Schwindkompensierter Beton

Autor(en): **Brianza, Marco**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **107 (1989)**

Heft 40

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-77177

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Schwindkompensierter Beton

Eine der wichtigsten Ursachen für die Entstehung von Rissen in Beton ist das Schwinden des Baustoffes. Der vorliegende Artikel gibt deshalb nach einem Überblick zum Phänomen Schwinden und zur Entstehung von Schwindrissen eine Einführung in die Möglichkeiten und Grenzen der Schwindkompensation. Er zeigt auf, wie mittels schwindkompensiertem Beton Schwindrisse grösstenteils verhindert werden können.

VON MARCO BRIANZA, BASEL

Risse werden als unvermeidliches Phänomen der Betonbauweise angesehen, und es wird ein grosser Aufwand betrieben, Anzahl und Grösse der Risse in Beton möglichst klein zu halten. Denn Risse können ausserordentliche Konsequenzen für die physikalischen und technischen Eigenschaften, aber auch die ästhetische Seite einer Betonkonstruktion haben. So ist bekannterweise z.B. die Dichtigkeit direkt abhängig von vorhandenen Rissen. Korrosion an der Armierung kann im Bereich von Rissen rasch voranschreiten. Für den Ingenieur und den Bauherrn ergeben sich deshalb bei Rissen Probleme der Gebrauchsfähigkeit und Dauerhaftigkeit eines Bauwerkes: Die vorgesehene Nutzungsmöglichkeit und Nutzungsdauer sowie die damit verbundenen (Erstellungs- und Unterhalts-)Kosten sind im starken Masse auch abhängig von Rissen im Beton.

Risse im Beton können verschiedenste Ursachen haben, schliesslich entstehen Risse immer dann, wenn die auftretenden Zugspannungen die Zugfestigkeit des Betons überschreiten. Endogene (Schwinden, Volumenänderungen aufgrund von Temperaturänderungen und -unterschieden, Treiberscheinungen usw.) und exogene Einwirkungen (mechanische Belastungen, Setzungen usw.), die so gross werden, dass sie zur Entstehung von Rissen im Beton führen, sind detailliert in der Literatur aufgelistet und besprochen (siehe z.B. [1]) und sollen hier nicht diskutiert werden.

Schwinden von Beton

Das Schwinden ist ein Vorgang, der bei allen porösen, wasserhaltigen Baustoffen auftritt. Insbesondere Zementstein mit seiner hohen Porosität (30–40 Vol.-%), feinsten Feststoffpartikeln und der grossen Spanne der Porengrössenverteilung (nm bis µm) schwindet beim Austrocknen stark. Als Schwinden bezeichnet man die Volumenverminderung eines Materials bei der Wasserabgabe. Das Gegenteil wäre das Quellen, das auftritt, wenn ein trockenes, poröses Material befeuchtet wird. Schwinden ist also ein reversibler Prozess. Wir unterscheiden zwischen Frühschwinden oder plastischem Schwinden und Schwinden im erhärteten Zustand (Trocknungsschwinden).

Schwindrisse entstehen im Beton bei Schwindvorgängen, wenn die bei der behinderten Volumenverkleinerung sich aufbauenden Zugspannungen die Zugfestigkeit des Betons überschreiten (Bild 2).

Das Schwinden lässt sich relativ einfach erklären: Im feuchten Zustand umgibt ein Wasserfilm jedes Korn. Entzieht man dem System Wasser (Austrocknung), so werden die Wasserfilme dünner, und die Partikel rücken einander näher. Eine Volumenverminderung ist die Folge, die Masse schwindet. Das Zusammenziehen der Partikel wird bewirkt durch *Oberflächenkräfte;* im plastischen Zustand (vor der Erhärtung) sind es Kapillarkräfte des Wassers (Benetzungswillen, Oberflächenspannung), im erhärteten Zementstein dagegen Oberflächenkräfte der feinen Zementpartikel.

Plastisches Schwinden

Beim Frühschwinden oder plastischen Schwinden tritt der Wasserverlust in den ersten Stunden nach dem Betonieren auf, wenn sich der Beton noch im plastischen Zustand befindet und keinerlei Zugspannungen aufnehmen kann. Es entstehen *Frühschwindrisse* [2].

Das Schwinden im plastischen Stadium ist abhängig von folgenden Faktoren:

- Je fester das Material, desto geringer das Frühschwinden.
- Je kleiner die Poren, desto grösser die Schwindkräfte und damit das Frühschwinden.
- Je grösser die vorhandene Wassermenge, desto stärker das Frühschwinden.

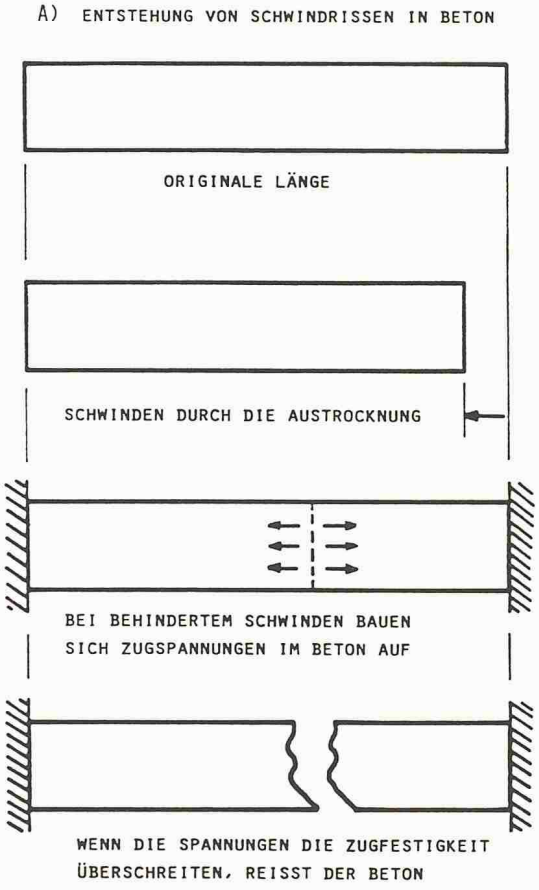
Klimafaktoren (Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit) und Nachbehandlung des Betons beeinflussen nicht das absolute Schwindmass, sondern nur das Schwinden pro Zeiteinheit. Günstige Bedingungen (= gute Nachbehandlung) verhindern also nicht etwa das Schwinden, sondern verlangsamen im wesentlichen den Wasserverlust und das Schwinden und bewirken, dass die Zugfestigkeit des Betons schneller ansteigt als die Schwindspannungen, wodurch die Bildung von Frühschwindrissen verhindert werden kann. Frühschwinden ist im Prinzip kein betonschädlicher Vorgang, solange die Entstehung von Rissen verhindert werden kann oder der Beton vor dem Abbindebeginn nochmals verdichtet wird. Zudem kann Frühschwinden durch eine effiziente Nachbehandlung weitgehend verhindert werden.

