

3A 12 60A

2810-1000

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN - MPA BRAUNSCHWEIG

IBMB

TU BRAUNSCHWEIG

Hydraulisch erhärtende Baustoffe aus Betonbrechsand – Phasenveränderungen durch Temperaturbehandlung und Einsatzmöglichkeit

**von
Bernd Dora**

Heft 161

**BRAUNSCHWEIG
ISBN 3-89288-142-1
ISSN 1439-3875**

2001

Diese Arbeit ist die vom Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität Braunschweig genehmigte Dissertation des Verfassers.

Eingereicht am: 12. Juni 2001
Mündliche Prüfung am: 24. Oktober 2001
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmidt



K
B. C.
...
...

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Baustoffkunde der Universität Gesamthochschule Kassel (GhK) und am Fachgebiet Baustoffe und Stahlbetonbau des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig. Der Arbeit liegt ein Forschungsvorhaben zugrunde, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter Az. BU 730/6 mit dem Thema „Rückführung der Feinbestandteile mineralischen Bauschutts in den Stoffkreislauf durch thermische Aufbereitung“ in dankenswerter Weise gefördert wurde.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann, der mir diese Arbeit ermöglichte und sie durch sein wissenschaftliches Interesse an diesem Themengebiet und seine stetige Diskussionsbereitschaft förderte. Ebenso wichtig war die Unterstützung, die ich durch meine Familie und meinen Eltern erhielt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmidt danke ich für seine Arbeit, die er als Mitberichter hatte. Herrn Prof. em. Dr. Dr. F. S. Rostásy danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Fricke für die Beteiligung an der Prüfung.

Bei allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der Fachgebiete Baustoffkunde (Uni Gh Kassel) sowie Baustoffe und Stahlbetonbau (TU Braunschweig) möchte ich mich für die jederzeit sehr gute Zusammenarbeit bedanken, vor allem bei Dr. Bernhard Middendorf und Matthias Gehrke. Außerdem möchte ich mich bei meinen studentischen Hilfskräften, insbesondere Carsten Geisenhanslücke, Peggy Handschugg und Marcus Klinge, aus der Kasseler Zeit bedanken.

Kassel/Braunschweig, im November 2001

Bernd Dora

Summary

Phase condition of crushed concrete sand

Crushed concrete sand from recycling plants contains a mixture of mineral components. Its ratio of hardened cement paste to aggregate is much higher than the ratio of the originally used concrete. Crushed sand consists of great amounts of hydrated cement phases as well as amounts of calcium hydroxide (portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) and calcium carbonate (calcite, CaCO_3). The aggregate of concrete sand mostly consists of quartzitic and/or carbonatic phases; moreover, there are several additives often used for concrete such as trass, fly ash, blast furnace slag, silica fume and others.

The main phases of hardened cement paste are:

- calcium silicate hydrate (50-60%)
- calcium hydroxide (20-25%)
- hydrated aluminate-, ferrite-, and sulfate phases (10-15%)
- traces of non-hydrated cement

Phase reactions of concrete at elevated temperatures

During drying processes free water and starting at temperatures of about 100°C parts of physically bonded water are set free. These processes remain nearly constant in the temperature range between 100°C and 200°C. At temperatures below 300°C chemically bonded water (dehydration) is already released, combining the processes of decomposition, transformation and new growth of phases. These processes and reactions cannot be related to an exactly defined range of temperatures as the cement stone, which consists of many compounds, as composition and hydration conditions. The dehydration of hydrate phases carries on continually at higher temperatures, but complete dehydration of the CSH-phases needs temperatures highly above 300°C. Between 450 - 550°C the decomposition of calcium hydroxide into calcium oxide and water starts. At 573°C a transformation of quartz happens. This so-called quartz inversion is a structural transformation from $\alpha\text{-SiO}_2$ to $\beta\text{-SiO}_2$, generally also known as transformation from low- to high quartz.

For a thermal treatment of crushed concrete sand, transformation and decomposition of hydrate phases starting at 400 - 600°C are the most important reactions. With the decomposition of CSH-phases the simultaneous forming of C₂S-phases occurs and thereby hydraulically reactive parts are formed into crushed concrete sand. The formation of reactive C₂S is very important for the thermal conditioning of crushed concrete sand. The controlling temperature range for the new growth of the C₂S phase is between 650-900°C.

Another important reaction for the thermal treatment of crushed concrete sand is the decarbonization of calcium carbonate, which results in an increase of free lime (CaO). The latter is also formed by the following reactions: by decomposition of portlandite and calcite and through degradative reaction of CSH-phases at high temperatures. Hence, a part of free lime is integrated in the newly grown phases during the decomposition process of the CSH-phases and the formation of C₂S. Due to that fact the content of free lime increases continually with rising temperatures and temperatures above 800-900°C.

The effort to treat crushed concrete sand at very high temperatures to get hydraulic products must guarantee that the content of free lime is very low to avoid expansion of concrete or mortar which has been produced with thermally treated crushed concrete sand.

Investigations of production of hydraulic active phases

Tasks

The aim is to give or give back hydraulic properties to crushed concrete sand which makes it possible that this material gets a new use as a binder component for the production of mortar or concrete.

Materials and the program of tests

The crushed concrete sand was produced from concrete. Cement, type CEM I 32,5 R, acc. to DIN 1164 was used as binder. The water-cement-ratio was 0,5 and quartzitic gravel within the grading curve range of A/B 16 acc. to DIN 1045 was used as aggregate. The production was done in cylindrical forms. The samples were stored for 7 days in water before they hardened in a climatic chamber at 20°C and 65% relative humidity.

After a period of ≥ 180 days the samples were crushed with a jaw crusher and the crushed concrete sand was sieved to $< 0,25$ mm. The determination of binder content in these fine particles of the crushed concrete sand acc. to DIN 52170 showed a content of 50 % binder and 50 % aggregate.

The fine crushed concrete sand ($< 0,25$ mm) was treated with temperatures between 400° - 1000° C at intervals of 50° C. The cooling down process was the same for all samples, spreading on a sheet at room temperature. An x-ray phase analysis was done before and after the thermal treatment (chapter 6). With tempered crushed sand as binder and standard sand as aggregate mortar prisms were produced acc. to DIN 18555, part 1, with a binder to aggregate ratio of 1:3 by volume parts. The results shown in the following give an average value for a series of measurements on three mortar prisms. The mortar prisms were stored at 20° C/65% relative humidity or 20° C/under water. Mechanical properties of the prisms were determined after 7 and after 28 days (chapter 7).

Test results

Thermogravimetric analysis

From the TG/DTG and DTA curves in chapter 6 the phase changes temperatures below 1500° C can be seen.

Up to about 105° C drying takes place. At about 450° C there is degradation of portlandite and CSH-phases and between 750 - 800° C calcium carbonate is decomposed. As a result, 700° C was chosen as a suitable temperature of treatment. For this temperature a relatively high C_2S -content can be expected together with a low content of free lime.

Phase analysis by x-ray diffraction method

The formation of C_2S after a treatment with temperatures of 700° C can be analyzed with x-ray diffraction (x-rays used: $CuK_{\alpha 1}$). In chapter 6 the intensities of untreated crushed concrete sand (lower curve) and those of crushed concrete sand after temperature treatment are shown. Before treatment the reflexes of CSH-phases, after

treatment the presence of C_2S are marked. In both diagrams the reflexes of quartzitic aggregate (quartz) within crushed concrete sand are marked.

Determination of CSH-phases with SEM

The newly grown CSH-phases, causing the development of mechanical strength, can be proved with the help of a scanning electron microscope (SEM) (see chapter 6).

Variation of temperature level

In order to confirm the optimal treatment temperature of $700^{\circ}C$ for the crushed concrete sand examined here, compressive strength was determined for mortar prisms acc. to DIN 1164 for a temperature range between $400-1000^{\circ}C$.

The results given in chapter 7 show that the treatment with a temperature of $700^{\circ}C$ results in crushed concrete sands with highest levels of strength. Below $700^{\circ}C$ there is not enough C_2S for hydraulic reactions. For higher temperatures a loss of strength is observed due to a growing amount of free lime (CaO) which has a weakening effect.

Variation of maximum grain size

For ecological and economical aspects it is important to choose a maximum grain size of crushed concrete sand as large as possible. Therefore crushed concrete sands with different maximum grain sizes were treated thermally and used as binder in mortars afterwards. Chapter 7 shows that the highest compressive strength of mortar can be reached if the thermally treated crushed concrete sand had a maximum grain size up to 0,25 mm. A finer grinding or sieving does not result in higher degrees of strength. An increased maximum grain size results in a drop of strength, because the reactive surface is smaller.

Variation of holding time

After determining the optimal temperature of treatment, the duration of treatment was optimized. Chapter 7 shows that the highest degrees of strength can be reached by a holding time of 30 minutes. Shortening the period of treatment does not result in the

phase changes wanted. A period of treatment longer than 30 minutes is more negative, because of growing production of free lime.

Variation of storage of the mortar prisms

Comparing the degrees of compressive strength after 7 or 28 days it can be seen that depending on the way of storing there is an increase of strength for storage under water and a loss of strength for storage in climate 20/65 after the 7th day, related to the 7-days- strength. The cause of a loss of strength for storage 20/65 is a stop of hydration due to drying.

Résumé

By means of thermal conditioning of crushed concrete sand hydraulically reactive C_2S -phases can be produced in the sand. As identified, hydraulic properties are gained back for crushed concrete sand, which make it possible to use it as a binder for the production of mortars. $700^\circ C$ is the optimal temperature for treatment if C_2S is supposed to be produced in crushed concrete sand. The optimal holding time in a laboratory oven or the holding time in a rotary kiln is 30 minutes. Mortars produced from thermally conditioned crushed concrete sand as a binder have a higher porosity than mortars that were produced with usual cement. The porosity can be reduced by careful follow-up storage, which also results in higher degrees of strength. Mortars belonging to mortar group IIa ($f_c > 7 \text{ N/mm}^2$) acc. to DIN 18555 can be produced without using ordinary cement. In concrete it is possible to substitute the ordinary cement content up to 50% by thermal treated crushed concrete sand. Further it is possible to produce a kind of "lime-sand-stones" from crushed concrete sand after an extra autoclaving process (chapter 8).

Inhaltsverzeichnis

Summary	I
Inhaltsverzeichnis	VI
Liste der Abkürzungen	XII
1 Einleitung	1
1.1 Überblick	1
1.2 Notwendigkeit der Verwertung	2
1.3 Zielstellung	3
1.4 Aufbau der Arbeit	7
1.5 Begriffsdefinitionen	8
2 Aufkommen und derzeitiger Einsatz von Brechsanden aus Bauschutt	10
2.1 Bauschutt aufkommen	10
2.2 Zusammensetzung und Einsatzgebiete von Brechsanden	12
2.2.1 Allgemeines	12
2.2.2 Betonbrechsand	14
2.2.3 Ziegelbrechsand	16
2.2.4 Kalksandsteinbrechsand	16
2.2.5 Brechsandgemische	17
3 Kenntnisstand zur Phasenumwandlung durch hohe Temperatur	19
3.1 Ausgangsstoffe im Betonbrechsand	19
3.2 Ergebnisse bisheriger Untersuchungen	21
3.3 Verhalten von Beton bei thermischer Beanspruchung bis 600°C	23
3.4 Verhalten von Beton bei thermischer Beanspruchung im Temperaturbereich von 600 - 1000°C	25
3.5 Verhalten von Beton bei thermischer Beanspruchung im Temperaturbereich von 1000 - 1450°C	29

3.6	Festigkeitsverhalten zementhaltiger Stoffe nach einer Temperaturbehandlung	29
4	Die Herstellung von Zement und hydraulischem Kalk	31
4.1	Zementherstellung	31
4.1.1	Ausgangsstoffe	31
4.1.2	Herstellungsprozeß	32
4.1.3	Phasenberechnung	34
4.1.4	Energieeinsatz	35
4.2	Herstellung hydraulischer Kalke	36
4.2.1	Ausgangsstoffe	36
4.2.2	Herstellungsprozeß	37
4.2.3	Energieeinsatz	38
5	Versuchsprogramm	39
5.1	Allgemeines zur Baustoffherstellung und -behandlung	39
5.2	Ausgangsstoffe	40
5.2.1	Betonbrechsand	40
5.2.2	Ziegelbrechsand und Kalksandsteinbrechsand	44
5.2.3	Verunreinigungen	44
5.3	Thermische Behandlung	44
5.3.1	Öfen	44
5.3.2	Aufheizrate	47
5.3.3	Behandlungstemperatur	47
5.3.4	Haltezeit	48
5.3.5	Abkühlung	48
5.4	Baustoffherstellung aus temperiertem Brechsand	48
5.4.1	Mörtel	48
5.4.2	Halbzeug (künstliche Steine)	50
5.5	Untersuchungsarten und -umfang	51
5.5.1	Phasenbestand	51
5.5.2	Frischmörteleigenschaften, Verarbeitbarkeit	57
5.5.3	Festigkeitseigenschaften	58

5.5.4	Verformungsverhalten	59
5.5.5	Porenaufbau und Wasseraufnahme	62
6	Untersuchungsergebnisse zum Phasenbestand des Ausgangs-, thermisch behandelten und weiterverarbeiteten Materials	66
6.1	Allgemeines	66
6.2	Chemische Zusammensetzung der Brechsande	66
6.3	Thermoanalytische Untersuchungsergebnisse	68
6.3.1	Thermogravimetrie (TG, DTG)	68
6.3.2	Differentialthermoanalyse (DTA)	74
6.4	Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalyse zum Kristallphasenbestand	80
6.4.1	Kristalline Phasen von Betonbrechsand nach definierter Temperaturbehandlung bis 1350°C	80
6.4.2	Kristalline Phasen in Mörtel aus temperaturbehandeltem Betonbrechsand	87
6.4.3	Kristalline Phasen in Mörtel aus temperaturbehandeltem Betonbrechsand in Abhängigkeit vom Mörtelalter	91
6.4.4	Kristalline Phasen in Brechsand aus Beton, Ziegel, Kalksandstein und in Brechsandgemischen	94
6.4.5	Kristalline Phasen in Brechsand aus Abbruchbeton von der Halde	97
6.4.6	Kristalline Phasen in thermisch behandeltem Zementstein	97
6.4.7	Kristalline Phasen in thermisch behandeltem Betonbrechsand mit calcitischem Zuschlag	102
6.4.8	Kristalline Phasen in thermisch behandeltem Betonbrechsand bei unterschiedlicher Temperierungsdauer	104
6.4.9	Kristalline Phasen in thermisch behandeltem Betonbrechsand bei unterschiedlicher Aufbereitung	105
6.4.10	Einfluß von Alkali und Salz im Betonbrechsand auf den kristallinen Phasenbestand	106
6.4.11	Einfluß von Zuschlagvariationen im Mörtel auf den kristallinen Phasenbestand	107

6.4.12	Einfluß der Variation der Mörtellagerung auf den kristallinen Phasenbestand	108
6.5	Ergebnisse der Strukturuntersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskopie	109
7	Technologische Eigenschaften von Mörtel aus thermisch behandeltem Brechsand	117
7.1	Frishmörteleigenschaften	117
7.1.1	Allgemeines	117
7.1.2	Erforderliche Anmachwassermenge	117
7.1.3	Ansteifverhalten von Mörtel mit Brechsandzuschlag	118
7.1.4	Luftporengehalt	119
7.1.5	Frishmörtelrohddichte	120
7.2	Einfluß der Parameter der Temperaturbehandlung von Betonbrechsand auf die Mörteldruckfestigkeit	121
7.2.1	Allgemeines	121
7.2.2	Einfluß der Temperaturhöhe	122
7.2.3	Einfluß der Haltezeit	123
7.2.4	Einfluß der Lagerungsdauer von Betonbrechsand nach der Temperaturbehandlung	123
7.2.5	Einfluß des Größtkorns des Betonbrechsandes	124
7.2.6	Einfluß einer Vorbehandlung des Brechsandes vor Temperierung durch Aufmahlung	125
7.2.7	Einfluß einer Nachbehandlung des Betonbrechsandes nach Temperierung durch Aufmahlung	125
7.2.8	Einfluß wiederholter thermischer Aufbereitung	125
7.2.9	Einfluß der Ofenart	126
7.3	Einfluß der Brechsandzusammensetzung auf die Mörteldruckfestigkeit	126
7.4	Einfluß der Mörtelzusammensetzung und -lagerung auf die Mörteldruckfestigkeit	130
7.4.1	Allgemeines	130
7.4.2	Variation der Bindemittelzusammensetzung	130

7.4.3	Variation des Wasser/Bindemittel Wertes und der Einfluß von Zusatzmitteln	131
7.4.4	Einfluß des Zuschlags	132
7.4.5	Einfluß der Lagerungsart und -dauer	133
7.5	Biegezugfestigkeit	134
7.6	Verformungsverhalten	135
7.6.1	Raumbeständigkeit	135
7.6.2	Dynamischer und statischer Elastizitätsmodul	136
7.6.3	Quell- und Schwindverformung	140
7.7	Porenaufbau und Wasseraufnahme	143
7.7.1	Porosität	143
7.7.2	Wasseraufnahme	144
8	Weiterverarbeitung von Brechsand zu künstlichen Steinen	146
9	Empfehlungen zum Praxiseinsatz von Betonbrechsand	149
9.1	Allgemeines	149
9.2	Ermittlung des maximal möglichen Brechsandanteiles als Bindemittelsubstitut für zementgebundene Baustoffe	151
9.3	Einsatz in Mörtel, Putz und Estrich	155
9.4	Einsatz in Beton	156
9.5	Einsatz als Halbzeug (Künstliche Steine)	156
9.6	Einsatz von BBS als Rohmehlsupstitut bei der Zementherstellung	157
10	Zusammenfassung, Schlußfolgerungen und Ausblick	159
11	Quellen	163
11.1	Literaturverzeichnis	163
11.2	Zitierte Normen und Richtlinien	171
Anhang		175
Tabellarischer Lebenslauf		179

Liste der Abkürzungen

Probenbezeichnungen

ABB	Abbruchbeton undefinierter Zusammensetzung
BBS	Betonbrechsand <250µm, thermisch behandelt als Bindemittelsubstitut
BS	Brechsandgemisch <250µm, thermisch behandelt als Bindemittelsubstitut
CEM, CEM I	Normzement bzw. Portlandzement nach DIN 1164
KSB	Kalksandsteinbrechsand <250µm, thermisch behandelt als Bindemittelsubstitut
ZBS	Ziegelbrechsand <250µm, thermisch behandelt als Bindemittelsubstitut
-N	Normsand, Zuschlag nach DIN 1164
-U	Unbehandelter Betonbrechsand als Zuschlag
-B	Thermisch behandelter Betonbrechsand als Zuschlag
Λ	abgesiebt
G	gemahlen
Qz	quarzitischer Zuschlag
Cc	calcitischer Zuschlag
Cl	Chlorid
Na	Natrium (Alkalie)

Abkürzungen der Zementchemie

An	Anorthoklas, $\text{NaO}_{0,71}\text{K}_{0,29}\text{AlSi}_3\text{O}_8$
Afm	Aluminatferrit-Monosulfat
Aft	Aluminatferrit-Trisulfat
C	Calciumoxid, CaO
C ₂ (AF)	Calciumaluminatferrit

C ₂ S	Dicalciumsilikat, Belit
C ₃ A	Tricalciumaluminat
C ₃ A(Cs)H ₁₂	Monosulfat
C ₃ S	Tricalciumsilikat, Alit
C ₄ (AF)H ₁₃	Tetracalciumaluminatferrithydrat
C ₄ AH ₁₃ , C ₄ AH ₁₁	Tetracalciumaluminathydrat
CAS	Calciumaluminatsilikat
CASH	Calciumaluminatsilikathydrat
Cc	Calciumcarbonat, CaCO ₃
CH	Calciumhydroxid, Portlandit, Ca(OH) ₂
CHS	Christobalith
CS	Calciumsilikat, Wollastonit
Cs	Calciumsulfat, CaSO ₄
CSH	Calciumsilikathydrat
Et	Ettringit, C ₃ A(Cs)H ₃₃
Gy	Gips
H	Hämatit, Fe ₂ O ₃
I	Illit, KAlSi ₃ OOH
Mc	Microclin, KAlSi ₃ O ₈
O	Orthoklas, KAlSi ₃ O ₈
T	Tobemorit, Ca ₅ (OH) ₂ Si ₆ O ₁₆ *4H ₂ O

Abkürzungen für Geräte bzw. Methoden

DSC	Differenzialthermokalorimetrie (Differenzial-Scanning-Calometrie)
DTA	Differenzialthermoanalyse
EDX	energiedispersive Röntgenanalytik
MIP	Quecksilberdruckporosimetrie (Mercury Intension Porosimeter)
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RFA	Röntgen-Fluoreszenz-Analyse

TA	Thermoanalyse
TG	Thermogravimetrie
XRD	Röntgenbeugungsanalyse

Weitere Abkürzungen

°C	Grad Celsius, Behandlungstemperatur
α	Beiwert, abhängig von der Brechsandzusammensetzung
α_B	Bindemittel-Beiwert
α_Z	Zuschlag-Beiwert
α_i	Abminderungs- bzw. Erhöhungsbeiwert
ABM	Ausbreitmaß
BM	Bindemittel
B/Z	Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis
β_{BZ}	Biegezugfestigkeit
$\beta_{BZ,max}$	Maximum der Biegezugfestigkeit
β_D	Druckfestigkeit
$\beta_{D,BBS}$	Druckfestigkeit von Mörtel mit Betonbrechsand
$\beta_{D,BS}$	Druckfestigkeit von Mörtel mit Brechsand allgemein
$\beta_{D,erf}$	erforderliche Druckfestigkeit
$\beta_{D,max}$	Maximum der Druckfestigkeit
$\beta_{D,Standard}$	Druckfestigkeit der Standartrezeptur von 10 N/mm ²
d	Tag(e)
DS	Deckschicht
dyn. E-Modul	dynamische Elastizitätsmodul
E_C	Elastizitätsmodul von Beton allgemein
$E_{C,BBS}$	Elastizitätsmodul von Beton mit Betonbrechsand
E_{C_0}	Grundwert des Elastizitätsmoduls
f_{cm}	mittlere Druckfestigkeit

FM	Fließmittel
FTW	Frost-Tau-Wechsel
GT	Gebundene Tragschicht
h	Stunde(n)
K1, K2, K3	Konsistenzbereich
KSt	Kalkstandard
MG	Mörtelgruppe
M.-%	Massenprozent
N/mm ²	Festigkeit in Newton pro Quadratmillimeter
OB	Oberbau
P	Putz
Q/S	hygrisches Quellen und Schwinden
r	Porenradius
stat. E-Modul	Statischer Elastizitätsmodul
UT	Ungebundene Tragschicht
Vol.-%	Volumenprozent
W/B	Wasser/Bindemittel-Verhältnis
W/Z	Wasser/Zementwert
ZE	Zementestrich
µm	Länge in Mykrometer
ω	Wasseraufnahmekoeffizient
20/65	20°C und 65% relative Luftfeuchtigkeit
20/U	20°C und Unterwasserlagerung

1 Einleitung

1.1 Überblick

Bei der Aufbereitung von Altbeton und Bauschutt (mineralische Baustoffgemische) durch Brechen, z.T. mit dem Ziel der Herstellung von Sekundärzuschlag für Beton fällt je nach verwendetem Brechertyp ein erheblicher Anteil als Brechsand an (≤ 2 bzw. 4 mm Korndurchmesser). So ist nach [DFG 1996] mit einem Anteil von 20 bis 40 M.-% ≤ 2 mm bzw. 30 bis 60 M.-% ≤ 4 mm zu rechnen.

Bisher vorliegende Versuchsergebnisse zu den technologischen Eigenschaften von Beton unter Verwendung von Zuschlag aus Betonsplitt und mineralischen Baustoffgemischen haben gezeigt, daß die alleinige Verwendung von Brechsand im Korngrößenbereich des Sandes zu erheblichen Problemen sowohl bei der Verarbeitbarkeit als auch bei verschiedenen Festbetoneigenschaften (z. B. Verformungsverhalten und Dauerhaftigkeit) führen kann [Budelmann 1999b].

Den bei der Aufbereitung als Sand anfallenden Kornfraktionen wendet sich diese Arbeit zu, wobei das Hauptaugenmerk auf Betonbrechsand liegt. Es wird experimentell und theoretisch untersucht, inwieweit durch eine Behandlung bei erhöhter Temperatur hydraulische Eigenschaften zurückgewinnbar sind, die eine Wiederverwertung als Bindemittel oder hydraulischen Zusatzstoff, eventuell auch mehrfach, im Sinne einer Kreislaufführung, sinnvoll werden lassen.

Der Ausgangspunkt ist i. w. der Kenntnisstand über den Abbau der Hydratphasen und die Neubildung der Klinkerphasen des Zementsteins bei Einwirkung hoher Temperatur durch Brandbeanspruchung. Wesentliche Untersuchungsparameter sind der Ausgangsstoff Betonbrechsand, nichtmineralische Verunreinigungen, andere mineralische Beimengungen, die Temperaturbelastung und der anschließend damit hergestellte Baustoff. Als Zielbaustoffe werden hydraulisch aktive Bindemittel und Zement substituierende Zusatzstoffe sowie Halbzeuge (Mauersteine) verfolgt. Die Eigenschaften des Zielbaustoffes in Abhängigkeit vom Ausgangsstoff und dessen Zusammensetzung sowie von der Behandlung werden charakterisiert; quantitative Einsatzgrenzen werden abgeleitet.

1.2 Notwendigkeit der Verwertung

Die Wiederverwertung von Altbeton aus abgebrochenen Bauwerken ist aus mehreren Gründen unverzichtbar. Die anfallende Altbetonmenge wächst, gleichzeitig wird die Deponierung teurer (z.T. 150 - 300 DM/t) und schwieriger. Die technischen Anforderungen an die Ablagerung von Abfällen befinden sich derzeit durch die Auswirkungen der EG-Deponierichtlinie [EG 1998] auf die TA Siedlungsabfall [BMU 1993] im Umbruch. Derzeit betriebene und vor Inkrafttreten der TA Siedlungsabfall [BMU 1993] genehmigte Deponien werden nur noch aus Gründen der Entsorgungssicherheit bis spätestens ab 1. Juni 2005 in der heutigen Form weitergeführt. Ferner ist die regionale Verknappung von Primärzuschlag anzuführen.

Auch wächst der politische Druck: Seit der Weltumweltkonferenz 1992 in Rio de Janeiro steht der Begriff "Sustainable Development" - "Nachhaltige Entwicklung" als Vision für den Wertewandel zu einer ressourcenschonenden, abfallarmen Gesellschaft. Nach Zielvorgabe des Umweltministeriums von 1990 sollten bis 1995 mindestens 60 % des Bodenaushubs, Bauschutts und Straßenaufbruchs (entspricht ca. 70% des gesamten Abfallaufkommens) wiederverwertet werden [BUNDESREGIERUNG 1992]. Nachdem das Ziel nicht erreicht wurde, hat die Bundesregierung 1996 eine Selbstverpflichtung der Bauwirtschaft zur umweltverträglichen Entsorgung von Bauabfällen entgegen genommen [BMU 1999]. Danach soll bis zum Jahr 2005 die Menge der abgelagerten, aber an sich verwertbaren Bauabfälle um die Hälfte vermindert werden. Dies entspricht nach dem Stand 1995 einem Verwertungszuwachs von ca. 23 Mio. Tonnen jährlich. Die Bundesregierung beobachtet die Umsetzung im Rahmen regelmäßig vorzulegender Berichte der Wirtschaft.

Zu nennen ist auch das am 07.10.1996 inkraftgetretene Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [KrW-/AbfG 1994], das die stoffliche Wiederverwertung von Abfällen zwingend in den Vordergrund stellt.

Derzeit beträgt die jährliche Betonabbruchmenge im alten Bundesgebiet etwa 30 Mio. t und in der Europäischen Union fallen jährlich ca. 130 Mio. t an. Bedingt durch die intensive Bautätigkeit in den letzten Jahrzehnten ist künftig mit einer beträchtlichen Zunahme des Bauschutts aus dem Bauwerksabbruch zu rechnen (siehe Abb. 1.1). Die

prognostizierten Abbruchmengen folgen aus der Betonproduktion unter Zugrundelegung üblicher Bauwerksnutzungsdauern.

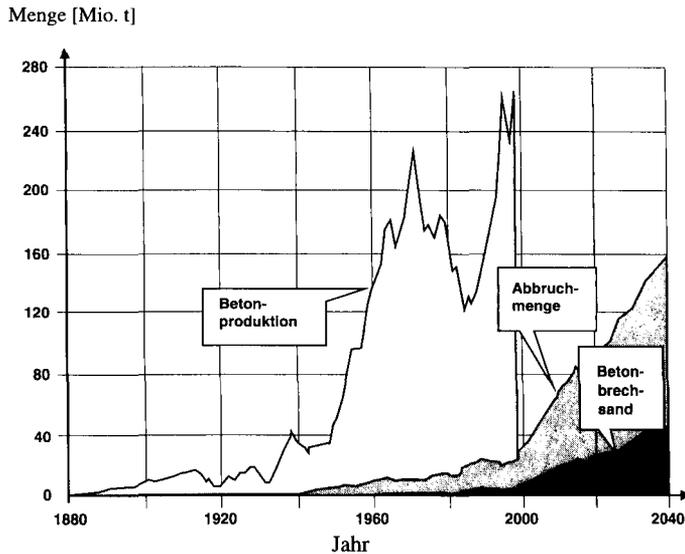


Abb. 1.1: Entwicklung der Betonproduktion und daraus errechneter Abbruchmengen bzw. Betonbrechsandmengen (zusammengestellt aus: [Rahlwes 1992], [Schmidt 2000] und [ZDB 2000]).

Für die erheblichen Mengen an Betonbrechsand (siehe Kapitel 1.1) gibt es bislang keinerlei hochwertige Wiederverwertung. Lediglich die Verwertung als Verfüllmaterial ist nennenswert. Dieser Feinanteil wird fast ausschließlich deponiert. Bei vollständiger Aufbereitung der genannten 130 Mio. t Betonabbruch in Europa durch Zerkleinerung blieben also bereits heute jährlich über 25 Mio. t Betonbrechsand ohne Verwertung.

1.3 Zielstellung

Die Arbeit setzt sich zum Ziel, die Möglichkeiten für eine Verwertung von Betonbrechsand durch thermische Behandlung zu klären. Der Abbau der Hydratphasen und

die Neubildung der Klinkerphasen des Zementsteins infolge der Einwirkung erhöhter Temperatur wurde mit dem Ziel studiert, Betonbrechsand Eigenschaften zu verleihen oder zurückzuerleihen, die einen erneuten Einsatz als Baustoff erlauben.

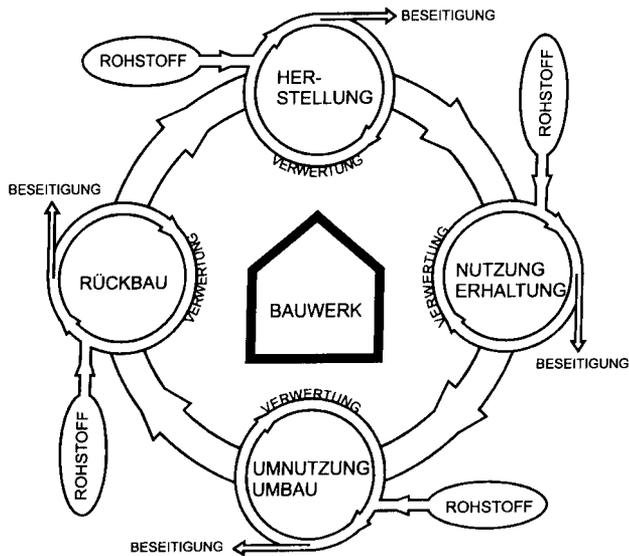


Abb. 1.2: Baustoffkreislauf nach [Budelmann 1997].

Bislang werden in jeder Lebensphase eines Bauwerks (siehe Abb. 1.2) praktisch ausschließlich primäre Baustoffe (Rohstoffe) eingesetzt und gleichzeitig, nicht mehr benötigte aber hochwertige Baustoffe als Abfall entsorgt. Der Baustoffkreislauf ist also nicht geschlossen. Vereinfacht läßt er sich in Form einer Schnecke darstellen (siehe Abb. 1.3); am Ende eines Nutzungszyklus gelangt der Baustoff auf die Deponie. Dem durch Rohstoffgewinnung und Bauschuttdeponierung bewirkten doppelten Landschaftsverbrauch wird bisher erst in geringem Maße entgegengewirkt, indem durch mechanische Aufbereitung und erneute Verwendung für untergeordnete Aufgaben (Verfüllmaterial) ein Teil des Bauschutts im Kreislauf gehalten wird (siehe Abb. 1.4). Ein Großteil wird aber nach wie vor entsorgt. Dazu gehören auch die bei der mechanischen Aufbereitung mineralischen Bauschutts anfallenden Brechsande.

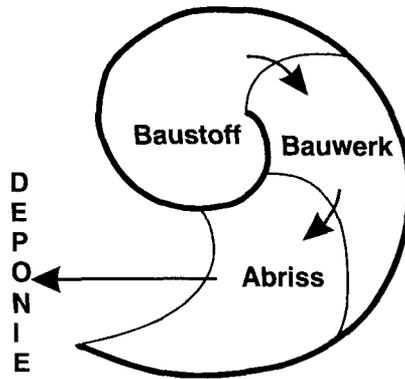


Abb. 1.3: Offener Baustoffkreislauf mit vollständiger Bauschuttdeponierung

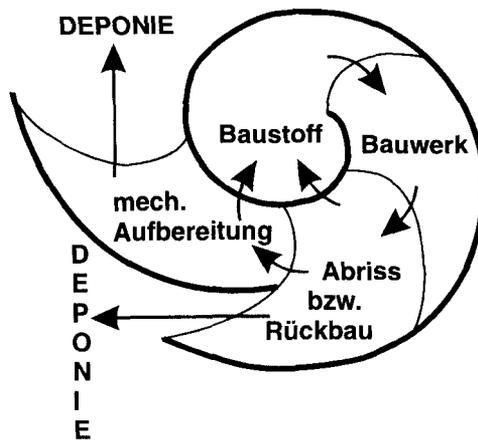


Abb. 1.4: Offener Baustoffkreislauf mit teilweiser mechanischer Aufbereitung

Durch eine thermische Aufbereitung der feinen Fraktionen könnten auch diese im Kreislauf gehalten werden. Bei geringen Bindemittelgehalten in den feinen Fraktionen kann auch eine ausschließliche autoklave Behandlung sinnvoll sein (siehe Abb. 1.5). So könnten die Voraussetzungen für eine „echte“ Rückführung in den Stoffkreislauf geschaffen werden, wodurch Rohstoffressourcen eingespart und das Abfallaufkommen vermindert werden könnten, wie das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz seit dem 07.10.1996 einfordert.

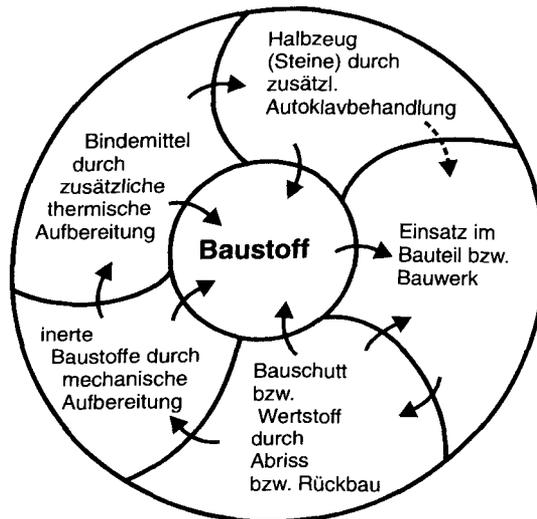


Abb. 1.5: Geschlossener Baustoffkreislauf mit mechanischer, thermischer und autoklaver Aufbereitung

In dieser Arbeit soll aufgeklärt werden, ob eine thermische Aufbereitung von Betonbrechsand technisch und wirtschaftlich sinnvoll einsetzbare, rezyklierte Baustoffe hervorzubringen vermag.

In den durchgeführten Untersuchungen wurden die Zusammensetzung und die Beschaffenheit des thermisch zu behandelnden Materials sowie die Temperaturbehandlung selbst variiert. Es wurde grundsätzlich von Betonbrechsand aus Konstruktionsbeton als

Feinteillieferant ausgegangen, da dieser in großen Mengen bei der Betonzerkleinerung anfällt, hohe Bindemittelanteile aufweist und, verglichen mit anderen mineralischen Stoffen aus dem Rückbau, einigermaßen sortenrein verfügbar ist.

Die in realem Abbruchbeton unvermeidbaren Beimengungen anderer mineralischer Baustoffe (z.B. aus Mauerwerk, Estrich, Putz) sowie nichtmineralische Verunreinigungen werden ebenfalls berücksichtigt.

1.4 Aufbau der Arbeit

Nach der Einleitung zur Arbeit in **Kapitel 1**, folgt in **Kapitel 2** der Stand derzeitiger Einsatzmöglichkeiten von Brechsand und die sich daraus ergebende Zielstellung der Arbeit.

In **Kapitel 3** wird auf den Kenntnisstand zu den Phasenveränderungen in mineralischen Baustoffen unter erhöhter Temperaturbeanspruchung eingegangen. Es wird dabei nach den Temperaturbereichen unter 600°C, von 600 bis 1000°C und von 1000 bis 1450°C unterschieden, da dort jeweils unterschiedliche Prozesse dominieren.

Die übliche Herstellung von Zement und hydraulischem Kalk aus primären Rohstoffen wird in **Kapitel 4** erläutert. Es wird insbesondere auf die Zusammensetzung der Ausgangsstoffe, den Herstellungsprozeß und den Energieeinsatz eingegangen.

Das Versuchsprogramm wird in **Kapitel 5** erläutert. Es werden dort die Untersuchungsarten und der Untersuchungsumfang auf den jeweiligen Verfahrensschritten Ausgangsstoffe, thermische Behandlung und Baustoffherstellung erklärt.

Die Analyseergebnisse der Phasenuntersuchungen mittels Thermoanalyse, Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Röntgenbeugungsanalyse (XRD) werden in **Kapitel 6** diskutiert.

In **Kapitel 7** wird gezeigt, welche mechanischen Eigenschaften aus thermisch behandeltem Brechsand hergestellter hydraulisch erhärtender Baustoff erreicht. Es werden Festigkeitsvergleiche angestellt, und zwar bezogen auf die Ausgangsstoffe, die Temperaturbehandlung, die Mörtelzusammensetzung und die Lagerung der hergestellten Prismen.

Ergebnisse der Weiterverarbeitung des thermisch behandelten Brechsandes im Autoklaven zu Halbzeugen (Steinen) werden in **Kapitel 8** behandelt.

Eine Umsetzungshilfe der Forschungsergebnisse für einen möglichen Praxiseinsatz von thermisch behandeltem Betonbrechsand bzw. Brechsandgemischen wird in **Kapitel 9** gegeben.

In **Kapitel 10** folgen die Zusammenfassung, Schlußfolgerungen, sowie ein Ausblick auf weitere durchzuführende Maßnahmen zur Praxiseinführung von thermisch behandelten Brechsanden als hydraulisch erhärtende Bindebaustoffe.

1.5 Begriffsdefinitionen

In der Tab. 1.1 sind die wesentlichen Begriffe, die in dieser Arbeit und der Recyclingwirtschaft verwendet werden, definiert. Die Definitionen sind der DIN 4226-100 entnommen und um weitere Begriffe ergänzt worden. So soll das Verständnis der Arbeit erleichtert werden.

Tab. 1.1: Begriffsdefinitionen nach [DIN 4226-100] mit Ergänzungen.

Begriff	Definition
Abfall	Bewegliche Sache, deren sich der Besitzer entledigen will oder deren geordnete Entsorgung zur Wahrung des Wohls der Allgemeinheit, insbesondere des Schutzes der Umwelt geboten ist.
Baubabfälle (Baurestmassen, Baurestoffe)	Bauschutt, Baustellenabfälle, Bodenaushub und Straßenaufbruch.
Bauschutt	Mineralische Stoffe aus Bautätigkeiten, auch mit geringfügigen Fremdanteilen.
Baustellenabfälle	Nichtmineralische Stoffe aus Bautätigkeiten, auch mit geringfügigen Fremdanteilen.
Bodenaushub	Nicht kontaminiertes, natürlich gewachsenes oder bereits verwendetes Erd- oder Felsmaterial.
Betonabbruch, Betonschutt	Material, das bei Abbruch- und Umbauarbeiten von Betonbauwerken oder Betonwaren anfällt.
Betonaufbruch	Material, das beim Aufbruch von Fahrbahndecken aus Beton im Straßenbau anfällt (Straßenaufbruch).
Betonbrechsand	Zuschlag $\leq 4\text{mm}$, der aus der Aufbereitung von Betonbruch gewonnen wird.
Betonbruch	Sammelbegriff für Betonabbruch oder Betonaufbruch.
Betonsplitt	Zuschlag $\geq 4\text{mm}$, der aus der Aufbereitung von Betonbruch gewonnen wird.
Industrielles Nebenprodukt	Material, das bei einem industriellen Produktionsprozeß neben dem eigentlichen Produkt anfällt und stofflich genutzt werden kann, weil es einen bestimmten Wert oder eine bestimmte Funktion hat.
Mauerwerkbruch	Material, das bei Abbruch- und Umbauarbeiten von Mauerwerksbauten anfällt.
Recycling	Die Rückführung der bei der Produktion und Verbrauch anfallenden Nebenprodukte und Reststoffe in einen Produktions-Konsum-Kreislauf (Wiederverwendungskreislauf).
Recyclingbaustoff	Baustoff am Ende seiner Nutzung (Nebenprodukt oder Reststoff), der nach entsprechender Aufbereitung wieder der Produktion von neuen Baustoffen dient.
Recyclingzuschlag	Zuschlag, der aus aufbereiteten und dadurch wiederverwertbaren Materialien besteht.
Sekundärrohstoffe	Rohstoffe, die aus Rückständen, Reststoffen oder Abfällen gewonnen werden.
Straßenaufbruch	Mineralische Stoffe, die hydraulisch mit Bitumen oder Teer gebunden oder ungebunden, im Straßenbau verwendet werden.
Umweltverträglichkeit	Wechselwirkung eines Stoffes bzw. Produktionsverfahrens mit den Schutzgütern: Wasser, Boden, Luft.
Wiederverwendung	Wiederholte Benutzung eines Stoffes / Produktes für den gleichen Verwendungszweck.
Wiederverwertung	Wiederholte Verwendung von durch Aufbereitung von Reststoffen / Abfällen entstandenen Stoffen.

2 Aufkommen und derzeitiger Einsatz von Brechsanden aus Bauschutt

2.1 Bauschutttaufkommen

In Deutschland fallen ca. 400 Mt/a Abfälle an, davon nach neuesten Schätzungen 285 Mt/a im Bauwesen (Bodenaushub, Bauschutt, Straßenaufbruch und Baustellenabfälle) [Budelmann 1999a]. Etwa 70 Mt/a hiervon sind mineralische Bauabfälle der Abfallarten Bauschutt und Straßenaufbruch, die wiederum knapp zur Hälfte aus Betonprodukten herrühren. Stellt man diesen Zahlen den Verbrauch natürlicher Mineralstoffe durch die Bauindustrie von etwa 600 Mt/a und davon etwa 200 Mt/a für Betonprodukte gegenüber, so wird das künftige Bauabfallaufkommen deutlich [ZDB 2000]. Hochgerechnet aus dem Zementverbrauch wird allein die Betonabbruchmenge in den nächsten 10 Jahren auf über 100 Mt/a ansteigen (siehe Abb. 1.1).

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [KrW-/AbfG 1994] definiert gebrauchte mineralische Baustoffe als Abfälle zur Verwertung. Für Bauabfälle gilt somit ein Verwertungsgebot für eine Verwertung auf einem möglichst hohen technischen Niveau. Die 1992 für 1995 aufgestellten Zielfestlegungen zur Verwertung von Bauabfällen [Bundesregierung 1992] wurden jedoch weitgehend nicht erreicht (siehe Tab. 2.1).

Die Bundesregierung hat 1996 eine Selbstverpflichtung der Bauwirtschaft zur umweltverträglichen Entsorgung von Bauabfällen entgegen genommen. Danach soll bis zum Jahre 2005 die Menge der weiterhin abgelagerten aber verwertbaren Bauabfälle um die Hälfte vermindert werden. Dies entspricht nach dem Stand 1995 einem Zuwachs der Verwertungsmenge um ca. 23 Mio. Tonnen jährlich. Die Bundesregierung beobachtet die Umsetzung im Rahmen regelmäßig vorzulegender Berichte der Wirtschaft. Die bisherigen Zielfestlegungen sind insoweit hinfällig.

Die zu betrachtenden Brechsande mit einem Größtkorn < 4 mm entstehen bei der Aufbereitung von Bauschutt durch Zerkleinerung, der mit 45 Mio. t/a den zweitgrößten Anteil der Baurestoffe ausmacht. Die Zusammensetzung des Bauschutts variiert in weiten Grenzen und wird von der Art des abgerissenen Gebäudes, der Bauweise, den verwendeten Baustoffen, der Nutzung und von der Abbruchtechnik beeinflusst. Nur in besonderen Fällen, z.B. beim Abbruch reiner Beton- und Stahlbetonbauten, wie es z.B. bei Brücken, Betonstraßen, Flugplätzen oder Parkhäusern der Fall ist, besteht das

Abbruchgut aus weitgehend einheitlichem, d.h. sortenreinem Material. Ansonsten besteht zwar die Möglichkeit durch einen kontrollierten Rückbau die abgebrochenen Baustoffe sortenrein in einzelne Stoffgruppen zu trennen, diese Vorgehensweise ist jedoch kostenintensiv und wird deshalb bislang nur selten praktiziert.

Tab. 2.1: Bundesweites Aufkommen und Verwertung an Baureststoffen 1995 sowie die Verwertungsziele aus dem Jahre 1992 für das Jahr 1995 [Budelmann 1997 und 1999a].

Baurestoff	Zusammensetzung	Aufkommen [Mio. t/a]	Verwertung [Mio. t/a]	Verwertungsziel [Mio. t/a]
Bodenaushub	Mutterboden, Sand, Kies, Lehm, Ton, Steine, Fels etc.	ca. 215	ca. 215	-
Bauschutt	Beton, Ziegel, Kalksandsteine, Porenbeton, Mörtel, Gips etc.	ca. 45	ca. 8	ca. 27
Straßenaufbruch	Asphalt, Teer, Beton, Sand, Kies, Schotter, Pflaster- und Randsteine etc.	ca. 26	ca. 21	ca. 23
Baustellenabfälle	Metalle, Holz, Kunststoffe, Kabel, Verpackungsmaterial, Farben, Lacke, Isoliermaterial etc.	ca. 14	ca. 2	ca. 6

In [KOHLER 1997] wurde die spezifische Zusammensetzung der Bauschuttmassen eingeschätzt. Demnach beträgt der Anteil an Mauerwerksabbruch, der die gesamte Palette der Wandbaustoffe sowie Mörtel, Putze, Estriche und mineralische Dämmstoffe enthält, 60 - 65 M.-% und der Anteil des Betonabbruchs 35 - 40 M.-%.

Bei der Aufbereitung mineralischen Bauschutts durch Zerkleinerung entstehen Splitte und Brechsande mit unterschiedlichen Korndurchmessern. Forschungsergebnisse, die mittlerweile in Deutschland Eingang in Regelwerke gefunden haben, haben gezeigt, daß die rezyklierten Splitte vollständig wiederverwertet werden können [DAfStb 1998, SCHMIDT 2000]. In der Fraktion der Brechsande reichern sich beim Brechvorgang die weichen Phasen an; diese sind deshalb überproportional bindemittelreich. Auch sind die Brechsande stark wassersaugend, wodurch ihr Einsatz als Zuschlag begrenzt ist [DAfStb 1998]. In den Aufbereitungsanlagen entstehen je nach verwendetem Brecher-

typ 20 bis 40 M.-% Brechsand der Kornfraktion ≤ 2 mm [MÜLLER, Ch. 2000]. Bezogen auf die Bauschuttmenge fallen demnach fast 20 Mio.-t Brechsand pro Jahr an, für die es z.Zt. nur stark eingeschränkte Wiederverwertungsmöglichkeiten gibt.

Das tatsächliche Bauschutttaufkommen ist statistisch nicht exakt erfassbar, da nur die von den Baufirmen weitergegebenen Mengenangaben berücksichtigt werden können. Man kann jedoch davon ausgehen, daß die tatsächliche Bauschuttmenge größer ist und zukünftig weiterhin steigen wird.

2.2 Zusammensetzung und Einsatzgebiete von Brechsanden

2.2.1 Allgemeines

Die Zusammensetzung der Brechsande hängt von der Aufbereitung und Beschaffenheit des anfallenden Bauschutts ab. Sortenreinheit erlaubt eine höherwertige Wiederverwendung. Die häufig auftretenden gemischten Brechsande werden meistens deponiert oder auf qualitativ niedrigerem Niveau eingesetzt (Verfüllmaterial). Einen Überblick über generelle Einsatzgebiete für Bauschutt, einschließlich der Brechsande gibt Abb. 2.1. Welche Brechsande für welchen Einsatz geeignet sind, wird in den nachfolgenden Abschnitten behandelt.

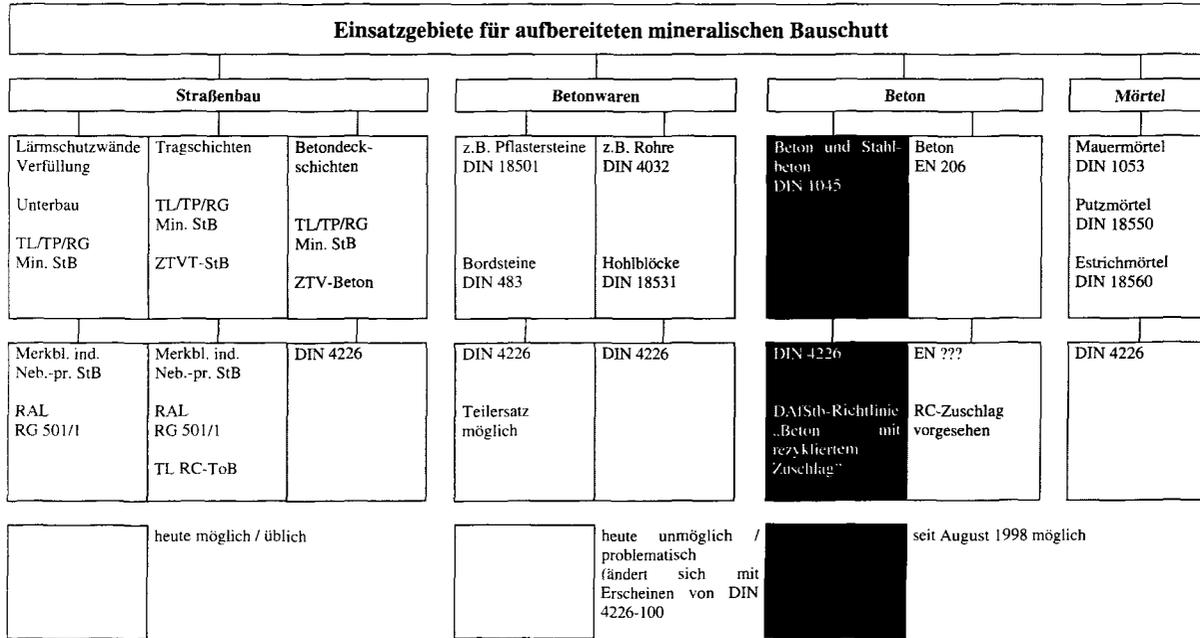


Abb. 2.1: Einsatzgebiete für Bauschutt [DORA 1999a]

2.2.2 Betonbrechsand

Betonbrechsande werden derzeit in folgenden Hauptanwendungsgebieten eingesetzt:

- Lärmschutzwälle,
- Frostschutzschichten,
- hydraulisch gebundene Tragschichten,
- Pflastersande und Pflasterunterbauten,
- Bankettverfestigungen.

Untersuchungen in [EICKSCHEN 1998] und [BIM 1999] zeigten, daß die Wiederverwertung von Betonbrechsanden als Zuschlag für Beton und Mörtel nur bedingt möglich ist, weil diese starkes Wassersaugen aufweisen und die Festbetoneigenschaften ungünstig beeinflussen. Des weiteren können in dem hohen Anteil an porösen Bindemittelanhaftungen Verunreinigungen und Schadstoffe vorhanden sein. In [BIM 1999] wird außerdem auf den Einfluß auf das Verbund-, Verformungs- und Dauerhaftigkeitsverhalten hingewiesen.

Tab. 2.2: Höchstanteile rezyklierten Zuschlags, bezogen auf den Gesamtzuschlag nach [DAfStb 1998].

Höchstanteile rezyklierten Zuschlags, bezogen auf den Gesamtzuschlag			
		Betonsplitt und Betonbrechsand > 2 mm Vol.-%	Betonbrechsand ≤ 2 mm Vol.-%
Beton für Innenbauteile	≤ B 25	35	7
	B 35	25	
<ul style="list-style-type: none"> • Beton für Außenbauteile • wasserundurchlässiger Beton • Beton mit hohem Frostwiderstand • Beton mit hohem Widerstand gegen schwachen chemischen Angriff 		20	0

Anhand der dort und in weiteren Forschungsprojekten ([BRITE/EURAM 2000] und [DFG 1996]) gesammelten Forschungsergebnisse sind die zulässigen Anteile an rezykliertem Zuschlag im Beton nach DIN 1045 gemäß Tab. 2.2 begrenzt worden. Bezogen auf den Gesamtzuschlag ist es derzeit möglich, für Beton für Innenbauteile 7 M.-% durch Betonbrechsand zu ersetzen. Ob Brechsand auch weiterhin als Zuschlag verwendet werden darf ist derzeit in der Diskussion. Im DAfStb [DAfStb 1999] wird derzeit ein Ausschluß von Brechsanden in Beton erwogen, da es derzeit kein geeignetes Prüfverfahren zur Charakterisierung von Brechsanden für die Typklassen I und II gibt (siehe Tab. 2.3).

