Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 103 (1985)
Heft: 4

Artikel: Thixotroper Beton: mit Wasser-Zement-Wert 0,35
Autor: Fehlmann, Hans Beat
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75712

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Thixotroper Beton

mit Wasser-Zement-Wert 0,35

Von Hans Beat Fehlmann, Walchwil

Beton gilt heute mit einem Raumgewicht von etwa 2,4 t/m³ als schwer und massig. Er wird als einheitlicher Baustoff angesehen. Seine Kälte, seine geringe Rückstrahlung und seine schlechten Isoliereigenschaften werden im Wohnungsbau oft als Fremdkörper empfunden. Isolationsverbessernde Stoffe bzw. Lufteinschlüsse senken die hohen Festigkeitswerte und erschweren die Verarbeitung. Gelingt es jedoch, durch Absenken des Wasser-Zement-Wertes die Festigkeitswerte auf ein Optimum zu steigern, so lassen sich die bisherigen Beton-Qualitätswerte halten oder verbessern.

Beton-Applikationsentwicklung

Das Studium der Beton-Applikation der letzten 10 bis 15 Jahre zeigt eindeutig eine Tendenz zu leichtem Beton; zudem sollte auch Beton mit feinerer Körnung verwendet und im weiteren sein Fliessverhalten und seine Frostsalz-Beständigkeit verbessert werden können.

Zusatzmittel

Die neuesten Richtlinien für die Zuteilung von Prüfzeichen für Beton-Zusatzmittel (Prüfrichtlinien Fassung 1984 nach DIN 1045, Stand Februar 1984) unterscheiden acht Wirkungsgruppen, nämlich

- Betonverflüssiger
- Fliessmittel
- Luftporenbildner
- Dichtungsmittel
- Verzögerer
- Beschleuniger
- Einpresshilfen
- Stabilisierer.

Diese Vielfalt von Zusatzmitteln deutet auf wesentliche Bedürfnisse der Anwender hin, dem Beton noch bessere Eigenschaften in seiner Endqualität sowie auch in seinen Einbring- und Verarbeitungsqualitäten zu verleihen.

Wasser-Zement-Wert

Schon 1918 erkannte *Abrams* klar, dass eine Reduktion des Wasser-Zement-Wertes eine wesentliche Qualitätsverbesserung des Betons mit sich bringt. Die Grenzen des Wasser-Zement-Wertes waren jedoch durch die Verarbeitbarkeit gegeben, wobei unter Beigabe der richtigen Zusatzmittel bereits nachgewiesen werden konnte, dass ein Wasser-Zement-Wert von weniger als 0,5 verarbeitbaren Beton ergibt.

Theoretische Überlegungen führten mich dazu, dass ein Wasser-Zement-Wert von 0,30 bis 0,35 die Betonqualität wesentlich verbessern muss. Höhere Druck- und Biegezugfestigkeiten sowie kleineres Schwinden und Kriechen sind nur über den Zement-Wasser-Wert zu erreichen. Voraussetzung ist natürlich, dass nicht so wenig Wasser zugegeben wird, dass die Hydratation des Zementes nicht mehr voll erfolgen kann.

Die folgenden Abschnitte zeigen, wie ein solcher Zement unter Zugabe eines Luftporenbildners hergestellt werden kann, wobei der grösste Teil des Überschusswassers durch Luft ersetzt wird.

Thixotropie

Bei genauem Durchdenken der Eigenschaften eines guten Betons erkennt man, dass er zu echt thixotropem Verhalten geführt werden muss. Beton muss flüssig und steif sein, leicht verarbeitbar und soll trotzdem nicht aus der Schalung austreten.

Gelingt es, feinste Luftporen einzubringen und damit das Zementvolumen zu vergrössern, so muss der durch die Luftporenbeigabe verursachte Druckfestigkeitsabfall überkompensiert werden, indem dank niedrigstem Wasser-Zement-Verhältnis die Festigkeitswerte des Betons entsprechend gesteigert werden. Beim Erhöhen des Zementvolumens durch Beigeben von 12 bis 15 Prozent Luft in den Zement wird nicht nur vermieden, dass sich die Zuschlagkörner direkt berühren, sondern es wird möglich, mit weniger Zuschlagstoffen das gleiche Betonvolumen zu erreichen. Die Zugabe eines Luftporenbildners, der volle Thixotropie gewährleistet, erlaubt Einsparungen an Kies und Sand, d.h. an immer wertvoller werdenden Naturstoffen.

Kann die Luft in kugeliger Form eingebracht werden, so wird der Beton äusserst leichtflüssig. Er wird leicht verarbeitbar und bleibt – solange mechanische Energie eingebracht wird – bis zum Beginn des Abbindeprozesses flüssig. Anderseits ist er bei Stillstand, d.h. ohne Energiezufuhr, genügend steif, dass Fugenaustritte des Zementes vermieden werden und keine Entmischung eintritt. Zudem lässt sich eine Verminderung der Wasserabscheidung (Bluten) während der Abbindephase feststellen, da fast kein überschüssiges Wasser mehr vorhanden ist. Die Vibrationsarbeit lässt sich wesentlich reduzieren. Allerdings ist dafür zu sorgen, dass beim Betonieren keine grösseren Luftblasen eingeschlossen bleiben.

Festigkeitszunahme

Die in Funktion des Wasser-Zement-Wertes erreichte Festigkeitszunahme ist bei einem Wert von etwa 0,35 optimal. Obwohl die Zugabe von Luft die Festigkeit reduziert, wirkt die exponentielle Zunahme der Biegezug- und Druckfestigkeit sowie die Verbesserung des Schwind- und Kriechverhaltens stärker, so dass sich die Verschlechterung der Festigkeitseigenschaften durch Luftporen leicht kompensieren lässt. Die Resultate ausgedehnter Untersuchungen zeigen, dass – richtige Dosierung vorausgesetzt – die nach den Normen verlangten Festigkeiten erreicht oder sogar überschritten worden sind.

Frostsalzbeständigkeit

Die Frostsalzbeständigkeit verbessert sich dadurch, dass ein Minimum an freien Kanälen oder Kapillaren im Beton entsteht, da kein Überschuss an Wasser vorhanden ist. Generell lässt sich feststellen, dass beim optimalen Wasser-Zement-Wert von etwa 0,35 der ganze Bindevorgang im Zement nicht gegen offene Kanäle stattfindet, sondern gegen geschlossene Poren, die für Wasser praktisch undurchdringlich sind; die Dampfdurchlässigkeit ist jedoch nach wie vor gegeben. Die Frostsalzbeständigkeit beruht weitgehend auf einem Verhindern des Eindringens von Fremdstoffen in den Betonkörper auch bei häufigen Frostsalzwechseln.

Bild 1. Übersichtsaufnahme. Vergrösserung 1:40

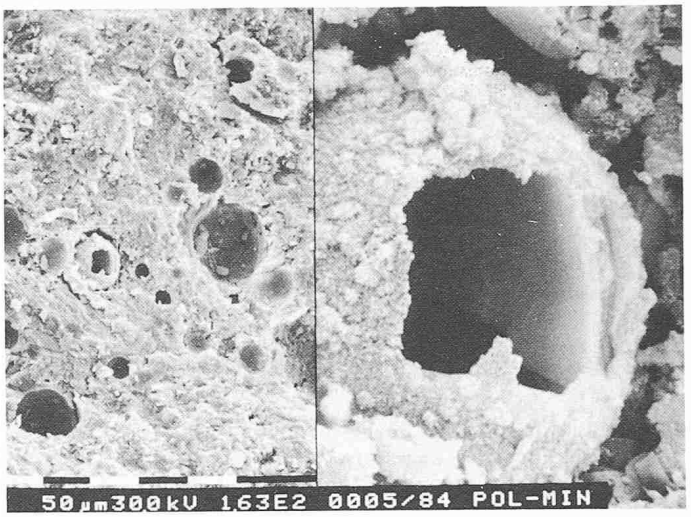


Bild 2. Detailaufnahme einer Pore (Split-Screen-Verfahren). Vergrösserung 1:163

Gewichtsreduktion

Dank einer Gewichtsreduktion durch Einsparen von Kies und Sand verringert sich auch das Betongewicht, das Konstruktionsgewicht wird leichter, und die gleiche Zementmenge nimmt ein grösseres Zementvolumen ein. Besonders wertvoll ist die eingesparte Kiesmenge.

