

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ

Geotechnische Serie, Lieferung 59

Herausgegeben von der

Schweizerischen Geotechnischen Kommission

Verwertbarkeit karbonathaltiger Molassesandsteine als Rohstoffe für dampfgehärtete Baustoffe

VON

P. ZGRAGGEN UND T.J. PETERS

KOMMISSIONSVERLAG: KÜMMERLY & FREY, GEOGRAPHISCHER VERLAG, BERN

1980

OFFSETDRUCK: HELIOPRINT AG, ZÜRICH

VORWORT DER SCHWEIZERISCHEN GEOTECHNISCHEN KOMMISSION

An der Sitzung vom 24. Januar 1980 beschloss die Kommission die Arbeit von P. Zraggen und Tj. Peters „Verwertbarkeit karbonathaltiger Molassesandsteine als Rohstoffe für dampfgehärtete Baustoffe“ in die Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, aufzunehmen.

Frühere Untersuchungen auf dem Gebiet der keramischen Baustoffe erfolgten an quartären fluvioglazialen Sanden (geotech. Ser. 56) und an Kiesschlämmen (geotech. Ser. 58). Da jedoch in der Schweiz ausgedehnte reine Quarzsandvorkommen bisher nicht bekannt sind, war auch die Erforschung des Verhaltens unserer kalk- und feldspathaltigen Molassesandsteine im hydrothermalen Härtungsprozess von grossem Interesse. Ihre grosse Verbreitung und Mächtigkeiten sowie ihre günstige Lage im Mittelland könnten eine wesentliche Rolle für eine allfällige Nutzung als Baurohstoffe spielen.

Die Kommission dankt den Verfassern für diesen nützlichen Beitrag. Sie schliesst sich dem Dank an die im Dankwort der Autoren genannten, die Arbeit fördernden Stellen an.

Für den Inhalt von Text und Figuren sind die Autoren allein verantwortlich.

Der Präsident der
Schweizerischen Geotechnischen Kommission
V. Trommsdorff

Zürich, November 1980

INHALTSVERZEICHNIS

Abstract	5
Zusammenfassung	6
1. Einleitung und Problemstellung	7
2. Geologie und Mineralogie der in Betracht gezogenen Molassesandsteine	8
2.1 Auswahl und Verbreitung der untersuchten Proben in der schweizerischen Molasse	8
2.2 Geologie und Mineralogie der gesammelten Proben	8
2.2.1 Geologie	8
2.2.2 Mineralogie	10
2.2.2.1 Untersuchungsmethoden.	10
2.2.2.2 Mineralogische Zusammensetzung der untersuchten Proben.	14
3. Charakterisierung der 15 Proben, welche als Rohmaterial für den Härtingsprozess ausgewählt wurden.	16
3.1 Auswahl, Bezeichnung und Verbreitung der Proben	16
3.2 Geologie und Mineralogie	16
3.2.1 Rasterelektronenmikroskop (REM) – Aufnahmen einiger typischer Molassesandsteine	19
4. Aufbereitung der 15 Proben, welche für die hydrothermalen Härtingsversuche ausgewählt wurden	21
5. Aktivierung der Proben.	23
5.1 Einleitung	23
5.2 Herstellungsbedingungen.	23
6. Herstellung der Probekörper und deren Härtung unter Sattdampf-Bedingungen	26
7. Physikalische Untersuchungen an den gehärteten Proben.	28
7.1 Einleitung	28
7.2 Resultate	28
7.2.1 Die Abhängigkeit der physikalischen Eigenschaften vom aktiven CaO-Gehalt	28
7.2.1.1 Aktives CaO – Trockenraumgewicht	30
7.2.1.2 Aktives CaO – Druckfestigkeit.	33
7.2.1.3 Aktives CaO – Biegezugfestigkeit	33
7.2.1.4 Aktives CaO – E-Modul	35
7.2.1.5 Aktives CaO – Schwinden.	35
7.2.1.6 Aktives CaO – Wassersaugvermögen	35
7.2.1.7 Vergleich der physikalischen Eigenschaften der verpressten mit den gegossenen Proben in Abhängigkeit vom aktiven CaO-Gehalt.	37
7.2.2 Die gegenseitigen Abhängigkeiten der physikalischen Eigenschaften	40
7.2.3 Vergleich der gegenseitigen Abhängigkeiten der physikalischen Eigenschaften der verpressten mit den gegossenen Proben	43
7.2.4 Vergleich der physikalischen Eigenschaften der aus Molassesandstein hergestellten Probekörper mit kommerziellen Kalksteinprodukten	45
8. Mineralogische Untersuchungen an den dampfgehärteten Molassesandsteinen	46
8.1 Röntgendiffraktion	46
8.2 Gefügeuntersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM)	49
9. Diskussion der Ergebnisse	53
10. Schlussfolgerung	56
Dankwort	57
Literaturverzeichnis	58
Anhang	59

ABSTRACT

In this work, the suitability of the use of carbonate-bearing sandstones from the swiss molasse basin was studied in view of the manufacture of autoclaved building products.

For this purpose, samples from 40 localities were studied mineralogically. Based on these results, 15 large (100 kg) samples were taken and pulverized. The material was activated in a laboratory rotary kiln at temperatures between 830 and 930°C depending on the kind of raw material. Test specimens were poured as in aerated concrete and pressed as for lime silica bricks and autoclaved at 200°C for 6 hrs. The following physical properties were measured: density, compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity, drying shrinkage and water absorption capacity. The raw materials, activated materials and the autoclaved products were characterized mineralogically and texturally by X-ray diffraction, chemical analyses and scanning electron-microscopy.

The amount of CaO varies in the activated samples from 3 to 55 weight %. The physical properties of the test specimens show a strong correlation with the CaO content of the activated material to about 25 weight %.

The binding mass of the autoclaved products consists mainly of 11 Å tobermorite and semi-crystalline calcium silicate hydrates. In extremely CaO-rich specimens α -C₂SH besides Ca(OH)₂ was detected.

It is concluded that several types of sandstones, present in very large amounts in the swiss molasse basin, are suitable for the manufacture of lime silica bricks and aerated concrete. Depending on the type of sandstone the activation and autoclaving conditions have to be optimized. A very large potential of raw materials for autoclaved building products is opened up.

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde geprüft, ob sich die karbonathaltigen Molassesandsteine sowie eine Sandstein/Mergel Mischung zur Herstellung dampfgehärteter Werk- bzw. Baustoffe eignen. Zu diesem Zwecke wurden von rund 40 mineralogisch untersuchten Proben eine Auswahl von 15 Proben gebrochen, gemahlen, aktiviert, gelöscht und autoklavisiert. Die Aktivierung der gemahlenden Sandsteine erfolgte in einem Labordrehrohr bei unterschiedlicher Beschickung zwischen 830° und 930°C. Für die Herstellung der Rohlinge wurde das Press- und Giessverfahren angewendet. Geprüft wurden folgende physikalische Eigenschaften: Raumgewicht, Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, statischer E-Modul, Schwindung und Wasseraugvermögen. Die qualitativen und gefügekundlichen Untersuchungen wurden mit Hilfe der Röntgendiffraktion und Rasterelektronenmikroskopie durchgeführt.

Die physikalischen Eigenschaften der dampfgehärteten Proben ergaben generell eine gute Korrelation zum aktiven CaO-Gehalt, wobei die gegossenen Proben allgemein einen kleineren Korrelationskoeffizienten zeigten. Der Gehalt an aktivem CaO lag zwischen 3 und 55%, derjenige von Quarz zwischen 18 und 44%. Gute Korrelationen bestanden ebenfalls zwischen Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit bzw. Schwindung als auch zwischen Biegezugfestigkeit und Wasseraugvermögen sowie zwischen Schwindung und Wasseraugvermögen.

11 Å Tobermorit und semikristalline CSH-Phasen (CSH I und II) bilden die Bindemasse der dampfgehärteten Proben. α -C₂SH, Vaterit sowie freies Ca(OH)₂ und Mg(OH)₂ wurden teilweise in den nicht vollständig gehärteten, sehr CaO-reichen Proben festgestellt. Calcit als Neubildung wurde in allen Proben beobachtet.

Die Untersuchungen zeigten, dass sich von den karbonathaltigen Molassesandsteinen, die Berner- und Plattensandsteine sowie der Chramburg Sandstein (Beispiel eines Helvetien Sandsteines) besonders gut für die Herstellung von dampfgehärteten Werk- bzw. Baustoffen eignen, insbesondere für die Herstellung von sog. Kalksandstein und Gasbeton. Während für die Herstellung von Kalksandstein aus den genannten Typen einzig eine Optimierung der Herstellungsbedingungen anzustreben wäre, müsste für Gasbeton eine höhere Mahlfeinheit sowie die Zumischung einer kalkreichen Probe vorgesehen werden. Dieses Problem könnte durch die Zumischung der karbonatreichen Muschel- bzw. Appenzeller-Sandsteine gelöst werden, da diese ohne Zusatz silikatischer Sande kaum verarbeitbar sind. Eine Mischung der kalkarmen aquitanen Sandsteine mit den genannten karbonatreichen Proben wäre sowohl für die Herstellung von Kalksandstein und Gasbeton erforderlich und realisierbar, da sie teilweise in demselben Steinbruch abbaubar sind. Ein gutes Resultat für die Herstellung von Kalksandstein ergab die Sandstein/Mergel-Mischung von Nuolen (Guntliweid).

1. Einleitung und Problemstellung

Im Zusammenhang mit der Erforschung der Rohstoffe der Schweiz und deren möglichen Anwendungsbereichen prüfen wir die Verwertbarkeit von Molassesandsteinen als Rohstoffe für dampfgehärtete Werk- bzw. Baustoffe. Eine erste Arbeit in dieser Richtung waren die Versuche mit einem tonarmen grobkörnigen Sandstein, bzw. tonhaltigen feinkörnigen Sandstein und einem Mergel der schweizerischen Molasse (HALLER et al., 1969). Das Bedürfnis für diese Forschungsrichtung kommt von der Kalksandstein- und Gasbetonindustrie, bedingt durch die speziellen Rohmaterialverhältnisse der Schweiz. Im Gegensatz zu Nachbarländern, besitzt die Schweiz keine wirtschaftlich brauchbaren reinen Quarzsande, welche als aktiver silikatischer Zuschlagstoff bei der Herstellung dampfgehärteter Baustoffe verwendet werden. Man ist somit gezwungen, sog. unreine Sande zu verwenden, die neben Quarz noch Feldspäte, Karbonate und Tonminerale enthalten. Es handelt sich dabei um fluvioglaziale Sande der Eis- und Nacheiszeit.

Um das Verhalten dieser unreinen Sande (ca. 50% Quarz) im Vergleich zu reinen Quarzsanden (ca. 98% Quarz) beim hydrothermalen Härtingsprozess abzuklären, entstand in Zusammenarbeit unseres Institutes mit den Zürcher Ziegeleien die Publikation von MUMENTHALER und PETERS (1977). Diese Arbeit zeigt unter anderem, dass die Menge an gelöstem SiO_2 bei gleichen Versuchsbedingungen nur wenig vom Quarzgehalt des Sandes abhängt, d.h. dass die Menge des Bindemittels der Kalksandsteine und Gasbetone – die Calciumsilikathydrate (CSH) – nur unwesentlich vom ursprünglichen Quarzgehalt des Zuschlagstoffes bestimmt wird. Verwendet man zudem noch einen geeigneten Zusatz, z.B. Portlandzement, so kann ein evtl. fehlender Anteil an löslichem SiO_2 wettgemacht werden. Betrachtet man die Summe aller physikalischen Eigenschaften der dampfgehärteten Produkte, hergestellt aus unreinen Sanden, so lassen sich diese Kalksandsteine bzw. Gasbetone mit jenen vergleichen, die mit reinen Quarzsanden hergestellt werden.

Für die wirtschaftliche Verwendung eines Rohstoffes sind unter anderem weite Verbreitung und grosse Mächtigkeit eine Voraussetzung. Zudem sollte eine potentielle Produktionsstätte für hydrothermal gehärtete Bau- bzw. Werkstoffe, wegen Umfang und Gewicht des Rohstoffes als auch des Endproduktes, nahe dem Rohstoffvorkommen und dem Verbrauchermarkt liegen. Diese Voraussetzungen erfüllen für unseren Zweck, neben den quartären fluvioglazialen Ablagerungen, nur noch die tertiären Molassegesteine im Mittelland. Die Idee der Verwendung von Molassegesteinen, speziell deren Sandsteine, war somit naheliegend. Das Bindemittel dieser Sandsteine besteht teilweise oder vollständig aus einem karbonatischen Zement. Aktiviert man nun diese karbonathaltigen Sandsteine durch Brennen bei ca. 900°C (Überführung der Karbonate in ihre Oxidform), so ist es möglich, direkt, d.h. ohne Zusatz von gebranntem Kalk oder Zement, eine Ausgangsmischung für die Herstellung dampfgehärteter Produkte zu erhalten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in dieser Arbeit versucht wurde, mit verschiedenen Molassesandstein-Typen sowie einer Sandstein-Mergel/Ton-Mischung unter standardisierten hydrothermalen Härtingsbedingungen Körper herzustellen. Bei gleichen Autoklavbedingungen wurde sowohl von gepressten als auch von gegossenen Proben ausgegangen.

Die Herstellung und die Begriffe dampf- (hydrothermal) gehärtete Baustoffe wie Kalksandstein und Gasbeton, werden in der Arbeit von MUMENTHALER und PETERS (1977) eingehend diskutiert.

