Zeitschrift: Cementbulletin
Herausgeber: Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton (TFB AG)
Band: 63 (1995)
Heft: 4

Artikel: Zusatzstoffe. Teil 1
Autor: Hermann, Kurt
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-153802

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

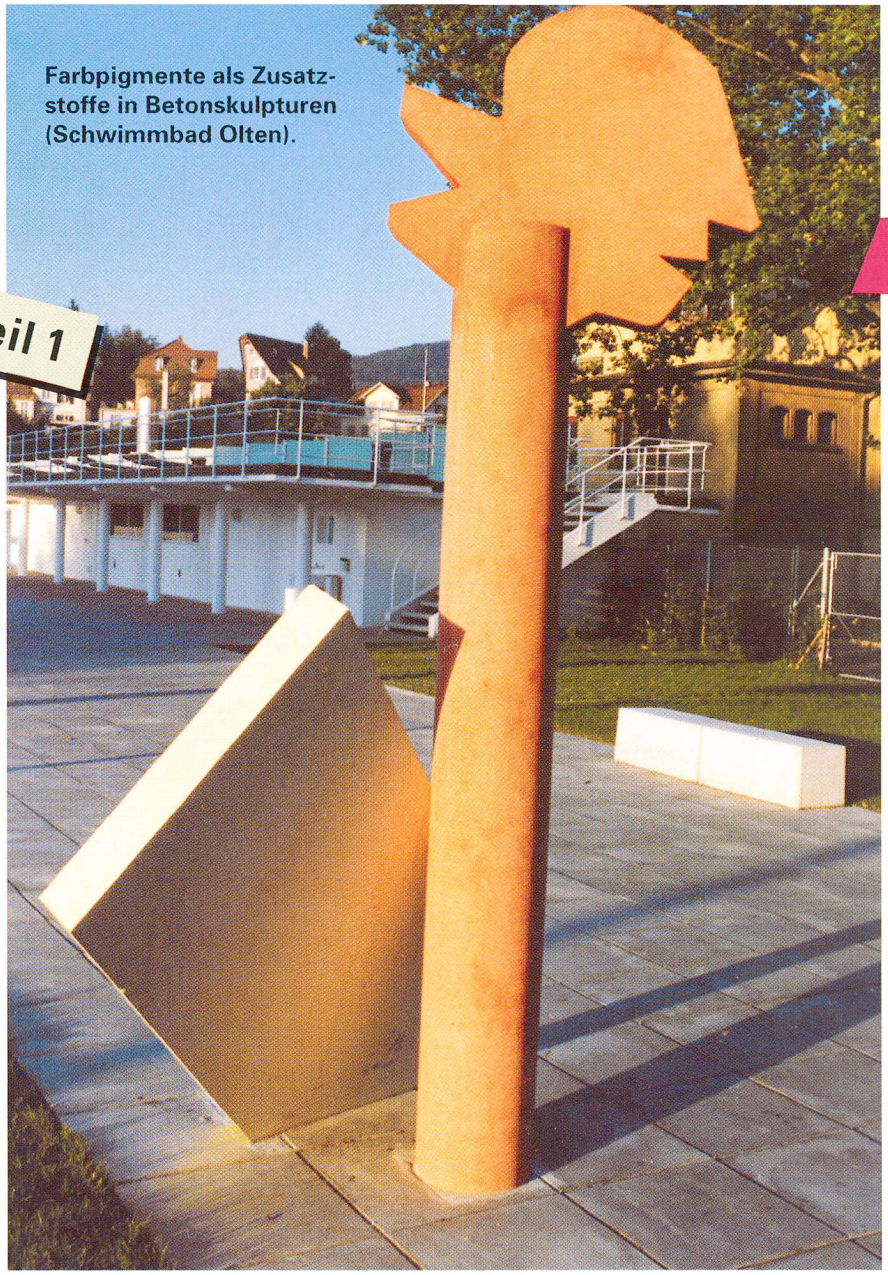
Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on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

Download PDF: 04.12.2025

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

Teil 1

Zusatzstoffe



Farbpigmente als Zusatzstoffe in Betonskulpturen (Schwimmbad Olten).

Fotos: TFB-Archiv

Betonzusatzstoffe werden dem Beton beigefügt, um bestimmte Eigenschaften zu verbessern oder besondere Eigenschaften zu erzielen.

