



Abteilung Beton und Bauchemie

Unsere Kompetenzen für Kunden und Partner



Materials Science & Technology

Brückenfunktion – von der Forschung zur Wirtschaft – unsere Stärken

Als Brückenfunktion verstehen wir den Transfer von neu erarbeitetem Wissen in den Bauprozess. Dabei bauen wir auf die partnerschaftliche Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Forschungsinstitutionen, der Wirtschaft und den Behörden.

Die vorliegende Broschüre vermittelt Ihnen einen Einblick in ausgewählte Prüfverfahren und interessante Fallbeispiele. Das gesamte Spektrum unserer Dienstleistungen entnehmen Sie der Preisliste.

In unserem ausgezeichnet ausgestatteten Prüflabor führen wir mit modernsten physikalischen und chemischen Analysemethoden und leistungsfähiger Mikroskopie spezifische Verfahren und Normenprüfungen durch. Für unsere Kunden prüfen und analysieren wir auch vor Ort, erstellen Schadenanalysen und Expertisen.

Dank dem breiten Fachwissen unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit Stärken auf verschiedensten Gebieten und unserer hervorragenden Infrastruktur können wir auf individuelle Fragestellungen und spezielle Bedürfnisse eingehen und kundenspezifische Messungen für Dienstleistungen durchführen sowie anspruchsvolle Fragestellungen in Forschungs- und Entwicklungsprojekten beantworten.

Nutzen Sie unsere Kompetenzen und Angebote.



Seite 04 – 05	1. Festigkeit
	Biegezugfestigkeit
	Quadratplattenversuch
Seite 06 – 07	2. Verformungsverhalten
	Kriechmessung
	Behinderte Schwindspannung im Reissrahmen
	Autogenes Schwinden
	Frühschwinden (Plastisches Schwinden)
Seite 08 – 09	3. Porosität / Frost und Frost-Tausalz / Permeabilität
	Quecksilberdruckporosimetrie
	Sauerstoffdiffusion
	Sauerstoffpermeabilitätstest OPI
Seite 10 – 11	4. Mikroskopie
	Dünnschliffmikroskopie
	Rasterelektronenmikroskop (REM)
Seite 12 – 13	5. Analytik
	Röntgendiffraktion (XRD)
	Thermogravimetrie (TGA)
	Porenlösungspresse mit IC
	Chemisches Schwinden
Seite 14 – 15	6. Zement / Mörtel / Beton-Zementprüfungen
	Kalorimetrie
	Mörtel
	Beton
Seite 16	7. Granulometrie / Petrographie / AAR
	Betonperformance AAR-Test
Seite 17	8. Objektarbeiten: Frischbetonkontrolle / Probenahme
Seite 18 – 22	9. Praktische Beispiele / Fragestellungen
	Alkali-Aggregat-Reaktion
	Sulfatwiderstand
	Nutzung der Wärmeflusskalorimetrie zur Optimierung von Betonrezepturen
	Plastische Frühschwindrisse
	Schadenfälle: Beispiel Brandfall
	Neuartige Kunststofffasern zur Verbesserung des Nachbruchverhaltens von Beton
	Recyclingbeton
Seite 23	10. Ausrüstung und Prüfmethode
Seite 23	11. Spezielle Lagerräume

1. Festigkeit

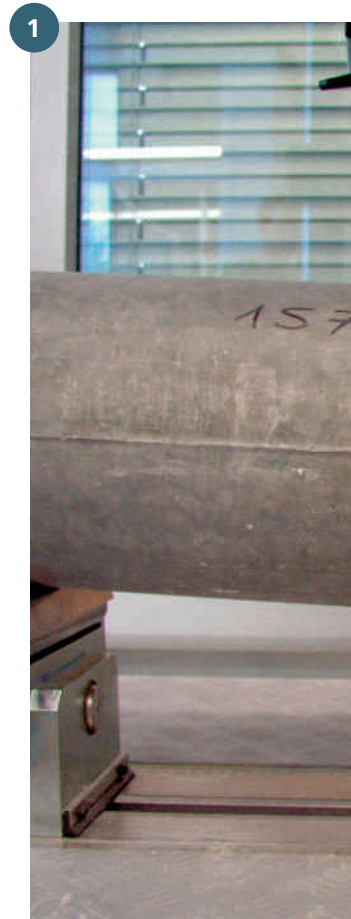
Biegezugfestigkeit

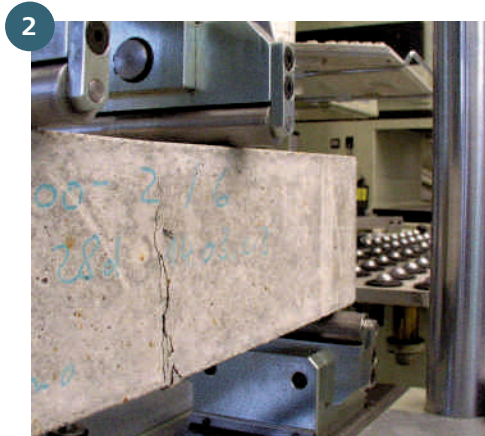
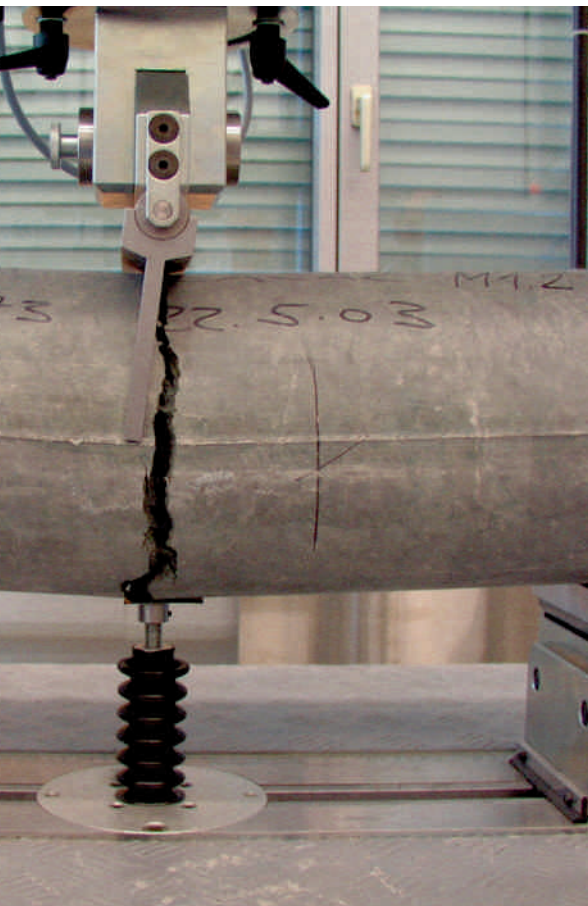
Beton weist im Verhältnis zur Druckfestigkeit eine relativ kleine Zugfestigkeit auf. Deshalb ist der Druckversuch am Beton der wichtigste Normversuch. Für gewisse Anwendungen (z. B. elastisch gelagerte Fahrbahnplatten) ist aber die Kenntnis der Biegezugfestigkeit trotzdem von grosser Wichtigkeit. Diese wird am Normalbeton an Prismen mit mittigem Lasteintrag oder mit 2-Punkt-Lasteintrag bestimmt (z. B. nach SN 640461a oder EN 12390-5).

Nach Erreichen der Biegezugfestigkeit bricht der Beton spröde und seine Festigkeit sinkt auf Null ab. Um das Nachbruchverhalten des Betons zu verbessern, können dem Beton Fasern (Kunststofffasern, Stahlfasern etc.) beigemischt werden. Dadurch erhält der Beton eine gewisse Nachbruchfestigkeit. Dieses Verhalten lässt sich in verschiedenen Biegezugversuchen überprüfen, indem die Kraft weggeregelt aufgebracht wird und gleichzeitig Kraft, Weg und Durchbiegung aufgezeichnet werden. Je nach Prüfungsart resultieren daraus das Arbeitsvermögen und/oder die residuelle Biegezugfestigkeit. Mit unseren Einrichtungen sind wir in der Lage, Faserbeton unter anderem nach EN 14651 und SIA 162/6 zu prüfen.

Quadratplattenversuch

Die Prüfung von Faserbeton an Biegezugprismen erfordert üblicherweise eine grosse Anzahl Prüfkörper. Diese kann deutlich reduziert werden, wenn anstelle von Prismen Quadratplatten mit den Abmessungen 600 x 600 x 100 mm nach SIA 162/6 geprüft werden. Bei dieser Prüfung liegen die Platten auf einem Stahlrahmen auf und werden mittig mit einem Stahlstempel weggeregelt belastet. Auf der Grundlage der Last-Verformungskurve können das Arbeitsvermögen und die Bruchenergie berechnet werden.





