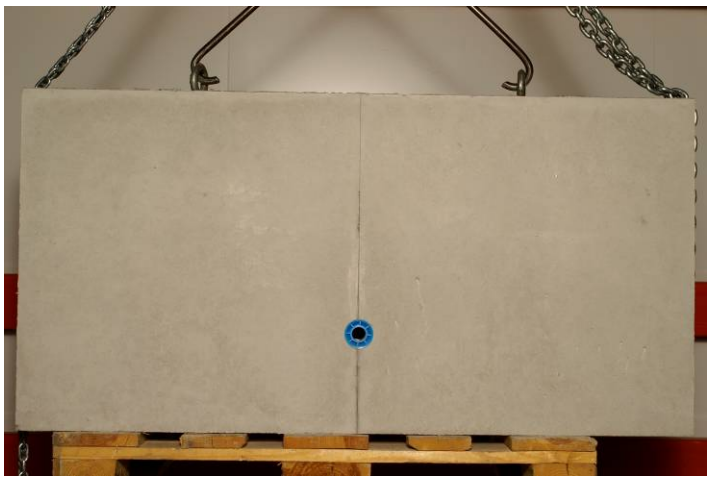
Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 44 823 55 11
F +41 44 823 40 35
www.empa.ch/abt135

Materials Science & Technology

Abteilung Beton & Bauchemie **Schlussbericht**

cemsuisse-Projekt SB3:

Wechselwirkungen zwischen Beton, Trennmittel, Schalung, Verarbeitung und Umgebungsbedingung



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **3**
1 Projektvoraussetzungen und Ziele **4**
2 Durchgeführte Arbeiten **5**
2.1 Konzept 5
2.2 Materialien 6
2.3 Untersuchungen 7
2.3.1 Grossmassstäbliche Betonwände 7
2.3.2 Zusätzliche Experimente 11
3 Resultate und Diskussion **13**
3.1 Viskosität der Trennmittel 13
3.2 Wärmeflusskalorimetrie 13
3.3 Betonierversuche 14
3.3.1 Farbkonstanz 14
3.3.2 Bildgestützte Computerauswertung Helligkeit 22
3.3.3 Porigkeit 23
3.4 Mikroskopische Untersuchungen 25
3.5 Korrelation mit den Ergebnissen des Projektes SB4 27
4 Bedeutung für die Praxis **28**
5 Weitere Umsetzung **29**
6 Literatur **29**
7 Anhang **30**
7.1 Diagramme Wärmeflusskalorimetrie 30

Für das cemsuisse-Projekt SB3: Wechselwirkungen zwischen Beton, Trennmittel, Schalung, Verarbeitung und Umgebungsbedingung

Dübendorf, Abteilung Beton / Bauchemie, 31.07.2007

Roman Loser

Zusammenfassung

Ziel des Projektes ist die Erfassung, Identifikation und Quantifizierung wichtiger Wechselwirkungen zwischen Beton, Trennmittel, Schalung, Verarbeitung und Umgebungsbedingungen, um so die Sichtbetonbauweise durch ein verbessertes Qualitätsmanagement zu optimieren.

An Betonwänden mit jeweils vier Sichtflächen von 50x50 cm Abmessung wurde der Einfluss verschiedener Faktoren (u.a. Schalung, Trennmittel, Betonverarbeitbarkeit, Temperatur, etc.) auf die Porigkeit und die Farbkonstanz untersucht. Zuerst wurden die Flächen bei definierter Temperatur und relativer Feuchtigkeit sowie normiertem Licht fotografiert. Danach erfolgte eine subjektive visuelle Bewertung sowie eine quantitative Erfassung mittels Bildanalyse. Zusätzlich wurden einzelne Einflussfaktoren in kleinmassstäblichen Experimenten genauer untersucht.

Die homogensten Oberflächen bezüglich Helligkeit entstehen bei gut verarbeitbarem Beton der Konsistenzklasse F4 – F5, der jedoch nicht zum Bluten neigt. Unter diesen Bedingungen haben Trennmittel und Schalung nur einen untergeordneten Einfluss. Den grössten negatien Einfluss auf die Inhomogenitäten einer Sichtbetonoberfläche haben tiefe Temperaturen sowie Unterschiede in der Saugfähigkeit der Schalung. Ein übermässiger Trennmittelauftrag führt zu erhöhter Wolkenbildung und zu Hydratationsstörungen. Durch den Trennmitteleinsatz nimmt die Gesamtporenfläche ab. Ebenso nimmt die Wahrscheinlichkeit einer erhöhten Porigkeit auf der Oberfläche mit zunehmendem Ausbreitmass des Betons ab.

1 Projektvoraussetzungen und Ziele

Glatte, nicht strukturierte Sichtbetonflächen in einheitlicher Farbe gewinnen in der modernen Architektur zunehmend an Bedeutung. Um qualitativ hochwertige Oberflächen zu erzielen, soll die Sichtbetonbauweise durch ein verbessertes Qualitätsmanagement optimiert werden. Neben der zielorientierten Projektierung und Ausschreibung der Sichtbetonbauwerke spielt dabei die Ausführung eine entscheidende Rolle. Die Wahl der entsprechenden Materialien und die Kontrolle der Herstellungsbedingungen bestimmen die Qualität der Sichtbetonflächen wesentlich (Abb. 1) und können nur unter Berücksichtigung der komplexen Wechselwirkungen richtig getroffen werden.

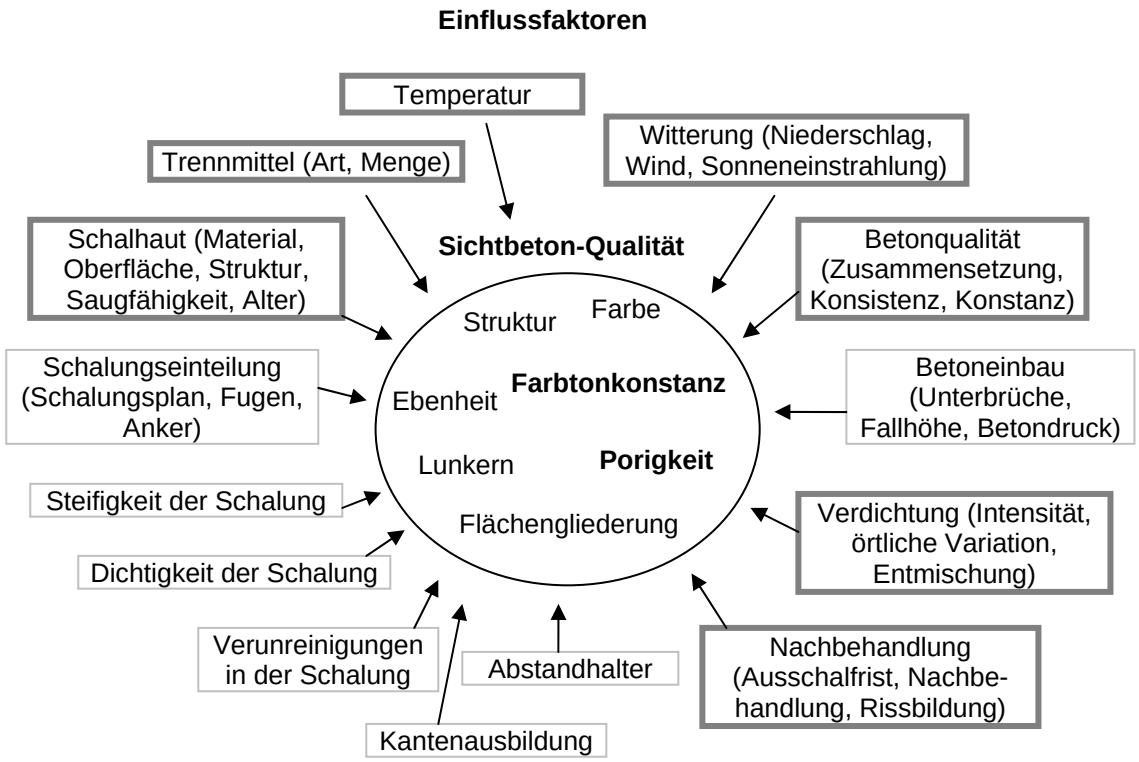


Abb. 1: Aspekte der Sichtbetonqualität und deren Einflussgrössen.

Ziel des vorliegenden Projektes war, die Wechselwirkungen zwischen Beton, Trennmittel, Schalung, Verarbeitung und Umgebungsbedingung zu untersuchen. Um dieses sehr weit gefasst Feld einzuschränken, wurden nur die in Abb. 1 fett umrahmten Einflussfaktoren variiert und ihre Auswirkungen auf die Qualitätsmerkmale **Farbkonstanz** und **Porigkeit** untersucht. Innerhalb dieser Versuchsmatrix wurden in Absprache mit der Projektbegleitgruppe punktuell ausgewählte Einflussfaktoren (z.B. beschränkte Anzahl Schaltafeltypen oder Trennmittel) und Kombinationen untersucht.

2 Durchgeführte Arbeiten

2.1 Konzept

Zur Beurteilung des Einflusses verschiedener Versuchsparameter auf die Sichtbetonqualität mussten representative Prüfflächen hergestellt werden. In umfangreichen Vorversuchen (Schalungsentwurf und -konstruktion, Mischungsentwurf, künstliche Alterung, Trennmittelauftrag, Einbringen des Betons, Verdichtungsart und –dauer, fotografische Aufnahme und Auswertung, etc.) wurde deshalb der genaue Ablauf für die Herstellung der Prüfflächen so festgelegt, dass möglichst alle unerwünschten Nebeneffekte ausgeschaltet werden konnten und nur der jeweils zu untersuchende Paramter die Sichtbetonfläche beeinflusste. Als Prüfflächen wurden Betonwände mit folgenden Abmessungen hergestellt:

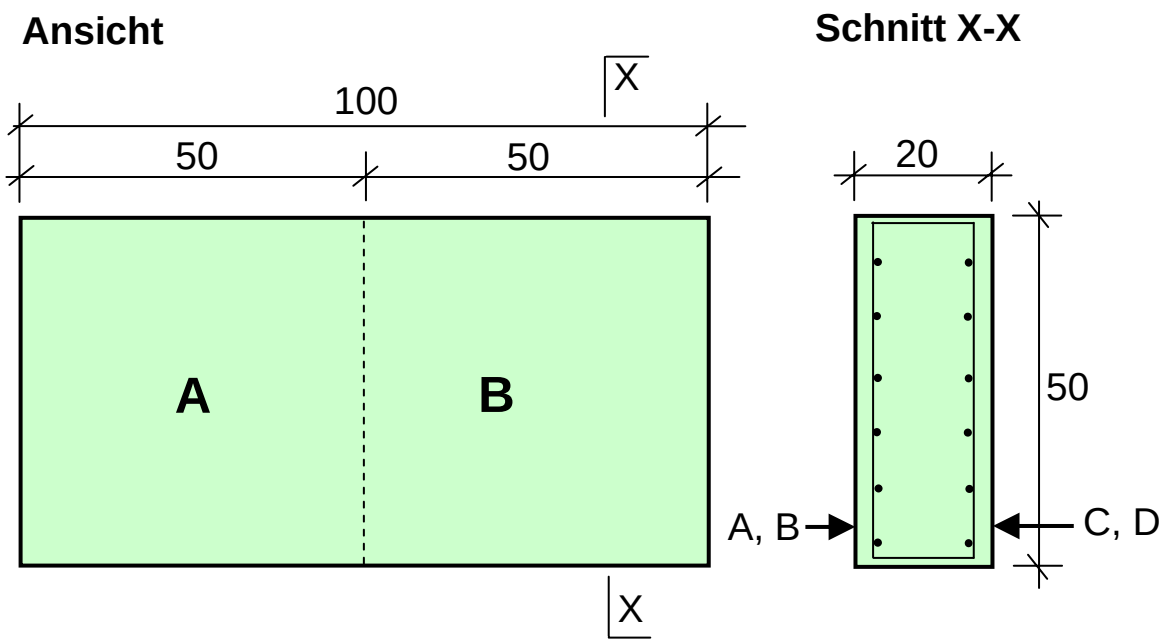


Abbildung 1: Prüfkörper für die Betonierversuche mit vier verschiedenen Prüfkörperoberflächen (A-D) für die Beurteilung von Porigkeit und Farbkonstanz (Masse in cm).

An jeder hergestellten Betonwand konnten so vier verschiedene Flächen mit Abmessungen von 50x50 cm beurteilt werden. Diese Flächen wurden anschliessend zu definierten Zeitpunkten fotografisch aufgenommen und die Bilder bezüglich Porigkeit und Farbkonstanz ausgewertet.

Mittels Zusatzuntersuchungen wie Wärmeflusskalorimetrie, Viskositätsmessungen an Trennmitteln, und Mikroskopie an Spitzproben wurde zudem versucht, Ursachen für die unterschiedlichen Qualitäten der Sichtbetonoberflächen zu finden.

