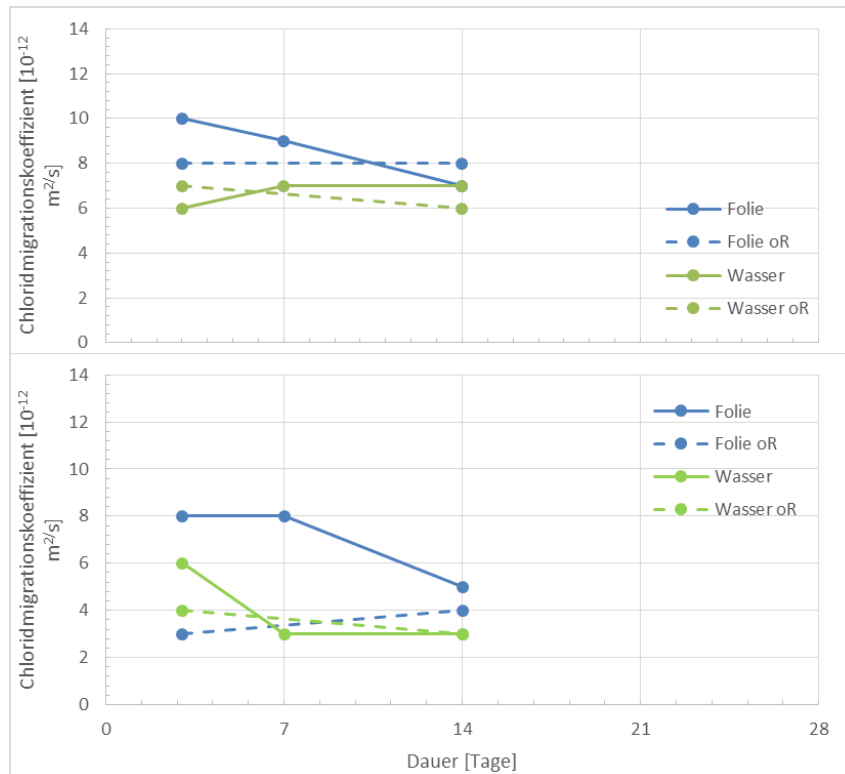


Abbildung 26: Chloridmigrationskoeffizient der Betonsorten A mit CEM I (oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 6 °C und der Nachbehandlung bei Laborlagerung; oR = ohne Randbeton.

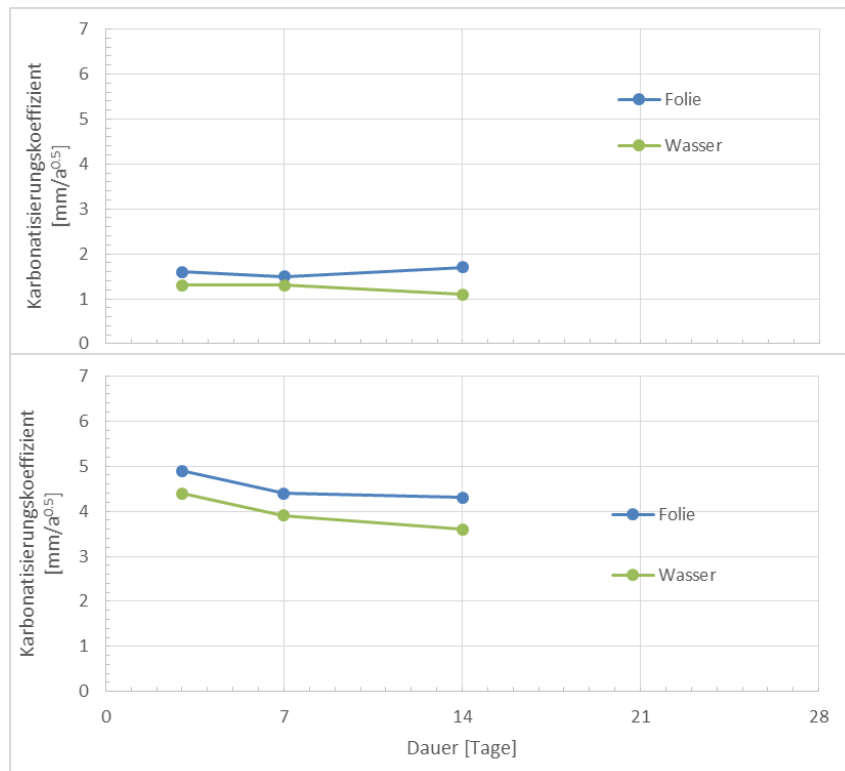


Abbildung 27: Karbonatisierungskoeffizient der Betonsorten A (CEM I) (oben) und B (CEM III/B) (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 6 °C und unterschiedlicher Nachbehandlungsart und -dauer bei Laborlagerung.

Bei der Frosttausalzprüfung hatte der Beton A (CEM I) bei 6 °C Lagerungstemperatur, unabhängig von der Nachbehandlung, einen hohen Frosttausalz widerstand (Abbildung 45); bei der Lagerung bei 20 °C wurde dies nur bei der Normlagerung (28 Tage unter Wasser) und der Schalungseinlage erreicht (Abbildung 46). Beton B (CEM III/B) wies bei der Lagerung bei 20 °C ebenfalls nur bei der Normlagerung und bei der Schalungseinlage einen hohen Frosttausalz widerstand auf (Abbildung 28). Mit dem Nachbehandlungsmittel wurde bei beiden Betonen eine geringere Abwitterung (in etwa mittlere Frosttausalzbeständigkeit) als bei den Lagerungen unter Folie oder bis zu 7 Tage im Wasser erreicht. Bei Beton B (CEM III/B) war der Einfluss der Lagerungstemperatur erkennbar, wenngleich auch deutlich weniger ausgeprägt als bei Beton A (CEM I).

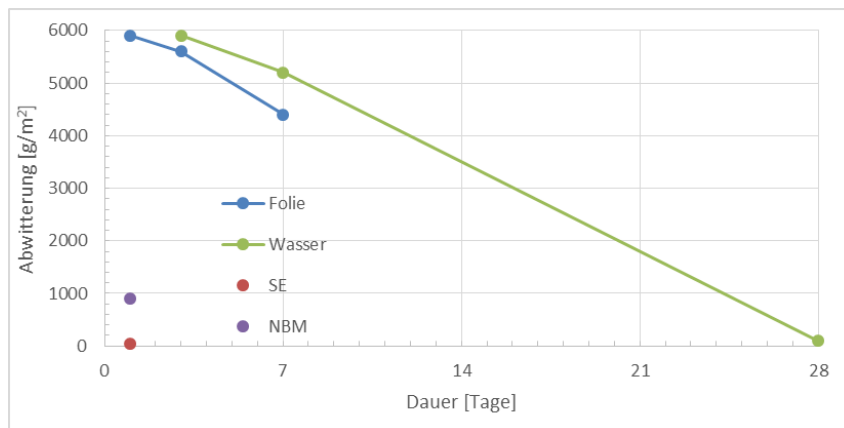


Abbildung 28: Abgewitterte Menge bei der Frosttausalzprüfung der Betonsorte B (CEM III/B) bei einer Lagerungstemperatur von 20 °C und unterschiedlicher Nachbehandlungsart und –dauer bei Laborlagerung.

Die Luftpermeabilität wies einen deutlichen Einfluss der Nachbehandlungsart und –dauer auf. Bei der Lagerung bei 20 °C (Abbildung 29) war die Luftpermeabilität zumeist höher als bei der Lagerung bei 6 °C (Abbildung 48). Der Einfluss der Zementart war weniger ausgeprägt. Die Schalungseinlage wirkte sich positiv auf die Luftpermeabilität aus (niedrigere Werte), das Nachbehandlungsmittel erwies sich bei Beton A (CEM I), im Gegensatz zu Beton B (CEM III/B), als wenig effektiv.

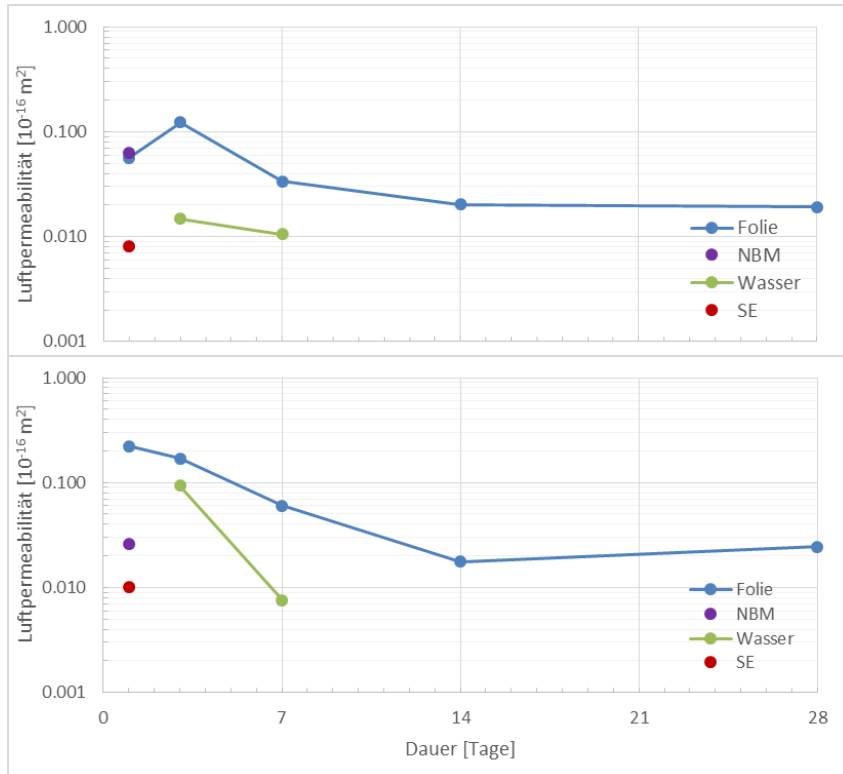


Abbildung 29: Luftpermeabilität der Betonsorten A mit CEM I (oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 20 °C und der Nachbehandlungsart und –dauer bei Laborlagerung.

3.3 Ergebnisse Lagerung 2

3.3.1 Frischbetoneigenschaften und Lagerung

Für die Untersuchungen bei der Lagerung 2 wurden die Betonsorten A (CEM I) und B (CEM III/B) sowie die Betonsorte A mit Luftporenbildner mit Zement aus einer 2. Lieferung gemäss Tabelle 7 hergestellt und die in Tabelle 11 aufgeführten Frischbetoneigenschaften ermittelt. Drei Lagerungsarten wurden angestrebt:

- I: max. ca. 10 °C,
- II: ca. 15 °C,
- III: ca. 20 °C).

Nach dem Ende der Nachbehandlung wurden die Proben weiter im Freien gelagert.

Im Vergleich zur Betonherstellung für die Lagerung 1 (im Labor) wurden für die Lagerung 2 (im Freien) bei Beton A ähnliche und bei Beton B deutlich höhere Druckfestigkeiten ermittelt (Tabelle 6). Die Unterschiede beim Beton B konnten auf geänderte Zementeigenschaften bei den zweimaligen Zementanlieferung zurückgeführt werden. Die Druckfestigkeiten der zwei Betone ohne Luftporenbildner entsprechen ungefähr einer Druckfestigkeitsklasse C35/45 und die des Betons A (CEM I) mit LP einer Druckfestigkeitsklasse C25/30.

Tabelle 11: Frischbetoneigenschaften und Druckfestigkeiten der im Freien gelagerten Betone A (mit und ohne Luftporenbildner LP) und B.

Sorte	Einheit	A (CEM I)	B (CEM III/B)	A (CEM I) mit LP
Datum	[-]	8.4., 22.4., 8.7.2013	8.4., 22.4., 8.7.2013	9.4., 9.7.2013
Rohdichte	[kg/m ³]	2410 – 2450	2330 – 2460	2320
Luftgehalt	[Vol.-%]	1.0 – 1.7	0.5 – 1.8	5.0 – 5.8
Ausbreitmass	[mm]	390 – 440	360	400 – 450
Druckfestigkeit fcw2	[N/mm ²]	37	16	24
Druckfestigkeit fcw28	[N/mm ²]	59	52	40
r = fc2/fc28	[-]	0.63	0.31	0.60

In Tabelle 12 sind Kennwerte zum Wetter während der Lagerung im Freien angegeben. Im Anhang I (Abbildung 34ff) ist der Wetterverlauf grafisch dargestellt. Die Distanz (Luftlinie) zwischen der TFB AG in Wildegg und der Wetterstation in Niederlenz beträgt 2.8 km, die Höhe über Meer ist bei beiden Orten bis auf wenige Meter identisch. Stichprobenartige Kontrollmessungen der Temperatur und Luftfeuchtigkeit an der Auslagerungsstelle zeigten, dass die Messwerte der Wetterstation Niederlenz auch für die Auslagerungsstelle bei der TFB AG zutreffen. Aus Tabelle 12 ist ersichtlich, dass zwischen der Lagerung I vom 8.4. bis 5.5.2013 und der Lagerung II vom 22.4. – 19.5.2013 geringere Unterschiede, als erwartet wurden, auftraten. Die Minimaltemperaturen waren während der ersten Lagerungsperiode (I) deutlich niedriger und die Niederschläge höher als bei der zweiten Lagerungsperiode (II). Die dritte Lagerungsperiode (III) unterschied sich u.a. bei den Temperaturen deutlich von den zwei vorherigen.

Tabelle 12: Wetter während der Lagerungarten I, II, III gemäss Wetterstation Niederlenz (www.wetterstation-niederlenz.ch).

Lagerung	Woche	Temperatur [°C]			Relative Luftfeuchtigkeit [%]			Regen [mm]	Sonnenschein [h]
		Minim.	Mittel	Maxim.	Minim.	Mittel	Maxim.		
I	8.-14.4.13	-0.6	9.3	23.0	28	64	92	35.3	33:50
	15.-21.4.13	0.6	12.6	25.2	22	73	95	67.8	36:20
	22.-28.4.13	4.6	12.0	24.8	24	73	93	26.4	41:20
	29.4.-5.5.13	7.4	12.4	22.1	40	80	90	7.9	20:50
	Mittelwert	3.0	11.6	24.8	29	73	93	34	33
II	22.-28.4.13	4.6	12.0	24.8	24	73	93	26.4	41:20
	19.4.-5.5.13	7.4	12.4	22.1	40	80	90	7.9	20:50
	6.-12.5.13	7.3	13.8	24.0	21	72	93	48.8	38:50
	13.-19.5.13	5.1	13.1	22.3	26	70	92	7.9	42:30
	Mittelwert	6.1	12.8	23.3	28	74	92	23	35
III	8.-14.7.13	11.9	21.5	28.6	28	58	89	0	85:00
	15.-21.7.13	13.3	22.3	31.1	26	58	89	0	74:00
	22.-28.7.13	16.0	24.5	35.8	22	60	91	6.9	62:00
	29.7.-4.8.13	13.4	21.7	34.7	25	71	94	72.9	63:30
	Mittelwert	13.7	22.5	32.6	25	62	91	20	71

3.3.2 Festbetoneigenschaften

Beton A (CEM I) erreichte bei jedem Prüfalter die höchste und Beton A (CEM I) mit LP die niedrigste Druckfestigkeit (Abbildung 30, Abbildung 49). Beton A (CEM I) mit LP hatte einen um ca. 4 Vol.-% höheren Luftgehalt bei der Frischbetonprüfung, wodurch sich der Festigkeitsunterschied von etwa 10 – 15 N/mm² zum Beton A (CEM I) (ohne LP) erklären lässt. Beton B (CEM III/B) weist aufgrund des Zementes mit einer im Vergleich zum CEM I niedrigeren Zementdruckfestigkeitsklasse (siehe Tabelle 7 auf S. 41) die niedrigere Druckfestigkeit auf. Der Einfluss der Lagerungsart ist im Vergleich zur Laborlagerung (Abbildung 24) weniger ausgeprägt; bei Beton B (CEM III/B) und Beton A (CEM I) mit LP wurden bei hohen Lagerungstemperaturen (III) bei jedem Prüfalter zumeist die höchsten Druckfestigkeiten gemessen; bei Beton A (CEM I) wurden, im Gegensatz dazu, ab dem Alter von 21 Tagen bei hohen Lagerungstemperaturen (III) niedrigere Druckfestigkeiten erreicht.

Die Prüfkörper, die mit einem Nachbehandlungsmittel behandelt wurden, wiesen teilweise die niedrigsten Druckfestigkeiten auf. Bei diesen Prüfkörpern wurde das Nachbehandlungsmittel nicht entfernt. Dadurch wurde die Querdehnungsbehinderung reduziert und eine niedrigere Druckfestigkeit resultierte (Abbildung 49).