Tab. 2.3: Höchstanteile rezyklierten Zuschlags, bezogen auf den Gesamtzuschlag nach der DAfStb-Richtlinie „Beton mit rezykliertem Zuschlag“ (Entwurf 4/2000)

Höchstanteile rezyklierten Zuschlags > 2 mm, bezogen auf den Gesamtzuschlag, für Beton bis zu einer Betonfestigkeitsklasse ≤ B 35		
Typ des rezyklierten Zuschlags	Typ I ¹⁾ > 2 mm [Vol.-%]	Typ II ¹⁾ > 2 mm [Vol.-%]
• Beton für Innenbauteile	50	40
• Beton für Außenbauteile • wasserundurchlässiger Beton • Beton mit hohem Frostwiderstand • Beton mit hohem Widerstand gegen schwachen chemischen Angriff	20	0

¹⁾ Stoffliche Zusammensetzung der Typen siehe Tabelle 2.5

Derzeit wird in verschiedenen Forschungsvorhaben versucht, höherwertige Einsatzgebiete für Betonbrechsande zu finden. So besteht eine Verwendungsmöglichkeit als Zuschlag im Mauermörtel oder als Rohstoffkomponente bzw. Zumahlstoff bei der Zementproduktion [SANCHEZ 1998]. Eine Reaktivierung der im Betonbrechsand enthaltenen Bindemittelphasen wird in [DORA 1999b] beschrieben und ist Gegenstand dieser Arbeit.

2.2.3 Ziegelbrechsand

Bauschutt aus Mauerziegel (Ziegelbrechsand) besteht hauptsächlich aus Aluminiumoxid- und Kieselsäurephasen. Als Nebenphasen lassen sich umgewandelte Tonmineralien, Mullite und Glasphasen finden [FISCHER 1987].

Untersuchungen zeigten, daß Ziegelbrechsand in geringem Umfang als reaktiver Zusatzstoff eingesetzt werden kann [MÜLLER, A. 1995]. Dies wird aus einer Festigkeitssteigerung gegenüber der Zugabe von inertem Gesteinsmehl abgeleitet. Folgende Einsatzgebiete für Ziegelbrechsande sind heute üblich:

- rote Wegbeläge in Park- und Grünanlagen,
- Substrate für Dachbegrünungen und Intensivkulturen,
- Tragschichten und Hartbeläge im Sportplatzbau sowie
- Zusätze in der Farbgebung und Wärmedämmung in der Kunststoffindustrie.

Mit einem maximalen Anteil von 10 – 20 M.-% können Ziegelbrechsande auch in die Herstellung neuer Ziegel einfließen [SCHUBERT 1997]. Des weiteren ist der Einsatz als Teilschubstitut im Zuschlag für Mauermörtel der Klasse IIa möglich [MÜLLER, Ch. 2000].

Mauer- und Putzmörtel besitzen meist einen guten Haftverbund zum Stein. Sortenreiner Ziegelbrechsand fällt daher in der Regel nicht an; die Trennung wäre zu aufwendig. Im Mauerwerkabbruch ist daher auf den Mörtelanteil zu achten.

2.2.4 Kalksandsteinbrechsand

Reiner Kalksandsteinbrechsand besteht chemisch aus Kieselsäure und Calciumoxid. Rezykliertes Material kann zu maximal 50 M.-% für die Herstellung neuer Kalksandsteine eingesetzt werden [EDEN 1994]. Befinden sich noch Mörtelreste an den Kalksandsteinen, so liegt dieser Anteil zwischen 7,5 bis ca. 25 M.-% [EDEN 1994].

Schwierigkeiten bei der Trennung von Kalksandsteinen und anhaftendem Mauer- oder Putzmörtel führen dazu, daß diese Brechsandart nur eine geringe Bedeutung in Wiederaufbereitungsprozessen erlangt.

2.2.5 Brechsandgemische

Gemischter Bauschutt besteht hauptsächlich aus Mauerwerks- und Betonabbruch, der die gesamte Palette der Wand- und Deckenbaustoffe sowie Mörtel, Putze, Estriche und Dämmstoffe enthält. Zusätzlich können auch Anteile von Naturstein sowie sonstige mineralische und nicht mineralische Fremdbestandteile im Abbruchmaterial enthalten sein. Tab. 2.4 zeigt einen Querschnitt von Zusammensetzungen untersuchter Brechsande auf.

Tab. 2.4: Zusammensetzungen von fünf gemischten Bauschuttarten [GRIMM 2000].

Materialart Angaben in M.-%	1			2	3	4	5
	[MÜLLER, A. 1997]			[WÖR- HEIDE 1996]	[BDE 1997]	[JÄCKEL 1997]	[TRÄNK- LER 1992]
	Mittel.	min.	max.				
Ziegel	49,7	31,3	79,4	47,9	42,6	26,0	28,0
Beton	9,3	1,0	26,9	43,7	23,4	58,0	50,0
Mörtel	26,0	13,7	49,1	k.A. ¹⁾	k.A. ¹⁾	k.A. ¹⁾	k.A. ¹⁾
Naturstein	8,7	2,2	24,3	5,7	6,4	8,0	20,0
Kalksandstein	2,2	0	11,4	k.A. ¹⁾	24,5	6,0	k.A. ¹⁾
sonstige mineralische Bestandteile	2,2	k.A. ¹⁾	k.A. ¹⁾	2,7	k.A. ¹⁾	2,0	2,0

¹⁾ k. A.: keine Angabe

Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung gibt es zur Zeit für gemischte Brechsande keine hochwertige Wiederverwertung; sie werden auf deutlich niedrigerem Niveau wieder eingesetzt. Die Anwendungsfelder liegen in den Bereichen:

- Lärmschutzwälle,
- Verfüllung von Leitungsgräben,
- Hinterfüllung und Überschüttung von Bauwerken und
- Befestigung ländlicher Wege.

Der Einsatz in den jeweiligen Bereichen ist im Einzelfall vom Ausgangsprodukt, von der Aufbereitung und von den entsprechenden Anforderungen, die an das Bauwerk gestellt werden, abhängig.

Mit Einführung der DIN 4226-100 und der DAfStb-Richtlinie Beton mit rezykliertem Zuschlag in ihrer überarbeiteten Form, wird ein hochwertiger Einsatz als Zuschlag für Beton und Mörtel erstmalig für gemischten Brechsand möglich sein, sofern er mindestens zu 70% aus Betonbrechsand besteht, d. h. der Brechsand den Typen I und II der Tab. 2.5 entspricht.

Tab. 2.5: Stoffliche Zusammensetzung nach DIN 4226-100 Entwurf 04/2000.

Bestandteile		Zusammensetzung [M.-%]			
		Typ I	Typ II	Typ III	Typ IV
Höherfeste mineralische Bestandteile	Beton, Naturstein	≥ 90	≥ 70	≥ 20	≥ 80
	Klinker, Ziegel, Kalksandstein	≤ 10	≤ 30	≤ 80	
Minderfeste mineralische Bestandteile		≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 20
Fremdbestandteile	Asphalt	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
	Mineralisch	≤ 2	≤ 2	≤ 2	
	Nicht mineralisch	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	< 1

3 Kenntnisstand zur Phasenumwandlung durch hohe Temperatur

3.1 Ausgangsstoffe im Betonbrechsand

Nach [VDZ 2000] ist etwa die in Abb. 3.1 dargestellte Mengenverteilung für die in Deutschland hergestellten Zementarten gegeben.

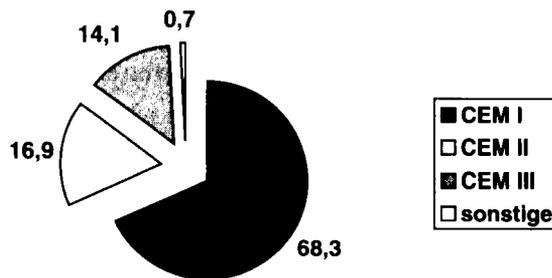


Abb. 3.1: Mengenverteilung in Deutschland hergestellter Zemente

Da heute ca. 70 M.-% des verbrauchten Zementes Portlandzement ist und dies in der Vergangenheit ebenso war, beschränkt sich diese Arbeit weitgehend auf Portlandzement.

Betonbrechsand besteht aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Phasen. Das Verhältnis Zementstein/Zuschlag ist gegenüber dem ursprünglichen Altbeton erheblich erhöht. Der Brechsand enthält somit große Mengen an hydratisiertem Zement, sowie Anteile von Calciumhydroxid (Portlandit, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) und Calciumcarbonat (Calcit, CaCO_3). Weiterhin kann angenommen werden, daß ein erhöhter Sulfatgehalt vorliegt. In [BREITENBÜCHER 1994] wird darauf hingewiesen, daß die Korngruppe 0/2 fast doppelt soviel SO_3 wie die größeren Korngruppen enthält. Dies läßt sich dadurch erklären, daß beim Brechen bevorzugt die „weicheren“ Phasen des Betons zerkleinert

werden und sich diese im Feinanteil anreichern. Diese Aussage für die sulfathaltigen Phasen muß auch auf alkalihaltige Phasen ausgedehnt werden. Die Phasen des Zuschlags im Betonbrechsand haben überwiegend eine quarzitische oder carbonatische Basis. Hinzu kommt die Vielzahl der im Beton üblichen Zusatzstoffe, wie Traß, Flugasche, Hüttensand, Silicastaub u. a..

Die wichtigsten Phasen im hydratisierten Zementstein sind [SCHNEIDER 1989a, TAYLOR 1997]:

- Calciumsilikathydrat: $m \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$

Diese Gruppe der Calciumsilikathyrate macht ca. 50 - 60 % des Volumens der festen Phasen im hydratisierten Zementstein aus. Deshalb ist sie für die Eigenschaften des Zementsteins die wichtigste Phasengruppe. Auf die Zusammensetzung und die Eigenschaften wird u.a. in [CHATTERJI 1995, CONG 1995, CZERIN 1977, JÄGER 1993, KHOURY 1992, LOCHER 1984, MANNS 1975, TAYLOR 1984, TAYLOR 1997] eingegangen.

- Calciumhydroxid: $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Der Volumenanteil bezogen auf die festen Phasen im hydratisierten Zementstein beträgt ca. 20 - 25 %.

- Calciumaluminathydrat bzw. Calciumaluminatferrithydrat und Calciumaluminat-sulfathydrat:

Der Volumenanteil dieser Phasen beträgt ca. 10 - 15 %. In Abhängigkeit vom Verhältnis der Sulfationen zu den Aluminiumionen wird u. a. die Bildung von Ettringit und Monosulfat begünstigt.

- Afm-Phasen (Al_2O_3 - Fe_2O_3 -mono):

Monosulfat:	$\text{C}_3\text{A}(\text{Cs})\text{H}_{12}$
Tetracalciumaluminathydrat:	C_4AH_{13} bzw. C_4AH_{11}
Tetracalciumaluminatferrithydrat:	$\text{C}_4(\text{AF})\text{H}_{13}$

- Aft-Phase (Al_2O_3 - Fe_2O_3 -tri):

Ettringit:	$\text{C}_3\text{A}(\text{Cs})\text{H}_{33}$
------------	--

Ferner sind im Betonbrechsand i.d.R. auch noch Anteile nicht hydratisierten Zementsteins enthalten. Deren wichtigste Klinkerphasen sind (siehe auch Abb. 3.2):

Tricalciumsilikat (Alit)	C_3S
Dicalciumsilikat (Belit)	C_2S
Tricalciumaluminat	C_3A
Calciumaluminatferrit	$\text{C}_2(\text{AF})$.

Neben nicht abgebundenen Sulfatträgern, z.B. $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ und CaSO_4 , sind im Zementstein des Betonbrechsandes zudem alkalihaltige (K_2O , Na_2O) Phasen und meist vernachlässigbare Mengen an Phasen, welche unter Chlorid- oder Kohlendioxideinwirkung auftreten können, vertreten. Zu nennen sind hier Friedelsches Salz ($\text{C}_3\text{A CaCl}_2 \text{H}_{11}$) und Monocarbonat ($\text{C}_3\text{A CaCO}_3 \text{H}_{11}$).

3.2 Ergebnisse bisheriger Untersuchungen

Das thermische Verhalten von Beton wurde besonders im Rahmen der Forschung zum Brandverhalten von Betonbauteilen vertieft untersucht. Um das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Betonbauteilen während und nach einer Brandbeanspruchung erklären und in Rechenmodellen abbilden zu können, wurden die Abbaureaktionen

(Phasenum- und -neubildungen im Beton bzw. Zementstein) intensiv studiert [FISCHER 1970, KHOURY 1992, LACH 1970, ODLER 1983, SCHNEIDER 1973, SCHNEIDER 1977, SCHNEIDER 1980, SCHNEIDER 1983a, . SCHNEIDER 1989b, WEIGLER 1964, ZÜRZ 1988].

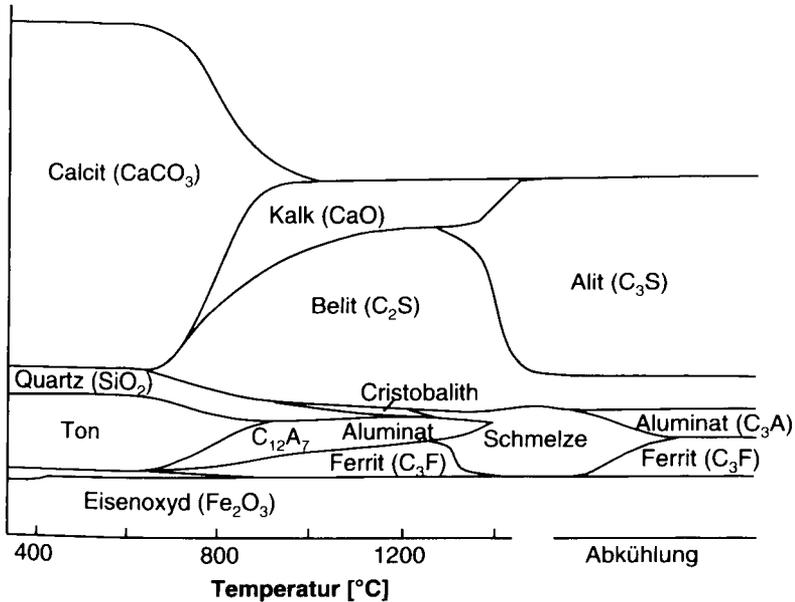


Abb. 3.2: Phasenneubildung bei der Zementherstellung [TAYLOR 1964]

Weitere Arbeiten befassen sich mit Temperaturbeanspruchungen für Bauwerke, die im Betrieb oder Störfall erhöhte Temperatur erfahren: Kernreaktoren, konventionelle Kraftwerke, Wärmespeicher, Schornsteine u. v. m. [FISCHER 1970, KHOURY 1992, MANNS 1975, MANNS 1989, SEEBERGER 1985, WENZEL 1988, YOSHIKANE 1988]. Darüber hinaus sind Grundlagenarbeiten zum Einfluß erhöhter Temperatur auf die Zementhydratation und Zementsteinstruktur anzuführen [CONG 1995, FORDHAM 1985, KHOURY 1985, SCHNEIDER 1983b, SCHNEIDER 1989a, SEEBERGER 1985, SHARARA 1994, WENZEL 1988].

Eine Grundlage für die Arbeit ist auch der Kenntnisstand über die Herstellung spezieller C₂S-reicher Zemente [BEI 1990, FUHR 1994, JÄGER 1993, MÜLLER 1985, SHARARA 1994, SHIBATA 1984, STARK 1982].

Die meisten Arbeiten zum Thema beschäftigen sich mit den thermischen Reaktionen von reinem Zementstein. Überwiegend wurde reiner Portlandzement untersucht [FORDHAM 1985, LACH 1970, ODLER 1983, SCHNEIDER 1973, SCHNEIDER 1983b, SEEBERGER 1985, ZÜRZ 1988], aber auch Portlandzement mit verschiedenen Zusatzstoffen wie Hüttensand, Traß, Flugasche und Silicastaub [LACH 1970, ODLER 1983, SEEBERGER 1985, ZÜRZ 1988].

Zur nachfolgenden Betrachtung der Vorgänge in Zementstein und Beton bei erhöhter Temperatur werden drei Temperaturbereiche unterschieden, bis ca. 600°C, 600 - 1000°C und 1000°C bis 1450°C. In grober Differenzierung entweicht im unteren Temperaturbereich das freie und physikalisch gebundene Wasser, zerfällt der Ettringit und zersetzt sich der Portlandit. Zwar finden auch bereits erste Dehydrationsvorgänge von CSH-Phasen statt, doch wird der größte Teil der Hydratphasen erst bei Temperaturen oberhalb von ca. 600°C zersetzt. Oberhalb von 1000°C findet die Bildung der Schmelze, die zur Zementherstellung wichtig ist statt. Die Unterscheidung der Temperaturbereiche ist deshalb plausibel, wenngleich auch nicht scharf und zwingend.

3.3 Verhalten von Beton bei thermischer Beanspruchung bis 600°C

Beim Erwärmen von Beton bzw. Zementstein laufen zunächst Entwässerungsvorgänge ab, bei denen neben dem freien, nicht gebundenen Wasser auch Anteile des physikalisch gebundenen Wassers freigesetzt werden, sobald die Temperatur über ca. 100°C liegt [MANN 1975, MANN 1989, SEEBERGER 1985, SCHNEIDER 1989b].

Das Verdampfen des Wassers in den Kapillarporen nimmt oberhalb von 100°C stark zu und bleibt dann bis 200°C nahezu konstant. In [SCHNEIDER 1973] wird ein Temperaturbereich für die Kapillarentwässerung von 20 - 300°C angegeben.

Im Temperaturbereich bis ca. 300°C findet auch bereits eine Freisetzung von chemisch gebundenem Wasser (Dehydratation) statt, was mit Phasenabbau, -umbildung und Phasenneubildung verbunden ist. Die Dehydratation der Hydratphasen ist nicht exakt

definierten Temperaturbereichen zuzuordnen, da es sich um eine Vielzahl von chemischen Verbindungen handelt, deren Verhältnis je nach Zusammensetzung und Hydratationsbedingungen unterschiedlich ist. In diesem Temperaturbereich ist insbesondere der Zerfall des Ettringits zu beobachten.

Die Entwässerung der Hydratphasen geht bei höherer Temperatur kontinuierlich weiter, aber eine vollständige Dehydratation, insbesondere der CSH-Phasen tritt erst bei Temperaturen weit oberhalb von 300°C auf. In [SCHNEIDER 1989a] wird für den Zerfall der CSH(I)-Phasen in $B-C_2S$ ein Temperaturintervall von 120-500°C genannt. Röntgenographische Phasenanalysen in [SCHNEIDER 1973] haben gezeigt, daß in diesem Temperaturbereich nur eine geringe Zunahme an Belit (C_2S) festzustellen war. Hieraus läßt sich folgern, daß mit dem Zerfall der CSH-Phasen, in Gegenwart von Freikalk (CaO), C_2S gebildet wird.

Im Temperaturintervall von 450 - 550°C zersetzt sich nach [KHOURY 1985, SCHNEIDER 1982, SCHNEIDER 1983b, SCHNEIDER 1983a, SCHNEIDER 1989a] das Calciumhydroxid in Calciumoxid und Wasser. In [SCHNEIDER 1973] wird aus röntgenographischen Phasenanalysen (XRD) gefolgert, daß die Zersetzung bei 450°C beginnt und daß bei 560°C immer noch Reste von Portlandit nachweisbar sind. Dies kann darauf zurückgeführt werden, daß das entstehende CaO , bedingt durch die Nachführung frei werdenden Wassers, erneut zu Portlandit reagieren kann. Die Dehydratation von Portlandit ist, ebenso wie praktisch alle anderen Zersetzungsreaktionen, abhängig von der Körpergröße und der Dauer der Temperaturbelastung.

Neben der Zersetzung des Portlandits tritt bei 573°C eine Reaktion in den quarzitären Zuschlägen auf, welche in der Literatur [KHOURY 1985, SCHNEIDER 1977, SCHNEIDER 1983b, SCHNEIDER 1985, SCHNEIDER 1989a, TAYLOR 1997] übereinstimmend als Quarzumwandlung beschrieben wird. Diese sog. Quarzinversion ist eine Strukturumwandlung von $\alpha-SiO_2$ nach $\beta-SiO_2$, allgemein auch als Übergang vom Tief- zum Hochquarz bezeichnet.

Für die thermische Behandlung des Betonbrechsandes sind die Umwandlungen bzw. Zersetzungen der Hydratphasen die wichtigsten Reaktionen. Wie bereits bemerkt, beginnt die Zersetzung der Hydratphasen im Zementstein bei Temperaturen von ca. 400 - 600°C. Die bedeutendste und wichtigste Reaktion für die Arbeit ist die Zersetzung der CSH-Phasen und parallele Bildung von C_2S -Phasen, da dadurch hydraulisch

reaktionsfähige Anteile entstehen. Gerade diese Reaktion beginnt schon im Temperaturbereich unterhalb von 600°C.

3.4 Verhalten von Beton bei thermischer Beanspruchung im Temperaturbereich von 600 - 1000°C

Bei höheren Temperaturen entstehen neben Belit (C_2S) auch andere minderreaktive Calcium-Silikat-Phasen. Nach [CONG 1995] entsteht z. B. aus Jennit ($C_9S_6H_{11}$) bei ca. 900°C Belit und Wollastonit (CS). Nach [TAYLOR 1964] bildet sich neben Wollastonit auch Rankinit (C_3S_2). Im Hinblick auf die thermische Aufbereitung von Betonbrechsand ist die Möglichkeit der Bildung von Wollastonit von Bedeutung. Wollastonit hat einen höheren SiO_2 -Anteil als C_2S , so daß bei ausreichend langer Temperaturbehandlung und dem Vorhandensein von SiO_2 -Trägern, z. B. aus dem Zuschlag, die Bildungsbedingungen der Phase Wollastonit ungünstiger sind als die der Phase Belit. Im besonders zementsteinreichen Betonbrechsand ist zu erwarten, daß neben Belit auch größere Anteile an Wollastonit gebildet werden, wobei eine Wollastonitbildung entweder aus der Reaktion von SiO_2 und entstandenem Freikalk oder aus der Reaktion mit dem Belit möglich wäre. In welchem Ausmaß Wollastonit gebildet wird, hängt dabei unter anderem vom Aufmahlgrad und von der Reaktionsdauer ab. Je feiner das Material vorliegt, desto größer ist die Oberfläche und desto höher der Reaktionsgrad. Aus verschiedenen Arbeiten [KHOURY 1992, SHARARA 1994] ist zu entnehmen, daß eine Bildung von Wollastonit erst ab einer Temperatur von ca. 800°C nachgewiesen wurde. Beim Zerfall der CSH-Phasen ist also damit zu rechnen, daß bei tieferen Temperaturen zunächst nur Belit gebildet wird und daß sich dann ab ca. 800°C größere Anteile des Belits in Wollastonit umwandeln. Eine Wollastonitbildung wird vor allem für den Zerfall der CSH(I)-Phasen angegeben [KHOURY 1992, SHARARA 1994], da diese ein geringeres CaO/SiO_2 -Verhältnis und damit einen höheren SiO_2 -Gehalt haben als CSH (II).

In [SCHNEIDER 1989a] ist für die Zersetzung der CSH(I)-Phasen ein Temperaturbereich von 120 - 500°C und für die Zersetzung der CSH(II)-Phasen ein Temperaturbereich von 650 - 900°C angegeben. Maßgebend sei für die Zersetzung der CSH-Phasen

und die Neubildung von C_2S der Temperaturbereich von 650 - 900°C. Nach [SCHNEIDER 1983b] beginnt die Zersetzung der CSH-Phasen ab 700°C und findet oberhalb von 850°C mit der Bildung von β - C_2S ihren Abschluß. Auch nach den meisten übrigen Angaben aus der Literatur finden die wesentlichen Zersetzungsercheinungen erst ab ca. 500°C statt, wobei es sich zunächst um die weniger stabilen CSH-Phasen handelt, die sich durch ein niedriges Molverhältnis CaO/SiO_2 auszeichnen. Mit steigender Temperatur kommt es dann auch zum Zerfall 'stabilerer' CSH-Phasen. Der überwiegende Teil aller CSH-Phasen wird zwischen 600 - 800°C zersetzt, wobei große Mengen an β - C_2S gebildet werden. CSH-Phasen können in geringen Mengen aber auch noch bei 1000°C vorliegen.

In [MANN 1975] wird das Tetracalciumaluminathydrat untersucht. Es wird festgestellt, daß bis ca. 110°C ungefähr die Hälfte des Wassers ausgetrieben wird, danach eine weitere kontinuierliche Wasserabgabe erfolgt und oberhalb von ca. 400°C die vollständige Entwässerung erreicht wird. In [SCHNEIDER 1973] wird hingegen für die Neubildung der aluminatisch und ferritisch gebundenen Phasen ein Temperaturbereich von 600 - 900°C angegeben. In [ZÜRZ 1988] wird eine Temperatur von 800°C für die Neubildung der aluminatisch-ferritischen Phasen genannt. Es ist in [ZÜRZ 1988] auch beobachtet worden, daß sich bei 700 - 800°C zunächst größere Anteile von C_3A bilden, diese jedoch bei Temperaturen über 900°C wieder zersetzt werden. Geringe Mengen von C_4AF bilden sich erst bei Temperaturen über 900°C. Anzumerken ist noch, daß es in Gegenwart von Fremdstoffen auch zur Bildung anderer Phasen kommen kann. So wird in [WOLTER 1982] darauf hingewiesen, daß sich in Gegenwart von Fluor die Phase $C_{12}A_7$ zu Ungunsten von C_3A stabilisiert.

Eine wichtige Reaktion für die thermische Behandlung von Betonbrechsand ist die Decarbonatisierung des Calciumcarbonats (Calcits) bei Temperaturen um 900°C. In Gegenwart verschiedener Beimengungen, z.B. SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 , beginnt die Reaktion bereits im Temperaturbereich von 500 - 600°C [LOCHER 1984, TAYLOR 1997]. Durch die Decarbonatisierung steigt der Gehalt an CaO (Freikalk) im thermisch behandelten Betonbrechsand an.

Freikalk (CaO) wird hauptsächlich durch drei verschiedene Abbaureaktionen gebildet. Einerseits entsteht Freikalk durch die Zersetzung von Portlandit und Calcit und

andererseits beim Zerfall von CSH-Phasen bei hohen Temperaturen. Zwar wird ein Teil des Freikalkes beim Zerfall der CSH-Phasen und der damit verbundenen Bildung von C_2S wieder in neugebildete Phasen eingebaut, jedoch ist aus XRD-Analysen [ODLER 1983, SCHNEIDER 1973, ZÜRZ 1988] abzulesen, daß der Freikalkgehalt mit steigender Temperatur offensichtlich immer weiter zunimmt und ab Temperaturen von 800 - 900°C beträchtliche Ausmaße annehmen kann.

Beim Überschreiten der Temperaturschwelle von 1000°C finden auf jeden Fall keine Phasenveränderungen mehr statt, die aus dem Verlust von chemisch gebundenem Wasser resultieren. Darauf weisen die Analysen in [MANN 1975, ZÜRZ 1988] hin, aus denen zu ersehen ist, daß im Bereich von 800 - 1000°C praktisch das gesamte chemisch gebundene Wasser freigesetzt wurde. Bei Betonen mit calcitischen Zuschlägen wird oberhalb von 1000°C noch mit einer Zersetzung von Resten von Calcit zu rechnen sein. Basaltische Zuschläge können hier durch Gasentweichung zu Aufblähungen neigen und der quarzartige Zuschlag wird sich in die feinkristalline α -Christobalit Modifikation umwandeln.

Dem Bestreben, den Betonbrechsand möglichst hoher Temperatur auszusetzen, um erneut hydrationsfähige Produkte zu erzeugen, muß die Forderung gegenüberstehen, den Freikalkgehalt möglichst gering zu halten, um Treiberscheinungen auszuschließen. Allerdings ist die Gefahr des Kalktreibens im Betonbrechsand nicht so groß wie bei handelsüblichem Portlandzement. Der thermisch behandelte Betonbrechsand hat im Vergleich zu Portlandzement eine deutlich geringere Reaktionsfähigkeit und langsamere Festigkeitsentwicklung. Das Ablöschen des Freikalkes ist also eher noch im plastischem Zustand zu erwarten. Bei hohen Freikalkgehalten kann spätes Kalktreiben jedoch auch nicht ausgeschlossen werden. Deshalb muß in der Arbeit untersucht werden, ob Freikalk durch SiO_2 und Al_2O_3 zu 'unschädlichen' Phasen wie Wollastonit (CS) [CZERIN 1977], CA und $C_{12}A_7$ gebunden werden kann. Dabei ist zu beachten, daß diese genannten Phasen unterschiedliche hydraulische Eigenschaften aufweisen. $C_{12}A_7$ zeigt z.B. eine sehr rasche hydraulische Erhärtung, während CS keine hydraulische Fähigkeit aufweist. In [SCHNEIDER 1973] wird darauf hingewiesen, daß bei geringen SiO_2 -Gehalten die Bildung von C_2S im Vergleich zur Bildung von CS aus stöchiometrischen Gründen bevorzugt sein dürfte. Dort werden aus einem zermahlene

und erhitzten Betonkörper mit hohem SiO_2 -Gehalt aus dem Zuschlag geringe Mengen an $\beta\text{-C}_2\text{S}$ und deutliche Gehalte an CS erhalten.

Derselbe Zusammenhang läßt sich auch aus [ODLER 1983, ZÜRZ 1988] im Vergleich zu [FISCHER 1970, WEIGLER 1964] folgern. In den genannten Arbeiten wurden zuvor erhitzte Probekörper anschließend wassergelagert. In [ODLER 1983, ZÜRZ 1988] bestand der bei 600°C thermisch behandelte Probekörper aus reinem Portlandzement, der bei anschließender Wasserlagerung durch Kalktreiben völlig zerstört worden ist. In [FISCHER 1970, WEIGLER 1964] handelte es sich um Proben aus Portlandzement mit quarzitischem Zuschlag (Feinsand); in diesem Fall sind an auf 600°C erhitzten und anschließend rehydratisierten Probekörpern beträchtliche Druckfestigkeiten gemessen worden. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, daß ein Teil des entstandenen Freikalks durch die Bildung von Wollastonit gebunden werden konnte. Daß die Proben in [FISCHER 1970, WEIGLER 1964] keine Zerfallserscheinungen durch Kalktreiben zeigten, wird dort auch dadurch erklärt, daß die Expansion beim Löschen des CaO in den durch die Temperaturbehandlung entstandenen Porenraum erfolgte.

Da davon ausgegangen werden kann, daß der thermisch zu behandelnde Betonbrechsand aus Recylinganlagen ein Gemisch aus unterschiedlichen Betonen ist, muß auch das Verhalten von Mischbetonen berücksichtigt werden. In [ODLER 1983, ZÜRZ 1988] wird beschrieben, daß ab 800°C die Bildung von Gehlenit bei Traßzementen und Melilith bei Schlackenzementen zu erkennen ist. Bei Silicazugabe läßt sich ab 800°C deutlich die Kristallisation von Wollastonit nachweisen, was allerdings zu ungunsten der Bildung von C_2S geschieht; bei keiner Temperatur sind dort aber nennenswerte Gehalte an Freikalk nachweisbar. Dies wird damit erklärt, daß sich Portlandit nahezu vollständig in kalkärmere CSH-Phasen umgewandelt hat, die dann bei der Erhitzung über 800°C direkt in Wollastonit übergehen. Diese Aussage wird in [SHARARA 1994] ausdrücklich bestätigt. Somit zerfallen diese Proben, entgegen Portlandzementproben, die über 600°C erhitzt wurden, bei einer anschließenden Wasserlagerung auch nicht durch Treiberscheinungen infolge von Freikalk [ODLER 1983, ZÜRZ 1988].

3.5 Verhalten von Beton bei thermischer Beanspruchung im Temperaturbereich von 1000 - 1450°C

Beim Überschreiten der Temperaturschwelle von 1000°C finden auf jeden Fall keine Phasenveränderungen mehr statt, die aus dem Verlust von chemisch gebundenem Wasser resultieren. Darauf weisen die Analysen in [MANN 1975, ZÜRZ 1988] hin, aus denen zu ershen ist, daß im Bereich von 800 – 1000°C praktisch das gesamte chemisch gebundene Wasser freigesetzt wurde. Bei Betonen mit calcitischen Zuschlägen wird oberhalb von 1000°C noch mit einer Zersetzung von Resten von Calcit zu rechnen sein. Basaltische Zuschläge können hier durch Gasentweichung zu Aufblähungen neigen und der quarzitishe Zuschlag wird sich in die feinkristalline α -Christobalit Modifikation umwandeln. In [SCHNEIDER 1982, SCHNEIDER 1983a] wird bei ca. 1150 – 1200°C das Einsetzen des Schmelzens beschrieben, wobei der Schmelzpunkt im wesentlichen von den Gehalten an Al_2O_3 und Fe_2O_3 abhängt. Je höher diese Anteile sind, desto früher ist mit dem Einsetzen des Schmelzens zu rechnen. Weitere Beimengungen erniedrigen den Schmelzpunkt ebenfalls, so daß schon bei 1100°C mit dem Auftreten von Schmelzinseln gerechnet werden kann. Nach [LOCHER 1984] beginnt bei 1280°C die Bildung der Schmelze, die zur Bildung des C_3S aus C_2S und CaO notwendig ist. Bei der Sintertemperatur von 1450°C beträgt die Schmelze rd. 25 M.-%, wobei hierin praktisch das gesamte Aluminium- und Eisenoxid vorliegt.

3.6 Festigkeitsverhalten zementhaltiger Stoffe nach einer Temperaturbehandlung

In [ODLER 1983, ZÜRZ 1988] wurden Beobachtungen zur Druckfestigkeitsentwicklung nach einer Temperaturbeanspruchung bis 1000°C bei anschließender Luft- und Wasserlagerung gemacht. Ab 800°C ist ein deutlicher Abfall der Festigkeiten zu verzeichnen gewesen. Ab 1000°C zerfallen die Proben aufgrund von Kalktreiben. Werte für die Druckfestigkeit nach einer Temperaturbeanspruchung und anschließender Wasserlagerung bei Zugabe von Zusatzstoffen werden auch in [FISCHER 1970, WEIGLER 1964] beschrieben. Aus diesen Arbeiten geht auch hervor, daß bei

Luftlagerung die Druckfestigkeit abnimmt, sie bei Wasserlagerung dagegen deutlich zunimmt. Dies läßt sich nur über die Rehydratation neugebildeter Phasen erklären.

Hinsichtlich der Rehydratation von thermisch behandelten Betonbrechsanden sind auch die Versuche an Zementsteinpulver nützlich [LACH 1970]. Hier zeigt sich, daß Portlandzementproben in Wasser eine Rehydratation erfahren, nachgewiesen an CSH-Phasen und Portlandit im zuvor temperierten Zementsteinpulver. Diese Phasen konnten im Falle der thermischen Behandlung von Eisenportlandzement und Hochofenzement nur in kleinerer Menge nachgewiesen werden.

Aus den vorstehenden Ausführungen kann zweifellos abgeleitet werden, daß nicht nur die Temperaturhöhe bei der Temperierung von Betonbrechsand wichtig ist, sondern daß auch die Zusammensetzung des zu behandelnden Materials eine entscheidende Rolle spielt.

Aus den vorstehend erläuterten Zusammenhängen kann geschlossen werden, daß der Feinanteil des Betonbrechsandes, nach einer thermischen Behandlung ein erneutes Abbindevermögen besitzt.

4 Die Herstellung von Zement und hydraulischem Kalk

4.1 Zementherstellung

4.1.1 Ausgangsstoffe

Als Ausgangsstoffe für die Herstellung von Zement werden in der Regel Kalkstein oder Kreide und Ton oder Tonschiefer verwendet. Die Kalk- und Tonkomponenten können aber auch gemischt als Mergel zum Einsatz kommen. In ihnen sind die Hauptbestandteile des Zementes CaO , SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 enthalten (Tab. 4.1). Zu ca. 70% wird in Deutschland Portlandzement verwendet. Portlandzemente (CEM I) bestehen zu 95 bis 100 % aus Portlandzementklinker. Dabei wird der Abbinderegler Gips / Anhydrit nicht berücksichtigt. Zemente mit Zusatzstoffen (CEM II und Hochofenzemente, CEM III) beinhalten zwischen 20 bis 94 % Portlandzementklinker.

Tab. 4.1: Die Zusammensetzung von Portlandzementklinker [VDZ 2000].

Chem. Formel	Abkürzung	Masseanteil	Beschreibung
CaO	C	60 ... 69 %	Reinstkalkstein, mergeliger Kalkstein, Mergelkalkstein, Kalkmergel oder Kreide
SiO_2	S	20 ... 25 %	Ton, mergeliger Ton, Mergelton, Tonmergel, Asche oder Schlacke
Al_2O_3	A	4 ... 7 %	Kiesabbrand, Eisenerz, Filterstaub der Hüttenindustrie
Fe_2O_3	F	0,2 ... 5 %	
MgO	M	0,5 ... 5 %	
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$		0,5 ... 1,5 %	
SO_3		0,1 ... 1,3 %	

Die chemische Zusammensetzung ist hierbei von großer Bedeutung. Entspricht sie nicht den geforderten Bedingungen muß mit Korrekturkomponenten die Mischung ergänzt werden. So ist bei einem zu geringen SiO_2 -Gehalt Sand und bei einem zu geringen Fe_2O_3 -Gehalt Kiesabbrand hinzuzugeben.

Die chemische Zusammensetzung wird durch Verhältniswerte, sogenannte Moduln gekennzeichnet. Hierbei sind die ermittelten Prozentgehalte der Oxide aus der chemischen Analyse für die Berechnung einzusetzen.

Der wichtigste Modul ist der Kalkstandard (KSt). Er wird zur Ermittlung des optimalen Kalkgehaltes herangezogen. Er gibt den maximal durch die Hydraulefaktoren (SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3) bindbaren CaO -Gehalt in den kalkreichsten Klinkerphasen wieder. Bei einem KSt = 100 liegt der optimale CaO -Gehalt vor. Der KSt berechnet sich wie folgt:

$$\text{KSt I} = \frac{100 \cdot \text{CaO}}{2,8 \cdot \text{SiO}_2 + 1,1 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,7 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (4.1)$$

Der Kalkstandard technischer Klinker liegt zwischen 90 und 102, hochwertige Klinker haben einen KSt von > 97 [Stark 1998].

4.1.2 Herstellungsprozeß

Die Herstellung von Zement erfordert einen hohen Energieaufwand. Die einzelnen Verfahrensschritte werden kurz angeführt (siehe auch Abb. 4.1).

Die Gewinnung der Rohstoffe erfolgt in Tagebauen oder Steinbrüchen durch Bohren und Sprengen. Bei Ton und Kreide kommen auch Schaufelrad- und Eimerkettenbagger zum Einsatz. Die so gewonnenen Rohstoffe werden unter Anwendung von Druck und/oder Schlag in Brechern zerkleinert und in Mühlen gemahlen. Vor dem eigentlichen Klinkerbrennen erfolgt eine Homogenisierung des Rohmehls. So können extreme Materialschwankungen reduziert werden.

Beim Klinkerbrennen wird bei den heute gebräuchlichen Trockendrehöfen mit Zyklonvorwärmer ein minimaler Brennstoffenergiebedarf von 3000 kJ/kg Klinker angegeben.

Die Temperaturbehandlung erfolgt dabei in zwei Schritten, einer Vorwärmung im sogenannten Calcinator bei ca. 1100°C und dem eigentlichen Brennprozeß im Drehrohfen bei ca. 1450°C.

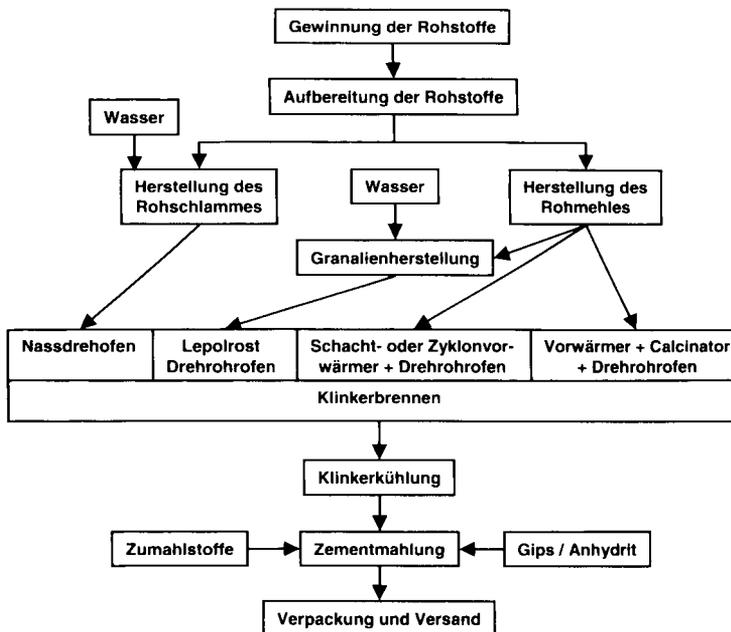


Abb. 4.1: Schematische Darstellung der Zementherstellung [Stark 2000].

Die Klinkerkühlung nach dem Brennvorgang soll in erster Linie eine rasche Abkühlung des Klinkers und damit eine Umwandlung der reaktiven Klinkerphasen in inerte Phasen verhindern, als auch möglichst viel Wärme in den Calcinator zurückführen.

Die im Brenn- und Kühlvorgang entstehenden Klinkerphasen zeigen die in Tab. 4.2 dargestellten Bezeichnungen, Eigenschaften und Zusammensetzungen (siehe auch Abb. 3.2).

Neben den genannten Klinkerphasen finden sich noch Freikalk (CaO) und Periklase (MgO) sowie vereinzelte Glasphasen im Zement. Das Vorkommen dieser Phasen hängt

von den Brenn- und Abkühlbedingungen, sowie von der Art und Zusammensetzung der Rohstoffe ab.

Tab. 4.2: Bezeichnungen, Eigenschaften und Zusammensetzungen der Klinkerphasen [STARK 2000].

Bezeichnung	Abkürzung	Formel	Mineral	Anteil	Festigkeit
Tricalciumsilicat	C ₃ S	3 CaO · SiO ₂	Alit	60 %	hohe Anfangsfestigkeit
Dicalciumsilicat	C ₂ S	2 CaO · SiO ₂	Belit	20 %	hohe Endfestigkeit
Tricalciumaluminat	C ₃ A	3 CaO · Al ₂ O ₃	Aluminat	7 %	Frühfestigkeit
Calciumaluminat-ferrit	C ₄ (A, F)	4 CaO · Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃	Aluminat-ferrit	8 %	geringe Festigkeit

4.1.3 Phasenberechnung

Der Oxidphasenbestand im Zementklinker läßt sich mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) ermitteln. Setzt man die Atomverhältnisse der Oxide in Bezug zueinander, kann man nach [BOGUE 1947] in Abhängigkeit vom Kalkgehalt der Ausgangsstoffe die potentielle Mineralzusammensetzung berechnen. Die 1929 von Bogue entwickelten Gleichungen haben noch heute ihre Gültigkeit. Nachfolgend sind die Gleichungen in Abhängigkeit vom Kalkgehalt aufgeführt.

A Systeme mit sehr hohem Kalkgehalt bilden beim Gleichgewicht CaO, C₃S, C₃A und C₄(A,F) nach folgenden Gleichungen:

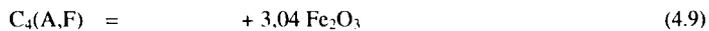
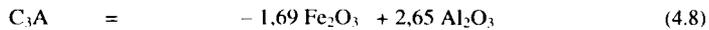
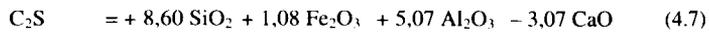
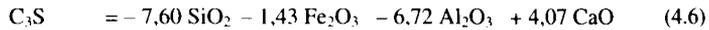
$$\text{CaO} = - 2,80 \text{ SiO}_2 - 0,35 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 1,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1,00 \text{ CaO} \quad (4.2)$$

$$\text{C}_3\text{S} = + 3,80 \text{ SiO}_2 \quad (4.3)$$

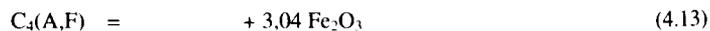
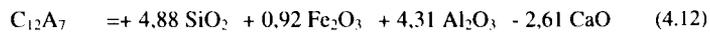
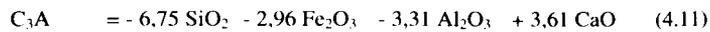
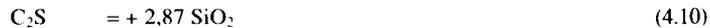
$$\text{C}_3\text{A} = - 1,692 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 2,650 \text{ Al}_2\text{O}_3 \quad (4.4)$$

$$\text{C}_4(\text{A,F}) = + 3,043 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \quad (4.5)$$

B Systeme mit mittlerem Kalkgehalt bilden beim Gleichgewicht C_3S , C_2S , C_3A und $C_4(A,F)$ nach folgenden Gleichungen:



C Systeme mit sehr geringem Kalkgehalt bilden beim Gleichgewicht C_2S , C_3A , $C_{12}A_7$ und $C_4(A,F)$ nach folgenden Gleichungen:



Die Gleichungen vom Typ C sind bei der Berechnung der Phasengehalte im thermisch behandelten Betonbrechsand ebenfalls anwendbar, da der Kalkgehalt in bezug zur primären Rohstoffzusammensetzung sehr gering ist. Außerdem lassen sich die Gleichungen der Typen A und B nicht anwenden, da das Alit in dem gewählten Behandlungstemperaturbereich zwischen 700 und 750°C noch nicht entsteht.

4.1.4 Energieeinsatz

Der Energieeinsatz hat sich in den letzten Jahren durch Verfahrensverbesserungen immer mehr dem theoretischen Energiebedarf angenähert. Der Energieeinsatz liegt derzeit im günstigsten Verfahren, dem Drehrohrföfen mit Vorcalciniierer und sechsstufigem Zyklonvorwärmer, bei 3000 kJ/kg Klinker (siehe Abb. 4.2).

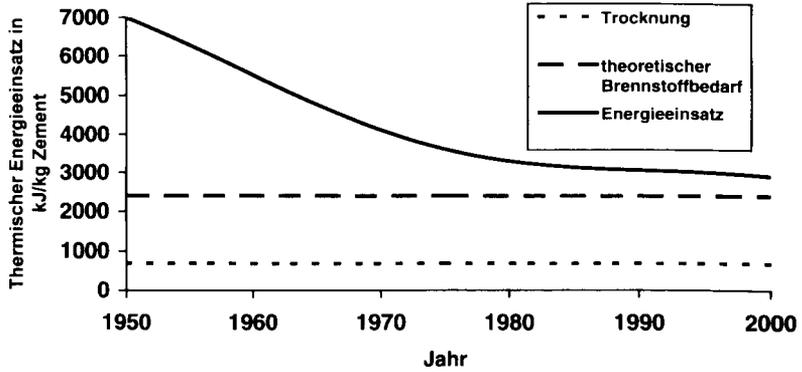


Abb. 4.2: Energieeinsatz bei der Zementherstellung [VDZ, 1999].

4.2 Herstellung hydraulischer Kalke

4.2.1 Ausgangsstoffe

Hydraulische Kalke bestehen aus Calciumsilikaten, Calciumaluminaten und Calciumhydroxid. Die Herstellung erfolgt durch den Brennvorgang tonhaltiger Kalksteine und anschließendes Löschen und Mahlen. (Ausgangsstoffe siehe Tab. 4.3). Der Erstarrungs- und Erhärtungsprozeß ist i.w. hydraulisch. Kohlendioxid führt zu einer Verstärkung der Erhärtung.

Tab. 4.3: Die chemische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe zur Kalkherstellung:

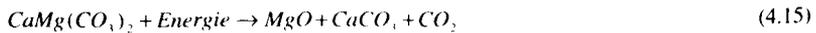
Bestandteil	Anteil
CaO	40 – 59 %
freies CaO	3 – 19 %
SiO ₂	11 – 27 %
Al ₂ O ₃	3 – 8 %
Fe ₂ O ₃	2 – 3 %
MgO	2 – 3 %
CaSO ₄	2 – 7 %
weitere	13,5 – 25,5 %

4.2.2 Herstellungsprozeß

Der Brennprozeß erfolgt standardmäßig in Schacht- oder Drehrohröfen bei Temperaturen zwischen 900 und 1300 °C. Der dabei einsetzende Entsäuerungsprozeß verwandelt in einer endothermen Reaktion das Calciumcarbonat in Calciumoxid und Kohlendioxid (siehe Gl. 4.14).



Weitere Bestandteile im Ausgangsmaterial reagieren folgendermaßen:





Der Löschvorgang erfolgt durch Zugabe von Wasser, wobei der ungebundene CaO-Anteil in Calciumhydroxid und Wärmeenergie umgewandelt wird (Gl. 4.19):



4.2.3 Energieeinsatz

Bei der Kalkherstellung ist der Energiebedarf im Kalkschachtofen in der gleichen Größenordnung wie bei der Zementherstellung im Drehrohrföfen (Abb. 4.2 und Tab. 4.4).

Tab. 4.4: Der Wärmeaufwand zur Kalkherstellung in Abhängigkeit vom Brennverfahren

Brennverfahren	spez. Wärmeaufwand kJ / kg Klinker
Kalkschachtöfen	3500 – 5500
Drehrohröfen	5000 – 6800

5 Versuchsprogramm

5.1 Allgemeines zur Baustoffherstellung und -behandlung

Den grundsätzlichen Ablauf der Herstellung und weiteren Behandlung der verwendeten Baustoffe zeigt Tab. 5.1. Für die Versuche wurden als Ausgangsstoffe Beton (Festigkeitsklasse B 35), Ziegelsteine und Kalksandsteine verwendet. Diese Ausgangsstoffe wurden mechanisch zerkleinert, meist in einem Laborbackenbrecher. Von dem zerkleinerten Material wurde der Brechsand (< 2 mm) abgesiebt.

Tab. 5.1: Baustoffherstellung und -behandlung

Versuchsabschnitt	Baustoff / Prozeß	Prozeßparameter
Ausgangsmaterial	Beton Ziegel Kalksandstein	Def. Herstellung und Zusammensetzung, Verwertungsziele
Mechanische Aufbereitung	Backenbrecher Prallmühle Siebung	Größtkorn, Kornverteilung, Zuschlag/Bindemittel- Verhältnis
Brechsand – Zusammensetzung	BBS ZBS KSB Verunreinigungen	Art, Mengenanteile
Thermische Behandlung	Laborofen Drehrohrföfen	Temperaturhöhe Haltezeit, Abkühlung
Baustofferzeugung	Herstellung von Mörtelprismen	Brechsande Normsande Lagerung
Schnellerhärtung	Druckbehandlung Autoklavbehandlung	Druck Wärme Dampfsättigung

Der Brechsand wurde anschließend einer Temperaturbeanspruchung zwischen 400°C und 1000°C, in Abstufungen von 50°C, ausgesetzt. Die Abkühlung erfolgte dann bei allen Proben identisch durch Ausbreiten auf einem Blech an der Raumluft. Es wurde vor und nach der thermischen Behandlung eine röntgenographische Phasenanalyse durchgeführt. Mit dem temperierten Brechsand als Bindemittel und Normsand als Zuschlag wurden dann Mörtelprismen nach DIN 18555, Teil 1 hergestellt. Die dabei berücksichtigten Variationen sind in Kapitel 5.4.1 aufgeführt. Teilweise wurde nicht temperierter Brechsand als Zuschlag verwendet. Die an den so hergestellten Baustoffen vorgenommenen Eigenschaftsuntersuchungen werden in Abschnitt 5.5 erläutert. Auch eine Weiterverarbeitung von Mörtel zu Halbzeug (künstlichen Steinen) wurde in die Versuche mit einbezogen, indem Entwässerung unter Druck- und Autoklaverhärtung folgten (siehe hierzu Kap. 5.4.2).

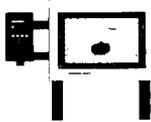
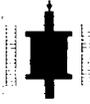
5.2 Ausgangsstoffe

5.2.1 Betonbrechsand

Der Hauptausgangsstoff war Betonbrechsand (BBS). Er wurde aus definiert hergestelltem Beton B 35 gewonnen (siehe Tab. 5.3). Als Bindemittel wurde CEM I 32,5 R nach DIN 1164 eingesetzt. Als Zuschläge wurden quarzitische und calcitische Gesteinskörnungen verwendet. Die Sieblinie entsprach dem Sieblinienbereich A/B 16 nach DIN 1045.

Die Betone mit den quarzitischen Gesteinskörnungen dienten als Bezugsbetone zur Ermittlung der thermischen Behandlungsbedingungen sowie der Beurteilung der Eigenschaften. Nach Herstellung der Betone als Zylinder ($d = 150 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$) wurden diese 180 Tage im Normklima bei 20/65 gelagert und anschließend in einem Backenbrecher der Marke Retsch (Tab. 5.2) gebrochen. In einem ersten Siebvorgang wurde davon das Material $< 2 \text{ mm}$ abgesiebt.