1
Biegezugversuch von geschleudertem Betonrohr mit Durchbiegungsmessung.

2
2-Punkt-Lastangriff eines faserverstärkten Betonprismas 150/150/700 mm. Der Versuch wird weggeregelt gefahren und gleichzeitig werden Kraft, Weg und Durchbiegung aufgezeichnet.

3
Quadratplattenversuch nach SIA 162/6 an einem faserverstärkten Beton.

2. Verformungsverhalten

Kriechmessung

Beton, der unter einer Dauerbelastung steht (z. B. Eigengewicht einer Konstruktion), verformt sich unter dieser Belastung in Funktion der Zeit. Diese zeitabhängige Nachverformung wird «Kriechen» genannt. Die Grösse dieser Kriechverformungen ist von verschiedenen äusseren Faktoren abhängig (z.B. Belastungszeitpunkt, -grösse und -dauer), wird aber wesentlich auch durch die Betonzusammensetzung beeinflusst. Bei der Berechnung von Bauwerksverformungen muss der Kriechanteil möglichst genau bekannt sein. Dieser lässt sich aus Erfahrungswerten abschätzen oder mit einem Standardversuch im Labor direkt bestimmen.

Wir verfügen über diverse Kriechstände, mit denen auf Betonprüfkörper (meist Betonprismen) eine gewünschte Dauerbelastung aufgebracht werden kann, während gleichzeitig die Verformung der Prüfkörper in Funktion der Zeit aufgenommen wird. Daraus lässt sich zum Beispiel die Kriechzahl in Funktion der Zeit berechnen.

Behinderte Schwindspannung im Reissrahmen

Schwinden ist eine Volumenabnahme des Betons verursacht durch das Einbinden von Wasser in Hydratphasen und das Verdunsten von Wasser an der Betonoberfläche. Wird der Beton daran gehindert, sich frei zu verformen, entstehen Zugspannungen im Beton. Die Grösse dieser Zugspannungen ist jedoch nicht alleine vom Schwindmass abhängig, sondern auch von der Elastizität und des Kriechvermögens des Betons sowie des Grades der Verformungsbehinderung. Sobald die Zugspannungen grösser werden als die Zugfestigkeit des Betons, können Risse entstehen. Das Rissrisiko eines Betons infolge behinderter Schwindverformungen ist somit von verschiedenen Faktoren abhängig und kann nicht alleine über das Schwindmass zu einem bestimmten Zeitpunkt beurteilt werden.

Wir haben Reissrahmen unterschiedlicher Grösse zur Verfügung, mit denen sich die zeitliche Spannungsentwicklung im Beton bei behinderten Schwindverformungen unter standardisierten Bedingungen bestimmen lässt. Da in der gemessenen Spannung die zeitliche Entwicklung der massgebenden mechanischen Eigenschaften enthalten ist (E-Modul, Kriechmass, Schwindmass), kann das zeitabhängige Rissrisiko verschiedener Betonsorten qualitativ direkt miteinander verglichen werden.

Autogenes Schwinden

Bei dichten Betonen mit tiefem Wasser-Zement-Wert ist die vorhandene Anmachwassermenge so klein, dass infolge der fortschreitenden Zementhydratation die entstehenden Hydratationsporen grösstenteils entleert werden. Dadurch sinkt die relative Feuchtigkeit im Beton ab (innere Selbstaustrocknung), was zu entsprechenden Schwindverformungen führt, ohne dass der Beton Feuchtigkeit nach aussen abgibt (autogenes Schwinden). Die Grösse dieser autogenen Schwindverformungen hängt von der Betonzusammensetzung ab (w/z-Wert, Bindemittel, Gesteinskörnung, Zusatzmittel etc.) und kann deshalb stark unterschiedlich sein.

Die Messung der autogenen Schwindverformungen erfolgt an Zementstein und Mörtel (lineare Messung) nach ASTM C 1698-09 ab Abbindebeginn des Zementes bis zu einem Alter von bis zu sieben Tagen. Es sind auch Messungen an herkömmlichen Mörtel- und Betonprismen möglich, allerdings erst ab 24 Stunden nach Herstellung.



1
Kriechstand für die Belastung von Betonprismen mit einer konstanten Dauerlast.

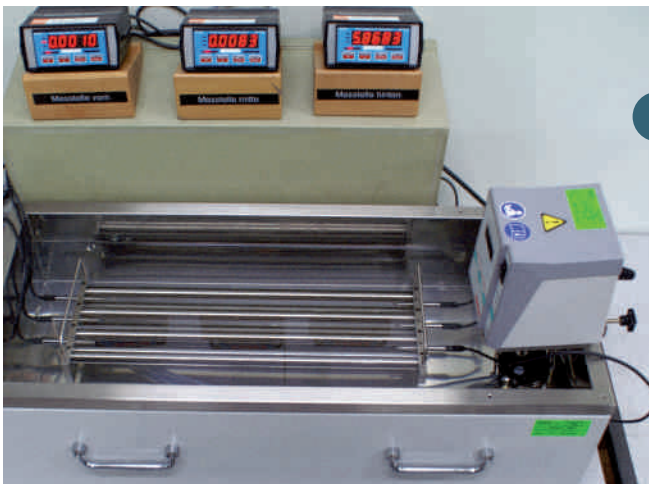
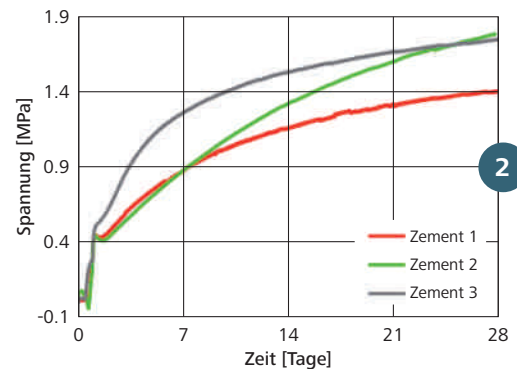
2
Gemessene Spannungsentwicklung im Reissrahmen für Betone mit unterschiedlichen Zementsorten.

3
Versuchsaufbau für die lineare Messung des autogenen Schwindens von Zementstein und Mörtel.

4
Reissrahmen zur Bestimmung der Spannungsentwicklung bei behinderten Schwindverformungen.

5
Windkanal für Frühschwindversuche mit kontrollierter Temperatur und Windgeschwindigkeit sowie kontrolliertem Feuchtgehalt.

6
Prüfkörper mit Rissbildung nach Frühschwind-Versuch.



3

Frühschwinden (Plastisches Schwinden)

Schwindverformungen, die im noch plastischen Zustand des Betons auftreten, wenn Wasser von einer frisch betonierten Betonoberfläche in die Umgebung verdunstet, werden als Frühschwinden bezeichnet. Solange die Verdunstungsrate des Wassers kleiner ist als das Nachfließen von Wasser aus dem Beton an die Oberfläche (sogenanntes Bluten des Betons), hat diese Verdunstung keinen wesentlichen Einfluss auf den Beton. Wenn jedoch die Verdunstungsrate grösser wird als das Bluten, verringert sich der Wasserfilm auf der Oberfläche. Sobald der Wasserfilm unter die Betonoberfläche absinkt, entsteht ein kapillarer Unterdruck im Beton. Solange der Beton sich noch verarbeiten lässt, werden entsprechende Schwindspannungen durch plastische Verformung des fließfähigen Betons abgebaut. Wenn der Beton jedoch eine gewisse Steifigkeit (Grünstandfestigkeit) erreicht, sich aber noch in der dormanten Periode befindet (Zementhydratation hat noch nicht begonnen), können diese Spannungen nicht mehr oder nur viel langsamer abgebaut werden und schon kurz nach dem Betonieren entstehen Schwindrisse, die häufig den ganzen Bauteilquerschnitt durchlaufen. Das Risiko von plastischen Frühschwindrissen ist von vielen, sich gegenseitig beeinflussenden Faktoren abhängig: Verdunstungsrate, Umgebungs- und Frischbetontemperatur, Betonzusammensetzung, Blutungsneigung des Betons, Verarbeitbarkeit, Nachbehandlung und mehr.