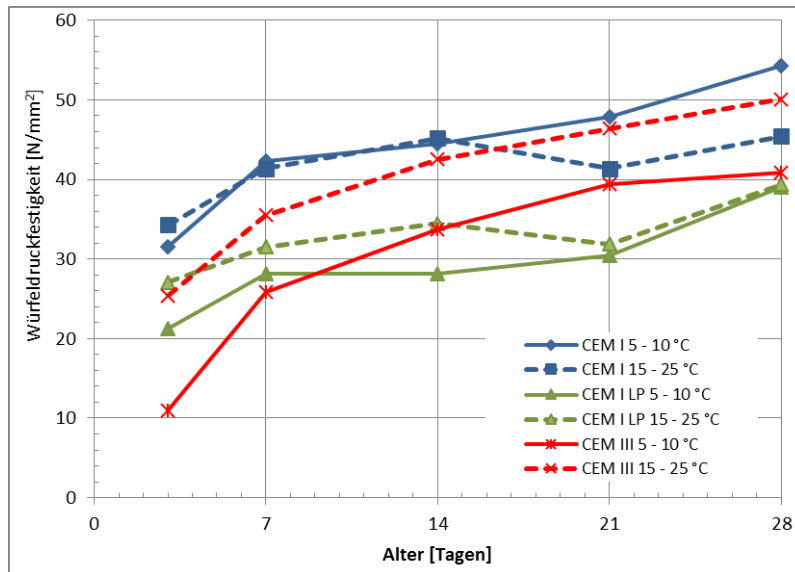


Abbildung 30: Einfluss der Lagerungstemperatur der drei Betonsorten auf die Würfel-Druckfestigkeit bei einer Nachbehandlung von 7 Tagen unter Folie; es wurde jeweils ein Würfel geprüft.

Die Zementart weist den grössten Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten auf (Abbildung 50). Weder die Lagerungsart noch die Nachbehandlungsdauer hatten einen klaren Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten bei Beton B (Abbildung 31) und den Betonen A (mit/ohne Luftporenbildner). Das Nachbehandlungsmittel zeigte vor allem beim Beton B (CEM III/B) und teilweise bei beiden Betonen A (CEM I mit/ohne Luftporenbildner) einen positiven Einfluss (Abbildung 31). Der Beton mit künstlich eingeführten Luftporen wies die höchsten Chloridmigrationskoeffizienten (niedrigsten Widerstand gegen eindringende Chloride) auf (Abbildung 50).

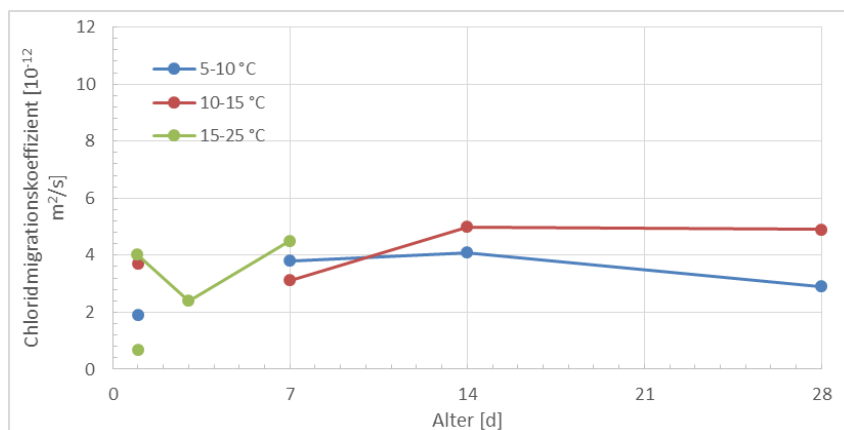


Abbildung 31: Einfluss der Nachbehandlung (unter Folie bzw. NBM = Punkte bei 1 d) der Betonsorte B (CEM III/B) und der Lagerungstemperatur auf den Chloridmigrationskoeffizienten.

Bei der Frostausalzprüfung wies Beton B (CEM III/B) eine hohe Abwitterung im Vergleich zu Beton A (CEM I) auf. Künstlich eingeführte Luftporen (Beton A (CEM I) mit LP) führten erwartungsgemäss zu einer geringen Abwitterung (Abbildung 32, Abbildung 51). Das Nachbehandlungsmittel bewirkte nur bei Beton B (CEM III/B) eine deutliche Reduktion der abgewitterten Menge (erhöhte den Frostausalz widerstand). Die Nachbehandlungsdauer oder die Lagerungsart wirkten sich uneinheitlich auf die abgewitterte Menge aus: Bei Beton A (CEM I) und Beton B (CEM III/B) wurden tendenziell bei der Lagerung III die höchsten Abwitterungsmengen erhalten. Bei Beton A (CEM I) mit LP zeigte sich kaum ein Einfluss der Nachbehandlungsdauer auf die Abwitterung (Abbildung 32). Das Nachbehandlungsmittel hatte bei der höheren Lagerungstemperatur keinen und bei der niedrigeren Lagerungstemperatur einen positiven Einfluss auf die Abwitterung.

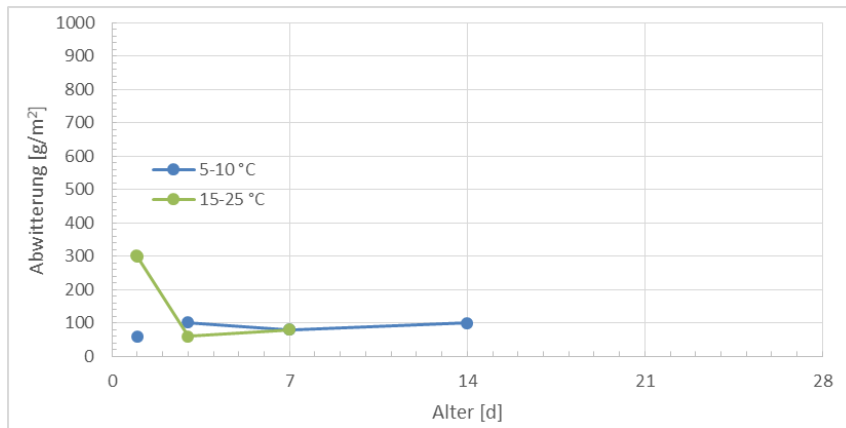


Abbildung 32: Einfluss der Nachbehandlung (unter Folie bzw. NBM = Punkte bei 1 d) der Betonsorte A (CEM I) mit LP und der Lagerungstemperatur auf die Abwitterung bei der Frostausalzprüfung; bei der Lagerung bei 15 – 25 °C trat die gleiche Abwitterung beim NBM wie bei eintägiger Nachbehandlung auf.

Alle Betone wiesen eine geringe Luftpermeabilität auf. Bei der Luftpermeabilität ergab sich bei der Zementart ein zum Frostausalzstand konträrer Effekt: Beton B (CEM III/B) wies die geringste und der Beton A (CEM I) mit Luftporen die höchste Luftpermeabilität auf (Abbildung 52). Die Verwendung des Nachbehandlungsmittels, eine unterschiedliche Lagerungsart (I, II, III) oder eine verschiedenen lange Nachbehandlung ergaben keine eindeutigen Effekte.

3.4 Fazit

Zwischen den Lagerungen im Labor bei konstanten Klimata (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) und im Freien bei variablen Klimata zeigten sich teilweise erhebliche Unterschiede bei den Einflüssen auf die Festbetoneigenschaften. Bager [37] lagerte Betonprüfkörper während 25 Jahren im Freien und im Labor und fand auch, dass die Betone bei der Außenlagerung deutlich abweichende Ergebnisse von den im Labor gelagerten aufwiesen.

Während bei der Laborlagerung der Einfluss der Zementart und der Lagerungstemperatur stark ausgeprägt war, war bei der Lagerung im Freien nur noch der Einfluss der Zementart stark ausgeprägt. Der Einfluss der Lagerungstemperatur war bei der Lagerung im Freien nur gering erkennbar. Dies wird auf verschiedene Ursachen zurückgeführt. Bei der Lagerung im Freien

- kann eine Kondensation von Luftfeuchtigkeit auftreten
- kann es regnen
- wurden nicht so niedrige Temperaturen (minimaler Mittelwert ca. 12 °C) wie im Labor (ca. 6 °C) untersucht, weshalb möglicherweise temperaturbedingte Effekte weniger ausgeprägt auftraten.

Der Einfluss der Nachbehandlungsdauer war im Freien (Lagerung 2) im Gegensatz zur Laborlagerung (Lagerung 1) nicht erkennbar. Dies kann auch durch die Lagerungsbedingungen erklärt werden. Bei der Lagerung im Labor kann der Beton kontinuierlich austrocknen, bei der Lagerung im Freien kann ein Austrocknen durch Folie, Kondensation von Luftfeuchtigkeit oder Niederschlag vermindert werden. Deshalb kann auch ein schlecht nachbehandelter Beton (kurze Dauer unter Folie) bei der Lagerung im Freien bessere Eigenschaften als ein gut nachbehandelter Beton (lange unter Folie) entwickeln, sofern es zu Niederschlägen kommt, nachdem die Abdeckung (Folie) entfernt wurde.

Der im Vergleich zur Laborlagerung wenig ausgeprägte Einfluss der Lagerungsdauer und Lagerungstemperatur wird darauf zurückgeführt, dass bei allen drei Lagerungen (I, II, III) die Luftfeuchtigkeit nachts zumeist 90 % erreichte (Abbildung 34 bis Abbildung 36 im Anhang) und somit tagsüber nur eine geringe Zeitspanne zur Austrocknung zur Verfügung stand. Zudem gab es bei den Lagerungen I und II (5 – 10 °C bzw. 10 – 15 °C) mehrfach pro Woche Niederschläge, wodurch die geplanten schlechten Nachbehandlungen so nicht stattfanden.

Der Einfluss der Lagerungsfeuchte wurde kaum untersucht. Es bestätigte sich der bekannte Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Hydratation von Zement (Abschnitt IV im Anhang). D.h. ab einer Lagerungsfeuchte von etwa 90 % (bei 20 °C) hydratisiert Zement sehr viel schneller als bei geringen Luftfeuchtigkeiten. Bei Zement, welcher zuerst trocken gelagert wurde (75 % r.F., 20 °C), setzte die Zementhydratation wieder ein, nachdem dieser auf 100 % r.F. und 20 °C umgelagert wurde. Ob dies auch in der Praxis auftritt, ist jedoch unklar. Falls es auftreten würde, könnte eine schlechte (zu kurze) Nachbehandlung durch eine intensive Feuchtigkeitszufuhr im höheren Alter teilweise kompensiert werden.

Eine Lagerung unter Wasser, die nur bei der Laborlagerung untersucht wurde, führte zu einer Verbesserung der Festbetoneigenschaften im Vergleich zu einer Lagerung unter Folie.

Durch die Schalungseinlage wurden die Betoneigenschaften zumeist klar verbessert. Die durch die Schalungseinlage verursachte Verdichtung des Randbetons bewirkte auch ohne eine weitere Nachbehandlung nach dem Ausschalen nach einem Tag eine deutliche Verbesserung der Betonqualität. Dies stimmt z.B. mit den Ergebnissen von Torrent et al. [28] überein.

Das verwendete Nachbehandlungsmittel führte nur teilweise zu den gewünschten Festbetoneigenschaften. Martin [42] fand vergleichbare Ergebnisse bei Untersuchungen in Südafrika; insbesondere bei winterlichen Verhältnissen mit Regen führten die Nachbehandlungsmittel zu einer Verschlechterung der Betoneigenschaften, da diese die Feuchtigkeitsaufnahme bei Regen verhinderten. Bei der Verwendung von Nachbehandlungsmitteln ist zudem zu beachten, ob nach dem Auftrag des Nachbehandlungsmittels die damit behandelten Betonoberflächen ihre Funktion noch erfüllen (z.B. Gleitsicherheit, Haftung Oberflächenschutzsystem). Je nach Gegebenheit wären das Nachbehandlungsmittel, z.B. mittels Wasserhochdruck, zu entfernen oder sogar auf dessen Einsatz zu verzichten.

Wird der Randbeton abgeschnitten, wie es bei der Prüfung des Chloridwiderstandes und der Wasserleitfähigkeit nach Norm SIA 262/1 vorgeschrieben ist, führt dies zumeist zu besseren Eigenschaften. Der Effekt ist umso deutlicher, desto schlechter die Nachbehandlung ist. Das Abschneiden von 5 – 10 Millimeter der Prüfkörper bei der Prüfvorschrift in der SIA 262/1 sollte gestrichen werden, da dies nicht dem realen Bauteil entspricht. Zudem sollte diese Änderung nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis haben, da in der Norm SIA 262/1 bzw. SN EN 12390-2 eine sehr gute Nachbehandlung (Lagerung unter Wasser bzw. bei 95 % r.F.) gefordert wird.

In Tabelle 13 bis Tabelle 15 ist dargestellt, wie lange die Nachbehandlung gemäss den Versuchsergebnissen zu dauern hätte, um einerseits die beim Konformitätsnachweis geforderten Betoneigenschaften zu erreichen und andererseits die Anforderungen der Tabellen 22 und 23 der SIA 262 zu erfüllen. In Tabelle 13 ist dies für die allgemeineren Eigenschaften Wasserleitfähigkeit und Luftpermeabilität mit den Nachbehandlungsklassen 3 und 4, in Tabelle 14 für den Karbonatisierungswiderstand mit der Nachbehandlungsklasse 3 und in Tabelle 15 für die vier Tiefbaubetone (Sorte D – G) mit der Nachbehandlungsklasse 4 dargestellt.

In Tabelle 13 zeigt sich, dass die in der Norm SIA 262 in

- Tabelle 22 angegebenen Dauern für die Nachbehandlungsklassen 3 und 4 zumeist ausreichend sind. Die Ausnahme betrifft die Wasserleitfähigkeit beim Beton B (CEM III/B) und Lagerungstemperaturen von 20 °C.
- Tabelle 23 angegebenen Dauern für die Nachbehandlungsklassen 3 und 4 ausreichend sind.
- Die Nachbehandlung mit dem Nachbehandlungsmittel oder mit der Schalungseinlage führte immer zu genügenden Eigenschaften.

Tabelle 13: Nachbehandlungsdauern für verschiedene Nachbehandlungsarten zur Erreichung der Anforderungen des Konformitätsnachweises gemäss den durchgeführten Untersuchungen; Anforderung gemäss Tab. 22 bzw. Tab. 23 nicht eingehalten; bei NBM und SE: Anforderungen an den Konformitätsnachweis erfüllt: ja, nein.

Beton Eigenschaft	Temp. [°C]	Nachbehandlungsart und notwendige Dauer [Tage] für NBK 3 / 4				SIA 262, NBK 3 / 4	
		Folie	Wasser	NBM	SE	Tab. 22	Tab. 23
A CEM I WL = 10 g/m ² h	6	<< 3	<< 3			<< 3 / < 3	3.5 / 9
	20	1	1	ja	ja	<< 3 / < 3	2 / 5
B CEM III/B WL = 10 g/m ² h	6	<< 3	<< 3			5 / 7	18 / 30
	20	7	3	ja	ja	<< 3 / 4	7 / 12
A CEM I kT = 0.5·10 ⁻¹⁶ m ²	6	< 3	< 3			<< 3 / < 3	3.5 / 9
	12	< 3		ja		<< 3 / < 3	2.5 / 7
	20	1	< 3	ja	ja	<< 3 / < 3	2 / 5
	23	1		ja		<< 3 / < 3	2 / 5
B CEM III/B kT = 0.5·10 ⁻¹⁶ m ²	6	< 3	< 3			5 / 7	18 / 30
	12	<< 7		ja		4 / 7	12 / 21
	20	1	1	ja	ja	<< 3 / 4	7 / 12
	23	1		ja		<< 3 / < 3	7 / 12
A CEM I LP kT = 0.5·10 ⁻¹⁶ m ²	12	< 3		ja		< 3 / 6	2.5 / 7
	23	1		ja		<< 3 / < 3	2 / 5

Laut Tabelle 14 ist für die Nachbehandlungsklasse 3 die in der Norm SIA 262 in

- Tabelle 22 angegebene Nachbehandlungsdauer zumeist ausreichend. Die Ausnahme betrifft den Karbonatisierungswiderstand beim Beton B (CEM III/B) bei Lagerung unter Folie bzw. im Wasser und einer Lagerungstemperaturen von 20 °C.
- Tabelle 23 angegebene Nachbehandlungsdauer zumeist ausreichend. Die Ausnahme betrifft ebenfalls den Karbonatisierungswiderstand beim Beton B (CEM III/B) und Lagerung unter Folie und eine Lagerungstemperatur von 20 °C.
- Die Nachbehandlung mit dem Nachbehandlungsmittel führte nicht immer zu genügenden Eigenschaften
- Die Schalungseinlage führte immer zu genügenden Eigenschaften.

Tabelle 14: Nachbehandlungsdauern für die Betonsorte C (XC4) mit der Nachbehandlungsklasse 3 für verschiedene Nachbehandlungsarten zur Erreichung der Anforderungen an den Konformitätsnachweis gemäss den durchgeführten Untersuchungen: Anforderung gemäss Tab. 22 bzw. Tab. 23 nicht eingehalten; bei NBM und SE: Anforderungen an den Konformitätsnachweis erfüllt: ja, nein.

Beton Eigenschaft	Temp. [°C]	Nachbehandlungsart und notwendige Dauer [Tage]				SIA 262, NBK 3	
		Folie	Wasser	NBM	SE	Tab. 22	Tab. 23
A CEM I KW = 5 mm/√a	6	<< 3	<< 3			<< 3	3.5
	20	< 1	< 1	ja	ja	<< 3	2
B CEM III/B KW = 5 mm/√a	6	3	< 3			5	18
	20	> 21	7	nein	ja	<< 3	7

Gemäss Tabelle 15 ist für die Nachbehandlungsklasse 4 die in

- Tabelle 22 der SIA 262 angegebene Nachbehandlungsdauer zumeist nicht ausreichend.
- Tabelle 23 der SIA 262 angegebene Nachbehandlungsdauer beim Chloridwiderstand zumeist ausreichend und beim Frosttausalz widerstand (ohne Luftporenbildner) zumeist nicht ausreichend. Vor allem bei Lagerungstemperaturen von 20 °C und höher sind die Nachbehandlungsdauern ungenügend.
- Die Nachbehandlung mit dem Nachbehandlungsmittel führte nicht immer zu genügenden Eigenschaften
- Der Einsatz der Schalungseinlage führte immer zu genügenden Eigenschaften.