Tab. 5.2: Aufbereitungs- und Behandlungsschritte

Prozeß	Prinzip	Gerät
Zerkleinern	Druck	 Backenbrecher
	Prall	 Prallmühle
Thermische Behandlung	Wärmezufuhr	 Laborofen
		 Drehrohrföfen
Autoklavbehandlung	Druck (Entwässerung)	 Druckpresse
	Wärmezufuhr bei Dampfdrucksättigung	 Autoklaven

Der so gewonnene Betonbrechsand < 2 mm diene nun in verschiedenen Variationen als Hauptausgangsstoff für die thermische Behandlung. Die Korngrößenverteilung des Brechsandes ist in Abb. 5.1 dargestellt. Im Regelfall erfolgt eine weitere Absiebung auf < 250 µm. Wenn nicht ausdrücklich erwähnt, wird nachfolgend immer dieses Material < 250 µm als Betonbrechsand zur Bindemittelherstellung verwendet.

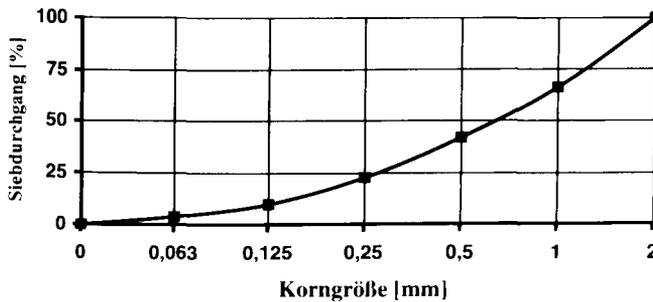


Abb. 5.1: Sieblinie von Betonbrechsand mit einem Größtkorn von 2 mm, gewonnen durch mechanische Aufbereitung im Backenbrecher.

Zu Vergleichszwecken wurde auch Betonbrechsand mit größerem (bis 2 mm) und kleinerem (bis 63 µm) Größtkorndurchmesser thermisch behandelt. Zudem wurde Brechsand mit 2 mm Größtkorndurchmesser insgesamt in einer Prallmühle (Tab. 5.2) auf Korngrößen < 250 µm fein gemahlen.

Vergleichend zu dem Betonbrechsand (BBS) aus definiert hergestelltem Beton wurde auch Betonbrechsand unbekannter Herkunft (ABB) mit in das Prüfprogramm aufgenommen, um realitätsnahe Verhältnisse einzubeziehen.

Tab. 5.3: Ausgangsstoffe

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Bestandteile
1	ABB	Betonbrechsand mechanisch aufbereitet aus Abbruchbeton	Undefinierte Zusammensetzung
2	BBS	Betonbrechsand mechanisch aufbereitet aus def. hergestelltem Beton der Festigkeits- klasse B 35	Zement: CEM I 32,5 R, 370 kg/m ³ , w/z 0,5, Zuschlag: quarzitisches (Edersand und -kies), 1800 kg/m ³
3	BBS-Cc	Wie BBS	Gleiche Mengen, wie bei BBS; Zuschlag im Ausgangsbeton jedoch calcitisch (Cc) aus dem Südharz
4	ZBS	Ziegelbrechsand	Mauerziegel des Typs Hlz 12 - 0,9
5	KSB	Kalksandsteinbrechsand	Kalksandvollsteine der Festigkeitsklasse 8
6	BBS-A	BBS plus Natriumhydroxid als Natriumlieferant	NaOH, 2 M.-% / Bindemittel
7	BBS-Cl	BBS plus Salz Calciumchlorid als Chloridlieferant	CaCl ₂ , 1 M.-% / Bindemittel
8	BBS-FM	BBS plus Fließmittel Betocrete (FM)	Gleiche Mengen, wie bei BBS; jedoch plus Superplasticizer, 50g / kg Bindemittel

5.2.2 Ziegelbrechsand und Kalksandsteinbrechsand

Anteile des Betonbrechsandes wurden durch Ziegelbrechsand (ZBS) sowie Kalksandsteinbrechsand (KSB) substituiert und so Veränderungen des Phasenbestandes im Ausgangsstoff berücksichtigt. Dies wurde bis zur vollständigen Substituierung des Betonbrechsandes durch Ziegelbrechsand bzw. Kalksandsteinbrechsand vollzogen, um auch Grenzzustände der möglichen Brechsandzusammensetzungen aus realen Bauschuttgemischen zu erfassen.

Es wurden neue Mauerziegel des Typs Hlz 12 - 0,9 ($\rho_{Rg} \approx 1900 \text{ kg/m}^3$) verwendet. Die Herstellung der Brechsande daraus erfolgte durch Zerkleinerung im Laborbackenbrecher. Für die Herstellung des Kalksandsteinbrechsandes wurden Kalksandvollsteine (KSB, $\rho_{Rg} \approx 1900 \text{ kg/m}^3$) zerkleinert, die der Festigkeitsklasse 8 entsprachen. Die Sande wurden in die Korngruppe 0/2 klassiert.

5.2.3 Verunreinigungen

Um mögliche Verunreinigungen im Ausgangsbeton durch den vorangegangenen Einsatz im Bauwerk zu berücksichtigen, wurde der Betonbrechsand gezielt durch die Zugabe von Natriumhydroxid (Alkalie) und Calciumchlorid (Tausalz) verunreinigt. Es wurde jeweils etwa das Zweifache der nach DIN 1164 zulässigen Höchstwerte zugegeben, nämlich 1,0% Chlorid bzw. 2,0% Kalium bezogen auf das Zementgewicht. Derartig hohe Konzentrationen an Verunreinigungen werden nur selten Bauschuttgemischen erreicht, wie Untersuchungen in [MÜLLER, A. 1995] zeigten.

5.3 Thermische Behandlung

5.3.1 Öfen

Der größte Teil der thermischen Behandlungen am Betonbrechsand wurde in einem stationären Laborofen vorgenommen; praxisnähere Vergleichsversuche erfolgten in

Drehrohröfen. Die verwendeten Öfen werden nachfolgend beschrieben.

Laboröfen (Standardöfen)

Es wurde ein Ofen der Firma Nabertherm (Abb. 5.2) zur thermischen Behandlung der Brechsande verwendet.

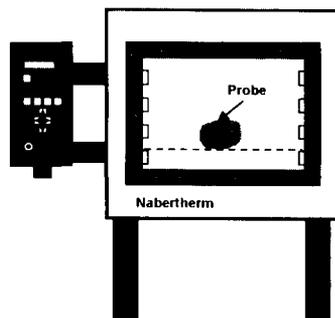


Abb. 5.2: Laboröfen Nabertherm zur thermischen Behandlung von BBS bis zu einer max. Behandlungstemperatur von 1350°C.

Es handelt sich um das Modell N 60 HR aus dem Jahr 1988. Mit diesem Ofen ist eine maximale Behandlungstemperatur von $T_{\max} = 1350^{\circ}\text{C}$ erreichbar. Der zu behandelnde Brechsand wurde auf Keramikschaalen oder Blechen mit einem maximalen Füllgewicht von 2 kg in den Ofen gegeben. Der Laborofen war der Standardofen für alle durchgeführten Behandlungsvariationen.

Labordrehrohröfen zur Vergleichsanalyse

Vergleichend wurden thermische Behandlungen des Betonbrechsandes in einem Drehrohröfen der Marke Carbolite LTD, Hope Valley, USA, Bj. 1999 (siehe Abb. 5.3) durchgeführt. Die maximale Behandlungstemperatur beträgt 1500°C, die Rohrlänge ist

1,70 m. Die Neigungseinstellung erfolgt mittels Handrad. Im Labordrehrohrföfen wurden die Unterschiede einer thermischen Behandlung im Drehrohrföfen zu der im stationären Laborföfen untersucht. Da die Drehrohrlänge nicht variiert werden konnte, war die Aufheiz- und Abkühlperiode an die Verweilzeit in der beheizten Rohrzone gekoppelt und richtete sich nach der Neigungseinstellung des gesamten Ofens.

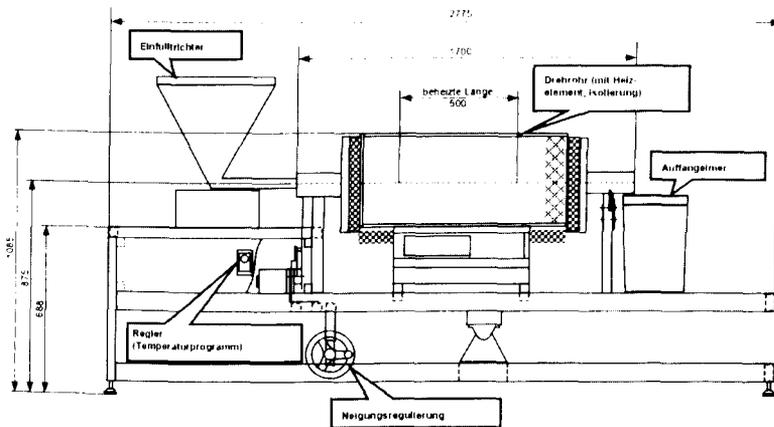


Abb. 5.3: Labordrehrohrföfen der Marke Carbolite zur thermischen Behandlung von BBS bis zu einer max. Behandlungstemperatur von 1500°C.

Drehrohrföfen im Technikummaßstab

Die Drehrohrföfenversuche im Technikummaßstab wurden in der Magdeburger Ofenanlage des Institutes für Apparate- und Umwelttechnik, Abteilung Umwelttechnik, durchgeführt. Es wurde die praktische Umsetzbarkeit der Brechsandtemperierung in einer praxisnahen Geräteanordnung erprobt (siehe Abb. 5.4). Hierbei sollten auch erste Erkenntnisse zu Wirtschaftlichkeitsfragen der Erzeugung von reaktivem Material aus Brechsand durch eine thermische Behandlung im Drehrohrföfen gewonnen werden.

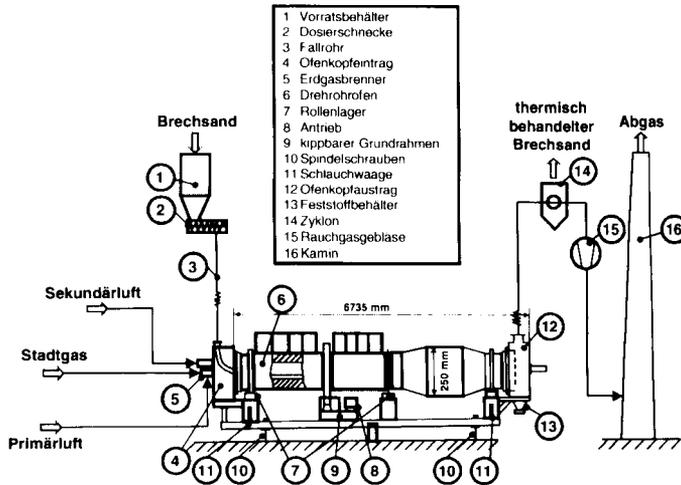


Abb. 5.4: Drehrohrföfen im Technikummaßstab zur thermischen Behandlung von BBS bis zu einer max. Behandlungstemperatur von 1000°C.

5.3.2 Aufheizrate

Die Aufheizung im Laborofen erfolgte stets mit 10 Kelvin pro Minute. Der zu behandelnde Betonbrechsand wurde auf einem Blech oder in einer Keramikschale fein verteilt. So konnte erreicht werden, daß die Ofentemperatur mit geringer Voreilung auch die Temperatur der zu behandelten Probe war. Zum Nachweis wurden Temperaturfühler in den Ofenraum und in die Probe eingebaut.

5.3.3 Behandlungstemperatur

Als Hauptbehandlungstemperatur ist nach den theoretischen Vorüberlegungen 700°C gewählt worden, da hier das Optimum der Beliterzeugung bei einem gleichzeitig geringen Freikalkgehalt zu erwarten ist. Für Parameterstudien wurde ausgehend hiervon

die Temperatur im Bereich von 450 bis 1000°C in Schritten von 50 K variiert. Für die Röntgenbeugungsanalyse wurde der Temperaturbereich bis auf 1350°C ausgedehnt.

5.3.4 Haltezeit

Die Haltezeit wurde zwischen 0 und 60 Minuten in Schritten von 15 Minuten variiert. Die Variation der Haltezeit erfolgte nur bei der Hauptbehandlungstemperatur von 700°C. Ansonsten wurde immer eine Haltezeit von 30 Minuten eingehalten.

5.3.5 Abkühlung

Die Abkühlung sollte so rasch wie möglich erfolgen. Nach Lea's Chemistry of Cement and Concrete [HEWLETT 1998] erzielt man bei einer Abkühlrate von 20000-50000 K/min bei Belit die doppelte Festigkeit, bezogen auf eine „normale Ofenkühlung“. Deshalb wurde nach Beendigung der jeweiligen Temperaturbehandlung der Ofen geöffnet und das Material auf einem ca. 2 m² großem Blech fein verteilt, daraus ergab sich eine Abkühlrate von etwa 350 Kelvin pro Minute. In einem Versuch wurde zur Steigerung der Kühlleistung eine Wasserkühlung im Vergleich zu der eben beschriebenen Kühlungsart an Luft durchgeführt. Dazu wurde das Blech zum schnellen Abtransport der Behandlungswärme in ein Bad mit fließendem Wasser gegeben, das ergab eine Abkühlrate von 1400 Kelvin pro Minute.

5.4 Baustoffherstellung aus temperiertem Brechsand

5.4.1 Mörtel

Mit dem temperierten Brechsand als Bindemittel und Normsand als Zuschlag wurden dann Mörtelprismen nach DIN 18555, Teil 1 hergestellt. Die Zusammensetzung des Bindemittels und der Mörtel sind in den Tab. 5.4 und Tab. 5.5 dargestellt. Für die

Standardrezeptur wurden 900g Betonbrechsand anstelle der in der DIN 1164 geforderten 450g Bindemittel zugegeben, da der Bindemittelgehalt nach DIN 52170 einen Gehalt von 50% ergab.

Die Lagerung der Mörtelprismen fand bei 20°C / 65% relativer Feuchte bzw. 20°C / unter Wasser statt. Es wurde die Eigenschaften 28 Tage nach Herstellung an den hergestellten Prismen ermittelt. Zur Verfolgung der zeitlichen Entwicklung der Eigenschaften wurden an ausgewählten Serien auch Werte im Probenalter von 7, 56 und 90 Tagen bestimmt. Die dargestellten Ergebnisse geben immer den Mittelwert einer Serie von Messungen an drei Mörtelprismen wieder.

Tab. 5.4: Bindemittelzusammensetzungen in M.-%

Lfd. Nr.	Bez.	Ther. beh. Ausgangsstoff							
		BBS	BBS-Cc	CEM	KSB	ZBS	Cl	Na ⁺	ABB
1	BBS	100	-	-	-	-	-	-	-
2		75	-	25	-	-	-	-	-
3		50	-	50	-	-	-	-	-
4		25	-	75	-	-	-	-	-
5	CEM	-	-	100	-	-	-	-	-
6	KSB	-	-	-	100	-	-	-	-
7		50	-	-	50	-	-	-	-
8	ZBS	-	-	-	-	100	-	-	-
9		50	-	-	-	50	-	-	-
10		50	-	-	25	25	-	-	-
11	BBS-Cl	99	-	-	-	-	1	-	-
12	BBS-A	98	-	-	-	-	-	2	-
13	ABB	-	-	-	-	-	-	-	100
14		90	10	-	-	-	-	-	-
15		70	30	-	-	-	-	-	-
16		50	50	-	-	-	-	-	-
17	BBS-Cc	-	100	-	-	-	-	-	-

Tab. 5.5: Mörtelzusammensetzung

Stoff	Bindemittel [g]	Zuschlag [g]	Zugabewasser [g]	Fließmittelzugabe [g/kg BM]
Standartrezeptur	900	900	400	-
Rezepturvariationen	450-900	1350-900	220-900	0 - 50

5.4.2 Halbzeug (künstliche Steine)

Um Verwertungsmöglichkeiten auch für bindemittelarme Brechsande zu finden, wurde aus Brechsand auch Halbzeug (künstliche Steine) hergestellt.

Betonbrechsand mit einer Körnung $\leq 2\text{mm}$ wurde, wie bei der Mörtelherstellung, einer thermischen Vorbehandlung bei 700°C in einem Laborofen mit einer Haltezeit von 30 Minuten unterzogen. Anschließend erfolgte die Abkühlung feinverteilt auf einem Blech an der Raumluft.

Abweichend von der üblichen Kalksandsteinherstellung wurde die Mischung nicht erdfreucht verarbeitet. Es wurde statt dessen ein Wasserüberangebot hinzugegeben und der Mischung eine Einsumpfzeit von einer halben Stunde gegeben. Es wurden immer 1,5 kg Betonbrechsand und 1,0 kg Wasser miteinander vermischt. Das nicht vom Betonbrechsandmörtel aufgenommene Überschußwasser wurde abfiltriert. Das so erzeugte Material wurde in Würfelformen mit 10 cm Kantenlänge gegeben. Das Einfüllen in die Formen erfolgte nach DIN 1164.

Das Material wurde dann in der Form belassen und einer Druckbelastung von 100 kN ausgesetzt. Die Druckbelastung erfolgte in einer Zweiäulen-Prüfpresse. Die Belastung wurde über einen Zeitraum von 10 Minuten konstant gehalten. Die so entstandenen Presslinge hatten etwaige Abmessungen von $B/T/H = 10/10/8$ cm. Im Anschluß erfolgte die eigentliche Autoklavbehandlung im Hochdruckautoklaven. Der Autoklav hat ein bis 250°C reichendes Heizelement, einen Innendurchmesser von 120mm und hält einem maximalen Druck von 100 bar stand.

In Anlehnung an die Behandlungsparameter bei der Kalksandsteinherstellung wurden folgende Einstellungen und Zeiten zur Steinherstellung aus Betonbrechsand mittels Autoklaven vorgenommen:

- Dampfsättigung
- 180°C Behandlungstemperatur
- ca. 18 bar Druck
- 4 Stunden Behandlungsdauer

Abschließend erfolgte in einem zeitlichen Abstand von 1.5 Stunden nach der Autoklavbehandlung die Druckfestigkeitsprüfung. Die Formlinge waren zu diesem Zeitpunkt auf Raumtemperatur erkaltet.

5.5 Untersuchungsarten und -umfang

5.5.1 Phasenbestand

Allgemeines

Mineralischen Baustoffen, also auch Betonbrechsand, die einer thermischen Beanspruchung bei hoher Temperatur unterzogen werden, wird in bestimmten Temperaturbereichen das physikalisch und chemisch gebundene Wasser entzogen. Der Betonbrechsand geht in einen zunehmend wasserarmen, schließlich wasserfreien Zustand über. Seine mineralogische Zusammensetzung ist durch alte und sich neu bildende bzw. umgewandelte Phasen in Abhängigkeit von den thermischen Randbedingungen gekennzeichnet.

Von Bedeutung ist für die in dieser Arbeit behandelten Aufgabe das Wissen über Entwässerungs- und Dehydratisationsbereiche, die Entsäuerung sowie die Art der Bindungen. Mit deren Hilfe lassen sich Rückschlüsse auf das Erhärtungsvermögen und die Gebrauchseigenschaften der zu erzeugenden Baustoffe ziehen.

Es wurden verschiedene Untersuchungsmethoden angewandt. Die Bestimmung der Zusammensetzung über die Oxide erfolgt am einfachsten mittels der Röntgen-

Fluoreszenz-Analyse (RFA), eine in der Zementchemie heute übliche und zuverlässige Methode.

Durch Temperaturbeanspruchung hervorgerufene chemische und physikalische Veränderungen lassen sich mit der Differential-Scanning-Calometrie (DSC) bzw. Differential-Thermo-Analyse (DTA) und der Thermogravimetrie (TG) verfolgen. Bei Einhaltung definierter Randbedingungen entstehen reproduzierbare Ergebnisse.

Neubildungen bzw. Umwandlungen kristalliner Phasen lassen sich besonders gut mit Hilfe der Röntgenbeugungsanalyse nachweisen. Die röntgenamorphen Phasen (z. B. ein Teil der Calciumsilikathydrat-Verbindungen), werden mit dieser Methode aber nicht erfaßt.

Zur Visualisierung der Struktur und des Gefüges wurden die Elektronenmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie (REM) herangezogen. Mit Hilfe der EDX-Analyse kann während der Rasterelektronenmikroskopie außerdem der quantitative Gehalt der Elemente bestimmt werden.

Im Folgenden werden die Untersuchungsmethoden und die Veranlassung ihres Einsatzes für die Untersuchungsziele dieser Arbeit kurz erläutert.

Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Die Bestimmung der Zusammensetzung der Brechsande erfolgte mittels der Röntgen-Fluoreszenz-Analyse (RFA). Über die Angabe der oxidischen Verbindungen gemacht werden. Außer den Bauschuttbrechsanden wurde vergleichend auch hydratisierter Zementstein betrachtet. Besonders der prozentuale Anteil an Calciumoxid in den Brechsanden ist für die Bestimmung der reaktiven Phasen in den Brechsandgemischen von entscheidender Bedeutung. Die Oxidanteile finden Eingang in den Kalkstandard zur Ermittlung des optimalen Kalkgehaltes in den wichtigsten Hydraulefaktoren. Das Funktionsprinzip der RFA ist in Abb. 5.5 skizziert.

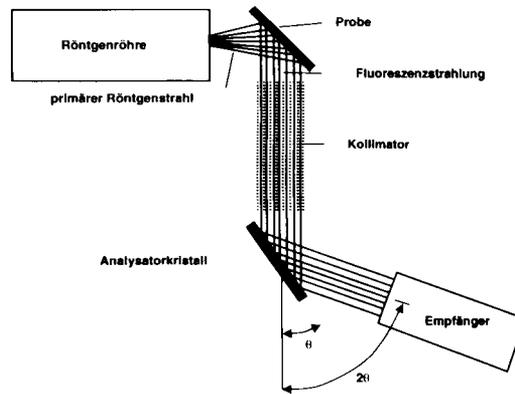


Abb. 5.5: Schematische Darstellung der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA).

Thermogravimetrie (TG) und Differenzialthermogravimetrie (DTG)

Bei der thermogravimetrischen Messung (TG) wird der Gewichtsverlust einer Probe bei Temperaturbeanspruchung bis 1500°C registriert. Als Ergebnis der thermoanalytischen Messung erhält man ein Thermogramm, das die Auswirkungen von Entwässerungs-, Zersetzungs- und Oxidationsprozessen auf das Probengewicht beschreibt. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abb. 5.6 dargestellt.

Verdeutlichen und quantifizieren kann man diese Vorgänge, indem man die Ableitung des Gewichts nach der Zeit oder Temperatur bildet (DTG).

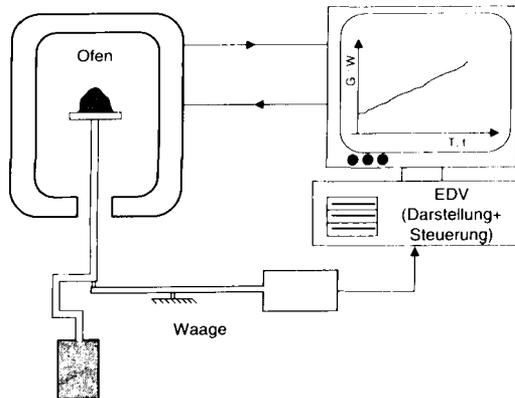


Abb. 5.6: Schematische Darstellung der thermogravimetrischen Messung und Auswertung (TG).

Differenzialthermoanalyse (DTA)

Die differenzielle Thermoanalyse ist eine Technik, bei der der Temperaturunterschied zwischen einer Probe und einem inaktiven Referenzmaterial als Funktion der Temperatur gemessen wird, während Probensubstanz und Referenzmaterial einem kontrollierten Temperaturprogramm unterworfen sind (siehe Abb. 5.7). Die Probe und das Referenzmaterial werden so erhitzt, daß die Temperatur der Probe linear mit der Zeit ansteigt. Gemessen wird die Temperaturdifferenz zwischen der Probe und dem Referenzmaterial (Al_2O_3). Diese Temperaturdifferenz wird dann gegen die Proben temperatur aufgetragen und man erhält ein Differentialthermogramm. Dieses Differentialthermogramm enthält Informationen in Form von Peaks über exotherme bzw. endotherme Prozesse wie z.B. Schmelzen, Desolvatisierung, Dehydrierung, Oxidation, Reduktion, Adsorption und Festphasenreaktionen. Über die Fläche eines Peaks erhält man die verbrauchte bzw. freigesetzte Energiemenge der jeweiligen Reaktion.

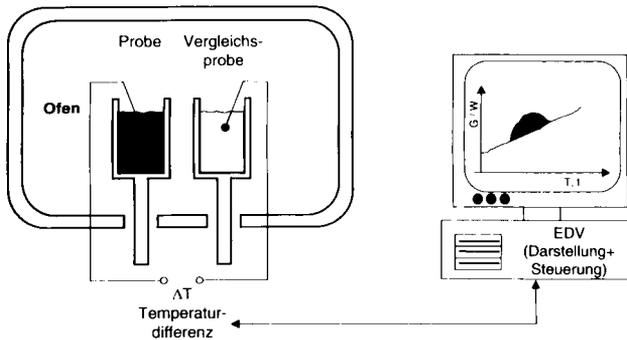


Abb. 5.7: Schematische Darstellung der Differentialthermoanalytischen Messung und Auswertung (DTA).

Röntgenbeugungsanalyse

Die Röntgendiffraktometeranalysen der Brechsande wurden mit einem Philips Diffraktometer mit JCPDS-Datenbank-Software zur Phasenidentifizierung durchgeführt [JCPDS 1999]. Mittels der Methode können feste, kristalline Phasen erkannt werden. Diese Methode führt i. w. zu qualitativen Aussagen; die Menge der identifizierten Phasen läßt sich nur grob abschätzen.

Die zuvor getrockneten Betonbrechsandproben wurden auf $< 63 \mu\text{m}$ aufgemahlen und in einen Probenträger eingebracht. Das verwendete Gerät besitzt eine Bragg-Bretano-Meßgeometrie und ist mit einer Kupfer-Röntgenröhre ausgestattet. Mit einer Beschleunigungsspannung von 40 kV und einer Stromstärke von 30 mA werden Röntgenstrahlen mit einer spezifischen, monochromatischen Wellenlänge erzeugt. Mit einer Geschwindigkeit von $0,02 \text{ } 2\theta/\text{s}$ wird ein Winkelbereich von $3\text{-}65^\circ \text{ } 2\theta$ abgefahren. Die Nachweisgrenze liegt bei Phasengehalten von ca. 2-3 M.-% in der Mischung.

Man erhält Diffraktogramme mit Ausschlägen (Peaks), deren Lage für jede Phase charakteristisch ist und mittels derer die Phasen identifiziert werden können. Die Methode wurde eingesetzt, um Aussagen zur Veränderung der kristallinen Phasen in

den Brechsanden durch eine Temperaturbehandlung bzw. zum Phasenbestand im damit hergestellten Mörtel machen zu können. In Kapitel 6.4 sind die Röntgendiagramme ausgewählter Proben der Phasenanalyse aufgeführt.

Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Die Oberfläche der untersuchten mineralischen Baustoffe ist elektrisch nicht leitend, daher mußten die Proben besputtert werden. Hierzu wurde zunächst Kohlenstoff aufgedampft und anschließend im Vakuum Gold. Die Sekundärelektronenerfassung (SE) der von den Proben rückgestrahlten Primärelektronen (PE) wurde mittels SE- bzw. BSE-Detektor (back scattered electrons) durchgeführt (Funktionsprinzip siehe Abb. 5.8). Mikroskopische Verfahren eignen sich zur bildhaften Darstellung des Zementstein-, Mörtel- oder Betongefüges, besonders hinsichtlich ihres Phasenbestandes. Durch Temperaturbehandlung entstandene Phasen, wie C_2S (Belit) oder C_3A (Calciumaluminat) sind mit der Methode der Rasterelektronenmikroskopie (REM) im Brechsand aber nicht zu analysieren. An hydratisierten Betonbrechsandproben jedoch ist vor allem das Auftreten, sowie die Häufigkeit und die Form der beim Abbinden entstandenen CSH-Phasen visualisierbar. Da die anderen Brechsande (KSB, ZBS) zur Festigkeitsbildung gar nicht oder vernachlässigbar beitragen, wurde auf deren Ergebnisaufnahme in diese Arbeit verzichtet.

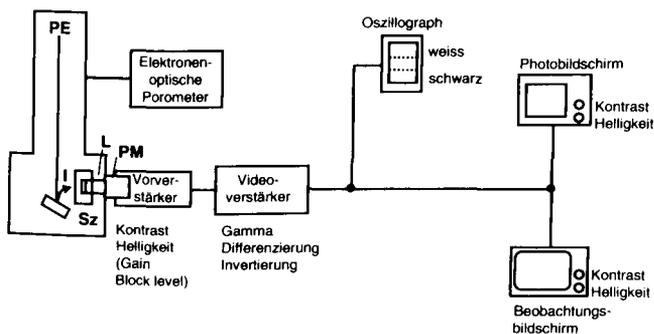


Abb. 5.8: System der Signalverarbeitung bei der Rasterelektronenmikroskopie (REM).

In Kapitel 6.5 werden ausgewählte Ergebnisse der REM-Untersuchungen dargestellt und interpretiert.

5.5.2 Frischmörteleigenschaften, Verarbeitbarkeit

Allgemeines

Am Frischmörtel, hergestellt mit thermisch behandeltem Brechsand als Bindemittel wurden die Frischmörtelrohichte, die Konsistenz und der Luftporengehalt bestimmt. Die durchgeführten Versuche werden nachfolgend kurz beschrieben. Die Probenzahl entsprach den jeweils angewandten Vorschriften.

Frischmörtelrohichte

Die Rohichte des Frischmörtels wurde mittels zweier Verfahren bestimmt. Zum einen nach DIN 18555, Teil 2 im LP-Topf. Da die Ausbreitmaße im Konsistenzbereich $K_M 2$ lagen erfolgte das Einfüllen und Verdichten der Proben nach dem Schockverfahren.

Bei dem zweiten Verfahren wurden als Meßgefäße die Normprismenformen 4 cm x 4 cm x 16 cm verwendet. Durch Wiegen der Form vor und nach Einfüllen des Frischmörtels wurde das Füllgewicht bestimmt. Der Mörtel wurde gemäß DIN 18555, Teil 3 eingefüllt und verdichtet. Die Rohichte errechnet sich dann nach Gleichung 5.1.

$$\rho = m / V \quad [\text{kg/dm}^3] \quad (5.1)$$

Konsistenz

Die Konsistenz des Frischmörtels wurde gemäß DIN 18555, Teil 2 bestimmt. Unter Anwendung eines Ausbreittisches nach DIN 1060, Teil 3 wurde ein Ausbreitmaß im Bereich der Konsistenz $K_M 2$ plastisch von 14 bis 20 cm, im Mittel 17 cm, angestrebt.

Die tatsächliche Zugabewassermenge wurde jeweils per Rückwaage des nicht verbrauchten Wassers ermittelt.

Die Prüfungen des Ausbreitmaßes der einzelnen Mischungsverhältnisse wurden bei jeweils erhöhter Wasserzugabe wiederholt, bis oben genannter Konsistenzbereich als Anfangswert nach Mischende erreicht wurde. Aus der zugegebenen Wassermenge wurden der Wasser-Bindemittel-Wert (w/b) nach Gleichung 5.2 und der Wasser-Feststoff-Wert (w/f) nach Gleichung 5.3 ermittelt.

$$w/b = \text{Wasser [g]} / \text{Bindemittel [g]} \quad [-] \quad (5.2)$$

$$w/f = \text{Wasser [g]} / (\text{Bindemittel [g]} + \text{Zuschlag [g]}) \quad [-] \quad (5.3)$$

Das Ausbreitmaß wurde in der ersten Stunde nach dem Mischungsende alle 15 Minuten bestimmt und noch einmal einer weiteren Stunde, um das Ansteifverhalten zu beschreiben.

Luftporengehalt

Nach DIN 18555, Teil 2, wurde der Luftporengehalt als im Frischmörtel vorhandenes Luftvolumen ermittelt. Die Prüfung erfolgte nach dem Druckausgleichsverfahren.

5.5.3 Festigkeitseigenschaften

Allgemeines

Zur Beurteilung der Festigkeitseigenschaften der Mörtel mit thermisch behandeltem Brechsand wurden die Druck- und Biegezugfestigkeit untersucht. Es wurden die Einflüsse der verschiedenen Ausgangsstoffe, der unterschiedlichen Behandlungen sowie der Variation der Mörtelzusammensetzung und Lagerung auf die Festigkeit vergleichend betrachtet.

Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde an halben Mörtelprismen nach DIN 1164 gemessen. Jedes in Kapitel 7 angeführte Ergebnis stellt den Mittelwert einer Serie von mindestens 3 und maximal 6 Messungen dar. Die Prismenstücke wurden im Probenalter von 7, 28, 56 und 90 Tagen geprüft.

Die Prüfungen der Druck- und Biegezugfestigkeit wurden auf einer Spindelprüfmaschine der Firma Instron Wolpert GmbH mit einer 100kN Kraftmeßdose durchgeführt.

Biegezugfestigkeit

Die Ermittlung der Biegezugfestigkeit erfolgte an je 2 Prismen im gleichen Probenalter, wie die der Druckfestigkeit. Die Durchführung der Prüfung erfolgte nach DIN EN 196. Teil I ebenfalls in einer mechanischen 100 kN Prüfmaschine der Marke INSTRON. Beim Prüfungsvorgang wurde mit einer Geschwindigkeit von 50 N/s die Kraft bis zum Bruch der Probe erhöht.

5.5.4 Verformungsverhalten

Allgemeines

Zur Beurteilung des Verformungsverhaltens der Mörtel wurden die Raumbeständigkeitsprüfung, Messungen des dynamischen und statischen Elastizitätsmodul sowie des zeitlichen Verlaufs von Quellen und Schwinden herangezogen. Die Versuche werden nachfolgend kurz beschrieben.

Raumbeständigkeit

Die Prüfung der Raumbeständigkeit erfolgte gemäß DIN EN 196, Teil 3 mit dem Le-Chatelier-Ring (siehe Abb. 5.9). Die Lagerung der Proben erfolgte bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 98%. Die Proben wurden 24 Stunden ab Herstellung in diesem Klima gelagert. Anschließend wurde der Abstand a zwischen den Nadelspitzen gemessen.

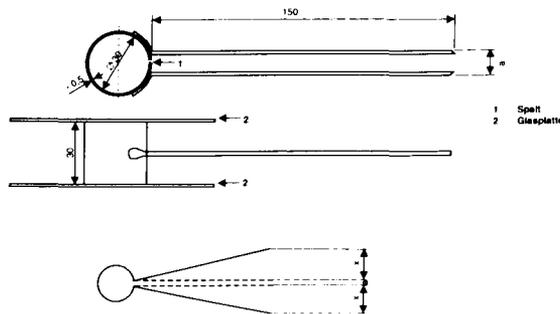


Abb. 5.9: Schematische Darstellung des Le Chatellier Ringes zur Bestimmung der Raumbeständigkeit.

Nach Kochen mit anschließender Abkühlung auf 20°C wurde der Abstand ($a + x$) erneut gemessen. Die Differenz zwischen den Messungen dient der Beurteilung der Raumbeständigkeit.

Durch den Versuch wird einschätzbar, ob eine Ausdehnung des erhärtenden Bindemittels zu befürchten ist. Ursache für eine ggf. festgestellte Ausdehnung ist i. a. eine Hydratation von freiem Calciumoxid und/oder von freiem Magnesiumoxid, das in der Probe insbesondere nach einer Temperierung enthalten sein kann.

Dynamischer E-Modul

Der dynamische E-Modul wurde mit dem Resonanzfrequenz-Verfahren ermittelt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 5.10 skizziert; angeschlossen war der Versuchsaufbau an ein

EG-Meter nach Kottas [KOTTAS 1954].

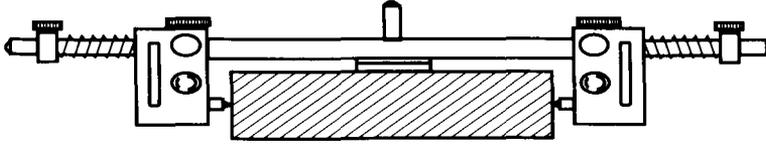


Abb. 5.10: Meßkopf zur Einleitung und Aufnahme der Ultraschallwellen zur Ermittlung des dynamischen E-Moduls.

Als Prüfkörper wurden Normprisma nach DIN 1164 verwendet. Die in Kapitel 7 angegebenen Werte sind aus dem Mittelwert der Messungen an mindestens zwei Prüfkörpern errechnet worden. Die Messung fand im Probenalter von 28 Tagen statt.

Aus den Resonanzfrequenzen der Dehnschwingungen f kann der dynamische E-Modul berechnet werden. Nach [KOTTAS 1954] ergibt sich der dynamische E-Modul für quaderförmige Probenkörperformen gemäß Gleichung 5.4.

$$E_{\text{dyn}} = f^2 * \frac{4,0025 * 10^{-4} * l * m}{b * h} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (5.4)$$

- f = Resonanzfrequenz des Prüfkörpers [Hz]
- m = Masse des Prüfkörpers [kg]
- l = Länge des Prüfkörpers [cm]
- b = Breite des Prüfkörpers [cm]
- h = Höhe des Prüfkörpers [cm]

Statischer E-Modul

Die Größe des dynamischen E-Modul hängt wesentlich von den Zuschlageigenschaften ab, während der im Bruchversuch bestimmte statische E-Modul erheblich von den Parametern des Zementsteins beeinflusst wird. Der statische E-Modul wurde in Anlehnung an DIN 1048, Teil 5, an jeweils vier zylindrischen Probekörpern mit einen Durchmesser

von 50 mm geprüft. Die Prüfung erfolgte nach 28 Tagen Lagerung der Proben im Normklima 20/65. Der statische E-Modul wurde als Sekantenmodul zwischen dem Ursprung und der Prüfspannung $\sigma_0 = \beta_1/3$ bei einer Belastungsgeschwindigkeit von $0,5 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ bestimmt. Durchgeführt wurden die E-Modul-Messungen an einer 4 Säulen Druckprüfmaschine der Marke Toni Technik Baustoffprüfsysteme mit 2-Wegaufnehmer der Fa. Hottinger Baldwin Meßtechnik.

An den zylindrischen Proben wurde zuvor noch der dynamische E-Modul bestimmt, um das Verhältnis des dynamischen E-Moduls zum statischen E-Modul zu erfassen.

Quellen und Schwinden

Quellen und Schwinden sind Volumenänderungen durch Wasseraufnahme bzw. Wasserverlust. Die Messungen wurden an Mörtelprismen $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ vorgenommen. Nach dem Ausschalen wurden an zwei gegenüberliegenden Längsseiten der Prismenproben je zwei Meßplättchen im Abstand von 10 cm mit einem zwei-komponentigen PMMA-Kleber aufgeklebt. Nach einer Aushärtungszeit von ca. 10 min wurde der erste Wert, der als Null-Wert diente, gemessen. Gemessen wurden die Verformungen mit dem BAM- Setzdehnungsmesser (Bauart Pfender).

Es wurden zwei Lagerungsbedingungen untersucht: Beim Klima 20/100 bis zu einem Probenalter von 28 Tagen und im Normklima 20/65 bis zu einem Probenalter von 90 Tagen. Die Proben wurden bis zu einem Alter von 28 Tagen täglich und danach bis zu einem Alter von 90 Tagen alle 2-3 Tage gemessen. Es wurden je Rezeptur und Lagerungsart 2 Prismen mit je 2 Meßstrecken untersucht.

5.5.5 Porenaufbau und Wasseraufnahme

Allgemeines

Die Dauerhaftigkeitseigenschaften mineralischer Baustoffe, u.a. der Frostwiderstand und der Widerstand gegen chemische und Witterungsangriffe, werden wesentlich durch

deren Porosität geprägt. Anhand des Porenvolumens, der Porenradienverteilung und des kapillaren Wassersaugens können zumindest vergleichende Beurteilungen der zu erwartenden Dauerhaftigkeit von Mörteln aus thermisch behandeltem Brechsand vorgenommen werden. In dieser Arbeit wurden dazu die freiwillige kapillare Wasseraufnahme sowie die Quecksilberdruckporosimetrie herangezogen.

Freiwillige Wasseraufnahme durch kapillares Saugen

Bei dem Verfahren wird der Probekörper (Normprisma nach DIN 1164) an der Prüfkörperunterseite von Wasser berührt und saugt dieses entgegen der Schwerkraft durch Kapillarzugkräfte auf (siehe Abb. 5.11).

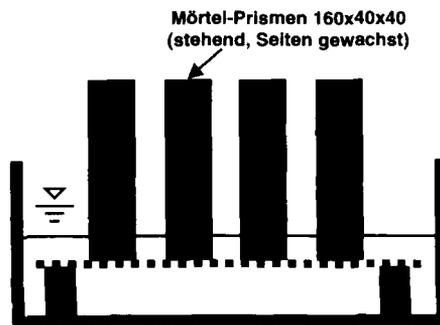


Abb. 5.11: Versuchsaufbau zur Ermittlung des freiwilligen Wassersaugens.

Aus der zeitabhängigen Massezunahme der Probe, bezogen auf die Saugfläche kann in Anlehnung an DIN 52617 der Wasseraufnahmekoeffizient bestimmt werden (Gl. 5.5 und 5.6).

Je Probenvariation wurde die Bestimmung an drei Prismen durchgeführt, wie nach DIN 52617 empfohlen. Die Registrierung der Massezunahme erfolgte nach 5, 10, 20, 30, 60 Minuten, 2, 3, 4, 5, 6 und 24 Stunden.

$$W_t = \frac{m_t - m_0}{A} \quad (5.5)$$

mit W_t = flächenbezogene Wasseraufnahme [kg/m²]
 m_t = Gewicht der Probe zum Zeitpunkt t [kg]
 m_0 = Gewicht der Probe vor dem Eintauchen ins Wasser [kg]
 A = Saugfläche des Probekörpers [m²]

$$\omega = \frac{W_t}{\sqrt{t}} \quad (5.6)$$

mit ω = Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m²*h^{0,5}]
 t = Zeit [h]

Porenvolumen und Porenradienverteilung mittel Quecksilberdruckporosimetrie (MIP)

Das Porenspektrum umfaßt einen weiten Radienbereich, der mit verschiedenen Meßmethoden erfaßt werden kann (Tab. 5.6) [MIDDENDORF 1994].

Tab. 5.6: Meßmethoden zur Bestimmung von Porenvolumen und -radienverteilungen

Messmethode	Abmessungsbereich (Porenradium [m])						
	10 ⁹	10 ⁸	10 ⁷	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁴	10 ³
	Gel.		Kapillar.			Luftporen	
freies Auge							///
Lichtmikroskopie					///	///	///
Rasterelektronenmikroskopie			///	///	///	///	///
Durchstrahlungselektronenmikroskopie		///	///	///	///	///	///
Wasseraufnahme			///	///	///	///	///
Gasdurchlässigkeit			///	///	///	///	///
Absorptionsgeschwindigkeit			///	///	///	///	///
Druckporosimetrie		///	///	///	///	///	///
Diffusion	///	///	///	///	///	///	///
Sorption	///	///	///	///	///	///	///

Ausgewählt wurde hier aufgrund der guten Abdeckung des für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit wichtigen Bereich der Kapillarporen die Quecksilberdruckporosimetrie (MIP). Zudem liefert dieses Verfahren im Gegensatz zu mikroskopischen Methoden, quantitative, reproduzierbare Ergebnisse zur Radienverteilung.

Quecksilber ist eine nicht benetzende Flüssigkeit, gegen deren Oberflächenspannung Druck aufgewendet werden muß, um sie in die Poren zu pressen. Der erforderliche Druck ist umgekehrt proportional zum Radius. Für gegebene Oberflächenspannung und Randwinkel ergibt sich somit folgende Beziehung (Gleichung 5.7) [Washburn 1921a+b] zwischen Porenradius und aufgewendetem Druck:

$$r = \frac{1}{P} * (-2 * \sigma * \cos \Theta) \quad (5.7)$$

- r = Porenradius [m]
- P = Oberflächenspannung [N/m²]
- σ = Randwinkel (141,3°)
- Θ = hydrostatischer Druck [N/m²]

Zum Einsatz kam ein Quecksilberdruckporosimeter AUTOPORE II 9220 der Firma MICROMERITICS, das Poren mit Radien von 2,23nm bis $2,23 \cdot 10^5$ nm erfaßt. Für die Berechnung abgeleiteter Größen wird die Porenform als ideal zylindrisch angenommen. Die Klassifizierung der Poren erfolgt nach [ROMBERG 1978]:

1-30nm	=	Gelporen
30-10 ⁴ nm	=	Kapillarporen
> 10 ⁴ nm	=	Luftporen

Es wurden zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 0,9 cm und einer Höhe zwischen 2 und 3 cm eingebaut, die zuvor bis zur Gewichtskonstanz im Ofen bei 105°C getrocknet wurden. Es wurden Doppelmessungen im Probenalter von 28 Tagen durchgeführt. Zur Auswertung wird die integrale Verteilung des von der Probe aufgenommenen Quecksilbervolumens in ml/g über dem Porenradius in μ m auf logarithmischer Skala aufgetragen. Aus der integralen Darstellung (Summenkurve) wird mittels Differenziation die Porenradienverteilung gewonnen.

6 Untersuchungsergebnisse zum Phasenbestand des Ausgangs-, thermisch behandelten und weiterverarbeiteten Materials

6.1 Allgemeines

Im folgenden Kapitel werden die chemischen und kristallographischen Veränderungen im Brechsand bzw. Zementstein infolge einer Temperaturbehandlung beschrieben. Anhand der beobachteten Zersetzungsreaktionen und Phasenumwandlungen im Brechsand werden Schlußfolgerungen hinsichtlich der Eigenschaften daraus hergestellter Baustoffe aufgezeigt.

6.2 Chemische Zusammensetzung der Brechsande

Die Bestimmung der Zusammensetzung der Brechsande erfolgte mittels der Röntgen-Fluoreszenz-Analyse (RFA, siehe Kapitel 5.5.1). In Abb. 6.1 sind die Analyseergebnisse für die untersuchten Baustoffe aufgetragen.

Bei der Interpretation der Analyseergebnisse sind besonders die unterschiedlichen Gehalte an SiO_2 und CaO in den untersuchten Stoffen zu beachten (siehe Abb. 6.1). Bei der Zementherstellung wird der Gehalt der Ausgangsstoffe nahezu konstant gehalten (siehe auch Kapitel 4). Portlandzemente haben einen CaO -Gehalt von ca. 65%; im kleiner 250 μm abgeseibten Betonbrechsand sinkt dieser auf ca. 40%. Legt man die Obergrenze des Größtkorns im Betonbrechsand auf 2 mm, so kann der CaO -Gehalt unter 30% absinken. Als Untergrenze bei der Zementherstellung nach DIN 1164 kann ein CaO -Gehalt von 60% angesehen werden. So kann Betonbrechsand als Substitutionsmaterial zur Zementherstellung nur in sehr begrenztem Umfang (siehe Kapitel 10) zum Einsatz kommen. Bei einer thermischen Behandlung zwischen 700 und 750°C hingegen, werden bereits in ausreichendem Maße bestehende CSH-Phasen zersetzt bzw. entwässert um genügend CaO zur Entstehung von Belit entstehen zu lassen, so daß in damit hergestellten Prismen Festigkeiten von über 10 N/mm² zu erzielen sind. Dies wird in den folgenden Kapiteln gezeigt.

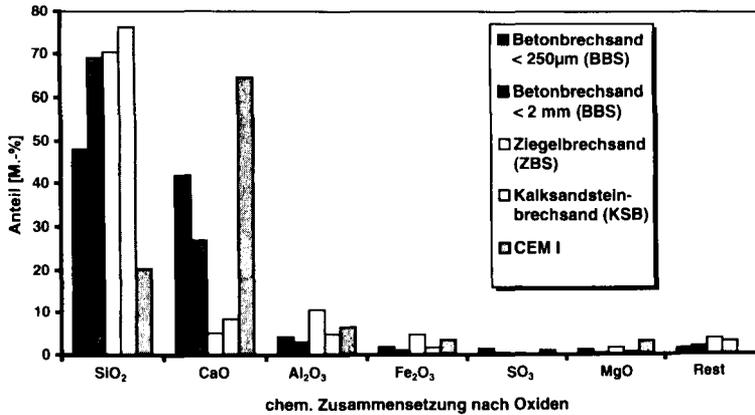


Abb. 6.1: RFA-Analysen untersuchter Brechsande im untemperierten Zustand.

Betrachtet man die Oxidgehalte in den Ziegel- und Kalksandsteinbrechsanden, so ist festzustellen, daß zur Belieferung ein zu geringer CaO-Gehalt und ein äußerst ungünstiges CaO/SiO₂-Verhältnis vorliegen. Wie in Kapitel 7 gezeigt wird, resultieren diese in sehr geringen Festigkeiten daraus hergestellter Mörtelprismen.

Kombiniert man Betonbrechsand mit Kalksandstein- und/oder Ziegelbrechsand, so lassen sich, z. B. bei einem Substituierungsgrad von 50%, Festigkeiten im Bereich zwischen 50 und 70% der reinen Betonbrechsandfestigkeit erzielen (siehe Kap. 7.2.8). Dieses Festigkeitsergebnis kann anhand der CaO-Gehalte vorhergesagt werden. Addiert man die CaO-Gehalte der im Brechsandgemisch enthaltenen Brechsande bezogen auf den CaO-Gehalt des reinen Betonbrechsandes, so ergibt sich rechnerisch der Faktor der erreichbaren Festigkeit (Abminderungsfaktor α), bezogen auf die Festigkeit reinen Betonbrechsandes (siehe Gleichung 6.1).

$$a = \frac{(BBS_{CaO} + KSB_{CaO} + ZBS_{CaO})}{3 * BBS_{CaO}} \quad [-] \quad (6.1)$$

mit: BBS_{CaO} = CaO-Gehalt des Betonbrechsandanteils
 KSB_{CaO} = CaO-Gehalt des Kalksandsteinbrechsandanteils
 ZBS_{CaO} = CaO-Gehalt des Ziegelbrechsandanteils

Alternativ kann man mit Hilfe der RFA-Analyse und der Gleichungen 4.10 bis 4.13 des Typs C nach Bogue den Phasengehalt im Brechsand ermitteln. So ist man nicht auf eine Röntgenbeugungsanalyse und eine quantitative Riedfeld-Auswertung angewiesen.

6.3 Thermoanalytische Untersuchungsergebnisse

6.3.1 Thermogravimetrie (TG, DTG)

In den Abb. 6.2 bis Abb. 6.7 sind Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen dargestellt.

Abb. 6.2 zeigt den Gewichtsverlust einer Betonbrechsandprobe bei einer Temperaturbehandlung bis 1500°C und die Ableitung nach der Zeit (DTG). Im Temperaturbereich bis 250°C wird hauptsächlich das Kapillarwasser und das physikalisch adsorbierte Wasser ausgetrieben. Der Gewichtsverlust bei 500°C kann der Zersetzung des Portlandits zugeordnet werden (siehe hierzu auch DTA-Auswertung).

Im Bereich oberhalb der Portlanditzersetzung bis zu einer Temperatur von ca. 750°C findet die Zersetzung der CSH-Phasen und die Bildung von β -C₂S statt. Von 750 bis 850°C findet die sogenannte Entsäuerung des Calciumcarbonates statt. Ab einer Behandlungstemperatur von 1200°C bildet sich dann aus Belit und dem entsäuerten Calciumcarbonat Alit und später folgt der Übergang in die flüssige Schmelze. Letzteres Ergebnis ist aber nur für die Zementherstellung von Interesse und wird im weiteren unberücksichtigt gelassen. Zur Erzeugung von hydraulisch aktivem Brechsand ist es ausreichend, den Temperaturbereich bis ca. 800°C zu betrachten.

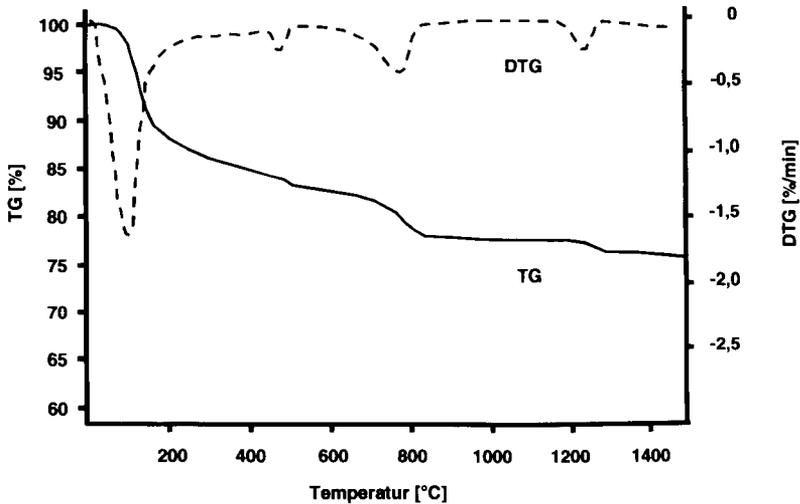


Abb. 6.2: Prozentuale Masseverlust von Betonbrechsand während einer thermischen Behandlung bis zu einer Temperatur von 1500°C.

Vergleicht man Betonbrechsand bis zu einer Behandlungstemperatur von 1000°C mit Portlandzement, so fällt der insgesamt um 10% größere Masseverlust des Portlandzementes auf (siehe Abb. 6.3). Dies läßt sich durch den quarzitäen Zuschlag in der Betonbrechsandprobe erklären. Dieser ist, mit Ausnahme der Quarzumwandlung von α - in β -Quarz, in dem betrachteten Temperaturbereich keiner Veränderung unterzogen, also gewichtskonstant. Verwendet man als Ausgangsmaterial Betonbrechsand mit calcitischem Zuschlag, so ist festzustellen, daß der Großteil des Gewichtsverlustes erst infolge der Entsäuerung des Zuschlags stattfindet. Außerdem ist ein Gewichtsverlust bei ca. 500°C infolge der Portlanditersetzung nicht erkennbar. Auch wird bedeutend weniger kapillar gebundenes Wasser ausgetrieben.