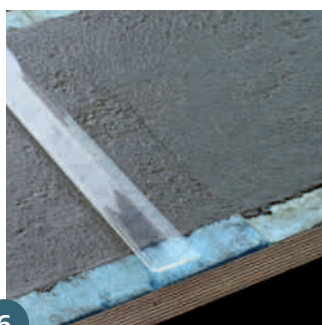
Um das Risiko von plastischen Frühschwindrissen zu untersuchen (z. B. Einfluss verschiedener Zementsorten, Zusatzmittel, Betonrezepturen, Nachbehandlungsmittel etc.), arbeiten wir mit einer daraus ausgelegten Versuchsanordnung. Nach Herstellung der Betonmischung werden am Beton die Verdunstungsrate, die Oberflächensetzung, der Porendruck, das Bluten sowie der Risszeitpunkt und die Risslänge und -breite in einem Windkanal bei 30°C und 45% relativer Feuchte gemessen. Die Datenaufzeichnung erfolgt vom Zeitpunkt des Prüfkörpereinbaus (ca. 30 min nach Betonherstellung) bis zu einem Alter von ca. sechs Stunden.



4

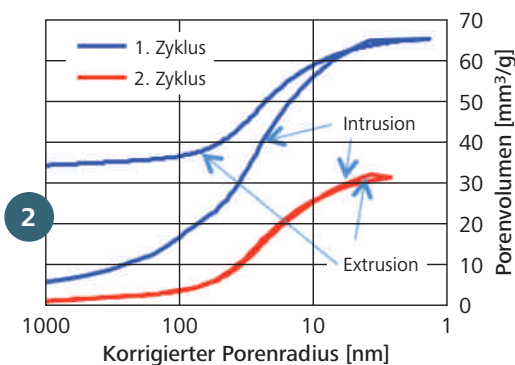


5



6

3. Porosität / Frost und Frost-Tausalz / Permeabilität



Quecksilberdruckporosimetrie

Die Quecksilberdruckporosimetrie ist eine Technik, mit der das Volumen und die Grösse der Makro- und Mesoporen (2 nm bis 100 μm) von porösen Materialien ermittelt werden können. Dabei wird Quecksilber unter hohem Druck in die Poren gepresst. Die Radien der Poren, die mit Quecksilber gefüllt werden, skalieren dabei invers mit dem aufgebrauchten Druck (Washburn-Gleichung). Das Verfahren wurde von uns weiterentwickelt, um die Effekte von Flaschenhalbsporen (Poren, die die Probenoberfläche nur über kleinere Poren erschliessen) mit zu berücksichtigen. Durch Anwenden eines Mehrzyklenverfahrens werden die Porengrössen entsprechend präziser interpretiert.

Sauerstoffdiffusion

Da zementöse Baustoffe eine gewisse Porosität aufweisen, können Gase (z. B. CO_2) durch die Poren in den Beton eindringen und unter gewissen Bedingungen zu Schäden am Beton selber oder der darin enthaltenen Bewehrung führen. Der Diffusionswiderstand von Beton gegenüber Gasen ist somit ein Mass für die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton.

Für die Prüfung des Sauerstoffdiffusionswiderstandes von Beton und Mörtel werden die Prüfkörper (Bohrkern Ø 100 mm) nach standardisierter Vortrocknung in eine Prüfzelle mit seitlicher Dichtung eingespannt. Anschliessend wird auf beiden Seiten des Prüfkörpers ein Gasstrom aufgebracht, wobei es sich auf der Oberseite um Sauerstoff und auf der Unterseite um Stickstoff handelt. Der Gasdruck ist auf beiden Prüfkörperseiten identisch. Der Stickstoff wird nach dem Durchströmen der Prüfzelle in ein Sauerstoff-Analysegerät eingeleitet und der Gehalt an Sauerstoff im Stickstoff bestimmt. Aus der Sauerstoffkonzentration im Stickstoff, den Gasflüssen und der Prüfkörpergeometrie lässt sich anschliessend der Sauerstoffdiffusionskoeffizient berechnen. Dieser ist umso grösser, je grösser die Diffusivität der Probe ist. Er ist sowohl von der Porenstruktur als auch vom Wassergehalt in den Poren abhängig. Je mehr Poren noch mit Wasser gefüllt sind, umso geringer ist die Gasdurchlässigkeit.

Sauerstoffpermeabilitätstest OPI

Auch bei der Sauerstoffpermeabilitätsprüfung wird ähnlich wie bei der Sauerstoffdiffusion der Widerstand von Beton gegenüber eindringenden Gasen geprüft. In diesem Fall wird auf den Prüfkörper jedoch ein Gasdruckgradient aufgebracht.

Für die Prüfung der Sauerstoffpermeabilität von Beton und Mörtel werden die Prüfkörper (Bohrkerne \varnothing 68 mm) nach standardisierter Vortrocknung in eine Prüfzelle mit seitlicher Dichtung eingespannt. Anschließend wird auf einer Seite des Prüfkörpers ein Gasdruck von 1 bar aufgebracht, während der Prüfkörper auf der gegenüberliegenden Seite dem Umgebungsdruck ausgesetzt ist. Im Folgenden wird der Druckabfall über einen Zeitraum von sechs Stunden gemessen. Je grösser dieser Druckabfall ist, umso permeabler ist der Beton. Im Unterschied zur Sauerstoffdiffusionsprüfung haben bei der Sauerstoffpermeabilitätsprüfung Mikrorisse einen sehr grossen Einfluss auf das Prüfergebn, da sie zu einem raschen Druckabfall führen.

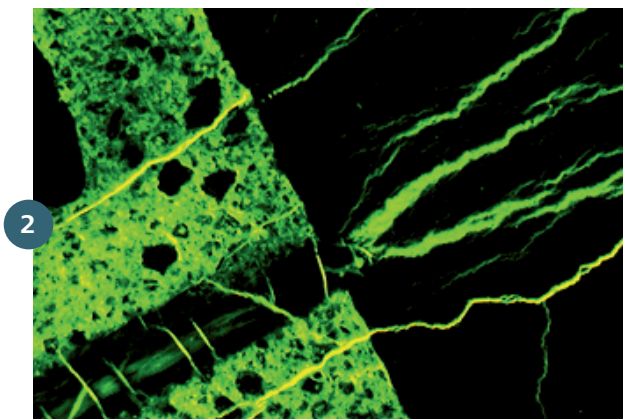
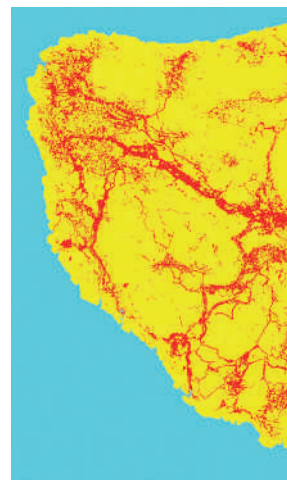
- 1
Quecksilberdruckporosimeter.
- 2
Porenradienverteilung.
- 3
Versuchsaufbau für die Bestimmung des Sauerstoffdiffusionskoeffizienten von Beton und Mörtel.
- 4
Prüfzelle für die Bestimmung des Sauerstoffdiffusionskoeffizienten.
- 5
Sechs Prüfkörper für die Bestimmung der Sauerstoffpermeabilität.



4. Mikroskopie

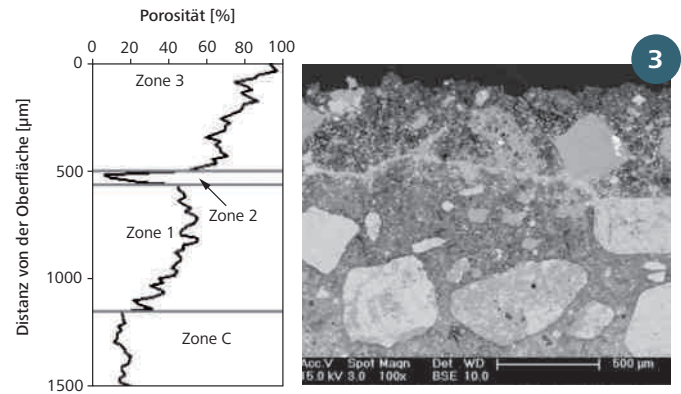
Dünnschliffmikroskopie

Mit dem Lichtmikroskop untersuchte Dünnschliffe sind ein vielseitig einsetzbares Werkzeug zur Analyse von Mörtel und Beton. Sie gestatten die Beurteilung der Mikrostruktur und die Identifikation von Mineralphasen. Von Hydratationsstudien über Brandfälle bis zu Sulfat-angriff oder Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) liefern die Dünnschliffe wichtige Informationen über die ablaufenden Prozesse und das Ausmass von Schäden. Insbesondere erlauben sie in Kombination mit anderen Prüfungen wie zum Beispiel Zug- oder Druckfestigkeit präzise und umfassende Analysen von Baustoffen.