2. Geologie und Mineralogie der in Betracht gezogenen Molassesandsteine

2.1 AUSWAHL UND VERBREITUNG DER UNTERSUCHTEN PROBEN IN DER SCHWEIZERISCHEN MOLASSE

Bei der Auswahl der Proben ging es primär darum, einen potentiellen Rohstoff für die Herstellung dampfgehärteter Produkte zu finden. Neben einer geeigneten Mineralogie sollte dieser Rohstoff eine möglichst weite Verbreitung und grosse Mächtigkeiten aufweisen. Eine günstige Lage, bezogen auf die städtischen Agglomerationen im schweizerischen Mittelland, war ebenfalls wünschenswert. Um ein möglichst gutes Bild über die Verwendbarkeit der wichtigsten Molassesandstein-Typen zu erhalten, wurden sekundär auch Proben gesammelt, deren Mineralogie und z.T. Lage eher als ungünstig zu bewerten sind, deren Verbreitung und Mächtigkeiten jedoch als genügend erachtet werden. Auf Molassesandsteine, die keiner der obigen Anforderungen entsprechen, wurde verzichtet. Versuchsweise wurden zudem ein paar Sammelprofile aufgenommen, welche neben Sandstein Tone und Mergel enthalten.

Den Molassesandsteinen kommt als natürlichen Bau- und Hausteinen in der Baugeschichte unserer Siedlungen grosse Bedeutung zu. Vor allem im letzten und anfangs dieses Jahrhunderts wurden riesige Mengen dieser Sandsteine für private und öffentliche Bauten, Brücken und Strassen verwendet. Für die Ermittlung der möglichen Rohstoffe war es naheliegend, folgende drei Werke als Ausgangsbasis für unsere Arbeit zu benutzen: *Schweizerische Geotechnische Kommission* (1915), DE QUERVAIN und JENNY (1951) und DE QUERVAIN (1969). Mit Hilfe dieser Daten sind u.a. Informationen über Art und Bedeutung sowie Verbreitung und Mächtigkeiten der wichtigsten Sandstein-Typen gegeben. Da die Verwitterung der meisten Molassesandsteine im Meter-Bereich liegt, waren die Angaben über im Betrieb stehende, bzw. stillgelegte Steinbrüche äusserst wertvoll, um möglichst frisches Untersuchungsmaterial zu erhalten. Die Proben stammen also – von ein paar wenigen Ausnahmen abgesehen – alle von Steinbrüchen, deren Geologie zum Teil der Spezialliteratur entnommen werden konnten. Bei 91 besuchten Aufschlüssen konnten Proben von ca. 40 Aufschlüssen entnommen werden. Gründe für diese Reduktion waren z.T. gleichartige Aufschlussverhältnisse, z.T. Überbauungen und im Kanton Waadt vor allem der Rebbau. Figur 1 zeigt die Verbreitung der in dieser Arbeit untersuchten Proben. Tabelle 1 gibt die notwendigen Erläuterungen.

2.2 GEOLOGIE UND MINERALOGIE DER GESAMMELTEN PROBEN

2.2.1 GEOLOGIE

Die nachfolgende kurze Beschreibung der Aufschlüsse, Tabelle 1, welchen Proben entnommen wurden, beschränkt sich auf folgende Punkte:

- Beschreibung der lithologischen Einheit mit ihren Besonderheiten (wie Geröllhorizonte und Holzeinlagerungen)
- Charakterisierung der Grobstratigraphie
- Aufschlussmächtigkeit

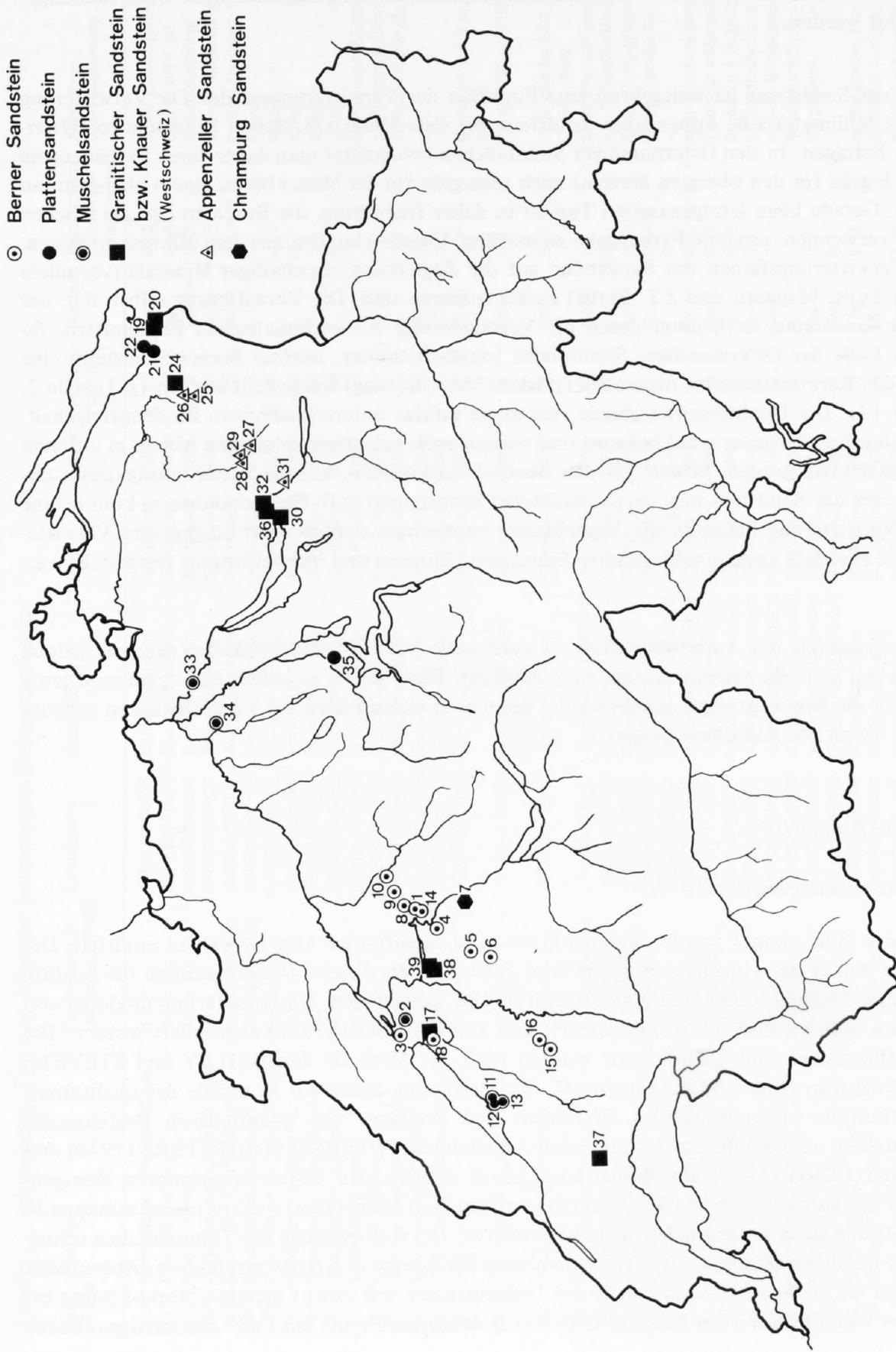


Fig. 1
Verbreitung der untersuchten Molassesandsteine

Im Rahmen dieser Arbeit konnten weder feinstratigraphische noch gefügekundliche Untersuchungen durchgeführt werden.

Die Farbe der Sandsteine ist weitgehend eine Funktion des Verwitterungsgrades. Die Verwitterung kann einige Millimeter z.B. Appenzeller Sandstein, bis viele Meter z.B. Berner Sandstein von Ostermundigen, betragen. In den Ostermundiger Steinbrüchen beobachtet man daher einen Farbübergang von gelblich-grün (in den obersten Metern) nach grau-grün (in der Mitte) bis zu einem blau-grau (an der Sohle). Gerade beim letztgenannten Typ ist es daher fragwürdig, die Bezeichnung „im frischen Bruch“ zu verwenden, um eine Farbangabe zu machen. Untersuchungen mit dem Mikroskop zeigen, dass die Verwitterungsfarben der Sandsteine auf die Zersetzung eisenhaltiger Minerale (vor allem Glaukonit, Pyrit, Magnetit und z.T. Biotit) zurückzuführen sind. Die Verwitterung selbst, d.h. der Zerfall der Sandsteine, ist bedingt durch die Verminderung des karbonatischen Bindemittels. So konnte im Falle der Ostermundiger Steinbrüche (ungeschichteter, poröser Berner Sandstein) eine Abnahme des Karbonatgehaltes nach oben (stärkste Verwitterung) festgestellt werden (s. Tabelle 2, Aufschluss 14). Die Qualitätsunterschiede, vor allem infolge unterschiedlichem Bindemittelgehalt, sind dem Steinbrucharbeiter wohl bekannt und müssen auch bei einem möglichen Abbau in unserem Falle berücksichtigt werden. Soweit wir dies beobachten konnten, war die Verwitterung umso stärker, je poröser der Sandstein war; bei geschichteten Sandsteinen (z.B. Plattensandstein) konnte eine deutliche Verwitterung beidseits der Lagerflächen beobachtet werden. Eine ausgeprägte Verwitterung konnte ebenfalls entlang tektonischen Störungen (Brüchen und Verwerfungen) festgestellt werden.

Bei der Beschreibung der Aufschlüsse (Tab. 1) werden die Aufschlussmächtigkeiten genannt, jedoch keine Angaben über die laterale Ausdehnung gemacht. Diese dürfte in jedem Falle genügend gross sein und wie die Beobachtungen immer wieder zeigten, in vielen Fällen auf weite Distanzen erstaunlicherweise die gleiche Lithologie zeigen.

2.2.2 MINERALOGIE

2.2.2.1 Untersuchungsmethoden

Mit Hilfe des Mikroskopes wurde der qualitative- und quantitative Mineralbestand ermittelt. Der quantitative Anteil der einzelnen Minerale wird geschätzt. Zu diesem Zwecke wurden die Schriffe auf Karbonat, Plagioklas und Kalifeldspat gefärbt. Die angewendete Karbonatfärbmethode ist von EVAMY and SHEARMAN (1962) entwickelt und von DICKSON (1966) abgeändert worden. Die Feldspäte (Plagioklas und Kalifeldspat) wurden nach der Methode von BAILEY and STEVENS (1960) gefärbt. Ein Philips-Diffraktometer ($\text{CuK}\alpha$ -Strahlung) diente zur Kontrolle des qualitativen und quantitativen Mineralbestandes. Methoden und Probleme der quantitativen Bestimmung, speziell von Albit und Kalifeldspat, sind in den Arbeiten von PETERS (1965), PETERS (1970) und PETERS und JENNI (1973) ausführlich beschrieben worden. Mit Hilfe des genannten Röntgen-diffraktometers wurden auch die Tonminerale anhand der Basisreflexe qualitativ und semiquantitativ (Ermittlung ihres prozentualen Anteils) bestimmt. Die Aufbereitung der Tonminerale erfolgte nach der Dekarbonatisierung der fein gemahlene Sandsteine in Atterbergzylindern (Abtrennung der Fraktion $< 2\mu$). Anschliessend wurde die Tonsuspension mit einer Calcium-Chlorid-Lösung behandelt, um Tonminerale mit Basenaustausch (z.B. Montmorillonit) mit Ca^{2+} abzusättigen. Durch