Betonzusatzstoffe sind feine Stoffe, die einem Beton meistens in grösseren Mengen (häufig zwischen 5 und 20 % der Zementmenge) zugegeben werden. Viele Zusatzstoffe werden bereits im Zementwerk mit dem Zement vermischt. Dafür sprechen technische Gründe, denn vorgemischte Materialien lassen sich im Beton gleichmässiger verteilen. Zudem soll die Wirkung eines Zusatzstoffes unabhängig von der Art sein, wie er in den Beton gelangt.

Zusatzstoffe sollen durch chemische oder physikalische Wirkungen bestimmte Betoneigenschaften beeinflussen, beispielsweise

- Frischbetoneigenschaften (Luftgehalt, Konsistenz, Verarbeitbarkeit, Wasserrückhaltevermögen)
- Ansteifen, Erstarren und Erhärten bei Zusatzstoffen, die in den Reaktionsablauf des Zements mit dem Wasser eingreifen
- Eigenschaften des erhärteten Betons (Festigkeit, Dichtigkeit, Beständigkeit)
- Farbe des Betons

Hochleistungsbetone, die den Zusatzstoff Silicastaub enthalten, verleihen Bohrplattformen in der Nordsee Standfestigkeit und Dauerhaftigkeit.

Zusatzstoffe lassen sich in mineralische und organische Stoffe einteilen, wie dies in *Tabelle 1* geschieht. Von den dort aufgeführten Zusatzstoffen werden in der Schweiz bei weitem nicht alle in erwähnenswerten Mengen eingesetzt, da sie oder ihre Ausgangsstoffe nicht in der Natur vorkommen, nur in geringen Mengen in industriellen Prozessen anfallen oder gar eingeführt werden müssen. Einheimische «Kandidaten» für die Verwendung als Zusatzstoff sind Abfallprodukte aus der Metallherstellung und Flugaschen. Natürliche Produkte, wie vulkanische Aschen (Puzzolane), treten nicht in abbauwürdigen Mengen auf [1].

Am häufigsten werden in der Schweiz Flugaschen, Silicastäube, natürliche Puzzolane und Füller (Kalkstein!) sowie Expansiv- und Farbstoffe eingesetzt [1]. Sie werden im Verlauf der hier beginnenden mehrteiligen Serie über Betonzusatzstoffe ausführlicher behandelt werden. Kein Thema werden Stahl-, Kunststoff- und Glasfasern sein, die vor nicht zu langer Zeit Gegenstand von Artikeln im «Cementbulletin» waren [2–4], sowie Kunststoffdispersionen, die gegenwärtig noch selten angewendet werden [1].