Tabelle 15: Nachbehandlungsdauern für die Betonsorten F und G (XC4, XD3, XF2/XF4) mit der Nachbehandlungsklasse 4 für verschiedene Nachbehandlungsarten zur Erreichung der Anforderungen an den Konformitätsnachweis für Tiefbaubeton gemäss den durchgeführten Untersuchungen: Anforderung gemäss Tab. 22 bzw. Tab. 23 für NBK 4 nicht eingehalten; bei NBM und SE: Anforderungen an den Konformitätsnachweis erfüllt: ja, nein.

Beton Eigenschaft	Temp. [°C]	Nachbehandlungsart und notwendige Dauer [Tage]				SIA 262, NBK 4	
		Folie	Wasser	NBM	SE	Tab. 22	Tab. 23
A CEM I CW = 10 10 ⁻¹² m ² /s	6	5	< 3	-	-	< 3	9
	12	7		ja	ja	< 3	7
	20	7	3	ja	ja	< 3	5
	23	3		ja	-	< 3	5
B CEM III/B CW = 10 10 ⁻¹² m ² /s	6	< 3	<< 3	-	-	7	30
	12	<< 7		ja	-	7	21
	20	5	3	ja	ja	4	12
	23	<< 3		ja	-	< 3	12
A CEM I LP CW = 10 10 ⁻¹² m ² /s	12	> 14		ja		6	7
	23	7		nein		< 3	5
A CEM I FT = 200 g/m ²	6	> 14	> 14			< 3	9
	12	14				< 3	7
	20	>> 7	28	nein	ja	< 3	5
	23	>> 7				< 3	5
B CEM III/B FT = 200 g/m ²	6	>> 14	>> 14			7	30
	12	> 28		nein		7	21
	20	>> 7	28	nein	ja	4	12
	23	> 28		nein		< 3	12
A CEM I LP FT = 200 g/m ²	12	< 3		ja		6	7
	23	3		nein		< 3	5

4 Folgerungen und Empfehlungen

4.1 Folgerungen

Zwischen den Prüfkörpern, die bei konstantem Klima im Labor und bei variablem im Freien gelagert wurden, zeigten sich z.T. erhebliche Unterschiede bei den Einflüssen der Nachbehandlung auf die Eigenschaften.

Die in Tabelle 22 der SIA 262 angegebenen Nachbehandlungsdauern, die auf der Druckfestigkeitsentwicklung basieren, sind bei den untersuchten Nachbehandlungsklassen 3 und 4 nicht immer ausreichend, um die gleichen Eigenschaften zu erreichen, die vom Betonwerk beim Konformitätsnachweis nach SN EN 206-1 gefordert werden. Das in Tabelle 22 der SIA 262 enthaltene Konzept ist folglich nicht generell geeignet.

Die in Tabelle 23 der SIA 262 angegebenen, fixen Nachbehandlungsdauern sind bei den Nachbehandlungsklassen 3 und 4 bei Lagerungstemperaturen von weniger als 20 °C zumeist ausreichend, um die gleichen Eigenschaften zu erreichen, die vom Betonwerk beim Konformitätsnachweis nach SN EN 206-1 gefordert werden. Bei höheren Lagerungstemperaturen ist das Konzept von Tabelle 23 nicht generell geeignet. Das in Tabelle 23 der SIA 262 enthaltene Konzept, ist nicht immer ausreichend, jedoch besser als dasjenige nach Tabelle 22 der SIA 262 geeignet.

Zusätzlich ist festzuhalten, dass einzelne Betoneigenschaften nicht zwangsläufig ungenügend sind, sofern die Nachbehandlungsdauern kürzer als diejenigen nach den Tabellen 22 oder 23 waren.

Bei der Verwendung eines Nachbehandlungsmittel, welches jeweils erst kurz (< 1 Tag) vor der Prüfung entfernt wurde, wurden die angestrebten Eigenschaften (Kriterien gemäss Konformitätsnachweis der SN EN 206-1) nicht immer erreicht.

Die Verwendung einer jeweils neuen Schalungseinlage (und keiner weiteren Nachbehandlung nach dem Ausschalen nach 1 Tag) führte immer zu den angestrebten Eigenschaften; einschränkend ist anzumerken, dass mit der Schalungseinlage nur wenige Untersuchungen durchgeführt wurden.

4.2 Empfehlungen

4.2.1 Vorbemerkung

Aufgrund der Ergebnisse werden folgende Möglichkeiten gesehen, um die Nachbehandlungsdauer festzulegen:

1. Fixe Vorgabe einer Dauer
2. Ermittlung der notwendigen Nachbehandlungsdauer mittels Prüfungen.

Nachfolgende Regelungen gelten für die Nachbehandlungsklassen 3 und 4. Die Betone, für die die Nachbehandlungsklassen 1 und 2 (z.B. XC1, XC2) gelten könnten, wurden nicht untersucht. In der SN EN 206-1 bestehen auch keine Anforderungen an zu prüfende Dauerhaftigkeitseigenschaften für Beton für XC1 und XC2.

Es wird keine Möglichkeit gesehen, um über die Druckfestigkeit(entwicklung) die Nachbehandlungsdauer, unabhängig von der Betonzusammensetzung, festzulegen, wie dies in in Tabelle 22 der SIA 262:2013 enthalten ist. Auch erwies sich das Vorgehen gemäss Tabelle 23 der SIA 262 als nicht immer zielführend.

4.2.2 Fixe Dauer der Nachbehandlung

Sollte die Möglichkeit der Vorgabe einer fixen Nachbehandlungsdauer bestehen, müsste Tabelle 23 der SIA 262 dahingehend korrigiert werden, dass unabhängig von der Lagerungstemperatur (im Bereich zwischen 5 und 25 °C) und der Festigkeitsentwicklung ($r = f_{c2}/f_{c28}$) immer die Vorgaben für eine langsame Festigkeitsentwicklung gelten müssten.

Dadurch

- würden die Eigenschaften vom Konformitätsnachweis zumeist, jedoch nicht immer, erreicht werden
- wäre die Nachbehandlungsdauer für manche Eigenschaften und/oder Betonsorten viel zu lange.

Deshalb wird in Tabelle 16 ein Alternativvorschlag präsentiert. Die Nachbehandlungsdauern sind dort in Abhängigkeit vom Karbonatisierungs- und Chloridwiderstand definiert. Die spezifizierten Karbonatisierungs- und Chloridwiderstände wurden aus folgenden Gründen gewählt:

- Der maximale Karbonatisierungswiderstand von $2.5 \text{ mm}/\sqrt{a}$ entspricht der Hälfte des Grenzwertes vom Konformitätsnachweis und der maximale Karbonatisierungswiderstand von $4 \text{ mm}/\sqrt{a}$ wurde gewählt, da dies einerseits auf Grund der Prüfstreuung anzustreben ist, um den Grenzwert vom Konformitätsnachweis zuverlässig einzuhalten und andererseits Praxiserfahrungen [39] für die Betonsorte C dies bestätigen.
- Der maximale Chloridwiderstand von $5.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ entspricht der Hälfte des Grenzwertes und der maximale Chloridwiderstand von $8.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ wurde gewählt, da dies auf Grund der Prüfstreuung anzustreben ist, um den Grenzwert vom Konformitätsnachweis zuverlässig einzuhalten.

Tabelle 16 enthält Vorschläge für die Nachbehandlungsdauer in Abhängigkeit von den hier untersuchten Betonsorten und den Betoneigenschaften gemäss aktuellem Schweizer Konformitätsnachweis. Die notwendige Nachbehandlungsdauer wurde aufgrund der hier vorgestellten Ergebnisse vorgeschlagen. Mit weiteren Untersuchungen (Lagerungsbedingungen, andere Bindemittel und Betonzusammensetzungen, etc.) sind die Vorschläge zu überprüfen.

Tabelle 16: Vorgeschlagene Nachbehandlungsdauer für Tiefbaubeton für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren, um im Bauteil die Eigenschaften vom Konformitätsnachweis zu erreichen, für Oberflächentemperaturen des Betons zwischen 5 und 25 °C.

Mindestnachbehandlungsdauer [Tage] ^{1), 2)}	
Betonsorte C, XC4(CH), mit einem Karbonatisierungswiderstand von	
• $\leq 2.5 \text{ mm}/\sqrt{a}$	3
• $\leq 4.0 \text{ mm}/\sqrt{a}$	7
Betonsorte D, XC4(CH), XD1(CH), XF2(CH), mit mittlerem Frosttausalz-widerstand, erreicht durch Luftporenbildner und einem Karbonatisierungswiderstand von	
• $\leq 2.5 \text{ mm}/\sqrt{a}$	3
• $\leq 4.0 \text{ mm}/\sqrt{a}$	7
Betonsorte E, XC4(CH), XD1(CH), XF4(CH), mit hohem Frosttausalz-widerstand, erreicht durch Luftporenbildner und einem Karbonatisierungswiderstand von	
• $\leq 2.5 \text{ mm}/\sqrt{a}$	3
• $\leq 4.0 \text{ mm}/\sqrt{a}$	7
Betonsorte F, G XC4(CH), XD3(CH), XF2(CH) bzw. XF4(CH), mit hohen Frosttausalz-widerstand, erreicht durch Luftporenbildner und einem Chloridwiderstand von	
• $\leq 5.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	5
• $\leq 8.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	7
¹⁾ Bei mehr als 5 h Verarbeitbarkeitszeit (Zeitraum, während dessen der Beton mit den vorgesehenen Geräten auf der Baustelle verdichtbar ist) ist die Nachbehandlungsdauer angemessen zu verlängern	
²⁾ Bei Temperaturen unter 5 °C ist die Nachbehandlungsdauer um die Zeitspanne zu verlängern, während der die Temperatur unter 5 °C lag	

Die Untersuchungen zeigten, dass bei Beton mit künstlich eingeführten Luftporen die Nachbehandlung nur einen geringen Einfluss auf den Frosttausalz-widerstand hat; bei Beton, der ohne künstlich eingeführte Luftporen hergestellt wurde, um einen hohen Frosttausalz-widerstand zu erreichen, konnte dies nur nach Normlagerung (bis Prüfalter 28 Tage unter Wasser) erreicht werden. D.h. bei so einem Beton kann die Nachbehandlung

nicht verkürzt werden. Da einerseits Praxiserfahrungen dies nicht so generell bestätigen und andererseits eine Nachbehandlungsdauer von 28 Tagen unter Wasser praxisfremd ist, werden für Beton, der einen mittleren oder hohen Frostausfallwiderstand aufweist, jedoch ohne Verwendung eines Luftporenbildner, keine Angaben in Tabelle 16 gemacht. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

Falls eine ungebrauchte Schalungseinlagen verwendet wird, könnte gemäss den wenigen vorliegenden Ergebnissen für die Betonsorten C, D, E, F, G die Nachbehandlung im Alter von 1 Tag beendet werden. Diese Angaben sind mit weiteren Untersuchungen zu überprüfen.

4.2.3 Prüftechnische Ermittlung der Dauer der Nachbehandlung

Da durch unterschiedliche Verdichtung, Nachbehandlung, Temperaturverlauf, etc. im Prüfkörper (z.B. Würfel) und im Bauteil die Hydratation und die Gefügeentwicklung des Betons unterschiedlich verläuft, sind die Betoneigenschaften im Prüfkörper und im Bauteil nicht identisch. Eine prüftechnische Ermittlung der Betoneigenschaften und der dafür notwendigen Nachbehandlungsdauer ist deshalb am Bauwerk wünschenswert.

Bei den Prüfungen ist zu unterscheiden, ob diese

- zur Beurteilung der Nachbehandlung bereits während der Nachbehandlung oder
- erst nach Abschluss der Nachbehandlung (evtl. erst Wochen bis Monate später)

verwendet werden können (Tabelle 17, vgl. z.B. Abschnitt 2.7).

Falls die Prüfungen bereits während der Nachbehandlung durchgeführt werden, ist es von Vorteil, wenn sie zerstörungsfrei/-arm sind, da diese unter Umständen mehrmals wiederholt werden müssen, bis die geforderten Eigenschaften erreicht (nachgewiesen) werden. Die beim Konformitätsnachweis geforderten Dauerhaftigkeitseigenschaften sind für das Prüfalter 28 Tage konzipiert, d.h. hier ist noch festzulegen, welche Prüfergebnisse am Ende der Nachbehandlung erreicht werden müssen, um dann im Alter von 28 Tagen die eigentlichen Anforderungen zu erreichen. Es wird empfohlen, dafür die Richtwerte der Tabelle 6 der SIA 262/1 für die Prüfungsart TT-2 zu verwenden, auch wenn das Prüfalter sehr viel niedriger als 28 Tage ist. Die kann damit begründet werden, dass die Betoneigenschaften zumeist sehr viel stärker durch die Betonzusammensetzung als die Alterung zwischen wenigen Tagen (Ende der Nachbehandlung) und 28 Tagen beeinflusst werden.

Diese Prüfungen sind an Bohrkernen durchzuführen. Details dazu sind im Kapitel 4 der SIA 262/1 festgehalten. Um möglichst wenige Bohrkern zu entnehmen, sind in Tabelle 17 verschiedene zerstörungsfreie Prüfungen aufgeführt und jeweils angegeben, welche davon während oder erst nach dem Ende der Nachbehandlung durchgeführt werden können.

Als geeignete Methoden zur Überprüfung der Dauer (und Qualität) der Nachbehandlung während der Nachbehandlung werden die Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes, des Wassergehaltes oder der Prellhärte gesehen. Zwischen dem elektrischen Widerstand und dem Chloridwiderstand ist für einen spezifischen Beton ein enger Zusammenhang zu erwarten; gleiches gilt für die Prellhärte und die Druckfestigkeit eines Betons. Bei der Prüfung der Prellhärte ist zu beachten, dass u.a. die Schalhaut und darauf vorhandene Stoffe wie z.B. Trennmittel einen grossen Einfluss ausüben können.

Im Prinzip könnte auch alternativ oder zusätzlich zu den vorgenannten Eigenschaften der Wassergehalt im Beton bestimmt werden. Daraus könnte abgeleitet werden, wie erfolgreich die Wasserverdunstung durch die Nachbehandlung verhindert wurde. In Abbildung 33 ist zur Illustration der Wassergehalt von Beton mit CEM I über die Zeit dargestellt. Innerhalb der ersten 28 Tage nach der Herstellung ändert sich der Wassergehalt nicht sehr, weshalb eine hohe Genauigkeit an die Bestimmung des Wassergehalts zu stellen wäre. Ob dies mit den üblichen zerstörungsfreien Methoden zuverlässig erreichbar ist, ist jedoch fraglich.

Alle Prüfverfahren mit denen während der Nachbehandlung die notwendige Nachbehand-

lungsdauer bestimmt werden soll, sind im Rahmen von Vorversuchen am zu verwendenden Beton zu überprüfen. Dabei sind die Kriterien (Mittelwert, Minimal- bzw. Maximalwert, Prüfhäufigkeit, etc.) für die Beurteilung zu bestimmen.

Tabelle 17: Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode zur Beurteilung einer ausreichenden Nachbehandlung während und nach der Abschluss der Nachbehandlung; Klammer = mit Einschränkungen.

Prüfung	Norm	Prüfung bzgl. Nachbehandlung		Bemerkung
		während	nach dem Ende	
Prellhärte	SN EN 12504-2	ja	ja	Ergebnis ist in Bezug zum zu untersuchenden Beton zu beurteilen; Schalfläche notwendig
Luftpermeabilität	SIA 262/1	nein	Ja	Ausreichend trockener Beton notwendig
Kapillare Wasseraufnahme (Karstensäuren)	keine	nein	ja	Ausreichend trockener Beton notwendig
Elektrischer Widerstand, (Leitfähigkeit)	RILEM [41]	ja	(ja)	Ergebnis ist in Bezug zum zu untersuchenden Beton zu beurteilen; Beton wäre evtl. vorgängig mit Wasser zu sättigen; grosser Einfluss der Temperatur
Wassergehalt im Randbeton	keine	ja	(ja)	Ergebnis ist in Bezug zum zu untersuchenden Beton zu beurteilen.