Tabelle 1: Verbreitung, Typ und Alter der untersuchten Molassesandsteine

Aufschluss	Lokalität	Landeskarte der Schweiz 1:25'000	Koordinaten	Sandstein-Typ	Stufe	Gruppe	Mächtigkeit in m	Bankung	Durchschnittliche Korngrösse in mm	Allgemeine Charakterisierung
1	Steingrübli / Ostermündigen	Worb	201125/604875	Berner Sandstein	Burdigalien	OMM	12	dm-m	0.15	mm-2 cm Mergelzwischenlagen
2	Flue / Brüttelen	Bieler See	207000/576775	Muschelsandstein	Burdigalien	OMM	8	cm	ungleich	Gerölle bis 8 cm
3	Wart / Tschugg	Bieler See	208100/571375	Berner Sandstein	Burdigalien	OMM	8	5m+3m	0.15	Feinstschichtung
4*	Grünenboden a/Gurten / Bern	Bern	196750/599825	Berner Sandstein	Burdigalien	OMM	10	dm-m	0.15	mm-cm Mergelzwischenlagen
5	Ruchmüli / Lanzenhäusern	Schwarzenburg	188350/592375	Berner Sandstein	Burdigalien	OMM	20	dm-m	0.1 u. 0.3	poröser Sandstein + dichter Sandstein
6	Konradshus / Heitenried	Schwarzenburg	185700/590175	Berner Sandstein	Burdigalien	OMM	12	-	0.3	massig
7	Chramburg-Flue / Gelterfingen	Münsingen	188475/605675	Chramburg Sandstein	Helvetien	OMM	10	-	0.17	massig
8	Stockeren / Bolligen	Worb	203750/605500	Berner Sandstein	Burdigalien	OMM	10	-	0.2	massig
9*	Steingruebe / Krauchthal	Worb	206000/609875	Berner Sandstein	Burdigalien	OMM	30	-	0.2	massig
10	Steingrueben / Oberburg	Burgdorf	209475/613200	Berner Sandstein	Burdigalien	OMM	20	-	0.2	massig
11	Le Dezaley / Seiry	Payerne	185250/554050	Muschelsandstein	Burdigalien	OMM	10	-	-	Gerölle und Muscheln
12	Les Saus / Bollion	Payerne	184900/552600	Muschelsandstein	Burdigalien	OMM	12	11 m	0.4	von Sandstein/Siltstein überlagert
13*	Tour de la Molière / Murist	Payerne	183050/552875	Muschelsandstein	Burdigalien	OMM	6	-	0.2	mehr Sandstein als in 12
14*	Ostermündigen / Bern	Worb	200000/604250	Berner Sandstein	Burdigalien	OMM	40	40 m	0.2	-
15*	La Combette / Massonnens	Romont	171225/565325	Berner Sandstein	Burdigalien	OMM	12	12 m	0.3	-
16*	Villarlod	Rossens	172850/567550	Berner Sandstein	Burdigalien	OMM	22	15 m	0.3	überlagert von 7 m Sandstein/Mergel Abfolge
17	Mt. Vully ob Sugiez	Murten	201400/574800	Weicher Sandstein (W-Schweiz)	Aquitanien	USM	11	dm-m	0.3	Siltstein/Mergel/Ton Abfolge
18	Mt. Vully / Le Vailet	Murten	201500/574150	Berner Sandstein	Burdigalien	OMM	8	dm	0.15 / 0.20	harte plattige Sdst./weiche Sdst., Gerölle, Holz
19	Säge / Walzenhausen	St. Margrethen	257150/763475	Granitischer Sandstein	Aquitanien	USM	12	dm-m	0.2	Sandsteine mit mergeligen Lagen
20*	St. Margrethen	St. Margrethen	257500/765500	Granitischer Sandstein	Aquitanien	USM	13	8 m	0.3	5 m Sandstein/Mergel Überlagerung
21*	Kreienwald / Staad	Rorschach	259850/758350	Plattensandstein	Burdigalien	OMM	12	dm	0.18	Feinschichtung mit Mergel
22*	Fuchsloch / Staad	Rorschach	261100/759750	Plattensandstein	Burdigalien	OMM	8	dm	0.18	weniger geschichtet als 21
24	Lochmüli / Teufen	Gais	249900/746575	Granitischer Sandstein	Aquitanien	USM	6	6	0.3	-
25	Hundegg / Zürchersmühle	Degersheim	244775/739850	Appenzeller Sandstein	Chattien	USM	4	2m	0.8 / 0.18	grob- und feinkörnige Sandsteine
26	Tätschenberg / Waldstatt	Degersheim	247825/739575	Appenzeller Sandstein	Aquitanien	USM	10	dm	0.25	Sandstein + Mergellagen, tektonisiert
27	Tempel / Krummenau	Nesslau	234725/730750	Appenzeller Sandstein	Chattien	USM	15	m	0.25	Sandstein + Nagelfluh + Mergel
28	Büchel / Ebnat-Kappel	Nesslau	235050/727825	Appenzeller Sandstein	Chattien	USM	10	dm-m	0.3	Schichtflächen mit Ton + Holz
29*	Gstaltig / Ebnat-Kappel	Nesslau	236450/728900	Appenzeller Sandstein	Chattien	USM	15	dm-m	0.5	mm-cm Mergellagen, Calcitklüfte
30*	Guntliweid / Nuolen	Linthebene	229450/711350	Granitischer Sandstein	Chattien	USM	70	m	-	Sandstein:Siltstein:Mergel 4:3:2
31	Gsäss / Benken	Linthebene	228300/720150	Appenzeller Sandstein	Chattien	USM	-	dm	0.5	Mergellagen
32*	Bürstli / Uzaberg	Ricken	232625/714200	Granitischer Sandstein	Aquitanien	USM	12	12m	0.3	-
33	Flüe / Würenlos	Baden	255700/669350	Muschelsandstein	Burdigalien	OMM	20	12m	0.15	im Hangenden 8 m Muschelsandstein
34*	Steinhof / Dottikon	Wohlen (AG)	249500/659500	Muschelsandstein	Burdigalien	OMM	16	16m	-	überlagert von dm/m wechselnden Sdst.
35*	Hint. Wys / Root	Luzern	216875/671825	Plattensandstein	Burdigalien	OMM	20	dm-m	0.18	Wechsel mit mm Mergellagen
36*	Moos / Bolligen	Ricken	231600/710800	Granitischer Sandstein	Aquitanien	USM	10	10m	0.3	-
37	En Bouzenet / Cheseaux	Echallens	159350/537000	Lausanner Molasse	Aquitanien	USM	8	8m	0.2	-
38	Ledi / Mühleberg	Bern	199625/589000	Knauersandstein	Aquitanien	USM	5	5m	0.2	-
39	Teuftal am Wohlensee	Bern	200700/589550	Knauersandstein	Aquitanien	USM	14	m	0.3	Sandstein/Mergel 3:1

* Steinbruch 1977 in Betrieb

Tabelle 2: Mineralogische Zusammensetzung der untersuchten Proben in Gew. %.

Aufschluss	Probe	Art der Probe	Quarz	Feldspäte		Karbonate		Rest (TM, Gl)	Tonmineralverhältnisse			
				Ab	Kf	Cc	Do		Illit	Montmo.	Chlorit	Kaolinit
1	1	Sammel-Profil	39	16	11	20	6	8	65	10	25	—
2	2	Muschel-sandstein	30	14	12	36	3	5	60	15 – 20	20	—
3	3	Nur Sandstein	39	14	17	6	20	4	50	25 – 30	20 – 25	—
4	4.1	Sammel-Profil	38	15	13	19	8	7	55 – 60	15	25 – 30	—
	4.2	Nur Sandstein	39	14	15	21	7	4	55	15 – 20	25 – 30	—
5	5.1	Nur feiner dichter Sandstein	38	19	13	18	5	7	50	20 – 25	25	—
	5.2	Sammel-Profil	38	19	14	14	4	11	50 – 55	15 – 20	30	—
6	6	Sandstein	36	17	16	18	1	12	50 – 55	20	25 – 30	—
7	7	Sandstein	42	11	8	30	1	8	55 – 60	10 – 15	30	—
8	8	Sandstein	39	13	17	17	6	8	55	25	20 – 25	—
9	9	Sandstein	43	14	16	17	2	8	55	20	25	—
10	10	Sandstein	39	15	17	17	4	8	45 – 50	25	25 – 30	—
11	11	Muschel-sandstein	20	11	11	55	3	—	55	20	25	—
12	12	Nur Muschelsandst.	16	11	5	64	2	2	50 – 55	20	25 – 30	—
13	13	Sammel-Profil	23	16	15	43	1	2	50 – 55	30 – 35	15	—
14	14.1	gelber Sandstein	44	19	15	11	5	6	65	10	20 – 25	—
	14.2	hellgrauer Sandstein	44	15	16	12	7	6	60	10 – 15	25 – 30	—
	14.3	dunkelgrauer Sandstein	42	17	15	14	6	6	60 – 65	10 – 15	25	—
	14.4	blaugrauer Sandstein	43	17	12	15	7	6	60	10 – 15	25 – 30	—
15	15	Sandstein	40	17	14	15	6	8	55 – 60	20	25	—
16	16.1	blaugrüner Sandstein	43	17	14	13	3	10	50 – 55	15 – 20	30	—
	16.2	gelbgrüner Sandstein	41	19	14	16	4	6	50	20	30	—
17	17	Sammel-Profil	26	17	14	9	4	30	55	15	30	—

Aufschluss	Probe	Art der Probe	Quarz	Feldspäte		Karbonate		Rest (TM, Gl)	Tonmineralverhältnisse			
				Ab	Kf	Cc	Do		Illit	Montmo.	Chlorit	Kaolinit
18	18	Sammel-Profil	35	20	17	17	4	7	50 – 55	10 – 15	35	–
19	19	Sammel-Profil	31	19	15	12	4	19	35	40 – 45	10	10 – 15
20	20	Sandstein	44	20	20	9	5	2	40	10 – 15	15	35
21	21	Sandstein	43	12	12	16	5	12	50	25	25	–
22	22	Sandstein	40	14	10	19	9	8	50 – 55	15 – 20	30	–
24	24	Sandstein	42	20	20	7	6	5	30 – 35	40 – 45	10 – 15	10 – 15
25	25	Sammel-Profil	22	5	–	43	23	7	45	30 – 35	10 – 15	10 – 15
26	26	Nur Sandstein	34	13	9	28	15	1	20	60 – 65	15	–
27	27	Nur Sandstein	20	7	5	30	36	2	25 – 30	50 – 55	5 – 10	10
28	28	Sandstein	22	5	4	38	31	–	25	55	5 – 10	10 – 15
29	29	Nur Sandstein	19	5	4	50	21	1	30	45	10 – 15	10 – 15
30	30.1	Sammel-Profil	26	9	13	23	14	15	45 – 50	25 – 30	10 – 15	10
	30.2	Buechberger Sandstein	34	19	15	12	2	18				
	30.3	Guntliwei-der Hart-sandstein	34	13	10	23	20	–				
31	31	Nur Sandstein	23	5	2	49	21	–	20 – 25	20	10	45
32	32	Sandstein	43	24	22	7	2	9	20	50	30	?
33	33.1	Muschel-sandstein	17	5	5	61	12	–	45 – 50	35 – 40	15	–
	33.2	Sandstein	41	14	11	16	9	9				
34	34.1	grauer Muschel-sandstein	18	7	3	65	6	1	30 – 35	55	10 – 15	–
	34.2	gelber Muschel-sandstein	7	–	–	89	2	2				
35	35	Sandstein	44	14	11	18	6	7	55	30	15	–
36	36	Sandstein	44	22	21	6	3	4	10	75 – 80	5	5
37	37	Sandstein	44	13	11	12	2	18	50	30 – 35	15	–
38	38	Sandstein	38	19	20	14	2	7	40 – 45	20 – 25	35	
39	39	Nur Sandstein	37	22	20	5	3	13	15	75	10	–

Ab = Albit; Kf = Kalifeldspat; Cc = Calcit; Do = Dolomit; Montmo. = Montmorillonit; Gl = Glimmer; TM = Tonminerale

Sedimentation der Tonsuspension auf Glasplättchen, erhält man die benötigten orientierten Präparate. Zur sicheren Identifizierung der Tonminerale waren drei Präparate notwendig: eines luftgetrocknet, eines mit Äthylenglykol gesättigt und eines bei 550°C während einer Stunde gebrannt.

Der Quarzgehalt wurde auch chemisch bestimmt (TALVITIE, 1951). Die gravimetrische Methode beruht darauf, dass in heisser, 85-prozentiger Phosphorsäure die Silikate, mit Ausnahme von Quarz, in Lösung gehen.

Die unter dem Mikroskop abgeschätzten Karbonatgehalte stimmten nicht in jedem Falle mit den röntgenographisch bestimmten Werten überein; es könnte sich dabei um sogenannte Orientierungseffekte handeln (PETERS, 1965). Aus diesem Grunde wurde der Karbonatgehalt auch komplexometrisch bestimmt. Die REM-Aufnahmen der verschiedenen Sandstein-Typen wurden mit einem Raster-Elektronenmikroskop „Stereoscan“ der Firma Cambridge Instrument Comp. Ltd., London, durchgeführt.

2.2.2.2 Mineralogische Zusammensetzung der untersuchten Proben

In Tabelle 2 sind die prozentualen Anteile der Hauptminerale Quarz, Feldspat (Ab = Albit, Kf = Kalifeldspat) und Karbonat (Cc = Calcit, Do = Dolomit) zusammengestellt. Die quantitativen Bestimmungen erfolgten nach den genannten Methoden, wobei beim Quarz vor allem auf die chemische, bei den Feldspäten auf die röntgenographische und bei den Karbonaten auf die komplexometrische Methode abgestellt wurde. Der Rest besteht hauptsächlich aus Glimmer (Hellglimmer, Biotit) und Tonmineralien. Bei den Sandsteinen dürfte der Tonmineral-Gehalt generell von untergeordneter Bedeutung sein; dies geht schon daraus hervor, dass in manchen Fällen kaum genügend Material für die Herstellung der Tonpräparate zur Verfügung stand. Bei den Sammelprofilen wurde im Profil ca. alle 20 cm eine Probe gesammelt.

Im Falle von 30.l musste der Anteil der verschiedenen lithologischen Einheiten geschätzt werden; die Probe wurde dann im geschätzten Verhältnis entnommen. Farbangaben wurden nur soweit gemacht, als sie für das Verständnis der Daten notwendig sind. Bei Aufschluss 14 handelt es sich um ein Profil (siehe 2.2.1).

Im Quarz-Feldspat-Karbonat-Dreieck (Fig. 2) fällt auf, dass die wichtigsten Sandstein-Typen der schweizerischen Molasse – die burdigalen Berner- und Plattensandsteine sowie die aquitanen granitischen und die Sandsteine der Westschweiz – relativ nahe beieinander liegen; zu dieser Gruppe kann auch der Helvetien Sandstein vom Belpberg (7) gezählt werden. Obwohl der Quarzgehalt innerhalb der genannten Sandstein-Typen etwas variiert, kann dagegen kein wesentlicher Unterschied zwischen den einzelnen Typen festgestellt werden. Eine deutliche Zunahme des Feldspatgehaltes ist vom Chramburg Sandstein über die Platten- und Berner Sandsteine in Richtung des granitischen Sandsteins bzw. der Knauersandsteine der Westschweiz festzustellen, während der Karbonatgehalt in der gleichen Richtung abnimmt.

Eine stark wechselnde Zusammensetzung hauptsächlich in bezug auf den Karbonatgehalt zeigen die Muschelsandsteine, während die Appenzeller Sandsteine eher wiederum eine einheitliche Gruppe bilden.

In allen Proben treten die Tonminerale Illit, Montmorillonit und Chlorit in wechselndem Verhältnis auf. Dagegen findet sich Kaolinit erstmals am oberen Zürichsee (Aufschluss 30, Fig. 1) und kann in allen Proben (mit Ausnahme von 26, 21 und 22) bis nach St. Margrethen (Aufschluss 20, Fig. 1) verfolgt werden. Man beachte, dass Kaolinit somit in den aquitanen Sandsteinen der Ostschweiz (granitischer Typ) und im chattischen Appenzeller Sandstein, jedoch nicht in den burdigalen Plattensandsteinen (Aufschlüsse 21 und 22 sowie 35) beobachtet wurde.