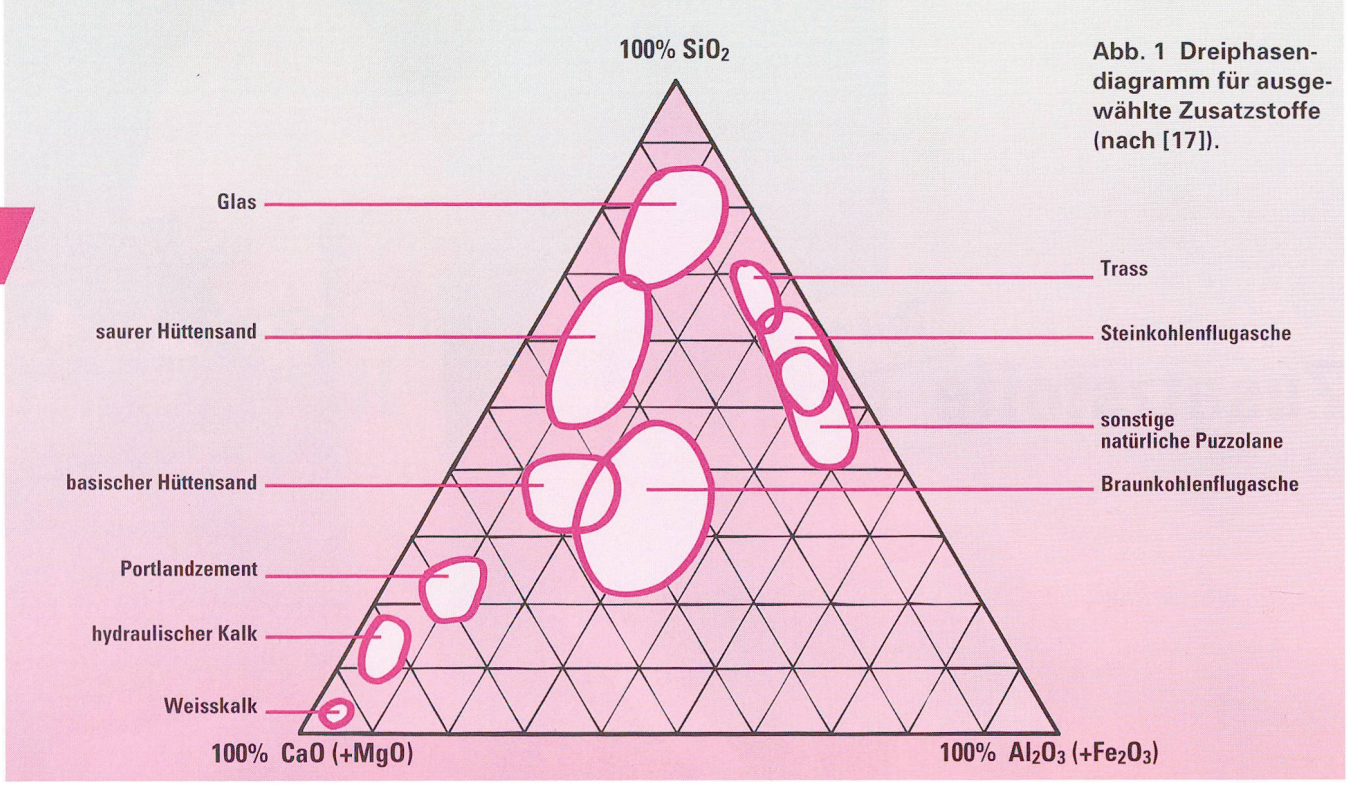


Abb. 1 Dreiphasendiagramm für ausgewählte Zusatzstoffe (nach [17]).

Grafik: TFB/S. Einfalt, ZSD

Zusatzstoffe in den Normen

Zusatzstoffe und Zusatzmittel (siehe [5–9]) werden in den SIA-Normen ungefähr gleich behandelt, nämlich recht rudimentär. Dies gibt dem Anwender einerseits viele Freiheiten, lässt ihn aber andrerseits auch oft im ungewissen darüber, wie sinnvoll der Einsatz dieser Materialien überhaupt ist.

In Norm SIA 162, Ziffer 5 14 41 werden Zusätze – gemeint sind Zusatzstoffe und Zusatzmittel – folgendermassen definiert [10]:

«Zusätze sind chemisch oder physikalisch wirksame Produkte, die in geringen Mengen dem im übrigen zweckmässig zusammengesetzten Beton zugegeben werden. Zusätze bzw. deren Wirkung sind bei der Betonzusammensetzung zu berücksichtigen.»

Weitere wichtige Vorschriften in der gleichen SIA-Norm sind:

- «Zusätze dürfen nur nach Absprache verwendet werden.» (Ziffer 5 14 42)
- Verschiedene Zusätze dürfen nur mit Zustimmung der Hersteller kombiniert werden (Ziffer 5 14 42).
- Die Eignung der Zusatzstoffe muss «durch systematische, schlüssige Vorversuche nachgewiesen werden. Insbesondere muss festgestellt werden, ob und in welchem Masse andere für die vorgesehene Verwendung relevante Betoneigenschaften ungünstig verändert werden». (Ziffer 5 14 43)
- «Zusätze, die die Korrosion von Stahl fördern können, sind nicht zulässig.» (Ziffer 5 14 44)
- «Die Mischdauer ist so zu wählen, dass eine homogene Verteilung der Zusätze im Beton sichergestellt ist. Die Angaben des Herstellers sind zu beachten.» (Ziffer 5 14 46)