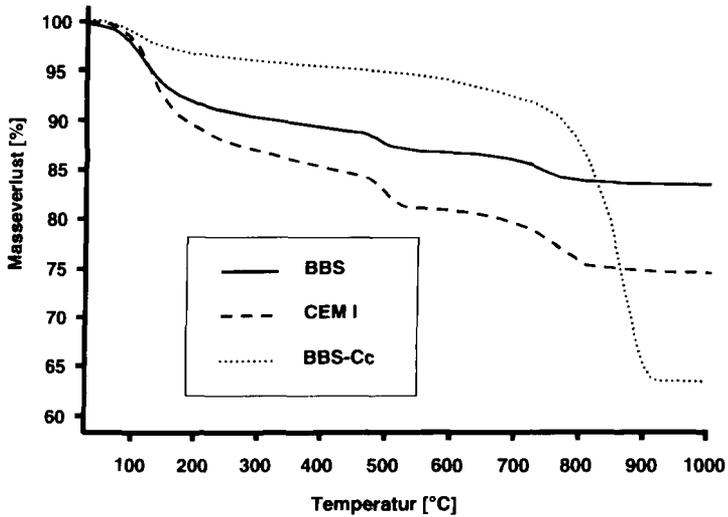


Abb. 6.3: Masseverlust von BBS mit quarzitischem und calcitischem Zuschlag sowie hydratisiertem Zementstein während einer thermischen Behandlung bis $T_{\max} = 1000^{\circ}\text{C}$.

Vergleicht man die Veränderung von Betonbrechsand ohne und mit Verunreinigungen durch Salze oder Alkalien, so ist erkennbar, daß keine wesentliche Beeinflussung des Masseverlustes vorliegt. Offenbar wird etwas mehr gebundenes Kapillarwasser ausgetrieben (siehe Abb. 6.4).

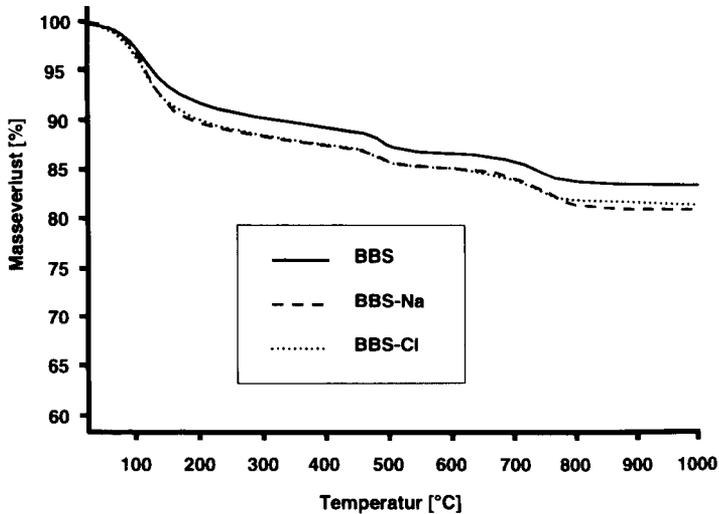


Abb. 6.4: Masseverlust von BBS ohne und mit Verunreinigung während einer thermischen Behandlung bis $T_{\max} = 1000^{\circ}\text{C}$.

Zur Frage, ob Betonbrechsand wiederholt im Kreislauf gehalten werden kann, gibt Abb. 6.5 Auskunft. Im Falle des BBS-Re wurde Betonbrechsand mit Wasser hydratisiert und später erneut gebrochen. Läßt man den geringeren Kapillarwasseranteil im Betonbrechsand aus dem zweiten Aufbereitungsprozeß außer acht, so ist ein etwa gleich großer Gewichtsverlust infolge Temperaturbehandlung festzustellen. Allerdings entfällt die Portlandzersetzung bei knapp 500°C , da sich die CSH-Phasen ja aus Belit und nicht aus Alit gebildet hatten. Denn nur bei der Bildung aus Alit entsteht Portlandit als Nebenreaktion. Der Anteil an zersetzten CSH-Phasen kommt aber nahezu in die gleiche Größenordnung.

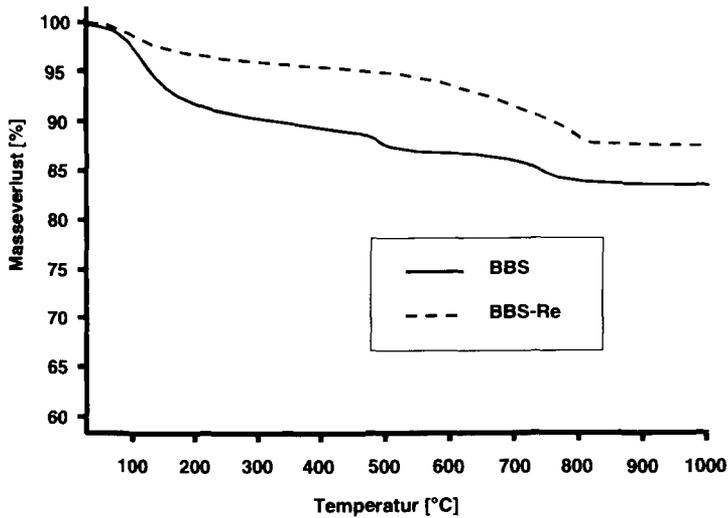


Abb. 6.5: Masseverlust von BBS in zwei Verwertungsdurchgängen während einer thermischen Behandlung bis $T_{\max} = 1000^{\circ}\text{C}$.

Behandelt man andere Brechsande als Betonbrechsand, so müssen diese je nach Herkunft differenziert betrachtet werden.

Eine thermische Behandlung von Mauerwerksabbruch mit dem Hauptbestandteil Ziegel (ZBS) bewirkt keine Phasenveränderung (siehe Abb. 6.6). Dies liegt vor allem an der Hauptkomponente Al_2O_3 , die im betrachteten Temperaturbereich nahezu inert ist und keinerlei Phasenveränderungen erfährt. Substituiert man 50% des Ziegelbrechsandes durch Betonbrechsand, so sind die Phasenveränderungen des Betonbrechsandes anteilig festzustellen. Eine puzzolanische Reaktion der Tonanteile aus dem Ziegel mit Zementsteinphasen aus dem Betonbrechsand konnte nicht beobachtet werden.

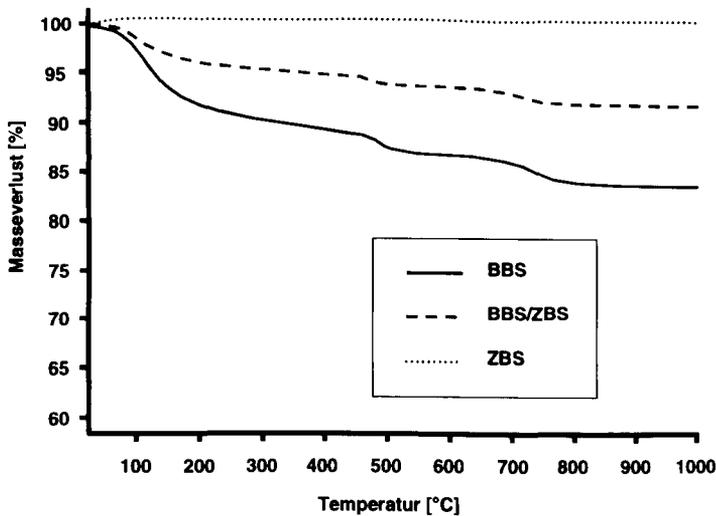


Abb. 6.6: Masseverlust von BBS und ZBS während einer thermischen Behandlung bis $T_{\max} = 1000^{\circ}\text{C}$.

Temperiert man hingegen Mauerwerksabbruch aus Kalksandsteinen (KSB), so ist ein Gewichtsverlust im Bereich oberhalb von 600°C festzustellen (Abb. 6.7). Mengenmäßig macht die dortige CSH-Zersetzung jedoch nur einen geringen Teil jener Umwandlungsmenge aus, die bei der Behandlung von Betonbrechsand beobachtet wird. Dies liegt am geringen Bindemittelgehalt von Kalksandstein bei dessen Herstellung durch Autoklavbehandlung. Festzustellen ist außerdem, daß der Hauptteil der CSH-Zersetzung bei geringerer Temperatur als bei der Betonbrechsandbehandlung abgeschlossen ist. Insgesamt betrachtet, dürfte aber behandelter Kalksandsteinbrechsand kein nennenswertes Potential zur Festigkeitsentwicklung daraus hergestellter Mörtel haben, wenn nicht Betonbrechsand in ausreichender Menge mit behandelt wurde.

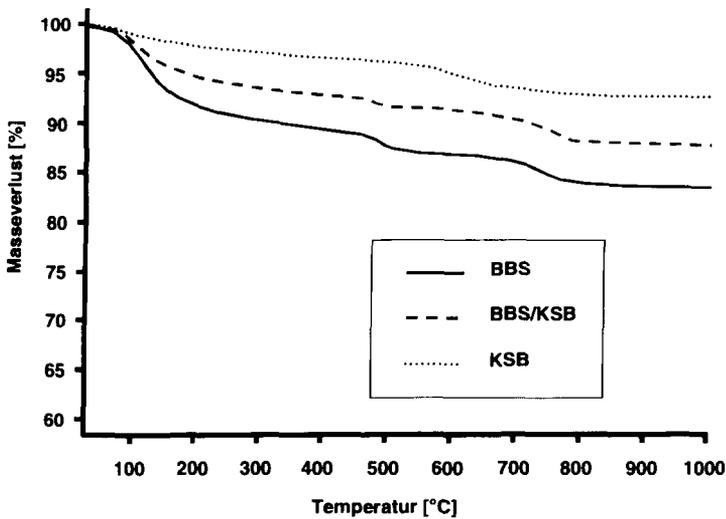


Abb. 6.7: Masseverlust von BBS und KSB während einer thermischen Behandlung bis $T_{\max} = 1000^{\circ}\text{C}$.

6.3.2 Differentialthermoanalyse (DTA)

Die Ergebnisse der Differential-Thermoanalytischen Untersuchungen werden ebenfalls im Temperaturbereich bis $T_{\max} = 1000^{\circ}\text{C}$ betrachtet. In Abb. 6.8 erkennt man die erhebliche Reaktionsenergie beim Übergang vom Feststoff in die Schmelze bei ca. 1300°C , was den wichtigen Temperaturbereich bis ca. 800°C für Phasenumwandlungen an Brechsanden hinsichtlich der Energiedifferenzen kaum auswertbar werden läßt. Die Begrenzung auf den betrachteten Temperaturbereich bis 1000°C erlaubt die Auswertung bei höherer Auflösung.

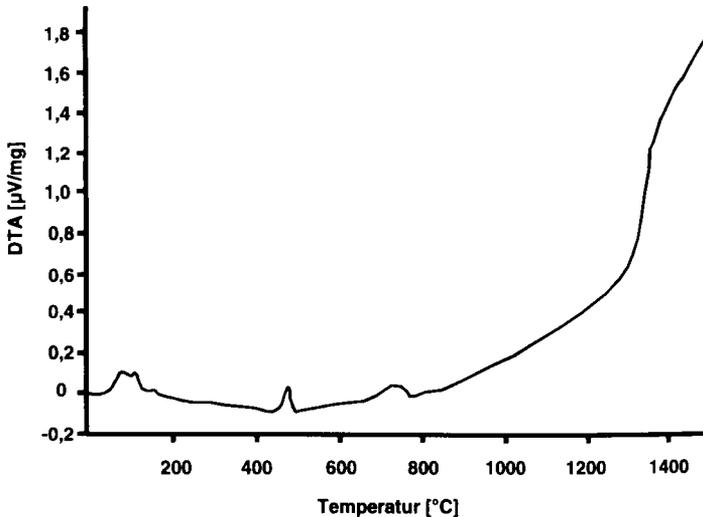


Abb. 6.8: Thermisch bedingte Phasenänderung bei Temperaturbeanspruchung von BBS

Für Betonbrechsand ist in Abb. 6.9 nach der kapillaren Entwässerung mit dem Maximum bei 120°C ein Nebenmaximum bei ca. 190°C zu erkennen. Dieser endotherme Peak kann der Anfangszersetzung der CSH-Phasen zugeschrieben werden [TAYLOR 1997]. Ein schwacher Endopeak bei 300°C, wie ihn Schneider [SCHNEIDER 1973] ermittelt hat und nur unsicher einer möglichen Abgabe physikalisch adsorbierten Wassers zuordnete, konnte bei keiner Betonbrechsandprobe festgestellt werden. Das scharfe Maximum bei 480°C kann, wie auch schon bei der thermogravimetrischen Untersuchung erkannt, der Zersetzung des Portlandits zugeordnet werden. Der nächste endotherme Peak ist bei ca. 570°C erkennbar; das entspricht fast exakt der Übergangstemperatur von α - in β -Quarz. Dann folgt eine weit ausgedehnte Reaktionszone. Ihr können zwei Maxima zugeordnet werden, eines bei 750 und ein zweites bei 770°C. Das erste Maximum läßt sich mit der weiteren Dehydratation der CSH-Phasen erklären. Aus den so frei gewordenen CaO- und SiO_2 -Molekülen bildet sich mit dem CaO aus der Portlanditzersetzung $\beta\text{-C}_2\text{S}$ (Belit). Das zweite Maximum bei 770°C kann als

vorgezogene Teilentsäuerung gesehen werden. Der Siliziumüberschuß scheint hier als Fließmittel eine frühere Entcarbonatisierung auszulösen. Die eigentliche Entsäuerung hat ihr Maximum im Betonbrechsand dann bei 850°C.

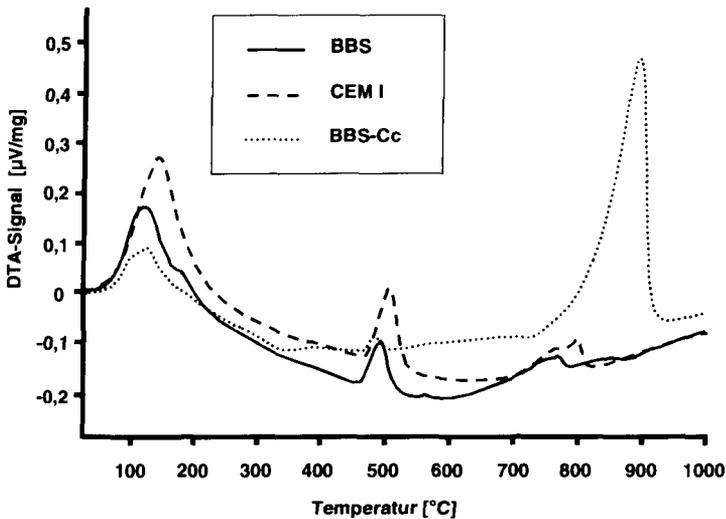


Abb. 6.9: Thermisch bedingte Phasenänderung bei Temperaturbeanspruchung von CEM I und BBS mit quarzitischem bzw. calcitischem Zuschlag.

Bei der thermischen Behandlung von reinem hydratisierten Zementstein (CEM I), ebenfalls in Abb. 6.9 dargestellt, sind die gleichen Reaktionen zu verzeichnen. Die Ausnahme bildet die fehlende Quarzumwandlung, da Zuschlag nicht vorhanden ist. Außerdem ist eine Verschiebung der Maxima um ca. 30°C höherer Temperatur abzulesen. Ein hoher Siliziumanteil bewirkt also offenbar eine Herabsetzung aller Reaktionstemperaturen während einer thermischen Behandlung im behandelten Stoff.

Bei der thermischen Behandlung von Betonbrechsand aus Beton mit calcitischem Zuschlag ist vor allem der sehr geringe Portlanditpeak von Interesse (siehe Abb. 6.9). Aufgrund der begrenzten Portlanditumwandlung steht im Temperaturbereich von 700 bis 750°C nur wenig CaO zur Belitbildung zur Verfügung. Auch die CSH-Phasenz-

setzung kann nicht klar von der Entsäuerung getrennt werden. Insgesamt ist zu vermuten, daß weniger hydraulisch aktives Belit erzeugt wird. Außerdem ist bei einer Überhitzung während der thermischen Behandlung über 800 °C hinaus die Gefahr einer erhöhten Freikalkbildung gegeben. Dieses Material wäre aus diesem Grund wohl sinnvoller als Rohstoffsubstitut in der Kalkherstellung einzusetzen.

Für Beton aus Betonbrechsand mit Verunreinigungen in Form von Alkalien oder Salzen ist festzustellen, daß die Phasenumwandlungen die Maxima bei gleichen Behandlungstemperaturen aufweisen (siehe Abb. 6.10). Vergleicht man die Maxima der reinen Betonbrechsandkurve mit denen der verunreinigten Brechsande, so fällt auf, daß bedeutend weniger Phasen umgewandelt werden. Alkalien und Salze stabilisieren offenbar die Phasen und unterbinden eine Teilzersetzung in dem betrachteten Temperaturbereich. Dies gilt für beide Arten der Verunreinigung.

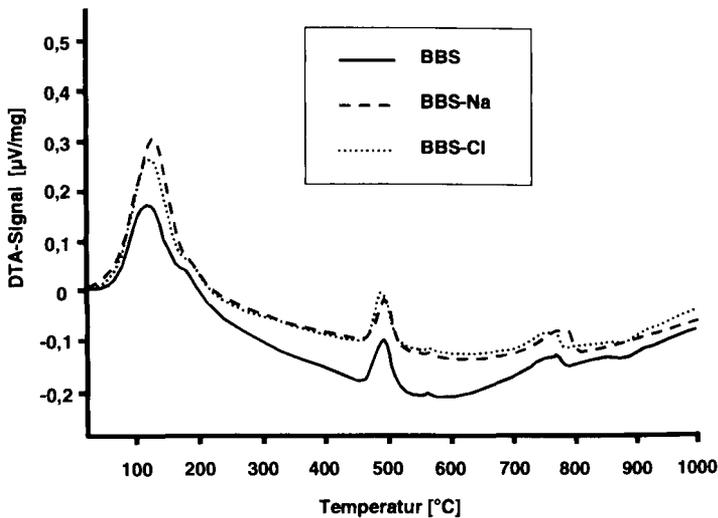


Abb. 6.10: Thermisch bedingte Phasenänderung bei Temperaturbeanspruchung von BBS ohne und mit Verunreinigungen.

Betrachtet man das DTA-Signal von Betonbrechsand aus wiederholter mechanischer und thermischer Aufbereitung, so sind einige Veränderungen der Peaks festzustellen (siehe Abb. 6.11). Das Maximum der Portlandzersetzung bei ca. 480°C entfällt und der zweite Peak hätte sein Maximum bei 750°C haben sollen. Ein Maximum bei 750°C konnte jedoch nicht erkannt werden. Es scheint vielmehr, daß eine Teilzersetzung bereits bei 690°C und eine weitere parallel mit der Entsäuerung bei 800°C abläuft. Bei einer wiederholten Aufbereitung wäre es also sinnvoll, eine um 50°C erhöhte Behandlungstemperatur zu wählen. Dann wären die CSH-Phasenzersetzung und eine CaO-Zufuhr aus der Entsäuerung gegeben und somit eine ausreichende Beliterzeugung gewährleistet.

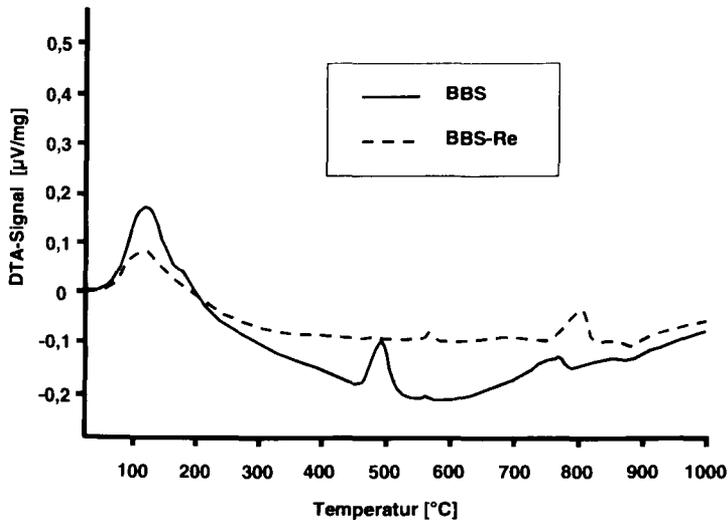


Abb. 6.11: Thermisch bedingte Phasenänderung bei Temperaturbeanspruchung von BBS mit wiederholter Aufbereitung.

Wie schon bei der TG-Auswertung besprochen, findet im betrachteten thermischen Behandlungsbereich keine Phasenumwandlung in Ziegelbrechsand (ZBS) statt. Dies zeigt auch die DTA-Kurve in Abb. 6.12. Das DTA-Signal verläuft nahezu geradlinig

auf Höhe der Nulllinie. Bei der Kombination aus Ziegel- und Betonbrechsand sind die Phasenumwandlungen anteilig zum Substituierungsgrad beider Brechsande. Daraus läßt sich schließen, daß die erzielbare Festigkeit von damit hergestellten Mörteln nur den Anteil an Festigkeit erreichen, den quantitativ der Betonbrechsand im Brechsand ausmacht.

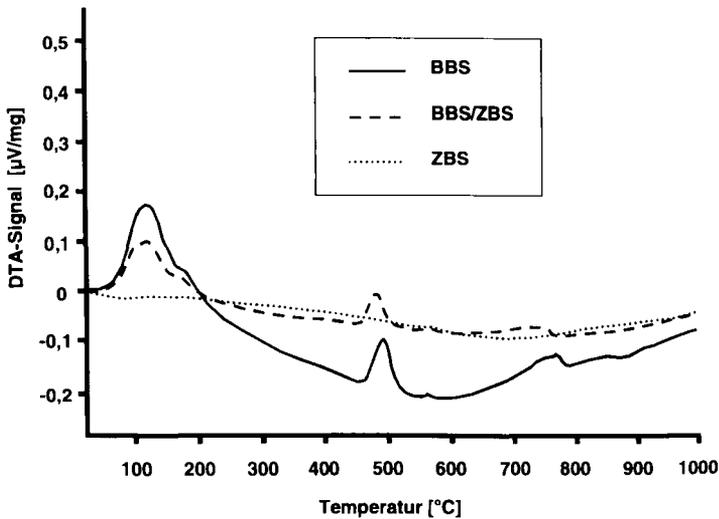


Abb. 6.12: Thermisch bedingte Phasenänderung bei Temperaturbeanspruchung von BBS und ZBS.

Betrachtet man die DTA-Auswertung von Kalksandsteinbrechsand (KSB), so ist unterhalb von 500 $^{\circ}\text{C}$ die Portlandzersetzung zu erkennen (Abb. 6.13). Dann jedoch findet zwar ein weiterer Gelabbau, d. h. eine CSH-Zersetzung statt, doch nur in einem sehr begrenztem Umfang. Fügt man dem Kalksandsteinbrechsand Betonbrechsand hinzu ist eine deutliche Steigerung der CSH-Phasenumwandlung zu verzeichnen. Sie liegt aber entsprechend dem Ziegelbrechsand-Betonbrechsandgemisch auch nur bei 50% bezogen auf reinen Betonbrechsand. Der Anteil an Betonbrechsand im Brechsandgemisch ist also von entscheidender Bedeutung für die durch thermische Behandlung mögliche

Beliterzeugung. Ein Abminderungsfaktor a , in Abhängigkeit vom Betonbrechsandanteil im Brechsand, nach Gl. 6.1 erscheint daher gerechtfertigt (siehe auch Kapitel 9.4).

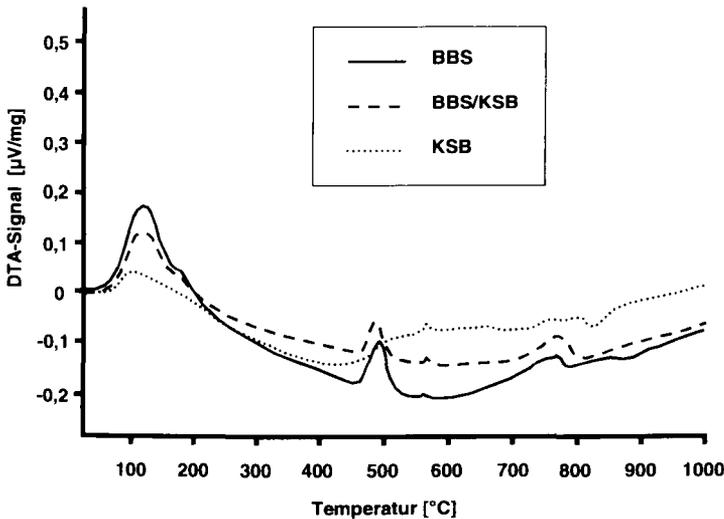


Abb. 6.13: Thermisch bedingte Phasenänderung bei Temperaturbeanspruchung von BBS und KSB.

6.4 Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalyse zum Kristallphasenbestand

6.4.1 Kristalline Phasen von Betonbrechsand nach definierter Temperaturbehandlung bis 1350 $^{\circ}\text{C}$

Die nachfolgenden Versuchsergebnisse gelten für Betonbrechsand (BBS), der im Alter von ungefähr 180 Tagen der jeweils angegebenen Behandlungstemperatur ausgesetzt wurde. Die wichtigsten, der analysierten kristallinen Phasen und deren Bedeutung werden nachfolgend diskutiert.

Das Röntgendiffraktogramm von unbehandeltem BBS bei Umgebungsbedingung (20 $^{\circ}\text{C}$) zeigt die wesentlichen kristallinen Phasen Calciumhydroxid (CH), Calcium-

carbonat (Cc), sowie kristalline Anteile im Calciumsilicathydrat (CSH) und Calciumaluminathydrat (CAH), Ettringit (Et) und Quarz (Qz) (Abb. 6.14). Die Identifikation von CAH ist dabei nicht eindeutig möglich, da es zur Überlagerung mit Peaks anderer Phasen kommt bzw. es sich um Peaks geringer Intensität handelt. Das Ergebnis stimmt mit den Ergebnissen von Taylor überein [TAYLOR 1964], die an reinem hydratisierten Zementstein ermittelt wurden. Die Feststellung von Schneider [SCHNEIDER 1973], das Zementgel läge im Beton, wenn überhaupt, nur in äußerst schwach kristalliner Form vor und sei daher als kryptokristallin zu bezeichnen, kann somit nicht bestätigt werden.

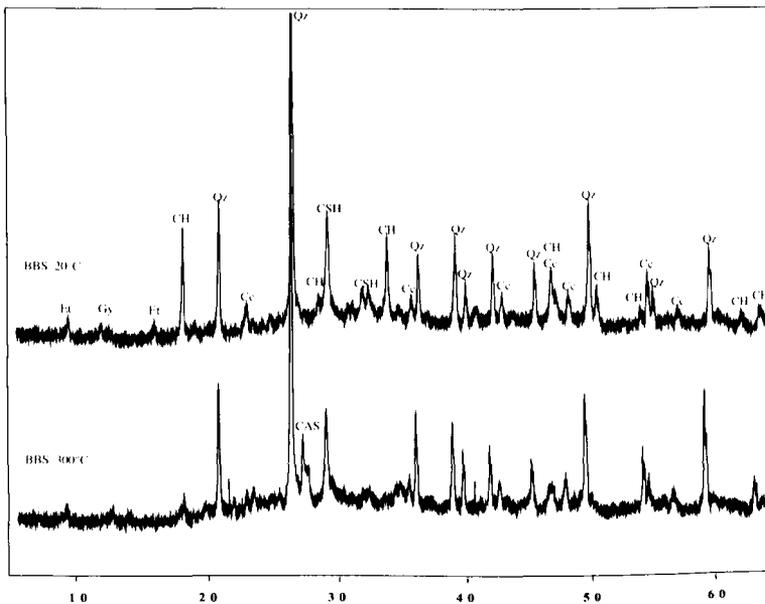


Abb. 6.14: Röntgenbeugungsdiagramm von Betonbrechsand (BBS) nach einer thermischen Behandlung bei 300°C.

Nach einer 30minütigen Temperaturbehandlung von BBS bei 300°C kann festgestellt werden (Abb. 6.14), daß eine Entwässerung des Portlandits und der CSH-Phasen beginnt. Außerdem kommt es zu einer ersten Bildung von Calciumaluminatsilicaten (CAS).

Bei einer Behandlungstemperatur von 450°C ist der Hauptpeak der CAS-Phasen noch eindeutig zu erkennen (Abb. 6.15). Diese bauen sich dann aber ab einer Temperatur von 500°C wieder ab. Ab einer Behandlungstemperatur 500°C lassen sich C₂S-Phasen (Larnite) im Röntgendiffraktogramm feststellen. Ab 550°C ist die Intensität der C₂S-Peaks so groß, daß die Identifikation als eindeutig zu bezeichnen ist. Gleichzeitig gehen die Intensitäten der Calciumhydroxid-Peaks zurück. Die Dehydratisierung des Portlandit hat begonnen. Bisher wurde davon ausgegangen, daß das entstandene CaO mit dem CO₂ der Luft sofort zu Calciumcarbonat reagiert. Dies konnte nicht bestätigt werden. Vielmehr ist davon auszugehen, daß das Calcium das Bestreben hat, mit dem Silicium eine Verbindung einzugehen. Das Verhältnis Calcium/Silicium ist dabei so groß wie möglich, d. h. in diesem Temperaturbereich 2:1, was sich ja in der C₂S-Phasen bestätigt.

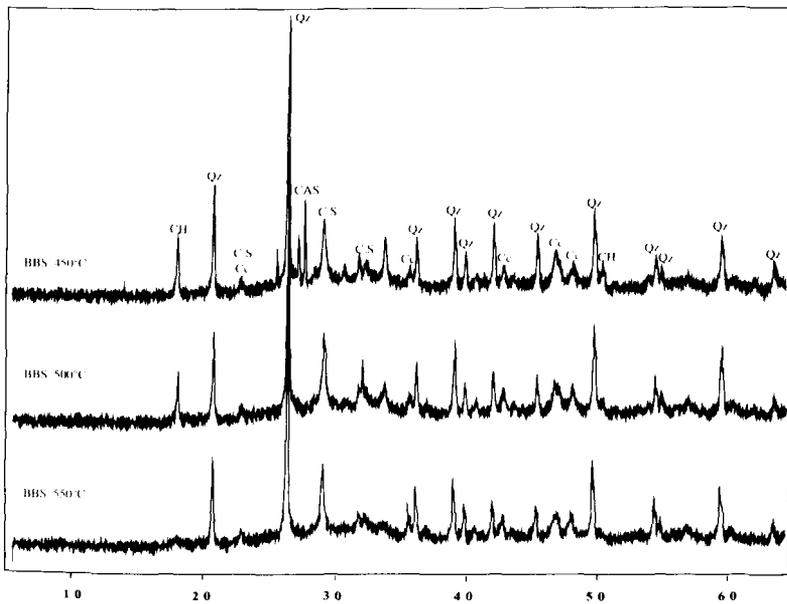


Abb. 6.15: Röntgenbeugungsdiagramm von Betonbrechsand (BBS) nach einer thermischen Behandlung von 450-550°C.

Bei einer Behandlungstemperatur von 600°C läßt sich kein Portlandit mehr nachweisen (Abb. 6.16). Es ist demnach vollständig entwässert. Ab 650°C ist der Beginn der Entstehung von Klinkermineralien festzustellen. Besonders ausgeprägt ist der amorphe Buckel bei einem Temperaturbereich von 700°C. Er wird aus den α' und β Modifikationen des C_2S gebildet. Außerdem entstehen oberhalb von 700°C durch Entwässerung von Aluminiumsilikaten und in Verbindung mit dem entstandenen Calciumoxid hochaktive Calciumaluminatsilikate (CAS). Die CAS haben zum Teil röntgenamorphen Charakter und sind daher nur schwer feststellbar. Steigert man die Temperatur weiter bis auf 800°C so ist ein Rückgang des Calciumcarbonat-Peaks zu erkennen (Abb. 6.17). Bei 850°C ist der Vorgang der Entsäuerung abgeschlossen. Eine nennenswerte Freikalkbildung ist nicht festzustellen. Das entstandene CaO geht offenbar sofort eine Verbindung in Form von Belite ein.

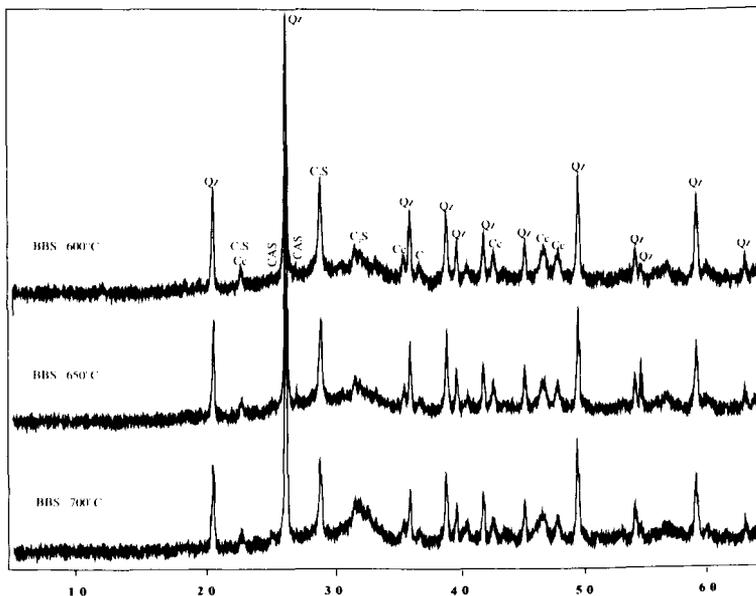


Abb. 6.16: Röntgenbeugungsdiagramm von Betonbrechsand (BBS) nach einer thermischen Behandlung von 600-700°C.

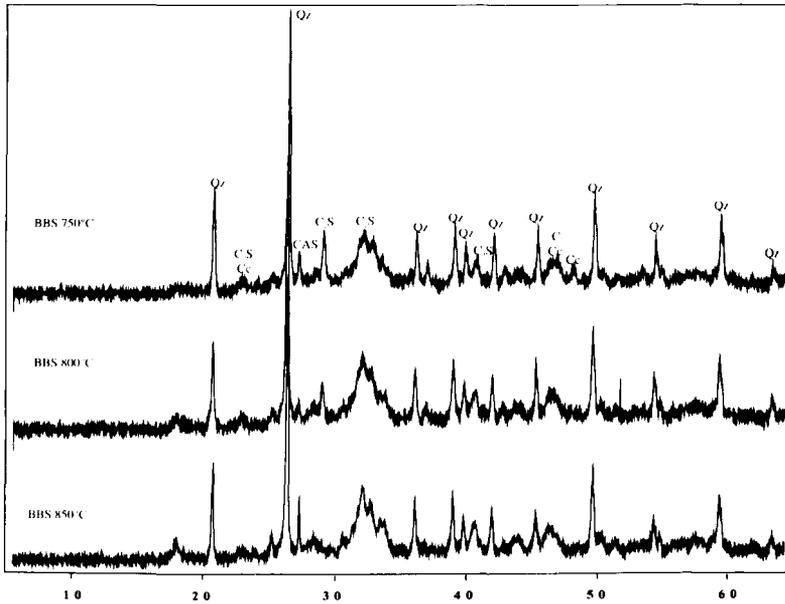


Abb. 6.17: Röntgenbeugungsdiagramm von Betonbrechsand (BBS) nach einer thermischen Behandlung von 750-850°C.

Ab einer Temperaturbelastung von 900°C wird aus den hochaktiven Calciumaluminat-silikaten (CAS) eine inaktive γ -Verbindung. Bis 1000°C finden sonst keine signifikanten Phasenveränderungen mehr statt (Abb. 6.18).

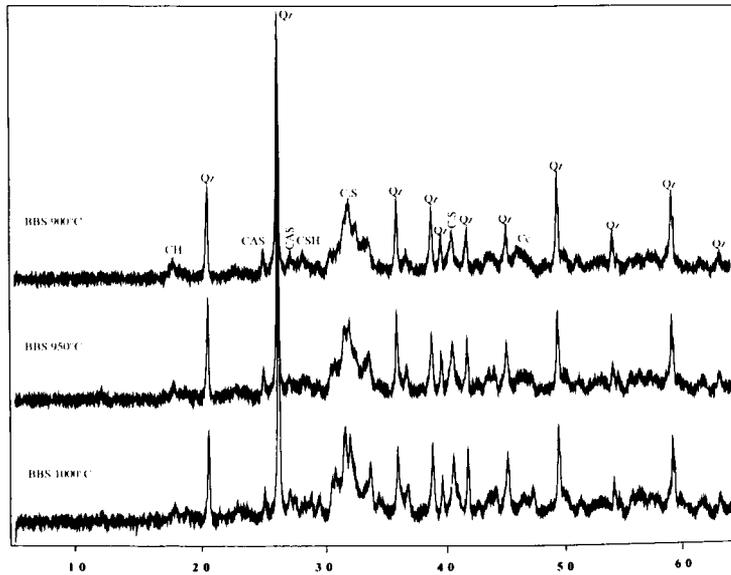


Abb. 6.18: Röntgenbeugungsdiagramm von Betonbrechsand (BBS) nach einer thermischen Behandlung von 900-1000°C.

Oberhalb von 1000°C sind die Bildung von C_3A und C_4AF möglich, aber nicht eindeutig nachweisbar. Ab einer Temperatur von 1100°C kann das Vorhandensein von aktiven Aluminiumsilikaten belegt werden (Abb. 6.19). Ab einer Temperaturbelastung von 1200°C, dem Bereich von Belitezementen, läßt sich die α -Modifikation der C_2S -Phasen nachweisen.

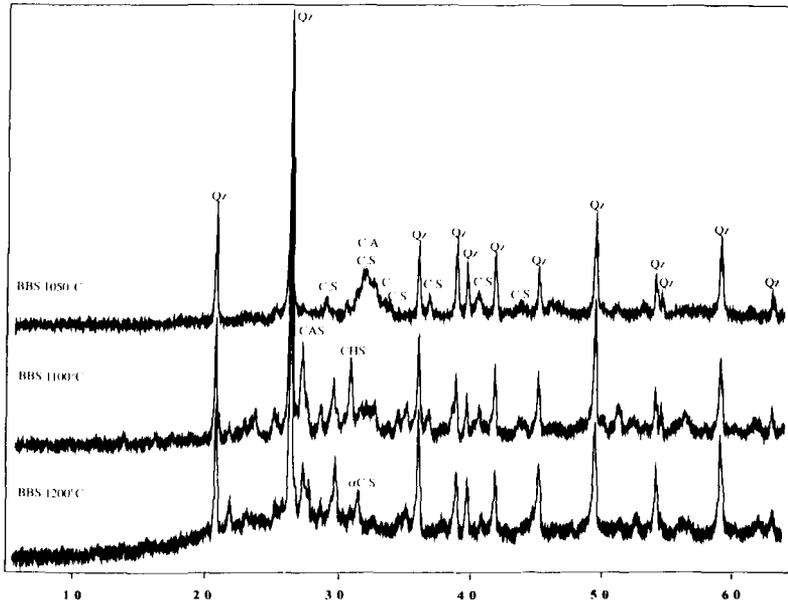


Abb. 6.19: Röntgenbeugungsdiagramm von Betonbrechsand (BBS) nach einer thermischen Behandlung von 1050-1200°C.

Die Hauptphase bei Primärzementen, das C_3S , entsteht im thermisch behandelten BBS ab einer Behandlungstemperatur von 1250°C. Bei 1350°C ist noch ein leichter quantitativer Zuwachs zu verzeichnen (Abb. 6.20).

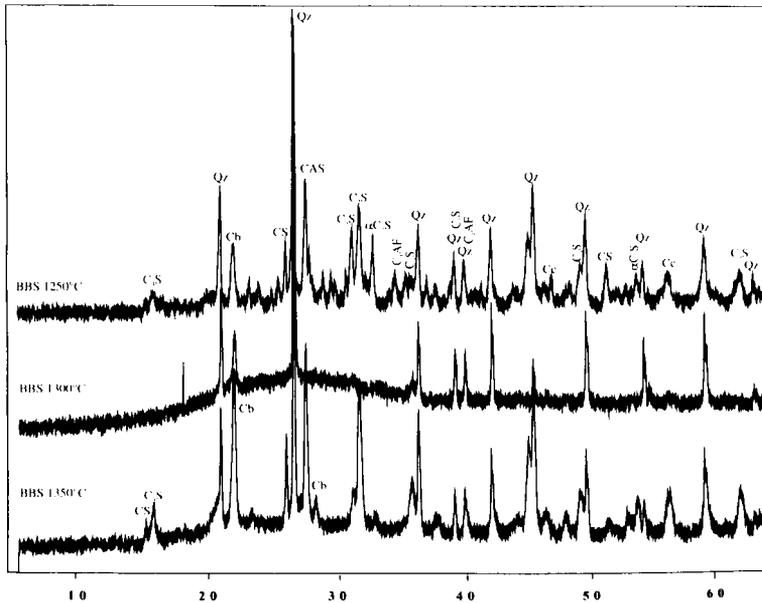


Abb. 6.20: Röntgenbeugungsdiagramm von Betonbrechsand (BBS) nach einer thermischen Behandlung von 1250-1350°C.

6.4.2 Kristalline Phasen in Mörtel aus temperaturbehandeltem Betonbrechsand

Betrachtet man die Phasendiagramme der aus Brechsand hergestellten Mörtel 28 Tagen nach der Herstellung in Abhängigkeit von der vorherigen thermischen Behandlung, so sind die folgend aufgeführten Phasenveränderungen festzustellen.

Im Bereich von 450 bis 500°C ist in den Röntgendiagrammen in Abb. 6.21 die anfängliche Phasenbildung von Calciumaluminatsilikathydraten (CASH) und Calciumsilikathydraten (CSH) nachweisbar. Im Temperaturbereich von 550°C kommt es jedoch zu einer zwischenzeitlichen Verminderung der Phasenbildung, was sich mit der Phasenumwandlung von α nach β des Zuschlags (Silicium) in diesem Temperaturbereich erklären läßt.

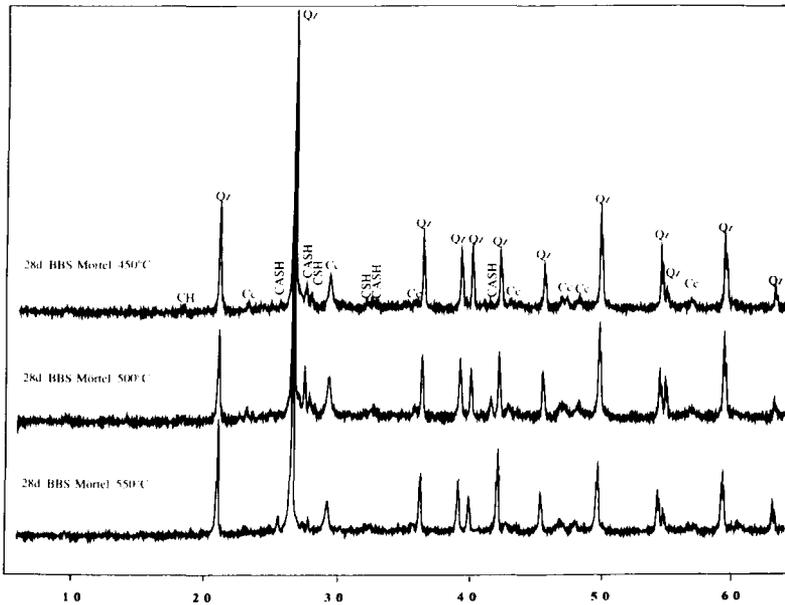


Abb. 6.21: Röntgenbeugungsdiagramm von Mörtel aus Betonbrechsand (BBS) im Alter von 28 Tagen. Temperaturbehandlungsbereich des BBS zwischen 450-550°C.

Nach Abschluß der Quarzumwandlung ist in dem Temperaturbereich zwischen 600°C und 750°C ein Anstieg an entstandenen CASH und CSH-Phasen zu erkennen (Abb. 6.22). Die Peakhöhe erlaubt einen Rückschluß auf die Menge. Demnach liegen Maxima der entstandenen Phasen für CSH bei 650°C und für CASH bei 750°C (Abb. 6.23). Ab einer Behandlungstemperatur von 750°C kann ein röntgenamorpher Buckel erkannt werden, der bei höherer Temperatur weiter ansteigt. Das beruht zum einen auf neu entstandenen C₂S Phasen sowie ab einer Behandlungstemperatur von 900°C auf inerten Sintererzeugnissen (Abb. 6.23 und Abb. 6.24).

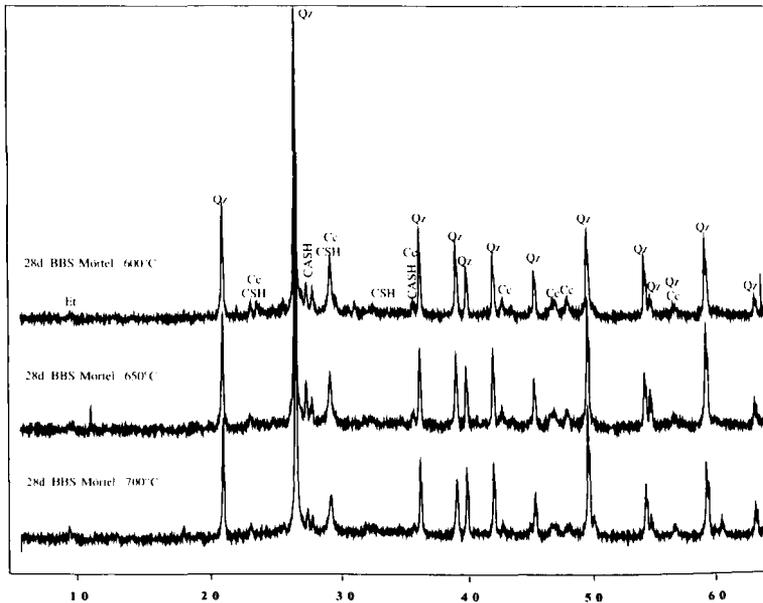


Abb. 6.22: Röntgenbeugungsdiagramm von Mörtel aus Betonbrechsand (BBS) im Alter von 28 Tagen. Temperaturbehandlungsbereich des BBS zwischen 600-700°C.

Im Röntgendiffraktogramm des Mörtels mit BBS, der bei 800 °C temperiert wurde, ist ein deutlicher Rückgang an Calciumcarbonat (CaCO_3) ersichtlich (Abb. 6.23). Die Entsäuerung findet statt. Da gleichzeitig der Freikalkgehalt nicht ansteigt, ist davon auszugehen, daß zeitgleich Verbindungsreaktionen von Calcium mit Silicium und/oder Aluminium ablaufen.

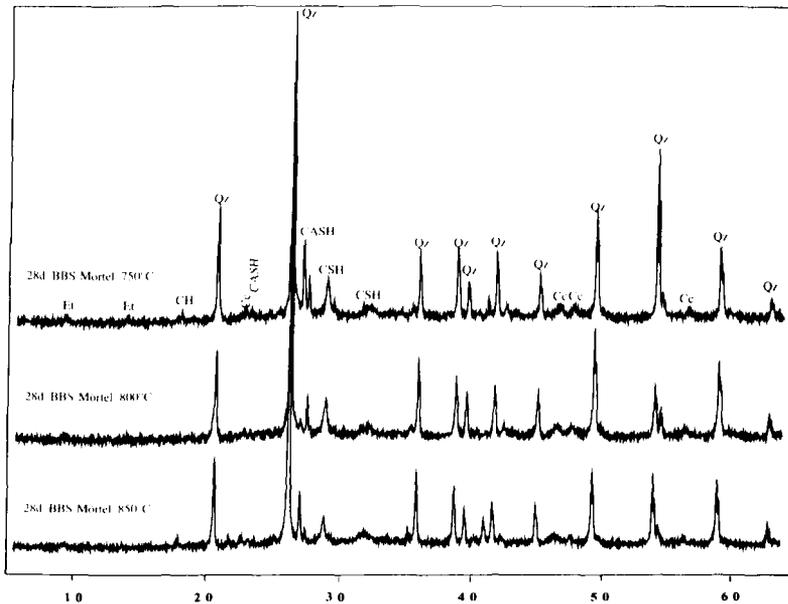


Abb. 6.23: Röntgenbeugungsdiagramm von Mörtel aus Betonbrechsand (BBS) im Alter von 28 Tagen. Temperaturbehandlungsbereich des BBS zwischen 750-850°C.

In Abb. 6.24 ist in dem Röntgendiffraktogramm des Mörtels mit BBS, der bei 900 °C temperiert wurde, ein deutlicher Rückgang der Peaks des CASH und CSH, bezogen auf die Peaks bei Behandlungstemperaturen unterhalb von 900°C, zu verzeichnen. Da in diesem Temperaturbereich nur inerte γ -Modifikationen der CAS beim Tempern selbst entstehen ist auch das Fehlen bzw. der Rückgang an CASH im hydratisierten Mörtel nachvollziehbar. Außerdem hat der Sinterprozeß ein Calciumverbindungen eingesetzt. Die Calciumsilikate stehen somit dem Hydratationsprozeß ohne eine Aufmahlung nur in einem sehr begrenzten Umfang zur Verfügung.

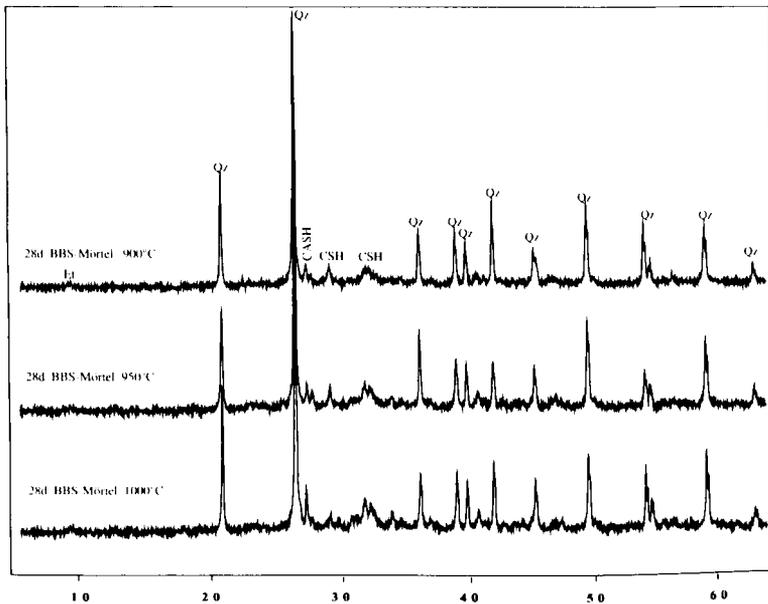


Abb. 6.24: Röntgenbeugungsdiagramm von Mörtel aus Betonbrechsand (BBS) im Alter von 28 Tagen. Temperaturbehandlungsbereich des BBS zwischen 900-1000°C.

6.4.3 Kristalline Phasen in Mörtel aus temperaturbehandeltem Betonbrechsand in Abhängigkeit vom Mörtelalter

Nachfolgend sind die Phasenveränderungen in Mörtel aus temperiertem Betonbrechsand in unterschiedlichem Alter nach der Mörtelherstellung beschrieben.

In dem als Ausgangsmaterial verwendeten thermisch unbehandeltem Betonbrechsand sind die für den Beton zu erwartenden Phasen an quarzitischem Zuschlag (Qz), Calciumcarbonat (Cc), Portlandite (CH) und Calciumsilikathydrat (CSH) feststellbar (Abb. 6.25, untere Kurve).

hydrat (CSH) ist der von der Intensität her zweitgrößte Peak bei 32,054 2 θ heranzuziehen. Der größte Peak wird vom Peak des Calciumcarbonates und der dritthöchste Peak vom Quarzpeak überlagert. Sie können somit nicht zur eindeutigen Identifikation von CSH Phasen herangezogen werden.

Betrachtet man die Veränderung des Phasenbestands über die Zeit nach der Herstellung, so ist unter der Annahme, daß die Intensität an Cc konstant ist, die wohl wichtigste Feststellung, daß die Intensität an CSH mit zunehmendem Alter ansteigt (gemeinsamer Peak bei 29,355 2 θ). Beim CASH scheint es sich nicht um eine stabile Verbindung zu handeln, denn im Alter von 90 Tagen ist, verglichen mit 28 Tagen, ein Rückgang zu verzeichnen (Abb. 6.26). Der Phasengehalt an CH ist, über die Erhärtungsdauer betrachtet, ebenso wie der Phasengehalt an Cc nahezu konstant.

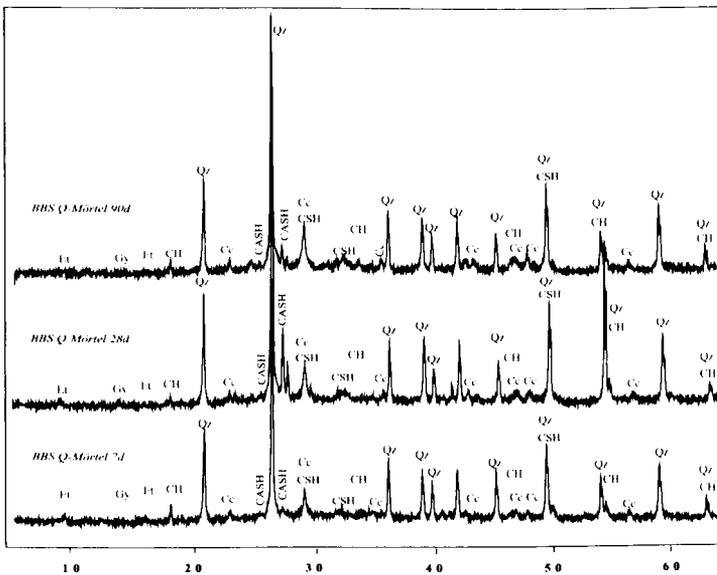


Abb. 6.26: Röntgenbeugungsdiagramm von Mörtel aus thermisch behandeltem Betonbrechsand (BBS) im Alter von 7, 28 und 90 Tagen.