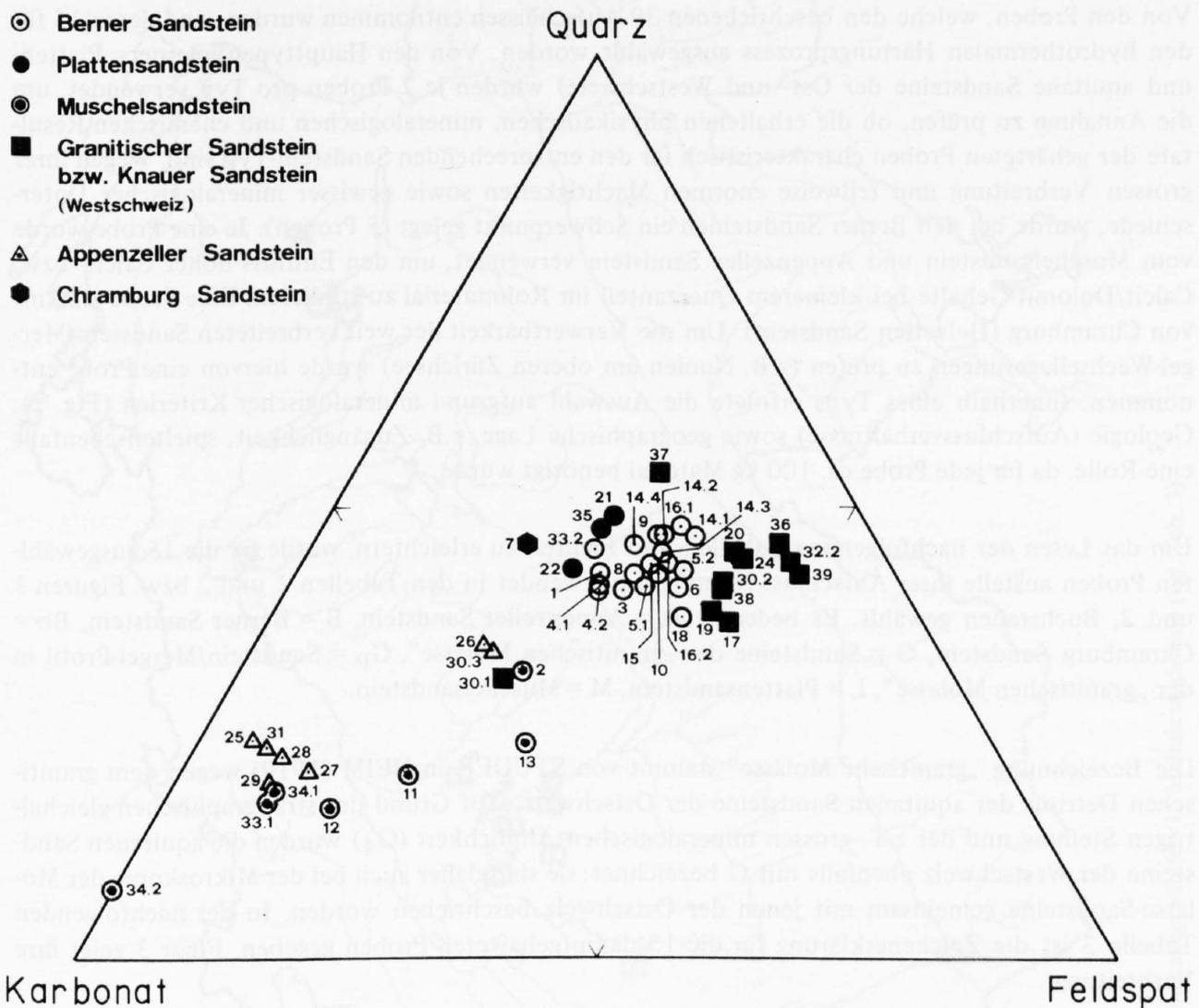


Fig. 2
Darstellung der untersuchten Molassesandsteine im Quarz-Feldspat-Karbonat Dreieck

3. Charakterisierung der 15 Proben, welche als Rohmaterial für den Härtingsprozess ausgewählt wurden

3.1 AUSWAHL, BEZEICHNUNG UND VERBREITUNG DER PROBEN

Von den Proben, welche den beschriebenen 39 Aufschlüssen entnommen wurden, sind deren 15 für den hydrothermalen Härtingsprozess ausgewählt worden. Von den Haupttypen (Berner-, Platten- und aquitane Sandsteine der Ost- und Westschweiz) wurden je 2 Proben pro Typ verwendet, um die Annahme zu prüfen, ob die erhaltenen physikalischen, mineralogischen und chemischen Resultate der gehärteten Proben charakteristisch für den entsprechenden Sandstein-Typ sind. Wegen ihrer grossen Verbreitung und teilweise enormen Mächtigkeiten sowie gewisser mineralogischer Unterschiede, wurde bei den Berner Sandsteinen ein Schwerpunkt gelegt (5 Proben). Je eine Probe wurde vom Muschelsandstein und Appenzeller Sandstein verwendet, um den Einfluss hoher Calcit- bzw. Calcit/Dolomit-Gehalte bei kleinerem Quarzanteil im Rohmaterial zu studieren. Eine Probe stammt von Chramburg (Helvetien Sandstein). Um die Verwertbarkeit der weit verbreiteten Sandstein/Mergel-Wechselagerungen zu prüfen (z.B. Nuolen am oberen Zürichsee) wurde hiervon eine Probe entnommen. Innerhalb eines Typs erfolgte die Auswahl aufgrund mineralogischer Kriterien (Fig. 2); Geologie (Aufschlussverhältnisse) sowie geographische Lage, z.B. Zugänglichkeit, spielten ebenfalls eine Rolle, da für jede Probe ca. 100 kg Material benötigt wurde.

Um das Lesen der nachfolgenden Tabellen und Figuren zu erleichtern, wurde für die 15 ausgewählten Proben anstelle ihrer Aufschluss-Nummern, verwendet in den Tabellen 1 und 2 bzw. Figuren 1 und 2, Buchstaben gewählt. Es bedeutet A = Appenzeller Sandstein, B = Berner Sandstein, Bb = Chramburg Sandstein, G = Sandsteine der „granitischen Molasse“, G_p = Sandstein/Mergel-Profil in der „granitischen Molasse“, L = Plattensandstein, M = Muschelsandstein.

Die Bezeichnung „granitische Molasse“ stammt von STUDER in HEIM (1919) wegen dem granitischen Detritus der aquitanen Sandsteine der Ostschweiz. Auf Grund der stratigraphischen gleichaltrigen Stellung und der z.T. grossen mineralogischen Ähnlichkeit (G₄) wurden die aquitanen Sandsteine der Westschweiz ebenfalls mit G bezeichnet; sie sind daher auch bei der Mikroskopie der Molasse-Sandsteine gemeinsam mit jenen der Ostschweiz beschrieben worden. In der nachfolgenden Tabelle 3 ist die Zeichenerklärung für die 15 dampfgehärteten Proben gegeben. Figur 3 zeigt ihre Verbreitung.

3.2 GEOLOGIE UND MINERALOGIE

Die Geologie der 15 für die hydrothermalen Härtingsversuche ausgewählten Proben wurde bereits im Abschnitt 2.2 beschrieben. Mit Hilfe von Tabelle 3 im Anhang dieser Arbeit kann diese dort nachgesehen werden. Ebenfalls kann mit Tabelle 3 die mineralogische Zusammensetzung der Proben aus Tabelle 2 entnommen werden.

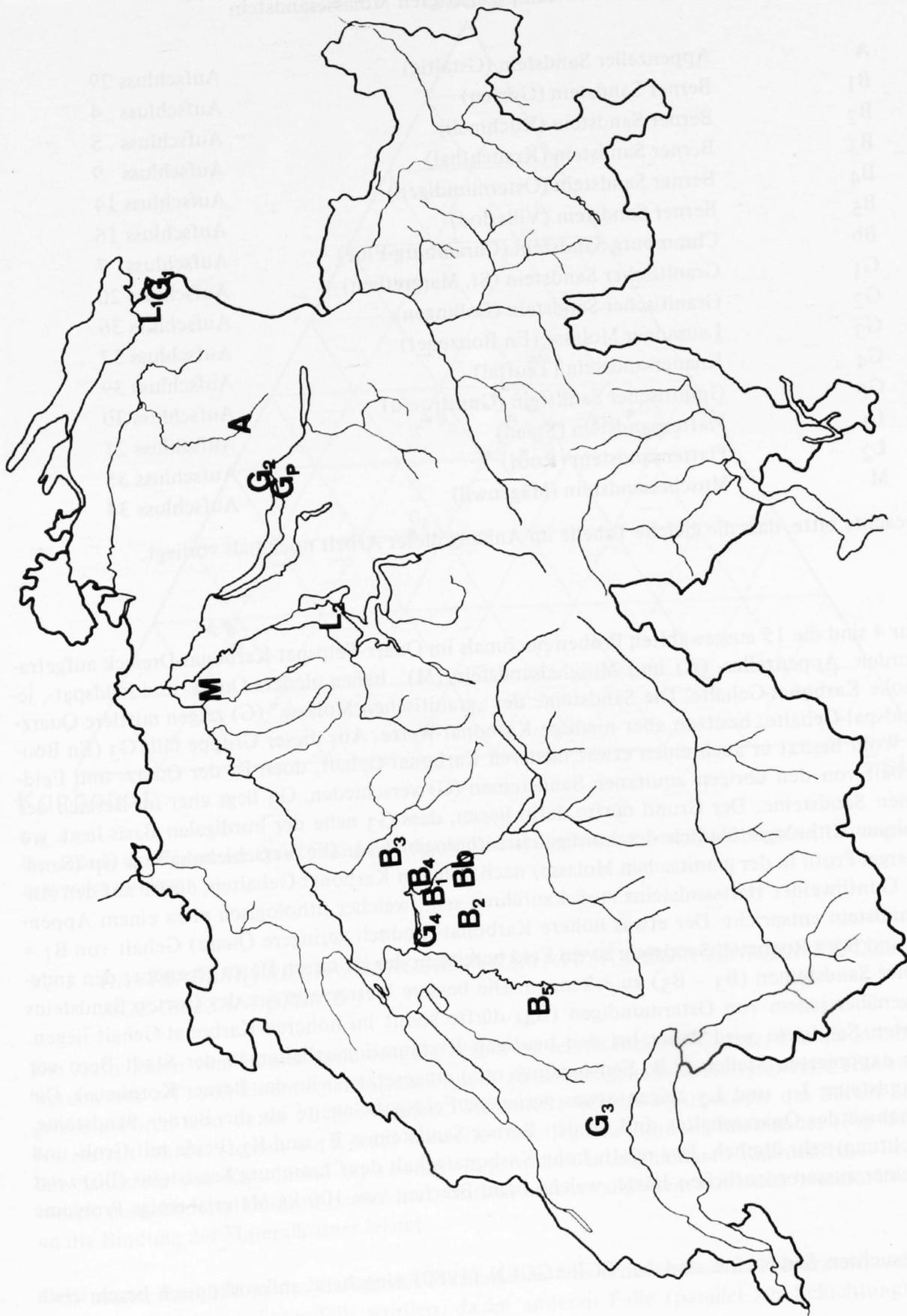


Fig. 3
 Lokalitäten, der für die Dampfhärtung ausgewählten 15 Molassesandsteine (vgl. Tab. 3)

Tabelle 3: Zeichen-Erklärung für die 15 dampfgehärteten Molassesandstein

A	Appenzeller Sandstein (Gstaltig)	Aufschluss 29
B ₁	Berner Sandstein (Gurten)	Aufschluss 4
B ₂	Berner Sandstein (Ruchmüli)	Aufschluss 5
B ₃	Berner Sandstein (Krauchthal)	Aufschluss 9
B ₄	Berner Sandstein (Ostermundigen)	Aufschluss 14
B ₅	Berner Sandstein (Villarlod)	Aufschluss 16
Bb	Chramburg Sandstein (Chramburg-Flue)	Aufschluss 7
G ₁	Granitischer Sandstein (St. Margrethen)	Aufschluss 20
G ₂	Granitischer Sandstein (Bollingen)	Aufschluss 36
G ₃	Lausanner Molasse (En Bouzenet)	Aufschluss 37
G ₄	Knauersandstein (Teuftal)	Aufschluss 39
Gp	Granitischer Sandstein (Guntliweid)	Aufschluss 30
L ₁	Plattensandstein (Staad)	Aufschluss 21
L ₂	Plattensandstein (Root)	Aufschluss 35
M	Muschelsandstein (Mägenwil)	Aufschluss 34

Man beachte bitte, dass die gleiche Tabelle im Anhang dieser Arbeit nochmals vorliegt.

In Figur 4 sind die 15 ausgewählten Proben nochmals im Quarz-Feldspat-Karbonat-Dreieck aufgetragen worden. Appenzeller- (A) und Muschelsandstein (M) haben niedere Quarz- und Feldspat-, jedoch hohe Karbonat-Gehalte. Die Sandsteine der „granitischen Molasse“ (G) zeigen mittlere Quarz- und Feldspat-Gehalte, besitzen aber niedrige Karbonat-Werte. Aus dieser Gruppe fällt G₃ (En Bouzenet). Wohl besitzt er auch einen etwas niederen Karbonat-Gehalt, doch ist der Quarz- und Feldspat-Gehalt von den übrigen aquitanen Sandsteinen (G) verschieden. G₃ liegt eher im Bereich der burdigalen Sandsteine. Der Grund dürfte darin liegen, dass G₃ nahe der burdigalen Basis liegt, wo die aquitane Lithologie ähnlich der burdigalen Lithologie wird. Die Verschiebung von Gp (Sandstein/Mergel-Profil in der granitischen Molasse) nach höheren Karbonat-Gehalten, dürfte auf den Anteil des Guntliweider Hartsandsteins zurückzuführen sein, welcher lithologisch etwa einem Appenzeller Sandstein entspricht. Der etwas höhere Karbonat- (jedoch geringere Quarz) Gehalt von B₁ = Gurten- und B₂ = Ruchmüli Sandstein ist im Feld bereits an der grösseren Härte gegenüber den anderen Berner Sandsteinen (B₃ – B₅) zu erkennen. Die bessere Wetterresistenz des Gurten Sandsteins (B₁) gegenüber jenem von Ostermundigen (B₄) dürfte somit im höheren Karbonat-Gehalt liegen. Der Gurten Sandstein wird daher bei den heutigen Restaurationsarbeiten in der Stadt Bern vor allem an exponierten Stellen (z.B. Fenstersimse etc.) eingesetzt (siehe das Berner Kornhaus). Die Plattensandsteine L₁ und L₂ zeigen etwas geringere Feldspat-Gehalte als die Berner Sandsteine. Mit Ausnahme des Quarzgehaltes sind sie den Berner Sandsteinen B₁ und B₂ (beide mit Grob- und Feinschichtung) sehr ähnlich. Der relativ hohe Karbonatgehalt des Chramburg Sandsteins (Bb) zeigt sich in seiner ausserordentlichen Härte, welche beim Brechen von 100 kg Material einige Probleme stellte.