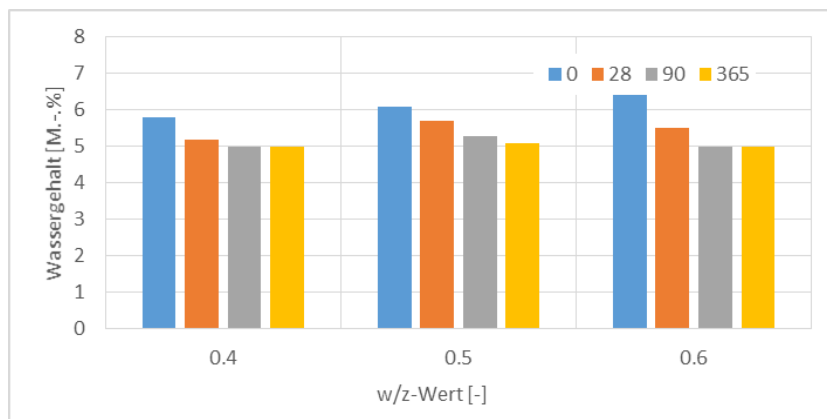


Abbildung 33: Wassergehalt im Beton gemäss Rezept (Alter 0 Tage) und zerstörungsfrei mit Messgerät Tramex ab Alter 28 Tage gemessen im Randbeton mit verschiedenen w/z-Werten über die Zeit, im Alter von 3 Tagen wurde der Beton ausgeschalt und bei 20 °C und 70 % r.F. gelagert, aus [36].

Um die Qualität der Nachbehandlung zu bestimmen, können auch Prüfungen am Beton nach dem Ende der Nachbehandlung vorgenommen werden. Diese können zerstörend an Bohrkernen (z.B. Chlorid-, Karbonatisierungs-, Frostausatzwiderstand) oder zerstörungsfrei am Bauteil (Tabelle 17), z.B. auch mittels Luftpermeabilitätsmessungen, erfolgen. Da die Prüfungen jedoch erst deutlich nach dem Ende der Nachbehandlung durchgeführt werden (können), kann die Nachbehandlung des untersuchten Bauteils nicht mehr beeinflusst werden. Für die Bestimmung und Beurteilung der Betondruckfestigkeit an Bohrkernen liegt eine Norm vor (SN EN 13791). Für die Bestimmung und Beurteilung der Dauerhaftigkeitseigenschaften sind mit der Prüfungsart TT-2 erste Hinweise in der Norm SIA 262/1:2013 gegeben. Diese Hinweise gelten jedoch nur für Beton mit einem Alter von 28 Tagen.

Anhänge

I	Meteorologische Daten Niederlenz	63
II	Ergebnisse der Laborlagerung	65
III	Ergebnisse der Lagerung im Freien	71
IV	Lagerung von Zementpulver	77
IV.1	Vorbemerkung	77
IV.2	Ergebnisse	77
IV.3	Fazit	80

I Meteorologische Daten Niederlenz

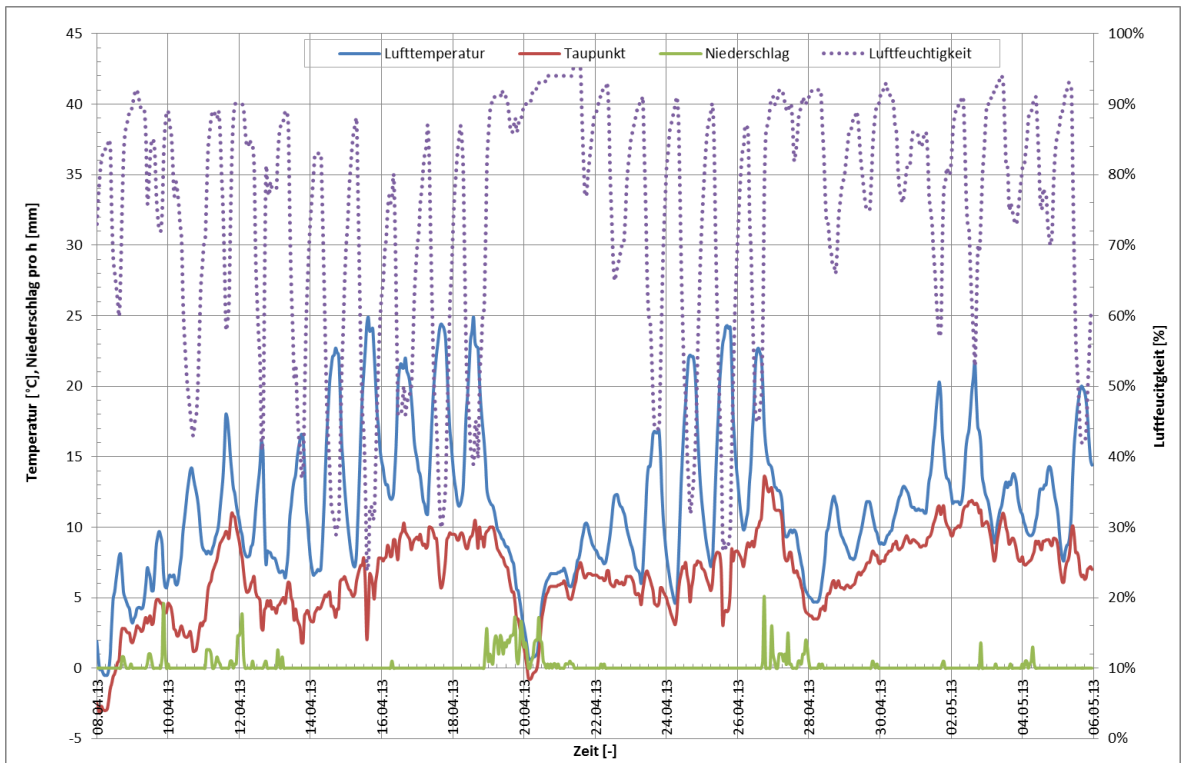


Abbildung 34: Meteorologische Daten im April und Mai 2013 (Lagerung I), Station Niederlenz.

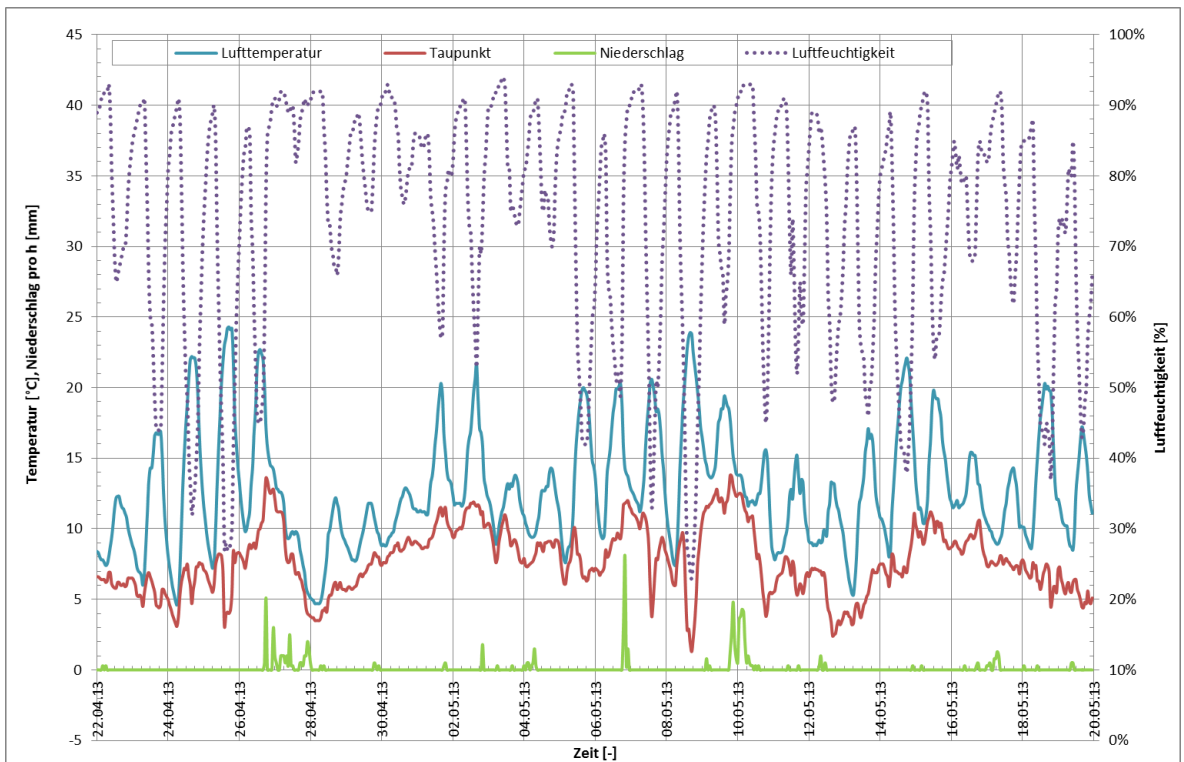


Abbildung 35: Meteorologische Daten im April und Mai 2013 (Lagerung II), Station Niederlenz

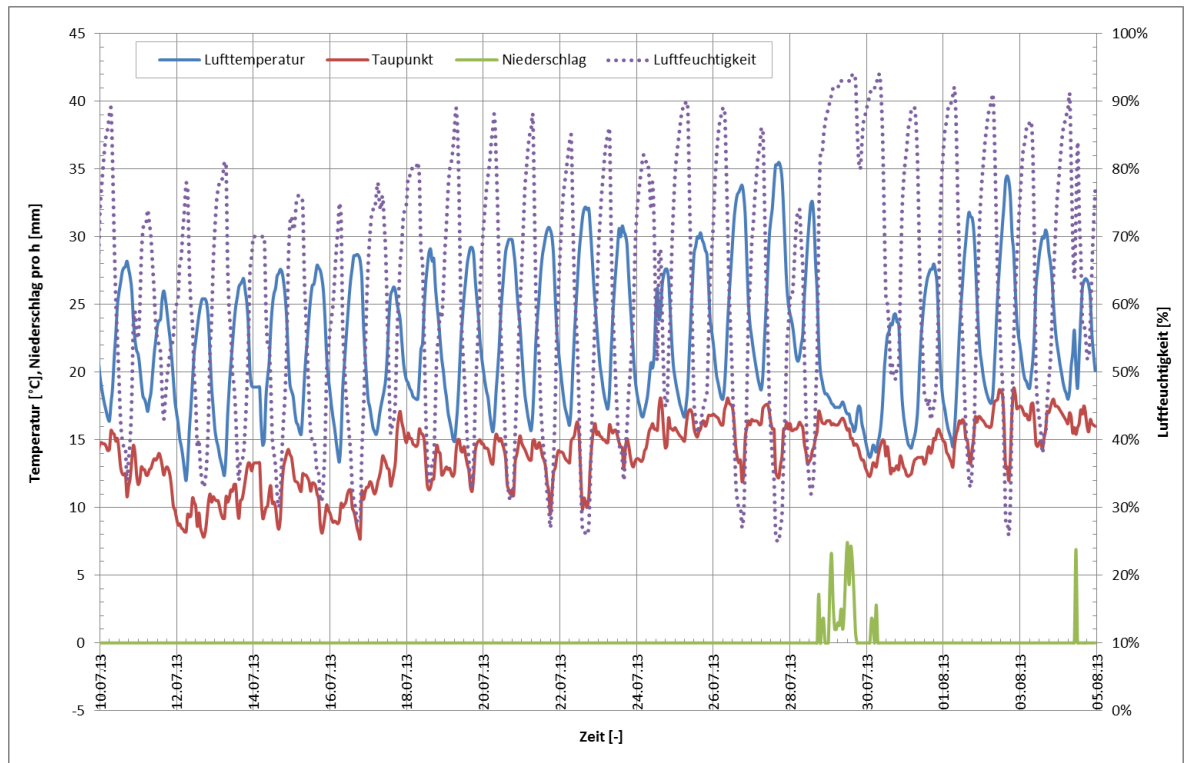


Abbildung 36: Meteorologische Daten im Juli und August 2013 (Lagerung III), Station Niederlenz.

II Ergebnisse der Laborlagerung

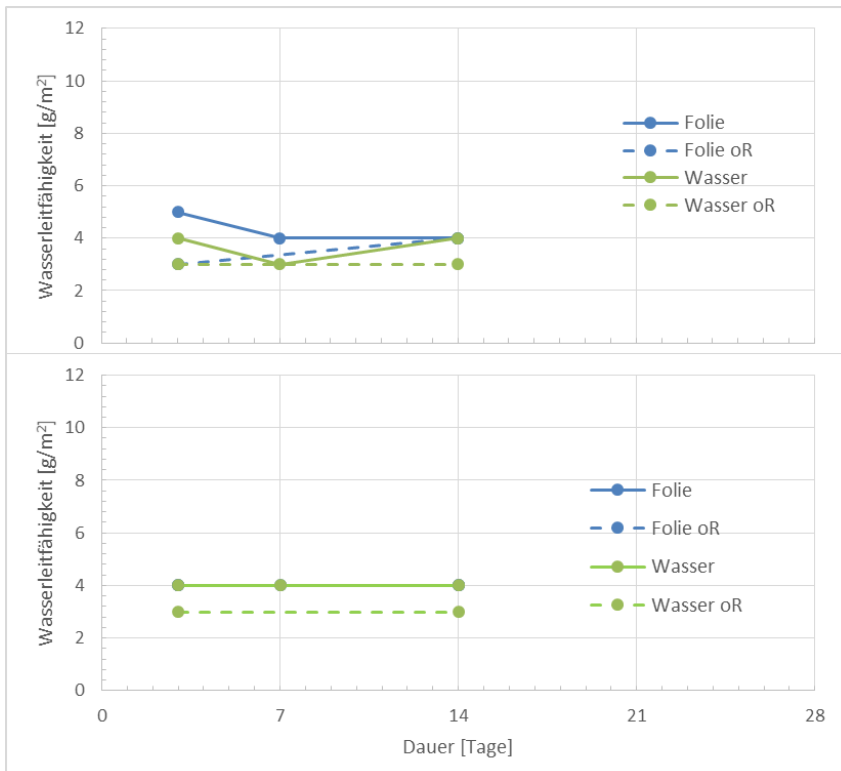


Abbildung 37: Wasserleitfähigkeit der Betonsorten A mit CEM I (oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 6 °C im Labor in Abhängigkeit von der Nachbehandlung; oR = ohne Randbeton. Beim Beton B liegen die Kurven „Folie“, „Folie oR“ und „Wasser“ übereinander.

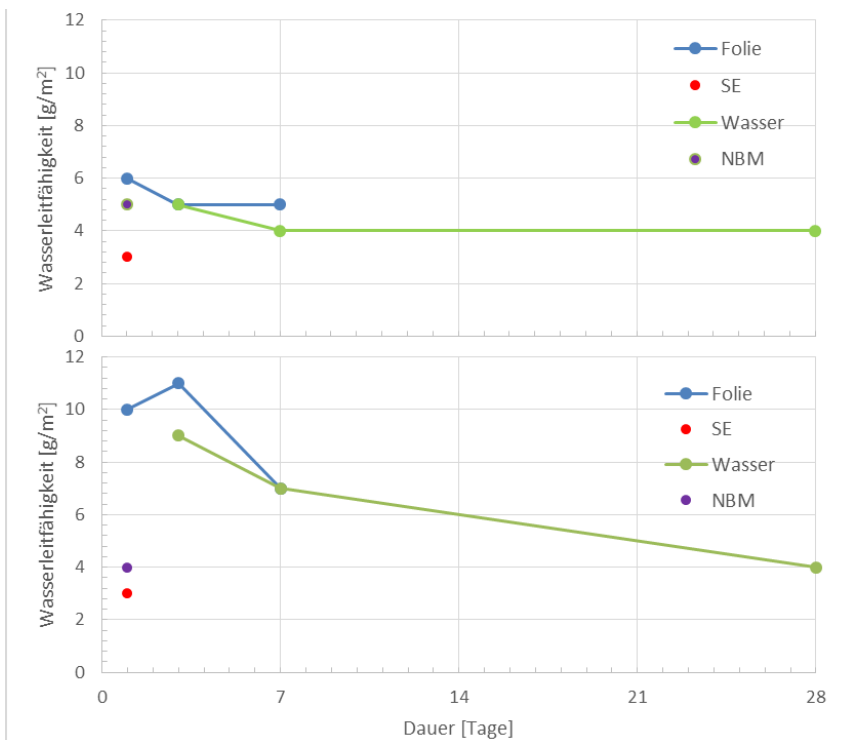


Abbildung 38: Wasserleitfähigkeit der Betonsorten A mit CEM I (oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 20 °C im Labor in Abhängigkeit von der Nachbehandlung; Prüfungen nach Norm, d.h. ohne Randbeton

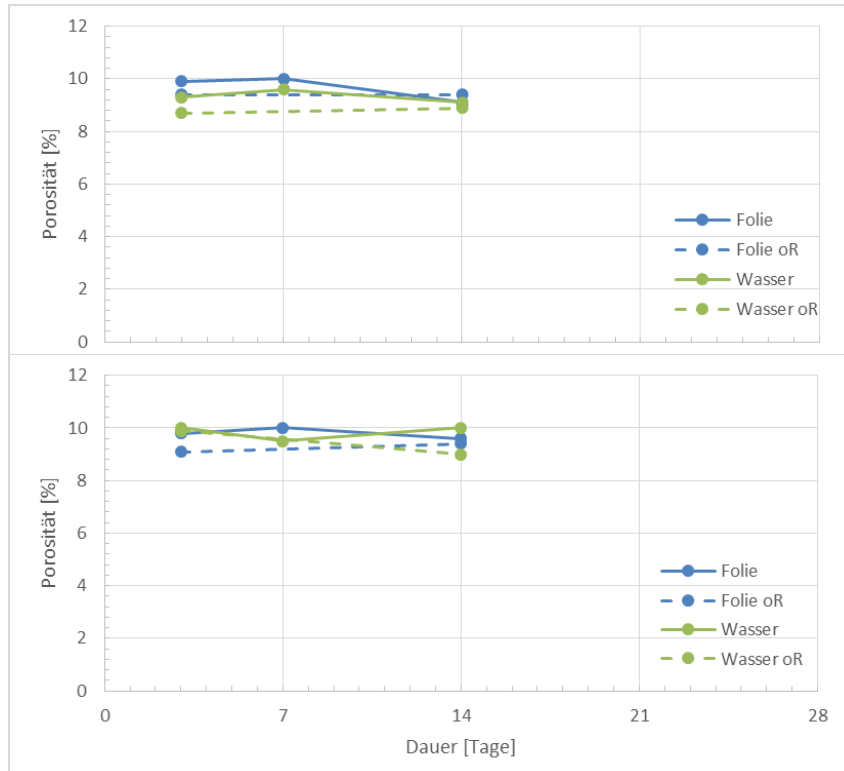


Abbildung 39: Hydratationsporosität der Betonsorten A mit CEM I (oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 6 °C im Labor und der Nachbehandlung.