Trocknungsschwinden

Das eigentliche Schwinden (oder Trocknungsschwinden) findet im erhärteten Beton statt, wenn überschüssiges (= nicht chemisch oder physikalisch gebundenes) Wasser an die Umgebung abgegeben wird. Beton kann bei Wasseraufnahme auch wieder expandieren, da Schwinden ein umkehrbarer Vorgang ist. Das Schwindmass ist abhängig von den oben erwähnten Einflussgrössen (Wassergehalt und Porengrösse), ferner vom Zement (Menge, Zusammensetzung und Feinheit) und sodann von Zusatzstoffen im Beton. Da der Wassergehalt von erhärtetem Beton (zumindest in den äusseren Bereichen) im Gleichgewicht steht mit dem Feuchtigkeitsgehalt der Umgebung, ist der Schwindbetrag eine direkte Funktion der äusseren klimatischen Bedingungen.

Schrumpfen

Häufig wird auch der Begriff Schrumpfen anstelle von Frühschwinden und Schwinden verwendet. Beim Schrumpfen handelt es sich um die Volumenverringerung infolge von chemischen Reaktionen, auch als chemisches Schrumpfen bezeichnet. Die Reaktionsprodukte beanspruchen ein kleineres Volumen als die Ausgangsstoffe. Bei der Hydratationsreaktion von Zement findet eine innere Austrocknung im Beton statt. Im Gegensatz zum Schwinden, wo durch das Verdunsten des Wassers die Masse abnimmt, kommt es beim Schrumpfen zu einer Volumenverringerung ohne Masseverlust. Dieser Prozess kann zu Schrumpfrissen



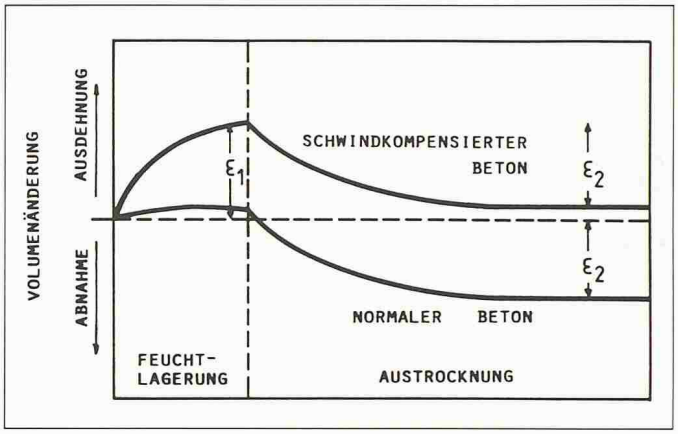
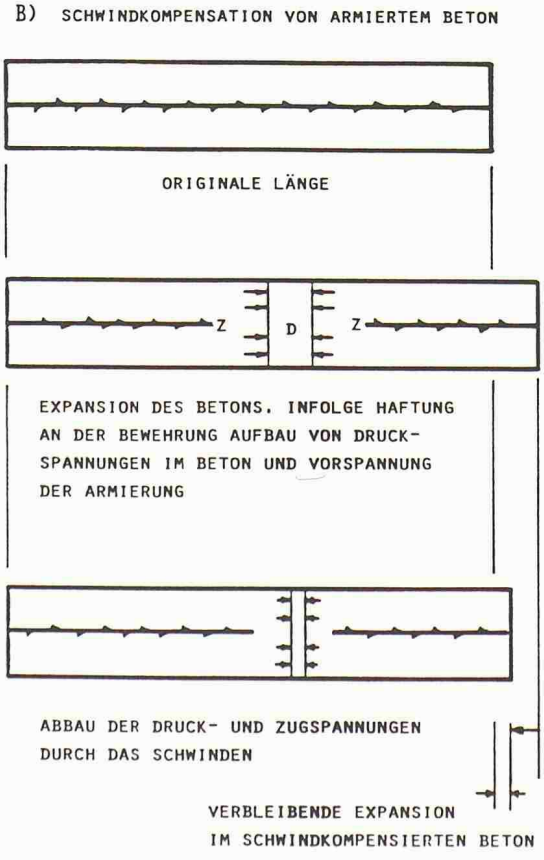
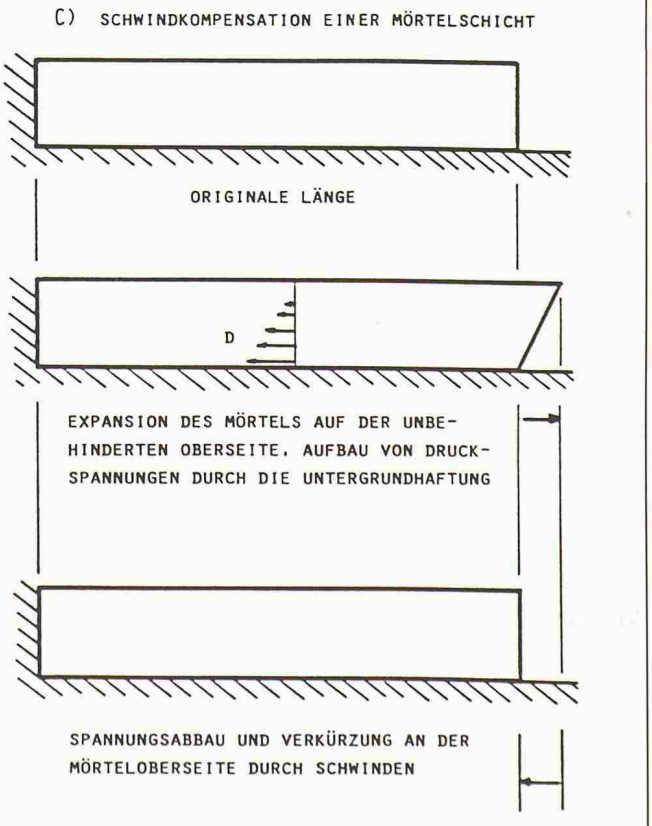