Die untersuchten Sandsteine sind bei ZGRAGGEN (1980) eingehend mikroskopisch beschrieben worden.

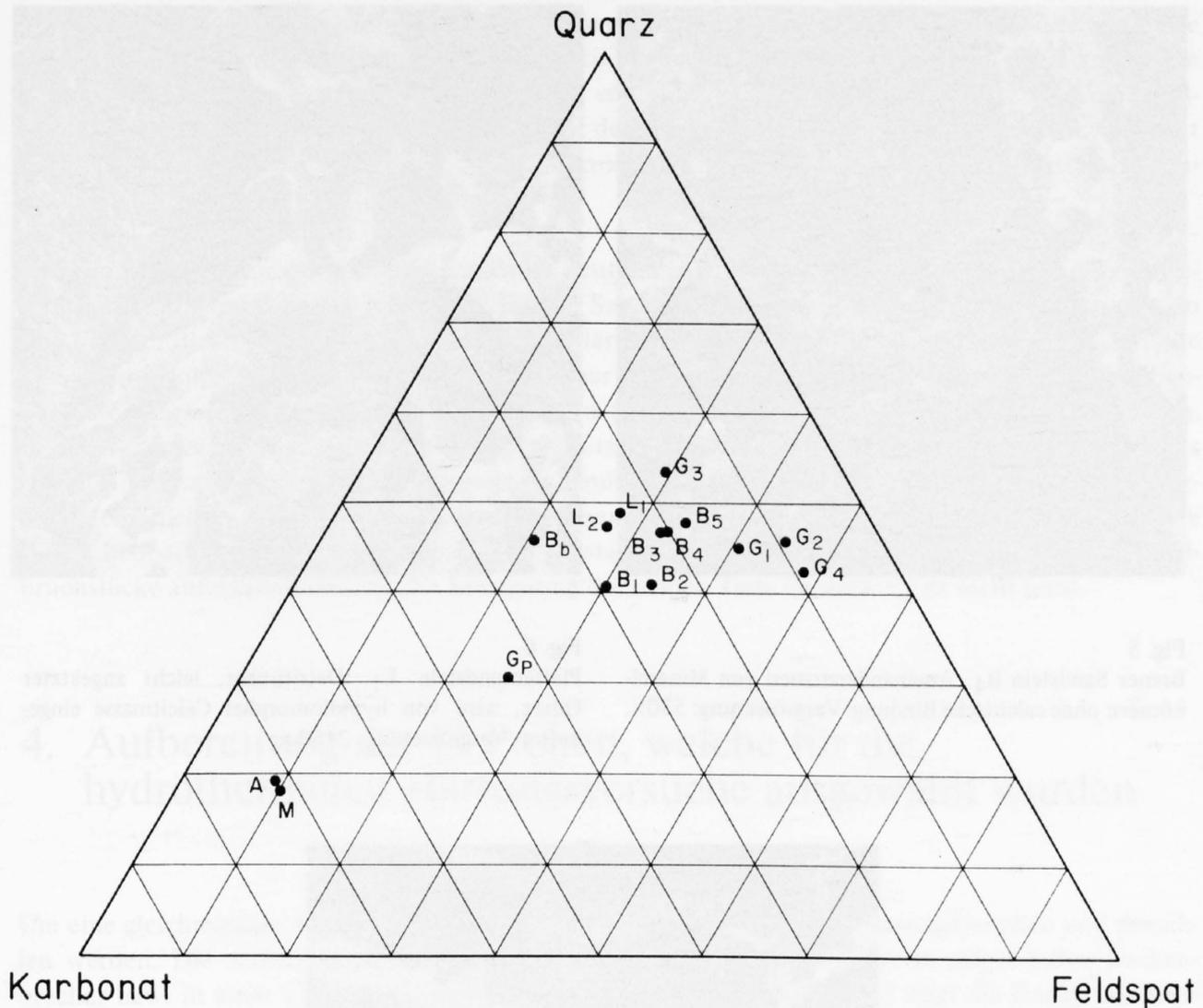


Fig. 4
Darstellung der Proben im Quarz-Feldspat-Karbonat Dreieck, welche bei den hydrothermalen Härtingsversuchen verwendet wurden.

3.2.1 RASTERELEKTRONENMIKROSKOP (REM)-AUFNAHMEN EINIGER TYPISCHER MOLASSESANDSTEINE

Die Aufnahmen vom Berner Sandstein B₄ zeigen ein relativ lockeres Gefüge, d.h. die Mineralkörner werden nur z.T. von einem calcitischen Zement zusammengehalten; intergranulare Hohlräume wie grössere Poren sind daher zu beobachten. Wie bereits bei der Mikroskopie des Berner Sandsteins festgestellt wurde, stossen die Körner teilweise ohne jegliche Bindung aneinander (Fig. 5). Im Berner Sandstein von Krauchthal B₃ konnte in grösseren intergranularen Räumen bzw. Poren, idiomorph ausgebildeter Dolomit beobachtet werden, welcher allgemein nur einen beschränkten Beitrag an die Bindung der Mineralkörner leistet.

Den besten Einblick in das Gefüge des Plattensandsteins erhielten wir in Präparaten, welche senkrecht zur Schichtung hergestellt wurden, da im anderen Falle (parallel zur Schichtung) die Hell-

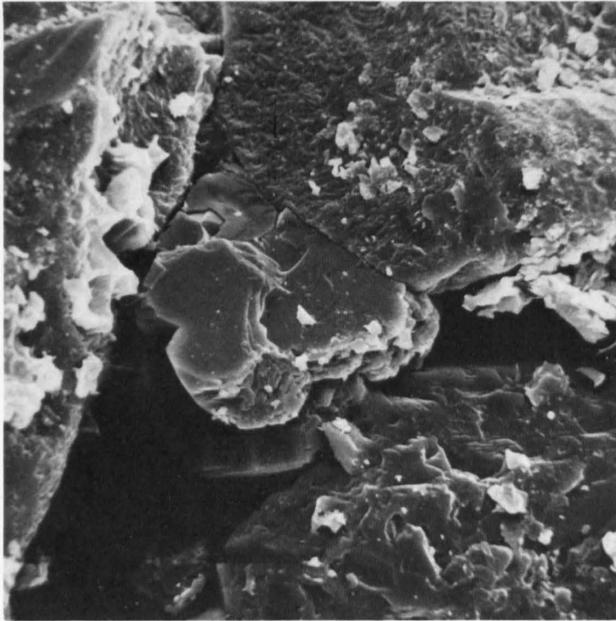


Fig. 5
Berner Sandstein B₄. Aneinanderstossen von Mineral-
körnern ohne calcitische Bindung. Vergrößerung: 530x.

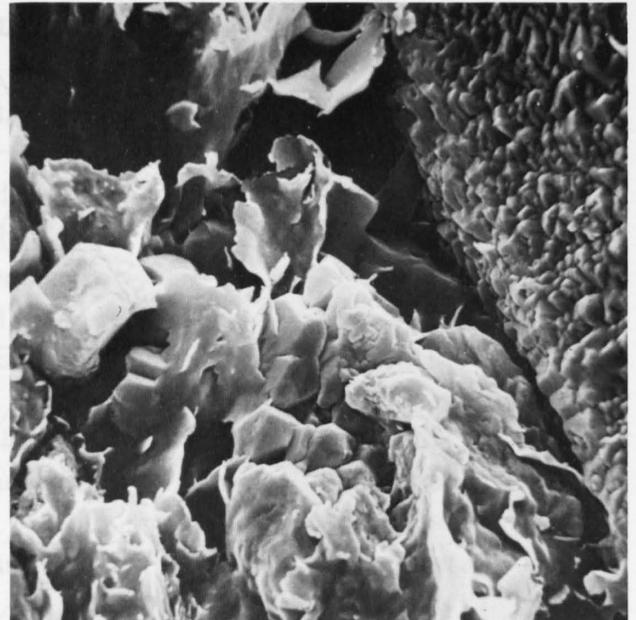


Fig. 6
Plattensandstein L₁. Detritischer, leicht angeätzter
Quarz, wird von hypidiomorpher Calcitmasse einge-
bettet. Vergrößerung: 2450 x.

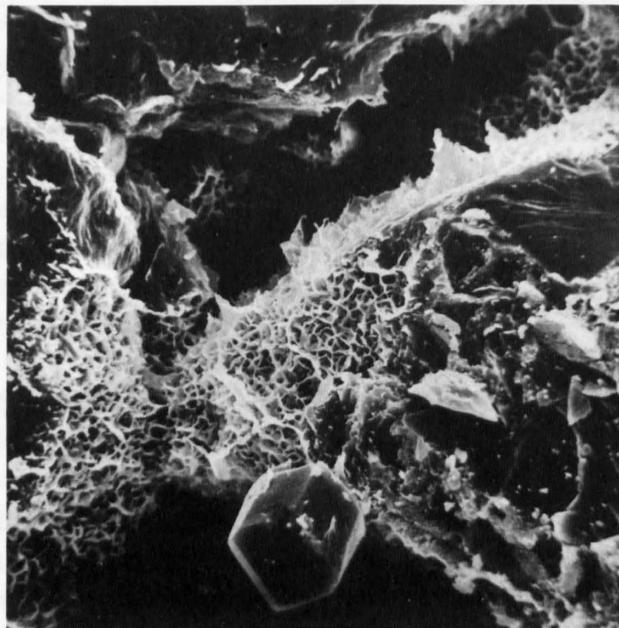


Fig. 7
Granitischer Sandstein G₂. Schwammartige Montmo-
rillonithäute. Idiomorpher Dolomit in Pore wachsend.
Vergrößerung: 595 x.

glimmer-Plättchen sich als störend erwiesen. Übersichtsaufnahmen zeigen das relativ dichte Gefüge des Sandsteins. Während kleinere Poren ab und zu beobachtet werden können, sind dagegen grössere Poren selten, d.h. die Körner werden recht gut von einer calcitischen Bindemasse zusammengehalten wie Nahaufnahmen zeigen. Offenbar scheint der Quarz (Fig. 6) etwas angeätzt zu sein, was nicht weiter erstaunlich ist, da wir bereits bei der Mikroskopie dieser Sandsteine Drucklösungserscheinungen beobachten konnten.

Die granitischen Sandsteine weisen wiederum deutlich sichtbare Hohlräume auf. Trotz ihres geringeren Karbonat-Gehaltes gegenüber dem Berner Sandstein, scheint ihre Mikroporosität geringer zu sein, als bei diesem. Der Grund dürfte in der stärkeren Kompaktion liegen, welche der granitische Sandstein infolge diagenetischer und tektonischer Vorgänge erfahren hat. Die bei diesem Typ beobachteten kieseligen Drucklösungserscheinungen führen ebenfalls zu einer Porositätsverminderung. In Figur 7 erkennt man ein schwammartiges Netz von Tonmineralien (Montmorillonit). Infolge des hohen Karbonat-Gehaltes ist den kalkreichen Sandsteinen Typus Muschelsandstein und Appenzeller-typus ein dichtes Gefüge eigen. Allerdings können beim Typus Muschelsandstein auch grössere Poren beobachtet werden, welche dadurch zustande kommen, dass beispielsweise zwei Muschelbruchstücke aufeinanderstossen; die Einpassung der beiden Teile ist dann meist nicht ideal.

4. Aufbereitung der 15 Proben, welche für die hydrothermalen Härtingsversuche ausgewählt wurden

Um eine gleichmässige Aktivierung der Proben zu ermöglichen, mussten diese gebrochen und gemahlen werden. Die Aufbereitung von ca. 100 kg Material je Probe erfolgte in einem Labor-Backenbrecher bzw. in einer Labor-Hammermühle mit 2 mm Rundloch. Figur 8 zeigt die Korngrössenverteilung der gemahlten Proben. Betrachtet man beispielsweise die Korngrösse 0.2 mm bei den Berner- und Plattensandsteinen sowie bei den Sandsteinen der „granitischen Molasse“ und schaut wie gross der Feinanteil < 0.2 mm ist (100 minus Rückstand in %), so sieht man: der Anteil an Feinmaterial ist bei den Plattensandsteinen am grössten (ca. 75 – 80%), es folgen die Berner Sandsteine mit ca. 40 – 70%, während bei den Sandsteinen der „granitischen Molasse“ der Feinanteil am kleinsten ist (ca. 25 – 55%). Bereits bei der Mikroskopie dieser Sandsteine konnte man generell eine Zunahme der durchschnittlichen Korngrösse von den Platten- über die Berner Sandsteine zu den Sandsteinen der „granitischen Molasse“ beobachten. Dies bedeutet also, dass die genannten Sandsteine beim Mahlen im wesentlichen in ihre ursprüngliche Sandfraktion zerlegt wurden. Die Korngrössenverteilung des Chramburg Sandsteins Bb entspricht fast genau jener von B₃ (Berner Sandstein von Krauchthal).