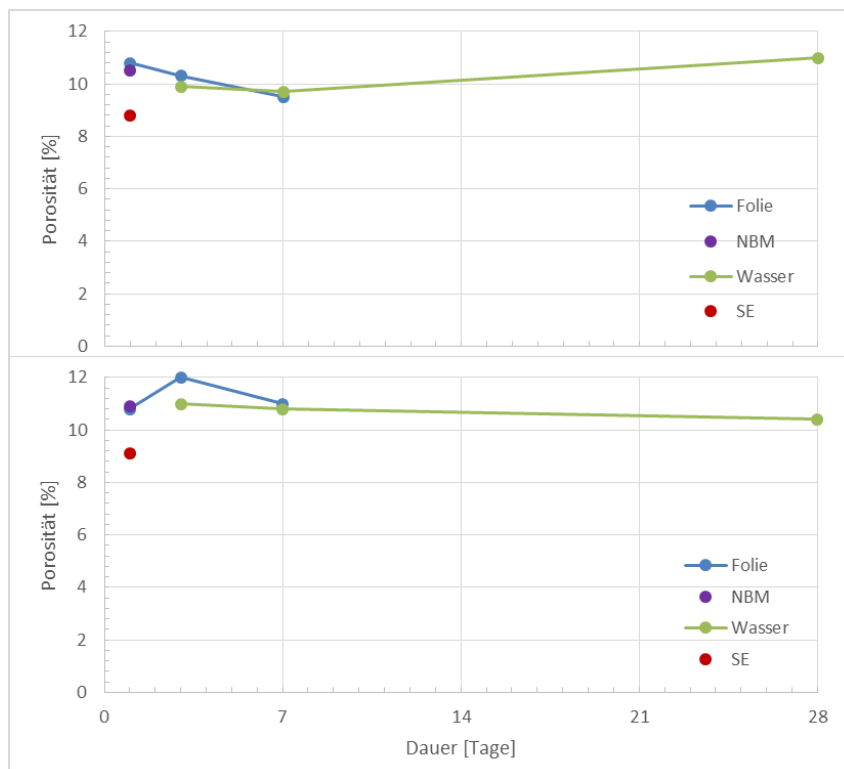


Abbildung 40: Hydratationsporosität der Betonsorten A mit CEM I (oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 20 °C im Labor und der Nachbehandlung.

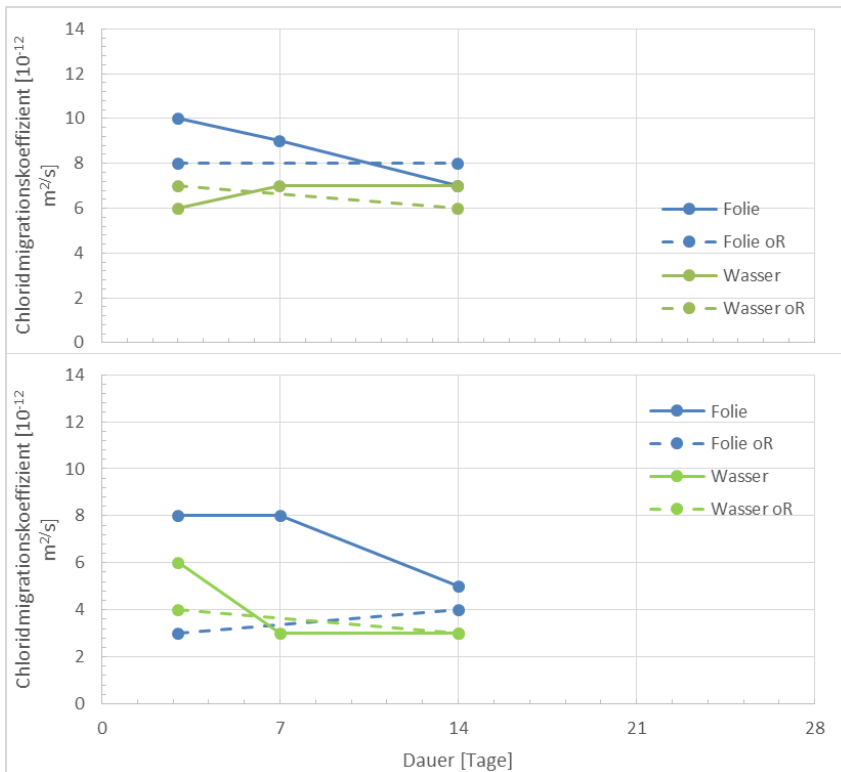


Abbildung 41: Chloridmigrationskoeffizient der Betonsorten A mit CEM I (oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 6 °C im Labor und der Nachbehandlung; oR = ohne Randbeton.

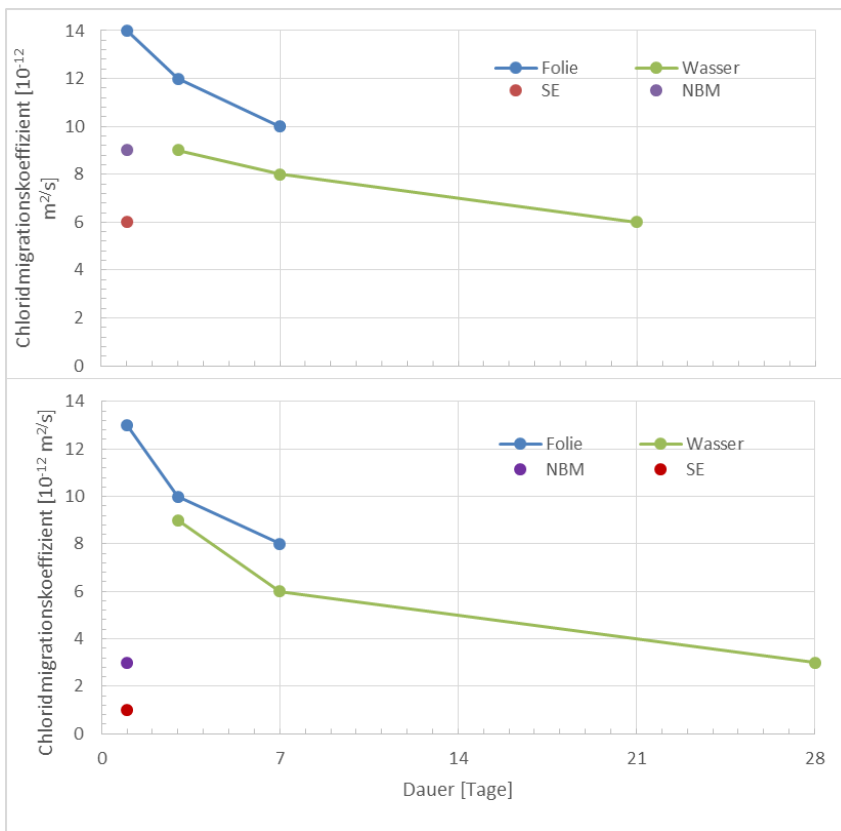


Abbildung 42: Chloridmigrationskoeffizient der Betonsorten A mit CEM I (oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 20 °C im Labor und der Nachbehandlung; Prüfung nach Norm, d.h. oR = ohne Randbeton.

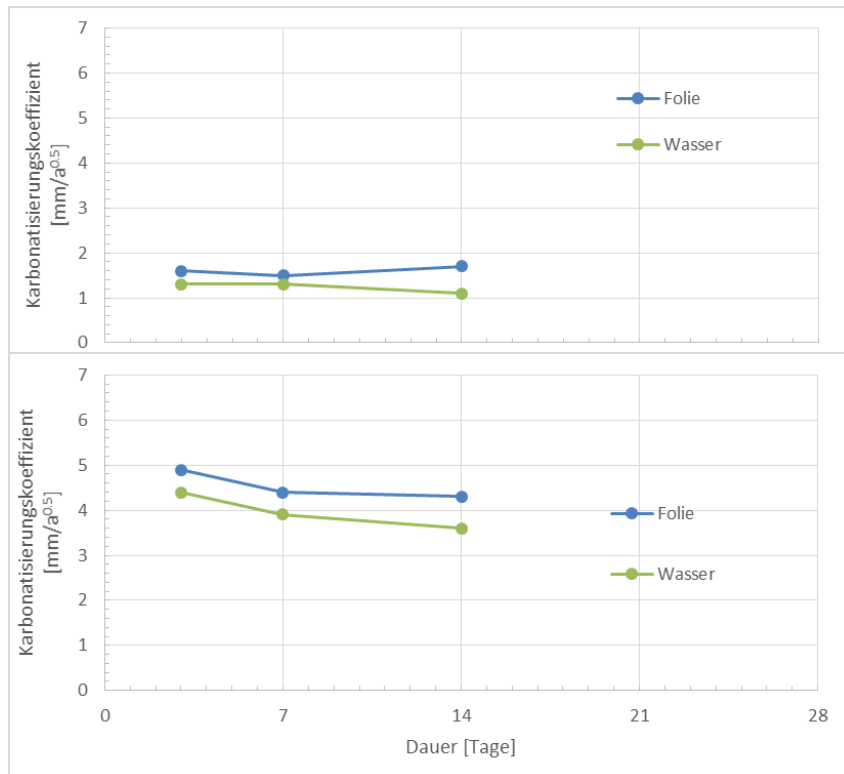


Abbildung 43: Karbonatisierungskoeffizient der Betonsorten A mit CEM I (Oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 6 °C im Labor und der Nachbehandlung.

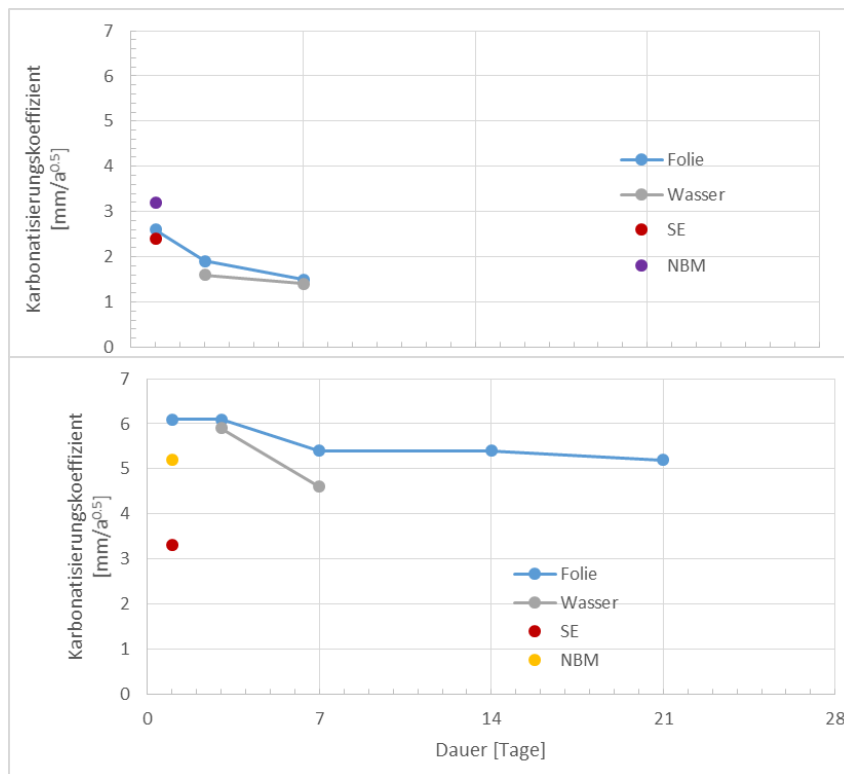


Abbildung 44: Karbonatisierungskoeffizient der Betonsorten A mit CEM I (Oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 20 °C im Labor und der Nachbehandlung; die Prüfungen bei 20 °C mit dem Nachbehandlungsmittel, der Schalungseinlage sowie bei Beton B mit Nachbehandlungsdauern von 14 und 21 Tage starteten wegen der verlängerten Nachbehandlung erst im Betonalter von 49 Tagen statt wie sonst 28 Tagen.

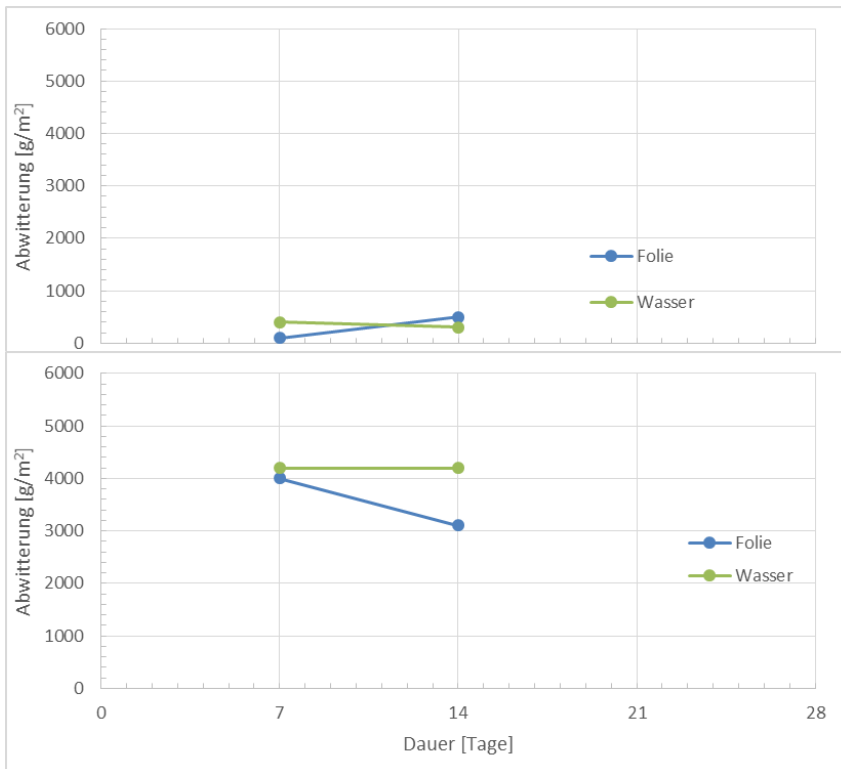


Abbildung 45: Abgewitterte Menge bei der Frosttausalzprüfung der Betonsorten A mit CEM I (oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 6 °C im Labor und der Nachbehandlung.

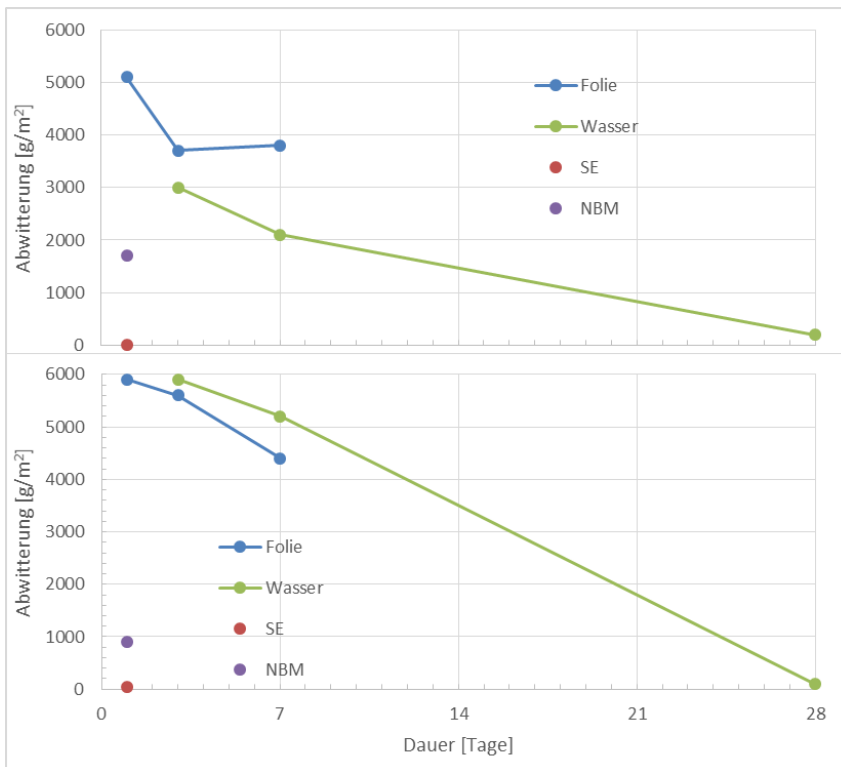


Abbildung 46: Abgewitterte Menge bei der Frosttausalzprüfung der Betonsorten A mit CEM I (oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 20 °C im Labor und der Nachbehandlung.