2.2 Materialien

Aus einem umfangreichen Marktangebot wurden in Absprache mit der Projektbegleitgruppe die verwendeten Materialien ausgewählt. Es sind dies die folgenden, häufig verwendeten Schaltafeln und Trennmittel:

- Trennmittel:

- wässrige Emulsion pflanzlicher Öle
- lösungsmittelhaltiges modifiziertes Mineralöl
- lösungsmittelfreies modifiziertes Mineralöl, Hersteller A
- lösungsmittelfreies modifiziertes Mineralöl, Hersteller B

- Schaltafeln (Dicke 27 mm):

- phenolharzbeschichtete, 19-lagige Birken-Furniersperrholzplatte, Beschichtung 120 g/m^2 (braune Farbe)
- melaminharzbeschichtete Dreischichtplatte aus Fichten-/Tannenholz (gelbe Farbe)
- kunststoffbeschichtete Birkensperrholzplatte (Mischung aus Polyolefinen und pflanzlichen Fasern), Beschichtungsstärke 2 mm (blaue Farbe)
- gehobelte Brettschalung aus Fichtenholz, Breite 19.2 cm und 11.5 cm, unbeschichtet

Für die Betonherstellung wurde als Hauptzement ein CEM II/A-LL 42.5 N verwendet (Tabelle 1). Für ausgewählte Versuche wurde zusätzlich ein CEM I 42.5 N vom gleichen Hersteller eingesetzt. Als Zusatzmittel kamen ein Fliessmittel auf der Basis von Naphtalinsulfonaten mit einem Feststoffgehalt von 34.4% sowie ein Luftporenbildner (wässrige Lösung von verseiften Harzsäuren) zum Einsatz. Die verwendeten Zemente sowie das Fliessmittel waren auch Bestandteil der Untersuchungen im Projekt SB4.

Bezeichnung	Hersteller	Dichte [kg/m^3]	Blaine [cm^2/g]
CEM II/A-LL 42.5 N	A	3’060	3’620
CEM I 42.5 N	A	3’130	3’070

Tabelle 1: Verwendete Zemente.

Folgende Betonmischungen wurden im Projekt eingesetzt:

Mischung	Gesteins-körnung [kg/m^3]	s/k [-]	Zement Art	Zement Menge [kg/m^3]	Wasser [kg/m^3]	w/z [-]	Zusatzmittel Art	Zusatzmittel Menge [kg/m^3]
SB-1	1’910	0.47	CEM II/A-LL	320	160	0.50	-	-
SB-2	1’915	0.47	CEM I	320	160	0.50	-	-
SB-3	1’815	0.47	CEM II/A-LL	320	159	0.50	LP	1.28
SB-4	1’825	0.47	CEM II/A-LL	320	192	0.60	-	-
SB-5	1’907	0.47	CEM II/A-LL	320	159	0.50	FM	1.92
SB-6	1’912	0.47	CEM I	320	159	0.50	FM	1.92
SB-7	1’941	0.47	CEM II/A-LL	320	146	0.46	FM	1.92

Tabelle 2: Betonmischungen (s/k: Sand/Kies-Verhältnis, LP: Luftporenbildner (0.4%/Zement), FM: Fliessmittel (0.6%/Zement).

Das Grösstkorn der Gesteinskörnung betrug 32 mm. Der Beton wurde in einem 250-Liter-Mischer hergestellt. Pro Mischung konnten so maximal 2 Betonwände hergestellt werden. SB-1 wurde als Grundmischung verwendet und musste deshalb in mehreren verschiedenen Chargen zu unterschiedlichen Zeitpunkten hergestellt werden. SB-5 wurde ebenfalls zweimal verwendet, wobei die zweite Charge bei 5°C hergestellt wurde.

Die Eigenschaften der Betonmischungen wurden im frischen Zustand über den Luftporengehalt (nach EN 12350-7) und das Ausbreitmass (nach EN 12350-5), sowie in ausgewählten Fällen über das Bluten und das Entmischungsmass charakterisiert (Tab. 3). Entmischungsmass und Bluten wurden innerhalb des Projektes SB4 gemessen. Der genaue Prüfablauf ist dem entsprechenden Projektbericht zu entnehmen. Zusätzlich wurde von jeder Mischung die Würfeldruckfestigkeit f_c im Alter von 28 Tagen bei Lagerung im Klima von 20°C/90% r.F. bestimmt.

Eigenschaft		SB-1	SB-1 5°C	SB-2	SB-3	SB-4	SB-5	SB-5 5°C	SB-6	SB-7
AM	[cm]	40-43	39	41	51	59	59	56	57	52
LP-Geh.	[Vol-%]	0.8-1.3	1.0	1.0	4.1	0.3	2.6	1.3	2.5	2.1
f_c	[N/mm^2]	42-45	47	44	34	32	41	43	46	47
Bluten	[%]	1.39	3.12	-	1.27	2.78*	2.38	3.91	-	-
EM	[-]	1.07	1.54	-	3.13	1.29*	2.18	3.35	-	-

Tab. 3: Resultate der Frischbetonkontrollen. AM: Ausbreitmass, LP-Geh.: Luftporengehalt, f_c: Würfeldruckfestigkeit, EM: Entmischungsmass.
* Die Werte für Bluten und Entmischungsmass wurden von der Mischung SB-10 aus dem Projekt SB4 entnommen, welche einen w/z-Wert von 0.58 aufweist.

2.3 Untersuchungen

2.3.1 Grossmassstäbliche Betonwände

Künstliche Alterung

Sämtliche verwendeten Schaltafeln wurden vor ihrem Einsatz künstlich gealtert, um die in der Praxis übliche Mehrfachverwendung zu simulieren. Dazu wurden die Schaltafeln seitlich abgeschalt, mit einem Zementleim (w/z = 0.34) ca. 1.5 cm dick bestrichen und anschliessend mit einem Plastik abgedeckt während 24 Stunden im Laborklima gelagert. Nach dieser Lagerung konnte der Zementleim als vollständige Platte von der Schalung entfernt werden. Die so gealterte Schaltafel wurde mit 6%-iger Salzsäure und einem Lappen gereinigt und anschliessend mit Leitungswasser und deionisiertem Wasser abgespült und während mindestens weiteren 24 Stunden im Laborklima getrocknet. Damit die Schaltafeln nach der künstlichen Alterung nicht mehr berührt werden mussten, wurden die Schaltafeln vorgängig bereits auf die Grundplatte der Wandschalung geschraubt. Nach der künstlichen Alterung wurde jede Platte jeweils nur für einen Versuch eingesetzt und anschliessend ausgewechselt.

Abb. 2: Künstliche Alterung der Schaltafeln: Schaltafeln mit Abschalung vor der Alterung (links), Zementleim frisch eingebracht (mitte), Zementsteinplatte nach dem Entfernen von den Schaltafeloberflächen (rechts).

Trennmittelauftrag

60 Minuten vor dem Einbringen des Betons wurde auf jede Schalungsplatte einzeln das Trennmittel aufbebracht. Hierzu wurde vorgängig die Art des Trennmittels und die Auftragsmenge (dick/dünn) festgelegt. Vor dem Auftrag wurde die Masse von Gefäss mit Trennmittel, Abdeckung, Lappen und Gummihandschuhe bestimmt. Anschliessend wurde das Trennmittel mit einem Lappen und Gummihandschuhen auf die Schaltafeloberfläche gleichmässig aufgebracht und danach sofort wieder die Gesamtmasse wie vor dem Auftrag bestimmt. Aus der Massendifferenz liess sich so die aufgetragene Menge in g/m^2 berechnen. Bei nichtsaugender Schalung betrug die Auftragsmenge im Mittel 7 g/m^2 für eine dünne Schichtstärke und 19 g/m^2 für eine dicke Schichtstärke. Bei saugender Schalung betrug der dünne Auftrag im Mittel 17 g/m^2. Innerhalb dieses Projektes wurden nur vertikale Schalflächen untersucht. Die maximale Auftragsstärke war also limitiert durch das Fliessen der Trennmittel unter der Schwerkraft. Die Aussagen im Resultateteil gelten also nicht direkt für vertikal liegende Flächen mit möglicher Bildung von „Trennmittelseen“.

Prüfkörperherstellung

Nach dem Trennmittelauftrag wurden die Schalungen zusammengebaut. Damit der Vibrator beim Verdichten des Betons die Schalhaut nicht berühren kann und um praxisnahe Verhältnisse zu simulieren, wurden die Betonprüfkörper mit einem Bewehrungskorb versehen (Ø 8 mm). Eine Betonüberdeckung von 20 mm wurde mitttels vier Kunststoff-Distanzhaltern gewährleistet, die immer gleich angeordnet wurden.

Anschliessend wurde die Betonmischung hergestellt, dem Mischer entnommen und die Frischbetoneigenschaften bestimmt (Ausbreitmass, Luftporengehalt). Die Betonherstellung wurde dabei so terminiert, dass das Einbringen des Betons möglichst genau nach der festgelegten Ablüftzeit des Trennmittels (üblicherweise 60 min) erfolgen konnte. Der Beton wurde in zwei Lagen in die Schalung eingebracht, wobei die erste Lage über einen Trichter mit anschliessendem Rohr eingefüllt wurde (Abb. 3). Dadurch wurde verhindert, dass der Trennmittelfilm bereits beim Einfüllen durch herabfallene Steine zerstört und die Aussagekraft der Versuche beeinträchtigt wird.

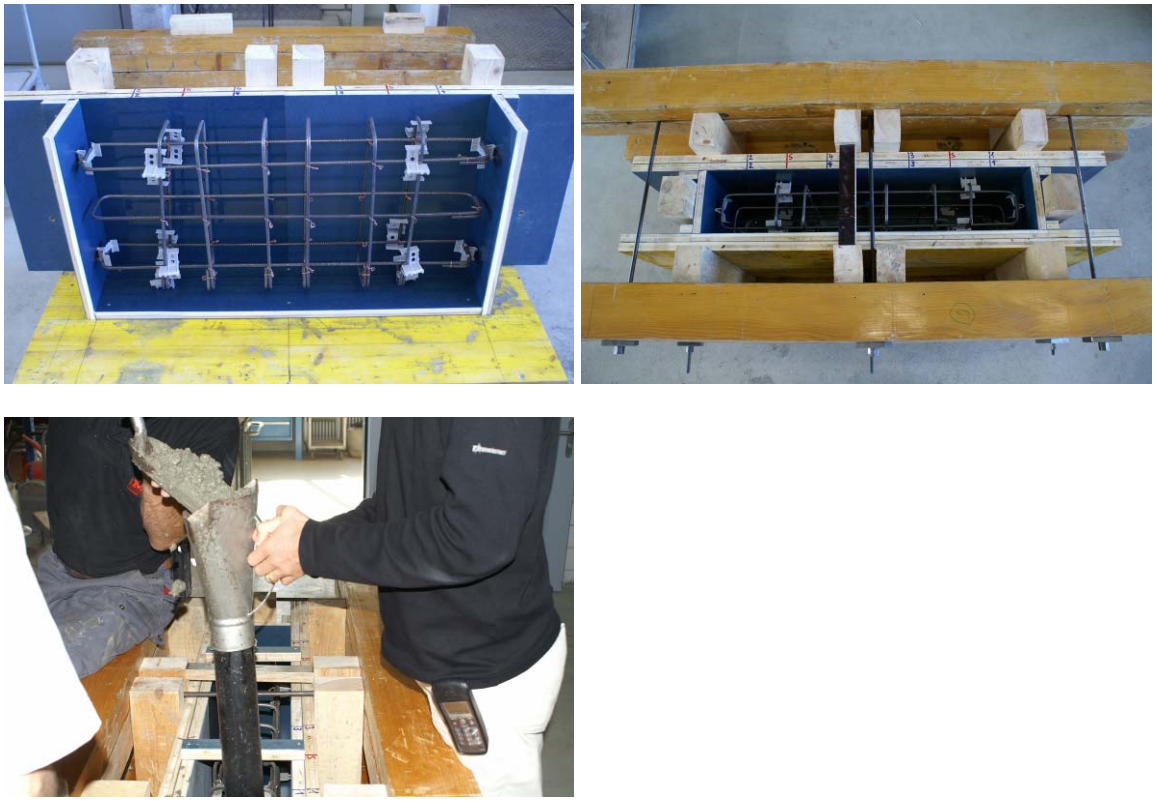


Abb. 3: Prüfkörperherstellung. Bewehrungskorb (o.l.), Schalung vor dem Betonieren mit markierten Verdichtungsstellen (o.r.), Einbringen des Betons der ersten Schüttlage mit Rohr und Trichter (u.l.).

Die erste Lage wurde darauf an vier definierten Orten während je 10 Sekunden mit vorgegebener Eintauchtiefe des Vibrators verdichtet. Anschliessend wurde die zweite Betonlage ohne Rohr eingebracht und analog zur ersten Lage verdichtet. Die Nachbehandlung erfolgte abgedeckt mit einem Plastik im Laborklima (18 – 22 °C) während 24 Stunden. Wie bei der Betonherstellung wurden während der Nachbehandlung Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit zur Kontrolle aufgezeichnet. Nach dem Ausschalen im Alter von 24 Stunden wurden die Prüfkörper in einem Raum mit definiertem Klima (20°C / 70% r.F.) bis zur fotografischen Dokumentation gelagert.