Versuchsweise wurde von 15 Proben auch die Feinheit (spezifische Oberfläche nach Blaine) bestimmt; diese erwies sich jedoch in unserem Falle als ungeeignet, da die Messungen eine Feinheit zwischen 700 und 1100 cm²/g ergaben; diese Messwerte liegen aber beinahe im Messfehlerbereich (± 200 cm²/g), so dass keine zuverlässigen Aussagen möglich sind. Die spezifischen Gewichte der gemahlten Berner-, Platten- und aquitanen Sandsteine lagen ebenfalls in einem engen Bereich (2.63 – 2.67 g/cm³).

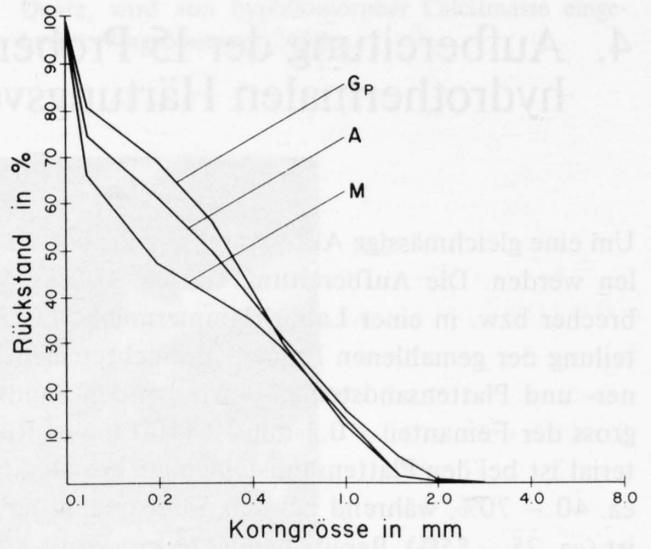
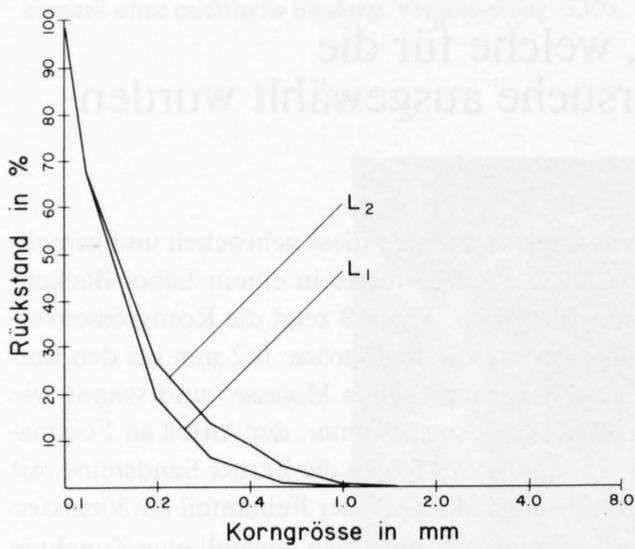
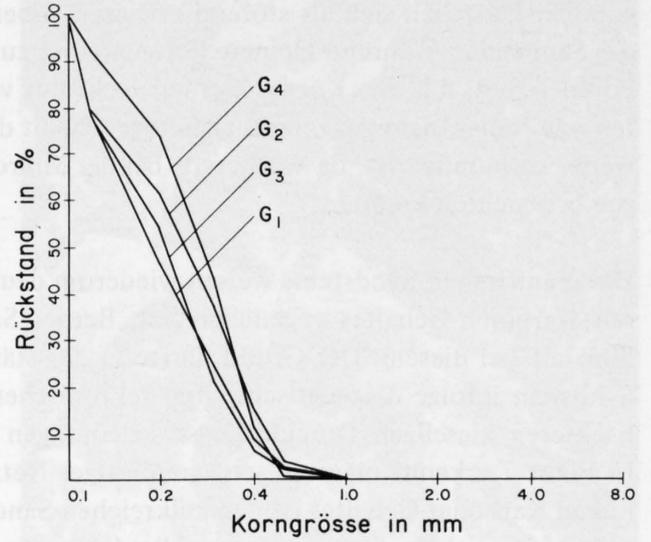
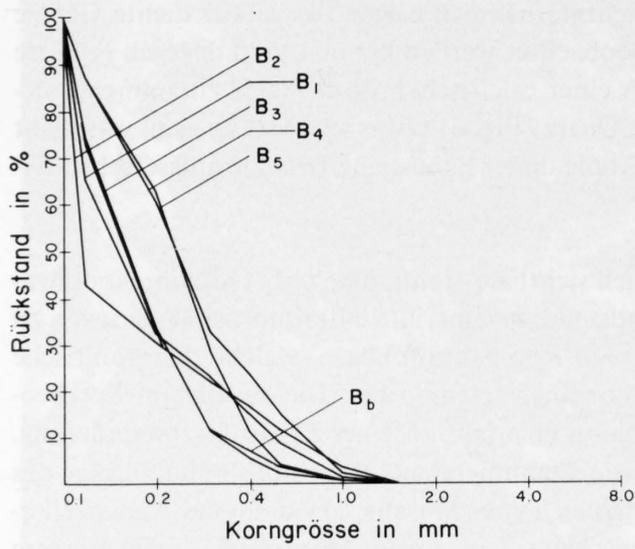


Fig. 8
Korngrößenverteilung der Molassesandsteine nach dem Mahlen (Hammermühle mit 2 mm Rundloch-Sieb).

5. Aktivierung der Proben

5.1 EINLEITUNG

Bei der Herstellung von dampfgehärteten Baustoffen wird dem silikatischen Rohstoff (meist reine Quarzsande; in der Schweiz auch sog. „unreine Sande“, siehe Einleitung) ein aktiver Reaktionspartner (gebrannter Kalk oder Zement) beigegeben. Die gemahlene karbonathaltige Molasse-Sandsteine mit rund 40% Quarz und wechselnden Feldspat- und Karbonatanteilen, liefern nicht nur den benötigten silikatischen Rohstoff Quarz, vielmehr enthalten sie auch den erforderlichen kalkhaltigen Reaktionspartner zum Quarz; es handelt sich dabei nicht um gebrannten aktiven Kalk, sondern um träges Karbonat. Um aus diesem gebrannten Kalk herzustellen, mussten die gemahlene Sandsteine auf ca. 900°C erhitzt werden (Aktivierung der Proben). Bei dieser Temperatur erfolgt der vollständige Zerfall der Karbonate Calcit (CaCO_3) und Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) unter Abspaltung von CO_2 in die Oxide CaO (gebrannter Kalk) und MgO („kaustische Magnesia“).

Der Vorteil der Aktivierung karbonathaltiger Sande wäre, falls der Karbonatgehalt genügend gross ist, dass keine Zusätze von gebranntem Kalk bzw. Zement mehr notwendig sind.

5.2 HERSTELLUNGSBEDINGUNGEN

Die Aktivierung der Proben erfolgte in einem Labor-Drehrohrofen. Es handelt sich dabei um einen Elektroofen SOLO der Firma Käsermann & Sperisen SA in Biel. Die Aufheizung des Ofens erfolgt in drei separat regulierbaren Zonen zu je 380 V bzw. 4 kW bis zu einer Maximaltemperatur von 1050°C. Der Ofen kann bis 10° gekippt werden. Das Drehrohr besteht aus einem Pythagorasrohr, Länge 150 cm, Innendurchmesser 8 cm, wobei die Umlaufgeschwindigkeit regulierbar ist. Die Aktivierungsbedingungen für die 15 Proben mussten wegen ihrer mineralogischen Heterogenität individuell ermittelt werden.

Wegen des sandigen Charakters sowie des fehlenden und geringen Tongehaltes der Proben, brauchten diese nicht granuliert zu werden wie dies bei der Aktivierung von Kiesschlammern notwendig ist (MUMENTHALER, 1979). Nach diesen Vorversuchen erfolgte die definitive Aktivierung der Proben, wobei zwischen 30 und 40 kg Material, je nach Karbonatgehalt, gebrannt wurde. Die Verweilzeit im Ofen lag zwischen 2,5 und 4 Minuten und die im Material gemessene Maximaltemperatur zwischen 830°C und 930°C, wiederum in Abhängigkeit von der Materialmenge und dem Karbonat-Gehalt der gemahlene Molasse-Sandsteine. Wegen der geringen Verweilzeit, der relativ niederen maximalen Aktivierungstemperatur sowie der Sandfraktion < 2 mm, dürfte es sich bei dem aus den Karbonaten der gemahlene Sandsteine entstandenen gebrannten Kalk um einen reaktionsfreudigen Weichbranntkalk handeln (CHONE, 1973). Die Bestimmung des reaktionsfähigen gebrannten Kalkes, d.h. des aktiven CaO-Gehaltes, welcher bei der Dampfhärtung für die Bildung der CSH-Phasen theoretisch zur Verfügung steht (ein geringer Teil bildet wieder Calcit), wurde mit Hilfe der sog. Zucker-Methode bestimmt. Die Analysen erfolgten nach den Vorschriften der Zürcher Ziegeleien unmittelbar nach

der Aktivierung einer Probe. Eine Überprüfung der Aktivität des gebrannten Kalkes bei der Probe B4 nach drei Monaten ergab dasselbe Resultat wie direkt nach der Aktivierung. Dies bedeutet, dass durch geeignete Lagerung des gebrannten Materials die Dampfhärtung nicht unmittelbar an die Aktivierung folgen muss; jahreszeitlich bedingte Abbauprobleme des Rohmaterials könnten dadurch umgangen werden. Unter „geeigneter Lagerung“ wird die Trockenhaltung des aktivierten Materials verstanden.

Die Überprüfung der Aktivierungs-Bedingungen erfolgte röntgendiffraktometrisch, indem das vollständige Verschwinden des Calcit-Reflexes bei 3.035 \AA ($2\theta \text{ CuK}\alpha = 29.40^\circ$) abgewartet wurde (optimale Aktivierung). Zu hohe Temperaturen hätten die Gefahr von Mineralneubildungen wie Gehlenit etc. zur Folge gehabt oder die Herabsetzung der Reaktivität des CaO; zudem wäre die Aktivierung von Glimmer- bzw. Kalium-reichen Proben durch starke Ringbildungen im Drehofen (Trockene Sinterung) verunmöglicht worden.

In Tabelle 4 ist neben den chemischen Analysen der ungebrannten gemahlene Molasse-Sandsteine auch der aktive CaO-Gehalt der aktivierten Proben aufgeführt. Die Beziehung zwischen dem aktiven CaO und dem totalen CaO der Proben zeigt Figur 9. Nehmen wir an, dass alles Calcium der gemahlene Molasse-Sandsteine nur an Calcit bzw. Dolomit gebunden ist, dann müsste bei optimaler Akti-

Tabelle 4: Chemische Analysen der ungebrannten gemahlene Molassesandsteine sowie aktives CaO der aktivierten Proben

	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	Bb	L ₁ *	L ₂	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	Gp	A*	M
SiO ₂	53,83	55,01	61,15	63,07	62,17	59,55	59,4	59,40	64,96	66,96	66,97	68,22	45,00	22,7	21,90
TiO ₂	0,33	0,36	0,28	0,20	0,28	0,25	0,26	0,26	0,17	0,23	0,35	0,31	0,30	0,07	0,12
Al ₂ O ₃	7,51	8,74	7,40	7,46	7,31	6,87	6,8	7,28	9,47	10,69	9,04	11,83	8,52	1,3	2,86
Fe _{tot}	2,53	3,15	2,79	2,62	2,84	2,56	2,0	2,45	1,28	1,71	2,57	2,11	2,46	0,73	1,19
MnO	0,09	0,09	0,06	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,04	0,05	0,07	0,06	0,07	0,12	0,04
MgO	2,89	3,26	2,84	2,09	2,27	2,33	3,0	2,60	2,19	1,75	1,61	1,61	4,00	6,7	1,50
CaO	14,79	12,76	10,54	10,11	10,87	12,60	12,3	12,36	7,88	6,16	7,82	4,85	17,46	34,3	38,41
Na ₂ O	1,41	1,52	1,41	1,37	1,56	1,30	1,4	1,41	2,03	2,38	1,67	2,74	0,89	0,0	0,53
K ₂ O	1,77	2,03	1,98	2,14	1,99	1,85	1,7	1,84	2,50	2,83	2,04	2,82	1,96	0,31	0,78
P ₂ O ₅	0,14	0,13	0,21	0,18	0,15	0,20	0,28	0,19	0,07	0,08	0,07	0,09	0,08	0,04	0,15
	85,29	87,05	88,66	89,29	89,50	87,58	87,21	87,86	90,59	92,84	92,21	94,64	80,74	66,27	67,48
GV	13,73	12,82	10,71	9,74	10,14	11,78	12,43	11,81	8,72	6,54	7,11	4,54	18,51	34,26	31,66
(CO ₂)	12,31	10,72	9,17	8,32	8,66	10,35	11,04	10,58	7,61	5,39	5,59	3,07	16,56	32,65	31,12
	99,02	99,87	99,37	99,03	99,64	99,36	99,64	99,67	99,31	99,38	99,32	99,18	99,25	100,53	99,14
Aktives CaO															
mit	11,35	10,51	9,64	8,34	9,26	11,40	11,03	10,62	6,33	5,10	5,72	3,21	12,70	27,61	37,60
ohne	13,16	12,06	10,80	9,24	10,31	12,92	12,60	12,04	6,94	5,46	6,16	3,36	15,59	42,00	55,02
GV-Berücksichtigung															