Korn-zu-Korn-Druck

Der Druck von Einzelkorn zu Einzelkorn im Beton muss nach theoretischen Überlegungen und aufgrund durchgeführter Versuche negativ sein (was auch aus der Bohrtechnik bekannt ist), da die Scherkraft im Innern des Gesteins niedriger ist als die eigentliche Druckkraft. Bei jedem Beton ist daher darauf zu achten, dass keine direkte Berührung von Korn zu Korn auftritt, sondern dass ein Zementleim hoher Festigkeit zwischen den einzelnen Steinchen liegt. Dies ist nachweisbar, sind doch die Festigkeiten von Mörteln gegenüber konventionellem Beton höher, was in der Praxis berücksichtigt werden sollte. Dabei ist auch Beton mit feinerem Kies-Sand eher leichter einzubringen als solcher mit groben Zuschlagstoffen.

Superleichte Zuschlagstoffe

Volle Thixotropie im Beton erlaubt, leichteste wie auch schwerste Zuschlagstoffe in konventionellem Beton zu verarbeiten, ohne Rücksicht auf die Einbringhöhe (Schichten). Die durchgeführten Applikationen zeigen, dass selbst bei Verwendung leichtester Zuschlagstoffe mit geringer Festigkeit (Styropor) keine Entmischung stattfindet. Mehrere 10 000 m² Beton sind verarbeitet worden, wobei nicht nur jede Anhäufung der Styroporkügelchen vermieden wurde, sondern sich jedes einzelne Korn mit einem Zementschleim umgab. Es wurde auch festgestellt, dass bei diesem Beton das Schwinden stark reduziert ist. Auch andere Leichtzuschlagstoffe wie z.B. Lecca, Leichtsande usw. sind gut verarbeitbar.

Die Eigenschaften des Zuschlagstoffes sind von eminenter Bedeutung, hauptsächlich für die Wasseraufnahme und selbstverständlich für die Festigkeitseigenschaften des Betons.

Ausblicke

Entsprechende Zusatzmittel wie das neuentwickelte TI-XO-Cellulare bringen dem Beton hochthixotrope Eigenschaften und erschliessen damit neue Möglichkeiten für die Anwendung von Leichtbeton:

- ☐ Zement und Kies entmischen sich praktisch nicht mehr.
- ☐ Die je nach verwendetem Zusatzmittel erreichbare Tragfähigkeit gestattet, superleichte Zuschlagstoffe einzubauen. Eine Isolationsverbesserung des Betons wird somit möglich.
- ☐ Das Einbringen eines hochfesten Zuschlagstoffes wird es theoretisch und praktisch von der Zementseite her erlauben, solche Zuschlagstoffe zu leichtesten Baukörpern zu führen. Dies gestattet wesentliche Kostenreduktionen und eine Anpassung der Betoneigenschaften an die verlangten Baukörpereigenschaften. Hochfeste, leichte Zuschlagstoffe stehen zurzeit in Entwicklung. Die Eigenschaften dieser Betone werden näher beschrieben werden können, sobald die industrielle Produk-

Bild 3. Porenwandung in starker Vergrösserung, 1:5200

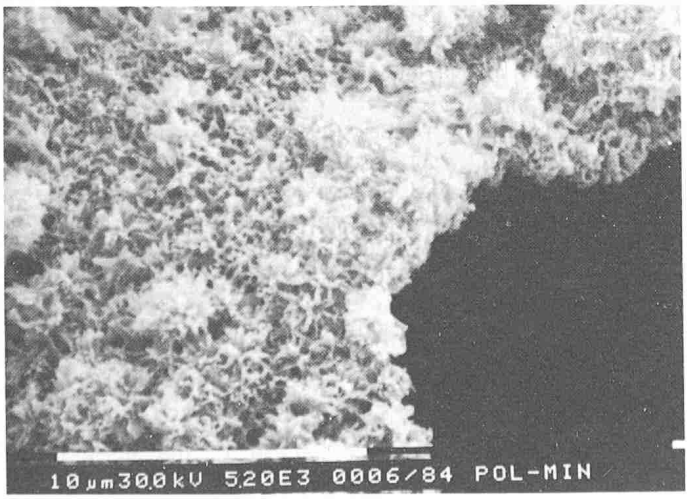
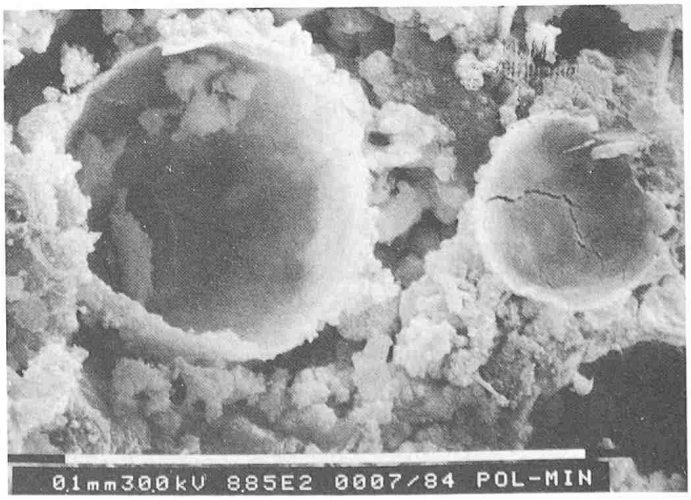


Bild 4. Poren-Nahaufnahme. Vergrösserung 1:885



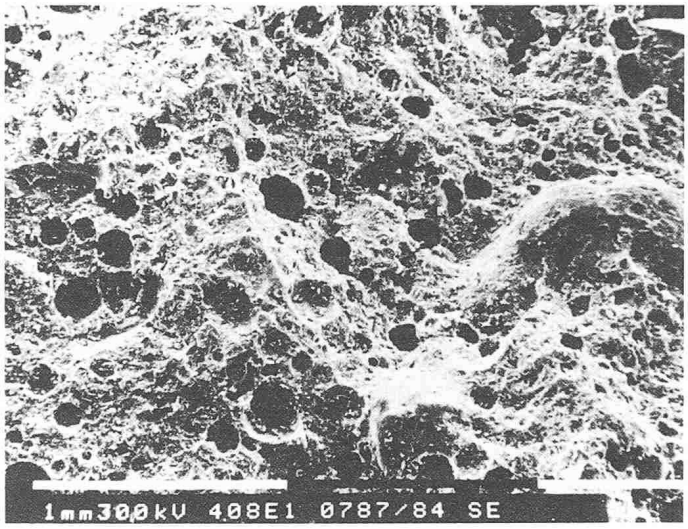


Bild 5. Übersichtsaufnahme (Beton). Vergrösserung 1:40

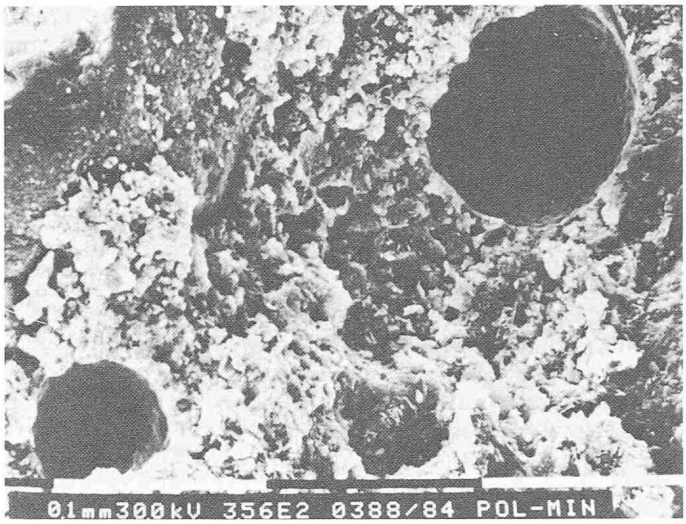


Bild 6. Poren-Kontaktfläche zu Matrix. Vergrösserung 1:356

tionsreife solcher Anlagen nachgewiesen ist.