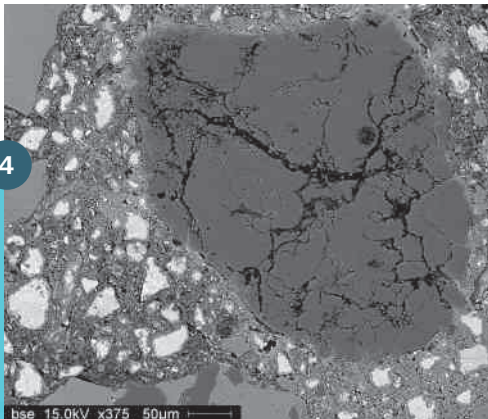


Rasterelektronenmikroskop (REM)

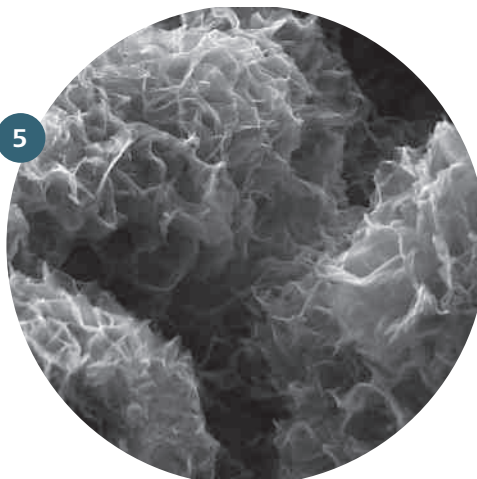
Mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) lässt sich neben der Mikrostruktur von Mörtel und Beton in Kombination mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie auch die chemische Zusammensetzung der verschiedenen Bestandteile bestimmen. Bei einer Betonschädigung durch AAR oder Sulfatangriff können zum Beispiel die beteiligten Betonbestandteile und das Ausmass der Reaktion identifiziert werden. Die Bilder werden oft als Grundlage von Bildanalysen eingesetzt, mit denen sich zum Beispiel die Porosität oder der Hydrationsgrad bestimmen lassen. Dies erlaubt es, bei einer Beurteilung oder Analyse den Schritt von der qualitativen zur quantitativen Datenerfassung zu vollziehen.



3



4



5

- 1 Dünnschliff mit einer Dicke von $\approx 25 \mu\text{m}$, hergestellt aus einer mit Epoxidharz imprägnierten Betonprobe unter dem Polarisationslichtmikroskop.
- 2 AAR-bedingte Risse und Gelbfärbung im Beton einer Autobahnbrücke (Dünnschliff im fluoreszierenden Auflicht).
- 3 Durch einen biologisch induzierten Säureangriff in einer Abwasserreinigungsanlage veränderter Beton und die mit Hilfe der Bildanalyse ermittelte Porosität in den obersten 1.5 mm des Betons.
- 4 Segmentierung des gelösten Quarzes (schwarz/rot) in einem Quarzit-Gesteinskorn.
- 5 Hydratphasen in einem Modellsystem für AAR.

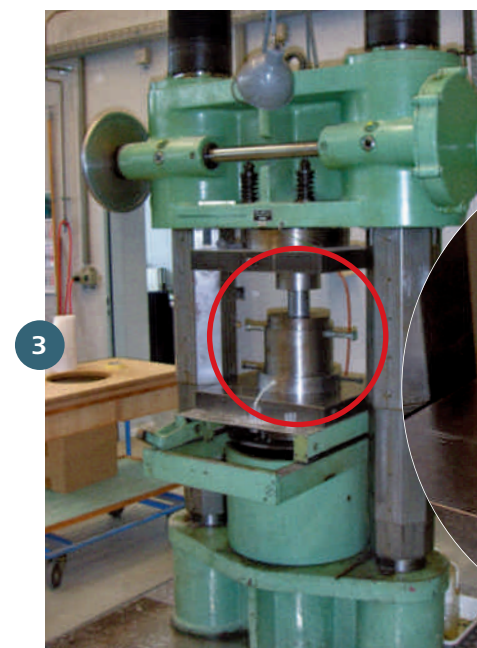
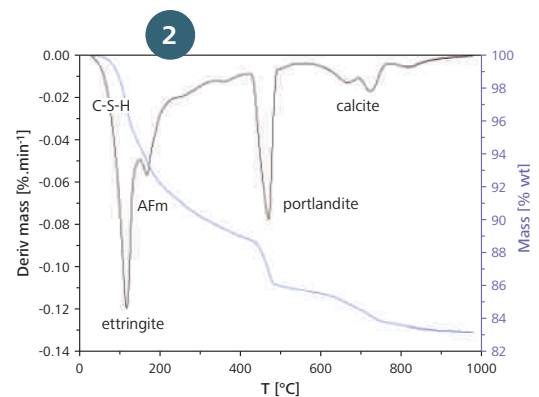
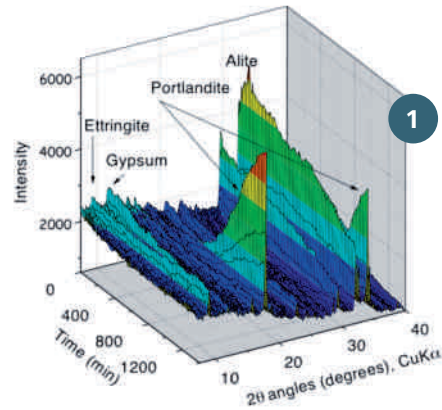
5. Analytik

Röntgendiffraktion (XRD)

Röntgendiffraktion (XRD) ist eine der wichtigsten Techniken zur Charakterisierung mineralischer Bindemittel und ihrer Hydratationsprodukte. Sie erlaubt den qualitativen Nachweis von kristallinen Verbindungen mit einem Mindestgehalt von ca. 1 – 3 Massenprozent. Amorphe oder sehr feinkristalline Substanzen lassen sich nicht identifizieren. Bei geeigneter Probenpräparation können die kristallinen Bestandteile mittels Rietveld-Verfeinerung quantifiziert werden. Der Anteil an amorphen Phasen lässt sich bei Messung eines internen oder externen Standards ebenfalls quantifizieren. XRD kann zur qualitativen oder quantitativen Analyse von Bindemitteln (z. B. Zement, Hüttensand, Flugasche) und weiteren Baustoffen sowie zur Charakterisierung der (kristallinen) Festphasen während der Hydratation eingesetzt werden. Uns stehen mehrere XRD-Geräte in verschiedener Konfiguration zur Verfügung (schneller Detektor, Heiz- und Feuchtekammern).

Thermogravimetrie

Mit Thermogravimetrie (TGA) lässt sich der Massenverlust einer Probe in Abhängigkeit der Aufheiztemperatur bestimmen. Bei mineralischen Bindemitteln sind diese Massenverluste üblicherweise durch die Abgabe von Wasser oder Kohlendioxid verursacht. Aufgrund der charakteristischen Temperaturen für die Massenverluste lassen sich Bestandteile von unhydratisierten oder hydratisierten Bindemitteln nachweisen (z. B. Ettringit, C-S-H-Phasen, AFm-Phasen) und z. T. auch quantifizieren (z. B. Gips, Portlandit, Calcit). Die TGA wird neben der XRD überwiegend zur Charakterisierung der Festphasen bei der Zementhydratation verwendet. Häufig liefert die TGA komplementäre Informationen zur Röntgenbeugung, da mit ihr auch (röntgen)amorphe Phasen wie C-S-H-Phasen identifiziert werden können.



5000 kN Druckpresse

Porenlösepressen mit IC

Für die Charakterisierung der Zementhydratation ist die zeitliche Entwicklung der Porenlösungszusammensetzung eine wichtige Messgröße. Porenlösung von frischen Zementpasten können durch Vakuum- oder Druckfiltration gewonnen werden. Aus erhärteten Proben lässt sich die Porenlösung mit Hilfe einer 5000-kN-Druckpresse gewinnen. Die Zusammensetzung der Porenlösung wird mit Ionenchromatografie und pH-Messungen untersucht. Sie gibt wichtige Aufschlüsse zum Beispiel darüber, welche Hydratphasen zu welchen Hydratationszeitpunkten stabil sind.