Bild 1. Volumenänderung in schwindkompensiertem und normalem Beton. Während der Feuchtbehandlung expandiert der Beton mit Expansionsmittel um den Betrag ε_1. Beim Austrocknen schwindet das Material um den Betrag ε_2. Ist die Expansion grösser als das Schwindmass, so tritt keine Volumenverkleinerung ein. Bei normalem Beton ohne Expansionsmittel tritt durch die Austrocknung eine Volumenverkleinerung um den Wert ε_2 ein

Bild 2. Modellvorstellungen zur Entstehung von Schwindrissen (A) und zur Wirkung der Schwindkompensation in bewehrtem Beton (B) und in einer Mörtelschicht (C)





führen. Da dieser Risstyp bei Beton kaum sichtbar ist (es entstehen nur mikroskopisch kleine Risse), sollte dieser Begriff für makroskopische Phänomene jedoch überhaupt nicht verwendet werden.

Volumenveränderungen durch thermische Einwirkungen

Risse, die z.B. durch thermische Einwirkungen entstehen (zu grosse Temperaturdifferenz zwischen verschiedenen Betonbereichen), sind wohl auch auf Volumenveränderungen zurückzuführen, sollten jedoch nicht als Schwindrisse bezeichnet werden, da sie nicht als Folge einer Wasserabgabe entstehen.

Es ist zu hoffen, dass in Zukunft die willkürliche Rissbezeichnung in der Literatur zugunsten einer vernünftigen, materialtechnologisch begründeten Namensgebung aufgegeben wird und Begriffe wie Hydratations- und Schrumpfungsrisse vermieden werden.

Verhinderung von Schwindrissen

Das Schwinden ist in keinem Fall verhinderbar, da ein poröser Werkstoff je nach Umgebung Wasser abgibt. Verhindert werden kann nur die Entstehung von Schwindrissen. Wird die Volumenverkleinerung des Betonkörpers behindert, so bauen sich abhängig vom Schwindmass und den konstruktiven Details Schwindspannungen (= Zugspannungen) im Körper auf, die bei Überschreiten der Zugfestigkeit des Betonkörpers zur Bildung von *Schwindrissen* führen. Durch den Bruch werden die Zugspannungen abgebaut.

Als Folge von Schwindrissen können sich ernste Probleme ergeben: Die Betonkonstruktion ist nicht mehr wasserdicht, sie weist verminderte Korrosionsbeständigkeit der Armierung und Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen und physikalischen Angriffen auf, wodurch die Dauerhaftigkeit herabgesetzt wird. Schwindrisse bedeuten häufig einen grossen zusätzlichen Aufwand für Unternehmer und Bauherr, wenn Rissinjektionen und/oder Abdichtungen vorgenommen werden müssen. Deshalb wird versucht, Schwindrisse zu vermeiden.

Es gibt drei prinzipiell unterschiedliche Möglichkeiten, wie Schwindrisse verhindert werden können:

- Man verhindert das Austrocknen des Betons und damit das Schwinden. Dies ist auf natürliche Weise bei Unterwasserbauten der Fall.
- Man erhöht die Frühfestigkeit des Betons und erniedrigt die maximal auftretenden Schwindspannungen durch diskretere Spannungsverteilung (z.B. durch Armierungseinlagen, Faserzugabe, konstruktive Details wie Fugen usw.) so weit, dass trotz Schwinden keine Rissbildung möglich ist.
- Man kompensiert die schwindbedingte Volumenverringerung bzw. die auftretenden Schwindspannungen durch vorgängige Materialexpansion bzw. Aufbau von Druckspannungen.

Die letztgenannte Möglichkeit soll im weiteren näher besprochen werden. Es handelt sich um die Technik des *schwindkompensierten Betons.*

Schwindkompensation

Das Prinzip der Schwindkompensation besteht darin, das Volumen des Betons vor Einsetzen des Schwindens mit Hilfe eines treibenden Materials soweit zu vergrössern, dass der Beton nach vollständigem Schwinden wieder genau das ursprüngliche Volumen erreichen wird (Bild 1).

Da die Expansion in der Praxis nicht oder nur begrenzt möglich ist, bewirken Expansionszusätze im Falle von armiertem Beton, allseitig begrenzten Baukörpern und auf dem Untergrund gut haftenden Schichten den Aufbau von Druckspannungen im frisch betonierten und erhärtenden Bauteil. Bild 2 zeigt modellhaft zwei Möglichkeiten des Materialverhaltens: Beton mit Stahlbewehrung (B) und eine Mörtelschicht (C). Welchen Einfluss die Behinderung der freien Expansion auf die mechanischen Eigenschaften hat, zeigen Versuche von Monfore [3]. Mörtel, hergestellt mit Expansivzement, in Stahlformen eingebracht und feucht gelagert, zeigt bei behinderter Expansion erhöhte Druckfestigkeit bis über 70 N/mm² infolge des internen Spannungsaufbaus, während Probekörper mit unbehinderter Expansion keinen Festigkeitszuwachs aufwiesen (Bild 3).

Mit Einsetzen des Schwindens werden die Druckspannungen im Beton wieder vollständig abgebaut, sofern das Schwindmass den Expansionswert erreicht. Andernfalls bleiben geringe Druckspannungen im Beton erhalten. Der Beton wird durch das Schwinden entlastet, verändert aber sein Volumen nicht mehr.

Grundvoraussetzung für erfolgreiches Gelingen ist, dass bei Einsatz von schwindkompensiertem Beton die Anforderungen an das Material definiert und die folgenden Parameter aufeinander abgestimmt werden:

- Abbinde- und Erhärtungsverlauf des Betons
- Schwindmass (bzw. Expansionsgrad) des Betons
- Reaktionsverlauf des Expansionsmittels
- Nachbehandlung

Für die Praxis ergeben sich infolge der verschiedenen Einflussparameter diverse Möglichkeiten, eine Expansion zu erreichen. Von ausschlaggebender Bedeutung ist dabei die Wahl und Dosierung des Expansionsmittels und die richtige Nachbehandlung.