Bei folgenden Versuchen kam es zu Abweichungen vom obenstehend beschriebenen Vorgehen:

- Auschalzeitpunkt: Bei Variationen der Ausschalfrist wurde die Schalung einseitig nicht schon nach der 24-stündigen Nachbehandlung entfernt, sondern erst nach vier Tagen Lagerung im Klimaraum bei 20°C / 70% r.F.
- Umgebungsfeuchte: Bei Variationen der Umgebungsfeuchte wurden die Prüfkörper nach dem Ausschalen bis zum Alter von 14 Tagen im Klimaraum 20°C / 90% r.F. gelagert und anschliessend noch für weitere 7 Tage bei 20°C / 70% r.F.
- Ablüftzeit Trennmittel: Bei den Versuchen mit unterschiedlicher Ablüftzeit wurde das Trennmittel für lange Ablüftdauer 19 Stunden, für kurze Ablüftdauer 30 Minuten vor dem Betonieren aufgetragen.
- Verdichtungsdauer: Um den Einfluss der Verdichtungsdauer zu simulieren, wurde bei ausgewählten Versuchen bei jeder Verdichtungsstelle doppelt so lange verdichtet (20 sec).
- Eine mitschwingende Schalung wurde simuliert, indem auf der Schalungsaussenseite einseitig ein Schalungsvibrator angebracht wurde. Anstelle der Innenverdichtung wurde dieser Prüfkörper während 13 Sekunden pro Betonlage mit dem Schalungsvibrator verdichtet. Die maximale Auslenkung der Schalung betrug dabei 0.3 – 0.5 mm.
- Umgebungstemperatur: Für die Versuche mit 5°C und 40°C Umgebungstemperatur wurden sämtliche Materialien (Betonkomponenten, Trennmittel, Schalung, Bewehrung) vorgängig

mindestens 48 Stunden bei der entsprechenden Temperatur gelagert. Für die Betonherstellung wurden die Komponenten aus dem Klimaraum entnommen, gemischt und sofort im entsprechenden Klima in die Schalung eingebaut und verdichtet. Nach dem Ausschalen 24 Stunden nach der Betonherstellung verblieben die Prüfkörper in den Klimaräumen und wurden nur zur fotografischen Aufnahme kurz daraus entnommen. Nach 14 Tagen wurden sie für weitere 7 Tage bei 20°C / 70% r.F. gelagert.

Fotografische Aufnahmen und Auswertung

Die Prüfkörper wurden im Alter von 2 und 14 Tagen unter konstanten Bedingungen (Beleuchtung, Lage, Kameraeinstellungen, etc.) beidseitig fotografiert. Bei variablen Ausschalzeitpunkten erfolgte die erste Aufnahme aus technischen Gründen erst nach 7 Tagen. Von jeder Prüfkörperfläche wurde zuerst ein Bild mit Frontalbeleuchtung aufgenommen, anschliessend ein zweites mit Seitenlicht.

Bei den Bildern mit seitlicher Beleuchtung traten die Oberflächenporen als dunkle Bereiche in Erscheinung und konnten so mit einer eigens für dieses Projekt entwickelten Software, die dunkle Bereiche auf einem Bild mittels wählbarer Helligkeitsgrenzen detektiert, erfasst werden. Somit war es möglich, die Porenanzahl, die Porengrössenverteilung und die Gesamtporenfläche von jeder Prüffläche zu bestimmen. Mittels dieses Vorgehen liessen sich Poren bis zu einem minimalen Durchmesser von ca. 0.5 mm zuverlässig detektieren.

Abb. 4: Prüfkörper aufgenommen unter seitlicher Beleuchtung. Die Oberflächenporen treten dunkel hervor.

Die Bilder mit Frontalbeleuchtung dienten einerseits als Grundlage für die visuelle Beurteilung der Betonflächen und den Vergleich untereinander bezüglich Farbigkeit, Farbkonstanz, Wolkenbildung, etc.. Zusätzlich wurden diese Bilder mit einer weiteren für dieses Projekt entwickelten Software farbmetrisch ausgewertet. Mit dieser Methode wird von jedem Pixel der Prüffläche die Helligkeit L, die Farbsättigung c und der Farbwinkel h bestimmt. Damit kann jeder Pixel mit drei Zahlen innerhalb des Farbraumes definiert werden. Von jedem dieser Werte berechnet die Software anschliessend den Mittelwert über die gesamte Prüfkörperoberfläche, sowie die Standardabweichung. Die Standardabweichung dieser Werte ist somit ein Mass für die Homogenität der Oberfläche und es lassen sich damit Flecken- und Wolkenbildungen in einer Zahl fassen. Je grösser die Standardabweichung, umso grösser sind die Unterschiede innerhalb der Fläche.

Da sich im vorliegenden Projekt sämtliche Prüfkörperoberflächen nahe des sogenannten Unbuntpunktes befanden, ergaben sich in der Farbsättigung und dem Farbwinkel keine wesentlichen Unterschiede. Flecken- und Wolkenbildungen hatten jedoch einen wesentlichen Einfluss auf die Helligkeit und vor allem auf deren Standardabweichung, weshalb sich das Augenmerk bei der Auswertung vor allem auf die Standardabweichung der Helligkeit L konzentrierte. Im Weiteren gilt es

zu beachten, dass das Auge kontinuierliche, weiträumig verteilte Helligkeitsübergänge viel weniger stark wahrnimmt als diskontinuierliche, kleinräumige Helligkeitsgradienten, obwohl beide Varianten bei der Auswertung die gleiche Standardabweichung ergeben. Dadurch sind Feinheiten in der Oberflächenhelligkeit, die von Auge gut sichtbar sind, mit der Software nur bedingt zu erfassen. Aus diesem Grund bleibt die Beschreibung des visuellen Eindrucks der Oberfläche ein wichtiges Instrument bei der Auswertung.

Untersuchte Variablen

Für folgende Variablen wurden Prüfflächen hergestellt und ausgewertet (wenn keine Angaben zum Beton gemacht werden, wurde die Mischung SB-1 mit CEM II/A-LL als Bindemittel verwendet):

- 4 verschiedene Schalungen, nicht gealtert, ohne Trennmittel (TM)
- 4 verschiedene Schalungen, gealtert, ohne TM
- 4 verschiedene Schalungen, gealtert, 1 TM (wässrige Emulsion)
- 4 verschiedene Schalungen, gealtert, 1 TM (wässrige Emulsion), erhöhte Rauhigkeit
- 4 verschiedene Schalungen, gealtert, 1 TM (wässrige Emulsion), doppelte Verdichtungsdauer
- phenolharzbeschichtete Sperrholzplatte (braune Schalung), gealtert, vier verschiedene TM, dünn aufgetragen
- braune Schalung, gealtert (im Folgenden als b/g bezeichnet), vier TM, dick aufgetragen
- b/g, zwei TM mit unterschiedlicher Ablüftzeit (30 min, 19 Stunden)
- b/g, 1 TM dick / dünn, unterschiedliche Ausschalfrist
- b/g, 1 TM dick / dünn, unterschiedl. Ausschalfrist, Lagerung bei 90% r.F.
- b/g, zwei TM dick / dünn, Beton mit CEM I (SB-2)
- b/g, Beton mit CEM I (SB-2), unterschiedliche Ausschalfrist
- b/g, 2 TM dick / dünn, Beton mit Luftporenbildner (SB-3)
- b/g, 2 TM dick / dünn, Beton mit Luftporenbildner (SB-3), doppelte Verdichtungsdauer
- b/g, 2 TM dick / dünn, Beton mit w/z = 0.60 (SB-4)
- b/g, 2 TM dünn, Beton mit w/z = 0.60 (SB-4), unterschiedl. Ausschalfrist
- b/g, 2 TM dick / dünn, Beton mit 0.6% Fliessmittel (SB-5)
- b/g, 2 TM dick / dünn, Beton mit 0.6% Fliessmittel (SB-5), verdichtet mit Schalungsvibratoren
- b/g, 2 TM dick / dünn, Beton mit 0.6% Fliessmittel und CEM I (SB-6)
- b/g, 1 TM dick / dünn, Beton mit 0.6% Fliessmittel und CEM I (SB-6), unterschiedl. Ausschalfrist und doppelte Verdichtungsdauer
- b/g, 4 TM dünn, Beton mit 0.6% FM und reduziertem w/z-Wert (SB-7)
- b/g, 2 TM dick / dünn, betoniert bei 5°C
- b/g, 2 TM dick / dünn, betoniert bei 40°C
- b/g, 2 TM dick / dünn, betoniert bei 5°C, Beton mit 0.6% Fliessmittel (SB-5)

2.3.2 Zusätzliche Experimente

Als Ergänzung zu den grossmassstäblichen Betonversuchen wurden folgende Zusatzuntersuchungen durchgeführt:

Viskositätsmessungen an Trennmitteln

Die Viskosität der Trennmittel bei verschiedenen Temperaturen (8°C, 21°C, 40°C) wurde durch Messen der Auslaufzeit aus dem Auslauftrichter mit der Düse Ø 4 mm nach DIN 53 211 bestimmt. Über die Auslaufzeit kann mittels bekannter Formeln die Viskosität (mPa·s) berechnet werden.

Zusätzlich zu den Trennmitteln wurde als Referenzgrösse die Viskosität von unbehandeltem Leitungswasser mitbestimmt.

Abb. 5: Auslauftrichter nach DIN 53 211 zur Bestimmung der Viskosität.

Wärmeflusskalorimetrie

Der Einfluss unterschiedlich hoher Trennmittelgehalte auf die Zementhydratation wurde mittels Messung des Hydratationswärmeflusses (J/(g·h)) in einem isothermen Kalorimeter (Modell „TAM AIR“) untersucht. Hierzu wurden Zementleime mit einem w/z-Wert von 0.50 aus CEM II/A-LL und CEM I verwendet. Neben einer Referenzmischung ohne Trennmittel wurden vom CEM II/A-LL für jedes Trennmittel zudem Mischungen mit einem Trennmittelgehalt von 1%, 5% und 10% bezogen auf die Zementmenge hergestellt, während beim CEM I nur die Mischungen mit einem Trennmittelgehalt von 5% gemessen wurden. Zusätzlich wurde das System Zementleim aus CEM II/A-LL, 5% Trennmittel und 1% Fliessmittel (bezogen auf die Zementmenge) für jedes der vier Trennmittel untersucht.

Mikroskopie

Unter dem Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) wurden Spitzproben der Betonoberflächen mit typischem Fleckenbild untersucht. Damit ist es möglich, die Struktur der Oberfläche (z.B. Rauhigkeit) bildlich zu erfassen sowie die chemische Zusammensetzung der oberflächennahen Schicht zu bestimmen.

3 Resultate und Diskussion

3.1 Viskosität der Trennmittel

Die Viskosität der Trennmittel nimmt mit abnehmender Temperatur zu (Abb. 6). Das lösungsmittelhaltige Trennmittel verhält sich ähnlich wie gewöhnliches Leitungswasser, während die lösungsmittelfreien Trennmittel und die wässrige Emulsion eine vergleichbare, jedoch höhere Viskosität aufweisen.

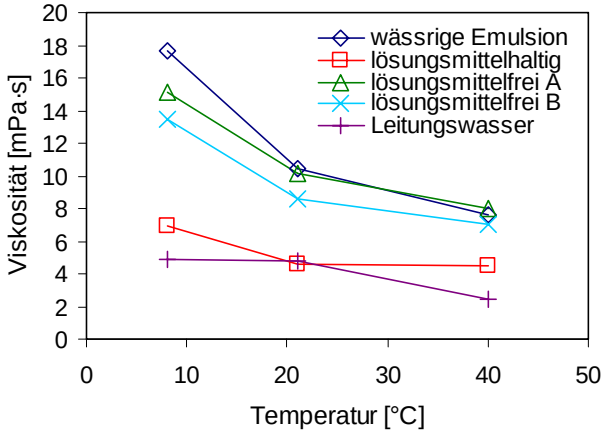


Abb. 6: Viskosität von verschiedenen Trennmitteln und Leitungswasser in Abhängigkeit der Temperatur, gemessen am Auslauftrichter nach DIN 53 211.

Obwohl sich die Viskosität bei einer Temperaturänderung von 40°C auf 8°C im Extremfall in etwa verdoppelt, bleiben die Trennmittel auch bei tiefen Temperaturen immer noch niedrigviskos. Dadurch wird die Trennmittelfilmdicke bei abnehmender Temperatur nur unwesentlich stärker, was sich bei den effektiv gemessenen Auftragsstärken in den Versuchen auch bestätigt hat. Auch eine Veränderung der Durchmischbarkeit zwischen Trennmittel und Zementleim ist nicht zu erwarten, da sich die Viskosität eines üblichen Zementleimes im Bereich von 500 mPa·s bewegt und somit um ein Vielfaches grösser ist als die der Trennmittel.

3.2 Wärmeflusskalorimetrie

Die Zementhydratation wird durch geringe Anteile an Trennmittel nicht beeinflusst. Mit steigendem Trennmittelgehalt nimmt der Einfluss auf die Zementhydratation zu, wobei auch gewisse Unterschiede zwischen den Trennmitteln zu erkennen sind (Abb. 7). Die lösungsmittelfreien Trennmittel beeinflussen die Hydratation stärker als das lösungsmittelhaltige Trennmittel und die wässrige Emulsion. Die Hydratation eines Zementleimes aus CEM I wird durch die Trennmittel stärker beeinflusst als ein Zementleim mit CEM II/A-LL. Wird dem Zementleim zusätzlich 1% Fliessmittel (FM) beigemischt, dann beeinflusst eine Trennmittelzugabe von 5% die Zementhydratation nicht mehr. Die Diagramme aller Hydratationswärmeflussmessungen sind im Anhang zu finden.