Erwähnenswert ist schliesslich noch die Prüfung 17 in Norm SIA 162/1

Stoffart	Typ	Aktivität	Beispiele
mineralische Stoffe	hydraulisch	hochaktiv	• Spezialzemente • hydraulischer Kalk
	latent hydraulisch	hochaktiv	• Hüttensand (granulierte glasige Hochofenschlacke) • calciumreiche Flugaschen (kalkreiche Flugaschen)
	puzzolanisch	hochaktiv	• Silicastaub
		mittelaktiv	• calciumarme Flugaschen (kieselsäurereiche Flugaschen) • natürliche Puzzolane wie – vulkanische Gläser – vulkanische Tuffe – Trass – Phonolith – Diatomeenerden
		schwachaktiv	• kristalline Schlacken
	Füller	inert	• Steinmehle wie – Kalksteinmehl – Quarzmehl
	Fasern	inert	• Stahl- und Glasfasern
	Expansivstoffe	–	• Expansivzemente • Calciumoxid • gasfreisetzende Stoffe
	Farbpigmente	inert	• Metalloxide und -salze • Erdfarben • Kreide, Graphit
organische Stoffe			• Sepia, Karmin • Teerfarben • Anilinfarben
	Fasern	inert	• Kunststoffasern (Polypropylen, Polyamid)
	Kunststoff-dispersionen	–	• Dispersionen wie – Polyvinylpropionat – Polyvinylacetat – Polyacrylate – Styrolbutadienlatices – Neoprenlatex • Epoxidharzdispersionen

Tab. 1 Einteilung der Betonzusatzstoffe ([1], modifiziert).

Zusatzstoff	Herkunft	Einsatzform	mittlere chemische Zusammensetzung in %									mittlere Korngrösse	spezifische Oberfläche	Quelle
			SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	GV[1])	(µm)	(m^2/g)	
Portlandzement (CEM I)	Zementfabrik	Pulver	22,5 19,8	5,5 4,9	2,0 3,1	62,5 62,8	1,5 2,5	2,7 2,5	0,4 0,5	1,0 0,9	3,0 2,7		2,89 3,20	Werte aus Schweizer Fabrik
Hydraulischer Kalk	Kalkfabrik	Pulver	11–27	3–8	2–3	40–59	2–3	1,5–3,5			11–20		7–9	[18]
Ca-reiche Flugasche	Elektrofilterasche	Pulver	38	22	4	24	5	3	1	2	1	1–10	0,5–1	[1]
Ca-arme Flugasche	Elektrofilterasche	Pulver	48	28	9	4	2	1	1	2	5	1–10	0,5–1	[1]
Silikastaub (Microsilica)	Nebenprodukt bei der Ferrosiliziumproduktion	Pulver/Slurry	75–98	0,2–3	0,3–1	0,1–5	0,3–3,5	0,4–1,2			0,7–4	0,1–0,2	15–25	[15]
synthetisches SiO_2	künstlich hergestellt	Slurry/Pulver	> 98								0	0,02	170–200	[15]
Kalksteinmehl	gemahlenes Gestein	Pulver									> 40	1–10	0,5–1	[1]
Quarzmehl	gemahlenes Gestein	Pulver	> 95									1–10	0,5–1	[1]
rheinischer Trass	natürliches Puzzolan vulkanischen Ursprungs	Pulver	53	16	6	7	3				–			[16]
Santorinerde	vulkanische Asche	Pulver	65	14,5	5,5	3,0	1,1				3,5			[16]
Diatomeenerde (Kieselgur)	Sedimente	Pulver	86	2	2	–	1				5			[16]

[1]) Glühverlust

Tab. 2 Zusammensetzung ausgewählter Betonzusatzstoffe.

[11], in der Hinweise auf die Eignungsuntersuchungen von Zusätzen enthalten sind.
Seit der Einführung der Norm SIA 215.002 (ENV 197–1) [12] gelten mindestens für die Herstellung von Zementen mit Zusatzstoffen wie Puzzolanen, Flugaschen, Kalkstein oder Silicastaub Vorschriften für die Zusammensetzung dieser Zusatzstoffe. Und als CEN-Mitglied ist die Schweiz verpflichtet, die im September 1994 ratifizierte Norm EN 450 über Flugasche für Beton [13] in den Status einer nationalen Norm zu erheben.
In der Schweiz wurden nach der Einführung der ENV 197–1 als Norm SIA 215.002 [12] mehrere normierte Zemente mit Zusatzstoffen auf den Markt gebracht, beispielsweise