6.4.4 Kristalline Phasen in Brechsand aus Beton, Ziegel, Kalksandstein und in Brechsandgemischen

Der Kalksandsteinbrechsand (KSB) (Abb. 6.27) enthält als Hauptbestandteil naturgemäß Quarz und in geringen Anteilen Calcit. Außerdem sind Reste kalkarmer Calciumsilikathydrate sowie Orthoklas und Anorthoklas als Feldspatvertreter zu identifizieren. Der Calcitanteil bleibt nach einer Temperaturbehandlung bei 700°C weitgehend unverändert. Bei dem BBS/KSB-Gemisch wird quantitativ weniger C_2S erzeugt, als bei reinem Betonbrechsand entsprechend dem niedrigeren Zementsteinanteil.

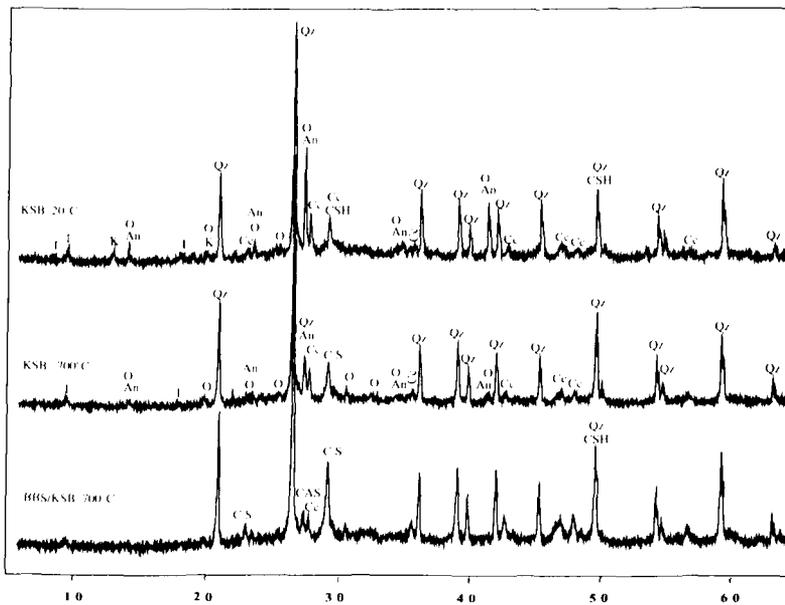


Abb. 6.27: Röntgenbeugungsdiagramm von Kalksandsteinbrechsand (KSB), thermisch behandeltem KSB und in Kombination mit Betonbrechsand (BBS).

Der Ziegelbrechsand (ZB) (Abb. 6.28) enthält als Hauptbestandteile Quarz und Microclin sowie in geringen Mengen Hämatit und Restanteile von Illit sowie geringe Mengen amorphere Substanzen. Nach einer Behandlung bei 700°C nehmen die Anteile an Microclin ab. Darüber hinaus wurden keine Veränderungen im Mineralphasenbestand festgestellt, was bei 700°C an sich auch nicht erwartet wurde. Eine Erhöhung des röntgenamorphen Anteils konnte in den thermoanalytischen Untersuchungen (Kap. 6.3) ja ebenfalls nicht beobachtet werden.

Für das BBS/ZB-Gemisch gilt die gleiche Aussage wie für das BBS/KSB-Gemisch, daß entsprechend dem niedrigeren Zementsteinanteil durch die geringere BBS Zugabe weniger C₂S erzeugt wurde.

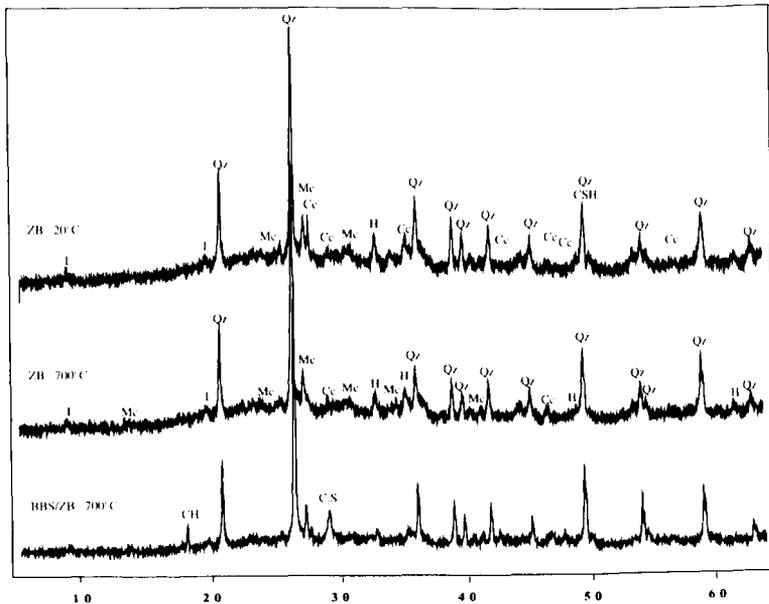


Abb. 6.28: Röntgenbeugungsdiagramm von Ziegelbrechsand (ZB), thermisch behandeltem ZB und in Kombination mit Betonbrechsand (BBS).

Das für die Festigkeitsentwicklung besonders benötigte C_2S wird nur bei einer thermischen Aufbereitung von reinem Betonbrechsand ausgeprägt erzeugt (Abb. 6.29, oberste Kurve). Bei der thermischen Aufbereitung von KSB und ZB als Gemisch konnte die C_2S -Phase nicht nachgewiesen werden. Bei dem Brechsandgemisch aus BBS/KSB/ZB gehen die entwässerten CSH-Phasen und das Portlandite vorrangig mit den Aluminatphasen CAS-Bindungen ein. So ist hier aufgrund des geringen Belitegehaltes auch eine deutliche Minderfestigkeit bezogen auf reinen Betonbrechsand zu erwarten.

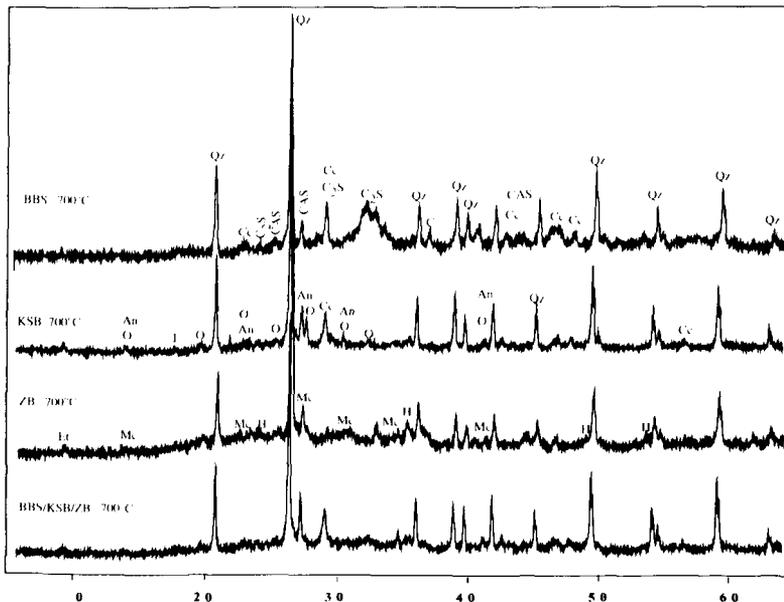


Abb. 6.29: Röntgenbeugungsdiagramm von thermisch behandeltem BBS, ZB und KSB und als Gemisch.

6.4.5 Kristalline Phasen in Brechsand aus Abbruchbeton von der Halde

Ähnlich wie bei dem Brechsandgemisch aus BBS/KSB/ZB ist auch bei dem Betonbrechsandgemisch mit unbekanntem Mengen an Verunreinigungen (ABB) eine verminderte C_2S Bildung festzustellen (Abb. 6.30). Eine Erhöhung der CAS-Bildung kann jedoch nicht festgestellt werden.

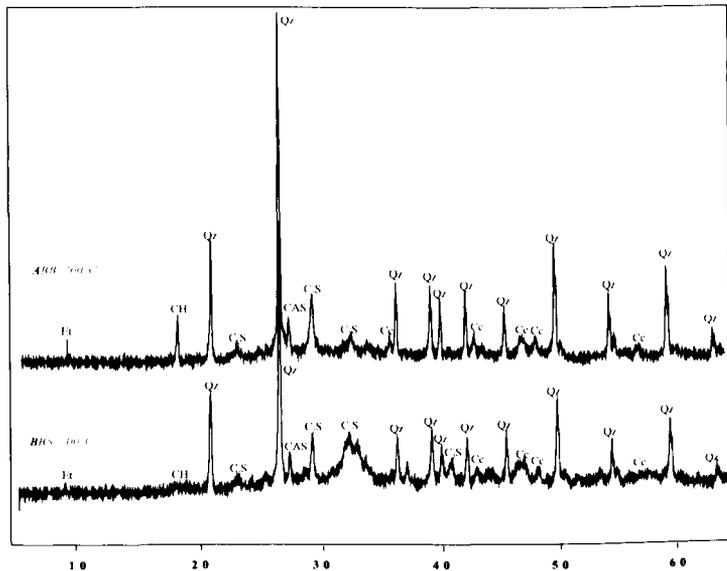


Abb. 6.30: Röntgenbeugungsdiagramm von thermisch behandeltem Betonbrechsand, definiert hergestellt (BBS) und in undefinierter Zusammensetzung von der Bauschutthalde (ABB).

6.4.6 Kristalline Phasen in thermisch behandeltem Zementstein

Im Vergleich zu den Röntgendiffraktogrammen des Betonbrechsandes ist bei den Proben aus Zementstein festzustellen, daß wegen des Fehlens quarzitischer oder calcitischer Zuschlags und der damit verbundenen sehr großen SiO_2 -Peaks, in den

Röntgendiffraktogrammen eine deutlichere Erkennbarkeit der Phasenpeaks bzw. der neugebildeten Phasen gegeben ist (Abb. 6.31). So kommt es nicht zu einer Überlagerung der Reflektionen des Zuschlags mit den Reflektionen des Zementsteins. Da der intensivststärkste Peak des SiO_2 bei $26,5 \theta$ entfällt, lassen sich die anderen Peaks somit im Verhältnis kontrastreicher darstellen.

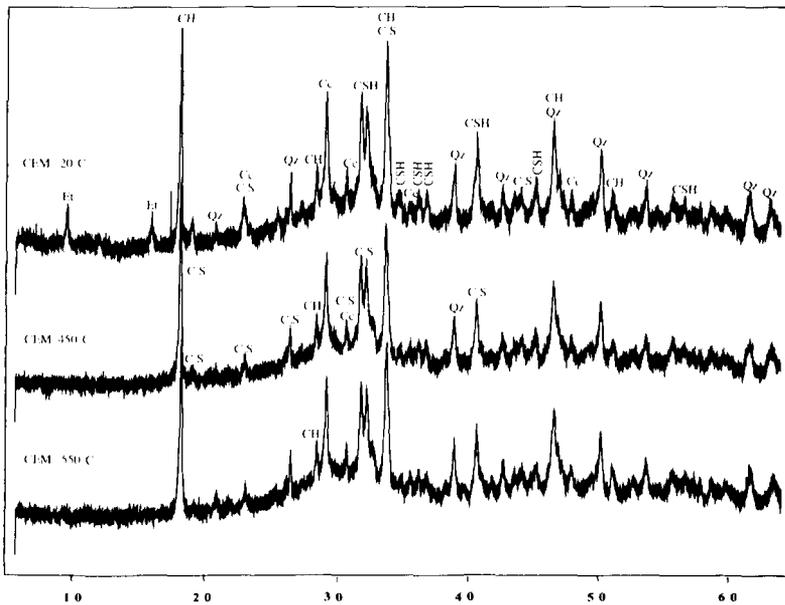


Abb. 6.31: Röntgenbeugungsdiagramm von thermisch unbehandeltem Zementstein (CEM) im Alter von 180 Tagen und nach einer thermischen Behandlung bei 450 und 550°C.

Beim thermisch unbehandelten Zementstein ist das Vorhandensein von Portlandite, Calciumcarbonat und unhydratisierten Klinkerphasen und Ettringit eindeutig nachzuweisen (Abb. 6.31). Trotz der teilweise röntgenamorphen Struktur ist auch eine CSH-Phase ($1,5 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) identifizierbar. Monosulfat, Gips, Tetracalciumaluminat-hydrat und Tetracalciumaluminatferrithydrat hingegen konnten nicht nachgewiesen

werden. Die Phasen sind entweder nicht in ausreichender Menge vorhanden oder liegen röntgenamorph vor.

Nach einer Temperaturbehandlung bei 450°C ist die Zersetzung des Ettringits zu beobachten. Nach einer Temperaturbehandlung bei 550°C kann eine Verringerung der Portlanditpeaks verzeichnet werden. Diese Verringerung ist allerdings so gering, daß sie auch auf Meßstreuungen zurückzuführen sein könnte.

Bei 650°C hat das Portlandit das Wasser gänzlich abgegeben und liegt nun als Calciumoxid in der Probe vor (Abb. 6.32). Das Calciumcarbonat ist hingegen noch nicht zersetzt. CSH-Phasen können nicht mehr eindeutig identifiziert werden. Die Intensität und damit das Vorhandensein der CSH-Phasen liegt am Rande der Nachweisgrenze. Es sind aber unhydratisierte Klinkerphasen (hauptsächlich Belite) feststellbar. Ihr Anteil ist gegenüber der thermisch unbehandelten Ausgangsprobe deutlich angestiegen.

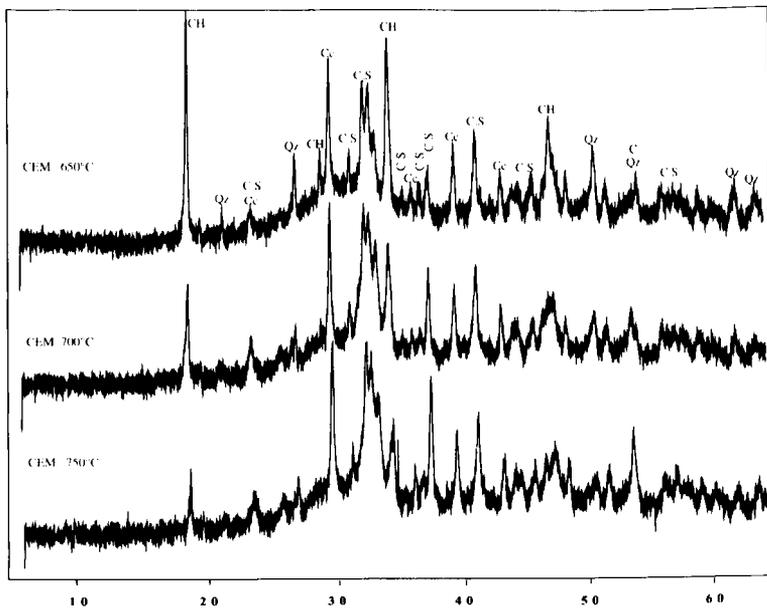


Abb. 6.32: Röntgenbeugungsdiagramm von thermisch behandeltem Zementstein (CEM) bei 650, 700 und 750°C.

Nach einer thermischen Behandlung bei 700°C ist das Maximum an Belit nachweisbar. Ab einer Behandlungstemperatur von 750°C ist eine Zunahme von Calciumoxid zu verzeichnen. Aluminatphasen sind zudem nachweisbar, hierbei handelt es sich um Calciumaluminat und Calciumaluminatsilikat.

Eine deutliche Reduzierung des Calcitpeaks erfährt die Zementsteinprobe durch eine Behandlungstemperatur von 850°C (Abb. 6.33). Damit verbunden ist ein weiterer Rückgang an Calciumoxid aufgrund des unzureichenden SiO₂-Angebotes. Ferner kann die instabile Phase α' -C₂S identifiziert werden. Es hat den Anschein, daß beim Abkühlprozeß geringe Anteile dieser Phase stabilisiert werden konnten.

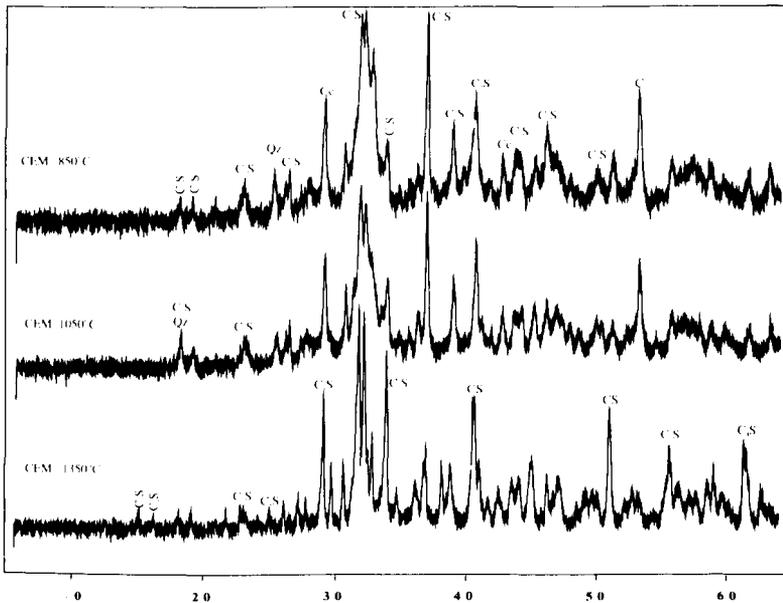


Abb. 6.33: Röntgenbeugungsdiagramm von thermisch behandeltem Zementstein (CEM) bei 850, 1050 und 1350°C.

Nach einer Temperaturbehandlung von über 1000°C (1050°C) kann entgegen den Angaben in der Literatur keine Wollastonitbildung festgestellt werden. Eine Stabilisie-

rung der hydraulisch aktiven Silikat- und Aluminatphasen erscheint schwierig. Die inaktiven γ -Modifikationen dieser Phasen sind vorhanden.

Im Temperaturbereich bei 1350°C, welcher der Zementherstellung entspricht, sind die für Zemente typischen Phasen identifizierbar. So ist die Neubildung von Alit erstmalig möglich. Außerdem können Belite, Christobalit und geringe Anteile von Wollastonit nachgewiesen werden.

Vergleicht man das Röntgendiffraktogramm des Zementsteins mit dem des Betonbrechsandes (Abb. 6.34), so ist vor allem festzustellen, daß der quarzische Zuschlag im Betonbrechsand durch seine hohe Intensität alle anderen Phasen unterdrückt.

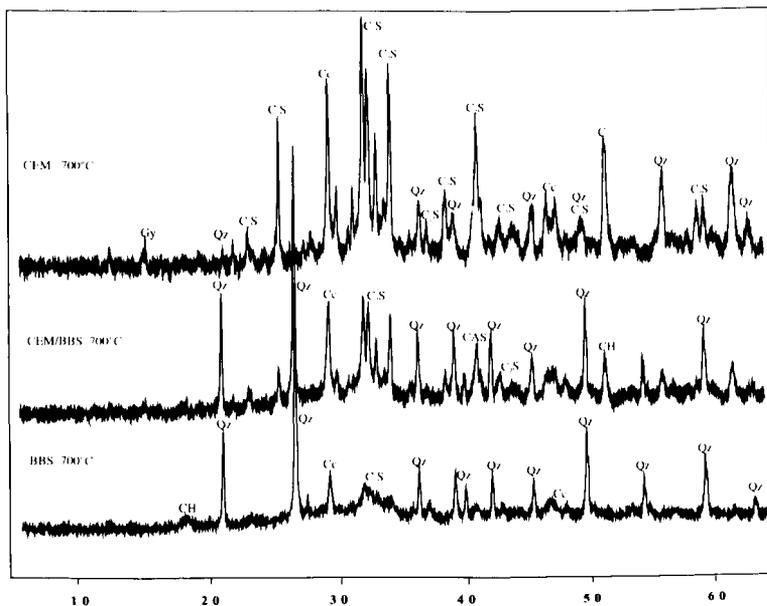


Abb. 6.34: Röntgenbeugungsdiagramme von BBS und Zementstein nach einer thermischen Behandlung bei 700°C.

Setzt man die Intensitäten der Bindemittelphasen gleich, so kann man visuell einfacher feststellen, das sich die gleichen Phasen in beiden Baustoffen bilden. Jedoch ist der Bindemittelphasengehalt entsprechend der Ausgangszusammensetzung (50% Binde-

mittelgehalt) im Betonbrechsand geringer als im Zementstein. Besonders von Interesse ist hier der geringere Belitgehalt im Betonbrechsand im Vergleich zu den des Zementsteines.

6.4.7 Kristalline Phasen in thermisch behandeltem Betonbrechsand mit calcitischem Zuschlag

Untemperierter Betonbrechsand aus Beton mit calcitischem Zuschlag zeigt erwartungsgemäß hohe Cc-Peaks und wenig Siliziumdioxid (Abb. 6.35).

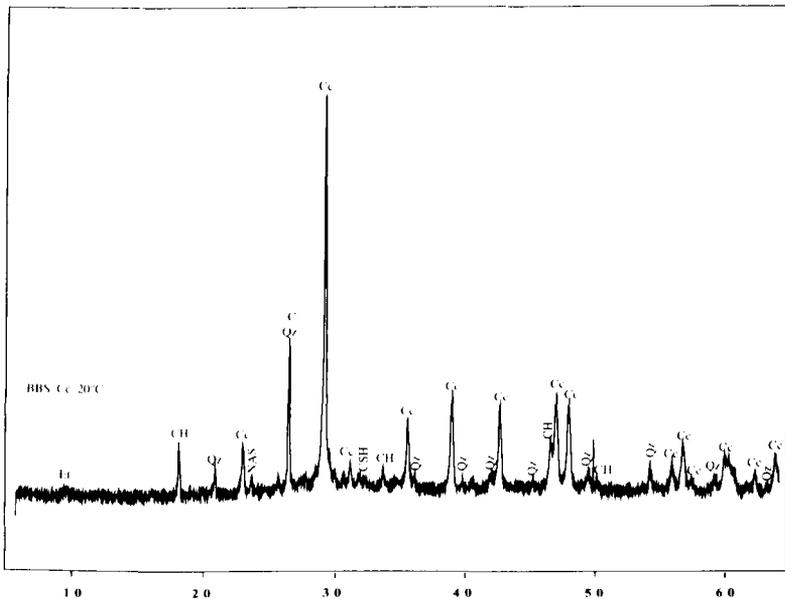


Abb. 6.35: Röntgenbeugungsdiagramm untertemperierten Betonbrechsandes aus Beton mit calcitischem Zuschlag.

Vergleicht man die Diffraktogramme temperierten Brechsandes aus calcitischem Beton mit denen von Beton mit quarzitischem Zuschlag, so ist festzustellen, daß deutlich

weniger reaktive Phasen bei der Behandlung von Betonbrechsand aus Beton mit calcitischem Zuschlag gebildet werden.

Bei einer Behandlung von 700°C entsteht nur unwesentlich weniger Belit als bei einer Behandlung bei 750°C. Bei einer Behandlung bei 750°C besteht hingegen aufgrund des geringen SiO₂ Gehaltes und damit einer geringen CaO-Bindung allerdings bereits die Gefahr einer erhöhten Freikalkbildung (Abb. 6.36). Deshalb ist die Wahl einer höheren Temperatur als 700°C für Brechsand aus calcitischem Beton nicht empfehlenswert.

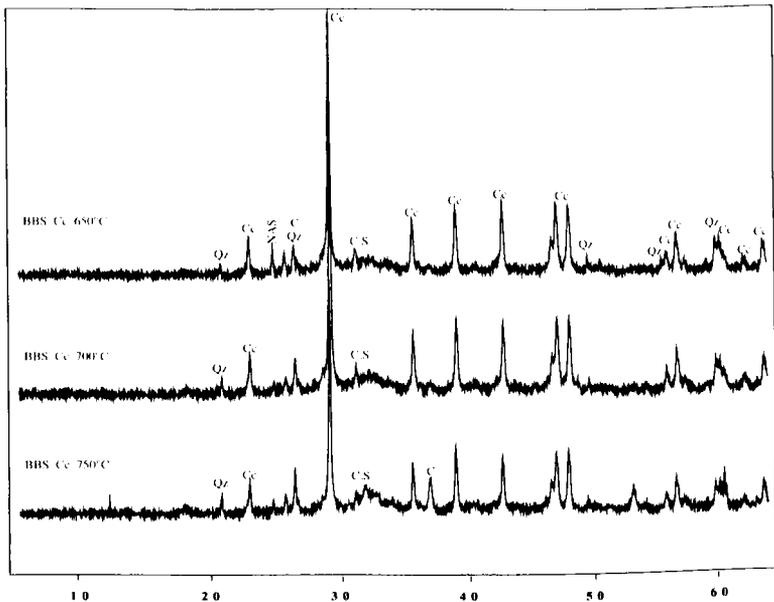


Abb. 6.36: Röntgenbeugungsdiagramm von thermisch behandeltem Betonbrechsand mit calcitischem Zuschlag bei 650, 700 und 750°C.

6.4.8 Kristalline Phasen in thermisch behandeltem Betonbrechsand bei unterschiedlicher Temperaturierdauer

Eine verlängerte thermische Behandlung von einer Haltezeit von ca. 30 Minuten auf 75 Minuten bei gleicher Behandlungstemperatur erzeugt keine neuen reaktiven Phasen. Festzustellen ist aber, daß die Entsäuerung aus dem Temperaturbereich um 800°C bei längerer Haltezeit auf niedrigere Temperatur vorgezogen wird. Insgesamt gleicht das Phasendiagramm bei einer Haltezeit von 75 Minuten und einer Behandlungstemperatur von 700°C etwa dem Phasendiagramm bei einer thermischen Behandlung bei 750°C und einer 30 minütigen Behandlungsdauer (Abb. 6.37).

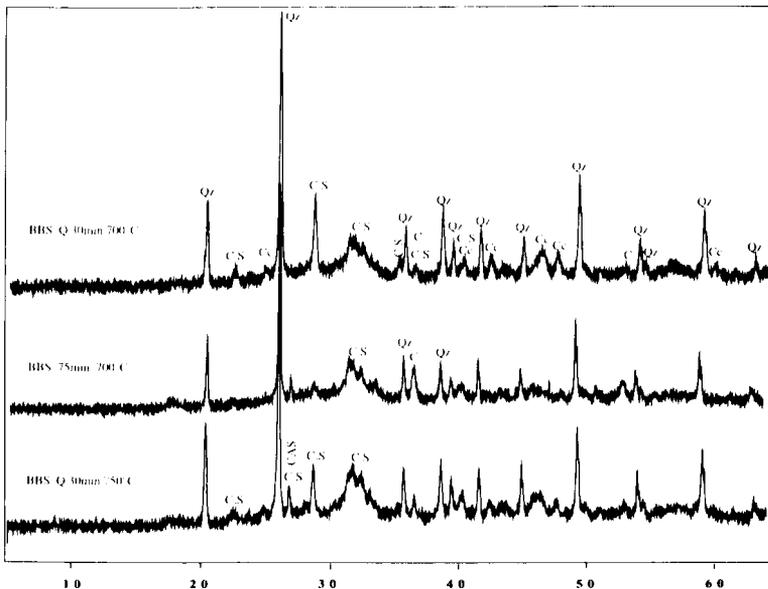


Abb. 6.37: Röntgenbeugungsdiagramm von BBS nach einer thermischen Behandlung bei 700°C und 750°C und unterschiedlicher Haltezeit.

6.4.9 Kristalline Phasen in thermisch behandeltem Betonbrechsand bei unterschiedlicher Aufbereitung

Es wurde der Einfluß der Art der weiteren Aufbereitung des Betonbrechsandes ($d_k = 2\text{mm}$) auf größere Feinheit untersucht, nämlich einerseits der Feinmahlung und andererseits der Absiebung auf Korngrößen kleiner $0,25\text{mm}$. Der Phasenbestand nach Temperierung in beiden Brechsanden ist unterschiedlich (Abb. 6.38).

Der Bindemittelgehalt beträgt bei einem Größtkorn von 2 mm 30% und bei einer Absiebung auf $250\ \mu\text{m}$ 50% . Mahlt man Betonbrechsand mit einem Größtkorn von 2 mm auf so erhält man einen um 20% geringeren Bindemittelanteil, bezogen auf eine Absiebung bei $250\ \mu\text{m}$. Aufgrund des geringeren Bindemittelgehaltes ist daher mit einer geringeren Erzeugung reaktiver Phasen, wie Belite, zu erwarten.

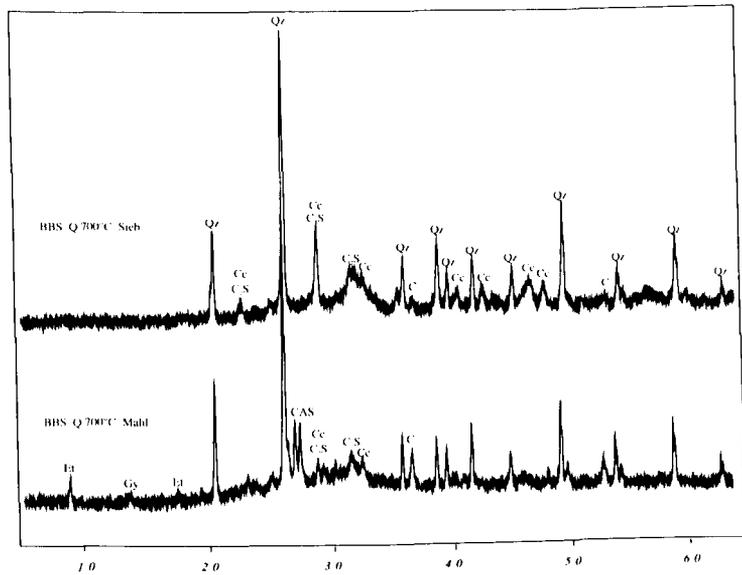


Abb. 6.38: Röntgenbeugungsdiagramm von abgesiebt bzw. aufgemahlenem BBS nach einer thermischen Behandlung bei 700°C .

Durch die Vergrößerung der reaktiven Oberfläche infolge der Aufmahlung, wird jedoch das Phasenwachstum begünstigt, bezogen auf ein abgeseihten Brechsand mit einem Bindemittelgehalt von 30%. So ist ein deutlicher Anstieg an neu gebildeten Calciumaluminatsilikatphasen (CAS) zu verzeichnen.

6.4.10 Einfluß von Alkali und Salz im Betonbrechsand auf den kristallinen Phasenbestand

Ein erhöhter Gehalt an Natrium bzw. Chlorid im Betonbrechsand hat reduzierende Wirkung auf den zu erzeugenden reaktiven Phasengehalt nach einer thermischen Behandlung. So wird die Belitbildung leicht gehemmt, Calcite abgebaut und Calciumoxid gebildet (Abb. 6.39). Es scheint so, daß die Beimengungen die Reaktionsfähigkeit des Calciumoxides ungünstig beeinflussen.

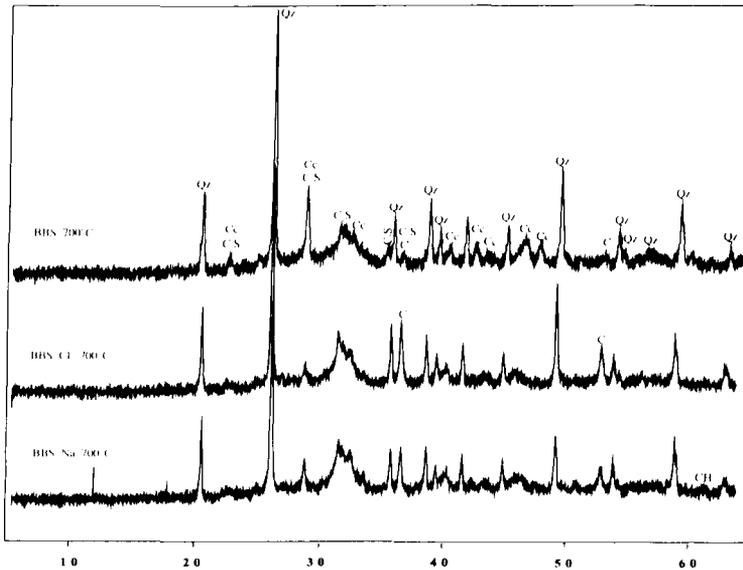


Abb. 6.39: Röntgenbeugungsdiagramm von BBS nach einer Temperaturbehandlung bei 700°C ohne und mit Chlorid- und Natriumzusatz.

6.4.11 Einfluß von Zuschlagvariationen im Mörtel auf den kristallinen Phasenbestand

Gibt man thermisch behandeltem Betonbrechsand, der als Bindemittel im Mörtel dient, verschiedenartigen bzw. unterschiedlich behandelten Zuschlag hinzu, so kann man folgende Feststellungen treffen (s. Abb. 6.40). Bei der Zugabe von Normsand als Zuschlag entsteht der größte Anteil an CASH-Phasen. Bei der Zugabe von untemperiertem Betonbrechsand als Zuschlag ist der CSH Anteil leicht höher. Dies ist mit den im Betonbrechsand vorhandenen CSH-Phasen zu erklären. Sie tragen aber nicht zu einer Festigkeitsbildung bei.

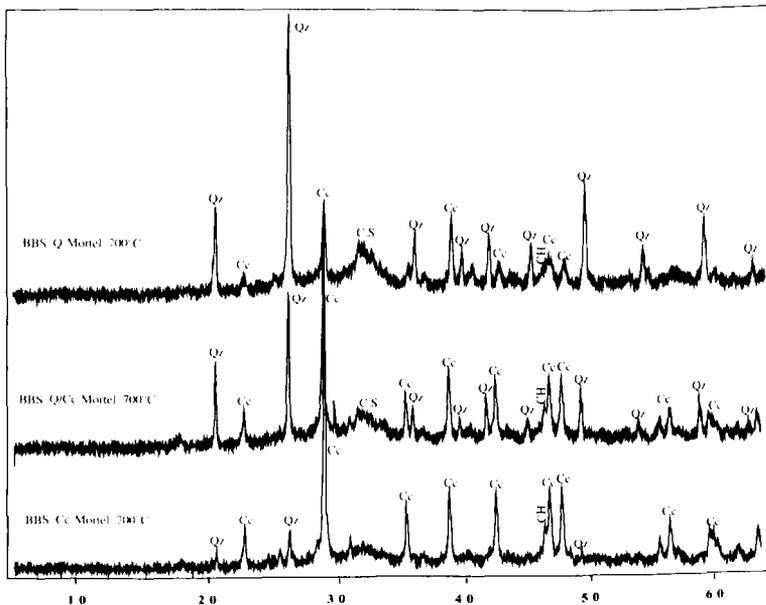


Abb. 6.40: Röntgenbeugungsdiagramm von Mörtel aus BBS nach einer thermischen Behandlung bei 700°C im Alter von 28 Tagen mit unterschiedlichen Zuschlägen im Mörtel.

Bei der Zugabe von thermisch behandeltem Betonbrechsand > 0,25 mm als Zuschlag ist ebenfalls, wie bei der Zugabe von thermisch unbehandeltem Betonbrechsand ein

Anstieg des CSH-Phasenanteils bezogen auf die Normsandmischung zu verzeichnen. Jedoch steigt hier auch der Portlanditanteil, so das von einer gesteigerten CSH-Phasenproduktion ausgegangen werden kann. Allerdings steigt dadurch auch der resultierende Gesamtbindemittelgehalt im Mörtel; die Folgen für die Gebrauchseigenschaften sind zu bedenken.

6.4.12 Einfluß der Variation der Mörtellagerung auf den kristallinen Phasenbestand

Eine Variation der Lagerungsart nach der Herstellung der Mörtel macht sich vor allem in der Bildung der CASH-Phasen bemerkbar (Abb. 6.41).

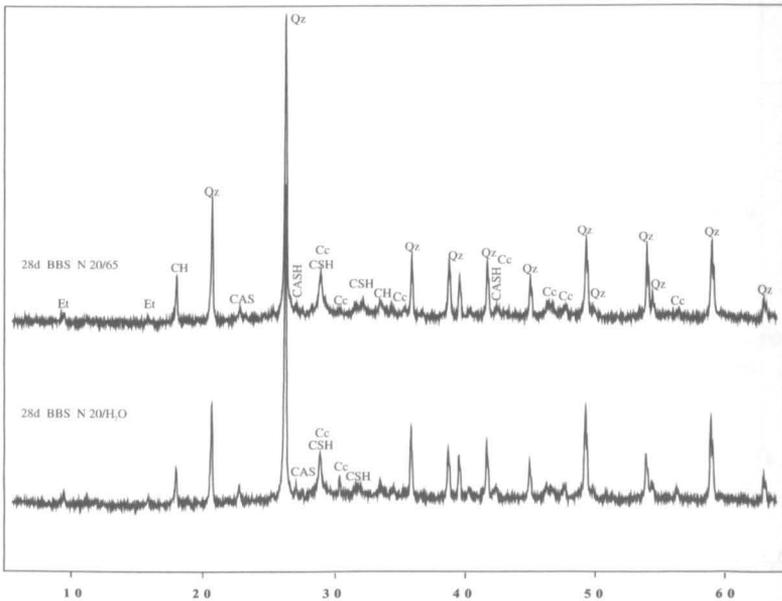


Abb. 6.41: Röntgenbeugungsdiagramm von BBS nach einer thermischen Behandlung bei 700°C im Alter von 28 Tagen nach Wasserzugabe bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen der Mörtel.

So ist bei einer 28 tägigen Unterwasserlagerung bezogen auf einer Lagerung im Normklima 20/65 eine Erhöhung der Peak-Intensität zu registrieren. Bei den CSH-Phasen ist kein signifikanter Einfluß der Lagerung der Proben feststellbar.

6.5 Ergebnisse der Strukturuntersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskopie

Es wird nachfolgend über die Ergebnisse mikroskopischer Untersuchungen mittels der Rasterelektronenmikroskopie berichtet, mit deren Hilfe Unterschiede der Hydratation und Strukturbildung von Brechsand mit Wasser für unterschiedliche Alter und weitere Parameter erkannt und verstanden werden sollen. Ausgangspunkt und Referenz für Vergleiche ist Portlandzementmrtel (Abb. 6.42).

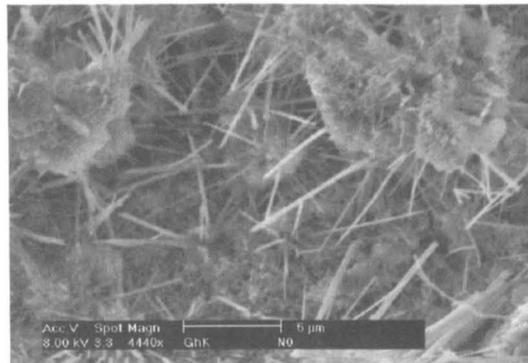


Abb. 6.42: REM-Aufnahme von hydratisiertem Mörtel mit CEM I als Bindemittel (Alter 7d).

Man erkennt, daß die für die Festigkeit maßgeblichen CSH – Partikel im Mittel eine Länge von ca. 7 μm aufweisen. Die CSH – Kristalle wachsen geradlinig und räumlich betrachtet in alle Richtungen. Substituiert man in diesem Mörtel 50% des Zementes durch thermisch behandelten Betonbrechsand, so ist ein verändertes „CSH – Geflecht“ zu erkennen (siehe Abb. 6.43). Die CSH-Kristalle scheinen fragiler und feiner, dafür aber enger vernetzt als bei der Referenzprobe zu sein.

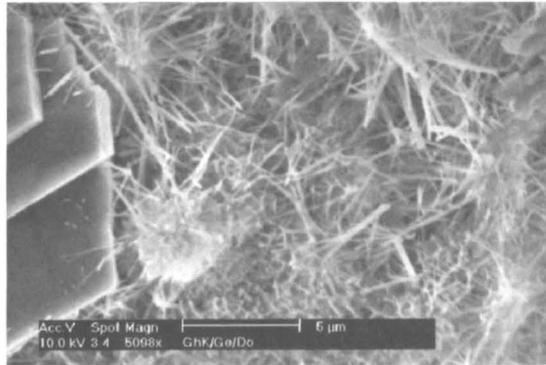


Abb. 6.43: REM-Aufnahme von hydratisiertem Mörtel mit CEM I und BBS als Bindemittel (Alter 7d).

Bei Mörtel, der ausschließlich mit Betonbrechsand, also nur mit sekundärem Bindemittel, hergestellt wurde, ist auffällig, daß die CSH-Kristalle wesentlich kürzer sind als in den zuvor beschriebenen Mörteln (siehe Abb. 6.44). Die mittlere Partikellänge beträgt hier ca. 2,5 μm. Es liegt nahe, daß dieses auf verlangsames Kristallwachstum zurückzuführen ist.

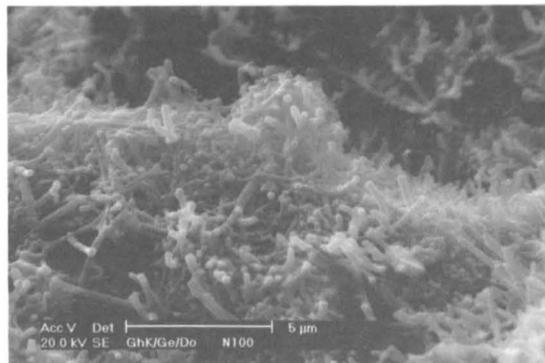


Abb. 6.44: REM-Aufnahme von hydratisiertem Mörtel mit BBS als Bindemittel (Alter 7d).

Verlangsamtes Wachstum läßt sich plausibel durch das Fehlen von Alit und die ausschließliche Bildung der CSH-Phasen aus dem im thermischen Behandlungsbereich von 700-750°C erzeugten Belit erklären. Dies erfolgt bekanntermaßen deutlich langsamer, führt aber im hohen Alter zur etwa gleichen Endfestigkeit. Die geringere Vernetzung der CSH-Phasen spiegelt sich auch in geringerer Druckfestigkeit daraus hergestellter Mörtel wieder, wie in Kap. 7 gezeigt wird. Wesentlich geringer ist die Reduktion in der Biegezugfestigkeit; sie erreicht ca. 40% der Festigkeit von Mörteln mit Zement als Bindemittel (siehe Kap. 7). Verantwortlich für das vergleichsweise günstige Verhalten bei der Zugfestigkeit verglichen mit der Druckfestigkeit, dürfte, bedingt durch die kurzen CSH-Phasen, die raue Oberfläche und damit eine hohe Reibungsverzahnung sein.

Vergleicht man unterschiedliche Lagerungsarten der hergestellten Mörtel, so ist eine ausgeprägte Abhängigkeit festzustellen. Lagert man BBS-Mörtel 28 Tage im Klima 20 / unter Wasser, so ist ein ähnliches Bild der Phasenbildung, wie bei Mörtel mit Normzementen bzw. einem Substituierungsgrad von 50% festzustellen (vergleiche Abb. 6.42, Abb. 6.43, Abb. 6.45). In Abb. 6.45 ist ein dichtes Geflecht aus CSH-Phasen, mit offenbar fortgeschrittenem Hydratationsgrad, zu erkennen.

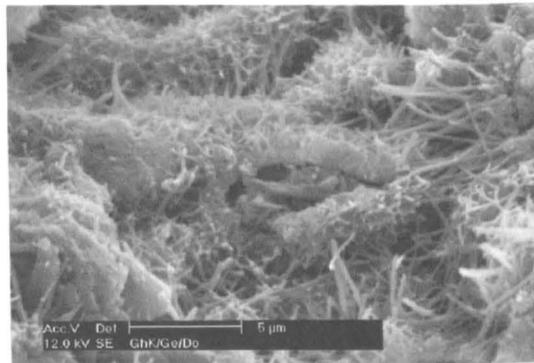


Abb. 6.45: REM-Aufnahme von hydratisiertem Mörtel mit BBS als Bindemittel (Alter 28d, unter Wasser-Lagerung).

Lagert man die Mörtelproben hingegen im Normklima 20/65, so ist gegenüber der Aufnahme nach 7 Tagen kaum ein wesentliches Phasenwachstum zu erkennen. Aufgrund raschen Trocknung des porösen BBS-Mörtels fehlt das für die Hydratation benötigte Wasser. Die poröse Struktur ist in Abb. 6.46 gut zu erkennen. Verglichen mit Mörteln aus Normzement erscheint eine verlängerte Nachbehandlung unabdingbar.

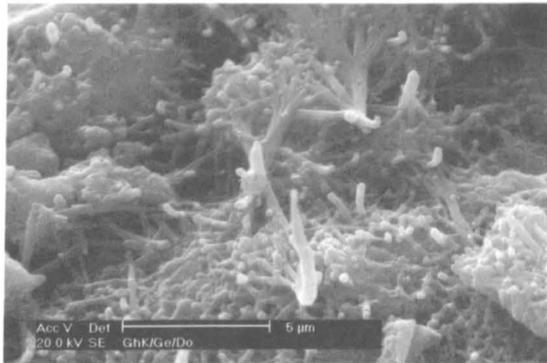


Abb. 6.46: REM-Aufnahme von hydratisiertem Mörtel mit BBS als Bindemittel (Alter 28d, Lagerung 20/65).

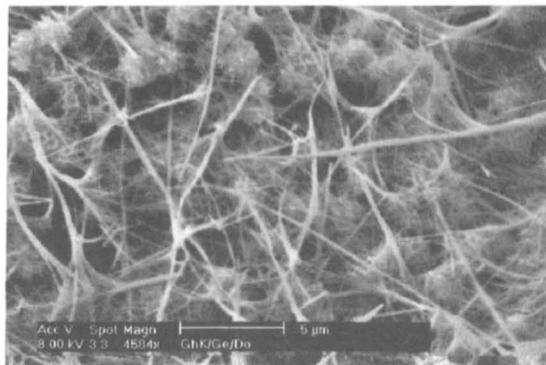


Abb. 6.47: REM-Aufnahme von hydratisiertem Mörtel mit BBS als Bindemittel und Fließmittel (Alter 28d).

Setzt man mörteltechnologische Maßnahmen, wie die Rezepturverbesserung durch die Zugabe von Fließmittel (FM) ein, so läßt sich ein sehr dichtes Netzwerk aus CSH-Phasen erzeugen (siehe Abb. 6.47). Aus „blumenkohllartigen Gewächsen“ wachsen, wie bei Mörteln mit Normzement, lange, dicke CSH-Phasen in alle Richtungen (siehe Abb. 6.48). Außerdem konnte im Probenalter von 28 Tagen, das Übergangsstadium von stumpf- zum spitznadeligen Habitus der CSH-Phasen mit einer Länge von 1000 nm festgestellt werden.

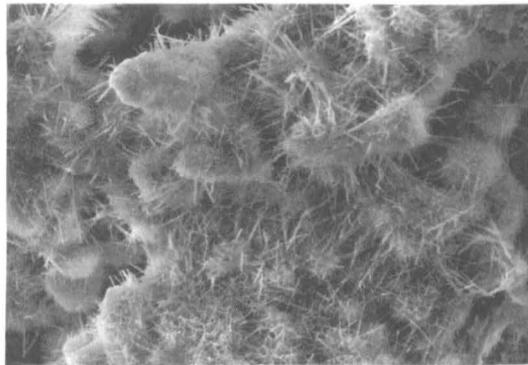


Abb. 6.48: CSH-Phasen, entstanden aus hydratisiertem β -C₂S, 28d, Bildbreite 25 μ m.

Generell kann bei allen Mörteln, für die ausschließlich thermisch behandelter Brechsand als Bindemittel verwendet wurde nur ein vermindertes Portlanditvorkommen festgestellt werden (siehe Abb. 6.49). Das verwundert nicht, da die CSH-Phasen ja ausschließlich aus Belit und nicht aus Alit entstehen. Nur bei der Entstehung der CSH-Phasen aus Alit entsteht Portlandit.

Calciumaluminathydrat (CAH), für die Festigkeitsentwicklung der Mörtel nur von sekundärer Bedeutung, konnte auch bei den REM-Untersuchungen nachgewiesen werden (siehe Abb. 6.50).

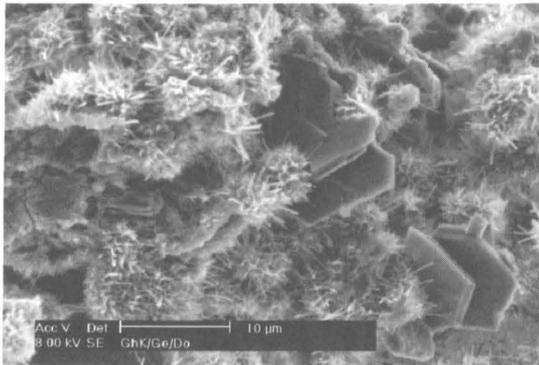


Abb. 6.49: REM-Aufnahme von Calciumhydroxid- Kristallen $\text{Ca}(\text{OH})_2$, eingebettet in CSH-Phasen.

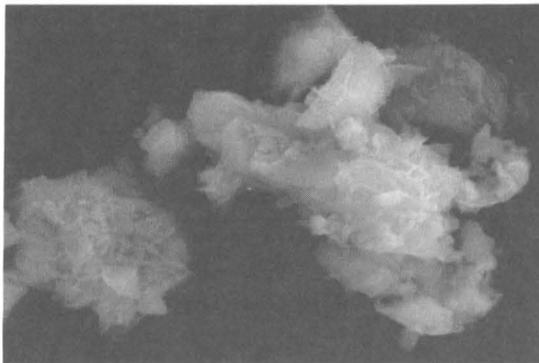


Abb. 6.50: CAH-Plättchen: Auf zwei C_3A -Körnern aufgewachsene dünn-tafelige ($d = 50 \text{ nm}$) Calciumaluminathydratkristalle, Bildbreite $16 \mu\text{m}$.

Freikalk (CaO) kann in den analysierten Proben nicht oder kaum nachgewiesen werden (siehe Kap. 6.4). Vermutlich wird es rasch in CSH-Phasen, Portlandit und Calciumcarbonat gebunden. Calciumcarbonat wurde in den REM-Untersuchungen als Calcit

(siehe Abb. 6.51 und Abb. 6.52) vorgefunden. Eine Besonderheit hierbei ist offenbar, daß das Calcit in rhombischer Form vorkommt (siehe Abb. 6.51), wie ansonsten nur bei Aragonit.

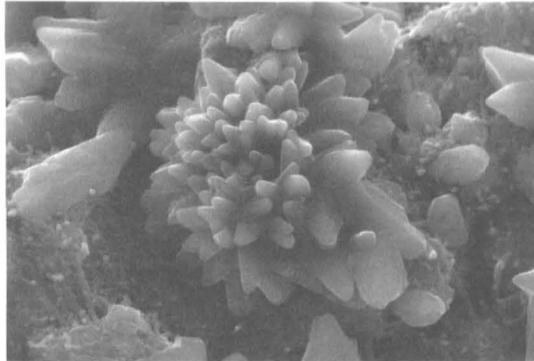


Abb. 6.51: REM-Aufnahme von rosettenartig gewachsenen Calciumcarbonatkristallen (Calcit), eingebettet in ein Geflecht von C-S-H Phasen (Bildbreite 24 µm).

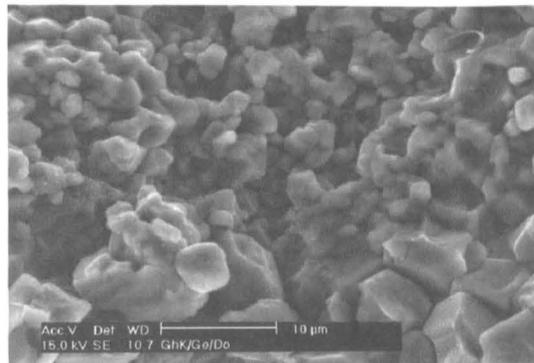


Abb. 6.52: Brechsandoberfläche mit rhomboedrischen und prismatischen Calcitkristallen

Ferner können auch noch Aussagen zum Verbundverhalten zwischen dem sekundären Bindemittel Betonbrechsand und dem quarzitären Normzuschlag gemacht werden. Auch hier entsteht in der Verbundzone Portlanditkristalle (siehe Abb. 6.53). Ob diese allerdings in der gleichen Häufigkeit und Ausprägung, wie in Verbundzonen von Baustoffen mit primärem Bindemittel, vorkommen, kann aufgrund des dazu zu begrenzten Probenumfangs keine Aussage gemacht werden.

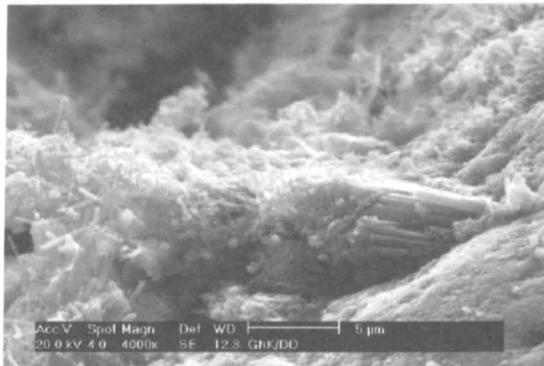


Abb. 6.53: Anreicherung von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Kristallen an der Grenzfläche Bindemittel-Zuschlag.