Expansionsmittel

Es sind diverse Materialien bekannt, die eine Expansion des Betons bewirken. Es können drei prinzipiell verschiedene Gruppen unterschieden werden:

Typ I: Expansionsmittel, die Gas freisetzen.
Typ II: Expansionsmittel, die zu einer Ettringitbildung führen.
Typ III: Expansionsmittel auf der Basis von Erdalkalioxiden.

Wirkungsweise und Eigenheiten der verschiedenen Quellmittel sollen kurz vorgestellt werden. Es wird dabei nicht eingegangen auf alte, nicht mehr gebräuchliche Treibmittel wie beispielsweise Eisenspäne und Korrosionsmittel (vorwiegend $CaCl_2$), die durch das Rosten eine Expansion verursachen, und auch nicht auf neuartige Substanzen, die sich noch im Entwicklungsstadium befinden und in der Praxis noch nicht eingesetzt werden.

Gasfreisetzende Expansionsmittel

Amphotere Metalle reagieren im alkalischen Milieu mit Ca-Hydroxid zu Ca-Me-Hydrat und geben dabei Wasserstoff ab. Als bekanntester Vertreter dieser Gruppe sei das Aluminiumpulver erwähnt, das zur Erzeugung von Gasbeton eingesetzt wird.

$$2\,Al + 3\,Ca(OH)_2 + 6\,H_2O \rightarrow 3\,H_2 + 3\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6\,H_2O$$

Im weiteren kommen heute vorwiegend Stickstoff-abspaltende, organische Verbindungen zum Einsatz, da bei diesen Materialien die Menge und der Freisetzungsverlauf des Gases genauer kontrolliert werden kann.

Gasabspaltende Expansionsmittel reagieren nur wenige Stunden und verlieren ihre Wirkung weitgehend, sobald die Erhärtung des Betons oder Mörtels einsetzt. Sie werden deshalb fast ausschliesslich für Vergussmörtel, Einpressmörtel und Injektionen verwendet, wo ein einwandfreier Kontakt zwischen Füllmaterial und Umhüllung (z.B. Spannkabelhüllrohr, Maschinenfundamentplatte usw.) erforderlich ist. In diesen Anwendungsbereichen ist das

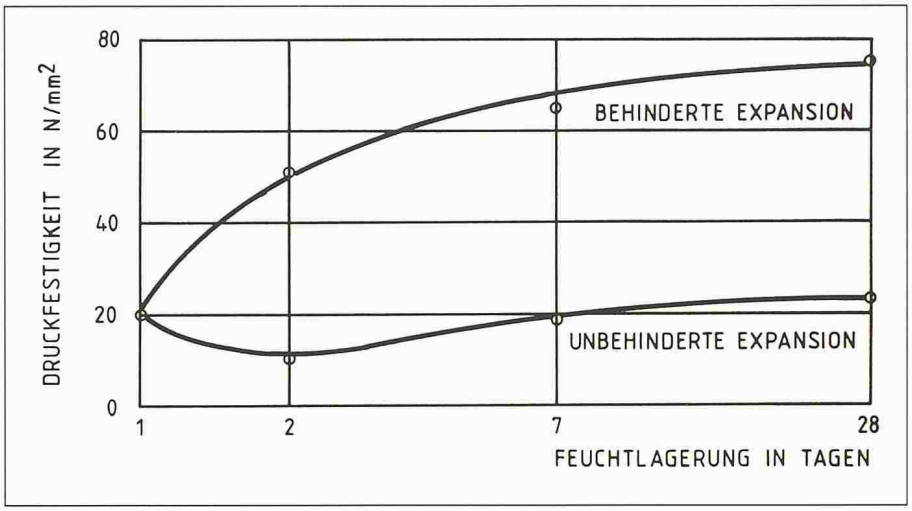


Bild 3. Veränderung der Mörteldruckfestigkeit (hergestellt mit Quellzement) bei behinderter und unbehinderter Expansion. Nach [3]

Typ K: Mischung aus Portlandzement, Ca-Sulfat (Gips, Anhydrit) und einem PC-ähnlichen Zement mit C_4A_3S:

$4\,CaO \cdot 3\,Al_2O_3 \cdot SO_3 + 6\,CaO + 8\,CaO \cdot SO_4 + 96\,H_2O \rightarrow$
$3\,(3\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3\,CaSO_4 \cdot 32\,H_2O)$

Typ M: Mischung aus Portlandzement, Ca-Sulfat und Calcium-Aluminat-Zement (CA und evtl. $C_{12}A_7$, «Lafarge-Zement»):

$CaO \cdot Al_2O_3 + 2\,CaO + 3\,(CaSO_4 \cdot 2\,H_2O) + 26\,H_2O \rightarrow$
$3\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3\,CaSO_4 \cdot 32\,H_2O$

Typ S: C_3A-reicher Portlandzement mit erhöhtem Ca-Sulfat-Gehalt:

$3\,CaO \cdot Al_2O_3 + 3\,(CaSO_4 \cdot 2\,H_2O) + 26\,H_2O \rightarrow$
$3\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3\,CaSO_4 \cdot 32\,H_2O$

Tabelle 1. Reaktionen der drei Typen Quellzemente zur Bildung des Minerals Ettringit