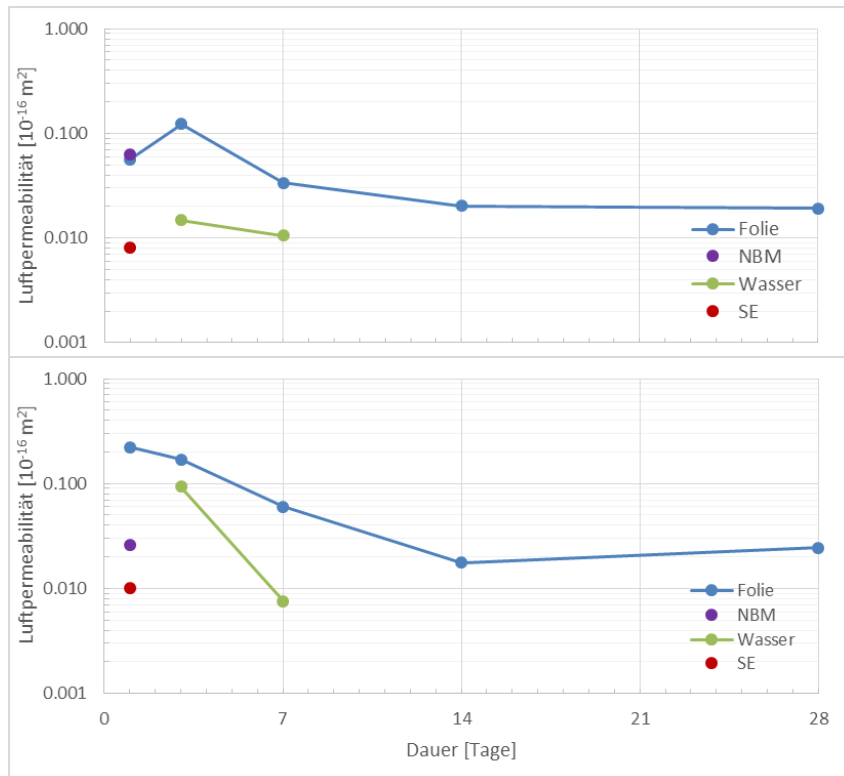


Abbildung 47: Luftpermeabilität der Betonsorten A mit CEM I (oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 20 °C im Labor und der Nachbehandlungsart und -dauer.

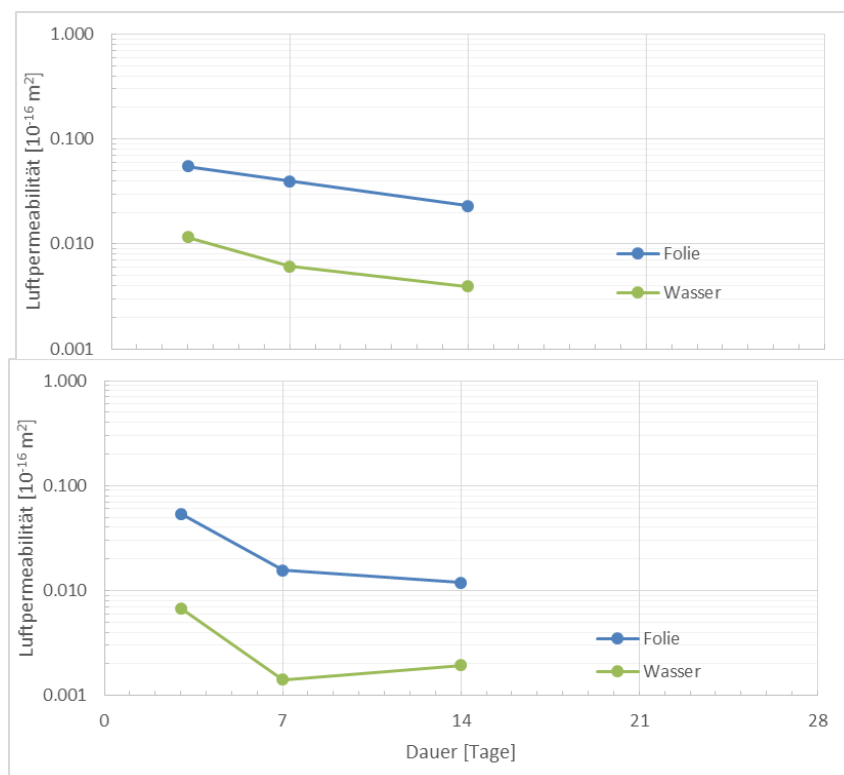


Abbildung 48: Luftpermeabilität der Betonsorten A mit CEM I (oben) und B mit CEM III/B (unten) bei einer Lagerungstemperatur von 6 °C im Labor und der Nachbehandlung.

III Ergebnisse der Lagerung im Freien

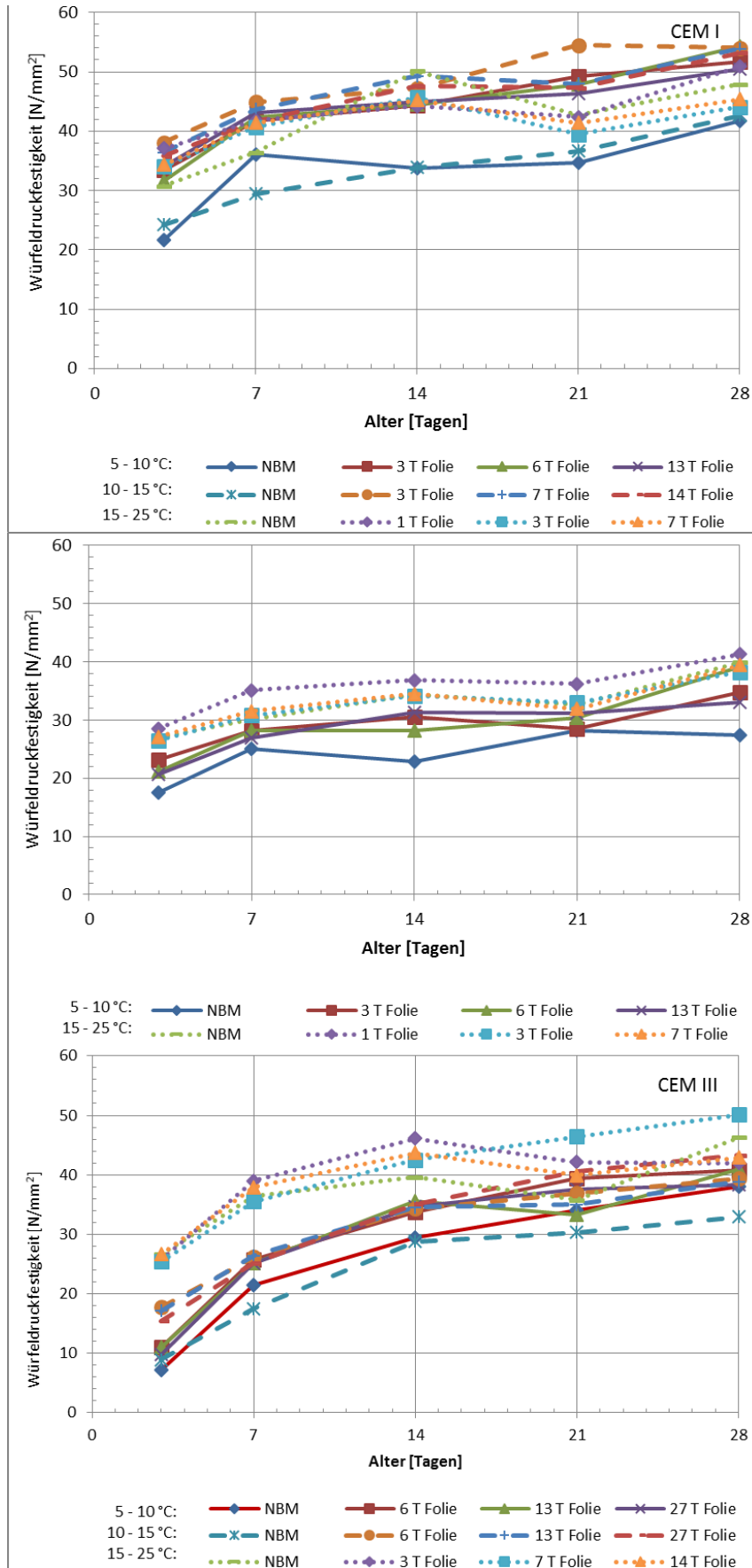


Abbildung 49: Entwicklung der Druckfestigkeit (bestimmt an je 1 Würfel) der 3 Betone (oben: CEM I, Mitte: CEM I LP, unten: CEM III/B) in Abhängigkeit von der Zeit, der Lagerungsart und der Nachbehandlung.

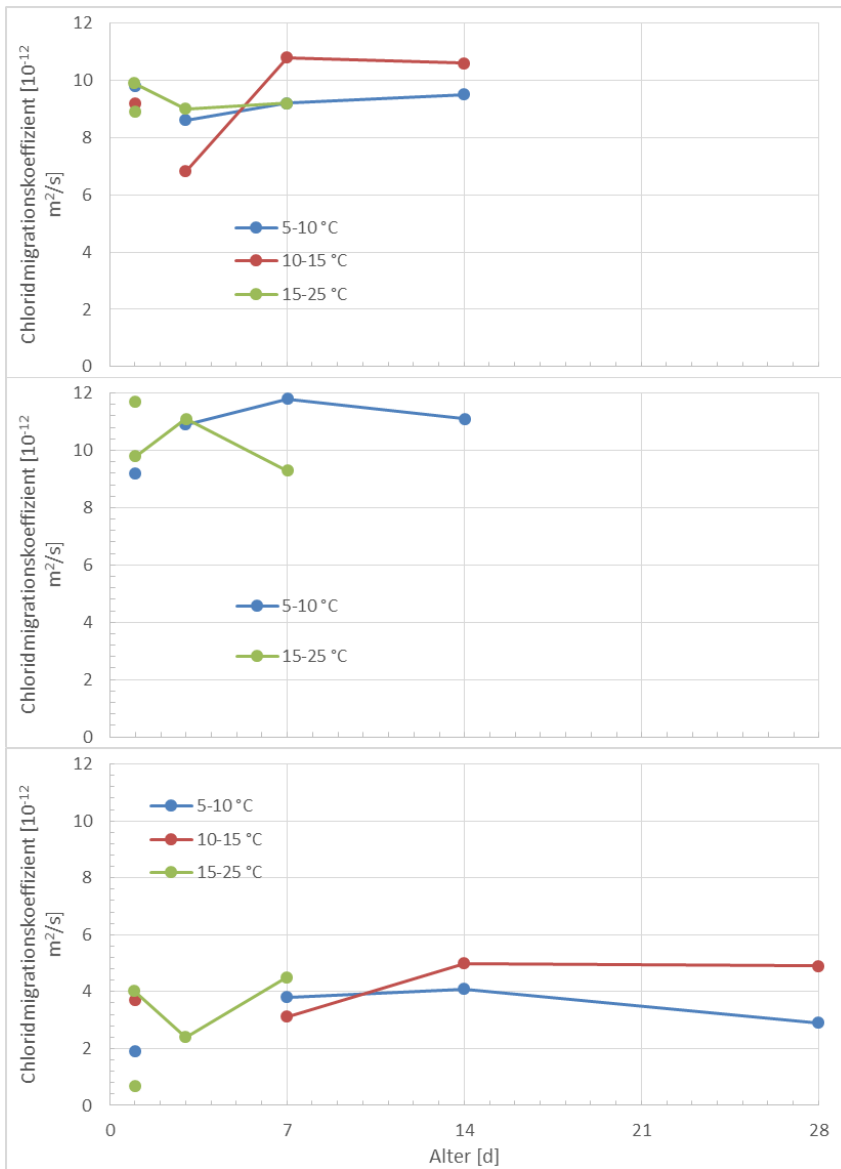


Abbildung 50: Chloridmigrationskoeffizient der 3 Betone in Abhängigkeit von der Lagerung und der Nachbehandlung (Folie, NBM = Punkte bei $t = 1 \text{ d}$), der Randbeton wurde nicht abgeschnitten.

Oben: Beton A mit CEM I

Mitte: Beton A mit CEM I und LP

Unten: Beton B mit CEM III/B.

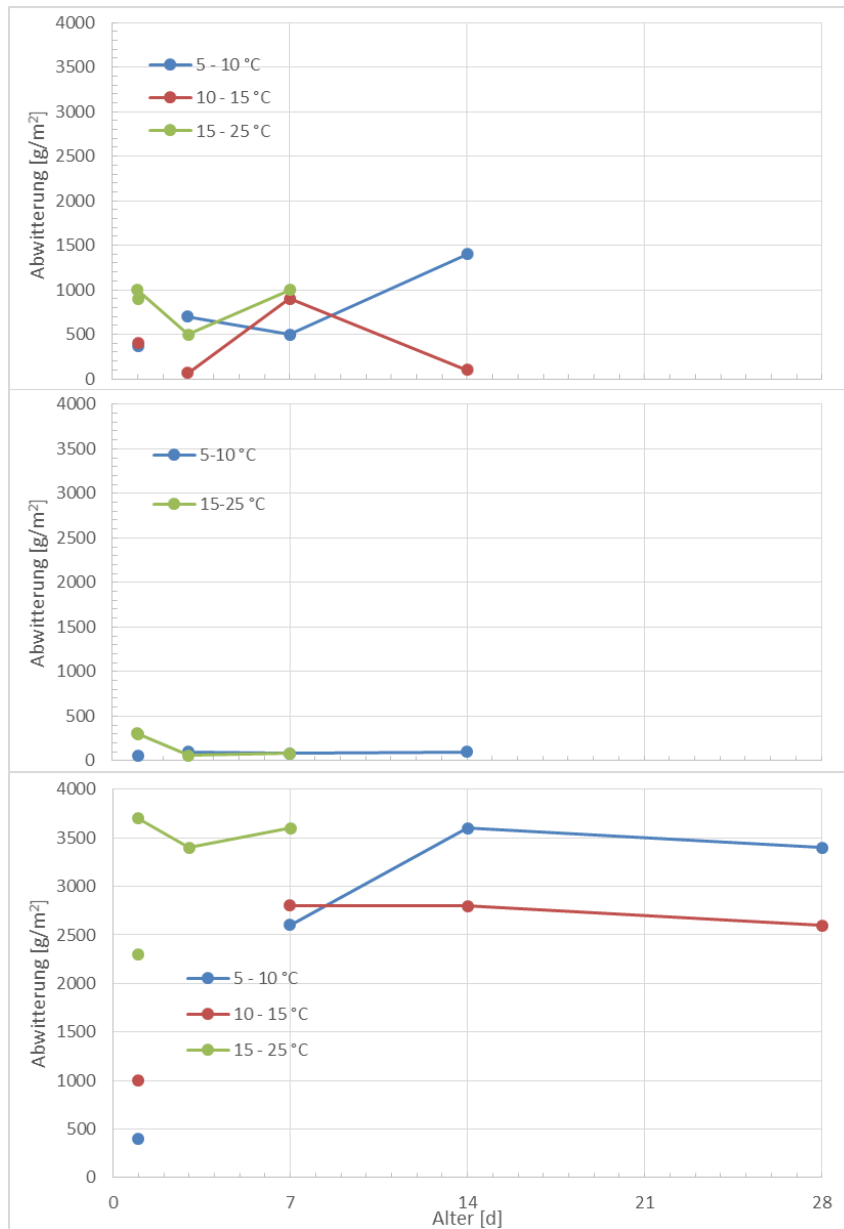


Abbildung 51: Abwitterungsmengen beim Frosttausalzversuch der 3 Betone in Abhängigkeit von der Lagerungsart und der Nachbehandlung (Folie, NBM = Punkte bei $t = 1$ d); beim Beton A mit LP fand bei der Lagerung bei 15 – 25 °C die gleiche Abwitterung beim NBM wie bei eintägiger Nachbehandlung auf.

Oben: Beton A mit CEM I

Mitte: Beton A mit CEM I und LP

Unten: Beton B mit CEM III/B.