- Portlandkalksteinzement CEM II/A-L 32,5
- Portlandsilicastaubzement CEM II/A-D 52,5
- Portlandsilicastaubzement CEM II/A-D 52,5 R
- Portlandkompositzement CEM II/A-M 52,5

Gründe für die Verwendung von Zusatzstoffen

Ursprünglich wurden Zusatzstoffe aus ökonomischen Gründen eingeführt. Sie waren entweder als Naturprodukte vorhanden, die nur wenig behandelt werden mussten, oder sie fielen in industriellen Prozessen als Neben- oder Abfallprodukte an. Zudem stiegen die Energiekosten. Später kamen auch ökologische Gründe dazu. Zu diesen gehören Widerstände gegen die Erschliessung neuer Abbaugebiete für Rohmaterialien zur Zementklinkerherstellung sowie die Möglichkeit, industrielle Abfallmaterialien wie Hochofenschlacken, Flugaschen oder Silicastaub sinnvoll einzusetzen statt zu deponieren.
Unabhängig von diesen ökologischen und ökonomischen Vorteilen beeinflussen geeignete Zusatzstoffe teilweise die Eigenschaften von Beton im frischen und insbesondere im erhärteten Zustand in positivem Sinn. In vielen Ländern, in denen die entsprechenden Materialien verfügbar sind, hat dies zu einer starken Verbreitung von Betonen mit Zusatzstoffen geführt; ein gutes Beispiel sind die Hochofenzemente in Deutschland. Hinzu kommt, dass bestimmte Betone mit speziellen Eigenschaften (Betone mit niedriger Hydratationswärme, eingefärbte oder schwindkompensierte Betone usw.) ohne Zusatzstoffe nicht hergestellt werden können.

Reaktionsarten von Zusatzstoffen

Die Zusammensetzungen von Zusatzstoffen unterscheiden sich teilweise stark. Einen Überblick vermittelt *Tabelle 2,* in der auch Portlandzemente eingeschlossen sind. In *Abbildung 1* sind diese Unterschiede in einem Dreiphasendiagramm anhand der Gehalte an Calcium- und Magnesiumoxid, Siliziumdioxid sowie Aluminium- und Eisenoxid anschaulich dargestellt.
Zusatzstoffe können hydraulisch, latent hydraulisch oder puzzolanisch reagieren oder sich als Füller weitgehend inert verhalten. Zwecks

Foto: Bram van Egmond, TFB

Eine interessante Anwendung von Betonzusatzstoffen: eingefärbte Betonbeläge bei Bushaltestellen.

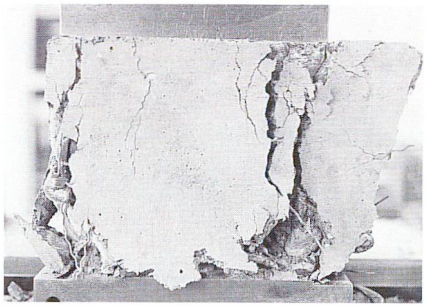


Foto: Kurt Haberstich, TFB

Beton, der Stahlfaser als Zusatzstoff enthält, verfügt über eine erhöhte Biegefestigkeit vor dem endgültigen Bruch; bei Druckbeanspruchung bricht er nach dem Auftreten von Rissen nicht sofort.

eines besseren Verständnisses dieser Begriffe werden sie hier kurz erklärt. Interessierten Lesern wird das Studium des Kastens «Was bei der Reaktion zwischen Zement und Wasser geschieht» empfohlen.

Hydraulische Bindemittel sind fein gemahlene mineralische Stoffe, die nach dem Anmachen mit Wasser sowohl an der Luft als auch unter Wasser (das heisst unter Luftabschluss) steinartig erhärten und danach wasserbeständig sind [14]. Hauptverantwortlich für das hydraulische Verhalten eines Bindemittels sind Verbindungen aus Calciumoxid (CaO), Siliziumdioxid (SiO_2, oft Kieselsäure genannt), Aluminiumoxid (Al_2O_3, Tonerde) sowie Eisenoxid (Fe_2O_3). Der wichtigste und bekannteste Vertreter hydraulischer Bindemittel ist der Portlandzement, der sich gegenüber anderen hydraulischen Bindemitteln vor allem durch die wesentlich höhere Festigkeit auszeichnet. Ein weiteres Beispiel, auf das zu einem späteren Zeitpunkt eingegangen wird, ist der hydraulische Kalk.