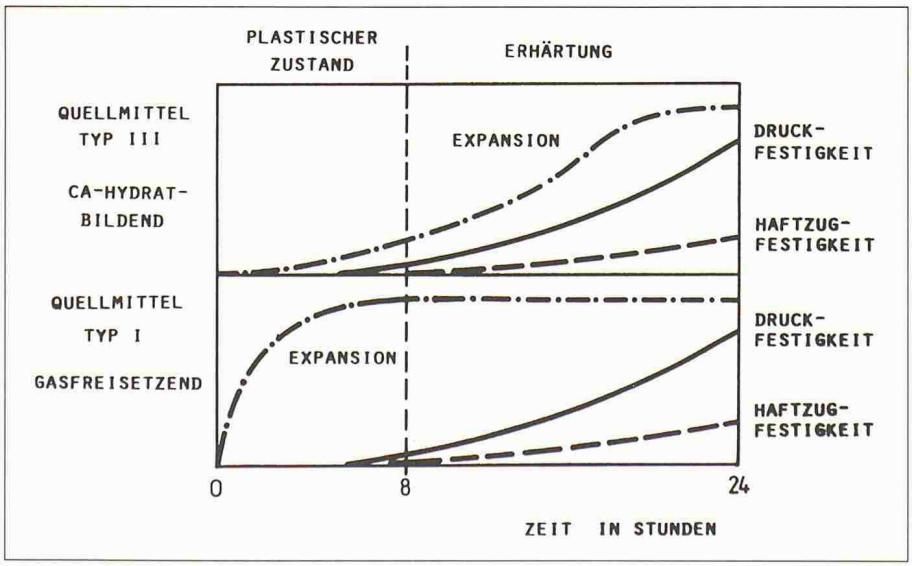


Bild 4. Vergleich des Expansionsverhaltens von Beton mit einem gasfreisetzenden Quellmittel (Typ I) und einem langsam wirkenden Expansionsmittel (Typ III). Das gasfreisetzende Material (unten) wirkt nur während weniger Stunden bis zum Abbindebeginn des Betons. Ein Spannungsaufbau ist nicht möglich. Das langsam wirkende Mittel (oben) auf der Basis von CaO hydratisiert während der Festigkeitsentwicklung. Da der Beton bereits an der Armierung haftet, können Druckspannungen im Beton aufgebaut werden

Quellen im plastischen Zustand wichtig, weil geringste Wasserabsonderungen zu Hohlstellen und Ablösungen führen.

Expansionsmittel, die nur in der plastischen Betonphase eine Volumenvergrösserung bewirken, eignen sich für schwindkompensierten Beton nicht. In diesem Bereich kommen ausschliesslich Stoffe zur Anwendung, die *langsam* reagieren und eine Expansion während der Festigkeitsentwicklung verursachen. Bild 4 zeigt den Expansionsverlauf von Beton mit Quellmitteln von Typ I und Typ III in Zusammenhang mit der (Druck- und Haftzug-)Festigkeitsentwicklung. Die Graphik verdeutlicht, weshalb kein schwindkompensierter Beton mit gasfreisetzenden Expansionsmitteln hergestellt werden kann. Bei den Expansionsmitteln des Typs II und III handelt es sich um Substanzen, die hydratisieren, d.h. eine chemische Reaktion mit Wasser eingehen resp. Wasser im neu gebildeten Festkörper einbauen.

Ettringitbildende Expansionsmittel

Treibmittel, die zur Bildung von Ettringit führen, werden auch unter dem Begriff *Quell-* oder *Expansivzemente* zusammengefasst. Allen Quellzementen ist gemeinsam, dass sie eine Expansion des Betons bewirken, wenn sich aus Aluminat- und Sulfatbestandteilen durch die chemische Reaktion ein komplexes wasserhaltiges Ca-Al-Sulfat-Mineral (Ettringit) bildet. Quellzemente – in der Schweiz weitgehend unbekannt (d.h. nicht hergestellt und verwendet) – werden vorwiegend in den Vereinigten Staaten und Japan produziert und angewendet. Quellzemente sind seit der Erfindung und Patentierung durch Lossier [4] in den 30er Jahren bekannt, obwohl über die Mechanismen der Expansion auch heute noch verschiedene Theorien bestehen [5]. Einsatzmöglichkeiten und Grenzen von Quellzementen diskutiert u.a. Wischers [6]. Gemäss amerikanischer Klassifizierung [7] werden drei Typen von Quellzementen nach ihrer Zusammensetzung unterschieden:

Typ K: Mischung aus Portlandzement, Ca-Sulfat (Gips, Anhydrit) und einem PC-ähnlichen Zement mit C_4A_3S

Typ M: Mischung aus Portlandzement, Ca-Sulfat und Calcium-Aluminat-Zement (CA und evtl. $C_{12}A_7$, «Lafarge-Zement»)

Typ S: C_3A-reicher Portlandzement mit erhöhtem Ca-Sulfat-Gehalt

Reaktive Bestandteile für die Ettringitbildung sind meist die Ca-Aluminate und -Sulfate des Zements. Die Reaktion

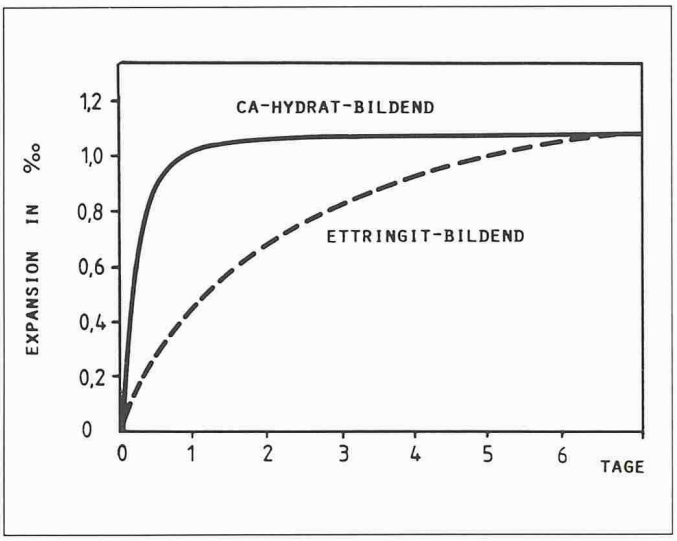


Bild 5. Vergleich des Expansionsverhaltens von zwei verschiedenen hydratisierenden Quellmitteln. Typ II ist ettringitbildend, reagiert langsam und braucht rund 7 Tage bis zur maximalen Expansion. Typ III ist Ca-Hydroxid-bildend und reagiert rascher. Die Expansion ist bereits nach 1–2 Tagen abgeschlossen