7 Technologische Eigenschaften von Mörtel aus thermisch behandeltem Brechsand

7.1 Frischmörteleigenschaften

7.1.1 Allgemeines

In der Mörteltechnologie üblicher Mauer- und Putzmörtel ist es bis heute Gepflogenheit, die Anmachwassermenge individuell so zu wählen, daß die jeweils gewünschte Verarbeitbarkeit mit geringer Toleranz erreicht wird. Die „richtige“ Mörtelkonsistenz für die Verarbeitung entscheidet oft in höherem Maße über den Erfolg z.B. einer Verputzung oder Verfügung als die vor allem durch den Wasserbindemittelwert geprägten Festmörteleigenschaften, wie z.B. die Festigkeit oder die Porosität. Diesbezügliche Eigenschaftsschwankungen werden deshalb zugunsten gleichmäßiger und guter Verarbeitbarkeit hingenommen.

Die experimentellen Untersuchungen zum Einfluß von Brechsand auf die Frischmörteleigenschaften werden unter diesem Blickwinkel durchgeführt.

7.1.2 Erforderliche Anmachwassermenge

Das Ausbreitmaß wurde konstant auf ca. 17cm gehalten. Das ist der plastische Bereich K_M2 nach DIN 18555, Teil 2, der für Mauermörtel handwerklich üblich ist. Die Mörtelzusammensetzung wurde in Anlehnung an sog. „Normmörtel“ nach DIN 1053 bzw. DIN 1164 gewählt. Dort ist ein Mischungsverhältnis von Z : G : OW = 1 : 3 : 0,5 in Gewichtsanteilen vorgesehen. Bezogen auf eine Prismencharge wurde für die Vergleichsmischung mit CEM I bei 450g Zement und 1350g Normsand 0/2 220ml Wasser benötigt; also etwa jener Wasserbindemittelwert, der für „Normmörtel“ vorgesehen ist. Bei Austausch des Zementes gegen thermisch behandelten Betonbrechsand gleicher Menge werden etwa 380ml Wasser benötigt. Der Wasserbedarf bei Verwendung von Betonbrechsand statt Zement als Bindemittel steigt also um ca. 70%, wenn die gleiche Konsistenz erreicht werden soll.

Der höhere Wasserbedarf der Betonbrechsande läßt sich mit der größeren Oberfläche durch die splittige Kornform und vor allem mit der größeren Porosität gegenüber dem Zementklinker erklären.

Der beträchtliche Anstieg des Wasserbedarfs bei Austausch des Zementes gegen Betonbrechsand, der, wenn man auch einen Teil des Normsand es durch Brechsand substituiert, noch weiter ansteigt, läßt zur Begrenzung der Verschlechterung der Gebrauchseigenschaften des Festmörtels die Verwendung von Fließmitteln geraten erscheinen.

7.1.3 Ansteifverhalten von Mörtel mit Brechsandzuschlag

Das angestrebte Ausbreitmaß von 17 cm bei Mischende wurde mit einer Schwankung von $\pm 1,0$ cm eingehalten. In Abb. 7.1 sind die Ergebnisse zur zeitlichen Entwicklung des Ausbreitmaßes durch Ansteifen von Mörteln mit unterschiedlichen Zuschlägen bis zwei Stunden nach Herstellung aufgetragen. Als Zuschläge wurden Normsand, unbehandelter Betonbrechsand und thermisch behandelter Betonbrechsand eingesetzt. Das Bindemittel war in allen Mörteln Betonbrechsand und das Mischungsverhältnis war $Z : G : OW = 1 : 3 : 0,5$ in Gewichtsanteilen. Der substituierte Zuschlagsanteil betrug bei BBS-Zugabe $> 250 \mu\text{m}$ 100%.

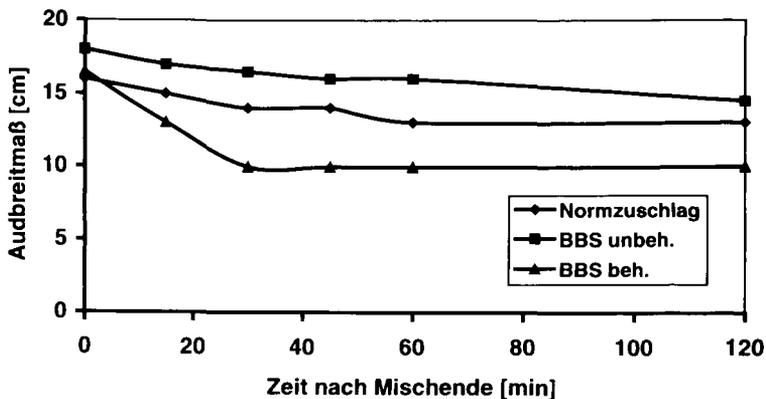


Abb. 7.1: Entwicklung des Ausbreitmaßes über die Zeit

Bei der Verwendung von Normsand und unbehandeltem Betonbrechsand als Zuschlag verläuft das Ansteifen ähnlich wie bei Mörtel mit ausschließlich Normsandzuschlag. Verwendet man jedoch thermisch behandelten Brechsand > 250 µm als Zuschlag, ist ein rascheres Ansteifen in der ersten halben Stunde zu beobachten, was durch die Erhöhung des reaktiven Bindemittelanteils im thermisch behandelten Brechsand zu erklären ist.

7.1.4 Luftporengehalt

Trägt man den Luftporengehalt im Frischmörtel über der Frischmörtelrohddichte auf, so erkennt man eine Spannweite von 2% bis 7% (siehe Abb. 7.2). Die unterschiedlichen Frischmörtelrohddichten entstanden durch Variation des Gehaltes an Betonbrechsand in der Mischung. Mit steigender Frischmörtelrohddichte kann eine Tendenz des Anstiegs des Luftporengehaltes festgestellt werden (siehe Abb. 7.2).

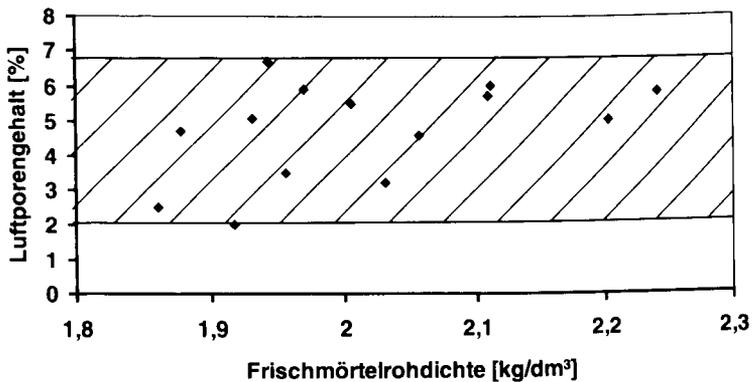


Abb. 7.2: Luftporengehalt im Frischmörtel in Abhängigkeit von der Frischmörtelrohddichte

7.1.5 Frischmörtelrohddichte

Generell gilt: Je höher der Betonbrechsanteil, desto geringer die Frischmörtelrohddichte. Bei der Normmischung nach DIN 1164 mit Zement CEM I liegt die Frischmörtelrohddichte bei $2,24 \text{ kg/dm}^3$. Sie sinkt bei Austausch des Primärbindemittels durch thermisch behandelten Betonbrechsand bei 750°C auf bis zu $2,03 \text{ kg/dm}^3$ (siehe Abb. 7.3). Vergleicht man die Kurve der Frischmörtelrohddichte mit den Kurven für die Druckfestigkeit und der Thermoanalyse, so lassen sich Parallelen erkennen. So ist im Temperaturbereich oberhalb von 850°C ein Anstieg der Rohddichte zu erkennen. Dieser steht im direkten Zusammenhang mit den Phasenveränderungen infolge der Entsauerung während der Temperaturbehandlung.

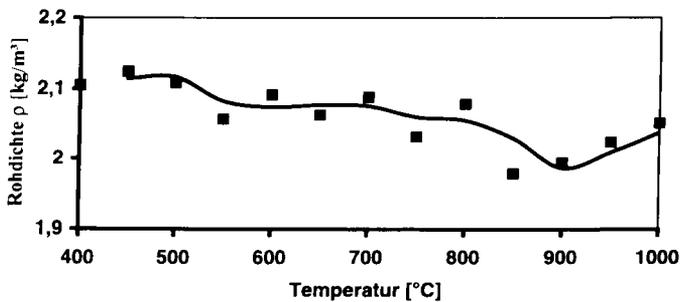


Abb. 7.3: Frischmörtelrohddichte von BBS nach unterschiedlicher Temperaturbehandlung und Wasserzugabe.

Tendenziell kann man außerdem sagen, daß die Frischmörtelrohddichte bis zu einer Behandlungstemperatur von 850°C sich leicht fallend und oberhalb von 850°C wieder steigend verhält.

7.2 Einfluß der Parameter der Temperaturbehandlung von Betonbrechsand auf die Mörteldruckfestigkeit

7.2.1 Allgemeines

Nachfolgend wird auf die Einflüsse unterschiedlicher Temperaturbeanspruchung von Betonbrechsand (BBS) auf die Druckfestigkeit daraus hergestellter Mörtel eingegangen. Alle im weiteren dargestellten Ergebnisse werden auf eine sog. Standardrezeptur bezogen. Für diese wurde bei 700°C temperierter Betonbrechsand verwendet. Das der Bindemittelanteil des untemperierten Brechsandes etwa 50% beträgt, wurde das Mischungsverhältnis Brechsand zu Normsand 1 : 1 gewählt, so daß ein etwaiges Verhältnis Bindemittel zu Zuschlag 1 : 3 entsprechend DIN 1053 entstand. Dieser Mörtel erreichte eine Druckfestigkeit von im Mittel 10 N/mm² nach 28 Tagen Wasserlagerung; dieser Festigkeitswert dient als Bezugswert (Tab. 7.1).

Tab. 7.1: Standardrezeptur

Behandlung des Betonbrechsandes		
Parameter	Gerät	Größe
Ofen	Laborofen Nabertherm	-
Behandlungstemperatur		700 °C
Haltezeit		0,5 h
Größtkorn des BBS		250µm
Mörtelzusammensetzung		
Bestandteil	Eingesetzter Baustoff	Anteil
Bindemittel	Betonbrechsand (BM=50%)	900 [g]
Zuschlag	Normsand nach DIN 1164	900 [g]
Wasser	Leitungswasser	400 [g]
Erzielte mechanische Mörtel Eigenschaften in Alter von 28 Tagen (Unterwasserlagerung)		
Eigenschaft	Symbol	Festigkeit
Druckfestigkeit	$\beta_{D,Standard}$	10 [N/mm ²]
Biegezugfestigkeit	$\beta_{BZ,Standard}$	3 [N/mm ²]

7.2.2 Einfluß der Temperaturhöhe

Bei der Bindemittelherstellung finden Temperaturbeanspruchungen der Rohstoffe in unterschiedlichen Temperaturbereichen statt, z.B. 900°C (Kalkherstellung), 1200°C (Belite-Zement) bis hin zu 1450°C (Zemente nach DIN 1164). Die in Kap. 6 vorgestellten Untersuchungen zur Phasentstehung bei Temperaturbehandlung haben gezeigt, daß auch unterhalb von 900°C bereits reaktive Phasen entstehen, die nutzbar sind. Dies zeigt auch die erweiterte Druckfestigkeit der Mörtel (Abb. 7.4).

Ein erstes „Maximum“ ist im Temperaturbereich von 500°C zu erkennen. Durch die dort erfolgende Portlandzersetzung ist in geringem Umfang reaktives Calciumoxid entstanden. Hingegen entstehen bei 700°C hydraulische Phasen, u.a. C₂S, die offenbar besonders gut nutzbar sind.

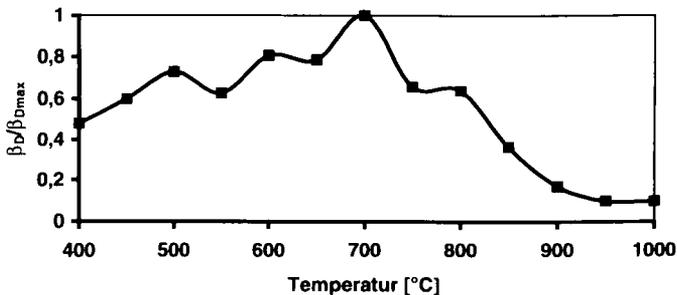


Abb. 7.4: Mörteldruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur des Betonbrechsandes, bezogen auf die Druckfestigkeit bei 700°C [$\beta_{\text{D,Standard}}=10 \text{ N/mm}^2$].

Denn die Entwässerung der Silikat- und Aluminatphasen ist dort soweit abgeschlossen, daß wieder hydraulisch reaktive Phasen entstehen. Eine Druckfestigkeit von 10N/mm² ist dort erreichbar, obwohl der Wasserbindemittelwert, bezogen auf den etwaigen Bindemittelanteil im Brechsand sehr hoch ist. (s. Tab. 7.1). Weitere Druckfestigkeitssteigerung kann z.B. durch Fließmittelzugabe zur Reduzierung des Wasseranspruches leicht erreicht werden. Oberhalb von 800°C findet die Entsäuerung statt, mit der ein

Festigkeitsabfall einhergeht. Ca. 700°C ist demnach, wie auch anhand der Phasenuntersuchungen bereits vermutet wurde (s. Kap. 6), ein günstiger Temperaturbereich.

7.2.3 Einfluß der Haltezeit

Es wird bei 700°C eine Haltezeit von 30 Minuten für die nahezu vollständige Entwässerung der reaktiven Phasen benötigt. Bei einer Temperaturbehandlung mit 700°C und einer Haltezeit von 30 Minuten entsteht aus den Hydratphasen die benötigte Menge reaktiver Belite- und Calciumaluminatverbindungen. Dieses zeigen die Phasenuntersuchungen am Brechsand (s. Kap. 6.2)) und dieses wird auch durch das Druckfestigkeitsergebnis bestätigt (Abb. 7.5). Bei einer Haltezeit über 30 Minuten hinaus findet bereits wieder eine Teilzersetzung dieser Phasen in die Oxide statt, ähnlich wie bei einer weiteren Temperaturerhöhung auf ca. 800°C.

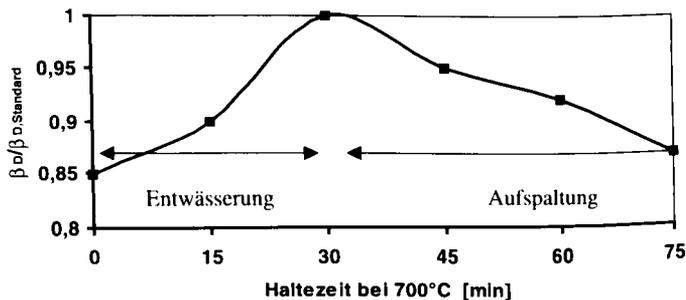


Abb. 7.5: Bezogene Mörteldruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperaturhaltezeit des Brechsandes bei 700 °C.

7.2.4 Einfluß der Lagerungsdauer von Betonbrechsand nach der Temperaturbehandlung

Eine Lagerung des Betonbrechsandes nach der Temperaturbehandlung von über drei Monaten vor der Weiterverarbeitung zu Mörteln bewirkt eine Reduzierung der Festig-

keit von 20 bis 25 % bezogen auf eine sofortige Verarbeitung. Damit liegt der Festigkeitsverlust in der gleichen Größenordnung wie der Festigkeitsverlust bei überlagerten Zementen nach DIN 1164.

7.2.5 Einfluß des Größtkorns des Betonbrechsandes

Klinker für Zement nach DIN 1164 wird üblicherweise auf Korngrößen unter 100µm, überwiegend sogar unter 63 µm aufgemahlen. Betrachtet man die erzielten Druckfestigkeiten der hergestellten Mörtel mit behandeltem Betonbrechsand, so ist das Optimum an Druckfestigkeit mit einem Betonbrechsandgrößtkorn von 250 µm erreichbar (siehe Abb. 7.6). Feinere Absiebung bringt keinen weiteren Festigkeitsgewinn. Das ist aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ein sehr interessanter Aspekt, hängen doch die verwertbaren Mengen für die thermische Aufbereitung davon ab. Bei Verwendung von behandeltem Betonbrechsand mit einem Größtkorn oberhalb von 250 µm ist ein erheblicher Festigkeitsabfall zu verzeichnen. In diesem Korngrößenbereich erscheint eine thermische Behandlung nicht sinnvoll.

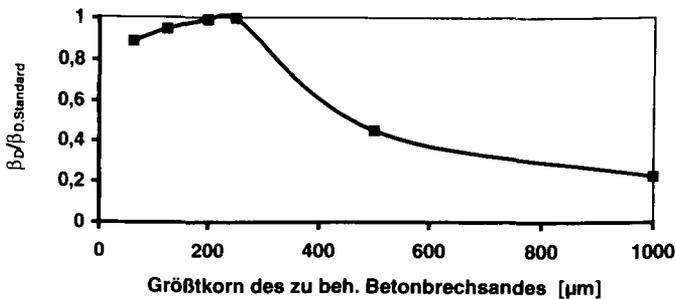


Abb. 7.6: Mörteldruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Größtkorn des Betonbrechsandes

7.2.6 Einfluß einer Vorbehandlung des Brechsandes vor Temperierung durch Aufmahlung

Anstelle einer Absiebung kann prinzipiell auch eine Feinmahlung erwogen werden. Mahlt man Betonbrechsand < 2mm auf < 250µm auf, so sinkt die Mörteldruckfestigkeit im Vergleich zu der für eine Absiebung < 250µm um etwa 25%. Der Grund dafür ist eine Verminderung des Bindemittelanteils im Betonbrechsand. Durch die Mitaufmahlung des hohen Quarzanteils in den gröberen Fraktionen im zu behandelnden Brechsand sinkt der Bindemittelgehalt im Betonbrechsand von 50% auf 30% ab (s. Kap. 6.2).

7.2.7 Einfluß einer Nachbehandlung des Betonbrechsandes nach Temperierung durch Aufmahlung

Eine Aufmahlung des Betonbrechsandes nach der Temperaturbehandlung, ähnlich wie die des Klinkers bei der Zementherstellung, bringt keine nennenswerte Steigerung der Druckfestigkeit damit hergestellter Mörtel. Der hohe Energieaufwand, der für eine Mahlung erforderlich ist, läßt diese nicht sinnvoll erscheinen.

7.2.8 Einfluß wiederholter thermischer Aufbereitung

Bereitet man die mit thermisch behandeltem Betonbrechsand und Normsand hergestellten Mörtelprismen erneut mechanisch und thermisch auf, so ist bei erneut gleicher Betonbrechsandzugabe als Bindemittel in einer erneuten Mörtelmischung aufgrund der Erhöhung des Quarzanteils durch den Normsand im behandelten Brechsand ein Festigkeitsverlust von bis zu 50% zu verzeichnen.

Bereitet man dagegen Mörtelprismen wieder auf, die ausschließlich aus Betonbrechsand hergestellt worden sind, so ist lediglich ein Festigkeitsrückgang von ca. 10% festgestellt worden.

7.2.9 Einfluß der Ofenart

Die thermische Behandlung der Brechsande für die vorstehend berichtete Mörteldruckfestigkeit erfolgte in einem stationären Laborofen. Vergleichend zu dem Laborofen (Nabertherm) wurden auch Versuche in zwei Drehrohröfen durchgeführt. Im Labor-drehrohröfen aufbereiteter Betonbrechsand führte zu Mörtel, der nur 80% der Festigkeit aufwies, verglichen mit jenem aus dem Laborofen. Deshalb wurden zusätzlich Versuche in einem Drehrohröfen im Technikummaßstab durchgeführt (Abb. 7.7). Es konnte die Vermutung bestätigt werden, daß das schlechtere Festigkeitsergebnis aus dem Labor-drehrohröfen durch die langsame Abkühlgeschwindigkeit, bedingt durch die relativ lange Rohrlänge nach der beheizten Strecke, hervorgerufen wurde. Im Drehrohröfen lassen sich prinzipiell aus Brechsanden Bindemittel gleicher Güte herstellen, wie im Laborofen. Temperaturschwankungen von bis zu 50°C, bezogen auf die gewünschte Behandlungstemperatur von 700°C sind hierbei ohne signifikanten Einfluß auf die Mörtelfestigkeit.

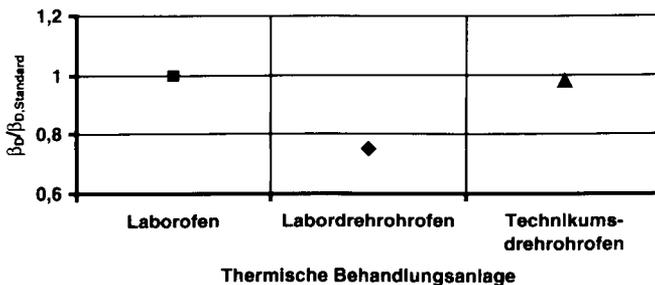


Abb. 7.7: Druckfestigkeit von Mörteln mit Betonbrechsand aus unterschiedlichen thermischen Behandlungsanlagen.

7.3 Einfluß der Brechsandzusammensetzung auf die Mörteldruckfestigkeit

Eine Variation der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials war die Verwendung zweier unterschiedlicher Zuschlagarten im aufzubereitenden Beton. Es wurde neben quarzitischem Zuschlag calcitischer Zuschlag zur Betonherstellung eingesetzt (s. Kap.

5.2.1). Verwendet man Betonbrechsand aus Beton mit ausschließlich calcitischem Zuschlag, so sinkt die Mörteldruckfestigkeit auf ca. 30%, verglichen mit quarzitischem Brechsand, ab. Für Beton mit gemischten quarzitischen/calcitischen Zuschlägen ist die Mörteldruckfestigkeit etwa proportional zum Mischungsverhältnis (Abb. 7.8). Die um 70% geringere Festigkeit von Mörteln aus Betonbrechsand aus Beton mit calcitischem Zuschlag läßt sich wie folgt erklären. Zum einen findet eine Entsäuerung des Zuschlags erst bei einer Behandlungstemperatur von 900°C statt, so daß nach Behandlung bei 700°C noch viel inertes Calciumcarbonat vorliegt. Zweitens ist die Festigkeit des Calciumcarbonates selbst geringer als die des quarzitischen Zuschlags.

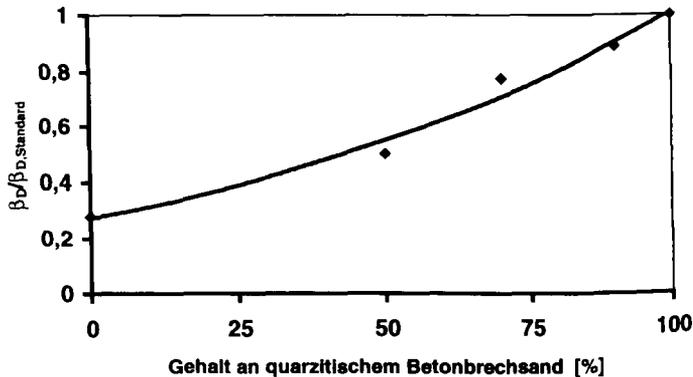


Abb. 7.8: Druckfestigkeit von Mörteln mit Betonbrechsand aus Beton mit calcitischem Zuschlag, substituiert bis 100% mit quarzitischem Zuschlag.

Besteht der Betonbrechsand des Mörtels vollständig aus Kalksandsteinbruch oder Ziegelbrechsand, so sind nur 10% der Bezugsdruckfestigkeit zu erzielen (Abb. 7.9). Die Gründe hierfür sind, daß beim Kalksandsteinbruch der Bindemittelgehalt mit 10% sehr gering ist und beim Ziegelbrechsand die reaktiven Phasen erst oberhalb einer Behandlungstemperatur von 1000°C entstehen (s. Abb. 6.6).

Handelt es sich um gemischten Bauschutt aus quarzitischem Betonbrechsand mit Teilmengen an Mauerwerkbrechsand (Kalksandstein und Ziegel) so ist die Mörteldruckfestigkeit etwa proportional zum Mischungsverhältnis (Abb. 7.9). Das bedeutet, daß sich mit einem „50/50“ Brechsandgemisch Mörtel der Mörtelgruppe IIa mit einer Festigkeit nach 28 Tagen von über 5 N/mm² herstellen lassen. Festzuhalten ist hierbei, daß bei einem Bindemittelgehalt von 50% im Betonbrechsand und bei Vernachlässigung des geringen reaktiven Phasengehaltes im Kalksandstein und Ziegel die Festigkeit der Mörtel durch 25% Bindemittelanteil im Brechsandgemisch erzeugt wird.

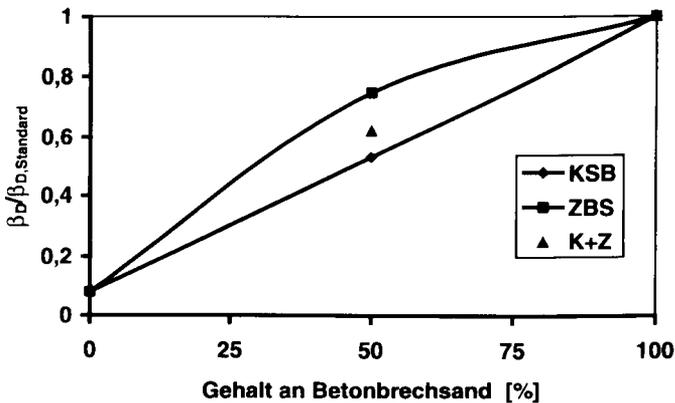


Abb. 7.9: Druckfestigkeit von Mörteln aus Betonbrechsand mit Beimengungen an Kalksandsteinbrechsand (KSB) und Ziegelbrechsand (ZBS) und der Kombination (K+Z) daraus.

Verunreinigungen des Ausgangsbetons in Form von Salz oder Alkalien verursachen generell einen Festigkeitsverlust (Abb. 7.10).

Bei 2% Alkalien, bezogen auf das Zementgewicht des Ausgangsbetons, geht die 28 Tage – Festigkeit der aus dem Betonbrechsand hergestellten Mörtelprismen auf Werte unter 60% zurück (siehe Abb. 7.10). Dies entspricht einem doppelt so hohen Rückgang

wie er bei der Zementherstellung durch hohe Alkaligehalte entsteht. Nach Osbaeck, zitiert in [STARK 1998], ist ein Festigkeitsrückgang von 20% zu verzeichnen.

Bei der Zugabe von 1% Cl^- bezogen auf das Zementgewicht sinkt die Mörtelfestigkeit auf ca. 80% ab. Cl^- bindet Calciumaluminat zu Friedelschem Salz, so daß das C_3A nicht mehr zur Festigkeitsbildung beitragen kann. Außerdem wird das Cl^- auch adsorptiv im Zementgel gebunden und behindert damit die Kristallisation (siehe auch [STARK 2000]).

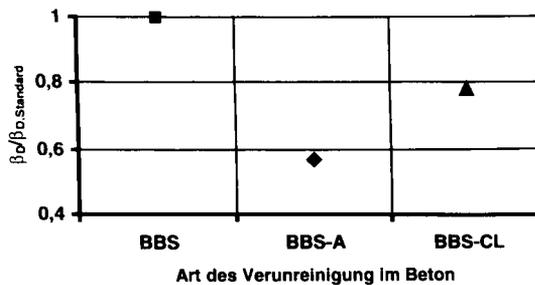


Abb. 7.10: Druckfestigkeit von Mörteln aus Betonbrechsand ohne (BBS) und mit Verunreinigungen aus Alkalien (BBS-A) und Chloriden (BBS-CL).

Abschließend sei der Vergleich der Mörteldruckfestigkeit für Betonbrechsand definierter Herstellung (BBS) mit Betonbrechsand von der Halde (ABB) aufgestellt. Hierbei ist festzustellen, daß kein Abfall der Druckfestigkeit bei Verwendung von Abbruchbetonbrechsand anstelle definiert hergestellten Betonbrechsandes entsteht. Betonbrechsand unbekannter Herkunft scheint sich demzufolge im gleichen Maße, wie der für dieses Untersuchungsprogramm definiert hergestellte Betonbrechsand zu eignen. Die gewonnenen Ergebnisse sind auf realen Bauschutt übertragbar.

7.4 Einfluß der Mörtelzusammensetzung und -lagerung auf die Mörtel-druckfestigkeit

7.4.1 Allgemeines

In den Kapiteln 7.2 und 7.3 wurde über die Druckfestigkeit von Mörteln berichtet, deren Bindemittel ausschließlich der reaktive Bestandteil des Brechsandes ist. Sollen thermisch behandelte Brechsande künftig in Mauer- oder Putzmörtel eingesetzt werden, so wird zur sicheren Erreichung geforderter Eigenschaften in der Regel ein Teilmengenverschnitt primärem Bindemittel (Zement und/oder Kalk) vorgenommen werden.

Die zentrale Steuergröße in der Beton- und Mörteltechnologie sowohl für die Verarbeitbarkeit als auch für die Eigenschaften des erhärteten Stoffes ist der Wasserbindemittelwert. Dieser ist für Mörtel aus Brechsand nicht genau bekannt, da der „reaktive Anteil“ des Brechsandes allenfalls geschätzt werden kann. In den bisher bezeichneten Versuchen wurde der Wassergehalt der Brechsandmörtel nach der Verarbeitbarkeit als Vorgabegröße gewählt. Der Wasserbedarf und der sich einstellende Wasserbindemittelwert sowie die Festmörteleigenschaften können durch Zusatzmittel beeinflußt werden.

Diese Aspekte werden nachfolgend beleuchtet.

7.4.2 Variation der Bindemittelzusammensetzung

Bei ausschließlicher Verwendung von Zement als Bindemittel entsteht Mörtel mit hoher Festigkeit bis 50 N/mm² (siehe Abb. 7.11). Für Mauer- und Putzmörtel wird i.a. eine geringere Festigkeit benötigt; die Eigenschaftsanpassung erfolgt über Wahl der Bindemittel und -menge, Zusatzstoffe und Zusatzmittel.

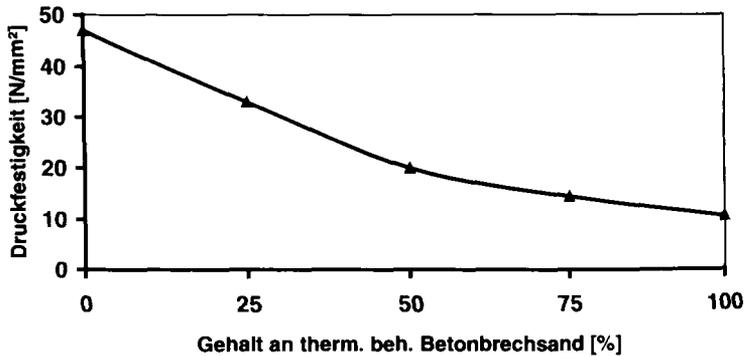


Abb. 7.11: Druckfestigkeit von Mörtel im Alter von 28 Tagen bezogen auf den Gehalt an Betonbrechsand anstelle des primären Bindemittels CEM I.

Bei Verwendung von thermisch behandeltem Betonbrechsand als Bindemittel ggf. mit einer Teilsubstitution durch Zement sind alle für übliche Mörtel notwendigen Druckfestigkeiten ohne Zusätze erreichbar.

7.4.3 Variation des Wasser/Bindemittel Wertes und der Einfluß von Zusatzmitteln

Als Wasser/Bindemittel-Wert wird der Quotient aus der tatsächlich zugegebenen Wassermenge bezogen auf 50% der Menge des zugegebenen thermisch behandelten Betonbrechsandes < 250 µm herangezogen. Es liegt also das Analyseergebnis zugrunde (s. Kap. 5.4.1), daß 50% des Brechsandes „reaktive“ Bindemittel sind.

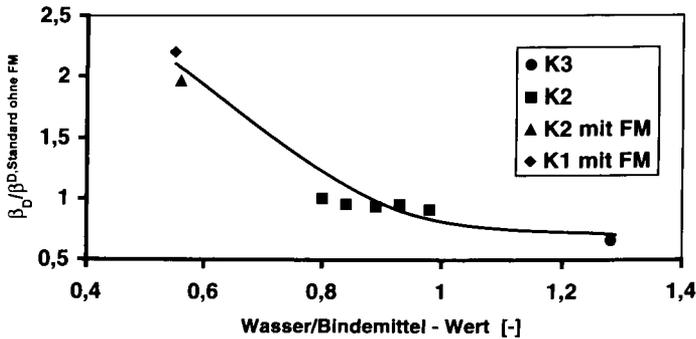


Abb. 7.12: Bezogene Festigkeiten bei Variation des Wasser/Bindemittel-Wertes

Mit einem Wasser/Bindemittel-Wert von 0,8 bis 1,0 läßt sich eine als Mauermörtel verarbeitbare Mischung (Konsistenzmaß 2; Ausbreitmaß 17cm) herstellen (siehe Abb. 7.12). Dieser Mörtel ist der Mörtelgruppe IIa nach DIN 1053 zuzuordnen ($\beta_{\text{Standard ohne FM}} = 10 \text{ N/mm}^2$). Eine weitere Reduzierung des Wasser/Bindemittel-Wertes bei gleicher Verarbeitbarkeit ist durch Zugabe von Zusatzmitteln (FM Betocrete, 40ml/kg BM, s. Tab. 5.5) möglich. Dadurch kann z.B. der Wasser/Bindemittel-Wert auf Werte unter 0,6 gesenkt und die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen verdoppelt werden. So wird auch die Mörtelgruppe III erreichbar.

7.4.4 Einfluß des Zuschlags

Von den drei untersuchten Rezepturen mit den Zuschlägen unbehandelter Betonbrechsand (BBS-U), thermisch behandelter Betonbrechsand (BBS-B) und Normsand (N) wird bei der Verwendung des quarzitisches Primärzuschlags die höchste Festigkeit erzielt (siehe Abb. 7.13).

Verarbeitet man den zuvor abgesiebten Betonbrechsand $> 250 \mu\text{m}$ als Zuschlag, so sinkt die Festigkeit um fast $\frac{1}{4}$ ab. Dies ist mit der geringeren Eigenfestigkeit des Zuschlags

von ca. 40 N/mm² (Festigkeitsklasse B 35) bezogen auf den Primärzuschlag mit einer Festigkeit > 100 N/mm² zu erklären.

Eine Erhöhung der Mörtelfestigkeit ist mit Betonbrechsand als Zuschlag zu erzielen, wenn der Zuschlag zuvor die gleiche thermische Behandlung erfahren hat, wie der als Bindemittel genutzte Teil < 250µm. Dadurch ist eine Eigenverfestigung des porösen Sekundärzuschlags durch ein in sich hineinverwachsen infolge der Reaktivierung der hydraulischen Phasen im Zuschlag zu erreichen.

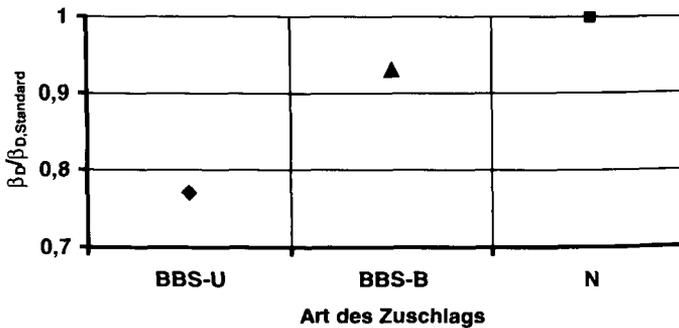


Abb. 7.13: Druckfestigkeit in Abhängigkeit des verwendeten Zuschlags in der Mörtelmischung bezogen auf die Druckfestigkeit Mörtel mit Normzuschlag

7.4.5 Einfluß der Lagerungsart und -dauer

Betonbrechsandmörtel benötigt eine längere und gründlichere Nachbehandlung als üblicher Mauermörtel mit Zement. Vorzeitiges Austrocknen hemmt den Hydratationsfortschritt und hat eine deutliche Abnahme der Festigkeit infolge der Austrocknung zur Folge (siehe Abb. 7.14). Demzufolge sind Betonbrechsandmörtel gründlich und lange, nötigenfalls bis zu vier Wochen nachzubehandeln. Ansonsten kann es, wie bei einer Lagerung im Normklima 20/65 zu sehen ist, zu einem Festigkeitsabfall kommen Abb. 7.14. Dieser Festigkeitsabfall läßt sich über das Schwindverhalten erklären. Infolge

erhöhter Eigenspannungen kommt es zu Mikrorißbildung und somit zu dem Festigkeitsrückgang.

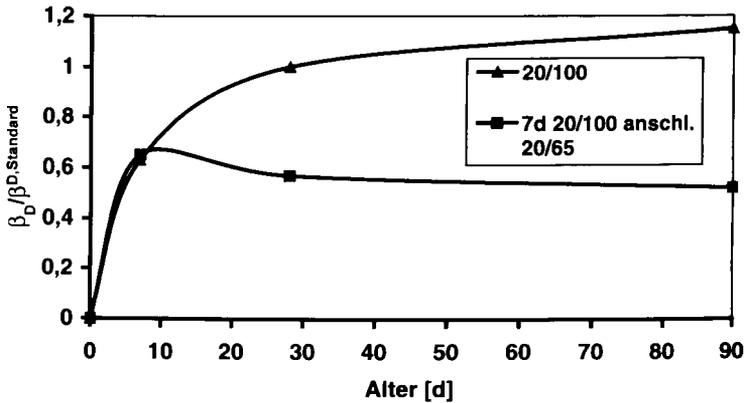


Abb. 7.14: Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Lagerungsart und -dauer der Mörtel bezogen auf die Druckfestigkeit Mörtel im Alter von 90 Tagen und Wasserlagerung

7.5 Biegezugfestigkeit

Bei den Ergebnissen zu der Biegezugfestigkeit zeigt sich, daß die Versuche mit Betonbrechsand als Bindemittel 40% der Festigkeit der Prismen mit Primärbindemittel erzielen (siehe Abb. 7.15).

Bezieht man die Biegezugfestigkeit auf die Druckfestigkeit der Mörtel, so ist festzustellen, das das Verhältnis bei den Mörteln mit Betonbrechsand als Bindemittel wesentlich günstiger ausfällt. Beim Normmörtel steht einer Biegezugfestigkeit von 7 N/mm² eine Druckfestigkeit von 50 N/mm² gegenüber, also ungefähr ein Verhältnis von 1:7. Bei Mörteln mit Betonbrechsand als Bindemittel steht der Biegezugfestigkeit von 3 N/mm² eine Druckfestigkeit von 10 N/mm² gegenüber, also ein Verhältnis von 1:3. Dieses günstige Verhältnis von Biegezug- zu Druckfestigkeit zeigen auch die Struktur-

bilder in Kap. 6. Durch die gebrochene Oberfläche der Brechsande erhalten diese eine größere Rauigkeit als der aufgemahlene Normzement.

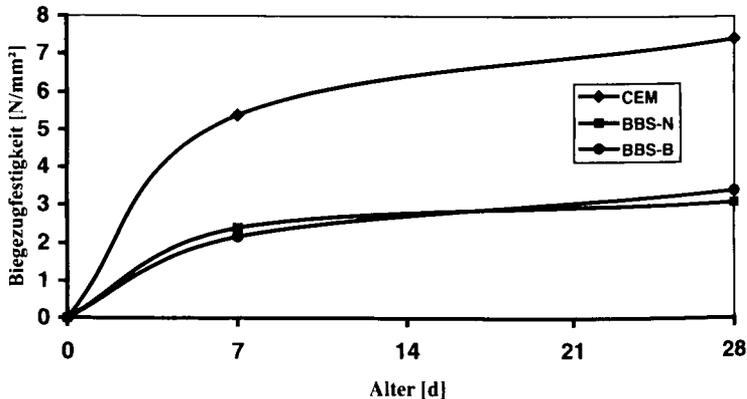


Abb. 7.15: Entwicklung der Biegezugfestigkeit bei Variation der Bindemittel und des Zuschlags

7.6 Verformungsverhalten

7.6.1 Raumbeständigkeit

Der im allgemeinen als zulässig erachtete Grenzwert für die maximale Aufspaltung der Nadeln bei der Raumbeständigkeitsprüfung nach Le Chatellier liegt bei 2 mm. Dieser Wert wurde für Mörtel mit Brechsand bei keiner Messung überschritten. Damit läßt sich generell feststellen, daß bei Einhaltung der hier angelegten Bedingungen bei der Temperaturbehandlung (Behandlungstemperatur 700°C, Haltezeit 0,5 Stunden) mit Kalktreiben nicht gerechnet werden muß. Die mineralogischen Ergebnisse (s. Kap. 6) ließen diese Ergebnisse erwarten.

7.6.2 Dynamischer und statischer Elastizitätsmodul

Nachfolgend sind die Ergebnisse zum dyn. E-Modul in Abhängigkeit von der Bindemittelzusammensetzung aufgeführt. Übereinstimmend ist, daß bei den Proben mit Natursand als Zuschlag, ab einem Probenalter von 28 Tagen der dyn. E-Modul konstant bleibt.

Der dyn. E-Modul ist um so geringer je mehr Zement durch thermisch behandelten Brechsand im Bindemittel substituiert wird (siehe Abb. 7.16). Die große Differenz in den dynamischen E-Moduli zwischen der Normmischung BBS 0 N (Bindemittel CEM I) und der Mischung BBS 100 N (Bindemittel BBS) läßt sich in den ersten Erhärtungstagen mit dem unterschiedlichen Erhärtungszustand der Proben erklären. Der C₃S reiche Normzement hat eine wesentliche schnellere Hydratationsgeschwindigkeit als der C₃S arme und C₂S reiche Betonbrechsand (s. a. Kap. 6). Ab einem Probenalter von 28 Tagen ist nicht mehr der unterschiedliche Erhärtungszustand für die differierenden E-Moduli verantwortlich. Vielmehr läßt sich der E-Modul am w/b-Wert festmachen. Der E-Modul verhält sich proportional zum w/b-Wert, der mit steigenden Betonbrechsandanteil stetig ansteigt.

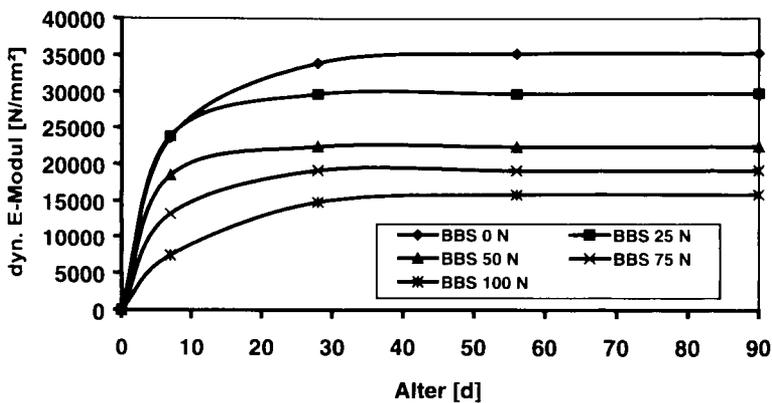


Abb. 7.16: Entwicklung des dyn. E-Moduls bei Variation der Bindemittelzusammensetzung

Der dyn. E-Modul bei den Mischungen mit Normzuschlag liegt 75% über den dyn. E-Moduli der Mischungen mit unbehandeltem und behandeltem Betonbrechsand als Zuschlag (siehe Abb. 7.17). Dies ist zweifelsfrei dem höheren E-Modul des primären Zuschlags zuzuordnen. Der E-Modul bei den Mischungen zwischen unbehandeltem und behandeltem Betonbrechsand als Zuschlag unterscheidet sich nur in der Anfangsphase marginal, was auf den Beitrag der latent hydraulischen Erhärtung des thermisch behandelten Zuschlags zurückzuführen ist.

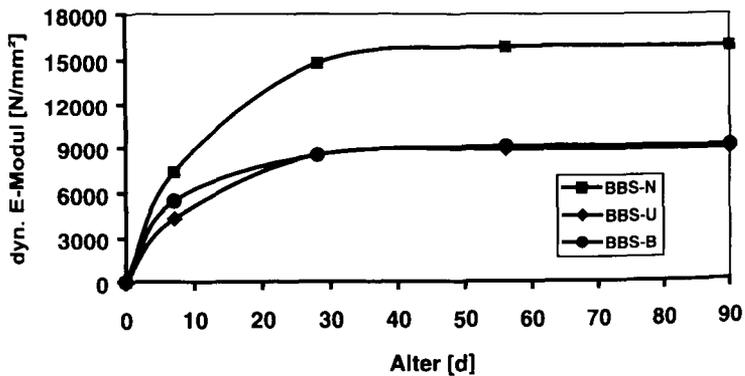


Abb. 7.17: Entwicklung des dyn. E-Moduls bei Variation des Zuschlags

Die Beziehung zwischen statischem und dynamischem E-Modul von Mörteln mit Betonbrechsand als Bindemittel und Normsand als Zuschlag läßt sich mit Gleichung 7.1 beschreiben [BUDELMANN 1998].

$$E_{\text{dyn}} = 1,1 E_{\text{stat}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (7.1)$$

In den Regelwerken wird der E-Modul generell auf die Festigkeit des Betons bezogen. Die Zusammensetzung findet zum Teil durch Korrekturfaktoren in der Beziehung Berücksichtigung (s. Tab. 7. 2).

Im Model Code MC 90 [CEB 93] wird der Einfluß des Zuschlags durch einen Faktor α_f berücksichtigt, siehe Gleichung [7.2] und Tab. 7. 2:

Tab. 7. 2: Zuschläge und ihr Einfluß auf den E-Modul nach MC 90

Zuschlagart	α_f
Basalt, dichter Kalkstein Zuschlag	1,2
Quarzitischer Zuschlag	1.0
Kalksteinzuschlag	0.9
Sandsteinzuschlag	0,7

$$E_c = \alpha_f \cdot E_{co} (f_{cm}/f_{cmo})^{1/3} \quad (7.2)$$

mit E_{co} = Grundwert des E-Modul = 21.500 N/mm²
 f_{cm} = mittlere Druckfestigkeit $f_{ck} + 8$ in N/mm²
 f_{cmo} = 10 N/mm²
 α_f = Zuschlag-Beiwert nach Tab. 7. 2

Tab. 7. 3: Zusammenstellung der ermittelten und errechneten E-Moduli von Mörteln mit variierendem BBS-Anteil im Probenalter von 28d

Bezeichnung	dyn. E-Modul aus Versuch	Stat. E-Modul ermittelt aus Spalte 2	β_D aus Versuch	E-Modul nach „MC 90“	E-Modul nach EC 2 für Normalbeton	E-Modul nach EC 2 für Leichtbeton ($\rho = 2,1 \text{ kg/dm}^3$)
1	2	3	4	5	6	7
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
BBS 0 N	34.000	37.700	47,0	37.700	36.100	34.300
BBS 25 N	29.700	32.600	33,0	34.400	32.800	31.200
BBS 50 N	22.400	24.600	20,0	30.300	28.800	27.400
BBS 75 N	19.200	21.100	14,5	28.200	26.800	25.500
BBS 100 N	14.800	16.300	10,6	26.400	25.200	23.900

Der statische E-Modul von Mörteln sinkt bei ausschließlicher Verwendung von Betonbrechsand als Bindemittel bezogen auf Mörtel mit Normzement auf Werte um 2/3 des nach EC 2 bzw. MC 90 errechneten E-Moduls ab (s. Tab. 7. 3).

Die E-Moduli zwischen den Grenzwerten „nur Zement“ und „nur Betonbrechsand“ lassen sich linear interpolieren (s. Abb. 7.18). Dadurch wird quasi eine Anpassung des Grundwertes des E-Moduls E_{co} von Beton mit Zement als Bindemittel auf Mörtel bezogen auf den Betonbrechsandanteil im Bindemittel vorgenommen.

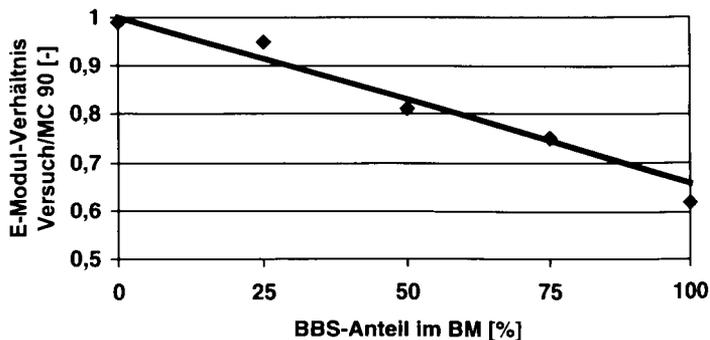


Abb. 7.18: Abminderungsfaktor α_B zur Ermittlung des E-Moduls von BBS-Mörteln in Abhängigkeit von BBS-Anteil im Bindemittel

Um den geringeren E-Modul von Mörteln mit Betonbrechsand als Bindemittel zu berücksichtigen ist ein Bindemittel-Korrekturwert α_B einzuführen. Er folgt der linearen Beziehung nach Gleichung 7.3. Ergänzt man Gleichung 7.2 um diesen Korrekturwert α_B , läßt sich der E-Modul in Abhängigkeit vom Betonbrechsandanteil im Bindemittel angeben (s. Gl. 7.4 und Tab. 7.4).

$$\alpha_B = 1 - (0,0034 \text{ BBS}) \quad (7.3)$$

mit BBS = Betonbrechsandgehalt im Bindemittel [%]

$$E_{c,BBS} = \alpha_B \alpha_f E_{co} (f_{cm}/f_{cmo})^{1/3} \quad (7.4)$$

mit α_f = Bindemittel-Beiwert nach Tab. 7.4

Tab. 7.4: Betonbrechsand und der Einfluß auf den E-Modul

BBS-Gehalt im BM [%]	α_B
0	1,00
25	0,92
50	0,83
75	0,75
100	0,66

7.6.3 Quell- und Schwindverformung

In Abb. 7.19 sind die Quell- und Schwindverformungen von Mörteln mit Betonbrechsand bei ausschließlicher Verwendung von thermisch behandeltem Brechsand als Bindemittel dargestellt. Scherparameter ist die Zuschlagart: -N Normsand (BBS-N = Standardrezeptur nach Tab. 7.1); -U thermisch unbehandelter Brechsand; -B thermisch behandelter Brechsand. Die Proben wurden nach Ausschalen im Alter von ein bis drei Tagen im Klima 20/65 bis zum Alter von 90 Tagen gelagert; während dieser Zeit wurden die Schwindverformungen gemessen.

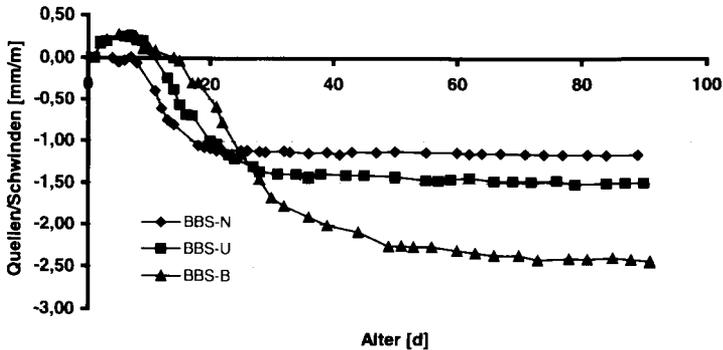


Abb. 7.19: Quell- und Schwindverformungen von Mörteln, mit BBS als Bindemittel, bei Variation der Zuschläge im Klima 20/65

Bei Verwendung von Normsand als Zuschlag im BBS – Mörtel liegen die Schwindverformungen nach 90 Tagen bei 1,2 mm/m, bei thermisch unbehandeltem Brechsand über 1,5 mm/m und bei thermisch behandeltem Brechsand bei 2,5 mm/m. Damit liegt das Endschwindmaß von allen Rezepturen in der Größenordnung von Prismen, hergestellt aus reinem Zementstein. Das Schwindmaß des Mörtels bei Verwendung von Normzuschlag liegt in der selben Größenordnung wie bei unbehandeltem Betonbrechsand.

Bei Verwendung von thermisch behandeltem Betonbrechsand als Zuschlag sind die Schwindverformungen etwa doppelt so groß, was aus dem zusätzlichen reaktionsfähigen Bindemittelanteil des als Zuschlag genutzten thermisch behandelten Betonbrechsandes resultiert.

Die Schwindverformungen von Brechsandmörtel mit Normsand als Zuschlag liegen nach 90d in derselben Größenordnung wie die von Normmörtel nach DIN 1164 mit Zement CEM I und Normsand. Allerdings ist der zeitliche Verlauf sehr unterschiedlich (Abb. 7.20). Bedingt durch den höheren Wassergehalt des Brechsandmörtels erfolgt dessen Trocknung und somit die Einwirkung der Schwindverformung wesentlich rascher.

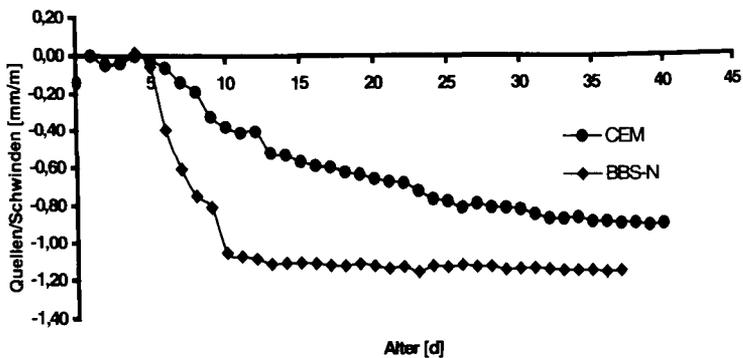


Abb. 7.20: Quell- und Schwindverformungen von Mörteln mit Zement bzw. BBS als Bindemittel im Normklima 20/65

Auch das Quellen der vorgenannten Mörtel mit Normsand bei Wasserlagerung ist nahezu identisch. Das Quellen bis zum Alter von 28 Tagen liegt unter 0,1 mm/m (siehe Abb. 7.21).