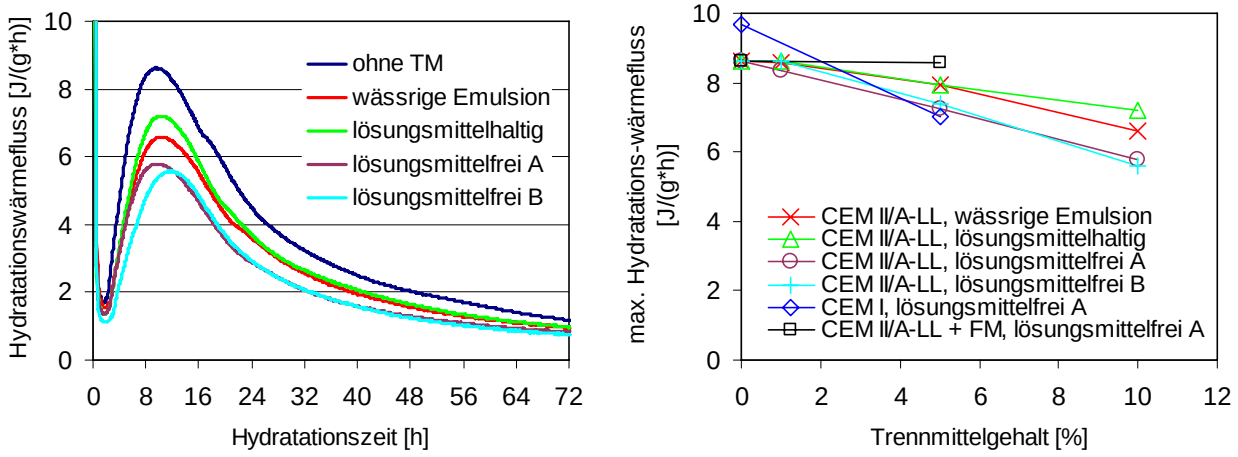


Abb. 7: Links: Hydratationswärmefluss von Zementleim mit CEM II/A-LL, w/z=0.50, ohne Trennmittel sowie mit 10% Trennmittel bezogen auf das Zementgewicht (vier verschiedene Trennmittel). Rechts: Änderung des maximalen Hydratationswärmeflusses in Abhängigkeit des Trennmittelgehaltes.

3.3 Betonierversuche

3.3.1 Farbkonstanz

Im Folgenden wird auf die einzelnen variierten Parameter eingegangen. Ihr Einfluss auf die Oberflächenqualität wird mittels subjektivem Empfinden und gegenüberstellendem Vergleich der fotografischen Aufnahmen abgeschätzt. Wo möglich ist das subjektive Empfinden mit qualitativen Daten im nachfolgenden Kapitel belegt. Da die Qualität der Bilder sehr stark vom Drucker abhängig ist, wird empfohlen, die Bilder direkt auf dem elektronischen Exemplar zu begutachten und allenfalls mittels Zoom zu vergrössern. Nur so können die Marmorierungen und Wolkenbildungen zuverlässig beurteilt werden. Falls nicht anders vermerkt, handelt es sich bei den Bildern um die Aufnahmen im Alter von 14 Tagen. Es ist zu beachten, dass die Prüfflächen mit 50x50 cm relativ klein sind. Wie sich grossräumigere Wolkenbildungen auf grösseren Flächen optisch auswirken ist deshalb schwer zu quantifizieren. Die nachfolgenden Aussagen gelten daher in erster Linie für die Prüfkörperflächen und müssen für Praxisanwendungen entsprechend interpretiert werden.

Schaltafelart und Alterung, ohne Trennmittel

Generell führen die gehobelten, rohen Schalungsbretter zu dunkleren Flächen als die übrigen drei Schaltafeltypen, wobei die Holzstruktur (Jahrringe) einen grossen Einfluss auf die Helligkeit zu haben scheint. Die globalen Farbunterschiede zwischen brauner, gelber und blauer Schaltafel sind relativ klein. Bei der gelben Schalung bilden sich kleinste Fehler in der Beschichtung (Astlöcher, Brettstossfugen, etc.) als dunkle Flecken ab. Im Weiteren sind hellere Bereiche zu erkennen, die tendenziell vertikal orientiert sind und durch die Verdichtung entstanden sein dürften (Abb. 8).

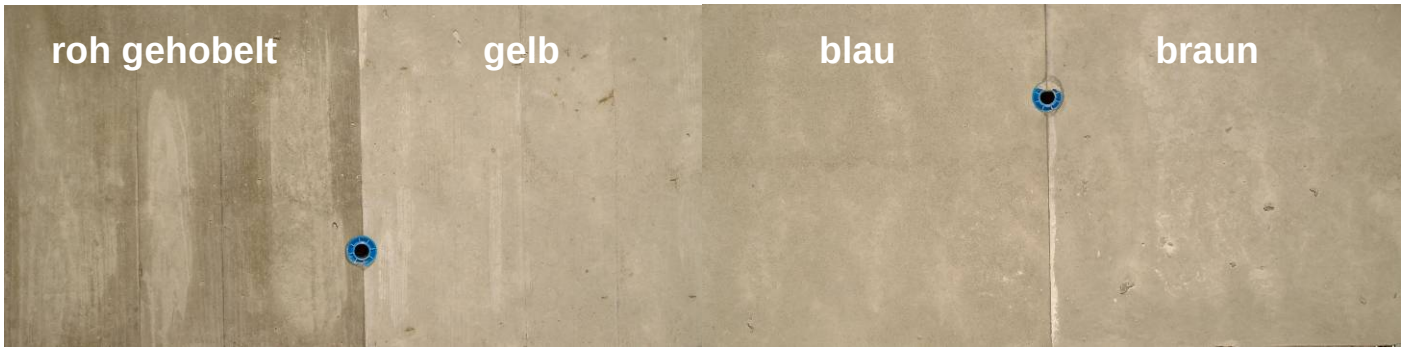


Abb. 8: Bildreihe 4 verschiedene Schaltafeln, künstlich gealtert, ohne Trennmittelauftrag, Beton SB-1.

Die Flächen mit fabrikneuen Schaltafeln (nicht gealtert) ohne Trennmittel unterscheiden sich optisch nicht von den gealterten Schalungen. Einzig die rohe Brettschalung führt im Gegensatz zur gealterten Schalung zu einer noch dunkleren Fläche.

In einem Nebenversuch wurden je eine braune und eine gelbe Schaltafel während ca. 3 Monaten ins Freie gestellt, wobei die Schalungen nur besonnt, jedoch nicht beregnet waren. Zusätzlich wurde ein 20 cm breiter Streifen der Schaloberfläche mit einem Karton abgedeckt. Im Anschluss an diese Alterung wurde eine Zementleimschicht analog der künstlichen Alterung auf die Schaltafeloberfächen aufgebracht. In Abb. 9 ist zu erkennen, dass diese Auslagerung bei der gelben Schaltafel zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Zemensteinoberfläche führt, während der abgedeckte Streifen bei der braunen Schaltafel praktisch nicht sichtbar ist.

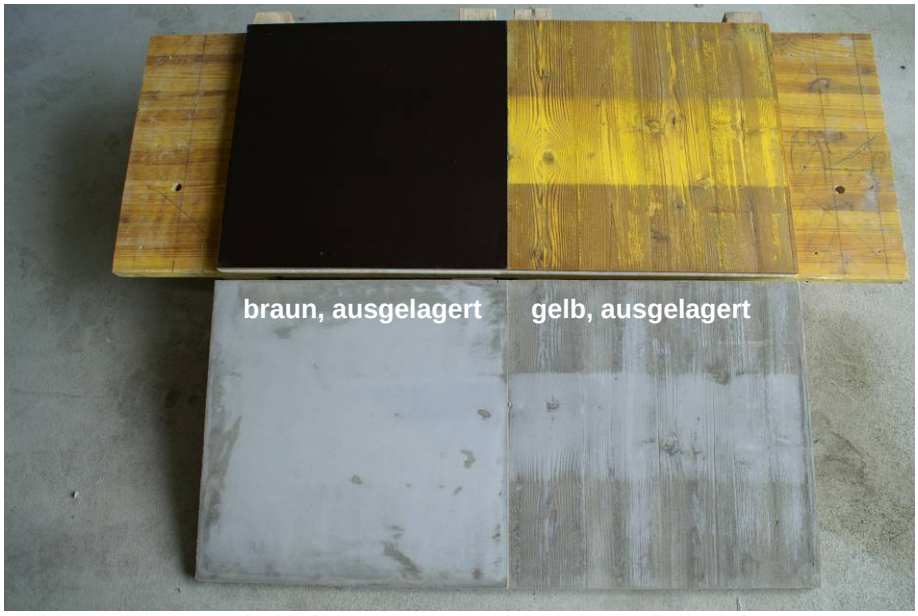


Abb. 9: Zementsteinflächen von ausgelagerten Schaltafeln.

Schaltafelart, mit Trennmittel

Durch den dünnen Trennmittelauftrag sind bei allen Schaltafeln dunkle Marmorierungen entstanden. Die braune Schaltafel scheint anfälliger bezüglich dieser Marmorierungen zu sein als die blaue und die gelbe Schalung. Die Fuge zwischen den beiden Schüttlagen ist bei allen Schalungen besser zu erkennen als ohne Trennmittel. Die obenstehenden Aussagen betreffend globaler Farbe und Beschichtungsfehler aus dem Versuch ohne Trennmittel gelten auch für den Fall mit Trennmittel.

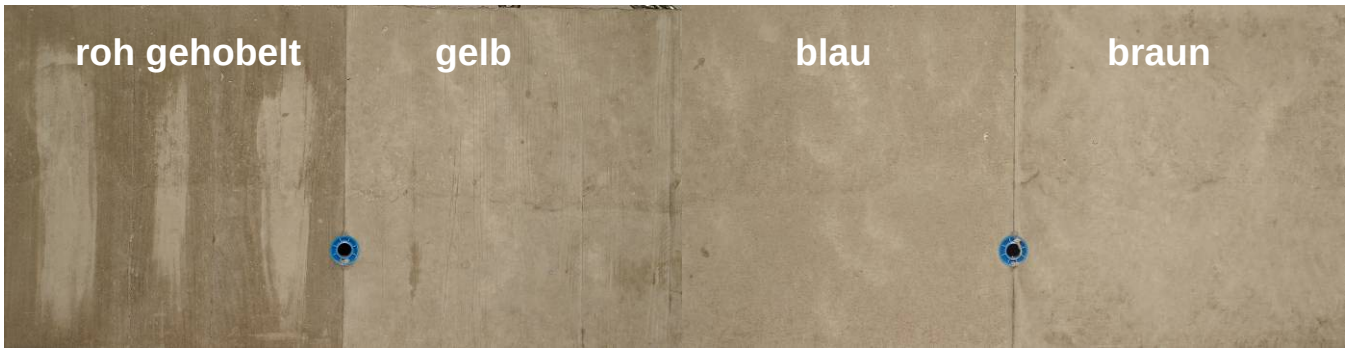


Abb. 10: Bildreihe 4 verschiedene Schaltafeln, künstlich gealtert, TM: wässrige Emulsion, dünn aufgetragen, Beton SB-1.

Erhöhte Rauhigkeit

Zur Untersuchung einer erhöhten Schaltafelrauhigkeit auf die Sichtbetonqualität wurden die vier verschiedenen Schaltafeln auf einem 20 cm breiten Streifen mit einer Stahlbürste aufgerauht und so die Reinigung der Schaltafeln simuliert. Dabei hat sich gezeigt, dass bei der blauen, der braunen und der gelben Schaltafel der rauhe Bereich kaum sichtbar dunkler geworden ist. Bei der gelben Schaltafel wurde die Beschichtung jedoch durch das Aufrauhen lokal zerstört. Diese zerstörten Bereiche bilden sich auf der Betonoberfläche als dunkle Flecken ab. Bei der rohen Schaltafel entsteht im aufgerauhten Bereich eine homogene, leicht dunklere Fläche gegenüber dem nicht aufgerauhten Bereich.

Verdichtungsdauer

An der generellen Farbe der Prüfkörperflächen ändert sich durch die längere Verdichtungsdauer im Vergleich zur Referenzfläche mit normaler Verdichtung nichts. Hingegen nehmen bei steifer Betonkonsistenz die Marmorierungen insbesondere bei der braunen Schaltafel durch die längere Verdichtung ab. Bei grösserem Ausbreitmass des Betons bleibt die Oberflächenqualität in etwa gleich. Bei dickem Trennmittelauftrag führt die längere Verdichtung unabhängig vom Ausbreitmass des Betons zu einer Angleichung der Oberflächenqualität an die Referenzfläche mit dünnem Trennmittelauftrag (weniger Hydratationsstörungen, einheitlichere Helligkeit der Oberfläche).

Trennmittelart

Auf Abb. 11 ist zu erkennen, dass keines der Trennmittel zu einem erheblichen generellen Farb- oder Helligkeitsunterschied führt. Die Marmorierungen und Fleckenbildungen nehmen jedoch von links nach rechts tendenziell ab. Dies gilt auch für die Sichtbarkeit der horizontalen Schüttlagenfuge.

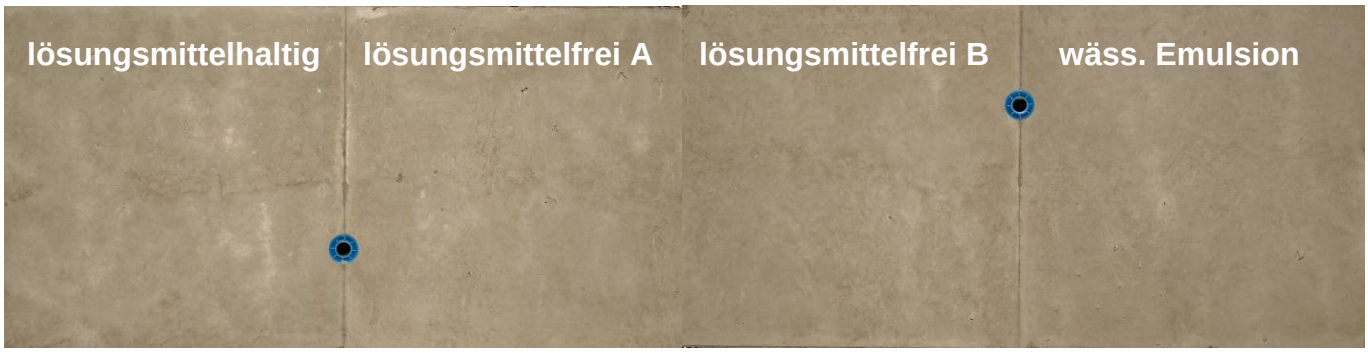


Abb. 11: Bildreihe braune Schaltafel, künstlich gealtert, vier verschiedene, dünn aufgetragene Trennmittel, Beton SB-1.