Latent hydraulische Stoffe sind in ihrer chemischen Zusammensetzung Portlandzementen recht ähnlich. Mit Wasser reagieren sie nur, wenn ein Anreger – beispielsweise Calciumhydroxid, $Ca(OH)_2$ – anwesend ist; der Anreger wird aber nicht in die Reaktionsprodukte eingebaut. Bekannteste Beispiele latent hydraulischer Stoffe sind Hüttensande und sogenannte kalkreiche Flugaschen.

Puzzolane weisen einen hohen Anteil an Siliziumdioxid («Kieselsäure») allein oder an Siliziumdioxid und Aluminiumoxid (Tonerde) auf. Sie reagieren mit Wasser und Calciumhydroxid zu festigkeitsbildenden Calciumsilikat- und Calciumaluminatverbindungen, die in ihrer Zusammensetzung und Struktur den Hydratationsprodukten von Portlandzementklinker (CSH und CAH) ähnlich sind [16]. Das Calciumhydroxid stammt aus den Hydratationsreaktionen von Portlandzementklinker. Betone, in denen Puzzolane einen Teil des Portlandzements ersetzen,

- weisen eine langsamere Festigkeitsentwicklung als Betone aus Portlandzementklinker auf,

Grafik: TFB/S. Einfalt, ZSD

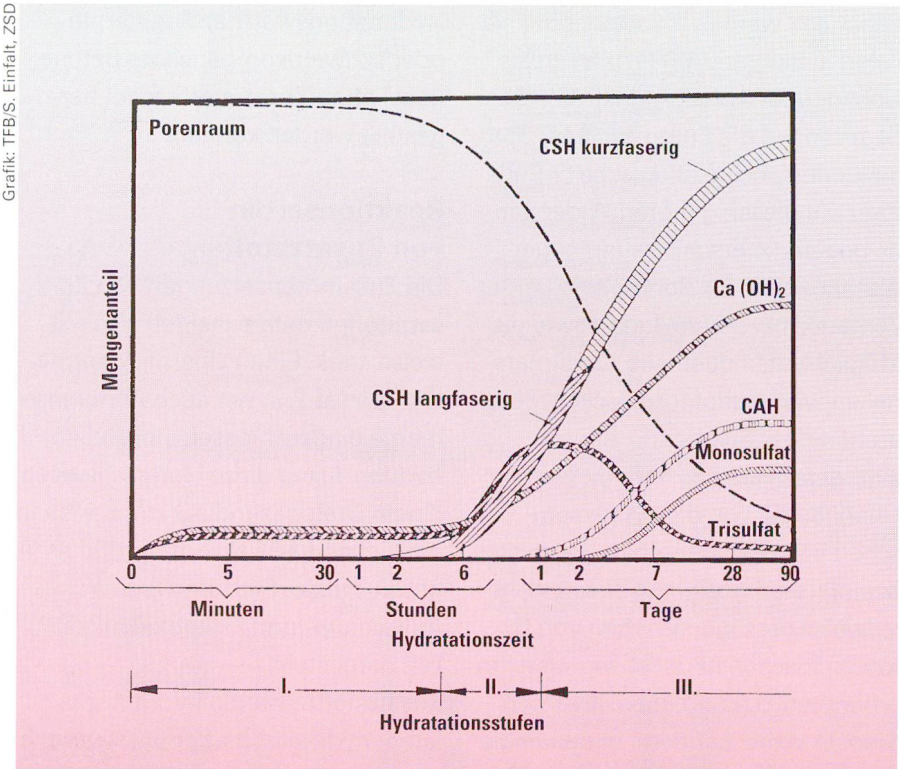


Abb. 2 Zeitlicher Verlauf der Bildung wichtiger Produkte bei der Hydratation von gipshaltigem Portlandzement ([17], modifiziert).