Chemisches Schwinden

Die Reaktion von Zement mit Wasser verursacht chemisches Schwinden, da das Volumen der Ausgangsstoffe (Zement + Wasser) grösser ist als das Volumen der Endprodukte (Hydratphasen). Daher lässt sich die Messung des chemischen Schwindens dazu verwenden, die Kinetik der Zementhydratation zu verfolgen und z. B. den Einfluss von Zusatzstoffen oder mitteln zu untersuchen. Wir setzen hierzu die Methode nach ASTM C 1608 ein.



4

- 1 Phasenentwicklung während der frühen Hydratation eines Portlandzementes (in-situ XRD-Messung in der Feuchtkammer).
- 2 Thermogravimetrische Aufheizkurve eines für 96 Stunden hydratisierten Zementes.
- 3 Vorrichtung zur Gewinnung von Porenlösungen aus erhärtetem Zementstein oder Mörtel bzw. Beton.
- 4 Analyse der Porenlösungszusammensetzung mit Ionenchromatographie.

6. Zement / Mörtel / Beton-Zementprüfungen



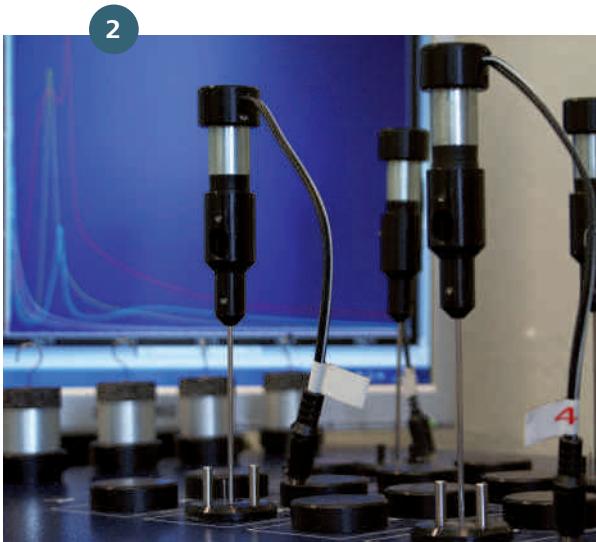
1

Kalorimetrie

Die isotherme Wärmeflusskalorimetrie ist eine effiziente Methode, um die kinetischen Prozesse während der (frühen) Zementhydratation zu untersuchen, beispielsweise den Einfluss des Sulfatträgers oder verschiedener Zusatzmittel (Beschleuniger, Verzögerer, Fließmittel) auf die Zementhydratation.

Uns stehen 2 TAM-Air-Kalorimeter mit jeweils acht Messzellen zur Verfügung, die eine Messung des Wärmeflusses von Zementleimen bei konstanter Temperatur (zwischen 5°C und 90°C) erlauben. Die Zementproben können ausserhalb des Kalorimeters oder innerhalb des Kalorimeters (Admix-Ampullen) gemischt werden.

Neben der isothermen Wärmeflusskalorimetrie können wir auch die Hydratationswärme eines Zementes nach EN 196-9 (teiladiabatisches Langavant-Verfahren) bestimmen.



2



3

Mörtel

Rheologische Eigenschaften einer Zementleim- oder Mörtelmischung

Die Messung von Fließkurven an Zementleimen oder Mörteln mit maximal 2 mm Korngrösse gibt wichtige Informationen zum Fließverhalten von Baustoffsuspensionen und zur Wirkung von rheologischen Additiven (z. B. Fließmitteln oder Verdicker). Weiterhin kann mit Hilfe von Oszillationsmessungen das Ansteifungs- und Abbindeverhalten von Zementleimen und Mörteln verfolgt werden.

Für die Versuche steht uns ein Rotationsrheometer mit luftgelagerten Messsystemen in Zylinder, Platte-Platte und Kugelgeometrie zur Verfügung. Die Messungen können in einem weiten Temperaturbereich durchgeführt werden.

Beton

Mischung 75, 250 oder 500 Liter inkl. Frischbetonkontrolle

Mit modernsten Betonmischern und einem eingespielten Team sind wir in der Lage, anspruchsvolle Projekte im Betonbereich durchzuführen. Unter Laborbedingungen stellen wir Betonmischungen nach Vorgabe der Zusammensetzung durch den Auftraggeber wiederholbar her oder entwickeln Mischungen, die die vom Auftraggeber geforderten Eigenschaften erfüllen. Dabei mischen wir auch Spezialbetone wie SCC, UHPC, Beton mit Beton- oder Mischabbruchgranulat problemlos und reproduzierbar. An den Mischungen wird standardmässig eine Frischbetonkontrolle durchgeführt und es werden Prüfkörper für die verschiedensten Laborprüfungen hergestellt.

1 Isothermes Wärmeflusskalorimeter TAM-Air (links) mit Messzellen für internes und externes Anmischen der Zementpasten (rechts).

2 Mischwerkzeuge mit unterschiedlichem Energieeintrag.

3 Rotationsrheometer mit Zylindermesssystem.

4 Programmierbarer EIRICH-Intensivmischer R08W für Beton.

5 Mischwerkzeuge mit unterschiedlichem Energieeintrag.



7. Granulometrie / Petrographie / AAR

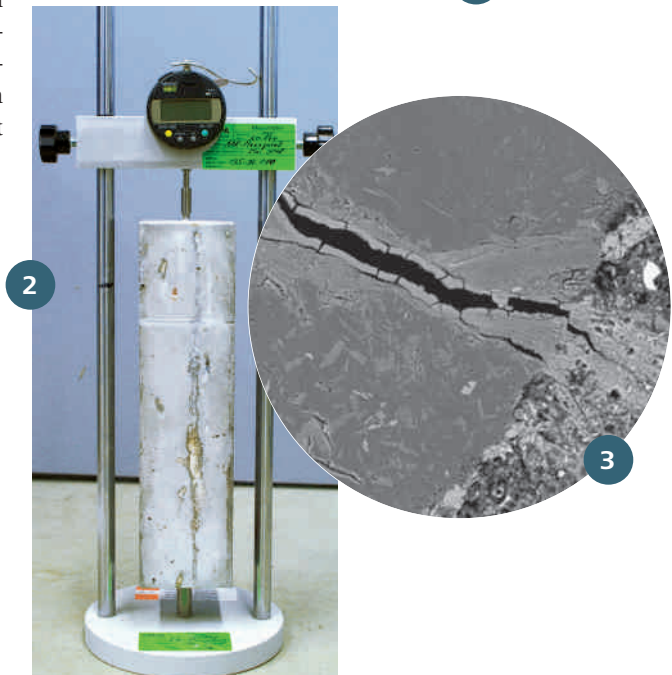
Betonperformance AAR-Test

Die Gesteinskörnung ist mit einem Anteil von 60 – 75 % der volumemässig wichtigste Bestandteil von Mörtel und Beton. Die petrographische Zusammensetzung der Gesteinskörnung (Sandstein, Kalk, Gneis usw.), ihre Korngrößenverteilung, Kornrundung und Kornform beeinflussen die Eigenschaften des Betons sowohl im frischen als auch im erhärteten Zustand.

Die Gesteinskörnung kann auch Auslöser von Betonschäden durch die AAR sein. Reaktive Mineralien in der Gesteinskörnung reagieren mit der alkalischen Porenlösung des Betons und bilden ein expansives Reaktionsprodukt, das zu Betonschäden in Form von Rissen führt. Durch geeignete Zementwahl lassen sich Betonschäden bei Neubauten auch mit reaktiven Gesteinskörnungen vermeiden. Der AAR-Widerstand von Betonen wird mit der Beton-Performance-Prüfung ermittelt (s. SIA Merkblatt 2042).



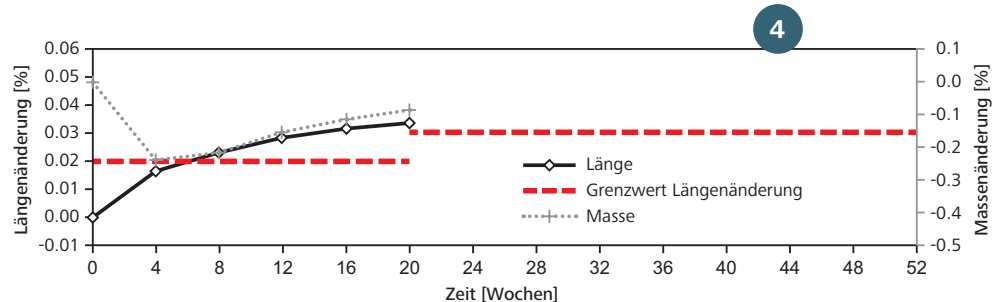
1



2

3

- 1 Sand und Kies.
- 2 Längenmessung an Prüfkörper der Beton-Performance-Prüfung.
- 3 Reaktives Gesteinskorn mit Riss, partiell durch Gel gefüllt.
- 4 Längenänderung von Beton während der Beton-Performance-Prüfung.