Bei grösserem Ausbreitmass des Betons (z.B. SB-7) sind bei konstanter Schalung keine Helligkeits- und Farbunterschiede zwischen den vier verschiedenen Trennmitteln mehr zu erkennen.

Trennmitteldicke

Der übermässige Trennmittelauftrag führt bei allen Trennmitteln zu einer verstärkten Wolkenbildung (Abb. 12). Bei allen Trennmitteln, insbesondere aber bei den lösungsmittelfreien Trennmitteln sind zusätzlich Bereiche mit Hydratationsstörungen zu erkennen, bei denen oberflächlich die Zementhaut fehlt. Diese Feststellung deckt sich mit den Resultaten aus der Hydratationswärmeflussmessung, wo die lösungsmittelfreien Trennmittel bei hohen Dosierungen die Hydratation am meisten beeinflussen. Die Hydratationsstörungen konzentrieren sich vor allem auf den unteren Bereich der Fläche, da die Trennmittel durch die dicke Auftragsstärke entlang der vertikalen Schaltafel nach unten flossen. Bei der wässrigen Emulsion führt der übermässige Auftrag zu grösseren dunklen Flecken und die Gesamtfläche wird im Mittel generell etwas dunkler im Vergleich zu den übrigen Trennmittel. Ein übermässiger Trennmittelauftrag kann zudem bei steifer Betonkonsistenz zu einem leichten Gelbton führen.

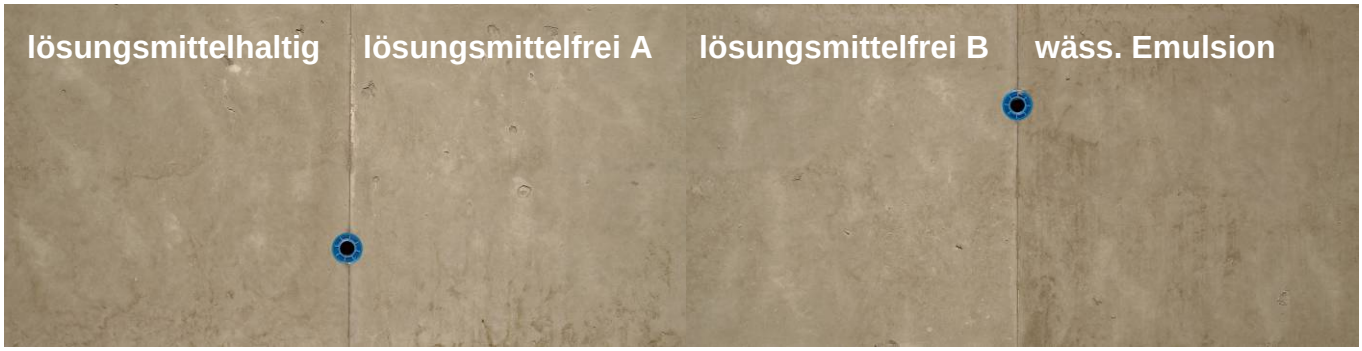


Abb. 12: Bildreihe braune Schaltafel, künstlich gealtert, vier verschiedene, dick aufgetragene Trennmittel, Beton SB-1.

Horizontale Schalflächen wurden innerhalb dieses Projektes nicht untersucht. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei horizontal liegenden Flächen dickere Trennmittelfilme möglich sind und somit verstärkte Hydratationsstörungen zu erwarten sind.

Ablüftdauer des Trennmittels

Die Ablüftdauer, das heisst die Zeit vom Aufbringen des Trennmittels auf die Schalung bis zum Einbringen des Betons, beeinflusst vor allem die Bildung von Marmorierungen und Wolken auf der Betonoberfläche. Während bei der wässrigen Emulsion bei einer Ablüftzeit von 30 Minuten die Marmorierungen stärker ausgebildet waren als bei einer Ablüftzeit von 19 Stunden, war es beim lösungsmittelhaltigen Trennmittel genau umgekehrt. Die Ablüftdauer sollte also möglichst konstant gehalten werden.

Zementart

Die Verwendung von CEM I anstelle von CEM II/A-LL hat zu keinen visuell erkennbaren Unterschieden auf der Betonoberfläche geführt. Der Einfluss eines übermässigen Trennmittelauftrages ist bei beiden Zementen in etwa vergleichbar. Trotzdem muss in der Praxis aufgrund der Hydratationswärmeflussmessungen mit einer erhöhten Gefahr von Hydratationsstörungen bei übermässigem Trennmittelauftrag im Zusammenhang mit CEM I gerechnet werden.

Ausschalfrist und Umgebungsfeuchtigkeit

Die unterschiedlichen Ausschalfristen von einem Tag und fünf Tagen, sowie die unterschiedlichen Lagerungsfeuchten von 70% r.F. und 90% r.F. bei jeweils 20°C haben bei keiner der untersuchten Oberflächen zu einer visuell erkennbaren Veränderung geführt.

Luftporenbildner

Durch den Einsatz des Luftporenbildners hat sich bei sonst gleicher Rezeptur wie die Grundmischung insbesondere das Ausbreitmass erhöht. Dadurch sind Oberflächen entstanden, die sehr homogen bezüglich Farbe und Helligkeit sind. Die Flächen weisen praktisch keine Marmorierungen auf. Der Einfluss eines übermässigen Trennmitelauftrages tritt bei der wässrigen Emulsion nur noch in Form einer geringfügigen Fleckenbildung in Erscheinung, während beim lösungsmittelhaltigen Trennmittel selbst bei übermässigem Auftrag kaum eine Änderung der Oberflächenhomogenität zu erkennen ist.

Abb. 13: Bildreihe braune Schaltafel, künstlich gealtert, zwei verschiedene, jeweils dünn und dick aufgetragene Trennmittel, Beton SB-3 mit Luftporenbildner.

Änderung des w/z-Wertes

Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0.50 auf 0.60 (SB-4) führt bei allen acht untersuchten Flächen unmittelbar nach dem Ausschalen zu einer erheblichen Bildung von dunklen Flecken. Da die Flächen im Laufe der Zeit generell etwas heller werden, sind auch die Flecken mit der Zeit tendenziell weniger gut sichtbar. In Abb. 14 sind die Oberflächen im Alter von 14 Tagen mit brauner Schalung und wässriger Emulsion als Trennmittel dargestellt. Der übermässige Trennmittelauftrag führt zu einer deutlich inhomogeneren Fläche als der dünne Trennmittelauftrag. Sowohl bei der Schalung mit dem dünn aufgetragenen Trennmittel als auch beim dick aufgetragenen Trennmittel bleibt die oberste Zementhaut grösstenteils an der Schalung kleben, was zu rauheren und dunkleren Oberflächenbereichen führt. Durch die sehr flüssige Konsistenz des Betons kann Wasser im Bereich der Schalbrettfugen ins Holz eindringen, welches in der Folge aufquillt. Diese aufgeqollenen Bereiche entlang der Schalbrettfugen bilden sich helle Streifen ab. Das gleiche Phänomen konnte jeweils bei der künstlichen Alterung mit Zementleim beobachtet werden, wobei sowohl die hellen Randbereiche als auch die aufgequollenen Schalbrettbereiche noch viel deutlicher in Erscheinung traten.

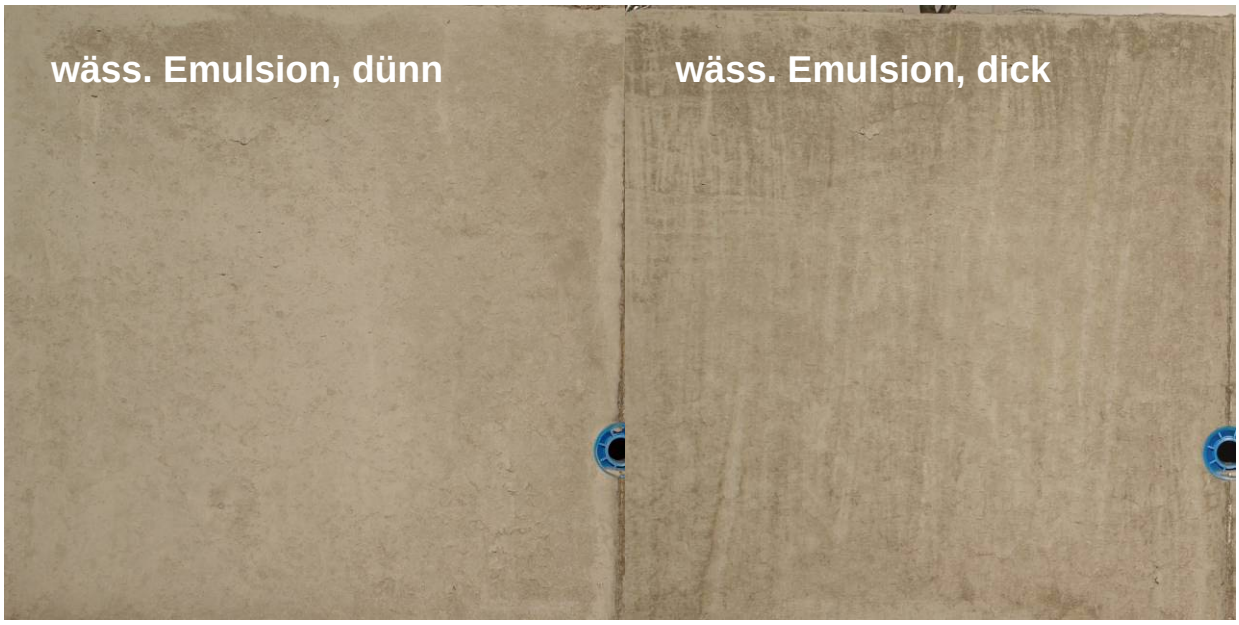


Abb. 14: Bildreihe braune Schalung, künstlich gealtert, wässrige Emulsion dünn und dick aufgetragen, Beton SB-4 mit w/z=0.60.

Fliessmittelzugabe

Bei einer Fliessmittelzugabe bei sonst gleicher Zusammensetzung wie die Grundmischung erhöht sich das Ausbreitmass. Dadurch entstehen sehr homogene Oberflächen ohne Marmorierungen und Wolkenbildung (Abb. 15). Ein übermässiger Trennmittelauftrag hat unter diesen Umständen bei der wässrigen Emulsion keinen Einfluss auf die Oberflächenqualität, während beim lösungsmittelhaltigen Trennmittel leichte Marmorierungen entstehen. Diese sind jedoch deutlich weniger ausgepägt als bei der Grundmischung ohne Fliessmittel und es sind auch keine Hydratationsstörungen zu erkennen. Diese Feststellung deckt sich mit den Messungen des Hydratationswärmeflusses, bei der sich durch die Zugabe von Fliessmittel der Einfluss der Trennmittel auf die Hydratation verringert.

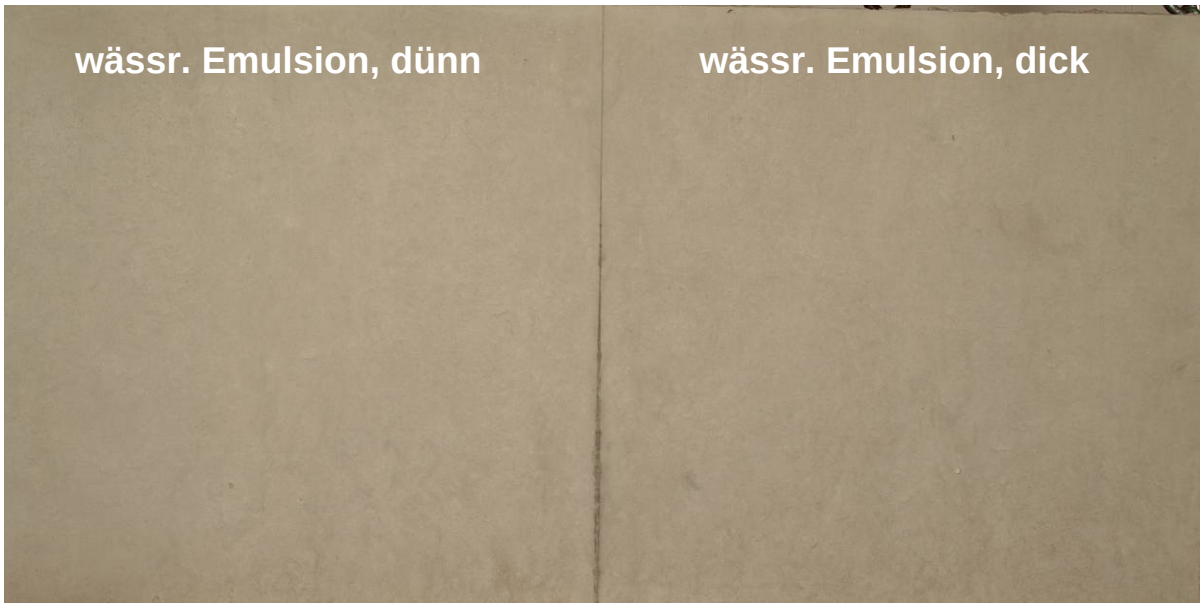


Abb. 15: Bildreihe braune Schalung, künstlich gealtert, wässrige Emulsion dünn und dick aufgetragen, Beton SB-5 mit Fliessmittel.