Was bei der Reaktion zwischen Zement und Wasser geschieht

Zusatzstoffe, die latent hydraulische oder puzzolanische Eigenschaften aufweisen, benötigen zur Reaktion Calciumhydroxid, $Ca(OH)_2$. Dieses ist jedoch im Portlandzement nicht in freier Form vorhanden. Es wird vielmehr erst durch die Reaktionen zwischen Klinkerbestandteilen und Anmachwasser gebildet. Ein Blick auf die dabei ablaufenden Reaktionen ist deshalb durchaus nützlich für das Verständnis gewisser Reaktionen von Zusatzstoffen in Betonen.

Im kürzlich erschienenen «Cementbulletin» über Verzögerer [8] wurde im Zusammenhang mit dem Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Beton bereits auf einige Aspekte der chemischen Reaktionen von Zementbestandteilen und Anmachwasser eingegangen. Dabei wurde vor allem der zeitliche Verlauf der Umsetzung von einzelnen Bestandteilen berücksichtigt. Dies geschieht hier erneut in ausführlicherer Form.

Portlandzement enthält als wichtigste Bestandteile vier sogenannte Klinkermineralien:

- rund 60 Massenprozent Tricalciumsilikat (C_3S oder $3\,CaO \cdot SiO_2$)
- rund 16 Massenprozent Dicalciumsilikat (C_2S oder $2\,CaO \cdot SiO_2$)
- rund 11 Massenprozent Tricalciumaluminat (C_3A oder $3\,CaO \cdot Al_2O_3$)
- rund 8 Massenprozent Tetracalciumaluminatferrit (C_4AF oder $4\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$)

Dabei stehen C für CaO, S für SiO_2, A für Al_2O_3 und F für Fe_2O_3. Entscheidend für die Festigkeitsentwicklung von Zementen sind die Klinkermineralien C_3S und C_2S. Diese reagieren sofort mit dem Anmachwasser, sie hydratisieren:

$$(1)\quad 2\,[3\,CaO \cdot SiO_2] + 6\,H_2O \rightarrow \underset{A}{3\,CaO \cdot 2\,SiO_2 \cdot 3\,H_2O} + 3\,Ca(OH)_2$$

$$(2)\quad 2\,[2\,CaO \cdot SiO_2)] + 4\,H_2O \rightarrow \underset{A}{3\,CaO \cdot 2\,SiO_2 \cdot 3\,H_2O} + 1\,Ca(OH)_2$$

Beide Hydratationsreaktionen führen zu den gleichen Produkten, $C_3S_2 \cdot 3\,H_2O$ und Calciumhydroxid, $Ca(OH)_2$, allerdings nicht in gleichen Mengen. Die *Gleichungen (1)* und *(2)* geben die tatsächlich auftretenden Reaktionen nur unvollständig wieder, denn die dort angegebene Zusammensetzung des Hydratationsproduktes **A** entspricht nur annähernd der Wirklichkeit. **A** wird deshalb häufig allgemein als Calciumsilikathydrat (CSH) bezeichnet.

Ein Teil des bei der Hydratation von C_2S und C_3S gebildeten $Ca(OH)_2$ reagiert mit den beiden anderen Klinkermineralien. Die Reaktionsprodukte, als Calciumaluminathydrate (CAH) zusammengefasst, unterscheiden sich nur im Fe_2O_3-Gehalt:

$$(3)\quad 3\,CaO \cdot Al_2O_3 + Ca(OH)_2 + 13\,H_2O \rightarrow 4\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13\,H_2O$$

$$(4)\quad 4\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + 4\,Ca(OH)_2 + 2x\,H_2O \rightarrow 2\,[4\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot x\,H_2O]$$

Die *Reaktion (3)* verläuft ausserordentlich schnell und würde ohne geeignete Gegenmassnahmen zu einer unerwünscht raschen Verfestigung des Betons führen. Durch die Zugabe von Calciumsulfat, das dem Zement als Gips ($CaSO_4 \cdot 2\,H_2O$) oder Anhydrit ($CaSO_4$) beigesetzt wird, lässt sich dies unterbinden: C_3A und $CaSO_4$ bilden sehr feine Kristalle von Ettringit ($3\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3\,CaSO_4 \cdot 32\,H_2O$), die sich auf der Oberfläche der C_3A-Teilchen niederschlagen und ihre Weiterreaktion verlangsamen. Ettringit (auch Trisulfat genannt) wandelt sich im Verlauf der Zeit in Monosulfat ($3\,CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12\,H_2O$) um.