□ Die Reduktion des Zement-Wasser-Wertes ermöglicht, einen Beton herzustellen, der keine offenen Poren mehr aufweist. Seine Frostsalzbeständigkeit ist daher wesentlich besser als jene konventionellen Betons, der zur Vermeidung von Verarbeitungsschwierigkeiten auf einen zu hohen Wasser-Zement-Wert eingestellt werden muss.

□ Die Reduktion der Gebäudelasten ist unter Einhaltung aller Vorschriften hinsichtlich der Zuschlagstoff-Qualität möglich, da ja normale Zuschlagstoffe verwendet werden.

□ Vereinfachungen der Baukörper werden möglich, denn der Einsatz von TI-XO-Cellularen Zusatzmitteln wird in absehbarer Zeit gestatten, auch leichteste, hochfeste Zuschlagstoffe zu verwenden, die zu hochisolierendem, tragfähigem Beton führen.

Gewährleistung der vollen Thixotropie im Beton kann seine Anwendbarkeit wesentlich erweitern und könnte vom Image des schweren, kalten Baukörpers wegführen zu einem den Bedürfnissen des Menschen angepassten Baustoff.

Nachweis der theoretischen Erkenntnisse

Grössere Untersuchungsreihen sind an der Fachhochschule Dortmund seit August 1983 unter Leitung von Prof. Dr. *P. Szabo* durchgeführt worden.

Aus Pilotprojekten waren die Wirkungsweisen des Zusatzmittels als thixotroper Langzeitverflüssiger und Porenbildner ungefähr bekannt. Das Prüfprogramm hatte einerseits die weitere Optimierung und anderseits das Erbringen der Qualitätsnachweise zum Ziel. Die chemische Zusammensetzung und die technologischen Stoffdaten des Zusatzmittels waren nicht Gegenstand der Untersuchung.

Die Untersuchungen richteten sich einerseits auf die Wirkung des Zusatzmittels auf die *Feinstruktur* des abgebundenen Bindemittels, anderseits auf die mechanischen Eigenschaften von Prüfkörpern (Zementprismen- und Betonwürfel-Prüfungen).

Alle Prüfungen zielten darauf ab, die optimalen Anwendungsbereiche zu ermitteln bzw. genauer abzugrenzen. Besonders wurde die Frage untersucht, welche Regeln bei der Erstellung bzw. Anwendung der Frischbetonmasse eingehalten werden müssen, um die beste Wirkung des Additives in der Baupraxis zu gewährleisten. Auch unkonventionelle Anwendungen des TI-XO-Cellulare-Betons lagen im Zielbereich der Untersuchungen.

Im folgenden sind die Resultate summarisch dargestellt. Im Rahmen des breit gefächerten Untersuchungsprogrammes wurden auch weitere, in diesem Bericht nicht behandelte Aspekte untersucht und damit die Resultate auf breiter Basis abgesichert.

Untersuchungsergebnisse

Feinstrukturanalyse

Diese Untersuchungen dienten der Abklärung, wie das Zusatzmittel die Feinstruktur in der abgebundenen Bindemittelmasse beeinflusst; die Erklärung der mechanischen Eigenschaften basiert auf der Feinstrukturanalyse.

Bild 7. Poren mit Drusenbildung. Sekundäre Hydratkristalle. Vergrösserung 1:312

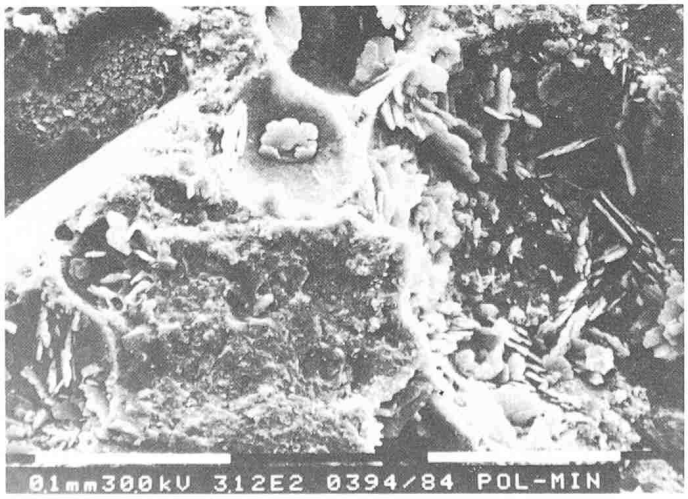
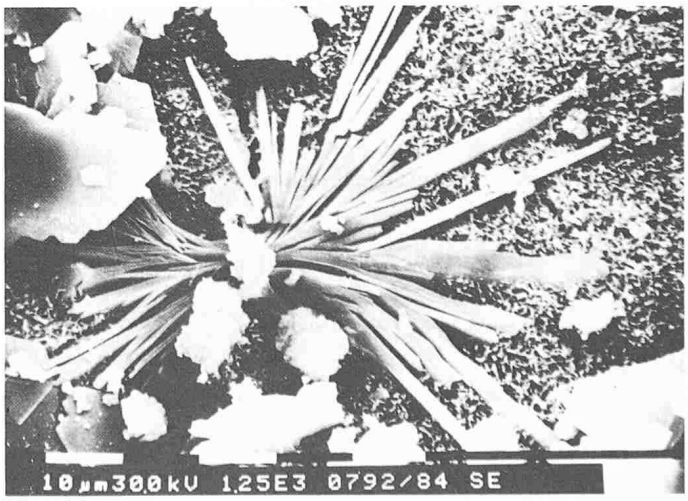


Bild 8. Kristallbildung in einer Pore. Vergrösserung 1:1250



Zuerst wurde Zement ohne Zuschlagstoff (Zementleim) geprüft. Damit sollte die Additivwirkung auf das Bindemittel ohne den Einfluss der Zuschlagstoffe untersucht werden. In einer zweiten Stufe wurde dann die abgebundene Bindemittelmasse in die Betonproben aufgenommen.

Alle Präparate für die Untersuchung mit dem Raster-Elektronenmikroskop wurden nach der Gold-Bedampfungstechnik erstellt. Die Vergrösserungen liegen entsprechend der zu untersuchenden Körnungsstruktur im Bereich bis maximal 5200fach. Für Detail-Analysen kam das Split-Screen-Verfahren zur Anwendung.