Wird anstelle von CEM II/A-LL ein CEM I als Bindemittel verwendet (SB-6), gelten die obenstehenden Aussagen für die wässrige Emulsion nach wie vor. Beim lösungsmittelhaltigen Trennmittel werden die Marmorierungen noch leicht verstärkt. Eine übermässige Verdichtung wirkt sich nicht sichtbar nachteilig auf die Oberflächenqualität aus.

Vibrierende Schalung

Bei dem mittels Schalungsvibrator verdichteten Prüfkörper sind in Farbe und Helligkeit keine wesentlichen Unterschiede zum Prüfkörper mit Innenverdichtung zu erkennen. Es ist eine leichte Tendenz zur Bildung heller Wolken auf der Oberfläche feststellbar, die auf das optische Bild der Fläche aber kaum störend wirken (Abb. 16).

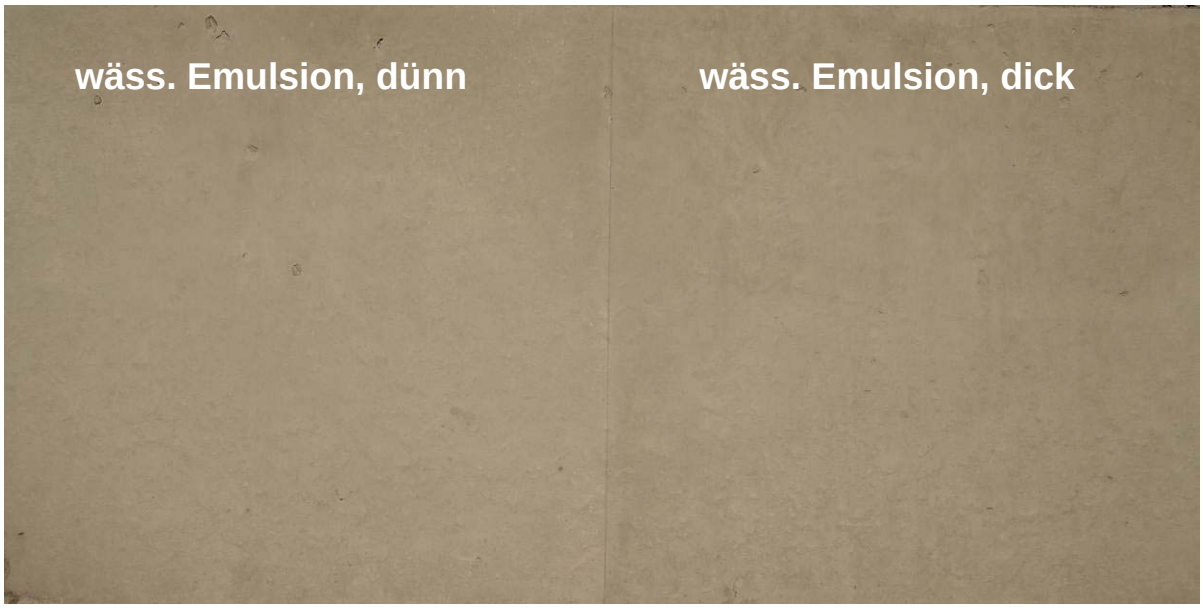


Abb. 16: Bildreihe braune Schalung, künstlich gealtert, wässrige Emulsion dünn und dick aufgetragen, Beton SB-5, verdichtet mit Schalungsvibrator.

Umgebungstemperatur

Die Umgebungstemperatur hat einen erheblichen Einfluss auf die Betonqualität. Bei 5°C sind die Betonoberflächen unmittelbar nach dem Ausschalen erheblich dunkler als bei 20°C. Die dunklen Flächen werden aber im Laufe der Zeit heller, insbesondere nach der Umlagerung ins Klima mit 20°C nach 14 Tagen. Die Flächen weisen aber auch nach 21 Tagen immer noch eine massive dunkle Fleckenbildung auf. Im Bereich der dunklen Flecken fehlt die oberflächliche Zementhaut, wodurch die Oberfläche an diesen Stellen eine erhöhte Rauhigkeit aufweist. Bei übermässigem Trennmittelauftrag werden die dunklen Bereiche im Alter von 21 Tagen noch zahlreicher.

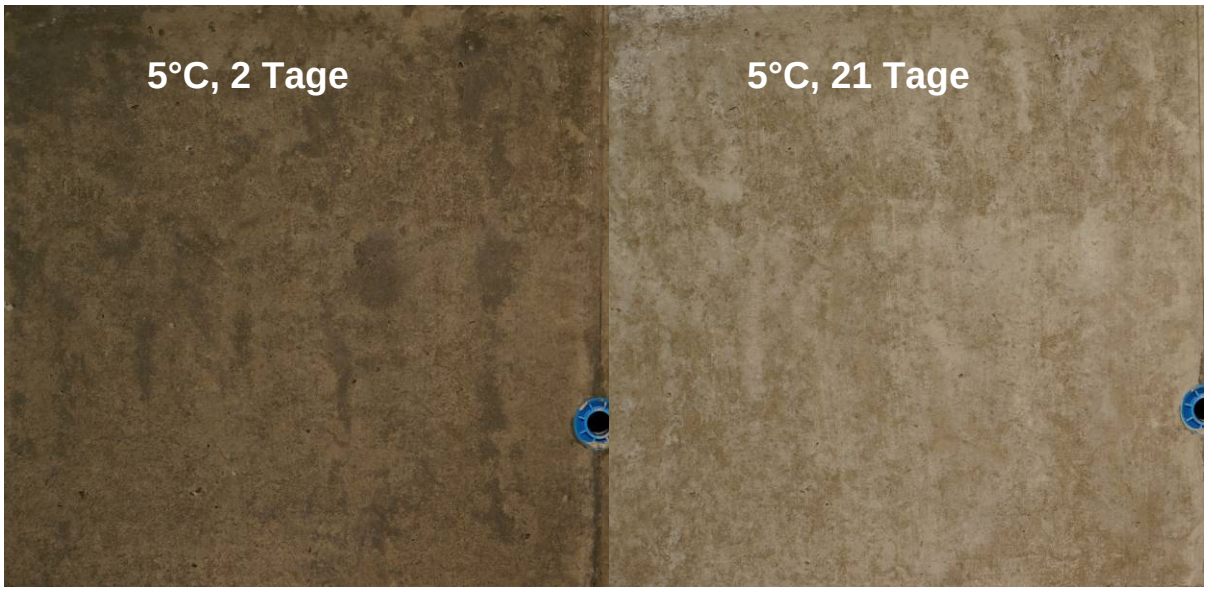


Abb. 17: Bildreihe braune Schalung, künstlich gealtert, wässrige Emulsion dünn aufgetragen, Beton SB-1 bei 5°C betoniert, fotografiert im Alter von 2 und 21 Tagen.

Wird bei 5°C mit einem Beton flüssiger Konsistenz (SB-5 mit Fliessmittel) betoniert, entsteht ebenfalls eine Fläche mit massiven dunklen Flecken, die jedoch glatter und dichter sind als die hellen Bereiche. Wird der Prüfkörper anschliessend bei Raumtemperatur gelagert, gleichen sich die dunklen Flecken an und es entsteht eine homogenere Oberfläche. Werden die Prüfkörper bei hoher Luftfeuchtigkeit gelagert, sind die Flecken wieder besser sichtbar.

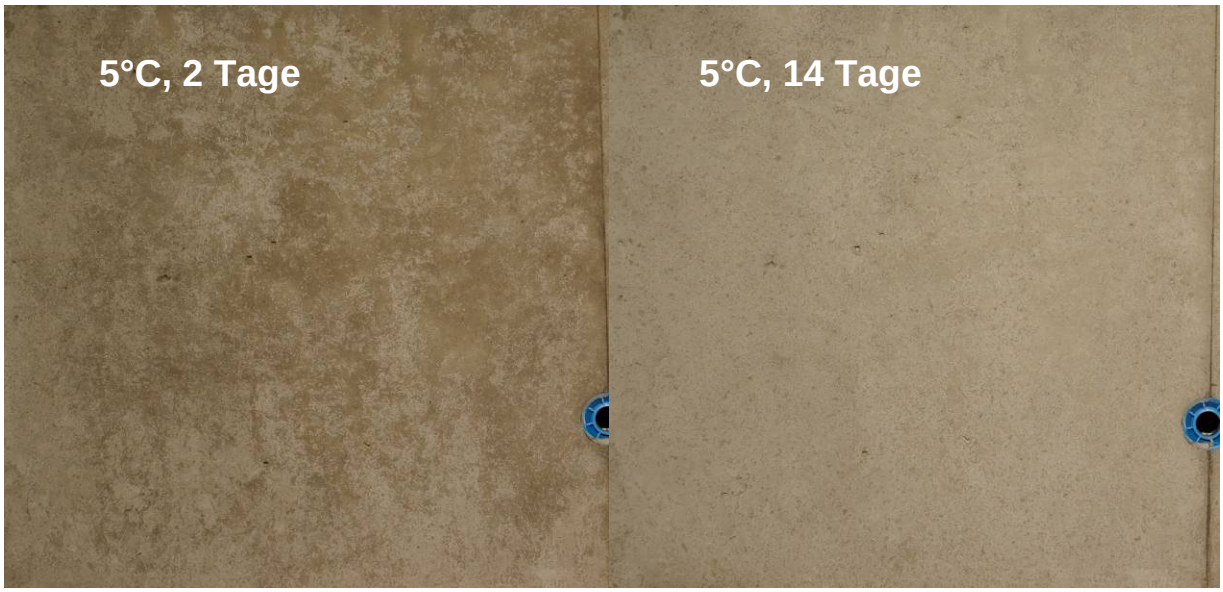


Abb. 18: Bildreihe braune Schalung, künstlich gealtert, wässrige Emulsion dünn aufgetragen, Beton SB-1 bei 5°C betoniert, fotografiert im Alter von 2 und 21 Tagen (Lagerung bei 20°C, 70% r.F.).

Wird bei 40°C betoniert, entstehen ebenfalls dunkle Flecken, die mit Zementhautablösungen und entsprechend hoher Rauhigkeit in Zusammenhang stehen. Ein erhöhter Trennmittelauftrag führt zu einem deutlich höheren Flächenanteil an dunklen Flecken.

Abb. 19: Bildreihe braune Schalung, künstlich gealtert, wässrige Emulsion dünn und dick aufgetragen, Beton SB-1 bei 40°C betoniert.

3.3.2 Bildgestützte Computerauswertung Helligkeit

Wie der Abb. 20 entnommen werden kann, verändert sich die Standardabweichung der Helligkeit (Stabw L) innerhalb der einzelnen Flächen in einem Zeitraum von maximal 14 Tagen praktisch nicht. Das Gleiche gilt auch für die mittlere Helligkeit der Flächen. Daraus lässt sich schliessen, dass dunkle Flecken und Marmorierungen nach dieser Zeit auf den meisten Flächen immer noch genau gleich gut sichtbar sind. Einzig bei den Prüfkörpern mit tiefen Temperaturen sind in der Abb. 20 deutliche Unterschiede zu erkennen. Während sich die Helligkeitsunterschiede bei der steifen Betonmischung ohne Fliessmittel (SB-1) im Laufe der Zeit sogar noch verstärken, werden sie bei der flüssigeren Konsistenz (SB-5) tendenziell kleiner. Die mittlere Helligkeit nimmt in beiden Fällen mit der Zeit zu.

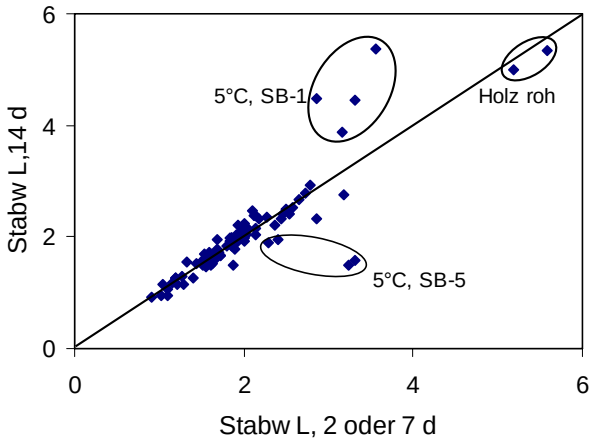


Abb. 20: Standardabweichung der mittleren Helligkeit L sämtlicher Prüfflächen im Alter von 14 Tagen im Vergleich zu derjenigen im Alter von 2 oder 7 Tagen.

Trägt man die Standardabweichungen der Helligkeit sämtlicher untersuchter Betonflächen auf, ergibt sich die Grafik gemäss Abb. 21. Daraus ist ersichtlich, dass der grösste Teil der untersuchten Flächen zu eine relativ eng begrenzte Variation der Standardabweichungen im Bereich von 2 aufweist (dunkelblau). Allerdings sind auch Gruppierungen zu erkennen, die sich von dieser Masse abheben. Die deutlich grössten Helligkeitsunterschiede auf den untersuchten Betonoberflächen entstehen bei tiefen Temperaturen sowie bei der Verwendung der rohen, saugenden Brettschalung. Diese Flächen werden auch im Mittel dunkler als der Rest. Zu ebenfalls grösseren Helligkeitsunterschieden führt das Betonieren bei 40°C und die Betonmischung mit hohem w/z-Wert (SB-4). Zu den geringsten Helligkeitsunterschieden führen die Mischungen mit Luftporenbildner (LP) und tendenziell auch die Mischungen mit Fliessmittel (FM). Diese Feststellungen decken sich mit dem optischen Eindruck der zugehörigen Bilder.