* Diese Proben wurden von der Firma Holderbank AG in Holderbank analysiert

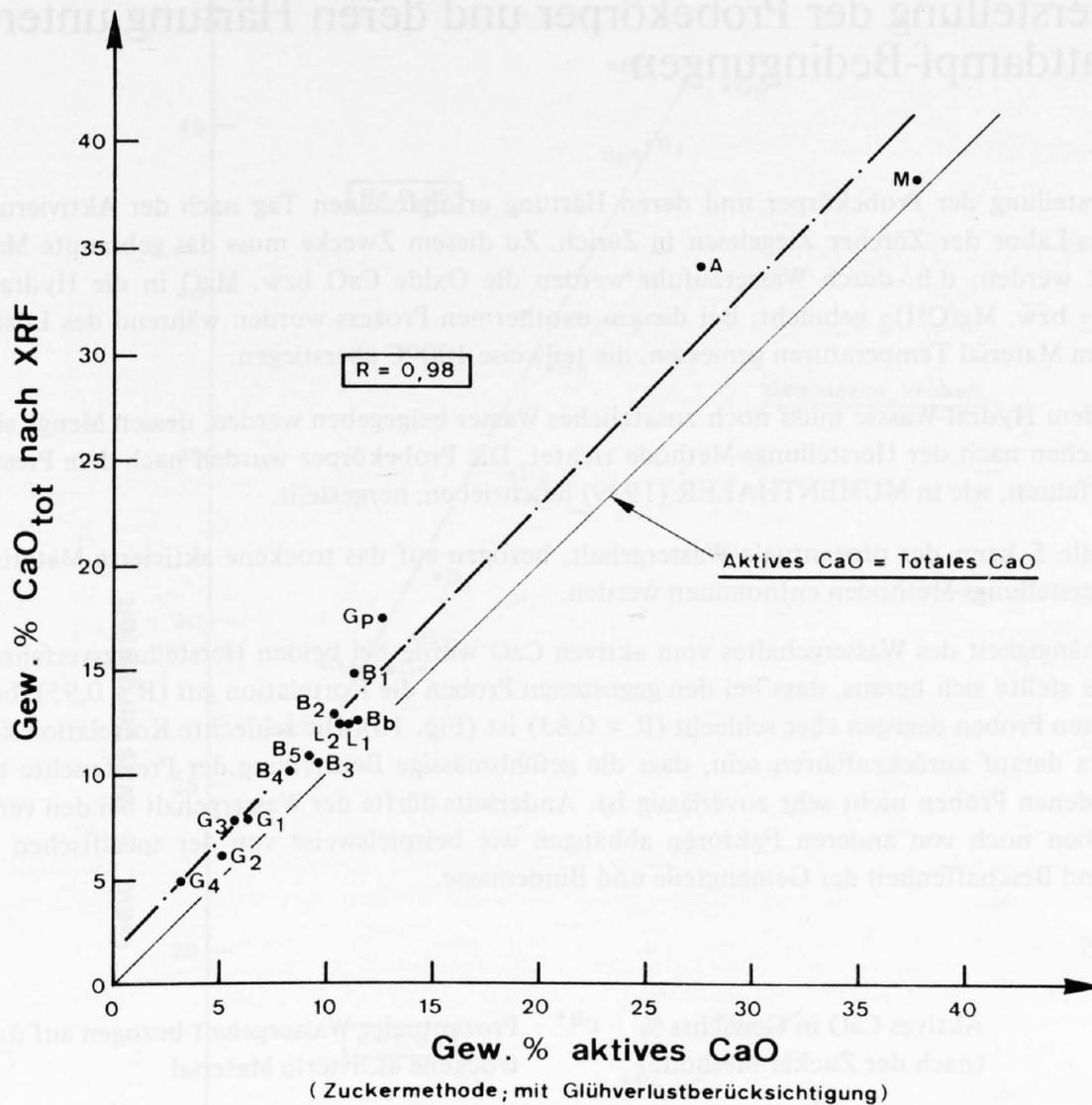


Fig. 9
 Beziehung zwischen dem aktiven CaO und dem totalen CaO der Proben.

vierung der mit der Zucker-Methode bestimmte aktive CaO-Gehalt gleich dem totalen CaO- (bzw. Calcium-) Gehalt sein. Aus der Mineralogie der Sandsteine wissen wir jedoch, dass ein Teil des Calciums auch im Plagioklas gebunden ist, d.h., dass trotz optimaler Aktivierung die Proben etwas links der Kurve „Aktives CaO = Totales CaO“ liegen müssen. Wir dürfen somit annehmen, dass die Proben im allgemeinen recht gut aktiviert wurden. Im Falle von G_p scheint ein Teil des aktiven CaO von den zersetzten Tonen absorbiert zu sein; bei B₁ ist in einem Röntgen-Diffraktogramm des aktivierten Materials noch ein sehr schwacher Calcit-Reflex zu beobachten.

6. Herstellung der Probekörper und deren Härtung unter Sattdampf-Bedingungen

Die Herstellung der Probekörper und deren Härtung erfolgte einen Tag nach der Aktivierung im Versuchs-Labor der Zürcher Ziegeleien in Zürich. Zu diesem Zwecke muss das gebrannte Material gelöscht werden, d.h. durch Wasserzufuhr werden die Oxide CaO bzw. MgO in die Hydratform $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bzw. $\text{Mg}(\text{OH})_2$ gebracht. Bei diesem exothermen Prozess wurden während des Löschvorganges im Material Temperaturen gemessen, die teilweise 100°C überstiegen.

Neben dem Hydrat-Wasser muss noch zusätzliches Wasser beigegeben werden, dessen Menge sich im wesentlichen nach der Herstellungs-Methode richtet. Die Probekörper wurden nach dem Press- und Giessverfahren, wie in MUMENTHALER (1979) beschrieben, hergestellt.

In Tabelle 5 kann der prozentuale Wassergehalt, bezogen auf das trockene aktivierte Material, für beide Herstellungs-Methoden entnommen werden.

Die Abhängigkeit des Wassergehaltes vom aktiven CaO wurde bei beiden Herstellungsverfahren geprüft. Es stellte sich heraus, dass bei den gegossenen Proben die Korrelation gut ($R = 0,95$), bei den verpressten Proben dagegen eher schlecht ($R = 0,83$) ist (Fig. 10). Die schlechte Korrelation könnte einerseits darauf zurückzuführen sein, dass die gefühlsmässige Beurteilung der Pressfeuchte bei 15 verschiedenen Proben nicht sehr zuverlässig ist. Andererseits dürfte der Wassergehalt bei den verpressten Proben noch von anderen Faktoren abhängen wie beispielsweise von der spezifischen Oberfläche und Beschaffenheit der Gemengteile und Bindemassee.

Tabelle 5

Probe	Aktives CaO in Gewichts % (nach der Zucker-Methode)	Prozentualer Wassergehalt bezogen auf das trockene aktivierte Material	
		Verpresste Proben	Gegossene Proben
B ₁	13,16	14,0	44,7
B ₂	12,06	12,5	47,1
B ₃	10,80	18,0	39,4
B ₄	9,24	11,0	34,7
B ₅	10,31	15,0	37,9
Bb	12,92	16,0	44,4
L ₁	12,60	15,0	40,8
L ₂	12,04	13,8	39,4
G ₁	6,94	12,0	31,6
G ₂	5,46	10,8	28,7
G ₃	6,16	14,0	29,7
G ₄	3,36	6,3	28,9
Gp	15,59	18,0	46,4
A	42,00	42,0	63,4
M	55,02	76,7	97,3

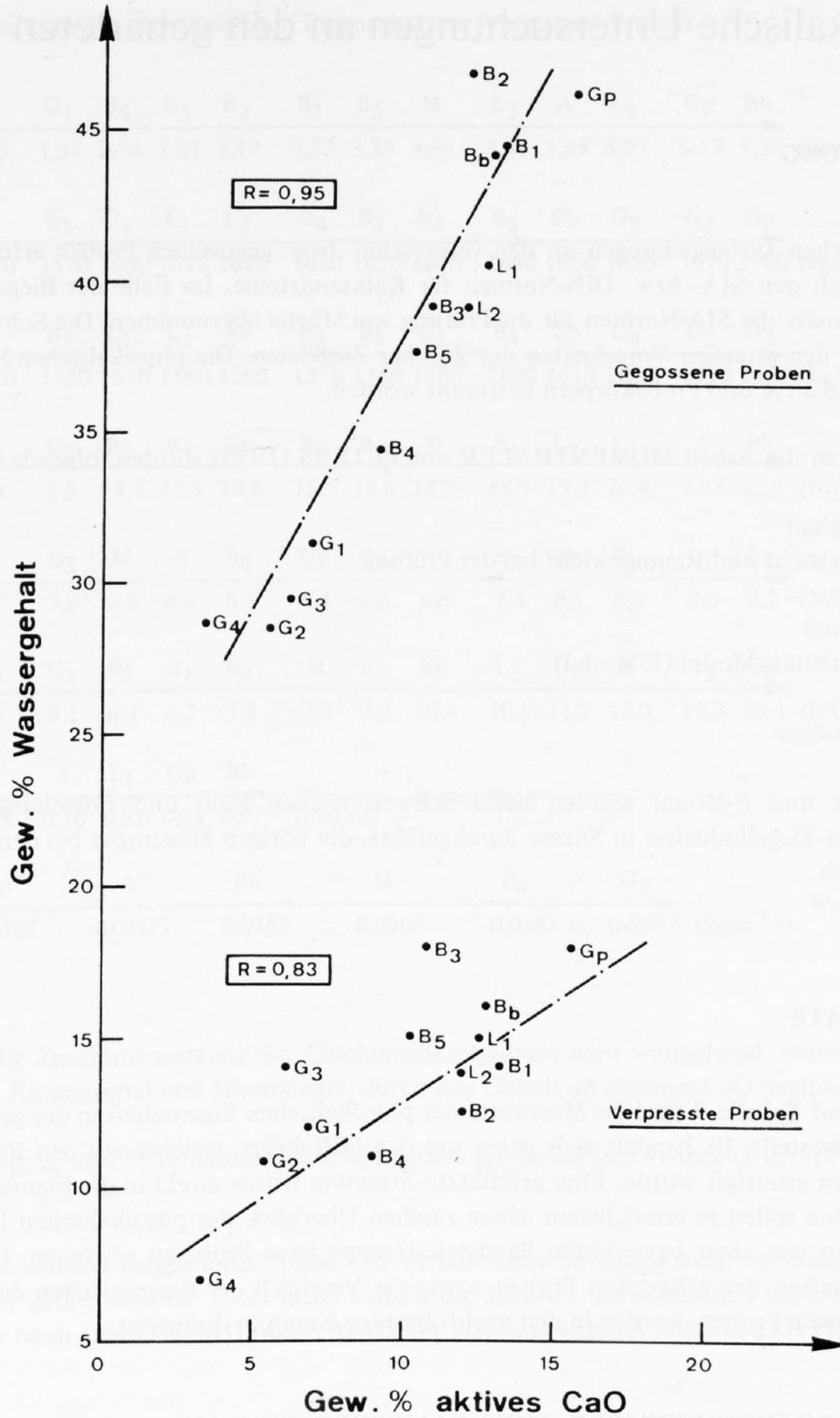


Fig. 10
 Prozentualer Wassergehalt – bezogen auf das trockene aktivierte Material – für
 beide Herstellungsmethoden.

7. Physikalische Untersuchungen an den gehärteten Proben

7.1 EINLEITUNG

Die physikalischen Untersuchungen an den verpressten bzw. gegossenen Proben erfolgten, soweit vorhanden, nach den SIA- bzw. DIN-Normen für Kalksandsteine. Im Falle der Biegezugfestigkeit wurden sinngemäss die SIA-Normen für die Prüfung von Mörtel übernommen. Die Schwindversuche erfolgten nach den internen Vorschriften der Zürcher Ziegeleien. Die physikalischen Eigenschaften einer Probe sind an je drei Probekörpern bestimmt worden.

In Anlehnung an die Arbeit MUMENTHALER und PETERS (1977) wurden folgende Parameter ermittelt:

Feuchtigkeitsgehalt
Trockenraumgewicht und Raumgewicht bei der Prüfung
Druckfestigkeit
Biegezugfestigkeit
Statischer Elastizitäts-Modul (E-Modul)
Schwindung
Wassersaugvermögen

Druckfestigkeit und E-Modul wurden beim Schweizerischen Prüf- und Forschungsinstitut der schweizerischen Ziegelindustrie in Sursee durchgeführt, die übrigen Messungen bei den Zürcher Ziegeleien in Zürich.

7.2 RESULTATE

In Tabelle 6 und Tabelle 7 sind die Messwerte der physikalischen Eigenschaften der gehärteten Proben zusammengestellt. Es handelt sich dabei um den Mittelwert, welcher aus den Resultaten von drei Probekörpern ermittelt wurde. Eine geschätzte Streuung wurde direkt in die Figuren eingezeichnet. Die Tabellen sollen es ermöglichen, einen raschen Überblick der physikalischen Daten der gehärteten Proben von einer bestimmten Sandstein-Gruppe bzw. Probe zu gewinnen. Die physikalischen Eigenschaften der gehärteten Proben sowie ein Vergleich der Eigenschaften der verpressten mit den gegossenen Proben, werden in den nachfolgenden Kapiteln diskutiert.