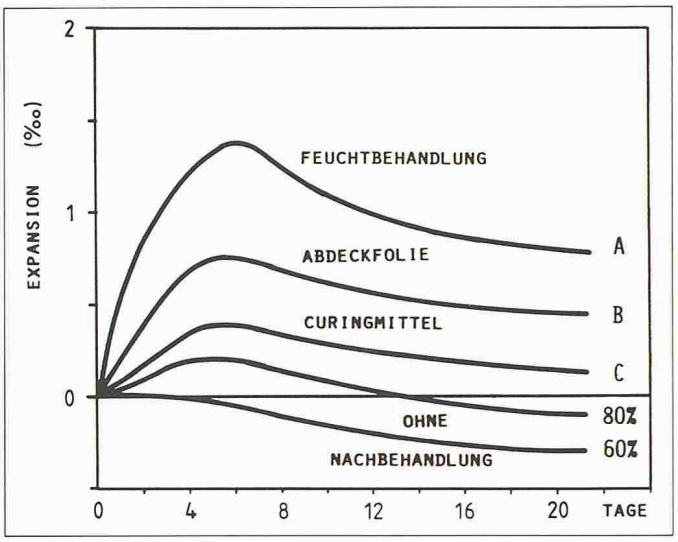


Bild 6. Einfluss der Nachbehandlung auf das Expansionsverhalten eines schwindkompensierten Betons. Gute Expansion (bzw. optimaler Druckspannungsaufbau im bewehrten Beton) ist nur bei feuchter Nachbehandlung (Besprühen mit Wasser, Auflegen nasser Säcke usw.) zu erreichen (A). Bei Abdeckung mit Folie, Dichtungsbahnen oder ähnlichem, das die Wasserverdunstung verhindert, aber kein Wasser zuführt, ist die Ausdehnung bereits auf die Hälfte des optimalen Wertes reduziert (B). Bei Verwendung von Curingmitteln ist nur noch eine geringfügige Expansion festzustellen (C). Zum Vergleich die Volumenänderungen des gleichen Betons ohne Nachbehandlung bei 80% und 60% relativer Luftfeuchtigkeit. Vergl. auch [9]

mit Wasser führt zur Bildung des Minerals Ettringit nach den Gleichungen in Tabelle 1.

Weitere Al-Verbindungen (Hydrate, Aluminate) in Zementklinker sind bekannt, die zusammen mit Gips zu Ettringit reagieren. Sie werden normalerweise in Quellzementen nicht verwendet.

Die Ettringitbildung und Expansion des Betons dauert in der Regel mehrere Tage (Bild 5). Es kann sich deshalb eine gute Druckspannung im Beton aufbauen, sofern (und dies ist die wesentliche Voraussetzung für eine gute Schwindkompensation) die Festigkeitsentwicklung und Nachbehandlung des Betons optimal verläuft. Wie die chemischen Reaktionsgleichungen zeigen, wird für der Ettringitbildung Wasser benötigt. Die Nachbehandlung muss deshalb die *Zufuhr von Wasser* gewährleisten, beispielsweise durch konstantes Berieseln aller Betonoberflächen nach dem Ausschalen.

Mit normalem Portlandzement hergestellter Beton wird in Kontakt mit sulfathaltigem Wasser durch die Bildung von Ettringit zerstört. Solche Schadensbilder sind uns in der Schweiz wohlbekannt. Obwohl es sich um den gleichen Prozess wie bei der Anwendung von Expansivzement handelt, sind aus folgenden Gründen beim schwindkompensierten Beton derartige Befürchtungen überflüssig:

- Die Ettringitbildung erfolgt dosiert, das maximale Expansionsmass ist durch die Zusammensetzung definiert.
- Die Ettringitbildung erfolgt homogen verteilt über den ganzen Betonquerschnitt und nicht nur an der Betonoberfläche.
- Die Ettringitbildung erfolgt zu einem grossen Masse während der Erhärtungsphase in den ersten 3–4 Tagen und ist nach rund 7 Tagen vollständig abgeschlossen.

Da die Expansion eines Quellzementes über den Sulfatgehalt gesteuert wird und Aluminat im Überschuss vorhanden ist, verhält sich der Quellzement nach der Expansion genau wie ein normaler Portlandzement, ist also ebenfalls nicht beständig bei Angriff von sulfathaltigem Wasser.

Erdalkali-Oxide

Calcium- und Magnesiumoxid hydratisieren in Kontakt mit Wasser und bewirken dadurch eine Expansion des Betons. Es laufen folgende Reaktionen ab:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$$

$$MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$$

Im Gegensatz zu den Quellzementen, die den Portlandzement ersetzen und als einziges Bindemittel in den Beton gegeben werden, können die Expansionsmittel, die im wesentlichen auf der Hydratation von Ca-Oxid beruhen, in relativ geringen Mengen als Zusatzstoff dem Beton (hergestellt mit normalem PC) zugemischt werden. Übliche Dosierungen sind 20–40 kg/m³, abhängig vom gewünschten Expansionsmass und den jeweiligen Einflussfaktoren.

Die Hydratationsreaktion von CaO verläuft rascher als die Ettringitbildung der Quellzemente. Deshalb expandieren Betone mit Ca-Oxid-Quellmittel schneller, und die Volumenvergrösserung ist bereits nach etwa 24 Stunden abgeschlossen (Bild 5). Dies erleichtert die Nachbehandlung des Betons ausserordentlich, da eine Feuchthaltung nur bis zu diesem Zeitpunkt zwingend notwendig ist. Anschliessend kann mit normalen Mitteln eine Austrocknung des Betons verhindert werden (Abdekkung).

Anderseits verlangen Expansionsmittel dieses Typs eine rasche Festigkeitsentwicklung des Betons, damit die Haftung an der Armierung genügend hoch ist, wenn nach wenigen Stunden durch die Expansion bereits Zugspannungen aufgebracht werden. Es empfiehlt sich deshalb die Verwendung von verflüssigenden Betonzusätzen, damit der W/Z-Wert genügend tief liegt.

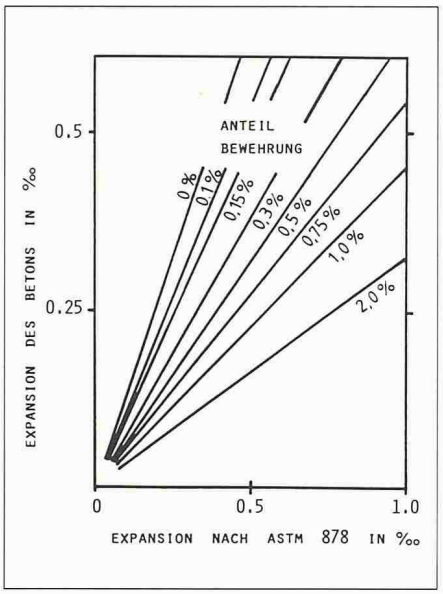


Bild 7. Zusammenhang zwischen der Expansion nach ASTM C878 und der Betondehnung in Abhängigkeit des Bewehrungsanteils. Nach [9]