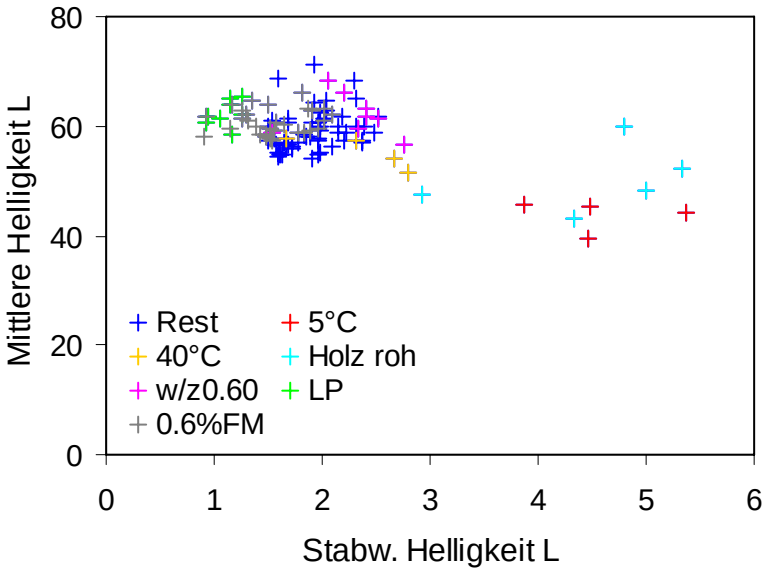


Abb. 21: Mittlere Helligkeit und Standardabweichung der Helligkeit für alle untersuchten Betonflächen im Alter von 14 Tagen.

3.3.3 Porigkeit

Wenn im Folgenden nichts anderes angegeben wird, ist unter der Porigkeit die Gesamtporenfläche auf der geprüften Betonoberfläche von 50x50 cm zu verstehen. Zusätzlich wurde jedoch auch die Porenverteilung der knapp 100 Prüfflächen bestimmt. Ausgewählte Beispiele zur Illustration sind in der Abb. 22 dargestellt. In Abb. 23 ist eine Tendenz zu grösseren totalen Porenflächen bei zunehmendem Grösstporendurchmesser zu erkennen. Es kann also in grober Näherung davon ausgegangen werden, dass die grossen, von Auge gut sichtbaren Poren mit zunehmender totaler Porenfläche ebenfalls zunehmen. Aus diesem Grund wurde die totale Porenfläche als Hauptbeurteilungskriterium der schwierig zu beurteilenden Porenverteilung vorgezogen.

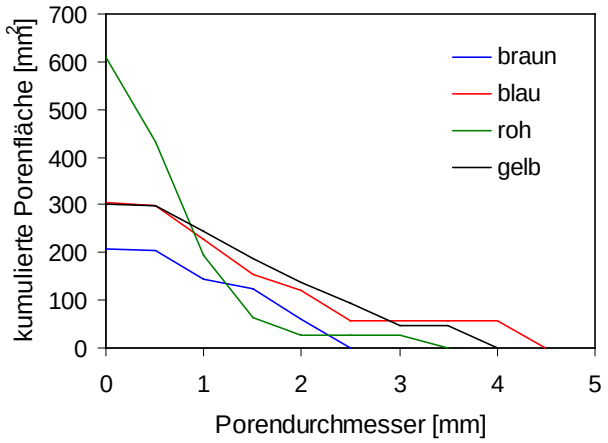


Abb: 22: Beispiele von Porengrössenverteilungen (Summenkurven). Vier verschiedene Schaltafeln mit wässriger Emulsion als Trennmittel, dünn aufgetragen, Betonmischung SB-1.

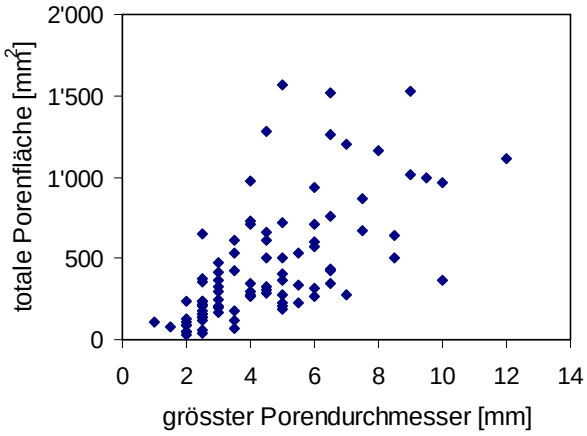


Abb. 23: Totale Porenfläche in Abhängigkeit des grössten Porendurchmessers für alle untersuchten Prüfflächen (nur Versuche mit Trennmittel).

Die Porigkeit weist eine relativ grosse Streuung auf. Die Streuung der Wiederholbarkeit hat etwa die gleiche Grössenordnung, wie die Differenzen, die aufgrund unterschiedlicher Schalmaterialien, Trennmittel, Umgebungsbedingungen und Betonmischungen entstehen. Generell ist die Porigkeit der untersuchten Betonflächen relativ gering. 94% der untersuchten Oberflächen fallen in die Porigkeitsklasse 4 (totale Porenfläche der Poren > 2 mm darf maximal 750 mm^2 betragen) gemäss DBV Merkblatt Sichtbeton [1], Tabelle 4, welche die Stufe mit den höchsten Anforderungen in der dort beschriebenen Klassifizierungstabelle darstellt. Es ist deshalb schwierig, verlässliche Aussagen über den effektiven Einfluss der einzeln variierten Parameter ableiten zu können. So konnte keine gesicherte Abhängigkeit der Porigkeit von Schaltafelart, Trennmittelart und Trennmittelfilmdicke gefunden werden.

Generell wurde jedoch festgestellt, dass die Porigkeit der Betonoberfläche bei der Verwendung von Trennmittel, unabhängig von der verwendeten Schalung abnimmt (Abb. 24). Die Verwendung von Trennmitteln wirkt sich demzufolge unabhängig vom verwendeten Typ günstig auf die Porigkeit aus. Während die blaue Schaltafel im fabrikneuen Zustand mit Abstand die grösste Porigkeit aufweist, ist die Porigkeit nach dem Trennmittelauftrag für alle untersuchten Schaltafelarten vergleichbar gross.

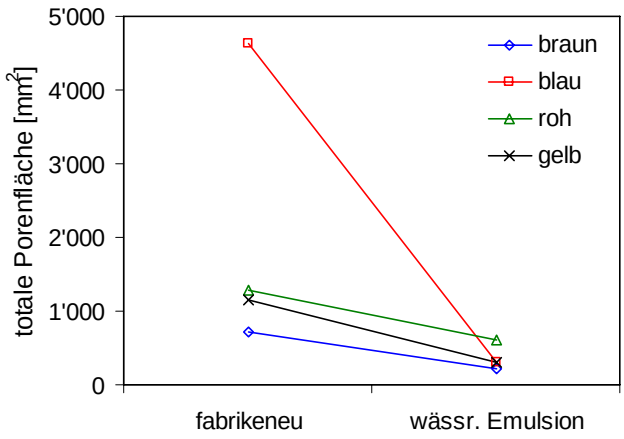


Abb. 24: Totale Porenfläche pro Prüffläche von 50x50 cm für fabrikneue Schaltafeln und künstlich gealterte Schaltafeln mit Trennmittel (wässrige Emulsion, dünn aufgetragen).

In Abb. 25 ist die totale Porenfläche in Abhängigkeit des Ausbreitmasses des Betons dargestellt. Es sind sämtliche hergestellten Prüfflächen aufgetragen, mit Ausnahme derjenigen Flächen, die ohne Trennmittel hergestellt wurden. Aus diesen Resultaten kann gefolgert werden, dass die Wahrscheinlichkeit, eine Fläche mit hohem Porenanteil zu erhalten, mit zunehmender Verarbeitbarkeit des Betons abnimmt. Die Verarbeitbarkeit des Betons scheint also neben dem obenstehend beschriebenen Trennmittelauftrag den grössten Einfluss auf die Porigkeit zu haben.

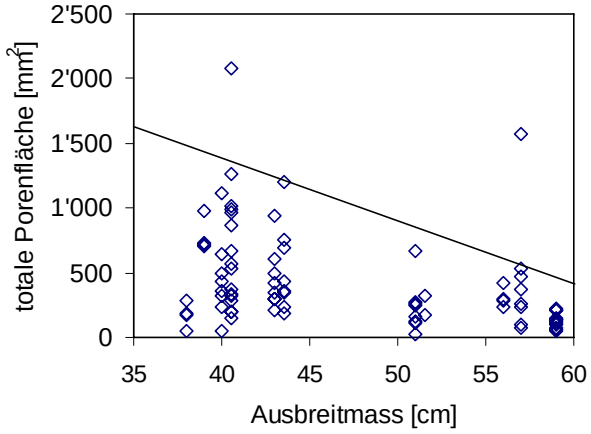


Abb. 25: Totale Porenfläche pro Prüffläche von 50x50 cm in Abhängigkeit der Verarbeitbarkeit des Betons (sämtliche untersuchte Flächen mit Ausnahme derjenigen ohne Trennmittelauftrag).

Von einzelnen Parametern wurde im Vorfeld erwartet, dass sie die Porigkeit negativ beeinflussen könnten. Die erhöhte Rauhigkeit führt nur zu einer geringfügig erhöhten Porigkeit, die innerhalb der Streuung der übrigen Werte liegt. Der Einsatz eines Luftporenbildners führt zwar zu einer erhöhten Porigkeit der Betonoberfläche. Da die Poren jedoch deutlich kleiner als 0.5 mm sind, sind sie nicht detektierbar und optisch nur sichtbar, wenn man sich der Oberfläche bis auf wenige Zentimeter nähert. Da die Porigkeit generell eher gering und die Resultate bei Wiederholungen teilweise gegenteilig sind, kann keine gesicherte Aussage über den Einfluss der Verdichtungsdauer auf die Porigkeit abgeleitet werden.

Durch die Verdichtung mit Schalungsvibratoren ist eine deutlich höhere Porigkeit entstanden. Ob jedoch damit eine Innenverdichtung mit mitschwingender Schalung richtig nachgestellt wurde, ist fraglich. Die Übertragung dieses Resultates auf mitschwingende Schalungen bei Innenverdichtung ist deshalb nicht zu empfehlen. Ebenso kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Verdichtungsintensität mit der in den übrigen Versuchen verwendeten Innenverdichtung vergleichbar ist. Es kann jedoch ein zunehmendes Risiko für eine erhöhte Porigkeit im Falle von Schalungsvibratoren vermutet werden.

3.4 Mikroskopische Untersuchungen

Für die mikroskopischen Untersuchungen wurden Spitzproben von je einer charakteristischen hellen und dunklen Oberflächenstelle entnommen. Zusätzlich wurde vom Prüfkörper, betoniert bei 5°C und Beton mit Fliessmittel (SB-5) eine Spitzprobe vom Übergang hell/dunkel untersucht.

Auf der Abbildung 26 ist zu erkennen, dass die hellen Flecken generell eine glattere Struktur aufweisen als die dunklen Flecken. Bei den dunklen Flecken bleibt die Betonhaut auf den Schaltafeln kleben, was auf der Sichtbetonfläche im allgemeinen zu rauhen und dunklen Flächen führt.

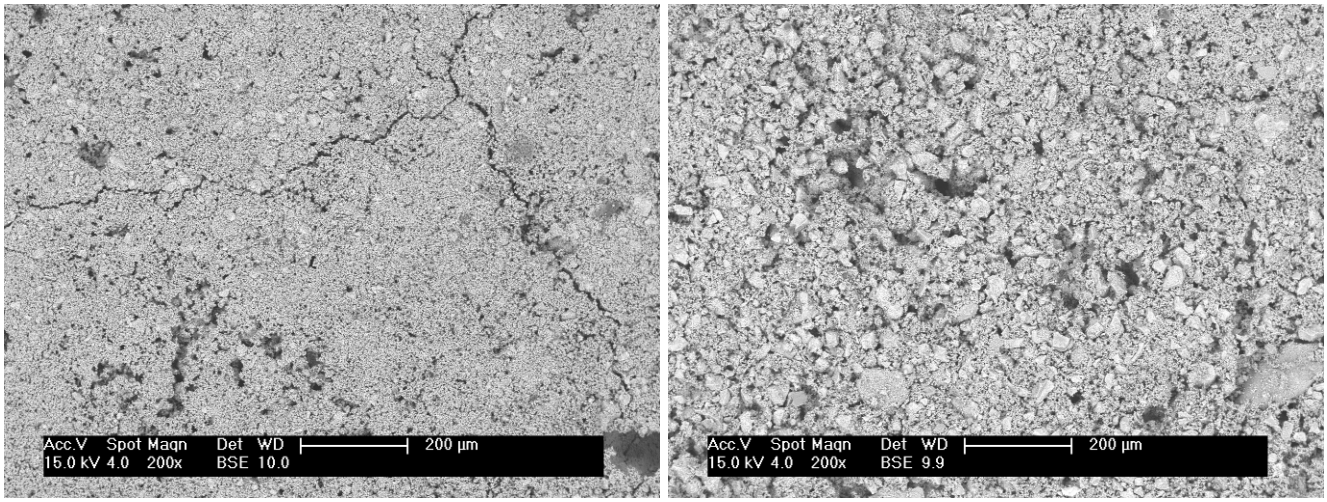


Abb: 26: Aufnahme im Elektronenmikroskop einer hellen (links) und einer dunklen (rechts) Oberflächenstelle.