Ersetzt man außer dem Bindemittel auch den Zuschlag durch Betonbrechsand so steigt das Quellen bis 0,4 mm/m an (siehe Abb. 7.22).

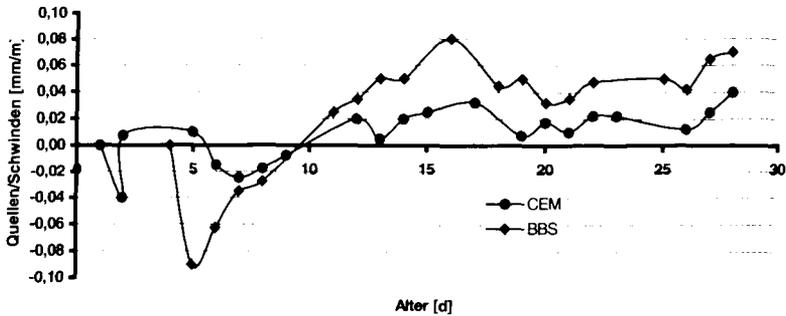


Abb. 7.21: Quell- und Schwindverformungen von Mörteln mit Zement bzw. BBS als Bindemittel im Klima 20/100

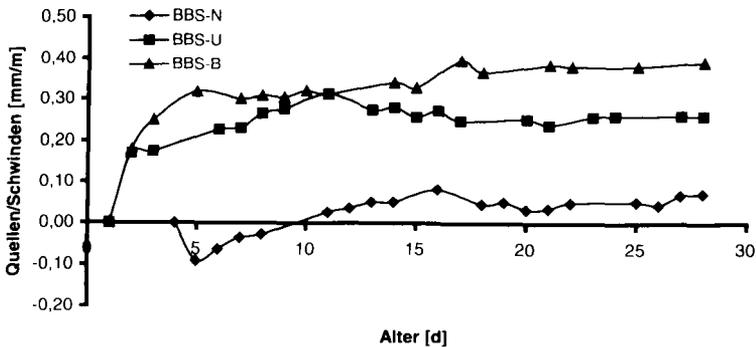


Abb. 7.22: Quell- und Schwindverformungen von Mörteln, mit BBS als Bindemittel, bei Variation der Zuschläge im Klima 20/100

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Schwind- und Quellverformungen von Mörtel, dessen Bindemittel (Zement CEM I) vollständig durch Betonbrechsand ersetzt wurde, in der Größenordnung derjenigen von zementgebundenen Mörteln und somit in baupraktisch üblichen Bereichen liegen.

7.7 Porenaufbau und Wasseraufnahme

7.7.1 Porosität

Das mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie ermittelte Porenvolumen und die Porenradienverteilung von Mörtel mit Betonbrechsand (BBS-N) wurde erfaßt (Abb. 7.23).

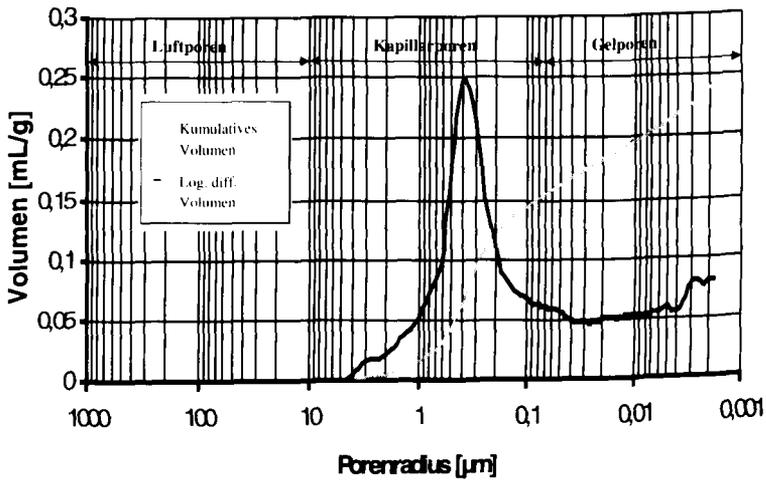


Abb. 7.23: Porensummenkurve und deren Ableitung von Mörtel mit BBS als Bindemittel.

Für Mörtel mit Betonbrechsand als Bindemittel ergibt sich so eine Gesamtporosität von 36,0 Vol.-%. Nach [KONTZE 1995] hat Zementmörtel mit gleichem w/z-Wert eine Gesamtporosität von 22,5 Vol.-%. Der für die Dauerhaftigkeit wichtige Anteil der Kapillarporen steigt von 59% des Porenvolumens beim Zementmörtel auf 63% bei Mörtel mit thermisch behandeltem BBS. Die Porosität des Brechsandmörtels ist also, bedingt durch den höheren Wasserbedarf, wesentlich höher als die von Zementmörtel. Ähnliche Porositäten wie für Zementmörtel können für Mörtel mit BBS mittels Teilschubstituierung des Zementes und/oder Reduzierung des w/b-Wertes durch Fließmittelzugabe erreicht werden.

7.7.2 Wasseraufnahme

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten im Probenalter von 28 Tagen dargestellt. Der Wasseraufnahmekoeffizient wurde an seitlich abgedichteten Mörtelprismen, die nach DIN 1164 hergestellt wurden, ermittelt. Die Wasseraufnahme wurde durch Gewichtsbestimmungen in Zeitabständen gemessen. Die Wasseraufnahme erfolgt etwa linear über der Wurzel der Zeit, so daß der Wasseraufnahmekoeffizient als Steigung bestimmt werden kann (Abb. 7.24).

Nach [ROSTÁSY 1983] liegen die Mittelwerte der Wasseraufnahmekoeffizienten für Putze zwischen 2 bis 7 kg/m²h^{1/2}. Legt man den oberen Wert von 7 kg/m²h^{1/2} als Grenzwert zugrunde (gestrichelte Linie in Abb. 7.24), so ist mit einem Wasseraufnahmekoeffizienten von 8 kg/m²h^{1/2} bei 100% thermisch behandeltem Betonbrechsand als Bindemittel (BBS 100 N) der Grenzwert geringfügig überschritten (Abb. 7.24). Durch Fließmittelzugabe bei gleichzeitiger Zugabewasserreduzierung ist mit 100% Brechsand als Bindemittel dieser Bereich erreichbar. Der Wasseraufnahmekoeffizient betrug in den Versuchen dann 4 kg/m²h^{1/2} (BBS-FM).

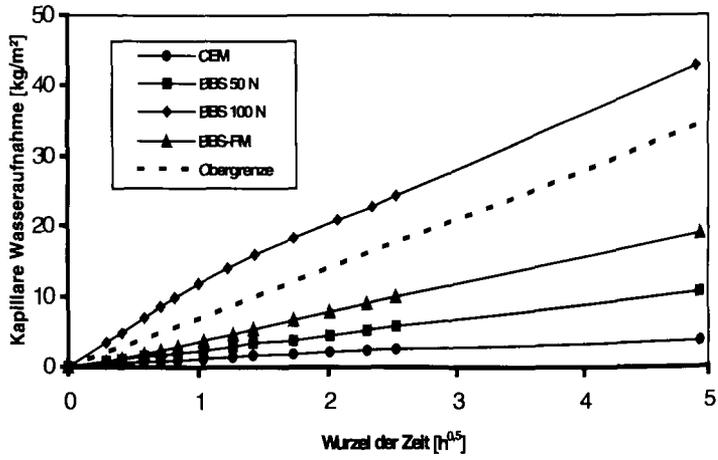


Abb. 7.24: Kapillare Wasseraufnahme im Probenalter von 28 Tagen

8 Weiterverarbeitung von Brechsand zu künstlichen Steinen

Die Herstellung der künstlichen Steine aus Betonbrechsand wurde in Abschnitt 5.4.2 beschrieben. Die so hergestellten Steine können mit Rohdichten zwischen 1,8 und 2,0 kg/dm³ in die Rohdichteklasse 2,0 nach DIN 106 Teil 1 eingeteilt werden. Die Festigkeitsprüfung erfolgte in Anlehnung an die Kalksandsteinprüfung nach DIN 106 Teil 1. Das Bruchbild zeigt Abb. 8.1. Es gleicht dem von Kalksandsteinen aus Primärmaterial.

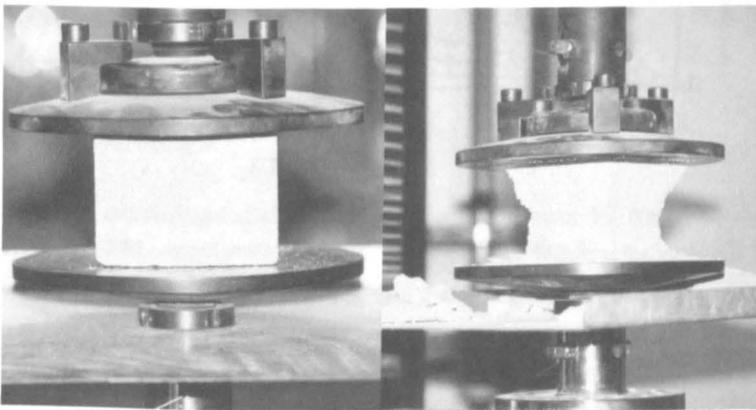


Abb. 8.1: BBS-Stein vor und nach der Druckfestigkeitsprüfung

Die gemessenen Druckfestigkeiten liegen zwischen 13,8 und 15,9 N/mm² (Mittelwert 15,0 N/mm²) (siehe Abb. 8.2). Diese Vollsteine aus Betonbrechsand lassen sich nach DIN 106 in die Druckfestigkeitsklasse 12 einteilen. Es lassen sich so z. B. Mauersteine für Innenwände ohne Verwendung von Primärstoffen herstellen.

Bruchstücke der Steine wurden anschließend mit dem Rasterelektronenmikroskop untersucht.

Abb. 8.3 zeigt ein dichtes Geflecht von CSH-Phasen. Anders als bei der Kalksandsteinherstellung, wo die für die Calciumsilikathydratbildung erforderliche Kieselsäure ausschließlich während des Dampferhärtungsprozesses aus dem Quarzsand durch Lösungs-

prozesse frei wird, steht hier zusätzlich Belit (C_2S) zur Calciumsilikathydratbildung zur Verfügung (siehe Abb. 8.4).

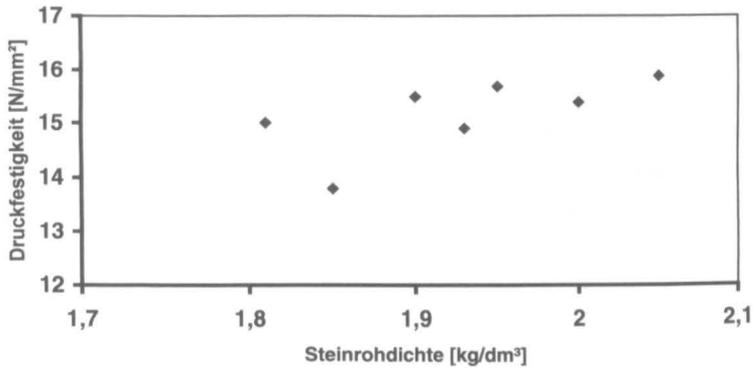


Abb. 8.2: Druckfestigkeit von Betonbrechsandsteinen (BBS-Steinen) in Abhängigkeit von der Rohdichte.

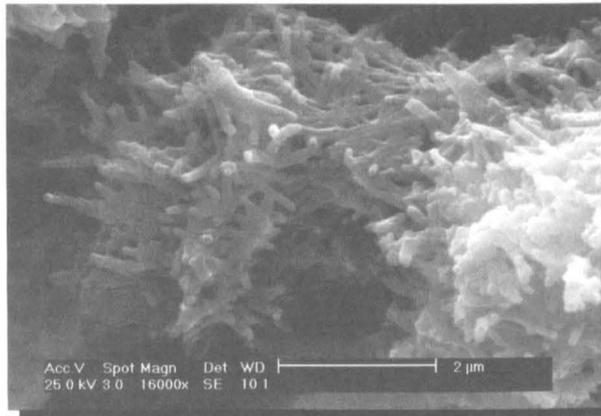


Abb. 8.3: REM Aufnahme von CSH-Phasen in künstlichen Steinen, hergestellt aus thermisch und autoklav behandeltem Betonbrechsand

Es tragen hier somit beide Prozesse zur Festigkeitsbildung bei. So lassen sich durch die Autoklavbehandlung Druckfestigkeiten bei den Steinen um 15 N/mm² ohne Zusatzmittelzugabe erzielen. Zu bemerken ist, daß hier Betonbrechsand mit einem Größtkorn von 2 mm verwendet wurde, d. h. der effektive Bindemittelgehalt beträgt nur 30%, während er im Betonbrechsand mit einem Größtkorn von 250 µm für die Mörtelherstellung bei 50% liegt.

Vergleicht man jetzt die erzielten Festigkeitseigenschaften von den künstlich hergestellten Steinen mit Mörteln, die zu ausschließlich aus Betonbrechsand und Wasser hergestellt wurden (Größtkorn 2 mm), so ist festzustellen, das die Autoklavbehandlung eine Festigkeitssteigerung von 300% bewirkt.

D. h., das der gleiche Festigkeitsanstieg, der bei der Mörtelherstellung durch Absieben und der damit verbundenen geringeren Brechsandausbeute erzielt wird, ist durch eine Autoklavbehandlung von Betonbrechsand mit einem Größtkorn von 2 mm zu erzielen.

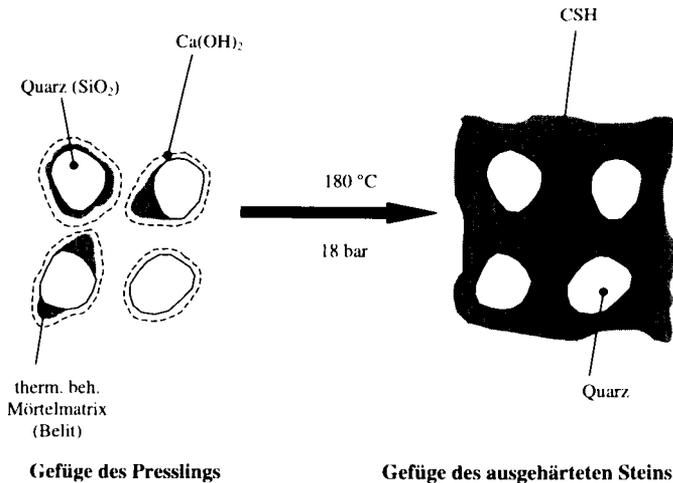


Abb. 8.4: Schematische Darstellung der Steinbildung

9 Empfehlungen zum Praxiseinsatz von Betonbrechsand

9.1 Allgemeines

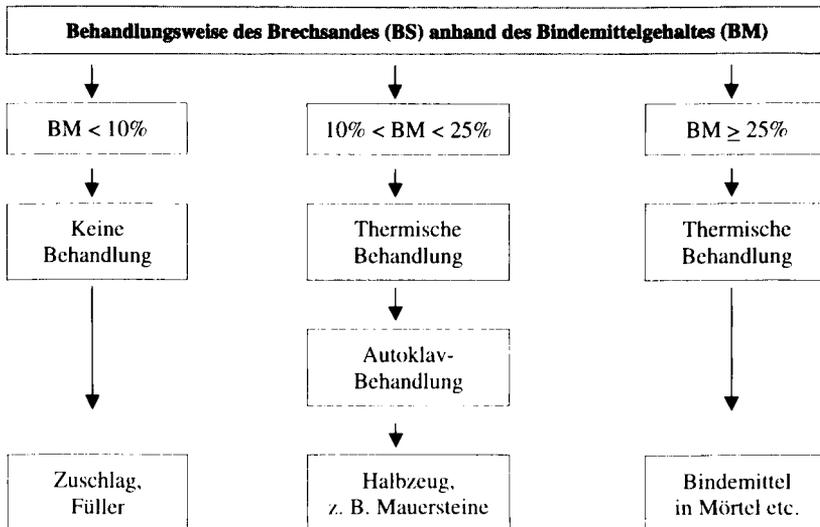
In diesem Kapitel werden Empfehlungen für den Einsatz von thermisch behandeltem Brechsand, hauptsächlich Betonbrechsand (BBS), als Primärbindemittelsubstitut für zementgebundene Baustoffen ausgesprochen. Die Empfehlungen beruhen auf Erkenntnissen aus den der Untersuchungsergebnissen, über die in den Kapiteln 6 bis 8 berichtet wurde. Für die thermische Behandlung von Brechsand aus Bauschutt sollten generell folgende Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

- Schicht- und Drehrohröfen sind gleichermaßen für eine Behandlung von Brechsand geeignet.
- Die Behandlungstemperatur sollte zwischen 700 und 750°C liegen; für jede Ofenart.
- Die Verweilzeit bei Behandlungstemperatur darf 30 Minuten nicht wesentlich über- oder unterschreiten.
- Für eine rasche Abkühlung nach der Temperaturbehandlung ist Sorge zu leisten, eine Luftkühlung sofort nach der Behandlung, fein verteilt auf einem Metallblech, ist ausreichend.
- Es sollte nur Brechsand, der auf 250µm Größtkorndurchmesser abgesiebt wurde, für den thermischen Behandlungsprozeß verwendet werden.
- Eine Aufmahlung der Brechsande ist weder vor noch nach der thermischen Behandlung zweckmäßig.
- Mit thermisch behandeltem Brechsand hergestellte Baustoffe bedürfen einer langen (mindestens dreiwöchigen) Nachbehandlung.
- Aus den Ergebnissen zum Verformungsverhalten folgt, daß beim Einsatz von BBS-Bindemittel als Zuschlag nur Zuschlag nach DIN 4226-1 zu verwenden ist.
- der BBS-Anteil im Bindemittel sollte 75% nicht überschreiten, wenn stark saugende Untergründe vorliegen oder der Baustoff Witterungseinflüssen ausgesetzt ist. Die Witterungsbeständigkeit bedarf im Einzelfall stets gesonderter Beurteilung.

Vor einer thermischen Behandlung von Brechsand ist stets zu klären, ob und in welchem Maße festigkeitsbildende Phasen erzeugt werden können. Dazu ist die Zusammensetzung gemäß DIN 4226-100 über die Zusammensetzung einer groben Kornfraktion zu bestimmen. Ist dies nicht möglich, ist die Zusammensetzung an den Brechsanden analytisch zu bestimmen. Wichtig ist hier vor allem die Art des Brechsandes und hier insbesondere der Betonbrechsandgehalt. Er ist erforderlich, um den Behandlungsweg bestimmen zu können. Der Bindemittelgehalt bei Betonbrechsand (BBS) < 250µm ist etwa 50%. Nur der Bindemittel-Gehalt (BM) aus dem Betonbrechsand-Anteil (BBS) im Brechsand (BS) ist für die Entstehung festigkeitsbildender Phasen verantwortlich.

Über den BBS-Anteil im Brechsand ist der prozentuale BM-Gehalt im Brechsandgemisch zu bestimmen (näherungsweise der halbe BBS-Anteil). Anhand des BM-Gehaltes kann dann mit Hilfe von Tab. 9.1 beurteilt werden, ob eine thermische Behandlung sinnvoll erscheint.

Tab. 9.1: Behandlungsvorschläge und Einsatzmöglichkeiten von Brechsand (BS) in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt (BM).



Bei einem BM-Gehalt von unter 10% des BS-Gemisches ist auf eine thermische Behandlung abzusehen. Bei einem BM-Gehalt zwischen 10 und 25% ist nach einer thermischen Behandlung eine Autoklav-Behandlung möglich. Als Produkt in diesem Herstellungsprozeß entsteht künstlicher Stein mit einer Druckfestigkeit von im Mittel 15 N/mm². Bindemittel lassen sich oberhalb eines BM-Gehalt im BS von 25% mittels der thermischen Behandlung effektiv herstellen.

9.2 Ermittlung des maximal möglichen Brechsandanteiles als Bindemittelsubstitut für zementgebundene Baustoffe

Ob thermisch behandelter Brechsand als alleiniges Bindemittel oder teilsubstituierend in Baustoffen eingesetzt werden sollte, ist anhand der Brechsandzusammensetzung einschätzbar.

Mit ausschließlich Betonbrechsand als Bindemittel des Baustoffes ist nach den Ergebnissen dieser Arbeit eine Druckfestigkeit von $\beta_{D,BBS}=10$ N/mm² sicher erreichbar. Bei gemischt zusammengesetzten Brechsanden ist dieser Wert abzumindern. In Tab. 9.2 sind dazu Beiwerte α_i angegeben. Multipliziert man das Produkt α der α_i aus Tab. 9.2 mit der Mörtel- oder Betondruckfestigkeit $\beta_{D,BBS}$, so erhält man die resultierende Festigkeit für den vorliegenden Brechsand (siehe Gl. 9.1).

Tab. 9.2: Beiwerte α_i

Zelle	Abminderungs- bzw. Erhöhungsgrund	Abminderungs- bzw. Erhöhungsbeiwert α_i [-]
1	reiner KSB oder ZBS	0,1
2	BBS substituiert mit KSB und ZBS BBS-Gehalt 0% Zwischenwerte sind linear zu interpolieren BBS-Gehalt 100%	0,1 - 1,0
3	BBS Typ II nach DIN 4226-100, BBS-Gehalt $\geq 70\%$	0,7
4	BBS Typ I nach DIN 4226-100, BBS-Gehalt $\geq 90\%$	0,9
5	w/b-Wertherabsetzung um 25% durch FM-Zugabe, $w/b_{FM}/w/b_{ohneFM}$	1,5
6	Grenzwertüberschreitung an Alkalien gemäß DIN 4226-100	0,6
7	Grenzwertüberschreitung an Chloriden gemäß DIN 4226-100	0,8

In den seltensten Fällen ist reiner Betonbrechsand für eine thermische Behandlung vorhanden. Über den Beiwert α lassen sich festigkeitsmindernde und -steigernde Einflüsse des verwendeten Brechsandes berücksichtigen.

Besteht der zu behandelnde Brechsand aus Kalksandstein- oder Ziegelbrechsand (KSB oder ZBS), d. h. der Betonbrechsandanteil (BBS) ist gleich Null, ist kaum mit festigkeitsbildenden Phasen zu rechnen. Der Beiwert α ergibt sich nach Zeile 1 der Tab. 9.2 zu 0,1; was im letztlich bedeutet, daß der Brechsand lediglich als quasi inerter Füller anzusehen ist. Eine Weiterbehandlung im Autoklaven zur Erzeugung z. B. von Mauersteinen ist aber möglich. Erst ab einem BBS-Gehalt von 50% erscheint es sinnvoll den Brechsand einer thermischen Behandlung zuzuführen. Das sich ergebende $\alpha=0.5$ für das Brechsandgemisch gemäß Zeile 2 ,Tab. 9.2, resultiert in einer Mörtelfestigkeit von 5 N/mm². Verwendet man typisierte Brechsandgemische nach DIN 4226-100 sind Mörtel der Gruppen II bzw. IIa ohne Primärbindemittelzusatz möglich.

$$\beta_{D,BS} = \alpha \beta_{D,BBS} \quad (9.1)$$

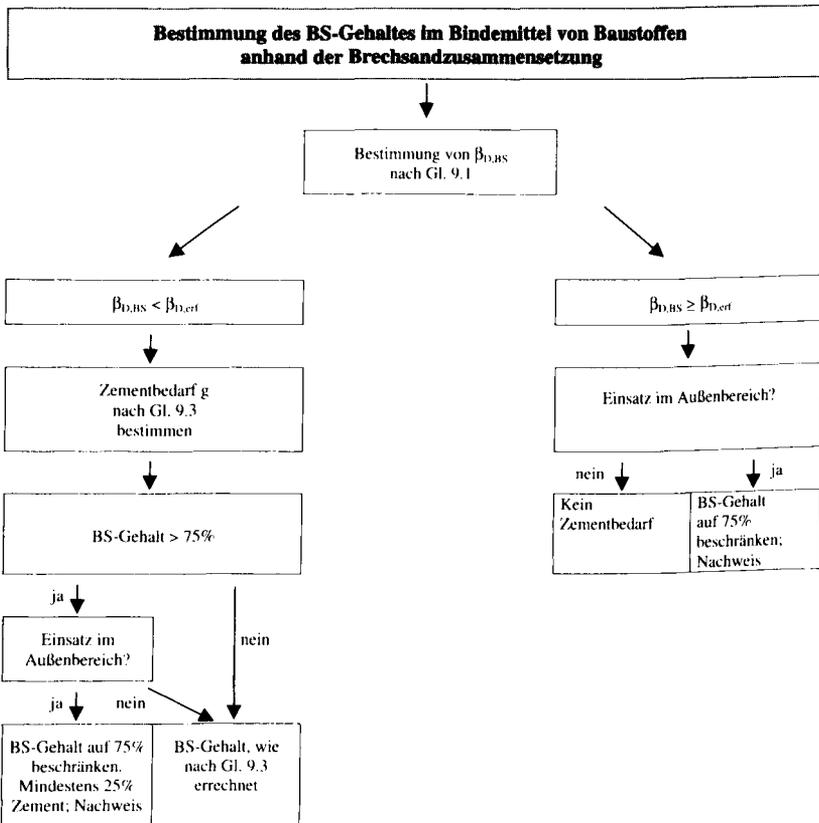
$\beta_{D,BS}$	=	Erzielbare Festigkeit des Mörtels/Betons mit temperiertem Brechsandgemisch als Bindemittel
α	=	Produkt der Abminderungs- bzw. Erhöhungsbeiwerte α , gem. Tab. 9.2
$\beta_{D,BBS}$	=	Erzielbare Festigkeit des Mörtels/Betons mit ausschließlich Betonbrechsand als Bindemittel ≈ 10 N/mm ²

Ist eine höhere Druckfestigkeit im zu erzeugenden Baustoff gefordert, so ist die Zugabe von Fließmittel erforderlich, sofern kein primärer Bindemittelleinsatz (Zement) gewünscht ist. Dadurch wird der Wasser-Bindemittel-Wert, der w/b-Wert (w/z-Wert), reduziert und die dauerhaftigkeitsbeeinflussenden Eigenschaften verbessert. Bei Einhaltung gleicher Verarbeitungseigenschaften. Berücksichtigung findet dieses in Gleichung 9.1 durch den Erhöhungsfaktor α aus Zeile 5 der Tab. 9.2. Dazu ist der (w/b-Wert) von dem Bereich zwischen 0,8 und 1,0 (im plastischen Bereich nach DIN 18555) auf den Bereich zwischen 0,6 und 0,7 abzusinken. Die maximal erreichbare Druckfestigkeit in damit hergestellten Baustoffen steigt dabei um 50%, auf Werte über 15 N/mm² an. Es lassen sich so zwar keine Zementfestigkeiten erreichen, jedoch kommt man so in den Festigkeitsbereich der hochhydraulischen Kalke.

Verunreinigungen sind weitestgehend zu vermeiden bzw. zu begrenzen. Es sind die Obergrenzen gemäß DIN 4226-100 bezüglich Alkali- und Salzgehalt einzuhalten. Bei Überschreitung dieser Werte sind Abminderungen gemäß Zeilen 6 und 7 der Tab. 9.2 vorzunehmen.

Das weitere Vorgehen hängt davon ab, ob die resultierende Baustofffestigkeit mit BBS kleiner oder größer als die erforderliche Festigkeit des herzustellenden Baustoffes ist. Das Ablaufschema dazu ist in Tab. 9.3 dargestellt.

Tab. 9.3: Ablaufschema zur Bestimmung des maximalen Brechsandgehaltes im Bindemittel (BM) in Baustoffen.



Wesentliche Festigkeitssteigerungen oberhalb von $\beta_{D,BS}$ ($\beta_{D,erf} > \beta_{D,BS}$) lassen sich durch die Substituierung mit primärem Bindemittel (Normzement nach DIN 1164) erreichen. In Abb. 9.1 sind die erreichbaren Druckfestigkeiten in Abhängigkeit vom Bindemittel aufgetragen.

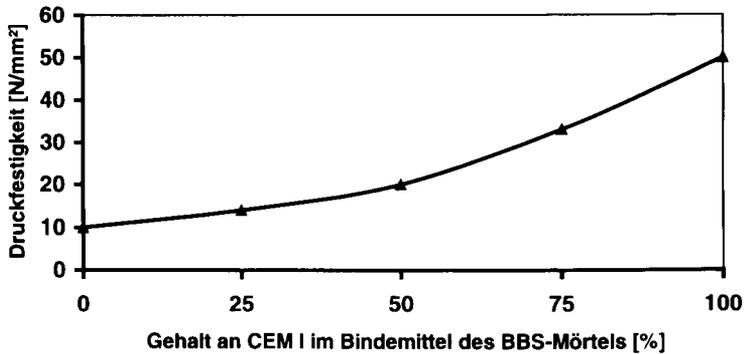


Abb. 9.1: Druckfestigkeit von Mörtel mit BBS/CEM Bindemittel, bezogen auf den primären Bindemittelgehalt.

Eine näherungsweise Formulierung dieses Zusammenhanges enthält Gleichung 9.2.

$$\beta_D = \frac{1}{250} g^2 + \beta_{D,BS} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (9.2)$$

β_D = Druckfestigkeit in N/mm²
 g = Gehalt an CEM I im Bindemittel des BBS-Mörtels in %
(0% ≤ g ≤ 100%)

Durch Umstellung von Gleichung 9.2 nach dem primären Bindemittelgehalt g , kann der voraussichtlich erforderliche Zementbedarf nach Gleichung 9.3 abgeschätzt werden.

$$g_{(1M,erf)} = \sqrt{250 \cdot (\beta_{D,erf} - \beta_{D,BS})} \quad [\%] \quad (9.3)$$

$\beta_{D,erf}$ = Druckfestigkeit in N/mm²
 $g_{(1M,erf)}$ = Gehalt an CEM I im Bindemittel des BBS-Mörtels in %

In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels werden, basierend auf den in diesem Abschnitt gezeigten Zusammenhängen, mögliche Einsatzmengen von Brechsand als Primärbindemittelsubstitut in ausgewählten Baustoffen exemplarisch aufgezeigt.

9.3 Einsatz in Mörtel, Putz und Estrich

Anhand der Bedingungen aus Abschnitt 9.1 und 9.2 sind BBS-Gehalte als Bindemittelsubstitut gemäß Tab. 9.4 im Bindemittel (BM) in Mörteln, Putzen und Estrichen möglich. Handelt es sich bei dem verwendeten Brechsand nicht um reinen BBS, sind die in Tab. 9.4 genannten Werte noch mit dem Beiwert α nach Tab. 9.2 zu multiplizieren.

Tab. 9.4: BBS-Bindemittelgehalte in Mörteln, Putzen und Estrichen

Mörtel nach DIN 1053				
Mörtelgruppe	MG I	MG II	MG IIa	MG III
Festigkeitsanforderung [N/mm ²]	-	2,5	5	10
BBS-Anteil im BM [%]	100	100	75	50
Putze nach DIN 18550				
Putzgruppe	P IIa	P IIb	P IIIa	P IIIb
Festigkeitsanforderung [N/mm ²]	2,5	2,5	10	10
BBS-Anteil im BM [%]	75	75	75	75
Estriche nach DIN 18560				
Estrichgruppe	ZE 12	ZE 20	ZE 30	ZE 40
Festigkeitsanforderung [N/mm ²]	15	25	35	45
BBS-Anteil im BM [%]	50	25	15	0

Reines Sekundärbindemittel ist demnach nur in Mörteln bis zur Mörtelgruppe II einzusetzen. Darüber hinaus ist immer primäres Bindemittel hinzuzugeben. Dies gilt auch für Putze, bei denen nur geringe Festigkeitsanforderungen vorliegen, da aufgrund der

relativ dünnen aufzubringenden Schichtdicke die Gefahr des vorzeitigen Wasserentzugs sehr groß ist. Bei dem Einsatz in Estrichen hingegen liegt die Einschränkung vor allem an den hohen Festigkeitsanforderungen selbst.

9.4 Einsatz in Beton

Aufgrund der relativ hohen Festigkeiten, die für Beton nach DIN 1045 gefordert werden, sollte nur reiner BBS bzw. Brechsand vom Typ I nach DIN 4226-100 zum Einsatz kommen. Tab. 9.5 zeigt die maximal möglichen Mengen an BBS als Bindemittelsubstitut in Beton auf. Beton mit ausschließlich sekundärem Bindemittel ist nur für untergeordnete Einsätze in einer Betonfestigkeitsklasse B 5 möglich. In der Festigkeitsklasse B 15 ist nur noch ein BBS-Anteil von 50% des Bindemittels möglich. In der Festigkeitsklasse B 35 können noch maximal 5% BBS im Bindemittel zum Einsatz kommen. Die Anwendung von temperiertem BBS für Beton für Außenbauteile nach DIN 1045 sollte nicht erwogen werden, da die Erkenntnisse zur Dauerhaftigkeit noch nicht ausreichend sind.

Tab. 9.5: BBS-Anteil im Bindemittel in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit.

Beton nach DIN 1045						
Betonfestigkeitsklasse	5	10	15	25	35	45
Festigkeitsanforderung [N/mm ²]	10	15	20	30	40	50
BS-Anteil [%]	100	75	50	25	5	0

9.5 Einsatz als Halbzeug (Künstliche Steine)

Aus Brechsanden lassen sich auch Halbzeuge (Mauer-, Pflastersteine, Rohre) herstellen. Allerdings sind dazu weitere Aufbereitungsschritte, wie Druck- und Autoklav-

behandlung, erforderlich. Im Gegensatz zur ausschließlich thermischen Behandlung kann hier Brechsand mit einem Größtkorn von 2000 µm eingesetzt werden. Primärer Zuschlag ist nicht erforderlich.

Ein Bindemittelgehalt von 30% im verwendeten BBS bis 2mm war ausreichend um Druckfestigkeiten von 15 N/mm² zu erzielen. Dabei konnte auf Primärstoffe ganz verzichtet werden. In Tab. 9.6 sind maximale BBS-Anteile in Mauersteinen in Abhängigkeit von der Steinfestigkeitsklasse angegeben. Bei abweichender Brechsandzusammensetzung sind die Anteile mittels dem Beiwert α aus Tab. 9.2 zu reduzieren.

Tab. 9.6: Einsatzmöglichkeit von BBS in Mauersteinen nach DIN 105 bzw. 106.

Mauersteine nach DIN 105 bzw. 106						
Druckfestigkeitsklasse	4	6	8	12	20	28
Festigkeitsanforderung [N/mm ²]	5,0	7,5	10,0	15,0	25	35
BBS-Anteil [%]	100	100	75	50	25	0

Bevor Brechsand in Rohren und Pflastersteinen eingesetzt werden kann, sind noch Untersuchungen zur Chemikalienbeständigkeit bzw. Verschleißbeständigkeit sowie Frostbeständigkeit durchzuführen.

9.6 Einsatz von BBS als Rohmehlsubstitut bei der Zementherstellung

Eine Rohmehlsubstituierung ohne Mischungsänderung der primären Rohstoffkomponenten durch Betonbrechsand ist möglich. Mit dem Kalkstandard KSt I nach Gleichung 4.1 läßt sich eine mögliche Verschiebung des KSt I durch eine Brechsandzugabe ermitteln.

Portlandzement benötigt, wie in Kapitel 4 geschrieben, einen Kalkstandard KSt I von mindestens 90. Da hochwertige deutsche Normzemente nach STARK 1998 einen Kalkstandard zwischen 97 und 102 aufweisen, können die primären Rohstoffkomponenten teilweise durch Betonbrechsand mit einem relativ niedrigeren Kalkstandard von KSt I_{BBS} = 30 ersetzt werden. BBS-Mengen zwischen 10 und 17% (Abb. 9.2) können so anstelle der primären Rohstoffe dem Brennprozeß zugeführt werden.

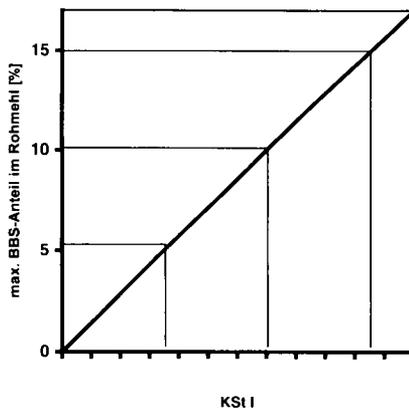


Abb. 9.2: Rohmehls substituierung durch BBS ohne Änderung der Primärstoffzusammensetzung.

Für andere Brechsandzusammensetzung ist der KSt I über die Zusammensetzung der Oxide mit Hilfe der RFA zu bestimmen (siehe auch Abschnitt 6.2).

10 Zusammenfassung, Schlußfolgerungen und Ausblick

Zerkleinert man Abbruchbeton in Brecheranlagen, entsteht ein Mineralphasengemisch unterschiedlicher Korngrößen. In den feinen Anteilen, dem Brechsand, ist das Verhältnis Zementstein/ Zuschlag gegenüber dem ursprünglichen Altbeton erheblich erhöht, bis zu 50 M.-%. Der Brechsand enthält im wesentlichen hydratisierte Zementphasen, sowie untergeordnet Calciumhydroxid (Portlandit, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) und Calciumcarbonat (CaCO_3). Da beim Brechvorgang bevorzugt die „weicheren“ Phasen des Betons zerkleinert werden, reichern sich die Bindemittelphasen im Feinanteil an. Die häufigsten Phasen im hydratisierten Zementstein sind: Calciumsilikathydrat (50-60%), Calciumhydroxid (20-25%), hydratisierte Aluminat-, Ferrit- und Sulfatphasen (10-15%).

Unterzieht man Betonbrechsand einer thermischen Behandlung, so finden Phasenveränderungen im Zementstein statt. Bei Temperaturen über ca. 100°C laufen zunächst Entwässerungsvorgänge ab, in denen neben dem freien, nicht gebundenem Wasser auch Anteile des physikalisch gebundenen Wassers freigesetzt werden. Die Abgabe des in den Kapillar- und Gelporen gebundenen Wassers nimmt oberhalb von 100°C stark zu und bleibt dann bis 200°C nahezu konstant. Bei Temperaturen bis ca. 300°C wird auch bereits chemisch gebundenes Wasser (Dehydratation) freigesetzt, was mit Phasenabbau, -umbildung und -neubildung verbunden ist. Die Dehydratation der Hydratphasen ist nicht exakt definierten Temperaturbereichen zuzuordnen, da sie aus einer Vielzahl von Verbindungen bestehen, deren Verhältnis je nach Zusammensetzung und Hydratationsbedingungen unterschiedlich ist. Die Entwässerung der Hydratphasen läuft bei höherer Temperatur kontinuierlich weiter, aber eine vollständige Dehydratation, insbesondere der CSH-Phasen tritt erst bei Temperaturen weit oberhalb von 300°C auf. Im Temperaturintervall von $470 - 500^\circ\text{C}$ beginnt die Zersetzung des Calciumhydroxids in Calciumoxid und Wasser. Bei 573°C läßt sich die Umwandlung von Quarz (von $\alpha\text{-SiO}_2$ nach $\beta\text{-SiO}_2$) beobachten.

Für die thermische Behandlung des Betonbrechsandes sind die Umwandlungen bzw. Zersetzungen der Hydratphasen die wichtigsten Reaktionen. Die bedeutendste und wichtigste Reaktion ist die Zersetzung der CSH-Phasen und die parallele Bildung von C_2S -Phasen, da dadurch hydraulisch reaktionsfähige Anteile im Betonbrechsand ent-

stehen. Im Hinblick auf die thermische Aufbereitung von Betonbrechsand ist die Möglichkeit der Bildung von reaktivem C_2S von besonderer Bedeutung, somit ist der Temperaturbereich oberhalb von 650 maßgebend für die Zersetzung der CSH-Phasen und für die Neubildung der Phase C_2S .

Eine wichtige Reaktion bei der thermischen Behandlung von Betonbrechsand ist die Decarbonatisierung des Calciumcarbonats, wodurch der Gehalt an Freikalk (CaO) ansteigt. Dieser wird durch verschiedene Reaktionen gebildet; einerseits durch die Zersetzung von Portlandit und Calcit und andererseits durch die Abbaureaktion von CSH-Phasen bei hohen Temperaturen. Zwar wird ein Teil des Freikalkes beim Zerfall der CSH-Phasen und der damit verbundenen Bildung von C_2S wieder in neugebildete Phasen eingebaut, jedoch steigt der Freikalkgehalt mit steigender Temperatur stetig an und nimmt ab Temperaturen von 800 - 900°C beträchtliche Ausmaße an. Das Überschreiten einer Behandlungstemperatur von 800°C ist schon deshalb nicht sinnvoll.

Ziel einer thermischen Behandlung im Temperaturbereich bis 800°C ist es, dem Betonbrechsand hydraulische Eigenschaften zu verleihen bzw. zurückzuverleihen, die einen erneuten Einsatz dieses Materials als Bindemittelkomponente zur Herstellung von Mörtel oder ggf. Beton erlauben.

In phasenanalytischen Untersuchungen mittels der Röntgenbeugungsanalyse (XRD) konnte die beste Erzeugung von Belit (β - C_2S) in einer Temperaturbehandlung von 700-750°C festgestellt werden. Die für die Festigkeitsentwicklung verantwortlichen neugebildeten CSH-Phasen in daraus hergestellten Normprismen, ließen sich durch raster-elektronenmikroskopische (REM) Untersuchungen nachweisen. Die optimale Haltezeit im Laborofen bzw. die Verweilzeit im Drehrohrföfen beträgt 30 Minuten.

Zur Bestätigung, mit 700°C die optimale Behandlungstemperatur für Betonbrechsand ermittelt zu haben, wurden für einen Temperaturbereich von 400 - 1000°C Festigkeitsuntersuchungen an Mörtelprismen nach DIN 1164 durchgeführt.

Anhand der Ergebnisse war zu erkennen, daß der Temperaturbehandlungsbereich von 700°C in Betonbrechsanden das höchste Festigkeitspotential weckt. Im Temperaturbereich unter 700°C kann nicht ausreichend C_2S zur nachträglichen Bildung von CSH-Phasen bereitgestellt werden. Bei höheren Temperaturen ist ein Festigkeitsrückgang bedingt durch einen hohen Anteil an gefügestörendem Freikalk (CaO) zu verzeichnen.

Zwecks ökologischer und ökonomischer Betrachtungen wurden Betonbrechsande mit unterschiedlichem Größtkorn temperaturbehandelt und anschließend als Bindemittel in Mörtel eingesetzt. Mörtel, die mit temperaturbehandeltem Betonbrechsand mit einem Größtkorn von 0,25 mm hergestellt wurden, erzielten die höchsten Festigkeiten. Ein feineres Aufmahlen oder Absieben bewirkt keine Festigkeitssteigerung. Bei einer Erhöhung des Größtkorns läßt sich ebenfalls keine Steigerung der Festigkeit feststellen, was durch die geringere reaktive Oberfläche und den geringeren Bindemittelanteil in den gröberen Brechsandfraktionen zu begründen ist.

Beim Vergleich der Prismendruckfestigkeiten im Alter von 7 und 28 Tagen wurde festgestellt, daß bei weiterer Unterwasserlagerung über den 7. Tag hinaus eine Festigkeitssteigerung und bei Lagerung im Klima 20/65 ein Festigkeitsverlust, bezogen auf die 7-Tage Festigkeit, eintritt. Begründet werden kann der Festigkeitsrückgang bei Lagerung bei 20/65 mit einem raschen Wasserentzug aufgrund der porösen Struktur des Mörtels und dadurch bewirktem Hydratationsstopp sowie Eigenspannungsrißbildung. Entgegenzuwirken ist durch besonders gründliche und lange Nachbehandlung oder durch Verschnitt mit primärem Bindemittel wie Zement.

Der Betonbrechsandanteil in Brechsandgemischen ist stets anzugeben. Mittels der in Kapitel 9 angeführten Berechnungsformel kann dann die zugehörige Festigkeitsentwicklung nach einer thermischen Behandlung abgeschätzt werden.

Mit thermisch behandeltem Betonbrechsand als Bindemittelsubstitut lassen sich Mörtel der Mörtelgruppe IIa nach DIN 18555 oder ähnliche Baustoffe reproduzierbar herstellen. Wird der thermisch behandelte Betonbrechsand durch andere behandelte Brechsande um bis zu 50% substituiert, so läßt sich noch Mörtel der Mörtelgruppe II nach DIN 18555 herstellen.

Brechsand, der mindestens zu 50% aus Betonbrechsand besteht, durch eine Temperaturbehandlung bei 700°C hydraulische Aktivität zu verleihen, ist auch energetisch sinnvoll. Verglichen mit der Zementherstellung wird nur ca. 30% der Energie benötigt. Die Rückführung von Brechsand durch thermische Behandlung in den Baustoffkreislauf ist also ein technologisch machbarer als auch ökologisch sinnvoller Verwertungsweg. Ist der Bindemittelgehalt im Brechsand sehr gering, wie bei manchen Bauschuttgemischen aus Mauerwerk, kann der thermischen Behandlung eine Autoklavbehandlung angeschlossen werden. So läßt sich Halbzeug, wie z. B. Mauersteine herstellen.

Ziel weiterer Untersuchungen muß es nun sein Musterbauwerke zu erstellen und diese wissenschaftlich zu begleiten, um so eine bauaufsichtliche Zulassung für thermisch behandelte Brechsande als hydraulisch aktives Bindemittel möglich zu machen.

11 Quellen

11.1 Literaturverzeichnis

BDE

- 1997 Verwertung von Bauschutt. Position des BDE zu den Technischen Regeln der LAGA. Kreislaufwirtschaft in der Praxis, Ausgabe Nr. 6, Köln, 1997.

BIM

- 1999 BAUSTOFFKREISLAUF IM MASSIVBAU; Abschlußfachtagung, DAFStb, Berlin, 27. und 28. Mai 1999, Beuth Verlag, 1999.

BEI, R.

- 1990 LUDWIG, U.: Hydraulische Reaktivität belitreicher Portlandzemente. In: Zement / Kalk / Gips 43 (1990).

BMU

- 1999 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Persönlich auf Anfrage erhaltene e-mail aus dem BMU, Bonn, Mai 1999.

BOGUE, R. H.

- 1947 The Chemistry of Portland Cement. Reinhold Publishing Corporation, New York, 1947.

BREITENBÜCHER, R.

- 1994 Recycling von Frisch- und Festbeton. In: Beton (1994).

BRITE/EURAM

- 2000 Construction Recycling Technologies for High Quality Cement and Concrete, Brüssel. Abschlußbericht für die Jahre 1996-99, Brüssel 2000.

BUDELMANN, H.

- 1989 DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): Verhalten von Beton bei mäßig erhöhten Betriebstemperaturen. Heft 404. Berlin: Beuth Verlag, 1989.
- 1997 Baustoffe im Kreislauf: Zum nachhaltigen, kreislaufgerechten Einsatz von mineralischen Baustoffen. Braunschweig : iBMB. - In: Mitteilungen Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (1997), Nr. 128. Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy, Baustoffe in Praxis, Lehre und Forschung, 1997, S. 37-50.
- 1998 DORA, B.: Verwendbarkeit von Betonbrechsand für Werk trockenmörtel (WTM), FG Baustoffkunde, Uni Gh Kassel und iBMB, TU Braunschweig, Abschlußbericht, unveröffentlicht, Nov. 1998.
- 1999a DORA, B.: Beton im Stoffkreislauf, ARCONIS 1/99, Fraunhofer- Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart, 1999, S. 10-13.

- 1999b DORA, B.: Der Einfluß von rezykliertem Zuschlag auf den Elastizitätsmodul von Beton, aus: Festschrift Prof. Reinhardt, Uni Stuttgart, November 1999, S. 611-620.

BUNDESREGIERUNG

- 1992 Zielfestlegungen der Bundesregierung zur Vermeidung, Verringerung und Verwertung von Bauschutt, Baustellenabfällen, Bodenaushub und Straßenaufbruch, Bonn, Entwurf vom 5. November 1992.

CHATTERJI, S.

- 1995 Concrete Durability and CaO/SiO₂ Mole Ratio of CSH. In: Cement and Concrete Research 25 (1995).

CONG, X.

- 1995 KIRKPATRICK, R.J.: Effects of the Temperature and Relative Humidity on the Structure of C-S-H Gel. In: Cement and Concrete Research 25 (1995).

CZERIN, W.

- 1977 Zementchemie für Bauingenieure. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 1977.

DFG

- 1996 DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT: Sonderforschungsbereich 385 „Baustoffrecycling“ (DFG – SFB 385). Universität Magdeburg. Förderperiode 1995/96. Teilprojekt C 1: Budelmann, H., Dora, B.: Eigenschaften von Recyclingbeton. Universität Gesamthochschule Kassel, 1996.

DORA, B.

- 1995 BUDELMANN, H.: Untersuchungen zum Einfluß der Altbetonzusammensetzung und der Aufbereitung auf die Eigenschaften von Recyclingbeton. In: 31. Forschungskolloquium DAfStb, Kaiserslautern, 05. - 06.10.1995, S. 232-242.
- 1999a BUDELMANN, H.: Beton mit rezykliertem Zuschlag nach DIN 1045 - Concrete with Recycled Aggregates conform to DIN 1045, aus: Forschungsarbeiten 1995-1999, iBMB, Heft 144, Braunschweig, 1999, S. 7-10.
- 1999b GRIMM, M.; BUDELMANN, H.; MIDDENDORF, B.: Herstellung hydraulischer Bindemittel durch thermische Aufbereitung von Betonbrechsand - Preparation of Hydraulic Active Binders by Thermal Conditioning of Crushed Concrete Sand, aus: Forschungsarbeiten 1995-1999, iBMB, Heft 144, Braunschweig, 1999, S. 11-14.
- 2000a BUDELMANN, H.: Hydraulic active binders from fine components of crushed concrete, R'2000, Recovery, recycling, Re-integration, 5th World Congress and Trade Show, Toronto, Ontario, Canada, June 5-9, 2000, S. 761-766.

- 2000b Thermische Aufbereitung von Bauschuttbrechsanden, 15. ZAF-Seminar Ressourcen und Recycling mineralischer Rohstoffe für die Bauindustrie, TU Braunschweig, 28.-29. September 2000.
- EDEN, W.
1994 Wiederverwertung von Kalksandsteinen aus Abbruch von Bauwerken bzw. fehlerhaften Steinen aus dem Produktionsprozeß, Bundesverband Kalksandsteinindustrie e. V., Forschungsbericht Nr. 80, Hannover, 1994.
- EICKSCHEN, E.
1998 SIEBEL, E.: Verwendung von Betonbrechsand als Zuschlag für Betonfahrbahndecken, Straße und Autobahn, Jg. 49, Nr. 9, S. 494-505, 1998.
- FISCHER, P.
1987 Die Bildung des grobkeramischen Scherben beim Brennen. Teil 2 Ausbildung des Scherbengefüges. ZI Jahrbuch, Wiesbaden, Bauverlag, 1987.
- FISCHER, R.
1970 DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): Über das Verhalten von Zementmörtel und Beton bei hohen Temperaturen. Heft 214. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1970.
- FORDHAM, C. J.
1985 SMALLEY, I.J.: A Simple Thermogravimetric Study of Hydrated Cement. In: Cement and Concrete Research 5 (1985).
- FUHR, C.
1994 Belitreiche Zemente, Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit und Anwendbarkeit in der Praxis. Universität-Gesamthochschule-Siegen, Dissertation, 1994.
- GRIMM, M.
2000 Herstellung hydraulischer Bindemittel durch thermische Aufbereitung von Betonbrechsand: Projektarbeit am FG Baustoffkunde der Universität Gesamthochschule Kassel, Betreuer: B. Dora, Kassel, 2000.
- GROßKURTH, K. P.
1999 MALORNY, W.: Untersuchungen zum Recycling von Asbestzementprodukten – Investigations with regard to the Recycling of Asbestos Cement Building Materials, aus: Forschungsarbeiten 1995-1999, iBMB, Heft 144, Braunschweig, 1999, S. 203-204.
- HANDSCHUG, P.
1999 Mörtel mit rezykliertem Bindemittel: Diplomarbeit am FG Baustoffkunde der Universität Gesamthochschule Kassel, Betreuer: B. Dora, Kassel, 1999.

HANSEN, H.

- 1994 A Method for total Reutilization of Masonry by Crushing, Burning, Shaping and Autoclaving. RILEM-Symposium "Demolition and Reuse of Concrete". E & FN, London, 1994, S. 407-410.

HANSEN, T. C.

- 1983 NARUD, H.: Recycled concrete and silica fume make calcium silicate bricks. In: Cement and Concrete Research 13 (1983), pp. 626 – 630.

HEMMINGER, W. F.

- 1989 CAMMENGA, H. K.: Methoden der Thermischen Analyse. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris und Tokyo, 1989.

HEWLETT, P. C. (Hrsg.).

- 1998 Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Fourth Edition, Arnold Verlag, London, 1998.

JÄCKEL, H. G.

- 1992 Aufbereitung von Betonschutt: Bauzeitung, Jg. 46, Nr. 6, 1992, S. 483-485.

JÄGER, R.

- 1993 Entwicklung und Untersuchung von C_3S - ' $C_{12}A_7$ ' und von CA - C_2AS - Zementen. Freiburg: Universität, Diss., 1993.

JCPDS

- 1999 Joint Committee on Powder Diffraction Standard. In: Joint Committee on Powder Diffraction Standard, A Pennsylvania Non-profit Corporation, 1601 Park Lane, Swarthmore, Pa. 19081.

KHOURY, G. A.

- 1985 GRAINGER, G. N.; SULLIVAN, J. E.: Transient thermal strain of concrete: literature review conditions within specimen and behaviour of individual constituents. In: Magazine of Concrete Research 37 (1985)
- 1992 Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. In: Magazine of Concrete Research 44 (1992).