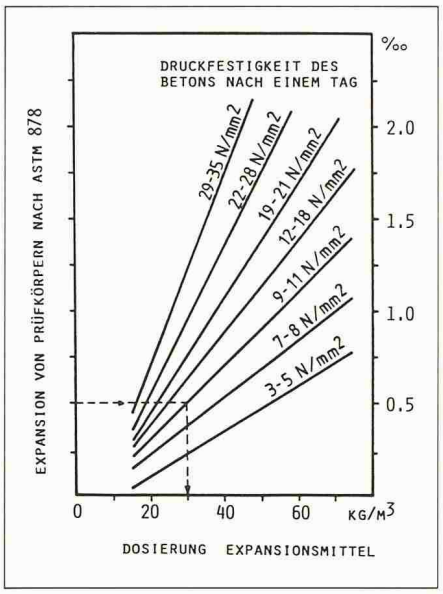


Bild 8. Diagramm zur Bestimmung der Dosierung eines Expansionsmittels aufgrund des Expansionsmasses nach ASTM C878 und der Betondruckfestigkeit

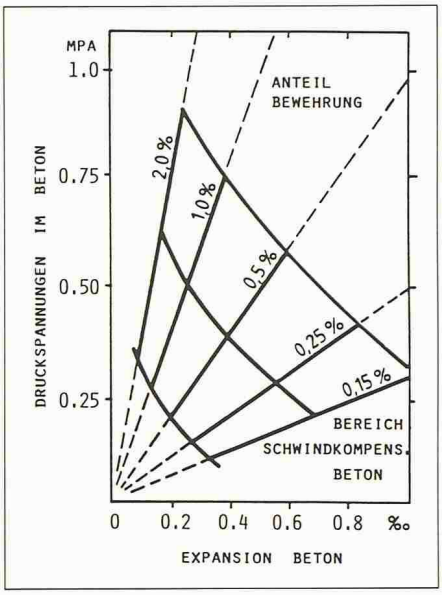


Bild 9. Druckspannungen, die im bewehrten Beton erreicht werden in Abhängigkeit des Bewehrungsanteils und der maximalen Expansion des Betons. Für schwindkompensierten Beton sollten die Werte innerhalb des angegebenen Feldes liegen. Nach [9]

Da bei der chemischen Reaktion des CaO in relativ kurzer Zeit viel Hydratationswärme freigesetzt wird, ist die Überwachung der Betontemperatur empfehlenswert, wenn keine Vorausberechnung der Temperaturentwicklung erfolgt und dementsprechende Massnahmen getroffen werden. Günstig wirkt sich deshalb der Einsatz dieses Expansionsmittels im Winter bei tieferen Temperaturen aus, sofern mit einer guten Wärmeisolation nachbehandelt wird (Verhinderung von Temperaturunterschieden zwischen Betonkern und -aussenseite von $dT > 20$ °C).

Neben der kürzeren Expansionszeit bringt der Einsatz von Quellmitteln dieser dritten Kategorie den zusätzlichen Vorteil, dass die Alkalitätsreserve des Betons gegen die Karbonatisierung und andere chemische Einwirkungen massiv verbessert wird. Demgegenüber sinkt bei der Verwendung von Quellzementen diese Alkalireserve deutlich ab, da alle Expansivzemente verglichen mit Portlandzement einen erhöhten Anteil an Aluminat besitzen und deshalb erheblich weniger $Ca(OH)_2$ bei der Hydratation freisetzen.

Nachbehandlung

Die Hydratationsreaktion des Expansionsmittels im schwindkompensierten Beton benötigt Wasser. Deshalb ist eine feuchte Nachbehandlung des jungen Betons notwendig. Die Feuchtbehandlung sollte spätestens mit dem Abbindebeginn, besser unmittelbar nach dem Abziehen des eingebrachten Betons, einsetzen und während der gesamten Expansionszeit fortdauern. Bild 6 zeigt, dass bei ungenügender Nachbehandlung während der Reaktionszeit des Quellmittels die Expansion nur Bruchteile der effektiv möglichen Werte erreicht. Bereits mit dem Aufbringen von Abdeckfolien zur Verhinderung der Wasserverdunstung anstelle einer Feuchtbehandlung (Wasserberieselung, Nasshalten von feuchten Stoffbahnen oder ähnliches) sinkt das Expansionsmass auf die Hälfte. Bei fehlender Nachbehandlung ist kaum noch eine Expansion feststellbar. Eine Schwindkompensation ist damit natürlich nicht mehr vorhanden.

Anwendung von schwindkompensiertem Beton

Das Vorgehen in der Praxis bei der Anwendung von schwindkompensiertem Beton soll kurz erläutert werden. Die weiteren Ausführungen, soweit sie materialabhängig sind, beruhen auf der Anwendung des Produkts Stabilmac [8].

Stabilmac ist ein Expansionsmittel der III. Gruppe und wird somit dem Beton als *Zusatzstoff* in geringer Menge (20–40 kg/m³) beigemischt. Es besteht im wesentlichen aus einer Mischung von Portlandzement, Calciumoxid und (anorganischen) Hilfsstoffen.

Bei der Konzeption des schwindkompensierten Betons sind die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

- Konstruktive Details inkl. Fugen, Anschlüsse usw.
- Betonrezeptur
- Armierungsgehalt
- Dosierung des Expansionsmittels

Auf die konstruktive Gestaltung der Betonelemente, die Anordnung der Fugen (falls überhaupt notwendig), Ausführung der Anschlusselemente und Übergangsbereiche kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Diese planerischen Details sind vom jeweiligen Objekt abhängig. Richtlinien sind aus [9] ersichtlich und auch beim Hersteller von Expansivzusätzen erhältlich.

Beim Einsatz von schwindkompensiertem Beton müssen Schwind- und Expansionsmass vorausberechnet und aufeinander abgestimmt werden. Hierzu ist die Menge an Armierung und die Betonrezeptur erforderlich. Das Schwindmass kann als Erfahrungswert (Messwerte) von anderen ausgeführten Bauwerken mit gleicher Betonrezeptur übernommen, experimentell aus Vorversuchen bestimmt oder berechnet werden aufgrund der Zusammensetzung des Betons (Zement- und Wassergehalt) und der durchschnittlichen Luftfeuchtigkeit.