4

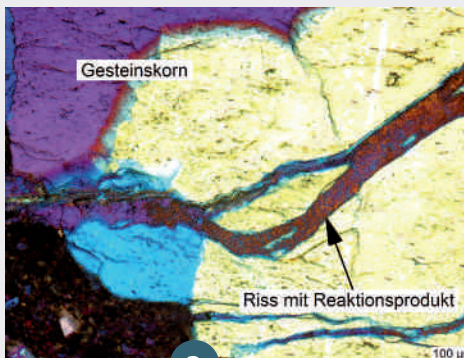
8. Objektarbeiten: Frischbetonkontrolle / Probenahme

Als unabhängiges, akkreditiertes Prüflabor führen wir für unsere Kunden Probenahmen auf Baustellen durch. Dazu gehören Frischbetonkontrollen inkl. Herstellung von Prüfkörpern für Laborprüfungen, aber auch Bohrkernentnahmen aus Betonobjekten. Unsere Mitarbeiter sind sich gewohnt, auch unter schwierigen Bedingungen (z. B. nach Schadenfällen) repräsentative Proben entnehmen zu können, um die Grundlagen für aussagekräftige Prüfungen zu schaffen.



- 1
Frischbetonkontrolle.
- 2
Bohrkernentnahme.
- 3
Tunnel in Deckelbauweise.

9. Praktische Beispiele / Fragestellungen



Alkali-Aggregat-Reaktion

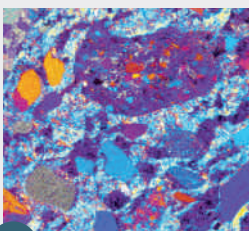
AAR erfasst Betonbauwerke verschiedenster Art von Stau-
mauern über Brücken bis zu Stützmauern, wenn die drei
Grundvoraussetzungen – genügend Alkalien aus dem Ze-
ment, reaktive Mineralien in der Gesteinskörnung und ge-
nügen Feuchte – erfüllt sind. Im Gegensatz zu anderen
Schadenmechanismen betrifft die Expansion und damit
die Rissbildung ausgelöst durch das sich ausdehnende Re-
aktionsprodukt nicht nur die Oberfläche sondern den ge-
samten Betonquerschnitt. Der Schaden wird über eine
Rissanalyse und Verteilung am Bauwerk bis zur Beurtei-
lung der Mikrostruktur im Mikroskop erfasst. Über eine
Bestimmung des Restquellmasses kann die zukünftige
Schadenentwicklung abgeschätzt werden. Massnahmen
zur Verhinderung der AAR bei Neubauten sind im SIA
Merkblatt 2042 definiert.

Sulfatwiderstand

Der Sulfatangriff kommt hauptsächlich im Tunnelbereich vor. Der Kontakt von Beton mit sulfathaltigem Grundwasser führt zu Ettringit- und Thaumasitbildung, die mit einer Volumenzunahme respektive einem Festigkeitsverlust verbunden ist. Nach der Probenahme werden zur eindeutigen Identifikation der Schadenursache und des Schadenmasses die mechanischen Eigenschaften des geschädigten Betons erfasst sowie die Licht- und auch die Elektronenmikroskopie eingesetzt. An Betonen für Neubauten lässt sich der Sulfatwiderstand nach SIA 262/1 prüfen.

Nutzung der Wärmeflusskalorimetrie zur Optimierung von Betonrezepturen

In Rahmen eines Forschungsprojektes sollten Betonrezepturen mit hoher Frühfestigkeit entwickelt werden. Hierbei waren vor allem das Fließmittel und die Zusatzstoffe zu optimieren. Anstelle aufwändiger Betonversuche wurden zunächst Vorversuche an Zementpasten und Mörteln durchgeführt. Es kam vor allem die Wärmeflusskalorimetrie zum Einsatz, die es erlaubt, die Beeinflussung der Zementhydratation, des Abbindeverhaltens und der Festigkeitsentwicklung zu frühen Prüfterminen abzuschätzen. Alle untersuchten Fließmittel verzögern die Hydratation, der Effekt ist jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt. Kalksteinmehl und feines Quarzmehl beschleunigen die Hydratation, während bei grobem Quarzmehl und bei Flugasche eine Verzögerung auftritt. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Vorversuchen konnten erfolgreich in den Betonversuchen umgesetzt werden.



1
Geschädigtes Brückenwiderlager mit dem zur Bestimmung des Rissindexes aufgetragenen Messquadrat.

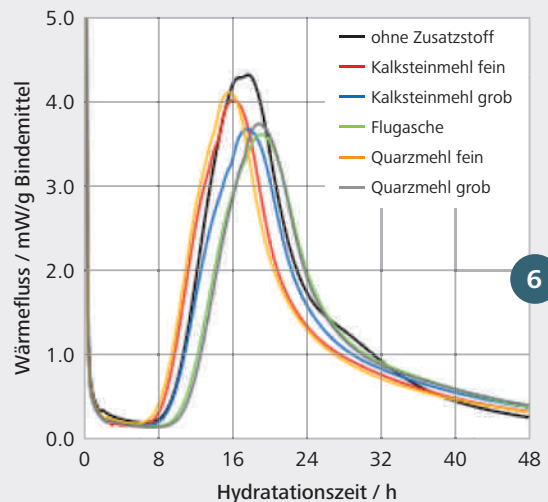
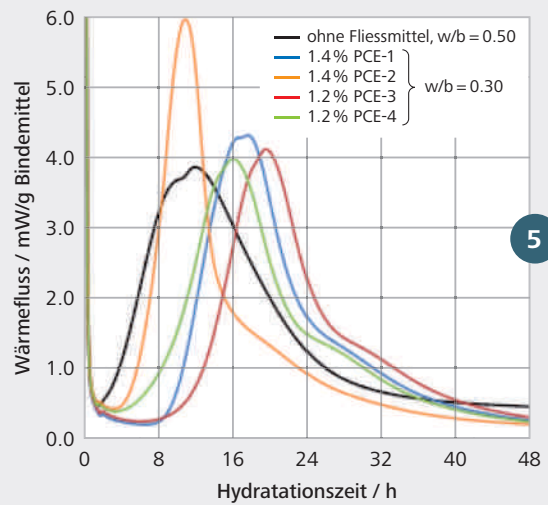
2
Gerissenes Gesteinskorn mit austretendem Reaktionsprodukt (Dünnschliff im doppelt polarisierten Durchlicht).

3
Abplatzungen von Ortsbeton durch Ettringitbildung in einem Lüftungsschacht.

4
Beton mit praktisch vollständigem Festigkeitsverlust durch die Bildung von Thaumasitadern (Dünnschliff im doppelt polarisierten Durchlicht).

5
Einfluss von Fließmitteln auf Polycarboxylatetherbasis auf den Hydratationswärmefluss eines CEM I 42.5 N. Die Dosierung der Fließmittel ist auf das flüssige Produkt bezogen und entspricht einer im Mörtelversuch ermittelten konstanten Verarbeitbarkeit (Ausbreitmass).

6
Einfluss von Zusatzstoffen auf den Hydratationswärmefluss eines CEM I 42.5 N, w/b = 0.30, 1.4% PCE-Fließmittel, Ersatz von 20 Masse-% des Zementes durch den Zusatzstoff.



Plastische Fröhschwindriss

Plastische Fröhschwindriss (s. auch Kapitel 2) treten bei Bauteilen auf, bei denen im noch frischen Zustand des Betons Wasser von der Oberfläche verdunsten kann (z. B. Bodenplatten, Decken, Fahrbahnbeläge etc.). Anzeichen für plastische Fröhschwindriss sind das Auftreten der Risse vor dem Abbindebeginn des Zementes und meist über den ganzen Bauteilquerschnitt durchlaufende Risse. Ob diese Risse am Bauteil auftreten oder nicht, hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab, die sich gegenseitig zusätzlich beeinflussen. So spielen etwa Witterung (relative Luftfeuchtigkeit, Wind, Temperatur), Nachbehandlung (Art und Beginn), Verarbeitbarkeit des Betons, Betonzusammensetzung (Bindemitteltyp, w/z, Zusatzmittel), Blutungsneigung des Betons, Transportdauer, Art der Konstruktion eine wichtige Rolle. Die Zusammenhänge dieser Einflussfaktoren können mit der unter Punkt 2 «Verformungsverhalten» beschriebenen Prüfanordnung (Fröhschwinden) unter Laborbedingungen untersucht werden.