KOHLER, G.

- 1997 Recyclingpraxis Baustoffe, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1997.

KONTZE, D.

- 1995 Vergleiche der Porosität von zementgebundenen Bindemittelleimen, Mörteln und Betonen, Diplomarbeit am Fachgebiet Baustoffkunde, Universität Gesamthochschule Kassel, SS 1995.

KOTTAS.

- 1954 : Zerstörungsfreie Prüfung von Beton, Beton 1954.

LACH, V.

- 1970 Über die Rehydratation von Portlandzement. In: Zement / Kalk / Gips 23, 1970.

LOCHER, F. W.

- 1984 VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE e.V. (Hrsg.): Chemie des Zements und der Hydratationsprodukte; Aufbau und Eigenschaften des Zementsteins. In: Zement – Taschenbuch 84. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 1984.

MANN, W.

- 1975 Über den Wassergehalt von Beton bei höheren Temperaturen. In: DEUTSCHER BETONVEREIN (Hrsg.): Betontechnische Berichte, 1975.
1989 DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): NEUBERT, B.: Wassergehalt von Betonen bei Temperaturen von 100 bis 500°C im Bereich des Wasserdampfpartialdruckes von 0 bis 5,0 Mpa. Heft 403. Berlin: Beuth Verlag, 1989.

MIDDENDORF, B.

- 1994 Charakterisierung historischer Mörtel aus Ziegelmauerwerk und Entwicklung von wasserresistenten Fugenmörteln auf Gipsbasis, Dissertation, Universität-Gesamthochschule-Siegen, Fachbereich 8, 1994.
2000 DORA, B.; BUDELMANN, H.: Hydraulic binders prepared by thermal activation from fine components of crushed concrete, ENERGEX'2000 and the Global Energy Exposition introduces (GlobeEx'2000), Las Vegas, USA, July 23-28, 2000, 987-992.

MÖLLER, S.

- 1998 Verwendbarkeit von Betonbrechsand für Werk trockenmörtel: Diplomarbeit am FG Baustoffkunde der Universität Gesamthochschule Kassel. Betreuer: B. Dora. Kassel, 1998.

MÜLLER, A.

- 1985 STARK, J.; RÜMLER, K.: Zum Stand der Entwicklung eines aktiven Belit – Zementes. In: Zement / Kalk / Gips 38 (1985).
1994 Ziegelrestmassenverwertung, 12. internationale Baustofftagung ibausil, Tagungsbericht Bd. 2, Weimar, 1994, S. 179-186.
1995 WINKLER, A.: Zusammensetzung und Verwertung von Baurestmassen. In: Abfallwirtschaft im Umbruch - 3. Weimarer Fachtagung über Abfall- und Sekundärrohstoffwirtschaft, Weimar, 1995, S. 5-1 – 5-15.
1997 Stoffkreisläufe für Mauerwerksabbruch?, 13. internationale Baustofftagung ibausil, Tagungsbericht Bd. 2, Weimar, 1997.

MÜLLER, Ch.

- 2000 DORA, B.: Wiederverwertung von Brechsand aus Bauschutt. Schriftenreihe des deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 506, Berlin, Beuth-Verlag, 2000.

ODLER, I.

- 1983 MAULA, S. A.; WEIß, R.: Veränderungen der Struktur und der Eigenschaften des Zementsteines infolge Einwirkung erhöhter Temperatur. Arbeitsbericht 1981 – 1983, Teil II, B6. In: Sonderforschungsbereich 148, Brandverhalten von Bauteilen. Braunschweig: TU Braunschweig, 1983.

RAHLWES, K.

- 1992 Recycling von Stahlbeton- und Stahlbetonverbundkonstruktionen – Ansätze zu einer umweltökonomischen Bewertung: In: deutscher Beton-Verein e. V. (Hrsg.), Vorträge auf dem Deutschen Betontag 1991 vom 25. bis 27. April 1991 in Berlin, Wiesbaden, 1992, S. 215-247.

RAITHEL, M.

- 1996 Zurückgewinnbarkeit hydraulischer Eigenschaften zementgebundener Materialien durch eine Temperaturbehandlung: Diplomarbeit am FG Baustoffkunde der Universität Gesamthochschule Kassel, Betreuer: Dr. B. Middendorf und B. Dora, Kassel, 1996.

ROMBERG, H.:

- 1978 Zementsteinporen und Betoneigenschaften, Beton-Information, 18, Heft 5, 1978, S. 50-55.

ROSEMANN, H.:

- 1987 Theoretische und betriebliche Untersuchungen zum Brennstoffenergieverbrauch von Zementdrehofenanlagen mit Vorcalcinierung, Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 48, Düsseldorf, 1987.

ROSTÁSY, F. S.

- 1983 Baustoffe: Stuttgart ; Berlin ; Köln ; Mainz: Verlag W. Kohlhammer 1983.

SANCHEZ, J. A.

- 1998 TUDANCA, S.: Reuse of Building Rubble in Cement Manufacturing. In: DHIR, K. (Hrsg.); HENDERSON, N. A. (Hrsg.); LIMBACHIYA, M. C. (Hrsg.): Use of Recycled Concrete Aggregate. Dundee: Verlag Thomas Telford, 1998, S. 481 – 491.

SEEBERGER, J.

- 1985 DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): Festigkeitsverhalten und Strukturveränderungen von Beton bis 250°C. Heft 360. Berlin: Beuth Verlag, 1985.

SCHMIDT, M.

- 2000 Technische, ökologische und wirtschaftliche Einflüsse auf die derzeitigen und zukünftigen Mengen an rezyklierten Baustoffen ; Gutachten im Auftrag des Bundesverbandes Baustoffe – Steine und Erden: In: Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V.: Der Bedarf an mineralischen Baustoffen, Frankfurt/Main, 2000, S. 75 – 191.

SCHNEIDER, U.

- 1973 Zur Kinetik festigkeitsmindernder Reaktionen in Normalbetonen bei hohen Temperaturen. Braunschweig: Technische Universität, Diss., 1973.
- 1977 Über den thermischen Abbau zementgebundener Betone. In: TIZ, Tonindustriezeitung 101 (1977).
- 1980 DIEDERICHS, U.; ROSENBERGER, W.: Hochtemperaturverhalten von Festbeton. Arbeitsbericht 1978 - 1980, Teil II, B3. In: Sonderforschungsbereich 148, Brandverhalten von Bauteilen. Braunschweig: TU Braunschweig, 1980.
- 1982 DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen. Heft 337. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1982.
- 1983a DIEDERICHS, U.; EHM, C.; HINRICHSMEYER, K.: Hochtemperaturverhalten von Festbeton. Arbeitsbericht 1981 - 1983, Teil II, B3. In: Sonderforschungsbereich 148, Brandverhalten von Bauteilen. Braunschweig: TU Braunschweig, 1983.
- 1983b DIEDERICHS, U.; HINRICHSMEYER, K.: Nachweis von Strukturveränderungen beim Erhitzen von Zementstein und Mörtel durch Quecksilberdruckporosimetrie. In: TIZ - Fachberichte 107 (1983).
- 1985 SCHNEIDER, U. (Hrsg.): Properties of materials at high temperatures - Concrete. Kassel: GHK-Bibliothek, 1985.
- 1989a DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): HERBST, J. H.: Permeabilität und Porosität von Beton bei hohen Temperaturen. Heft 403. Berlin: Beuth Verlag, 1989.
- 1989b NÄGELE, E.: Repair ability of Fire Damaged Structures. In: CIB W 14 Report. Kassel: Universität Gh Kassel, 1989.

SCHUBERT, P.

- 1994 HEER, B.: Bauforschungsberichte des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. Umweltverträgliche Verwertung von Mauerwerk - Baureststoffen. Institut für Bauforschung, RWTH Aachen, 1997.

SHARARA, A. M.

- 1994 EL-DIDAMONY, H.; EBIED, E.; ABD El-Aleem.: Hydration Characteristics of β -C₂S in the Presence of some Pozzolan Materials. In: Cement and Concrete Research 24 (1994).

SHIBATA, S.

- 1984 KISHI, K.; ASAGA, K.; DAIMON, M.: Preparation and Hydration of β -C₂S without Stabilizer. In: Cement and Concrete Research 14 (1984).

STARK, J.

- 1982 Entwicklungsstand von Belit - Zementen. In: Betontechnik (1982).
- 1998 WICHT, B.: Anorganische Bindemittel -Zement-Kalk-Spezielle Bindemittel-. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar 109, Weimar 1998.
- 2000 WICHT, B.: Zement und Kalk - Der Baustoff als Werkstoff ; Birkhäuser Verlag, 2000.

TAYLOR, H.F.W.

- 1964 The chemistry of cements. Vol. 1 & 2. London / New York: Academic Press, 1964.
- 1984 NEWBURY, D.E.: Calcium Hydroxide Distribution and Calcium Silicate Hydrate Composition in Tricalcium Silicate and β -Dicalcium Silicate Pastes. In: Cement and Concrete Research Vol. 14 (1984).
- 1997 Cement Chemistry. 2nd Edition. Thomas Telford Publishing, London 1997.

TRÄNKLER, J.

- 1992 Verbesserung der Produktqualität bei der Bauschutttaufbereitung durch nasse und trockene Behandlung. Aufbereitungs-Technik, Jg. 33, Nr. 4, 1992, S. 194-202.

VDZ

- 1999 VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE e. V.: Monitoring-Bericht 1998 – Verminderung der CO₂-Emission. Düsseldorf, 1999.
- 2000 VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE e. V. (Hrsg.): Zement-Taschenbuch 2000. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2000.

WASHBURN, E. W.

- 1921a Note on a Method of Determination Pore Sizes in a Porous Material, Proc. Natl. Acad. Sci., USA, 7, 1921, S. 115-116.
- 1921b Phys. Rev., USA, 17, 1921, S. 273-283.

WEIGLER, H.

- 1964 DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): FISCHER, R.; DETTLING, H.: Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen. Heft 164. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1964.

WENZEL, H. P.

- 1988 Veränderungen der Mikrostruktur von Festbeton infolge hydrothermalen Belastung. In: Betontechnik (1988).

WÖRHEIDE, R. J.

- 1996 RÜDIGER, U.: Verwertung von Mauerwerksabbruch. Baustoff-Recycling und Deponietechnik (BR), Nr. 6, 1996, S. 8-15.

WOLTER, A.

- 1982 Zur Bildung und Stabilität von Tricalciumsilikat und Aliten. In: Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 3092. Opladen: Westdeutscher Verlag, 1982.

YODA, K.

- 1988 YOSHIKANE, T.; NAKASHIMMA, Y.; SOSHIRODA, T.: Recycled cement and recycled concrete in Japan. In: 2. RILEM. Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry. pp. 527 – 536.

YOSHIKANE, T.

- 1988 The instances of concrete recycled for base course material in Japan. In: 2. RILEM Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry. pp. 746 – 755.

ZDB

- 2000 Zentralverband des Deutschen Baugewerbes: Baujahr'99 ; Jahrbuch des Deutschen Baugewerbes. Berlin: Köllen Druck + Verlag, 2000.

ZÜRS, A.

- 1988 Untersuchungen über die thermische Zersetzung hydratisierter Zementpasten und Betone bei Brand. Clausthal: Technische Universität, Diss., 1988.

11.2 Zitierte Normen und Richtlinien

(AbfG)

- 1992 Abfallgesetz Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen. Deutsches Bundesrecht, Stand: 26.6.1992.

BMU

- 1993 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: „Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall); Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen“; vom 14.05.1993, Bundesanzeiger, Jhr. 45, Nr. 99a, Bundesanzeiger Verlagsges. mbH, Köln 1993.

CEB

- 1993 CEB-Comité Euro-International du Béton – CEB-FIP Model Code 1990. Bulletin D'Information No. 213/214; Lausanne, May 1993.

DAfStb

- 1998 DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): Richtlinie: Beton mit rezykliertem Zuschlag: Teil 1 Betontechnik; Teil 2 Beton-zuschlag aus Betonsplitt und Betonbrechsand. Berlin: Beuth Verlag, 1998.

DAfStb (Manuskript)

- 1999 DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): Richtlinie: Beton mit rezykliertem Zuschlag: Teil 1 Betontechnik; Teil 2 Beton-zuschlag aus Betonsplitt und Betonbrechsand. Dezember 1999.

DIN 105

- 1989 Mauerziegel. 08/89.

- DIN 106
1980 Kalksandsteine. 09/80.
- DIN 1045 Entwurf
1999 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton 07/1999.
Teil 1: Bemessung und Konstruktion. 02/1997
Teil 2: Leistungsbeschreibung, Eigenschaften, Herstellung und Übereinstimmung. 07/1999
Teil 3: Ausführung von Bauwerken. 02/1999
Teil 4: Betonfertigteile. 05/2000
- DIN 1045
1988 Beton und Stahlbeton. 07/88.
- DIN 1048
1991 Prüfung von Beton. 06/1991.
- DIN 1053
1996 Teil 1 Mauerwerk; Berechnung und Ausführung, 11/1996.
- DIN 1060
1995 Baukalk. 03/1995.
Teil 1: Definition, Anforderungen, Überwachung.
- DIN 1164
1994 Zement. 10/1994.
- DIN 18555
1982 Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln. 09/1982.
- DIN 18560
1992 Estriche im Bauwesen, 05/1992.
- DIN 4032
1981 Betonrohr und Formstücke. 01/1981
- DIN 4226
1983 Zuschlag für Beton. 04/1983.
Teil 1: Zuschlag mit dichtem Gefüge. Begriffe, Bezeichnung, Anforderungen;
Teil 2: Zuschlag mit porigem Gefüge (Leichtzuschlag). Begriffe, Bezeichnung und Anforderungen;
Teil 3: Prüfung von Zuschlag mit dichtem oder porigem Gefüge;
Teil 4: Überwachung (Güteüberwachung)

- DIN 4226 (Entwurf)
Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel.
1999 Teil 1: Gesteinskörnungen mit dichtem Gefüge. 12/1999
2000 Teil 2: Gesteinskörnungen mit porigem Gefüge (Leichtzuschlag). 09/2000
2000 Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen. 09/2000
- DIN 51006
1990 Thermische Analyse (TA) Thermogravimetrie (TG) - Grundlagen, Beuth-Verlag, 10/90.
- DIN 52170
1980 Bestimmung der Zusammensetzung von erhärtetem Beton, Beuth-Verlag, 2/80.
- DIN 52450
1985 Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern; Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe, 08/85.
- DIN 52617
1987 Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen. 05/1987.
- DIN EN 196
Prüfverfahren für Zement.
1995 Teil 1: Prüfverfahren für Zement; Bestimmung der Festigkeit. 05/1995.
1995 Teil 2: Prüfverfahren für Zement; Chemische Analyse von Zement. 05/1995.
1995 Teil 3: Prüfverfahren für Zement; Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit. 05/1995.
1990 Teil 6: Prüfverfahren für Zement; Bestimmung der Mahlfeinheit. 03/1990.
- DIN EN 459
1995 Baukalk.
Teil 2 Prüfverfahren für Baukalk. 03/95.
- EG
1998 EG-Deponierichtlinie Nr. 98/C 332/02 vom 04.06.1998; Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft vom 30.10.1998.
- EUROCODE 2
1994 DIN V ENV 1992-1: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teile 1-1 bis 1-6, Beuth-Verlag, 1992-1994.

KrW-/AbfG

- 1994 Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetz: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. Deutsches Bundesrecht, Stand: 27.9.1994.

LAGA

- 1998 Länderarbeitsgemeinschaft Abfall: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen. Technische Regeln, Stand Nov. 1996, Erich Schmidt Verlag, 1998.

Anhang

Tabelle A1: Angaben zu den verwendeten Analysemethoden

Bestandteil	Vorbehandlung	Verfahren	
1	2	3	
Glühverlust	Trocknen bei 105 °C	Glühen bei 1000 °C an der Atmosphäre gemäß DIN EN 196-2	
Unlösliches		Behandlung mit Salzsäure und Sodalösung gemäß DIN EN 196-2	
Chlorid, Cl		Aufschluß mit Salpetersäure, potentiometrische Titration in Anlehnung an DIN EN 196-21 bzw. Elution mit Wasser, potentiometrische Titration gemäß DIN 4226-3	
Sulfat als SO ₃		oxidativer Aufschluß;	
Carbonat als CO ₂		infrarotspektroskopische Bestimmung	
Natriumoxid, Na ₂ O		Flammenfotometrische Titration in	
Kaliumoxid, K ₂ O		Anlehnung an DIN EN 196-21	
Siliciumdioxid, SiO ₂		Glühen bei 1000 °C	Schmelzaufschluß mit Lithiumtetraborat; Röntgenfluoreszenzanalyse
Aluminiumoxid, Al ₂ O ₃			
Eisenoxid, Fe ₂ O ₃			
Titandioxid, TiO ₂			
Calciumoxid, CaO			
Magnesiumoxid, MgO			

Tabelle A2: Chemische Eigenschaften verschiedener Brechsande

Brechsand		1	2	3	4
Ausgangsmaterial		ABB	BBS	ZBS	KSB
1	2	4	6	8	10
SiO ₂	M.-% ¹⁾	76,8	78,7	70,3	76,3
Al ₂ O ₃		4,54	1,74	10,6	4,81
Fe ₂ O ₃		1,58	0,67	4,65	1,67
CaO		8,5	12,7	4,76	8,39
MgO		0,68	0,34	1,68	0,69
TiO ₂		0,21	0,13	0,60	0,22
Na ₂ O		0,60	0,08	n. b.	n. b.
K ₂ O		1,30	0,48	n. b.	n. b.
Na ₂ O-Äqu.		1,56	0,40	2,18	1,43
SO ₃		0,20	0,53	0,28	0,23
Cl ²⁾		0,009	0,002	0,005	0,005
Cl ³⁾		0,02	0,02	0,02	0,02
Glühverlust			4,92	4,51	3,63

1) bezogen auf die glühverlusthaltige Substanz

2) nach DIN 4226

3) nach EN 196

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A3: Siebdurchgänge der Ausgangssande (Korngruppen 0/2) in M.-%

Brechsand		Prüfsiebmaschenweite in mm						
		0,063	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9
BBS	Probe 1	6,6	13,8	26,3	48,4	73,2	99,6	100
	Probe 2	5,9	12,3	23,7	44,9	70,4	99,6	100
	Probe 3	6,1	12,8	24,8	46,1	71,0	99,6	100
	Mittelw.	6,2	12,9	25,0	46,5	71,5	99,6	100
KSB	Probe 1	5,2	10,6	24,7	58,7	86,3	100,0	100
	Probe 2	5,2	10,7	25,0	59,4	86,7	100,0	100
	Mittelw.	5,2	10,7	24,8	59,1	86,5	100,0	100
ZBS	Probe 1	16,7	27,2	38,2	52,9	72,2	100,0	100
	Probe 2	16,1	26,8	37,6	51,7	71,5	100,0	100
	Mittelw.	16,4	27,0	37,9	52,3	71,9	100,0	100

Tabelle A4: Wasseraufnahme der Brechsande für unterschiedliche Wasserlagerungszeiten

Brechsand	Korngruppe	Wasserlagerungszeit	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
			M.-%			
1	2	3	4	5	6	7
BBS	0,125/4	10 min.	5,51	5,57	5,01	5,36
		24 h	5,87	6,20	5,73	5,93
KSB	0,125/2	10 min.	7,13	6,85	7,43	7,13
		24 h	6,51	6,35	6,65	6,50
ZBS	0,125/2	10 min.	8,16	8,03	8,60	8,26
		30 min.	6,95	7,88	7,52	7,45
		24 h	7,82	8,58	8,36	8,25

Tabelle A5: Trockenrohichte der Brechsande bestimmt mit dem Pyknometer-Verfahren

Brechsand	Korngruppe	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
		kg/dm ³			
1	2	3	4	5	6
BBS	0,125/4	2,200	2,185	2,201	2,195
KSB	0,125/2	2,232	2,227	2,274	2,244
ZBS	0,125/2	2,056	2,065	2,071	2,064

Tabelle A6: Verfärbung der Prüflüssigkeit bei der Untersuchung der sortenreinen Brechsande auf feinverteilte Stoffe organischen Ursprungs (NaOH-Versuch)

Brechsand	Bezeichnung	Probe 1	Probe 2
		Färbung nach 24 Stunden	
1	2	3	4
BBS	1.100	schwach gelb	schwach gelb
KSB	3.100	gelb	gelb bis dunkel gelb
ZBS	4.100	klar	klar

Tabelle A7: Gehalt an abschlämmbaren Bestandteilen der sortenreinen Brechsande

Brechsand	Bezeichnung	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
		M.-%			
1	2	3	4	5	6
BBS	1.100	7,35	7,49	7,37	7,40
KSB	3.100	5,75	5,69	-	5,72
ZBS	4.100	7,43	7,85	-	7,64

Tabelle A8: Feuchtegehalt der sortenreinen Brechsande

RZ-Sand	Bezeichnung	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
		M.-%			
1	2	3	4	5	6
BBS	1.100	1,09	1,08	1,08	1,08
KSB	3.100	2,33	2,29	2,30	2,31
ZBS	4.100	0,20	0,18	0,19	0,19



VERZEICHNIS DER BISHER IN DER SCHRIFTENREIHE DES IBMB ERSCHIENENEN HEFTE (ISSN 0178-5796)

In der Schriftenreihe "Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig - ISSN 0178-5796 (Heft 1 bis 16 als "Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig", Heft 17 bis 39 als "Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig") sind bisher die nachfolgend aufgeführten Hefte erschienen.

Sie können bezogen werden von:

Institut für Baustoffe,
Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Bibliothek
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig

Tel. (05 31) 3 91-54 54
Fax (05 31) 3 91-45 73
E-Mail o.dienelt@tu-bs.de

oder über jede Buchhandlung.

Kosten:
Je nach Umfang zwischen DM 10,- und
DM 60,-.

Vergriffene Hefte können als Kopien gegen
Erstattung der Kopierkosten bezogen werden.

Heft 1:

Deters, R.: Über das Verdunstungsverhalten und den Nachweis öligler Holzschutzmittel. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1962; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1962

Heft 2:

Kordina, K.: Das Verhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen unter Feuerangriff. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1963; Sonderdruck aus: Beton 13(1962), S. 11-18, 81-84

Heft 3:

Eibl, J.: Zur Stabilitätsfrage des Zweigelenkbogens mit biegeweichem Zugband und schlaffen Hängestangen. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1963; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1963

Heft 4:

Kordina, K.; Eibl, J.: Ein Verfahren zur Bestimmung des Vorspannverlustes infolge Schlupf in der Verankerung. Zur Frage der Temperaturbeanspruchung von kreiszylindrischen Stahlbetonsilos. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1964; Sonderdruck aus: Beton- und Stahlbetonbau 58(1963), S. 265-268; 59(1964), S. 1-11

Heft 5:

Ertingshausen, H.: Über den Schalungsdruck von Frischbeton. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1965; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Hannover, 1965

Heft 6:

Waubke, N.V.: Transportphänomene in Betonporen. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1966; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1968

Heft 7:

Ehm, H.: Ein Beitrag zur rechnerischen Bemessung von brandbeanspruchten balkenartigen Stahlbetonbauteilen. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1967; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1967

Heft 8:

Steinert, J.: Möglichkeiten der Bestimmung der kritischen Last von Stab- und Flächentragwerken mit Hilfe ihrer Eigenfrequenz. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1967; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1967

Heft 9:

Lämmke, A.: Untersuchungen an dümm-schichtbildenden Feuerschutzmitteln. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1967; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1967

Heft 10:

Rafla, K.: Beitrag zur Frage der Kippstabilität aufgehängter Träger. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1968; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1968

Heft 11:

Ivanyi, G.: Die Traglast von offenen, kreisförmigen Stahlbetonquerschnitten: Brazier-Effekt. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1968; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1968

Heft 12:

Meyer-Ottens, C.: Brandverhalten verschiedener Bauplatten aus Baustoffen der Klassen A und B. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1969

Heft 13:

Fuchs, G.: Zum Tragverhalten von kreisförmigen Doppelsilos unter Berücksichtigung der Eigensteifigkeit des Füllgutes. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1968; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1968

Heft 14:

Meyer-Ottens, C.: Wände aus Holz und Holzwerkstoffen unter Feuerangriff. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1970; Sonderdruck aus: Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, H.56(1969)

Heft 15:

Lewandowski, R.: Beurteilung von Bauwerksfestigkeiten anhand von Betongütekübeln und -bohrproben. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1970; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1970

Heft 16:

Neubauer, F.-J.: Untersuchungen zur Frage der Rissesicherung von leichten Trennwänden aus Gips-Wandbauplatten. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Braunschweig, 1970; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1969

Heft 17:

Meyer-Ottens, C.; Kordina, K.: Gutachten über das Brandverhalten von Bauteilen aus dampfgehärtetem Gasbeton: aufgestellt für den Fachverband Gasbetonindustrie. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1970

Heft 17:

Meyer-Ottens, C.; Kordina, K.: Gutachten über das Brandverhalten von Bauteilen aus dampfgehärtetem Gasbeton. Erw. Neuaufl. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1974

Heft 18:

Bödeker, W.: Die Stahlblech-Holz-Nagelverbindung und ihre Anwendung: Grundlagen und Bemessungsvorschläge. Braunschweig. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1971; Zugl.: Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1971, ISBN 3-89288-057-3

Heft 19:

Meyer-Ottens, C.: Bauaufsichtliche Brandschutzvorschriften: Beispiele für ihre Erfüllung bei Wänden, Brandwänden und Decken. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1971

Heft 20:

Liermann, K.: Das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbrückenpfeilern mit Rollenlagern. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1972; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1972, ISBN 3-89288-056-5

Heft 22:

Nürnberg, U.: Zur Frage des Spannungsrißkorrosionsverhaltens kohlenstoffarmer Betonstähle in Nitratlösungen unter Berücksichtigung praxisnaher Verhältnisse. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1972; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1972, ISBN 3-89288-054-9

Heft 23:

Meyer-Ottens, C.: Zur Frage der Abplatzungen an Betonbauteilen aus Normalbeton bei Brandbeanspruchung. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1972; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1972

Heft 24:

El-Arousy, T.H.: Über die Steinkohlenflugasche und ihre Wirkung auf die Eigenschaften von Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge im frischen und festen Zustand. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1973; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1973, ISBN 3-89288-053-0

Heft 25:

Rieche, G.: Mechanismen der Spannungskorrosion von Spannstählen im Hinblick auf ihr Verhalten in Spannbetonkonstruktionen. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1973; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1973, ISBN 3-89288-052-2

Heft 26:

Tennstedt, E.: Beitrag zur rechnerischen Ermittlung von Zwangsschnittgrößen unter Berücksichtigung des wirklichen Verformungsverhaltens des Stahlbetons. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1974; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1974, ISBN 3-89288-051-4

Heft 27:

Schneider, U.: Zur Kinetik festigkeitsmindernder Reaktionen in Normalbetonen bei hohen Temperaturen. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1973; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1973

Heft 28:

Neisecke, J.: Ein dreiparametriges, komplexes Ultraschall-Prüfverfahren für die zerstörungsfreie Materialprüfung im Bauwesen. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1974; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1974, ISBN 3-89288-050-6

Heft 29:

Kordina, K.; Maack, P.; Hjorth, O.: Traglastermittlung an Stahlbeton-Druckgliedern. Schlußbericht (AIF-Nr. 956). Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1974, ISBN 3-89288-048-4

Heft 30:

Eibl, J.; Ivanyi, G.: Berücksichtigung der Torsionssteifigkeit von Randbalken bei Stahlbetondecken. Schlußbericht, Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1974

Heft 31:

Kordina, K.; Janko, B.: Stabilitätsnachweise von Rahmensystemen im Stahlbetonbau. Schlußbericht (AIF-Nr. 1388), Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1974, ISBN 3-89288-049-2

Heft 32:

Hjorth, O.: Ein Beitrag zur Frage der Festigkeiten und des Verbundverhaltens von Stahl und Beton bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1976; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1975

Heft 33:

Klingsch, W.: Traglastberechnung instationär thermisch belasteter schlanker Stahlbetondruckglieder mittels zwei- und dreidimensionaler Diskretisierung. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1976; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1976

Heft 34:

Djamous, F.: Thermische Zerstörung natürlicher Zuschlagstoffe im Beton. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1977; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1977

Heft 35:

Haksever, A.: Zur Frage des Trag- und Verformungsverhaltens ebener Stahlbetonrahmen im Brandfall. Braunschweig. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1977; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1977

Heft 36:

Storkebaum, K.-H.: Ein Beitrag zur Traglastermittlung von vierseitig gelagerten Stahlbetonwänden. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1977; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1977, ISBN 3-89288-045-X

Heft 37:

Bechtold, R.: Zur thermischen Beanspruchung von Außenstützen im Brandfall. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1977; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1977, ISBN 3-89288-046-8

Heft 38:

Steinert, J.: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesbeton aus dem Wassereindringverhalten. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1977; Unveränderter Nachdruck der Erstveröffentlichung Bad Honnef, Osang, 1977 (Zivilschutzforschung, Bd. 7)

Heft 39:

Weiß, R.: Ein haufwerkstheoretisches Modell der Restfestigkeit geschädigter Betone. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1978; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1978, ISBN 3-89288-047-6

Heft 40:

Alda, W.: Zum Schwingkriechen von Beton. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1978; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1978, ISBN 3-89288-035-2

Heft 41:

Teutsch, M.: Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken mit rechteckigem Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1979; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1979, ISBN 3-89288-036-0

Heft 42:

Schneider, U.: Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1979; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1979

Heft 43:

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz: Veröffentlichungen 1967 bis 1979. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1979, ISBN 3-89288-037-9

Heft 44:

Kordina, K.; Fröning, H.: Druckmessungen in Silozellen mit einer neu entwickelten Sonde. Abschlußbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1979, ISBN 3-89288-038-7

Heft 45:

Henke, V.: Ein Beitrag zur Zuverlässigkeit frei gelagerter Stahlbetonstützen unter genormter Brandeinwirkung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1980; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1980

Heft 46:

Schneider, U.; Haksever, A.: Wärmebilanzrechnungen für Brandräume mit unterschiedlichen Randbedingungen (Teil 1). Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1980

Heft 47:

Walter, R.: Partiiell brandbeanspruchte Stahlbetondecken: Berechnung des inneren Zwanges mit einem Scheibenmodell. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1981; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1981, ISBN 3-89288-039-5

Heft 48:

Svensvik, B.: Zum Verformungsverhalten gerissener Stahlbetonbalken unter Ein-
schluß der Mitwirkung des Betons auf Zug
in Abhängigkeit von Last und Zeit. Institut
für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig,
1981; Zugl.: Dissertation, Technische Uni-
versität Braunschweig, 1981, ISBN 3-
89288-040-9

Heft 49:

Institut für Baustoffe, Massivbau und
Brandschutz: Veröffentlichungen 1967 bis
1981. Institut für Baustoffe, Massivbau und
Brandschutz der Technischen Universität
Braunschweig, 1981, ISBN 3-89288-041-7

Heft 50:

Ojha, S.K.: Die Steifigkeit und das Verfor-
mungsverhalten von Stahlbeton- und
Spannbetonbalken unter kombinierter Be-
anspruchung aus Torsion, Biegemoment,
Querkraft und Axialkraft. Institut für Bau-
stoffe, Massivbau und Brandschutz der
Technischen Universität Braunschweig,
1982, ISBN 3-89288-042-5

Heft 51:

Henke, V.: Zusammenstellung und Anwen-
dung Bayes'scher Verfahren bei der Stich-
probenbeurteilung. Projekt D1 des SFB
148. Institut für Baustoffe, Massivbau und
Brandschutz der Technischen Universität
Braunschweig, 1982, ISBN 3-89288-043-3

Heft 52:

Haksever, A.: Stahlbetonstützen mit Recht-
eckquerschnitten bei natürlichen Bränden.
Institut für Baustoffe, Massivbau und
Brandschutz der Technischen Universität
Braunschweig, 1982; Zugl.: Habil.-Schr.,
Technische Universität Istanbul, 1982,
ISBN 3-89288-044-1

Heft 53:

Weber, V.: Untersuchung des Reiß- und
Verformungsverhaltens segmentärer Spann-
betonbauteile. Braunschweig. Institut für
Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der
Technischen Universität Braunschweig,
1982; Zugl.: Dissertation, Technische Uni-
versität Braunschweig, 1982, ISBN 3-
89288-017-4

Heft 54:

Ranisch, E.-H.: Zur Tragfähigkeit von Ver-
klebungen zwischen Baustahl und Beton:
geklebte Bewehrung. Institut für Baustoffe,
Massivbau und Brandschutz der Techni-
schen Universität Braunschweig, 1982;
Zugl.: Dissertation, Technische Universität
Braunschweig, 1982

Heft 54:

Ranisch, E.-H.: Zur Tragfähigkeit von Ver-
klebungen zwischen Baustahl und Beton:
geklebte Bewehrung. Unveränderter Nach-
druck der Ausgabe 1982. Institut für Bau-
stoffe, Massivbau und Brandschutz der
Technischen Universität Braunschweig,
1986; Zugl.: Dissertation, Technische Uni-
versität Braunschweig, 1982, ISBN 3-
89288-010-7

Heft 55:

Wiedemann, G.: Zum Einfluß tiefer Tempe-
raturen auf Festigkeit und Verformung von
Beton. Institut für Baustoffe, Massivbau
und Brandschutz der Technischen Universi-
tät Braunschweig, 1982; Zugl.: Disserta-
tion, Technische Universität Braunschweig,
1982

Heft 56:

Timm, R.: Ein geometrisch und physika-
lisch nichtlineares Rechenmodell zur opti-
malen Biegebemessung ebener Stahlbeton-
rahmen. Institut für Baustoffe, Massivbau
und Brandschutz der Technischen Universi-
tät Braunschweig, 1982; Zugl.: Disserta-
tion, Technische Universität Braunschweig,
1982, ISBN 3-89288-018-2

Heft 57:

Diederichs, U.: Untersuchungen über den Verbund zwischen Stahl und Beton bei hohen Temperaturen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1983; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1983, ISBN 3-89288-019-0

Heft 58:

Schneider, U.: Wärmebilanzrechnungen in Verbindung mit Versuchen in Brandräumen (Teil 2). Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1983, ISBN 3-89288-020-4

Heft 59:

Dobbernack, R.: Wärmebilanzrechnungen in Brandräumen unter Berücksichtigung der Mehrzonenmodellbildung (Teil 3). Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1983, ISBN 3-89288-021-2

Heft 60:

Hillger, W.: Verbesserungen und Erweiterungen von Ultraschallprüfverfahren zur zerstörungsfreien Fehlstellen- und Qualitätskontrolle von Betonbauteilen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1983; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1983, ISBN 3-89288-014-X

Heft 61:

Blume, F.: Zur Wirklichkeitsnähe der Lastannahmen in Silovorschriften für Zellen aus Stahlbeton und Spannbeton. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1984; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1984, ISBN 3-89288-013-1

Heft 62:

Nölting, D.: Das Durchstanzen von Platten aus Stahlbeton : Tragverhalten, Berechnung, Bemessung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1984; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1984, ISBN 3-89288-012-3

Heft 63:

Wesche, J.: Brandverhalten von Stahlbetonplatten im baupraktischen Einbauzustand. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1985; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1985, ISBN 3-89288-009-3

Heft 64:

Droese, S.: Untersuchungen zur Technologie des Gleitschalungsbau. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1985; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1985, ISBN 3-89288-000-X

Heft 65:

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz: Forschungsarbeiten 1978 - 1983. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1984, ISBN 3-89288-001-8

Heft 66:

Hegger, J.: Einfluß der Verbundart auf die Grenztragfähigkeit von Spannbetonbalken. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1985; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1985, ISBN 3-89288-002-6

Heft 67:

Kepp, B.: Zum Tragverhalten von Verankerungen für hochfeste Stäbe aus Glasfaserverbundwerkstoff als Bewehrung im Spannbetonbau. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1985; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1985, ISBN 3-89288-003-4

Heft 68:

Sager, H.: Zum Einfluß hoher Temperaturen auf das Verbundverhalten von einbetonierten Bewehrungsstäben. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1985; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1985, ISBN 3-89288-004-2

Heft 69:

Haß, R.: Zur praxisingerechten brandschutztechnischen Beurteilung von Stützen aus Stahl und Beton. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1986; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1986, ISBN 3-89288-005-0

Heft 70:

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz: 17. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, März 1986, Kurzfassungen der Beiträge. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1986, ISBN 3-89288-006-9

Heft 71:

Ehm, C.: Versuche zur Festigkeit und Verformung von Beton unter zweiaxialer Beanspruchung und hohen Temperaturen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1986; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1986, ISBN 3-89288-007-7

Heft 72:

Hartwich, K.: Zum Reiß- und Verformungsverhalten von Stahlfaserverstärkten Stahlbetonstäben unter Längszug. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1986; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1986, ISBN 3-89288-008-5

Heft 73:

Scheuermann, J.: Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf Verbund und Ribbildung von Stahlbetonbauteilen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-011-5

Heft 74:

Hinrichsmeyer, K.: Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-015-8

Heft 75:

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz: Fachseminar Neue Bemessungsregeln durch Änderung der Stahlbeton- und Spannbetonvorschriften DIN 1045, DIN 4227, Juni 1986, Kurzfassungen der Beiträge. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1986, ISBN 3-89288-022-0

Heft 76:

Budelmann, H.: Zum Einfluß erhöhter Temperaturen auf Festigkeit und Verformung von Beton mit unterschiedlichen Feuchtegehalten. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-016-6

Heft 77:

Großmann, F.: Spannungen und bruchmechanische Vorgänge im Normbeton unter Zugbeanspruchung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-023-9

Heft 78:

Rohling, A.: Zum Einfluß des Verbundkriechens auf die Rißbreitenentwicklung sowie auf die Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-024-7

Heft 79:

Henning, W.: Zwangrißbildung und Bewehrung von Stahlbetonwänden auf steifen Unterbauten. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-025-5

Heft 80:

Richter, E.: Zur Berechnung der Biegetragfähigkeit brandbeanspruchter Spannbetonbauteile unter Berücksichtigung geeigneter Vereinfachungen für die Materialgesetze. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-026-3

Heft 81:

Kiel, M.: Nichtlineare Berechnung ebener Stahlbetonflächentragwerke unter Einfluß von Brandbeanspruchung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1987; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1987, ISBN 3-89288-027-1

Heft 82:

Konietzko, A.: Polymerspezifische Auswirkungen auf das Tragverhalten modifizierter zementgebundener Betone (PCC). Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1988; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1988, ISBN 3-89288-028-X

Heft 83:

Grzeschkowitz, R.: Zum Trag- und Verformungsverhalten schlanker Stahlbetonstützen unter besonderer Berücksichtigung der schiefen Biegung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1988; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1988, ISBN 3-89288-030-1

Heft 84:

Wiese, J.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten unter partieller Brandbeanspruchung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1988; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1988, ISBN 3-89288-031-X

Heft 85:

Rudolph, K.: Traglastberechnung zweiachsig biegebeanspruchter Stahlbetonstützen unter Brandeinwirkung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1988; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1988, ISBN 3-89288-032-8

Heft 86:

Kordina, K.; Meyer-Ottens, C.; Noack, I.: Einfluß der Eigenbrandlast auf das Brandverhalten von Bauteilen aus brennbaren Baustoffen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1989, in Vorbereitung, ISBN 3-89288-058-1

Heft 87:

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz: Forschungsarbeiten 1984 - 1989. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1989, ISBN 3-89288-034-4

Heft 88:

Grossert, E.: Untersuchungen zum Tragverhalten von Massivbrücken mit zweizelligem Kastenquerschnitt. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1989; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1989, ISBN 3-89288-059-X

Heft 89:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Weiterbildungsseminar "Bauen in Europa", 15.-16. November 1990 in Braunschweig, Kurzreferate, ISBN 3-89288-063-8

Heft 90:

Falkner, H.; Teutsch, M.; Claußen, T.; Voß, K.-U.: Vorspannung im Hochbau. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1991, ISBN 3-89288-064-6

Heft 91:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Fachtagung Spannbeton im Hoch- und Industriebau, Kurzreferate, 1991, ISBN 3-89288-065-4

Heft 92:

Heins, T.: Simulationsmodell zur sicherheitstechnischen Beurteilung der Rauchausbreitung in ausgedehnten Räumen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1991; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, ISBN 3-89288-066-2

Heft 93:

Hagen, E.: Zur Prognose des Gefährdungspotentials von Raumbränden. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1992; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1991, ISBN 3-89288-072-7

Heft 94:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Fachseminar "Instandsetzung und Ertüchtigung von Massivbauten", 14.-15. November 1991 in Braunschweig, Kurzreferate, ISBN 3-89288-068-9

Heft 95:

Qualitätssicherung im Bauwesen, VMPA-Tagung 1992, 25.-26.06.1992, Tagungsbericht, ISBN 3-89288-071-9

Heft 96:

Weiterbildungsseminar "Brandschutz im Industriebau", 30.09.1992 in Braunschweig, Kurzreferate, ISBN 3-89288-070-0

Heft 97:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Fachseminar "Neue Technologien im Bauwesen", 12.-13.11.1992 in Braunschweig, Kurzreferate, ISBN 3-89288-073-5

Heft 98:

Gunkler, E.: Verstärkung biegebeanspruchter Mauerwerkswände durch bewehrte Ergänzungsschichten. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1993; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1992, ISBN 3-89288-074-3

Heft 99:

Dorn, T.: Zur Berechnung des Tragverhaltens brandbeanspruchter Tragwerke in Verbundbauweise unter besonderer Berücksichtigung der Träger-Stützen-Anschlüsse. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1993; Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1992, ISBN 3-89288-075-1

Heft 100:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Fachseminar "Stahlfaserbeton", 04.03.1993 in Braunschweig, Kurzreferate, ISBN 3-89288-076-X

Heft 101:

Falkner, H.; Teutsch, M.: Vergleichende Untersuchungen an unbewehrten und stahlfaserbewehrten Industriefußböden. Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1993, ISBN 3-89288-077-8

Heft 102:

Falkner, H.; Teutsch, M.: Comparative studies of plain and steel fiber reinforced concrete industrial ground slabs. Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1993, ISBN 3-89288-078-6

Heft 103:

Braunschweiger Brandschutz-Tage 1993: Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis. 06.-07.10.1993, Kurzreferate, ISBN 3-89288-079-4

Heft 104:

Thienel, K.-C.: Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1993

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1993, ISBN 3-89288-080-8

Heft 105:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Braunschweiger Bauseminar 1993 "Dauerhafte Bauwerke aus Faserbeton", 11.-12.11.1993 in Braunschweig, Kurzreferate, ISBN 3-89288-081-6

Heft 106:

Neuentwicklungen im baulichen Brandschutz. Dr. Meyer-Ottens 60 Jahre; Fachseminar 18.03.1994 in Braunschweig, ISBN 3-89288-085-9

Heft 107:

Bunte, D.: Zum karbonatisierungsbedingten Verlust der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1994
Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1993, ISBN 3-89288-086-7

Heft 108:

Holzenkämpfer, P.: Ingenieurmodell des Verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1994
Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1994, ISBN 3-89288-087-5

Heft 109:

Forschungsarbeiten 1990 - 1994. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1994, ISBN 3-89288-088-3

Heft 110:

Falkner, H.; Teutsch, M.; Rohde, S.: Untersuchung der Schubtragfähigkeit und der Wasserundurchlässigkeit von Arbeitsfugen unter Verwendung von Stremaform-Abschalelementen.

Falkner, H.; Teutsch, M.; Claußen, T.: Schubtragfähigkeit des Vergußbetons zwischen Köcher-, Block oder Hülsenfundamenten und Stützenfuß bei unterschiedlich profilierten Betonoberflächen.

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1994, ISBN 3-89288-089-1

Heft 111:

Voß, K.-U.: Zum Trag- und Verformungsverhalten bei Schwellbeanspruchung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1994

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1993, ISBN 3-89288-090-5

Heft 112:

Weiterbildungsseminar Brandschutz bei Sonderbauten: 05./06.10.1994 in Braunschweig; Kurzreferate, 1994, ISBN 3-89288-092-1

Heft 113:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Aus der Forschung in die Praxis: 10./11.11.1994; Braunschweiger Bauseminar 1994, ISBN 3-89288-091-3

Heft 114:

Warnecke, P.: Tragverhalten und Konsolidierung von historischem Natursteinmauerwerk, 1995

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1995, ISBN 3-89288-094-8

Heft 115:

Braunschweiger Brandschutz-Tage 1995: 6. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis: 04.-05.10.1995, Kurzreferate, ISBN 3-89288-093-X

Heft 116:

Huang, Z.: Grenzbeanspruchung gebetteter Stahlfaserbetonplatten, 1995

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1995, ISBN 3-89288-095-6

Heft 117:

Falkner, H.; Teutsch, M.; Huang, Z.: Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1995, ISBN 3-89288-096-4

Heft 118:

Kubat, B.: Durchstanzverhalten von vorgespannten, punktförmig gestützten Platten aus Stahlfaserbeton, 1995

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1995, ISBN 3-89288-097-2

Heft 119:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Dichte Bauwerke: 09./10.11.1995; Braunschweiger Bauseminar 1995, ISBN 3-89288-091-3

Heft 120:

Steinert, C.: Bestimmung der Wärmeübergangsbedingungen auf Bauteile im Brandfall, Abschlußbericht, 1995, ISBN 3-89288-099-9

Heft 121:

Schütte, J.; Teutsch, M.; Falkner, H.: Fugenlose Betonbodenplatten, Forschungsbericht, 1996, ISBN 3-89288-100-6

Heft 122:

Weiterbildungsseminar Brandschutz bei Sonderbauten: 24./25.09.1996 in Braunschweig, Kurzreferate, 1996, ISBN 3-89288-101-4

Heft 123:

Droese, S.; Riese, A.: Belastungsversuche an zwei Durchlauf-Plattenstreifen aus Elementplatten mit Aufbeton aus Stahlfaserbeton, 1996, ISBN 3-89288-102-4

Heft 124:

Hankers, C.: Zum Verbundtragverhalten laschenverstärkter Betonbauteile unter nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung, 1996
Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1996, ISBN 3-89288-103-0

Heft 125:

Schmidt-Döhl, F.: Ein Modell zur Berechnung von kombinierten chemischen Reaktions- und Transportprozessen und seine Anwendung auf die Korrosion mineralischer Baustoffe, 1996

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1996, ISBN 3-89288-104-9

Heft 126:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Ingenieurbauwerke mit neuen Konzepten: 14./15.11.1996, Braunschweiger Bauseminar 1996, ISBN 3-89288-105-7

Heft 127:

Forschung über Baudenkmalpflege - Arbeitsberichte: 1990 - 1993, 1996, ISBN 3-89288-106-5

Heft 128:

Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy: Baustoffe in Praxis, Lehre und Forschung, 1997, ISBN 3-89288-107-3

Heft 129:

Forschung über Baudenkmalpflege - Arbeitsberichte: 1994, 1997, ISBN 3-89288-108-1

Heft 130:

Forschung über Baudenkmalpflege - Arbeitsberichte: 1995, 1997, ISBN 3-89288-109-X

Heft 131:

Falkner, H.; Teutsch, M.; Klinkert H.: Trag- und Verformungsverhalten dynamisch beanspruchter Fahrbahnen aus Beton- und Stahlfaserbeton, Forschungsbericht, 1997, ISBN 3-89288-110-3

Heft 132:

Schütte, J.: Einfluß der Lagerungsbedingungen auf Zwang in Betonbodenplatten, 1997

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1997, ISBN 3-89288-111-1

Heft 133:

Braunschweiger Brandschutz-Tage 1997: 7. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis: 01.-02.10.1997, Kurzreferate, ISBN 3-89288-112-X

Heft 134:

Ameler, J.: Betonverhalten bei hohen Temperaturen und triaxialer Beanspruchung - FE-Modell auf der Basis der Betonstruktur, 1997

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1997, ISBN 3-89288-113-8

Heft 135:

Tagung Konsolidierung von historischem Natursteinmauerwerk: 06./07.11.1997 in Braunschweig, ISBN 3-89288-114-6

Heft 136:

Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Innovatives Bauen: 13./14.11.1997, Braunschweiger Bauseminar 1997, ISBN 3-89288-115-4

Heft 137:

Forschung über Baudenkmalpflege - Arbeitsberichte: 1996 - 1997, 1998, ISBN 3-89288-116-2

Heft 138:

Scheibe, M.: Vorhersage des Zeitstandsverhaltens unidirektionaler Aramidfaserverbundstäbe in alkalischer Umgebung, 1998, Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 1998, ISBN 3-89288-117-0

Heft 139:

Weiterbildungsseminar Brandschutz bei Sonderbauten : 29./30.9.1998 in Braunschweig ; Kurzreferate, 1998, ISBN 3-89288-118-9

Heft 140:

Gutsch, A.: Stoffeigenschaften jungen Betons - Versuche und Modelle, 1998, Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., ISBN 3-89288-119-7

Heft 141:

Falkner, H. ; Teutsch, M. [Hrsg.] Beton auf neuen Wegen : 12.-13.11.1998 ; Braunschweiger Bauseminar 1998, ISBN 3-89288-120-0

Heft 142:

Betonbau - Forschung, Entwicklung und Anwendung : Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing Horst Falkner am 20.4.1999. 1999.
ISBN 3-89288-121-9

Heft 143:

Teutsch, M ; Klinkert, H.
Leistungsklassen von Stahlfaserbeton.
1999.
ISBN 3-89288-122-7

Heft 144:

Forschungsarbeiten 1995 - 1999. 1999.
ISBN 3-89288-123-5

Heft 145:

Braunschweiger Brandschutztage 1999: 8. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis ; 4.-5. Oktober 1999 in Braunschweig., Kurzreferate. 1999.
ISBN 3-89288-124-3

Heft 146:

Falkner, H. ; Teutsch, M. [Hrsg.]
Bauen im nächsten Jahrtausend : 11.11.-12.11.1999 ; Braunschweiger Bauseminar 1999.
ISBN 3-89288-125-1

Heft 147:

Weiterbildungsseminar Brandschutz bei Sonderbauten: 28./29.3.2000 in Braunschweig; Kurzreferate. 2000.
ISBN 3-89288-126-X

Heft 148:

Hariri, K.: Bruchmechanisches Verhalten jungen Betons - Laser-Speckle-Interferometrie und Modellierung der Ribprozeßzone. 2000.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2000.
ISBN 3-89288-127-8

Heft 149:

Wigger, H.: Rissbildung in historischem Natursteinmauerwerk : Beobachtung, Versuche und Berechnungsmodelle. 2000.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2000.
ISBN 3-89288-128-6

Heft 150:

Neubauer, U.: Verbundtragverhalten geklebter Lamellen aus Kohlenstofffaser - Verbundwerkstoff zur Verstärkung von Betonbauteilen. 2000
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2000.
ISBN 3-89288-129-4.

Heft 151:

Brandschutz in Chemikalienlagern. 2000.
ISBN 3-89288-130-8

Heft 152:

Falkner, H. ; Teutsch, M. [Hrsg.]
Trends und Entwicklungen im Bauwesen : 9.-10.11.2000 ; Braunschweiger Bauseminar 2000.
ISBN 3-89288-131-6

Heft 153:

Rostásy, F.S. ; Budelmann, H. [Hrsg.]
Rissbeherrschung massiger Betonbauteile : Bauwerk, Werkstoff, Simulation ; Braunschweig, 20.3.2001.
ISBN 3-89288-132-4

Heft 154:

Krauß, M. ; Hariri, K. ; Rostásy, F.S.
Hydratationsgrad, Ultraschall-Technik zur Beschreibung der Erhärtung, bruchmechanisches Verhalten jungen Betons : Berichte ; Forschungsprojekt der EU (Brite Euram BE96-3843), IPACS. 2001.
ISBN 3-89288-135-9.

Heft 155:

Gutsch, A. ; Rostásy, F.S.
Spannungs-Dehnungslinie, viskoelastisches Verhalten und autogenes Schwinden jungen Betons : Berichte ; Forschungsprojekt der EU (Brite Euram BE96-3843), IPACS. 2001.
ISBN 3-89288-136-7

Heft 156:

Rostásy, F.S. ; Krauß, M. ; Gutsch, A.
Spannungsberechnung und Risskriterien für
jungen Beton – Methoden des iBMB : Be-
richt : Forschungsprojekt der EU (Brite Eu-
ram BE96-3843), IPACS. 2001.
ISBN 3-89288-137-5

Heft 157:

Rostásy, F.S. ; Krauß, M. ; Gutsch, A.
Früher Zwang in massigen Sohlplatten :
Bericht : Forschungsprojekt der EU (Brite
Euram BE96-3843), IPACS. 2001.
ISBN 4-89288-138-3

Heft 158:

Braunschweiger Brandschutztage 2001: 9.
Fachseminar Brandschutz - Forschung und
Praxis ; 1.-2. Oktober 2001 in Braun-
schweig., Kurzreferate. 2001.
ISBN 3-89288-139-1

Heft 159:

Falkner, H. ; Teutsch, M. [Hrsg.]
Bauen im Wandel der Zeit : 8.-9.11.2001 ;
Braunschweiger Bauseminar 2001. 2001.
ISBN 3-89288-140-5.

Heft 160:

Beiträge zum 40. Forschungskolloquium
des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton :
11.-12.10.2001 in Braunschweig. 2001.
ISBN 3-89288-141-3

Heft 161:

Dora, B.: Hydraulisch erhärtende Baustoffe
aus Betonbrechsand – Phasenveränderun-
gen durch Temperaturbehandlung und Ein-
satzmöglichkeit.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2001.
ISBN 3-89288-142-1

Druck und Einband
Druckerei & Buchbinderei Wolfram Schmidt
38114 Braunschweig · Hamburger Str. 267
Telefon: 0531/ 33 75 89 · Fax: 0531/ 34 44 49
E-Mail: Schmidt.Druck.BS@t-online.de