Einen guten Überblick über den zeitlichen Ablauf der einzelnen Hydratationsreaktionen gibt *Abbildung 2:* In der ersten Stufe werden hauptsächlich Ettringit und wenig $Ca(OH)_2$ gebildet. Mit der Entstehung von langfaserigen, ineinander verschlungenen CSH-Kristallen beginnt die zweite Phase, in der wesentlich mehr $Ca(OH)_2$ freigesetzt wird und sich das Gefüge verfestigt. In der dritten Phase schliesslich wachsen kurzfaserige CSH- und CAH-Kristalle in die noch vorhandenen Poren hinein. Sie verdichten das Gefüge und erhöhen die Festigkeit. Trisulfat wandelt sich in Monosulfat um, und das reichlich vorhandene $Ca(OH)_2$ steht gegebenenfalls für Reaktionen mit Zusatzstoffen zur Verfügung.

- führen bei massigen Bauteilen zu einer geringeren Erwärmung und einer stärkeren Nacherhärtung in höherem Alter und
- erfordern ein ausreichendes Feuchteangebot über einen längeren Zeitraum.

Puzzolane können aus natürlichen Quellen stammen (Trass) oder künstlichen Ursprungs sein (Steinkohlenflugaschen, Silicastaub).

Füller sind besonders ausgewählte natürliche oder künstliche anorganische Stoffe, die aufgrund ihrer Korngrössenverteilung die physikalischen Eigenschaften von Portlandzement (Verarbeitbarkeit, Wasserrückhaltevermögen) verbessern. Sie können inert sein, puzzolanische, geringe oder latent hydraulische Eigenschaften aufweisen [12]. Zu den Füllern gehören beispielsweise Kalkstein (Calciumcarbonat) oder Quarzmehl.

Kurt Hermann

Literatur

[1] *Brianza, M.*, «Betonzusatzmittel», schriftliche Unterlagen zum TFB-Seminar «Betonzusatzmittel und -zusatzstoffe» vom 27. Oktober 1994 in Wildegg.

[2] *Hermann, K.*, «Stahlfaserbeton», Cementbulletin **60** [7], 1–8 (1992).

[3] *Hermann, K.*, «Kunststoffaserbeton», Cementbulletin **60** [8], 1–8 (1992).

[4] *Hermann, K.*, «Glasfaserbeton», Cementbulletin **60** [9], 1–8 (1992).

[5] *Hermann, K.*, «Zusatzmittel», Cementbulletin **62** [9], 3–7 (1994).

[6] *Hermann, K.*, «Zusatzmittel: BV und HBV», Cementbulletin **62** [10], 3–7 (1994).

[7] *Hermann, K.*, «Zusatzmittel: LP», Cementbulletin **62** [11], 3–7 (1994).

[8] *Hermann, K.*, «Zusatzmittel: VZ», Cementbulletin **62** [12], 3–7 (1994).

[9] *Hermann, K.*, «Zusatzmittel: BE», Cementbulletin **63** [1], 3–7 (1995).

[10] Norm SIA 162, «Betonbauten» (Ausgabe 1993).

[11] Norm SIA 162/1, «Betonbauten – Materialprüfung» (Ausgabe 1989).

[12] Norm SIA 215.002, «Zement – Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien; Teil 1: Allgemein gebräuchlicher Zement» (Ausgabe 1993).

[13] EN 450:1994, «Flugasche für Beton – Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung» (ratifiziert am 9. Sept. 1994).

[14] *Weigler, H.*, und *Karl, S.*, «Beton: Arten – Herstellung – Eigenschaften», Verlag Ernst & Sohn, Berlin (1989), Seiten 83–96, 118.

[15] *Linder, R.*, «Silica für Beton-Bauteile und -Waren?», Betonwerk + Fertigteil-Technik **58** [11], 63–68 (1992).

[16] «Proposed report: Use of natural pozzolanes in concrete», ACI Materials Journal **91** [4], 410–426 (1994).

[17] *Wesche, K.*, «Baustoffe für tragende Bauteile», Bauverlag, Wiesbaden, 2. Auflage (1981), Band 2, Seiten 36 bzw. 44.

[18] «Hydraulischer Kalk – Eigenschaften/Anwendungen», herausgegeben von der TFB, Wildegg (1987).