Zement ohne Zuschlagstoffe

Kenndaten der untersuchten Proben der Zementleim-Masse:
Material: abgebundener Zementleim
W/Z-Wert: 0,35
TI-XO-Cellulare-Anteil: 0,18 Massen-%, auf Zement bezogen
Lagerung: mehr als 28 Tage

Das Bild 1 zeigt die wichtigsten Strukturmerkmale. Die kugeligen Poren weisen einen Durchmesser von 20 bis 200 µ auf. Die Porenverteilung in der Masse ist gleichmässig; jegliche Texturierung fehlt. Solche Texturen, Porentrauben oder grössere Blasen wurden offensichtlich durch die erhöhte Thixotropie der mit TI-XO-Cellulare versetzten Zementpaste verhindert. Die Bilder 2 und 3 zeigen den Aufbau der Porenwandung näher. In der Porenstruktur sind die regelmässige Kugelform und die dichte Porenwand aus gleichmässig gewachsenen Kalkhydratkristallen charakteristisch. Die Innenfläche der Porenwandung ist vollkommen glatt.

Der dichte Porenwandaufbau lässt darauf schliessen, dass er für Flüssigkeiten praktisch undurchlässig ist. Die sekundären Risse (Bild 4) entstanden bei der Absplitterung des Präparates.

Besonders interessiert der Aufbau der Porenwandung, deren Spektralanalyse dem Gesamtspektrum der Bindemittelmasse in Tabelle 1 gegenübergestellt ist. Die RFA-Spektralanalyse wurde an Proben mit Kohlenstoff-Bedampfung durchgeführt.

Die Porenwandung zeigt vor allem eine Anreicherung von Kalkhydraten und Verbindungen, die durch Hydratisierung von Tricalciumsilikaten entstehen. Diese kennzeichnende Anreicherung bedeutet, dass die Porenbildung in der Anfangsphase der Hydratation erfolgt und sehr früh zum Abschluss kommt. Das Fehlen einer Schichtstruktur oder anderer Wachstumszeichen in der Kugelwandung deutet ebenfalls darauf hin, dass die Porenbildung ein kurzer und schnell abgeschlossener Prozess ist.

Tabelle 1. Elementeverteilung im Zementleim

	Porenwandung		Gesamtmasse
Ca	1	:	1
Si	0,5	:	1
Al	0,25	:	1
Mg	0,5	:	1
S	0,4	:	1
K	0,7	:	1

Bindemittelmasse im Beton

Bei den Strukturuntersuchungen wurde der Einfluss des Zuschlagstoffes miteinbezogen. Es wurden aus einer Betonprobe mit einem Zement aus dem westdeutschen Raum (Wülfrat) und einer aus Luxemburg Präparate erstellt und auch im Vergleich mit einem Normalbeton untersucht. Zwischen den beiden mit TI-XO-Cellulare vergüteten Proben konnten keine Unterschiede festgestellt werden. Offensichtlich wurde die Wirkungsweise des Zusatzmittels durch die unterschiedlichen Zementsorten nicht beeinflusst.

Die Beton-Feinstruktur (Bilder 5 und 6) gleicht jener der reinen Zementmasse. Die kugeligen Poren sind ebenfalls gleichmässig verteilt, die Porengrössen sind ähnlich.

Im Innern der Poren kann hier im Gegensatz zu den Zementleimproben oft eine Drusenbildung beobachtet werden (Bilder 7 und 8). Diese unterschiedlich starke Erscheinung tritt nicht an allen Poren auf. Offensichtlich handelt es sich hier um sekundäre Mineralbildungen in der späteren Hydratationsphase vor allem in Form von Ettringit (CSH).

Die Porenbildung im Beton erfolgt analog zu jener in den Zementleimproben. Grösse und Gestalt der Poren wird durch die Wechselwirkung mit dem Zuschlagstoff nicht beeinflusst. Auch bleibt die Verteilung der Poren vom Zuschlagstoff unbeeinflusst sehr gleichmässig. Texturen und Schlierenbildungen um die Zuschlagsteine sind keine zu beobachten.

Wirkung des Zusatzmittels auf die Feinstruktur

Die Aufnahmen zeigen eine zweifache Wirkung des TI-XO-Cellulare-Zusatzmittels. Es bewirkt

- intensive Porenbildung und
- Ausbildung einer gleichmässig porösen Struktur durch die erhöhte Thixotropie des Frischmörtels bzw. des Frischbetons.

Die Poren sind charakterisiert durch

- regelmässige Kugelform,
- schalenartige, robuste Porenwand,
- sehr dichte, feinkristalline Porenwandung (Verfilzung der Kristalle),
- Anreicherung des Ca in der Porenwand und
- relativ eng begrenzte Porengrösse (20 bis 200 µ).

Es fällt auf, dass sowohl kleinere Mikroporen (<20 µ) als auch grössere (>200 µ) vollständig fehlen.

Die erhöhte Thixotropie bewirkt die gleichmässige Verteilung der Porosität und das Fehlen von Texturen in der Bindemittelmasse. Zum Vergleich zeigt das Bild 9 eine Aufnahme einer Normbetonprobe (PC 400 Schweizer Rezeptur). Der Zementstein ist dicht, und in der Bruchfläche sind klare Blätterungen texturiert durch die Zuschlagkornformen erkennbar.

Mechanische Eigenschaften

Die Raster-Elektronenmikroskop-Aufnahmen zeigen, dass TI-XO-Cellulare als Luftporenbildner wirkt, d.h. die Rohdichte verringert und die Struktur der Grundmasse im Beton reguliert. Somit ist zu erwarten, dass sich die Porosierung in den mechanischen Qualitäten bemerkbar macht.

Mit Serienuntersuchungen an *Zementprismen* wurden die Einflüsse des Additivs auf die Qualität des Betons auf breiter Basis vor allem im Zusammenhang mit der Zusatzmittel-Dosierung, der Mischung und dem Wasser-Zement-Wert geprüft. Auf diese Weise wurden die optimalen Anwendungsbereiche abgetastet und bestimmt. Innerhalb der so ermittelten Bereiche wurden die Prüfungen an *Betonwürfeln* durchgeführt, wobei die in der Praxis gewonnenen Erfahrungen mitberücksichtigt wurden.

Untersuchung mit Zementprismen

Diese Untersuchungen wurden mit den üblichen Zement-Prismenformen gemäss SIA und DIN (160×40×40 mm) durchgeführt. Jede Prüfung erfolgte an 9 (3 pro geprüfte Haltezeit) gleichzeitig aus der gleichen Mörtelmasse hergestellten Prismen, die nach 3, 7 und 28 Tagen Lagerung in der Klimakammer zuerst auf Biegezugfestigkeit und anschliessend auf Druckfestigkeit geprüft wurden (entsprechende Prüfvorschriften der DIN, SIA und EMPA).

Auch bei grösseren Prüfserien wurden identische Herstellungsbedingungen innerhalb der Serie sichergestellt. Die Versuche mit den Zementprismen erfolgten in drei Etappen:

- Zuerst wurden reine Zementprismen ohne Zuschlag geprüft, um die Wirkung des Zusatzmittels auf den Zement bzw. das Abbinden ohne zusätzliche Wechselwirkungen mit dem Zuschlagstoff zu erfassen. Dabei wurden die Zusatzmittel-Dosierung,

der Wasser-Zement-Wert und die Mischdauer variiert.
- In der zweiten Phase wurden die Prüfungen mit Normsand weitergeführt. Die Versuchsdurchführung entsprach DIN 1164 mit gleichbleibender Zement- und Sand-Dosierung.
- Schliesslich wurden in der dritten Phase der Untersuchungen ausser den Mischzeiten die Zementdosierungen bei konstantem Wasser-Zement-Wert und bei einem ebenfalls konstanten optimalen TI-XO-Cellulare-Gehalt variiert.