Im Fall eines Verdachtes auf plastische Fröhschwindriss an Bauwerken werden per eines Augenschein vor Ort Rissverläufe und -geometrie sowie weitere Besonderheiten aufgenommen. Insbesondere geht es auch darum, weitere Rissursachen (z. B. Risse durch Verformung der Schalung oder Setzen des Betons) ausschliessen zu können. Gleichzeitig werden Bohrkernproben an verschiedenen Stellen (mit und ohne Risse) aus dem Bauwerk entnommen. Diese Bohrkernproben werden anschliessend im Labor fotografisch und schriftlich dokumentiert. Daraus können bereits wichtige Erkenntnisse für die Beurteilung abgeleitet werden (z. B. Verdichtungsmängel, Entmischungen des Betons, Rissverlauf etc.). An den intakten Bohrkernen wird anschliessend überprüft, ob der Beton die an ihn gestellten Anforderungen erfüllt. Dabei handelt es sich meistens um Druckfestigkeit und allenfalls um Wasserleitfähigkeit.

In die Beurteilung der Gesamtproblematik fliessen Angaben aus Betonliefererschein, Betonzusammensetzung, Beschaffenheit der Betonoberfläche, Klimadiagramme (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Wind) sowie aus Befragungen (Nachbehandlungsmethoden und -beginn, Konsistenz des Betons) und allfälligen Frischbetonprüfungen ein.



1



1
Plastische Frühschwindrisse (oben) und Bohrkern mit durchlaufendem Riss bis auf die Unterseite der Betondecke (unten).

2
Wand und Decke aus Stahlbeton nach einem Brandereignis mit massiven Betonabplatzungen und verformter Bewehrung.

3
Beispiel der Dokumentation von Bohrkernen mit starker brandbedingter Schädigung.

4
Massive Bildung von brandbedingten Mikrorissen im Zementstein (links, Anschliff) und Ablösung entlang eines Gesteinskorns (rechts, Dünnschliff).

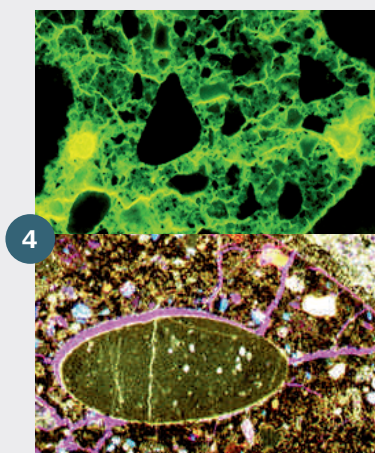
Schadenfälle: Beispiel Brandfall

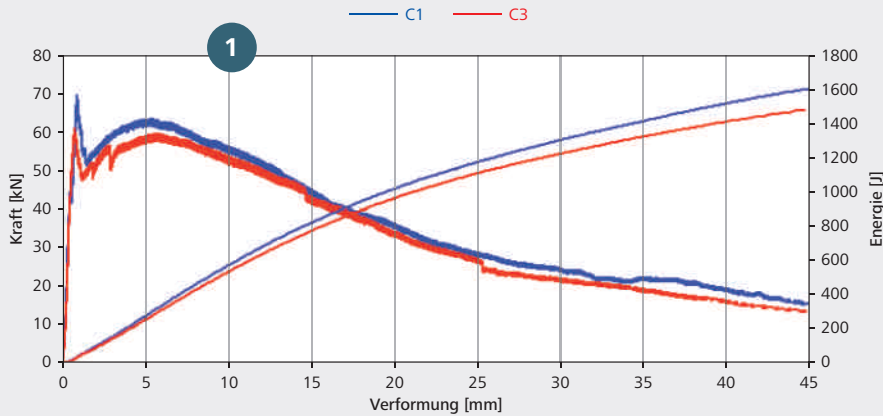
Bei Brandfällen in Wohnhäusern, Industriebauten, Tiefgaragen sowie auch Infrastrukturbauten (z. B. Tunnel) sind bei Betonkonstruktionen häufig Schäden erkennbar, die sich durch Abplatzungen und Rissbildung äussern. Es stellt sich die Frage, inwieweit der Beton und die Bewehrung durch diese thermische Einwirkungen geschädigt wurden. Zur Beantwortung sind in den meisten Fällen eine Beurteilung per Augenschein sowie eine Probenahme vor Ort notwendig. Dabei besteht die Schwierigkeit, die Probenahmestellen so zu legen, dass Orte unterschiedlichen Schädigungsgrades abgebildet werden können, eine Beurteilung bezüglich Statik möglich ist und der Aufwand sowie der Eingriff in das Bauwerk so klein als möglich gehalten werden. Zudem ist zu beachten, dass nicht nur die zusammenhängenden Bohrkernstücke von Bedeutung sind, sondern das gesamte Material inkl. Rissen und Bruchstücken (s. Abbildung Bohrkern mit starker brandbedingter Schädigung). Die Probenahme muss also entsprechend vorsichtig und mit dem notwendigen Know-how erfolgen. Zusätzlich werden falls notwendig Proben der Bewehrung entnommen.

Eine genaue Dokumentation der Probenahmestellen sowie der entnommenen Bohrkernstücke ist hierbei sehr wichtig, da dies für die Beurteilung von grundlegender Bedeutung ist. So wird beispielweise der Verlauf makroskopischer Risse sichtbar, wenn die Bohrkernstücke in geeigneter Weise entnommen worden und dargestellt sind.

An den Bohrkernen wird üblicherweise der Druckfestigkeitsverlauf in Funktion der Tiefe ab Oberfläche bestimmt. Zusätzlich werden der Chloridgehalt (Vorbeugen einer chloridinduzierten Bewehrungskorrosion) sowie allenfalls der Gehalt weiterer Schadstoffe im Beton gemessen. Mit Hilfe der Anschliff- oder Dünnschliffmikroskopie lässt sich untersuchen, ob im Beton eine Mikrorissbildung oder eine Phasenumwandlung des Zementsteines stattgefunden hat. An den entnommenen Bewehrungsstäben wird ein Zugversuch durchgeführt, wobei die Resultate mit den Normvorgaben verglichen werden. So lässt sich eine allfällige thermische Beeinträchtigung der Stahleigenschaften abschätzen.

In die Gesamtbeurteilung fliessen sowohl alle Messwerte ein als auch das optische Bild der entnommenen Bohrkernstücke und des Schadenplatzes vor Ort sowie die statische Wirkung der einzelnen Bauteile. Dies erfordert entsprechende Erfahrung, die an der Empa durch die grosse Anzahl bereits behandelter Brandschäden vorhanden ist.





- 1** Arbeitsvermögen von Faserbeton im Quadratplattenversuch.
- 2** Aufbau einer Bikomponentenfaser.
- 3** Faserorientierung im Spritzbeton.
- 4** Mischabbruch.

Neuartige Kunststofffasern zur Verbesserung des Nachbruchverhaltens von Beton

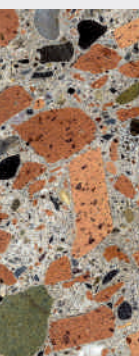
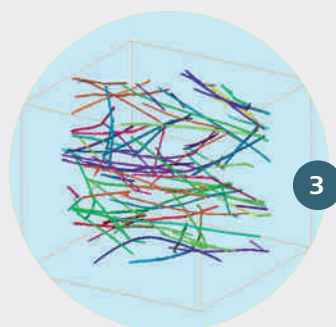
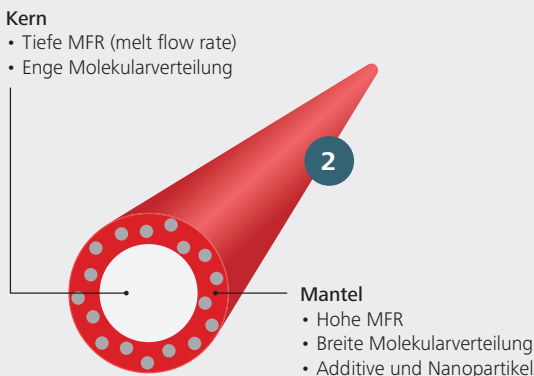
Das Nachbruchverhalten von Beton kann durch die Zugabe von Makrofasern deutlich verbessert werden (s. Punkt 1). So bricht der Beton auch bei grösseren Verformungen nach Erreichen seiner Festigkeit nicht sofort, sondern kann noch Lasten aufnehmen. Oft werden dazu Stahlfasern verwendet. Wir haben in Zusammenarbeit mit der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) und einem Industriepartner eine neuartige kunststoffbasierte Faser entwickelt, die sich einerseits gut im Beton verarbeiten lässt, andererseits hohe Lasten übertragen kann. Dies gelang mit einer aus Kern und Mantel bestehenden Bikomponentenfaser. Das Kernpolymer ist dabei bezüglich der mechanischen Eigenschaften der Faser und der ihn umschliessende Mantel als Kontaktzone zum Beton für guten Verbund und gute Verarbeitbarkeit optimiert. Die ausgezeichneten Dauerhaftigkeitseigenschaften konnten in Belastungsversuchen mit verschiedenen aggressiven Wässern nachgewiesen werden. In Biege- und Kriechversuchen wurde zudem das Dauerlastverhalten untersucht.