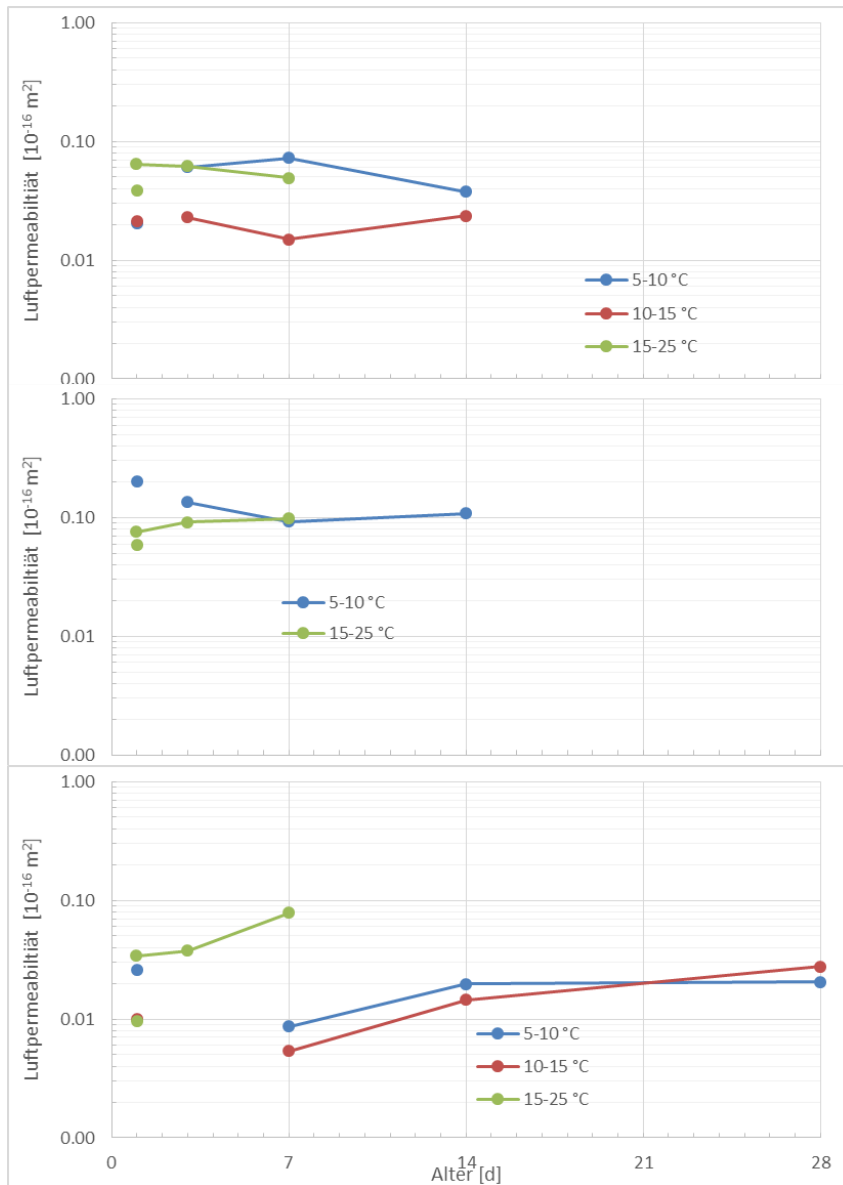


Abbildung 52: Luftpermeabilität der 3 Betone in Abhängigkeit von der Lagerungsart und der Nachbehandlung (Folie, NBM = Punkte bei $t = 1$ d).

Oben: Beton A mit CEM I

Mitte: Beton A mit CEM I und LP

Unten: Beton B mit CEM III/B.

IV Lagerung von Zementpulver

IV.1 Vorbemerkung

Um Hinweise auf die Nachbehandlungsempfindlichkeit verschiedener Zementarten zu erhalten, wurden einerseits verschiedene Zementarten bei 20 °C und verschiedenen Luftfeuchtigkeiten gelagert (Tabelle 18). Zu unterschiedlichen Zeitpunkten wurden die Proben dann gewogen und anschliessend noch bei 50 °C und 105 °C getrocknet und erneut gewogen, um die vom Zement aufgenommene Wassermenge zu bestimmen. Andererseits wurden die gleichen Zemente während 3 Monaten bei 20 °C und 75 % r.F. gelagert und danach für weitere 2 Monate weiterhin bei diesem Klima sowie Parallelproben bei 20 °C und 100 % r.F. Damit sollte bestimmt werden, ob Zement, dem am Anfang kaum Wasser zur Hydratation zur Verfügung steht, durch eine nachträgliche Wasserzufuhr weiter hydratisieren kann.

Die Zementproben wurden auf Uhrgläsern in mit einem Deckel verschlossenen Kisten gelagert. Zu den Wägeterminen wurden jeweils Uhrgläser mit Proben herausgenommen (Abbildung 53) und wie beschrieben getrocknet und gewogen. Durch die Deckel war der Luftzutritt in die Kisten stark gebremst, eine geringe Karbonatisierung der Zementproben kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.



Abbildung 53: Lagerung von Zement.

Tabelle 18: Untersuchte Zementarten und Luftfeuchtigkeiten bei 20 °C.

Zementart	Lagerungsfeuchte [%]	Salz zur Einstellung der Feuchte
CEM I 42,5 N	75	NaCl
CEM II/A-LL 42,5 N	80	NH ₄ Cl
CEM II/A-D 52,5 R	85	KCl
CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N	90	Na ₂ PO ₄ x 7 H ₂ O
CEM III/B 32,5 R	100	Wasser

IV.2 Ergebnisse

In Abbildung 54 sind die Ergebnisse der Lagerungsversuche dargestellt. Insgesamt fällt auf, dass

- mit zunehmender Lagerungsdauer die Massen zunehmen
- bei einer Lagerungsfeuchte zwischen 75 und 85 % die Zemente kaum an Masse zunahm. Dies stimmt auch mit Ergebnissen von z.B. Powers [6] überein.
- zwischen einer Lagerung bei 95 % und 100 % r.F. der Wassergehalt nach Trocknung bei 105 °C und z.T. 50 °C sehr ähnlich ist.

- zwischen der Lagerungsdauer von 7 und 28 Tagen die Massenzunahme deutlich ist.
- CEM I und CEM II/A-LL am meisten Masse zunehmen, was an dem hohen Zementklinkergehalt beim Zement CEM I und der hohen Mahlfineinheit des Klinkers beim Zement CEM II/A-LL liegt
- CEM III/B die niedrigste Massenzunahme aufweist (ca. 1/3 geringer als andere Zementarten), was auf den mit Abstand geringsten Gehalt an Zementklinker (maximal 1/3 der anderen Zementarten) zurückgeführt werden kann.

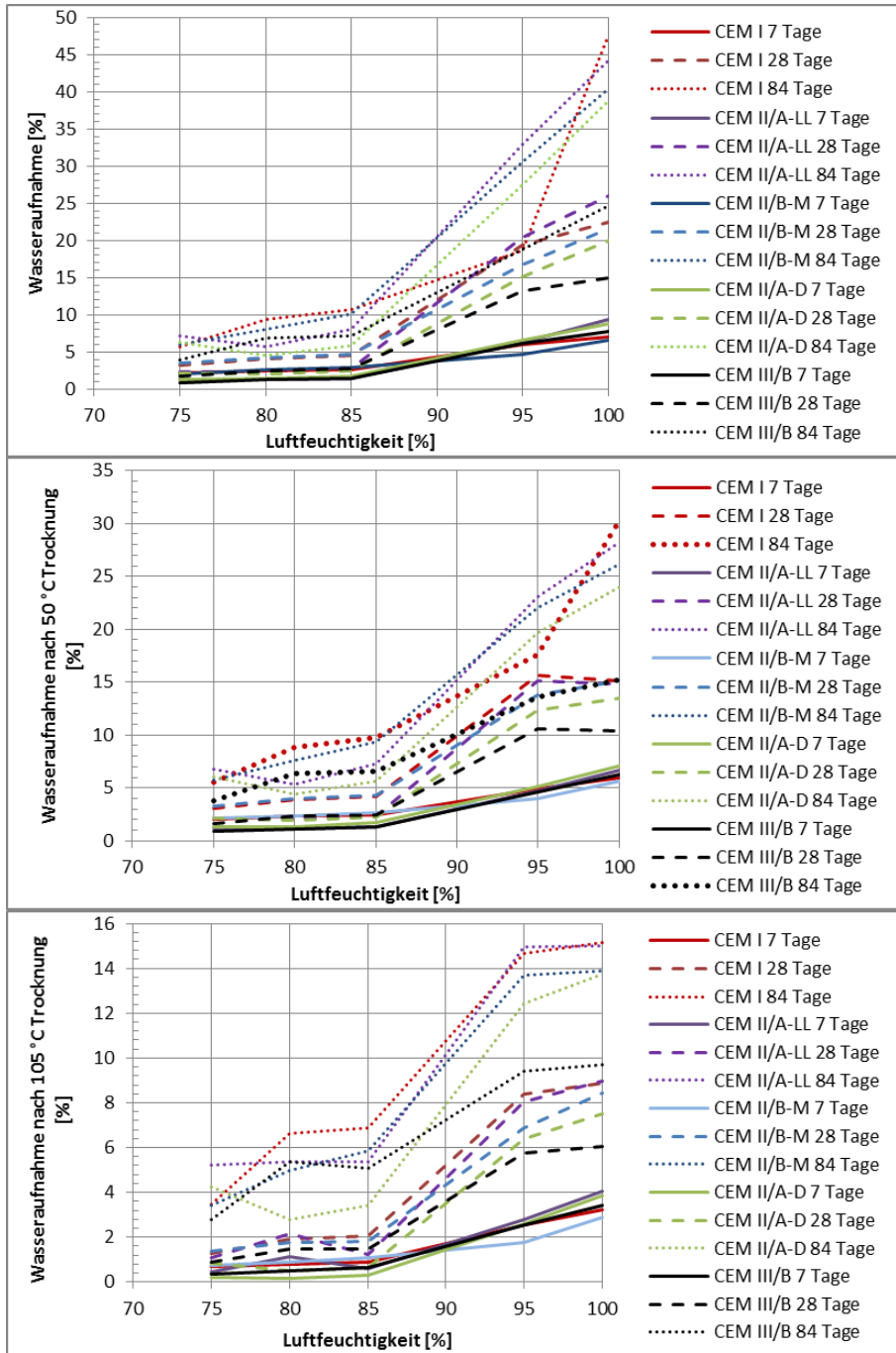


Abbildung 54: Einfluss der Zementart, Lagerungsfeuchte und -dauer auf die Massenzunahme

Oben: ohne Trocknung

Mitte: nach 50 °C Trocknung

Unten: nach 105 °C Trocknung.

Während der „trockenen“ (75 % r.F.) Lagerung nahmen die Zemente etwa 3 – 5 % ihrer Massen (nach Trocknung bei 105 °C) an Wasser auf (Abbildung 55). Durch die Umlagerung auf 100 % r.F. nahm der Wassergehalt zu. Die Wasseraufnahme nach 105 °C-Trocknung war am Ende der zweimonatigen Lagerung bei 100 % r.F. etwa 50 bis 100 % höher als bei der Lagerung bei 75 % r.F. Dies belegt, dass nach „trockener“ Lagerung eine erhöhte Feuchtezufuhr die Zementhydratation wieder ankurbeln kann. Vergleicht man die Wassergehalte nach 105 °C-Trocknung nach fünfmonatiger Lagerung (3 Monate 75 % r.F., 2 Monate 100 % r.F.) mit denen der ca. 3 monatigen Lagerung konstant bei 100 % r.F. (Abbildung 54), weisen die konstant bei 100 % r.F. gelagerten Zemente einen etwa 10 bis 20 % höheren Wassergehalt trotz halb so langer Lagerung auf. Zement CEM III/B nahm am wenigsten Wasser und Zement CEM II/B-M am meisten Wasser auf.

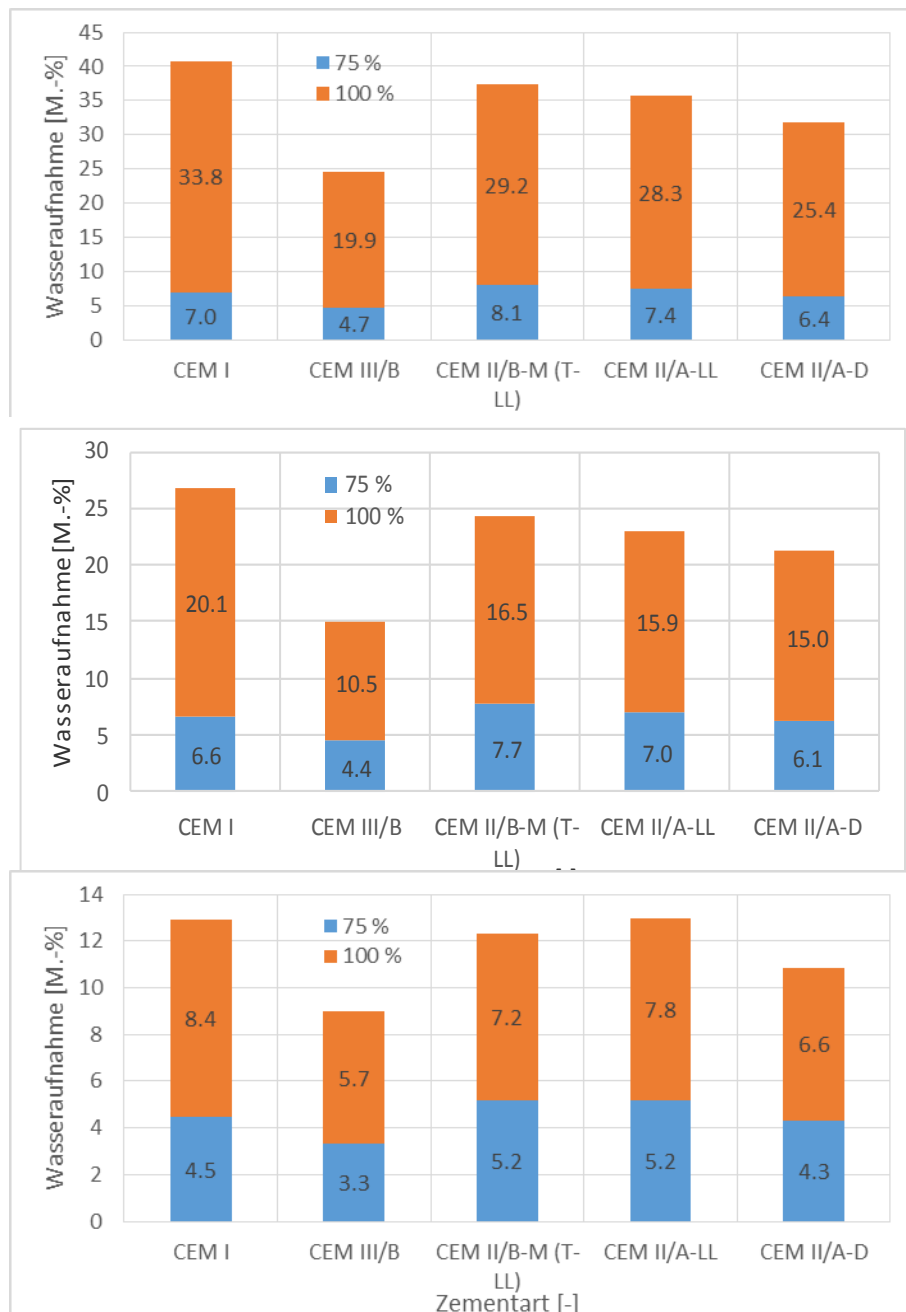


Abbildung 55: Einfluss der Zementart, Lagerungsfeuchte und –dauer auf die Massenzunahme nach dreimonatiger Lagerung bei 20 °C und 75 % r.F. sowie anschließender zweimonatiger Lagerung bei 20 °C und 75 % r.F. bzw. 100 % r.F.

Oben: ohne Trocknung

Mitte: nach 50 °C Trocknung

Unten: nach 105 °C Trocknung.

IV.3 Fazit

Insgesamt zeigte sich, dass bei einer Lagerung bei 20 °C und

- unterhalb von etwa 90 % r.F. die Hydratation stark verlangsamt wird.
- zwischen 90 und 95 % r.F. der Wassergehalt deutlich zu nimmt.
- zwischen 95 und 100 % r.F. der in Hydratphasen eingebundene Wassergehalt (105 °C Trocknung) ähnlich ist; d.h.
 - dieser Feuchteunterschied in der Lagerung macht sich wenig bemerkbar
 - bei der Nachbehandlung sollte eine relative Feuchte von mindestens 95 % vorherrschen

Durch eine feuchte Lagerung nach einer anfänglichen trockenen Lagerung konnte die Hydratation des Zements wieder angeregt werden.

Nach 28 und 84tägiger Lagerung unterschieden sich die Zementarten deutlicher in der Feuchteaufnahme als nach siebentägiger Lagerung. Der Zement CEM II/B-M (T-LL) nahm während der siebentägigen Lagerung bei > 90 % r.F. weniger Feuchtigkeit auf (nach 105 °C) als die anderen Zementarten. Bezüglich der Nachbehandlung der untersuchten Zementarten wäre zu erwarten, dass die Zementart CEM II/B-M (T-LL) deshalb eher empfindlicher auf eine ungenügende Feuchte als die anderen Zementarten reagiert. Nach 84tägiger Lagerung lag die Feuchteaufnahme des Zements CEM II/B-M (T-LL) im Mittelfeld der untersuchten Zementarten. Der zeitliche Unterschied in der Feuchteaufnahme kann vor allem auf die unterschiedlichen Zementklinkergehalte und – mahlfeinheiten zurückgeführt werden. Beim Zement CEM III/B mit einem geschätzten Klinkergehalt von etwa 25 – 30 % hydratisiert im Alter von wenigen Tagen eine ähnliche Klinkermenge wie im Zement CEM I mit mindestens 95 % Klinker. Im höheren Alter zeigt sich dann der Einfluss des Klinkergehaltes bzw. der Reaktivität der weiteren Hauptbestandteile (Silikastaub, gebrannter Ölschiefer, Hochofenschlacke) im Zement. Der Zement CEM I mit dem höchsten Klinkergehalt hydratisierte bei nahezu allen untersuchten Luftfechtigkeiten am stärksten. Der Zement CEM II/A-LL hydratisierte aufgrund seiner hohen Mahlfeinheit und trotz seines geringeren Klinkergehaltes (ca. 82 %) nur gering weniger als der Zement CEM I. Der Zement CEM II/A-D mit der höchsten Mahlfeinheit und dem zweithöchsten Klinkergehalt (ca. 92 %) hydratisierte langsamer als der Zement CEM II/A-LL. Diese erstaunliche Feststellung könnte eventuell mit einer dichteren Lagerung des Zementpulvers erklärt werden (vgl. auch [4], [27]). Zement CEM III/B nahm im Alter von 28 und 84 Tagen am wenigsten Feuchte (nach 105 °C Trocknung) auf, was auf dessen geringen Klinkergehalt und langsam reagierenden Hüttensand zurückgeführt werden kann; zudem zeigte diese Zementart den geringsten Einfluss der Lagerung bei 75 bis 100 % auf die Feuchteaufnahme nach 105 °C Trocknung.