Die Resultate aus den wichtigsten Randbedingungsbereichen sind in den folgenden Tabellen und Diagrammen zusammengefasst. Aus der Tabelle 2 zeichnen sich die optimalen Wirkungsbereiche klar ab. Dabei ist hier nur der Einfluss auf die reine Zementerhärtung erfasst; der Zuschlagstoff kann, je nach Qualität, diese Bereiche noch modifizieren. Die optimalen Anwendungsbedingungen liegen für alle drei Variablen in relativ engen, jedoch gut definierbaren Grenzen:

- die Mischzeit soll unter 120 s bleiben,
- der Wasser-Zement-Wert ist bei 0,35 optimal, und
- die TI-XO-Cellulare-Dosierung sollte eher unter 0,2 Massen-%, auf Zement bezogen, bleiben.

Zur Dosierung des Additivs ist darauf hinzuweisen, dass hier das Zusatzmittel aus labortechnischen Gründen in der drei- bis vierfachen Konzentration der handelsüblichen Form verwendet wurde. Die Diagramme im Bild 10 machen die Verschiebung der Qualitätswertfelder mit der Veränderung des Wasser-Zement-Wertes deutlich. Bei der Prüfkörperherstellung wurde auch die Verarbeitbarkeit getestet. Es zeigt sich, dass ohne TI-XO-Cellulare-Zusatz die Verarbeitung des Mörtels bei kleinen Wasser-Zement-Werten von W/Z ≦0,4 und darunter schwierig bzw. unmöglich wird, da die Masse ihre Plastizität und Sämigkeit verliert. Mit dem Zusatzmittel war die Aufbereitung bis zum Wert W/Z = 0,3 hinunter gut durchführbar.

Die ermittelten Prüfwerte gleichen jenen für die Zementleimprismen. Dabei wurde die Dosierung des Additivs auf einem optimalen Wert (0,15 Massen-% auf Zement bezogen) konstant gehalten.

Bei der Nullprobe wurden auch Prismen mit W/Z = 0,35 und darunter erstellt. Sie lieferten jedoch keine brauchbaren und vergleichbaren Resultate. Längere Mischzeiten als 60 s ergaben schlechtere Resultate, die hier nicht zum Vergleich herangezogen werden.

Die Tabellen 3 und 4 zeigen die Untersuchungsresultate mit Zementprismen,

Mischdauer [s]	*W/Z*	*Rohdichte* [kg/m³] Zusatz % * 0,25	0,18	0,10	*Biegezugfestigkeit* (28 Tage) [N/mm²] Zusatz % * 0,25	0,18	0,10	*Druckfestigkeit* (28 Tage) [N/mm²] Zusatz % * 0,25	0,18	0,10
60	0,30	1819	1838	1869	7,13	8,31	8,04	40,00	42,28	47,00
	0,35	1861	1817	1945	9,50	9,49	8,77	47,37	50,42	50,87
120	0,30	1785	1736	1725	6,94	6,58	7,31	35,65	35,53	35,34
	0,35	1904	1742	1912	10,14	7,76	8,59	48,41	44,75	49,36
300	0,30	1578	1606	1632	5,11	5,11	6,40	18,10	19,39	26,14
	0,35	1851	1723	1851	8,32	8,86	9,68	46,45	43,14	47,80
Nullprobe 60	0,35**	1895***			9,03***			49,66***		

* TI-XO-Cellulare-Zusatz in Massen-% auf Zement bezogen
** nur sehr schwer zu verarbeiten
*** ohne TI-XO-Cellulare-Zusatz

Tabelle 2. Ergebnisse der Prüfungen an Zementleimprismen mit TI-XO-Cellulare-Zusatzmittel, ohne Zuschlagstoffe (Zementleim)

Tabelle 3. Ergebnisse der Zementprismenprüfungen mit Normsand (nach DIN 1164). Zusatzmittel 0,15 Massen-% auf Zement bezogen

Mischdauer [s]	*W/Z*	*Rohdichte* [kg/m³] Lagerdauer Tage 3	7	28	*Biegezugfestigkeit* [N/mm²] Lagerdauer Tage 3	7	28	*Druckfestigkeit* [N/mm²] Lagerdauer Tage 3	7	28
60	0,35	2275	2183	2300	8,90	9,15	10,96	48,32	57,44	60,38
	0,40	2320	2302	2273	6,19	8,16	8,45	39,24	48,90	49,47
	0,50	2281	2242	2258	4,30	5,25	6,01	19,60	27,50	28,93
300	0,30	2155	2198	2155	7,52	8,86	10,91	41,00	42,75	53,90
	0,35	2198	2107	2139	8,06	9,14	10,44	40,53	43,04	54,00
	0,40	2073	2059	2088	5,11	5,41	6,60	22,81	28,01	30,43
Nullprobe 60	0,40	2322	2392	2367	8,25	9,06	10,44	46,00	52,39	66,09
	0,50	2305	2264	2265	7,12	7,81	8,53	36,97	42,12	51,20

Tabelle 4. Ergebnisse der Zementprismenprüfungen. Ausgelegt mit Normsand (nach DIN 1164) auf PC 300 und PC 400 (Schweizer Rezeptur). W/Z = 0,33. TI-XO-Cellulare 0,15 Massen-%

Mischdauer [s]	*Rohdichte* [kg/m³] Lagerdauer Tage 3	7	28	*Biegezugfestigkeit* [N/mm²] Lagerdauer Tage 3	7	28	*Druckfestigkeit* [N/mm²] Lagerdauer Tage 3	7	28
PC 300									
45	2112	2195	2173	8,46	10,65	15,10	44,56	52,37	57,85
60	2095	2133	2125	8,00	9,14	11,49	38,67	49,70	55,19
90	2040	2195	2136	7,64	8,85	12,02	37,03	44,16	58,10
PC 400									
45	2158	2190	2182	9,44	11,00	17,89	44,90	56,75	69,52
60	2183	2155	2210	8,50	9,96	12,41	41,67	50,16	63,66
90	2122	2194	2135	9,00	8,42	14,98	33,16	49,02	66,58
Nullprobe *PC 400* W/Z = 0,5 60	-	2415	2388	-	10,15	11,99	-	56,04	63,12

Tabelle 5. Betonwürfel-Druckfestigkeiten. W/Z = 0,33. TI-XO-Cellulare-Dosierung 0,16 Massen-% auf Zement bezogen

Betonsorte	*Mischdauer* [s]	*Rohdichte* [kg/m³] Lagerdauer Tage 3	7	28	*Druckfestigkeit* [N/mm²] Lagerdauer Tage 3	7	28
PC 300	60	2177	2127	2176	28,53	37,19	41,19
	90	2138	2159	2197	27,62	37,56	40,89
PC 400	60	2170	2172	2222	22,45	32,89	57,47
	90	2168	2185	2176	29,10	38,22	55,33
Nullproben PC 300	60	-	2420	2433	-	33,41	40,65
PC 400	60	-	2450	2435	-	36,57	46,10

Proben W/Z	Mischzeit [s]	Materialablösung [g] Anzahl Pendelungen 30	150	Druckfestigkeit [N/mm²] Anzahl Pendelungen 0	30	150
0,3	60	0	4	44,60	43,16	40,77
0,35	60	0	11	48,05	48,91	42,14
0,35	300	0	8	46,50	44,39	39,08

Tabelle 6. Frosttausalzprüfungen. TI-XO-Cellulare-Gehalt 0,15 Massen-% auf Zement bezogen

die auf PC 300 und PC 400 (Schweizer Rezepturen) ausgelegt wurden. Der Wasser-Zement-Wert (0,33) und die Dosierung des Zusatzmittels (0,15 Massen-% auf Zement bezogen) wurden auf optimalen Werten konstant gehalten; variiert wurde nur die Mischzeit.

Die Resultate der PC 400-Zementprismen sind im Bild 11 graphisch dargestellt.

Zur Nullprobe ist zu bemerken, dass sie praktisch nur mit einem Wasser-Zement-Wert von mindestens 0,5 erstellt werden konnte.