Das freie Expansionsmass eines Quellmittels wird vom Hersteller experimentell bestimmt, z.B. nach ASTM C 878 [10]. Konventionelle Schwindmessungen (z.B. nach SIA 162/1) eignen sich nicht zur Erfassung des Expansionsmasses eines schwindkompensierten Betons. Einerseits sind die vorgeschriebenen Lagerungsbedingungen ungeeignet (konzipiert für die Austrocknung eines Baustoffes, nicht zur Feuchtlage-

rung), anderseits sollte die behinderte Expansion bestimmt werden. Aufgrund von empirischen Untersuchungen sind die Zusammenhänge zwischen Expansionsmass des Quellmittels nach ASTM C 878 und Expansionsmass, Armierungsgehalt und Druckfestigkeit eines Betons bekannt. Deshalb kann vom berechneten Schwindmass mittels Armierungsanteil auf den notwendigen Expansionswert nach ASTM (Bild 7) geschlossen werden, woraus sich aufgrund der Betonfestigkeit die Dosierung des Expansionsmittels berechnen lässt (Bild 8).

Die Behinderung der Expansion (zum Aufbau von Druckspannungen, am besten durch die Stahlarmierung, weniger durch nicht kontrollierbare angrenzende Bauteile oder Untergrundhaftung) muss abgestimmt sein auf das vorausberechnete Schwindmass und darf nicht zu massiv sein. Zu starke Behinderung der Expansion führt zu einem stark verringerten Expansionsverhalten. Prinzipiell sollten die aufgebauten Druckspannungen auch nicht zu hoch werden, um unkontrolliertes Quellen in unbewehrten oder schwachen Bereichen zu verhindern. Die Empfehlungen der Lieferanten von Expansivmitteln sind deshalb unbedingt zu berücksichtigen. Für schwindkompensierten Beton sollten die folgenden Grenzen nicht überschritten werden [9] und Bild 9:

- Bewehrungsanteil mindestens 0,15%, maximal 2%
- Expansionsmass zwischen 200 und 800 µm/m.

Schliesslich müssen die bereits oben erwähnten Punkte beim Herstellen schwindkompensierten Betons beachtet werden, damit diese Betontechnologie erfolgversprechend angewendet werden kann:

Der Einsatz eines systemverträglichen Hochleistungsverflüssigers ist notwendig, um den W/Z-Wert tief zu halten und so eine rasche Festigkeitsentwicklung zu bekommen. Verzögernde Betonzusätze dürfen keinesfalls verwendet werden.

Die Nachbehandlung hat sofort nach dem Betonieren und im erforderlichen Ausmass während mindestens zwei Tagen nass zu erfolgen. Baustellenerfahrungen deuten darauf hin, dass schwindkompensierter Beton anfälliger ist auf Frühschwindrisse, da ein grosser Teil des Anmachwassers bei der Hydratationsreaktion verbraucht wird und der Verdunstung nicht mehr zur Verfügung steht. Rascheres Austrocknen ist die Folge, wogegen der Beton bei warmem, trockenem und windigem Wetter frühzeitig und verstärkt geschützt werden muss. Die Temperaturentwicklung muss beachtet werden. Bei Temperaturen über 30 °C sollte kein schwindkompensierter Beton hergestellt und eingebracht werden. Für Massenbeton ist schwindkompensierter Beton weniger geeignet, bei Konstruktionsteilen ab 35 cm Wandstärke sollte die Betonrezeptur angepasst werden, damit die Hydratationswärmeentwicklung nicht zu einer zu hohen Betontemperatur führt. Im übrigen sind für weitere Details, insbesondere auch konstruktiver Art, die Richtlinien des ACI (American Concrete Institute) sehr instruktiv [9].

Zusammenfassung

Schwinden ist ein nicht zu verhindernder Vorgang bei Beton und bedeutet eine Volumenverkleinerung aufgrund der Wasserabgabe (Austrocknung). Wenn beim Schwinden die aufgebauten Zugspannungen die Zugfestigkeit des Betons überschreiten, entstehen Schwindrisse. Durch Verwendung von schwindkompensiertem Beton ist es möglich, Schwindrisse weitgehend zu verhindern.

Bei der Technik des schwindkompensierten Betons wird in den ersten Tagen mit Hilfe eines Quellmittels der Beton soweit expandiert, wie das zu erwartende Schwindmass beträgt. Es bauen sich Druckspannungen im bewehrten Beton auf, die beim Schwindvorgang (Austrocknung) wieder abgebaut werden, ohne dass es zu einer Volumenverkleinerung kommt. Dadurch kann die Rissentstehung stark reduziert werden. Um eine optimale Schwindkompensation zu erreichen, müssen konstruktive Details (die hier nicht besprochen wurden) angepasst, die Betonfestigkeit und der Armierungsanteil berücksichtigt sowie das Expansionsmass und der Schwindbetrag aufeinander abgestimmt werden. Eine Feuchthaltung als Nachbehandlung in den ersten Tagen ist unumgänglich. Korrekt geplanter und verarbeiteter schwindkompensierter Beton ermöglicht die Herstellung von weitgehend schwindrissfreien Betonkonstruktionen und führt zu dichteren und dauerhaften Betonbauten.

Literatur

[1] Comité Euro-International du Béton (1985): «Draft» CEB-Guide to Durable Concrete Structures. Bulletin d'Information No. 166, 1985

[2] *Wittmann, F.H.:* Zur Ursache der sogenannten Schrumpfrisse. Zement und Beton 85,86 (1975) 10–16

[3] *Monfore, G.E.:* Properties of Expansive Cement Made with Portland Cement. Gypsum and Calcium Aluminate Cement. Journal PCA Res. Dev. Lab. 6/2, 1964, 2–9

[4] *Lossier, H.* (1936): Les ciments sans retrait et à expansion. Génie Civil 3.10.1936

[5] *Cohen, M.D.:* Theories of expansion in sulfoaluminate-type expansive cements: schools of thought. Cement and Concrete Research 13/6, 1983, 809–818

[6] *Wischers, G.:* Quellzement Vorteile und Grenzen seiner Anwendung. Vortrag Betontag 5./7. März 1969, Düsseldorf

[7] ASTM C 845 Standard Specification for Expansive Hydraulic Cement.

[8] STABILMAC. Produktdokumentation der Meynadier AG, Zürich

[9] ACI Committee 223: Standard Practice for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete. ACI Report 223-86, American Concrete Institute, Detroit 1986

[10] ASTM C 878: Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete

Adresse des Verfassers: Dr. *M. Brianza*, Meynadier AG, Bauchemische Produkte, Vulkanstrasse 110, 8048 Zürich.