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
C ₂ S	Belit, Dicalciumsilikat
C ₃ A	Aluminat, Tricalciumaluminat
C ₃ S	Alit, Tricalciumsilikat
C ₄ AF	Ferrit, Tetracalciumaluminatferrit
CAH	Calciumaluminathydrat
CEM I	Portlandzement gemäss SN EN 197-1
CEM III/B	Hochofenzement gemäss SN EN 197-1
CH	Portlandit, Calciumhydroxid
CSH	Tobermorit, Calciumsilikathydrat
CW	Chloridmigrationskoeffizient [m ² /s], geprüft nach SIA 262/1
f _c	Würfeldruckfestigkeit [N/mm ²]
f _{ck,cube}	charakteristische Würfeldruckfestigkeit
FT	Frosttausalz widerstand [g/m ²] bzw. hoch – mittel – tief, geprüft nach SIA 262/1
kT	Luftpermeabilität [m ²], geprüft nach SIA 262/1
KW	Karbonatisierungswiderstand [mm/√a], geprüft nach SIA 262/1
LP	Luftporenbildner
NBK	Nachbehandlungsklasse gemäss SIA 262
NBM	Nachbehandlungsmittel
oR	Ohne Randbeton
r	Festigkeitsentwicklung, Quotient aus 2 und 28 Tage-Druckfestigkeit
SE	Schalungseinlage
T	Temperatur
w	Wassergehalt [kg/m ³]
WL	Wasserleitfähigkeit [g/m ² h], geprüft nach SIA 262/1
w/z	Massenverhältnis Wasser zu Zement [-]
z	Zementgehalt [kg/m ³]

Literaturverzeichnis

-
- [1] CEN, CEN/TS 14754-1:2007, Nachbehandlungsmittel – Prüfverfahren – Teil 1: Bestimmung der Wasserrückhaltefähigkeit von üblichen Nachbehandlungsmitteln
-
- [2] Ehrhardt, D. & J. Stark, 2010, Nachbehandlung von Beton – Die neue TL NBM-StB 09, Strasse und Autobahn, 8, 2010
-
- [3] Locher, F. W., 2000, Zement – Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Verlag Bau + Technik
-
- [4] Giese, A., D. Ehrhardt & J. Stark, 2012, Vergleich der Frost-Tausalz-Beständigkeit von CEM II-Zementen im Labor und an Freiflächen, ibausil, Poster P 2.34
-
- [5] Lothenbach, B., Th. Matschei, G. Möschner & F. P. Glasser, 2008, Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement, Cement and Concrete Research, 38, 2008, 1 – 18.
-
- [6] Powers, T. C., 1947, A disussion of cement hydration in relation to the curing of concrete, Highway reasearch board: Proceedings of highway research board, 27. Auflage, 178 – 188
-
- [7] Adam, Th., 2006, Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtgehalt, Dissertation TU Darmstadt
-
- [8] Goto, S. & D.M. Roy, 1981, The effect of w/c-ratio and curing temperature on the permeability of hardened cement paste, Cement an Concrete Research, 11, 1981, 575 – 579
-
- [9] Detwiler, R.J., K.O. Kjellson & O.E. Gjorv, 1991, Resistance to chloride intrusion of concrete cured at different temperatures, ACI Materials Journal, Jan/Feb., 1981, 19-24
-
- [10] Marsh, B.K., R.J. Day, & D.G. Bonner, 1985, Pore structure characteristics affecting the permeability of cement paste containing fly ash, Cement and Concrete Research, 15, 1985, 1027 – 1038
-
- [11] Valenza II, J.J. & J.J. Thomas, 2012, Permeability and elastic modulus of cement paste as a function of curing temperature, Cement an Concrete Research, 42, 2012, 440 – 446
-
- [12] Lothenbach, B., C. Alder, F. Winnefeld & P. Lunk, 2005, Einfluss der Temperatur und Lagerungsbedingungen auf die Festigkeitsentwicklung von Mörtel und Beton, beton, 12, 604 – 609
-
- [13] De Larrard, F., 1999, Concrete Mixture Proportioning : A Scientific Approach, Brunner Routledge, Oxford
-
- [14] Spears, R.E., 1983, The 80 Percent Solution to Inadequate Curing Problems ; Concrete International, April 1983, 15 – 18
-
- [15] Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2011, Nachbehandlung von Beton, Zementmerkblatt Betontechnik B8, 3.2011
-
- [16] Kern, R., 1998, Der Einfluss der Austrocknung auf die Wasserbindung und Eigenschaften des Betons, Dissertation TU Darmstadt
-
- [17] Hilsdorf, H.K., K. Schönlin & F. Tauscher, 1997, Dauerhaftigkeit von Beton: Schlussbericht zum Forschungsauftrag 3114 der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V., Beton Verlag, Düsseldorf, 1997
-
- [18] Ehrhardt, D. & J. Stark, 2009, Einfluss der Nachbehandlung auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton, ibausil, Tagungsband Nr. 2, 85 – 92
-
- [19] Spörel, F., H. Müller & A. Westendarp, 2013, Einfluss der Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit geschalter massiger LP-Betonbauteile, beton 6/2013, 234 – 239
-
- [20] Schmidt, D., V. Slowik, M. Schmidt & R. Fritzsich, 2007, Auf Kapillardruckmessung basierende Nachbehandlung von Betonflächen im plastischen Zustand, Beton- und Stahlbetonbau, 102, Heft 11, 789 – 796
-

-
- [21] Verein Deutscher Zementwerke, 2002, Zement Taschenbuch, 50. Ausgabe, Verlag Bau+Technik
-
- [22] Bentz, D. P., K. A. Snyder, & P. E. Stutzman, 1997. Hydration of portland cement : The effects of curing conditions. Proc. 10th Int. Congress on the Chemistry of Cement. Vol. 2. 1997.
-
- [23] Huber, J., 2008, Zur Nachbehandlung von Beton – Auswirkungen des Wasserverlustes durch Evaporation im jungem Alter am Beispiel von Strassenbeton, Dissertation TU München
-
- [24] Weber, S., 1996, Nachbehandlungsunempfindlicher Hochleistungsbeton, Mitteilungen 1996/2 des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart
-
- [25] Lothenbach, B., K. Scrivener & R.D. Hooton, 2011, Supplementary cementitious materials, Cement and Concrete Research, Vol. 41, 1244 – 1256
-
- [26] Marsh, B.K. & M.A. Ali, 1994, American Concrete Institute ACI, Special Publication SP145, Nizza, France, 1161 – 1176
-
- [27] Parrot, L.J., 1988, Moisture profiles in drying concrete, Advances in Cement Research, Vol. 1, No. 3, 164 – 170
-
- [28] Torrent, R., A. Griesser, F. Moro, & F. Jacobs, 2012, Technical-economical consequences of the use of Controlled Permeable Formwork, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III : 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, IC-CRRR-3, 3-5 September 2012, Cape Town, South Africa, 1330 – 1335
-
- [29] Wassermann, R., & A. Bentur, 2013, Efficiency of curing technologies: strength and durability, Materials and Structures, Vol. 46, Nr. 11, 1833 – 1842
-
- [30] VDB, 2011, Optimierung des Nachbehandlungssystems für Betone mit CEM II/B-S-Zementen, Report 17, Verband Deutscher Betoningenieure e.V.
-
- [31] Stark, J. & D. Ehrhardt, 2009, CEM II/B-S Zementssysteme im Betonstrassenbau, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FE-Nr. 08.183/2005/LGB, Bauhaus-Universität Weimar, Friedrich August Finger - Institut für Baustoffe, Februar 2009
-
- [32] Kjellsen, K. O. & R.J. Detwiler, 1992, Reaction kinetics of portland cement mortars hydrated at different temperatures, Cement and Concrete Research, 22, 112 – 120
-
- [33] Escalante-Garcia, J.I. & Sharp, J.H., 1998, Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in portland cements : Part I, Neat Cements, Cement and Concrete Research, 28, 9, 1245 – 1257
-
- [34] Escalante-Garcia, J.I. & Sharp, J.H., 2000, The effect of temperature on the early hydration of Portland cement and blended cements, Advances in Cement Research, 12. 3, 121 – 130
-
- [35] Meteorologische Daten von www.meteoschweiz.admin.ch, Zugriff 2013
-
- [36] Jacobs, F., 2006, Luftpermeabilität als Kenngrösse für die Qualität des Überdeckungsbetons von Betonbauwerken, VSS-Bericht 604
-
- [37] Bager, D.H., 2009 : 25 years exposure – durability and mechanical properties. - 17. Ibausil, Weimar, 23. – 26.9.2003, 939 – 950.
-
- [38] Stark, J. & B. Wicht, 2000: Zement und Kalk. - Bau Praxis Birkhäuser
-
- [39] Lunk, P., 2013, Praktische Erfahrungen mit den neuen Betonnormen, 19. Holcim Betontagung 24.9.2013
-
- [40] Van Egmond, Bram & F. Jacobs, 1999, Gewichtete Reife des Betons, Cementbulletin Nr. 11
-
- [41] Polder, R., C. Andrade, B. Elsener, O. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert & M. Raupach, 2000, Test method for on site measurement of resistivity of concrete, Materials and Structures, 33, December, 603-611
-
- [42] Martin, M., 2012, The Influence of Curing Techniques and Chemical Admixtures on the Properties of Concrete, Master Thesis, University of Cape Town, South Africa
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 16.6.2014

Grunddaten

Projekt-Nr.: AGB 2011/001

Projekttitel: Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton

Enddatum: 16.6.2014

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die Dauerhaftigkeitseigenschaften (Karbonatisierungswiderstand, Chloridwiderstand, Frosttausalz widerstand) und nicht die Festigkeit von Stahlbeton bestimmen heutzutage vor allem die Nutzungsdauer bzw. den Instandsetzungsbedarf von Bauwerken. Durch den Einbau und eine (ungenügende) Nachbehandlung kann die Qualität des vom Betonwerk gelieferten Betons massgeblich verschlechtert werden. Folglich hat der Bauherr keine Gewähr, ein qualitativ hochwertiges Betonbauteil zu erhalten, falls nur das Betonwerk nachweist, dass der dort hergestellte Beton die Normanforderungen (SN EN 206-1) erfüllt. Im Rahmen des Forschungsprojektes galt es, die neuen Regeln der Norm SIA 262:2013 (bzw. EN 13670) zur Nachbehandlungsdauer zur Vermeidung einer zu schnellen Austrocknung zu überprüfen. Hierzu wurden Tiefbaubetone ($w/z = 0.45$, $D_{max}32$) mit zwei verschiedenen Zementarten (CEM I, CEM III/B) hergestellt. Die Prüfkörper wurden bei konstanten Klimata im Labor und variablen Klimata im Freien gelagert. Dabei zeigte sich, dass die Ergebnisse der im Labor gelagerten Prüfkörper nicht einfach auf Praxisverhältnisse übertragen werden können. Der Einfluss der Zementart wirkte sich sehr stark auf die betrachteten Dauerhaftigkeitseigenschaften und die notwendige Nachbehandlungsdauer aus. Auch zeigte sich ein wesentlicher Unterschied in der notwendigen Nachbehandlungsdauer bei Beton, der mit und ohne künstlich eingeführte Luftporen zur Erzielung eines hohen Frosttausalzwiderstandes hergestellt wurde.

Mit dem Konzept zur Nachbehandlungsdauer in der Norm SIA 262 (Tab. 22 und 23), welches vor allem auf der Festigkeitsentwicklung basiert, wird den Dauerhaftigkeitsanforderungen nicht genügend Rechnung getragen. Folglich ist dieses Konzept für die in der Schweiz verwendeten Betone nicht generell geeignet. Dauerhaftigkeitsprobleme ergeben sich vor allem bei Temperaturen über 15 °C.

Die Vorgaben können vor allem bei niedrigen Temperaturen zu unwirtschaftlich langen Nachbehandlungsdauern führen. Die notwendige Nachbehandlungsdauer hängt weder von den Umgebungstemperaturen noch der Festigkeitsentwicklung des Betons, wie in der Norm SIA 262: 2013 enthalten, ab. Es wurden Vorschläge ausgearbeitet, wie die Nachbehandlungsdauer für die Praxis einfach definiert werden kann.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Die drei gestellten Zeile wurden erreicht. Die in der Norm SIA 262:2013 enthaltenen Hinweise zur Nachbehandlungsdauer zur Vermeidung einer zu schnellen Austrocknung, die auf der Festigkeitsentwicklung basieren, (Tab. 22, 23) sind nicht immer geeignet, um eine ausreichende Dauerhaftigkeit zu gewährleisten. Im Einzelfall ist die Dauer viel zu kurz (hohe Temperaturen), in anderen viel zu lange (niedrige Temperaturen).

Es besteht kein genereller Zusammenhang zwischen der Entwicklung und Höhe der Druckfestigkeit und der Dauerhaftigkeitseigenschaften (Karbonatisierungswiderstand, Chloridwiderstand, Frosttausalz-widerstand, kapillares Saugen, Luftpermeabilität).

Es wurden Vorschläge zur Festlegung der notwendigen Nachbehandlungsdauer ausgearbeitet.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die in der Norm SIA 262:2013 enthaltenen Hinweise zur Nachbehandlungsdauer zur Vermeidung einer zu schnellen Austrocknung müssen in der Form überarbeitet werden, dass die Nachbehandlung bei hohen Temperaturen (> 15 °C) zu verlängern und bei niedrigen Temperaturen zu verkürzen ist. Die in der Tabelle 23 der Norm SIA 262 enthaltenen Parameter Festigkeitsentwicklung und Oberflächentemperatur des Betons eignen sich in der vorgegebenen Weise nicht für die Bestimmung der Nachbehandlungsdauer für die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton.

Die Übertragbarkeit von Ergebnissen von Versuchen mit konstantem Klimata im Labor auf Praxisbedingungen ist zu überprüfen. Durch die konstanten Klimata im Labor kann die Gefügeentwicklung und Austrocknung des Betons sehr abweichend von Praxisverhältnissen verlaufen. Die sich im Bauteil ergebenden Betoneigenschaften sind neben separat hergestellten Prüfkörpern vermehrt zu prüfen.

Publikationen:

Jacobs, F. (2014): Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlung.- in: Neues aus der Brückenforschung, sia D 0247

Jacobs, F. (2014): Curing of Concrete.- RILEM International workshop on performance-based specifications and control of concrete durability, Zagreb, Croatia, 11.-13.6.2014

Jacobs, F. (2013): Nachbehandlung von Beton.- in: TFB Bulletin 2/2013

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Jacobs

Vorname: Frank

Amt, Firma, Institut: TFB AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Das Forschungsprojekt wurde im vorgesehenen Zeitraum und Budget durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen. Die Ergebnisse wurden nachvollziehbar ausgearbeitet und bei den Sitzungen regelmässig dargestellt.

Es konnte gezeigt werden, dass die in der SIA 262:2013 enthaltenen Hinweise zur Nachbehandlungsdauer zur Vermeidung einer zu schnellen Austrocknung nicht ausreichend sind. D.h. bei Anwendung der SIA-Regeln kann eine ungenügende Dauerhaftigkeit mit entsprechenden wirtschaftlichen Nachteilen (vorzeitigem Instandsetzungsbedarf) resultieren. Es wurden Vorschläge ausgearbeitet, wie in der Praxis die Nachbehandlung geregelt werden sollte.

Umsetzung:

Die im Rahmen des Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnisse zur Nachbehandlung zur Vermeidung einer zu schnellen Austrocknung werden den zuständigen Normengremien des SIA mit Hinweisen zur Umsetzung unterbreitet. Über die Erkenntnisse wurde und wird eine breite Fachöffentlichkeit informiert (z.B. TFB Bau und Wissen / Betonkolloquien).

weitergehender Forschungsbedarf:

Ermittlung der Unterschiede der Betoneigenschaften im Bauteil und in separat hergestellten Prüfkörpern; letztere sind vom Betonwerk beim Konformitätsnachweis zum Nachweis der Qualität herzustellen. Ausarbeitung von Prüfmethoden nach Abschluss und ggf. während der Nachbehandlung zur Bestimmung der notwendigen Nachbehandlungsdauer.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Vorgaben der SIA 262:2013 zur Nachbehandlung sind dringend zu revidieren.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Käser

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Baudirektion Kanton Zürich Tiefbauamt, Ingenieur-Stab

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Stand: 15.6.2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Foundationsschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbausphal mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbausphal in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchsanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Viellissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologientransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labor-massstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeurückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschieben von Erhaltungsmaßnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisell	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeurückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebsparkeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDAinSVT Einsatz modellbasierter Datentransfernomen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbaupasphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlag-schutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009