Betonwürfel-Prüfungen

Alle Betonwürfel wurden mit einem Zuschlagstoff ∅ <16 mm erstellt. Die Prüfungen erfolgten nach DIN 1045 mit Würfeln von 150 mm Kantenlänge. Bei einem optimalen TI-XO-Cellulare-Zusatzmittelgehalt von 0,16 Massen-%, auf Zement bezogen, wurde der Wasser-Zement-Wert bei 0,33 in allen Proben konstant gehalten.

Zwei Betonsorten, PC 300 und PC 400, wurden nach Schweizer Rezeptur erstellt und geprüft. Die Mischzeiten wurden zur Ermittlung der besten praktischen Durchführbarkeit nochmals leicht variiert. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5 zusammengefasst.

Die Festigkeitszunahme in Funktion der Lagerungszeit ist im Bild 12 dargestellt.

Ergebnis der mechanischen Prüfungen

Die Resultate der Zementprismen-Prüfungen und der Beton-Untersuchungen greifen ineinander und ergeben ein einheitliches Qualitätsbild, was eine summarische Bewertung dieser Prüfserien ermöglicht. Die Ergebnisse führen auch zu den gesuchten optimalen Anwendungsbedingungen.

Wasser-Zement-Wert

Das Zusatzmittel erlaubt eine Verminderung des Wasser-Zement-Wertes vom üblicherweise vorgeschriebenen Wert 0,5 auf den Bereich von 0,33 bis 0,35. Auf die Bedeutung des Wasser-Zement-Wertes für die Festigkeit des Betons wird in der Literatur vielfach hingewiesen (Wasser-Zement-Wert-Gesetz). Die Verarbeitbarkeit bleibt durch das Zusatzmittel auch in diesem Bereich noch gut, da es als Verflüssiger wirkt. So kann die entsprechende Festigkeitssteigerung (gemäss Wasser-Zement-Wert-Gesetz) für den Zementstein (bestehend aus Zement und Wasser) ausgenützt werden.

Eine weitere Senkung des Wasser-Zement-Wertes führt jedoch offensichtlich zu grossen Misch-Schwierigkeiten und zu partiellem oder generellem Wassermangel, der eine volle Hydratation der Masse verhindert. Damit wird die Tendenz umgekehrt, und die Festigkeitswerte des Betons nehmen wieder ab (bei W/Z ≦0,3).

TI-XO-Cellulare-Dosierung

Die Ergebnisse zeigen, dass das Zusatzmittel trotz sehr kleiner Dosierung intensiv wirksam ist. In der bei den Versuchen aus labortechnischen Gründen verwendeten drei- bis vierfachen Konzentration ist der Dosierbereich sehr eng. Die optimale Wirksamkeit liegt bei 0,12 bis 0,16 Massen-%, auf die Zementmenge bezogen.

Mischdauer

Die Untersuchungen bestätigen, dass die Mischdauer möglichst nicht über 120 s hinaus verlängert werden soll. Die erhöhte Thixotropie des vergüteten Betons begünstigt kurze Mischzeiten, da eine gegenläufige Entmischung des Mörtels nicht stattfindet.

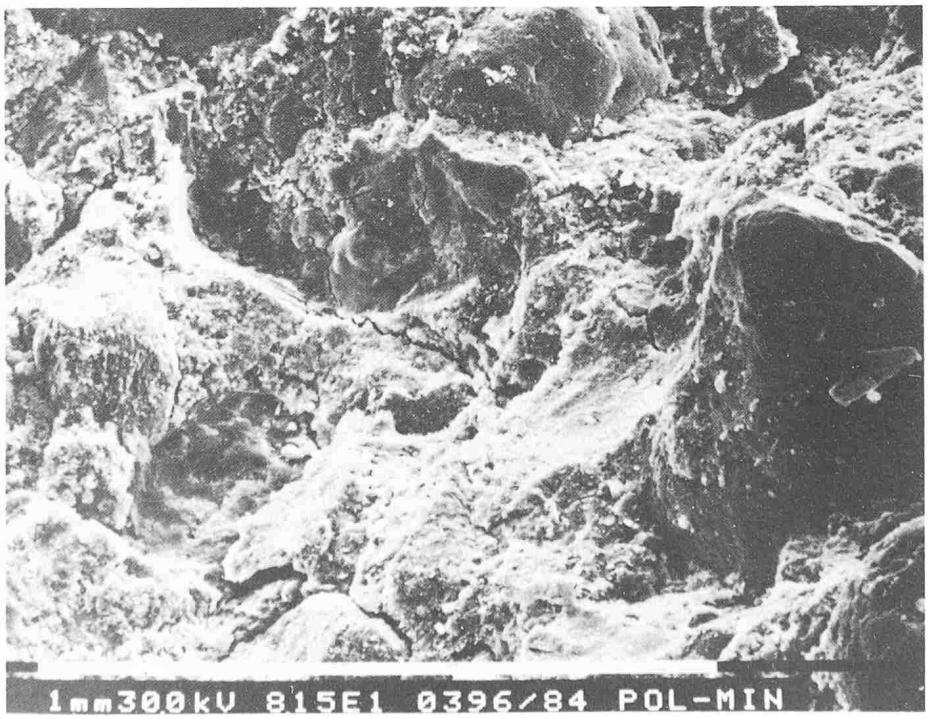
Rohdichte

Die Porenbildung vermindert die Rohdichte des Zementgels stark, was zu einer Verringerung der Beton-Rohdichte um 200 bis 300 kg/m³ führt. Entscheidend ist dabei, dass der für die Festigkeit nachteilige Kapillarporenanteil (vgl. Elektronenmikroskop-Untersuchungen) nicht erhöht wird.

Festigkeiten

Die Endfestigkeiten (nach 28 Tagen Lagerung) liegen trotz geringerer Rohdichte im gleichen bzw. tendenziell höheren Bereich als die gleichzeitig aus gleichem Zement erstellten Nullproben. Dies dürfte vor allem auf die Verringerung des Wasser-Zement-Wertes und die damit erreichte Festigkeitssteigerung des erhärteten Zementgels zurückzuführen sein. Die kugeligen, massivwandigen Poren schwächen die Bindemittelmatrix kaum. Deshalb kann die W/Z-abhängige Festigkeitserhöhung trotz Porenbildung wirksam werden. Die Biegezugfestigkeiten sind entsprechend den der Druckfestigkeiten, und auch im Verhältnis zu ihnen, als günstig zu bezeichnen.

Bild 9. Übersichtsaufnahme. Normbeton PC 400. Vergrösserung 1:81,5



Frosttausalz-Prüfungen

Die Frosttausalz-Prüfungen wurden nach der Methode der EMPA (Eidgenössische Materialprüfungsanstalt) durchgeführt. Lediglich die Grösse der Probekörper wurde den DIN-Würfelmassen angepasst (150×150×40 mm). Getestet wurden Zementleimplatten