Dieser Fasertyp wurde auch für den Spritzbetonbereich weiterentwickelt. Dabei spielte insbesondere die Kenntnis der Faserverteilung an einer gespritzten Wand eine entscheidende Rolle. Erstmals liess sich mit Röntgentomographie und einem speziellen morphologischen Filter bei der Datenverarbeitung die Verteilung von Kunststofffasern in Spritzbeton sichtbar machen.

Recyclingbeton

In zunehmendem Masse wird bei der Betonherstellung primäre Gesteinskörnung in unterschiedlichen Mengen durch Recyclingmaterialien wie Betongranulat oder Mischabbruchgranulat ersetzt. Dies hat nicht nur einen erheblichen Einfluss auf die Mischungszusammensetzung, sondern auch auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Wir begleiten Auftraggeber, die Recyclinggesteinskörnung einsetzen wollen, durch den ganzen Prozess der Einführung. Dies kann unter anderem folgende Arbeitsschritte beinhalten:

- Charakterisierung der Recyclinggesteinskörnung (Granulometrie, Wasseraufnahme, Petrografie, chemische Zusammensetzung (insbesondere der Feinanteile) per Nasschemie, XRD und TGA).
- Erstellen der Mischungsrezeptur, basierend auf den Vorgaben gemäss EN 206-1 (Beton nach Eigenschaften) und den Resultaten der Gesteinskörnungsprüfung.
- Erstes Herstellen des Betons (entweder auf unserem Labormischer oder direkt beim Auftraggeber vor Ort) mit Frischbetonkontrolle und Prüfkörperherstellung und, wenn nötig, unmittelbares Anpassen der Betonrezeptur vor Ort.
- Bestimmen der wesentlichen mechanischen Eigenschaften (z. B. Druckfestigkeitsentwicklung, Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul, Schwind- und Kriechmass) sowie der Dauerhaftigkeitseigenschaften (z. B. Chloridwiderstand, Wasserleitfähigkeit, Frost-Tausalz-Widerstand).
- Beurteilen der Resultate in Bezug auf die Normvorgaben und im Vergleich mit Erfahrungswerten von Beton mit primärer Gesteinskörnung.
- Empfehlungen für Anwendungsgebiete des entsprechenden Recyclingbetons.



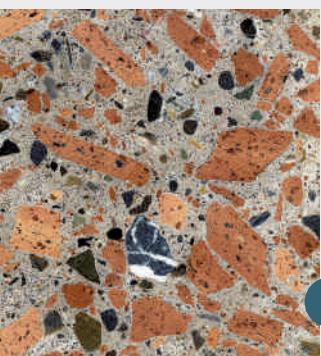
10. Ausrüstung und Prüfmethoden

Herstellung von Prüfkörpern / Probenpräparation

- Betonlabor inkl. Beton-Intensivmischer 75, 250 und 500 Liter Inhalt, Frischbetonprüfungen und Herstellung von Prüfkörpern
- Zement- und Mörtellabor inkl. diverser Mischer und Frischmörtelprüfeinrichtungen
- Prüfungen für Gesteinskörnungen: Siebmaschinen, Los-Angeles-Test etc.
- Betonschneid- und Schleifmaschinen, Kernbohrgeräte
- Laborwagen für Bohrkernentnahme und Frischbetonkontrolle

Mechanische Prüfungen

- Druckprüfmaschinen von 5 kN bis 5000 kN
- Zugprüfmaschinen bis 50 kN
- Biegezugprüfmaschinen bis 160 kN (3- und 4-Punkt)
- Dynamischer und statischer Elastizitätsmodul
- Kriechprüfmaschinen bis max. 90 kN, 250 kN, 600 kN
- Druckaufnehmer für Schalungsdruckmessungen
- Reissrahmen 120 x 120 mm und 150 x 150 mm zum Messen von Schwindspannungen



Porosität / Permeabilität / Dauerhaftigkeit

- Diverse Klimaschränke
- Frosttruhen bis -25°C mit 20°C Wasserflutung
- Diverse Permeabilitätsmessgeräte mit Sauerstoff und Wasser
- Presstöpfe für Wasserdruck bis 30 bar, 60 Liter Inhalt
- Chloridwiderstand- und Leitfähigkeitsmessgeräte
- Sauerstoffdiffusion
- Quecksilberdruckporosimetrie
- Karbonatisierungskammer mit aktiver Regelung des CO₂-Gehalts sowie der Temperatur und Feuchte

Analytische Methoden

- Isothermes Wärmeflusskalorimeter, teiladiabatisches Kalorimeter
- Ionenchromatographie (IC)
- Rotationsrheometer mit Luftlager für Zementleime und Mörtel
- Messgerät zur Bestimmung der Zeta-Potenzials von Partikelsuspensionen
- Rasterkraftmikroskop
- Thermoanalyse (TGA, DTA, DSC)
- Rasterelektronenmikroskop (ESEM) inkl. diverser Präparationsmethoden
- Lichtmikroskopie (Auflicht, Durchlicht) inkl. diverser Präparationsmethoden
- pH-Meter-Vorrichtungen zur Gewinnung von Porenlösungen (aus flüssigen und festen Zementleimen)
- Bestimmung des organischen Kohlenstoffs (TOC) in wässrigen Lösungen
- Chemisches Schwinden
- Früh-, Trocken- und Autogenes Schwinden
- Röntgenpulverdiffraktometrie
- Röntgenfluoreszenzanalyse
- Nasschemie (ICP-OES, ICP-MS, TOC etc.)
- Lasergranulometrie
- Kernresonanzspektroskopie (NMR)
- Schwingungsspektroskopie (CIR, Raman)

11. Spezielle Lagerräume

Klimaräume

Wir verfügen über folgende Lagerräume. Diese stellen wir auf Anfrage auch unseren Kunden zur Verfügung.

- Prüf- und Lagerraum mit 20°C/35% r. F. (> 20 m²)
- Prüf- und Lagerräume mit 20°C/70% r. F. (> 20 m²)
- Prüf- und Lagerräume mit 20°C/90% r. F. (> 20 m²)
- Flexibler Klimaraum, 20 – 60°C, bis ca. 90% r. F. (> 10 m²)
- Frostraum bis -25°C (> 15 m²)

Die Empa ist das interdisziplinäre Forschungs- und Dienstleistungsinstitut für Materialwissenschaften und Technologieentwicklung des ETH-Bereichs. Als Brücke zwischen Forschung und Praxis erarbeitet sie Lösungen für die vorrangigen Herausforderungen von Industrie und Gesellschaft in den Bereichen nanostrukturierte, «smarte» Materialien und Oberflächen, Umwelt-, Energie- und nachhaltige Gebäudetechnologien – Cleantech-Anwendungen – sowie Bio- und Medizinaltechnologien. Indem die Empa Forschungsergebnisse dank effizientem Technologietransfer gemeinsam mit Industriepartnern in marktfähige Innovationen umwandelt, trägt sie massgeblich dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit der Schweizer Wirtschaft zu stärken. Zudem schafft sie die wissenschaftlichen Grundlagen für eine nachhaltige Gesellschaftsentwicklung. Als Institution des ETH-Bereichs ist die Empa in all ihren Tätigkeiten der Exzellenz verpflichtet.

Empa
Abteilung Beton und Bauchemie

CH-8600 Dübendorf
Überlandstrasse 129

Telefon +41 58 765 44 15
Telefax +41 58 765 40 35
Mail beton@empa.ch



Materials Science & Technology

www.empa.ch/abt135