Beim Versuch bei 5°C und Beton mit Fliessmittel (SB-5) ist genau das Gegenteil der Fall. Die dunkle Fläche ist glatter und weist eine Ansammlung grosser Kristalle auf, während der helle Bereich rauher ist und keine grösseren Kristalle aufweist (Abb. 27).

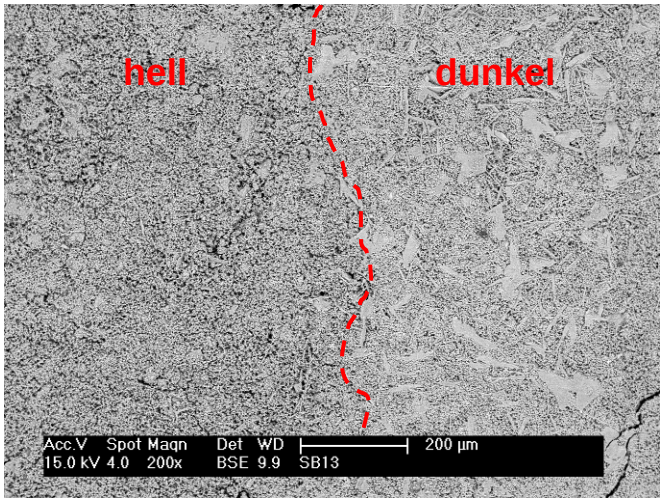


Abb.27: Aufnahme im Elektronenmikroskop (SB-5, 5°C) eines Grenzbereiches hell/dunkel.

Mittels EDX-Analyse konnten die Kristalle als Calciumhydroxid-Kristalle identifiziert werden. Diese Feststellung deckt sich mit den Resultaten ähnlicher Untersuchungen in Deutschland [2]. Auch dort wurde gezeigt, dass bei tiefen Temperaturen und hohen Luftfeuchtigkeiten durch die langsame Austrocknung der Betonoberfläche ein verstärkter Transport von Calciumhydroxid an die Oberfläche stattfindet. Dieses kristallisiert an der Oberfläche aus und führt zu den dichteren und dunkleren Oberflächenbereichen. Im Rahmen dieses Projektes traten diese Flecken allerdings nur unter diesen spezifischen Bedingungen bei Beton mit flüssiger Konsistenz auf. Bei allen anderen Fleckenbildungen war die obenstehend erwähnte rauhere Oberfläche infolge Zementhautablösungen oder lokale Unterschiede in der Saugfähigkeit der Schalung die massgebende Grösse.

3.5 Korrelation mit den Ergebnissen des Projektes SB4

Im Projekt SB3 wurden zuwenig unterschiedliche Betonmischungen untersucht, um eine gesicherte Korrelation zwischen Bluten/Sedimentation aus dem Projekt SB4 und der Qualität der Sichtbetonflächen zu ermöglichen. Trotzdem gibt es gewisse Hinweise über einen solchen Zusammenhang.

Die Flächen mit der tiefsten Standardabweichung der Helligkeit wurden mit Betonmischungen erzielt, deren Ausbreitmass im Bereich von 50-60 cm lag (Ausbreitsmassklasse nach EN 206-1: F4 und F5) und relativ wenig bluteten. Hohe Standardabweichungen resultieren bei Betonmischungen, die entweder stark bluten oder relativ steif sind und nicht entmischen.

Aus diesen Beobachtungen lässt sich die Hypothese ableiten, dass sich ein gewisser Partikelfluss an der Schalfläche zu einer kleinen Standardabweichung der Helligkeit führt. Diese Hypothese wird gestützt durch die Beobachtung, dass bei steifen Mischungen eine Verlängerung der Verdichtungsdauer zu gleichmässigeren Flächen führt. Ist die Teilchenbewegung allerdings so gross, dass eine Fraktionierung eintritt, wie das bei starkem Bluten der Fall ist, steigt die Standardabweichung der Helligkeit wieder an.

Beim Projekt SB3 hat die Verwendung von CEM I nicht zu einer messbaren Erhöhung der Standardabweichung der Helligkeit geführt. Andererseits steht das vermehrte Auftreten von Sichtflächen unregelmässiger Helligkeit bei den Mörtelprismen im Projekt SB4 (qualitative Beurteilung) eindeutig im Zusammenhang mit dem Einsatz von CEM I (mit und ohne Flugasche). Auch wenn dies durch quantitative Daten nicht abgestützt ist, scheint die Verwendung von CEM II/A-LL das Potential für Helligkeitsdifferenzen der Sichtflächen gegenüber CEM I zu reduzieren.

4 Bedeutung für die Praxis

Aus den Resultaten dieses Forschungsprojektes können folgende, für die praktische Anwendung wichtigen Schlussfolgerungen gezogen werden:

Farkonstanz und Helligkeit

- Die homogensten Oberflächen mit geringstem Anteil an dunklen Flecken, Marmorierungen und Wolkenbildung entstehen bei Beton im Konsistenzbereich F4 - F5, der jedoch nicht zum Bluten neigt.
- Den stärksten Einfluss auf die Sichtbetonqualität hat die Umgebungstemperatur (insbesondere tiefe Temperaturen bei hoher Luftfeuchtigkeit), sowie Beton mit hohem w/z-Wert, der zu erhöhtem Bluten neigt. Hierbei entstehen Betonflächen mit erheblicher Fleckenbildung.
- Ein Trennmittelauftrag führt bei steifem Beton (Konsistenzbereich F2 – F3) tendenziell zu Marmorierungen und erhöhter Wolkenbildung im Vergleich zu Flächen ohne Trennmitteleinsatz. Ein mehrmaliger Einsatz der Schaltafel ohne Trennmittel wurde jedoch innerhalb des Projektes nicht überprüft. Bei weichem Beton (Konsistenzbereich F4 – F5) sind diese Marmorierungen und Wolkenbildungen unabhängig vom verwendeten Trennmittel wesentlich weniger stark ausgeprägt.
- Ein übermässiger Trennmittelauftrag führt zu erhöhter Wolkenbildung, verstärkter Marmorierung und insbesondere bei den lösungsmittelfreien Trennmitteln zu Hydratationsstörungen. Bei steifem Beton ist dies ausgeprägter der Fall als bei weichem Beton.
- Die Ablüftzeit der Trennmittel sollte innerhalb einer Fläche möglichst konstant gehalten werden. Die notwendige Ablüftzeit wird durch die Art des Trennmittels beeinflusst. Lösungsmittelhaltige Trennmittel ergeben homogenere Oberflächen bei kurzen Ablüftzeiten, während bei wässrigen Emulsionen genau das Gegenteil zutrifft.
- Saugende Schalungen führen zu einer wesentlich dunkleren Betonoberfläche. Schalungen mit lokal defekter Beschichtung führen deshalb in diesen Bereichen zu dunklen Flecken. Ebenso führt die unterschiedliche Saugfähigkeit von rohen Brettschalungen zu hell/dunkel Unterschieden.
- Die Schalung sollte während der Lagerung nicht der Witterung (inbesondere UV-Bestrahlung) ausgesetzt werden. Dies gilt vor allem für die Schalung mit Melaminharzbeschichtung (gelb).
- Um seitliche Randaufwölbungen entlang der Schalbrettfugen, die sich auf der Betonoberfläche abbilden zu verhindern, muss ein seitlicher Feuchtigkeitszutritt ins Holz der Schaltafel unterbunden werden.

Porigkeit

- Durch den Trennmittelauftrag entstehen im Vergleich zu Schalungen ohne Trennmittel Oberflächen mit geringerer Porigkeit, unabhängig von Schalung, Trennmittelart und Trennmittelfilmdicke.
- Mit zunehmendem Ausbreitmass des Betons nimmt das Risiko für einen hohen Porenflächenanteil ab.

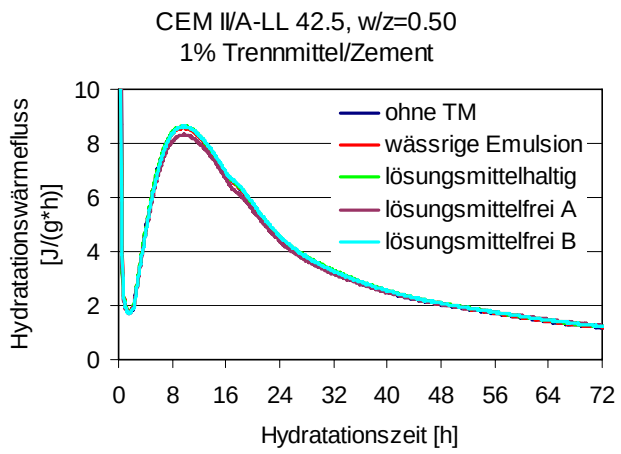
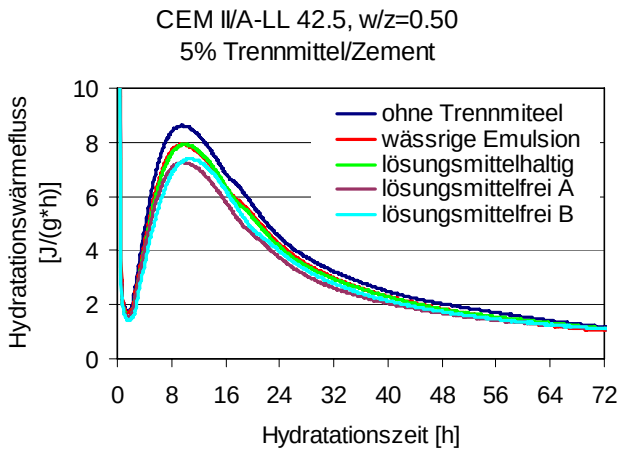
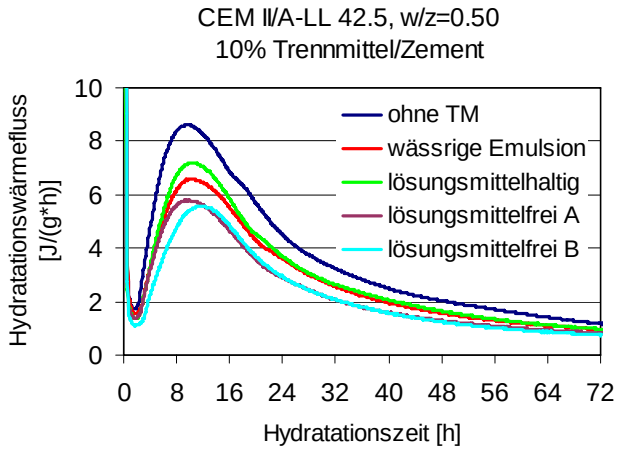
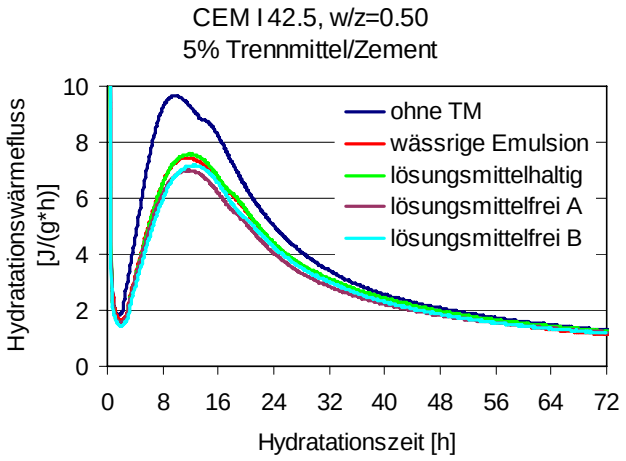
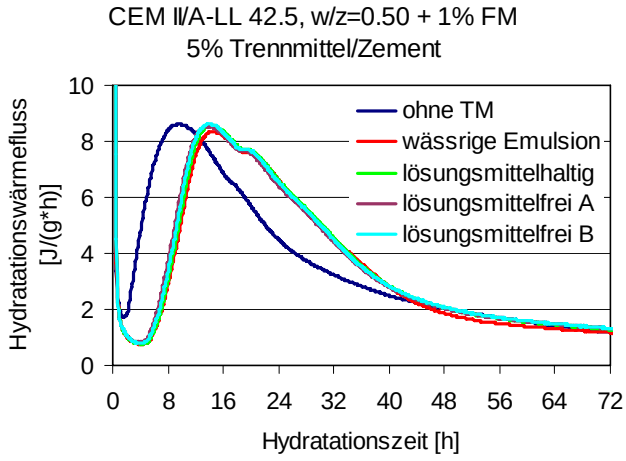
5 Weitere Umsetzung

Im vorliegenden Projektbericht sind nicht sämtliche Bilder aller Prüfflächen enthalten. Diese können jedoch auf Wunsch für die weitere Umsetzung zusammen mit einem Bezeichnungsschlüssel in geeigneter Form zur Verfügung gestellt werden.

6 Literatur

[1] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein (DBV) und Bundesverband der Deutschen Zementindustrie (BDV), “Merkblatt Sichtbeton”, Fassung August 2004, Eigenverlag DBV und BDZ.

[2] Fachtagung „Sichtbeton – Forschung und Praxis“ zum Forschungsprojekt „Verbundforschung Sichtbeton“. Teil „Vermeidung von Farbunterschieden auf Sichtbetonflächen – Transport und Kristallisationsvorgänge im erhärtenden Beton“. 8. Dezember 2006, Düsseldorf.

7 Anhang

7.1 Diagramme Wärmeflusskalorimetrie