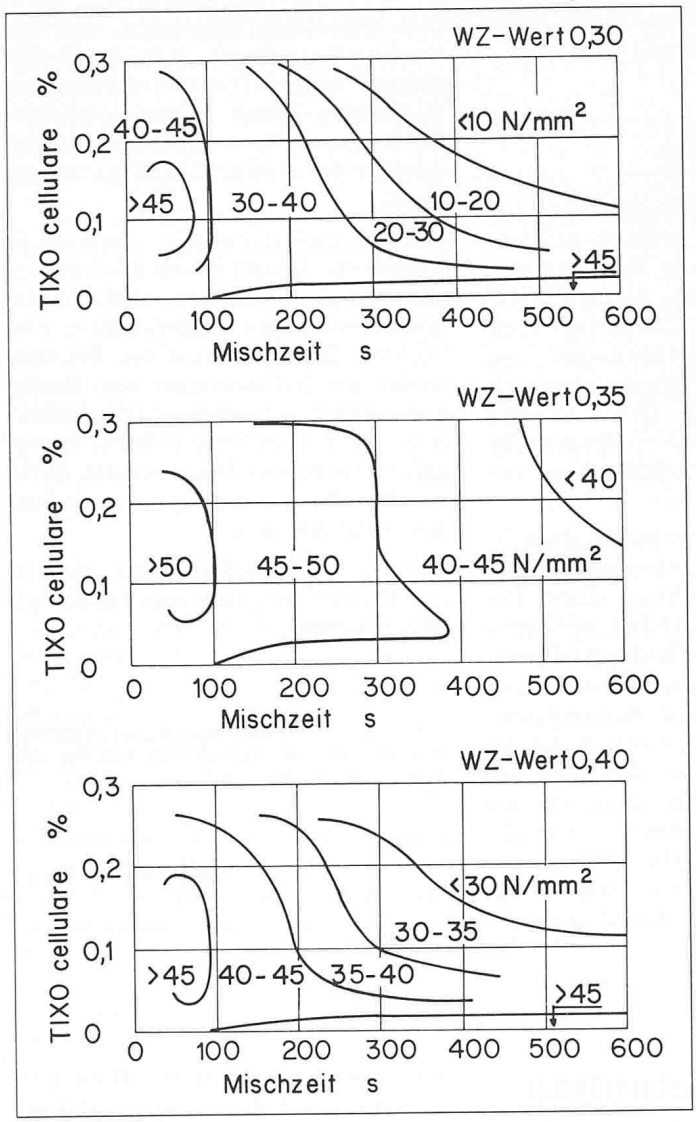


Bild 10. Verschiebung der Qualitätswertfelder mit der Veränderung des Wasser-Zement-Wertes

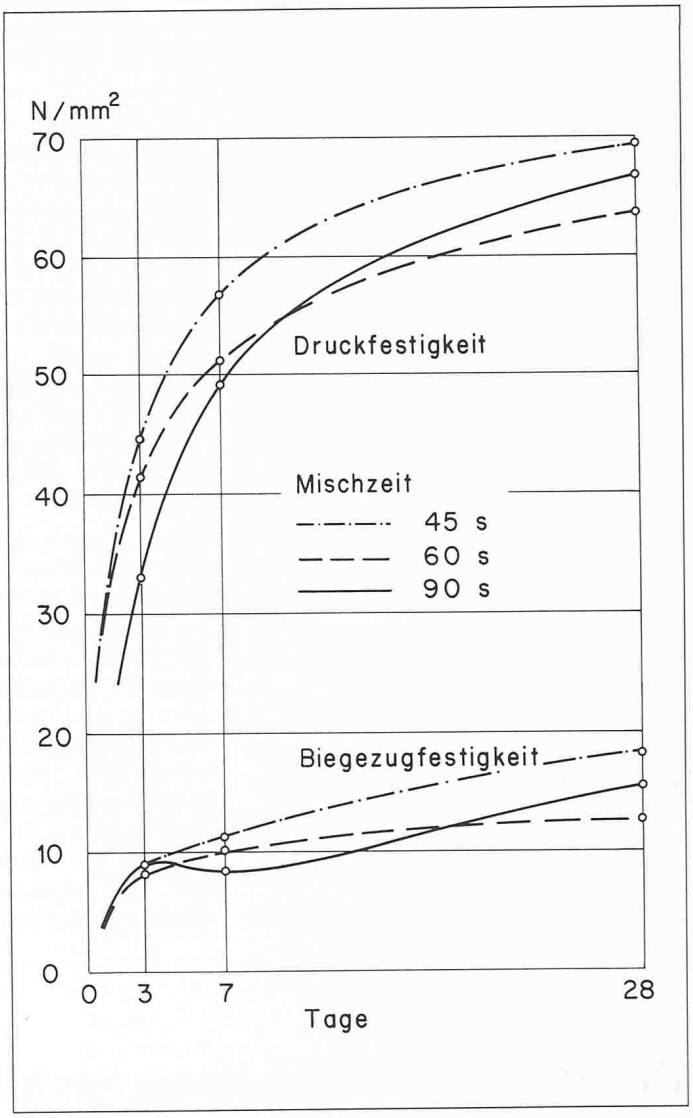


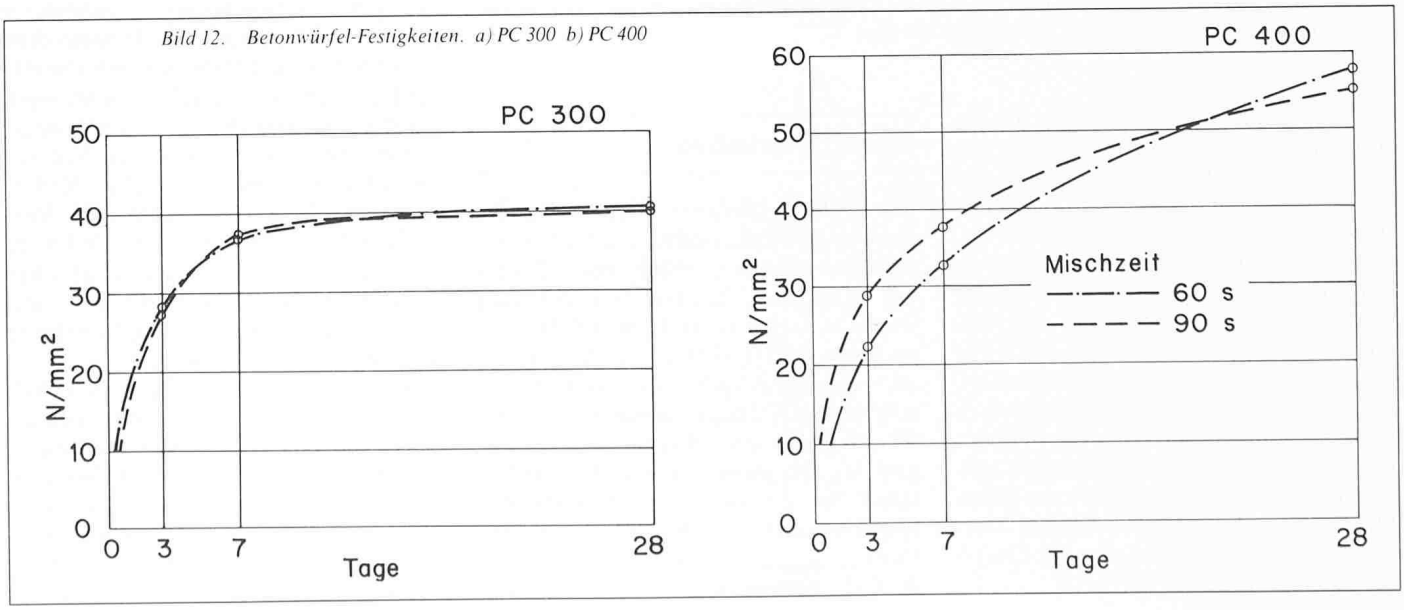
Bild 11. Zementprismenversuche, PC 400

mit Wasser-Zement-Werten von 0,3 und 0,35.

Da 30 Pendelungen keine Wirkung zeigten, wurden sie bis zu 150 Frosttausalz-Wechseln fortgesetzt. Der Temperaturverlauf des Prüfzyklus ist im Bild 11 dargestellt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6 zusammengefasst und zeigen, dass keine signifikante Abnahme der Druckfestigkeit nach den vorgeschriebenen 30 Pendelungen feststellbar ist. Auch nach 150 Pendelungen wurde lediglich eine maximale Einzelabschwächung um 16% ermittelt.

Grundsätzlich gilt als Massstab für die Materialablösungsmenge nach 30 Pendelungen:

Bild 12. Betonwürfel-Festigkeiten. a) PC 300 b) PC 400



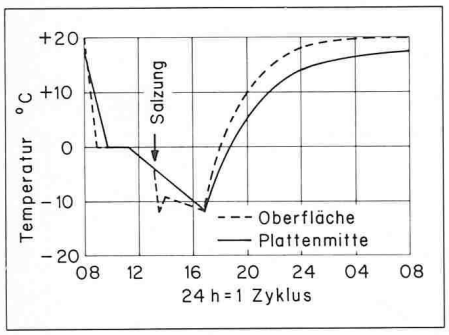


Bild 13. Temperaturverlauf der Pendelung bei Frosttausalz-Beständigkeitsprüfung für eine Platte von 75 mm Dicke

- Hohe Frosttausalz-Beständigkeit $\Delta m_{30} < 600\ g/m^2$,
- Schlechte Beständigkeit $\Delta m_{30} > 3800\ g/m^2$.

Bei den geprüften Proben wurden folgende Werte errechnet:

Probe W/Z = 0,30, 60 s $\Delta m_{30} = 0\ g/m^2$, $\Delta m_{150} = 177\ g/m^2$

Probe W/Z = 0,35, 60 s $\Delta m_{30} = 0\ g/m^2$, $\Delta m_{150} = 489\ g/m^2$

Probe W/Z = 0,35, 300 s $\Delta m_{30} = 0\ g/m^2$, $\Delta m_{150} = 355\ g/m^2$

Alle Proben erfüllen die Bedingungen für hohe Frosttausalz-Beständigkeit auch bei 150 Pendelungen bei weitem.

Schlussfolgerungen

Die theoretischen Überlegungen liessen sich durch Versuche an neutraler Stelle nachweisen; die Reduktion des Wasser-Zement-Wertes durch Einbringen feinstverteilter Luft bringt nicht nur verbesserte Verarbeitbarkeit, sondern auch leichtere Betonraumgewichte. Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit, Wasserdichtigkeit und Frosttausalz-Beständigkeit werden jedoch nicht verschlechtert.

Das Ausbauen der im Beton schon latent vorhandenen thixotropen Eigenschaften durch Einführung echter Thixotropie bringt bei Verwendung normaler, konventioneller Zuschlagstoffe wesentliche Gewichtsreduktionen und sehr gute Frosttausalz-Beständigkeit. Die hochgradige Thixotropie bringt die Möglichkeit, leichteste Zuschlagstoffe ohne Entmischungsgefahr bei der Betonherstellung zu verwenden. Die Reduktion der Vibrierarbeit bei normalem und superleichtem Beton kann empfohlen werden, da das Zementvolumen wesentlich vergrössert und der Korn-zu-Korn-Druck weitgehend eliminiert wurde. Die Herstellung von leichtestem Beton (Superleichtbeton) für tragende Konstruktionen scheint damit in den Bereich des Möglichen gerückt.

Die Gewichtsreduktion vereinfacht Transporte, Handling und das Einbringen; Tragkonstruktions- und Fundationsbemessungen werden kleiner und leichter. Die Reduktion des Betongewichts durch Einbringen von kugeligen, dichten Luftporen und die Reduktion des Wasser-Zement-Werts bringt gleiche bis bessere Betonqualität, leichtere Baukörper und entsprechende Baukostenreduktionen.

Der Kies-Sand-Bedarf wird kleiner, und Beton-Kiesvorkommen können geschont werden.

Adresse des Verfassers: dipl. Bauing. ETH/SIA *H. B. Fehlmann*, Postfach 43, 8700 Küsnacht und Zugerstr. 76, 6318 Walchwil.

Untersuchungen und Bilder: Fachhochschule Dortmund, Prof. Dr. *P. Szabo*.

Zur Plastizitätstheorie im Stahlbetonbau

Von Jürgen Kammenhuber, Zollikerberg und Aachen

Aus Anlass der Vorlage des Entwurfes zur Neufassung der *Norm SIA 162* erscheint es angebracht, sich einige Grundsätze der Plastizitätstheorie in Erinnerung zu rufen und diese auch im Rahmen allgemeinerer Verfahren zu sehen, die sich um eine rechnerische Erfassung des tatsächlichen Verhaltens eines Tragwerks bei angenommener Lasterhöhung bemühen. Auf dem Gebiet der Plattenberechnung wird zudem eine kurze Gegenüberstellung und Einordnung der Verfahren von *Marcus, Johansen, Hillerborg* und *Wolfensberger* vorgenommen. Ferner sollen einzelne Beziehungen zu den aus der CEB- und FIP-Arbeit hervorgegangenen zukünftigen Regeln des Eurocode 2 hergestellt werden.

Das Konzept neuerer Normen für Betonbauten (z.B. Eurocode 2 [1] und SIA 162 [2]) lässt auf der Grundlage mehrjähriger Forschungsarbeiten verschiedene vereinfachende Annahmen zu, die es ermöglichen, für den Nachweis der *Tragfähigkeit* weitgehend von der Plastizitätstheorie Gebrauch zu machen [3]. Nachstehend sollen für nicht vorgespannte Stahlbetontragwerke, ausgehend vom nichtlinearen Materialverhalten eines Stabelementes, in knapper Form diese Vereinfachungen entwickelt und deren Konsequenzen erläutert werden. Eine ausführlichere Darstellung und ein weitergehendes Literaturverzeichnis findet sich in [4].

Materialverhalten

Die in Bild 1 skizzierte idealisierte Momenten-Krümmungsbeziehung für ein Stahlbetonelement (Stab oder Platte) der Länge dx (Linienzug 0-1-2-3-4-5) werde zunächst vereinfacht auf diejenige nach Bild 2 (Linienzug 0-3-4-5′). M_y bezeichne dabei das vom Querschnitt aufnehmbare Biegemoment bei *Fliessbeginn* der Biegezugbewehrung und M_R den rechnerischen Biegewiderstand bei *Erschöpfung* (Querschnittstragfähigkeit). In Bild 2 wurde der Punkt 3 gegenüber Bild 1 auf die Gerade 0-2′ verlegt, die in ihrer Neigung dem sogenannten Zustand II entspreche (Beton auf Zug nicht mitwirkend gedacht). Die Berechnung eines statisch unbestimmten Tragwerkes auf der Grundlage eines solchen trilinearen Verhaltens kann als *vereinfachtes Fliesszonenverfahren* eingestuft werden. Sie gestaltet sich besonders übersichtlich, wenn alle plastischen Krümmungsanteile, d.h. alle Krümmungen rechts der Linie 0-2′ in Bild 2 je fliessendem Stabbereich (Fliesszone) zu einem plastischen Winkel ϑ zusammengefasst werden. Dessen Abhängigkeit vom Extremwert $\overline{M}$ des Biegemomentes der Fliesszone ist in Bild 3b als Momenten-Rotationsbeziehung dargestellt. Hierbei ergibt sich die Kurve 3-4 aus der Integration der plastischen Krümmungsanteile entsprechend dem Verlauf der Biegemomente über die Länge der Fliesszone. Als linear-elastischer Formänderungsanteil verbleibt dann die Momenten-Krümmungsbeziehung nach Bild 3a. Sie endet im Punkt 2′, ohne dass unter M_R ein spröder Bruch eintritt, denn im Verlauf der Laststeigerung wächst die plastische Rotation entsprechend Bild 3b über den Wert ϑ_f beim Erreichen von M_R hinaus bis zum Wert ϑ_R, bei dem die Rotationskapazität erschöpft ist und damit der Biegebruch eintritt.