7.2.1 DIE ABHÄNGIGKEIT DER PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN VOM AKTIVEN CaO-GEHALT

Unter dem aktiven CaO-Gehalt verstehen wir diejenige Menge an gebranntem Kalk, welche nach der Aktivierung der Sandsteine mit Wasser $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bildet. Menge, Zusammensetzung und Ausbildung des Bindemittels (CSH-Phasen) bestimmen im wesentlichen deren physikalische Eigenschaften. Die

Tabelle 6 Resultate der physikalischen Eigenschaften: Verpresste Proben

G ₄	G ₂	G ₃	G ₁	B ₄	B ₃	B ₂	B ₁	B ₅	M	L ₂	A	L ₁	G _p	B _b		Feuchtigkeitsgehalt
0,85	1,24	1,25	1,57	2,74	3,01	3,17	3,32	3,35	3,36	3,41	3,85	3,97	5,13	5,38	(Gew. %)	
M	A	B ₁	B ₂	G ₁	L ₁	L ₂	G ₄	B ₃	B ₄	B ₅	B _b	G ₂	G ₃	G _p		Raumgewicht bei der Prüfung
1470	1520	1570	1570	1600	1610	1620	1620	1620	1640	1640	1650	1650	1670	1700	(kg/m ³)	
M	A	B ₁	B ₂	L ₁	L ₂	B _b	B ₃	B ₅	G ₁	B ₄	G _p	G ₄	G ₂	G ₃		Trockenraumgewicht
1420	1460	1520	1520	1550	1560	1560	1570	1580	1580	1600	1610	1610	1630	1650	(kg/m ³)	
G ₄	G ₁	G ₂	G ₃	B ₃	B ₄	G _p	B ₅	B ₂	M	B ₁	L ₂	L ₁	A	B _b		Druckfestigkeit
2,1	7,6	8,3	9,6	14,1	15,5	16,1	16,5	16,6	18,2	18,9	19,7	20,4	22,5	22,6	(N/mm ²)	
G ₄	G ₂	G ₁	G ₃	M	A	B ₄	G _p	B ₅	B ₃	B ₂	B _b	B ₁	L ₁	L ₂		Biegezugfestigkeit
1,3	3,2	3,7	3,8	3,8	4,9	6,3	6,4	6,6	6,6	7,4	8,1	8,5	9,0	9,2	(N/mm ²)	
G ₄	G ₂	G ₃	G ₁	B ₃	B ₁	B ₄	M	B ₅	B _b	L ₂	L ₁	A	B ₂	G _p		E-Modul
–	4,2	4,5	5,1	6,1	6,2	7,4	7,8	7,9	10,4	10,5	11,7	12,0	12,3	13,4	(kN/mm ²)	
G ₂	B ₄	M	A	L ₁	G _p	B _b										Schwindung
0,42	0,59	0,69	0,76	0,81	0,85	0,91									(mm/m)	
L ₁	G _p		A	B _b	M	B ₄	G ₂									Wassersaugvermögen
0,0140	0,0167		0,0177	0,0182	0,0268	0,0385	0,0592								(kg/m ² .s)	

Menge und die Zusammensetzung der Calciumsilikathydrate wird weitgehend, neben Herstellungsbedingungen, Rohmaterial und Mineralogie, durch den Gehalt an aktivem CaO bestimmt.

Die Proben G_p, A und M verhalten sich meist anders als die übrigen Proben (Fig. 11). Der Grund ist folgender:

G_p, A und M wurden wegen ihres hohen C/S-Verhältnisses im Autoklaven bei einer Haltezeit von 6 Stunden bei 200°C und ca. 16 at nicht vollständig gehärtet, da neben den neugebildeten Bindemittel-Phasen noch freies Ca(OH)₂ bzw. Mg(OH)₂ vorliegt, welches nicht in CSH Phasen gebunden ist.

Wir dürfen somit die unvollständig gehärteten Proben nicht direkt mit den vollständig gehärteten Proben vergleichen. Aus diesem Grunde erfolgte die Berechnung der Korrelationen ohne G_p, A und M.

In dem Übersichts-Diagramm (Fig. 11) wurden G_p, A und M eingezeichnet, die Regressionsgerade bezieht sich jedoch nur auf die vollständig gehärteten Proben.

Tabelle 7 Resultate der physikalischen Eigenschaften: Gegossene Proben

G ₄	G ₂	G ₃	G ₁	M	A	B ₅	L ₁	B ₄	B ₃	L ₂	B ₂	Bb	B ₁	Gp		Feuchtigkeitsgehalt
1,16	1,62	1,63	1,98	2,78	2,89	3,32	3,45	3,68	3,89	3,94	4,02	4,05	4,98	5,50	(Gew. %)	
M	A	B ₂	B ₁	B ₄	B ₃	Bb	L ₁	L ₂	B ₅	G ₃	G ₄	G ₁	Gp	G ₂		Raumgewicht bei der Prüfung
1130	1270	1380	1470	1520	1550	1550	1560	1570	1580	1590	1640	1650	1680	1680	(kg/m ³)	
M	A	B ₂	B ₁	B ₄	B ₃	Bb	L ₁	L ₂	B ₅	G ₃	Gp	G ₁	G ₄	G ₂		Trockenraumgewicht
1100	1230	1330	1400	1470	1490	1490	1510	1510	1530	1560	1590	1620	1620	1650	(kg/m ³)	
G ₄	G ₂	G ₃	G ₁	B ₃	B ₅	B ₂	B ₄	Gp	B ₁	Bb	L ₂	L ₁				Druckfestigkeit
4,3	8,2	8,7	11,4	12,7	13,5	14,2	14,5	14,9	16,9	17,2	17,8	20,0				(N/mm ²)
G ₄	M	A	G ₃	G ₂	G ₁	B ₅	B ₄	Gp	B ₃	B ₂	Bb	L ₂	B ₁	L ₁		Biegezugfestigkeit
1,2	1,5	1,6	2,6	2,7	2,8	3,4	3,5	3,5	3,7	3,7	4,3	5,0	5,1	5,6	(N/mm ²)	
G ₄	B ₄	G ₃	B ₃	G ₂	Bb	B ₂	B ₁	B ₅	G ₁	L ₁	L ₂	Gp				E-Modul
3,3	4,2	4,2	4,7	4,8	6,4	6,4	6,6	6,7	7,1	7,3	8,7	10,2				(kN/mm ²)
G ₂	M	B ₄	A	L ₁	Bb	Gp										Schwindung
0,38	0,63	0,65	0,72	0,78	0,80	0,84										(mm/m)
Gp	L ₁		Bb	B ₄	G ₂	A	M									Wassersaugvermögen
0,0133	0,0152		0,0158	0,0208	0,0283	0,0352	0,0532									(kg/m ² s.)

7.2.1.1 Aktives CaO – Trockenraumgewicht

Wie der Korrelationskoeffizient $R = -0,83$ zeigt (Fig. 12), ist die Korrelation zwischen aktivem CaO und dem Trockenraumgewicht bei den verpressten Proben nicht besonders deutlich. Immerhin ist Tendenz da, dass mit zunehmendem aktivem CaO das Trockenraumgewicht abnimmt. Offenbar spielt hier das spezifische Gewicht sowie die quantitative Zusammensetzung der Mineralien im gehärteten Produkt eine Rolle.

Die Sandsteine der „granitischen Molasse“ (mit wenig CaO und hohem Trockenraumgewicht) haben auch nach dem hydrothermalen Härtingsprozess einen hohen Quarz- und Feldspat-Gehalt, jedoch wenig tobermoritisches Bindemittel (11 Å Tobermorit und CSH I). Mit zunehmendem CaO-Gehalt, d.h. in Richtung der ursprünglich kalkreichen Proben, nimmt der Quarz- und Feldspat-Gehalt ab, die tobermoritische Bindemasse jedoch zu. Gp, A und M weisen zudem noch freie Hydroxide $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und $\text{Mg}(\text{OH})_2$ auf. Die Abnahme des Trockenraumgewichtes mit zunehmendem CaO-Gehalt beruht auf der Abnahme des Quarz- bzw. Feldspat-Gehaltes, bzw. Zunahme der Bindemasse und freien Hydroxide.

VERPRESSTE PROBEN

GEGOSSENE PROBEN

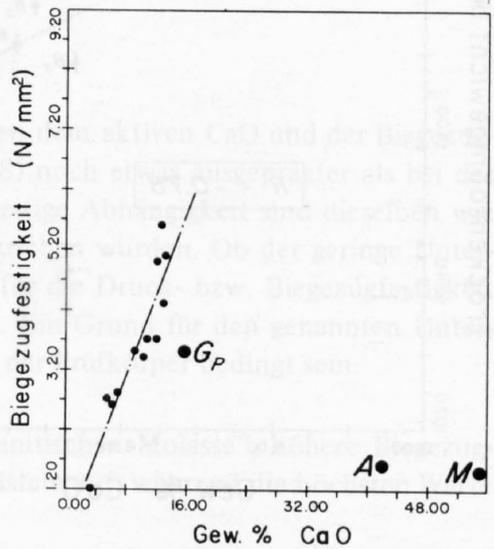
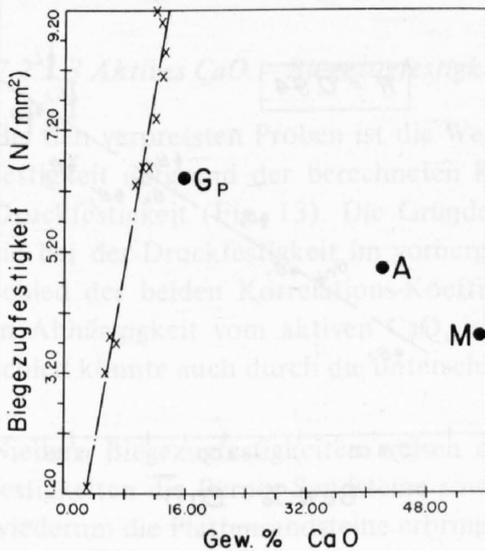
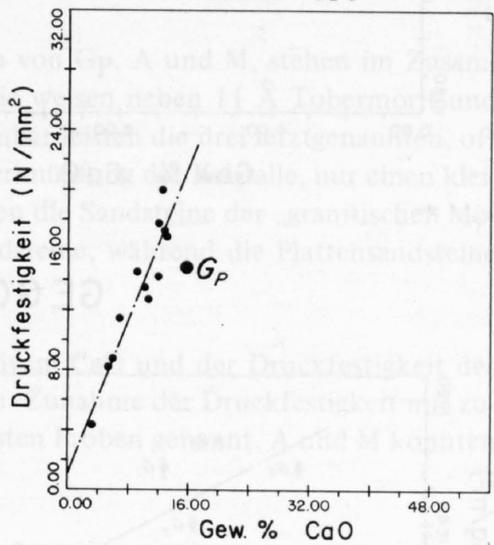
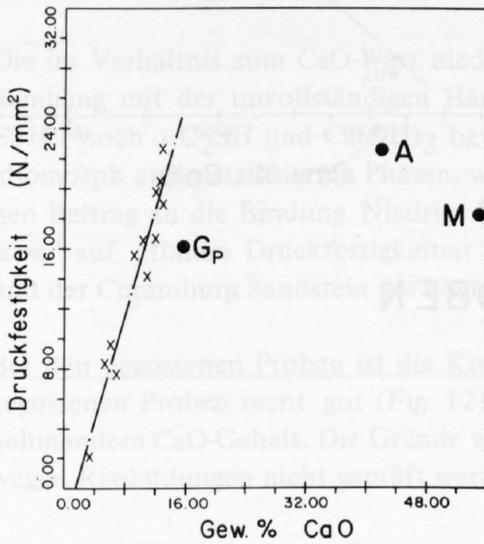
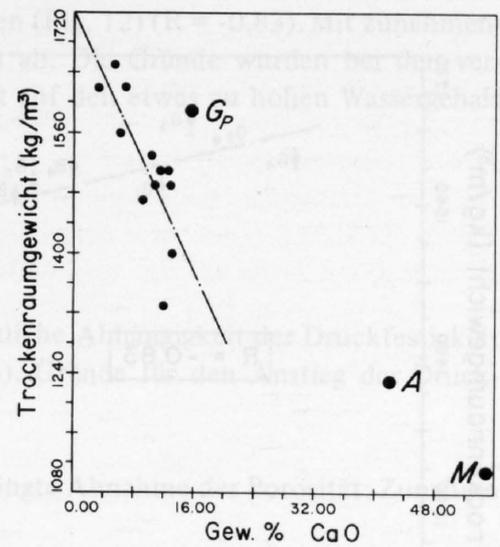
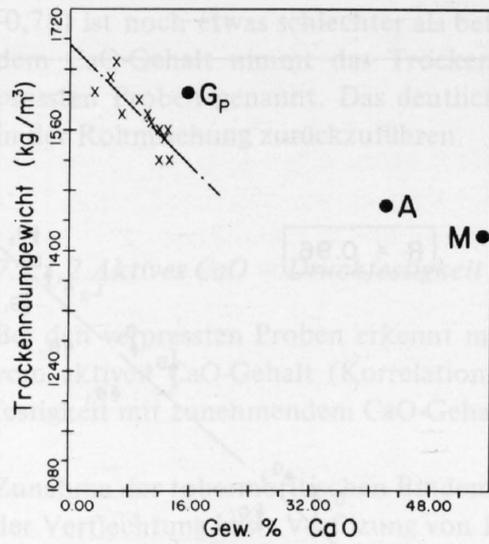
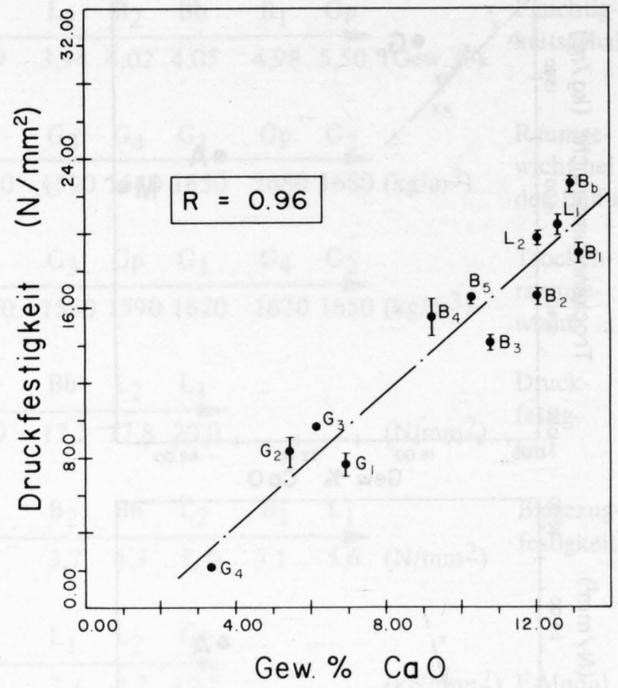
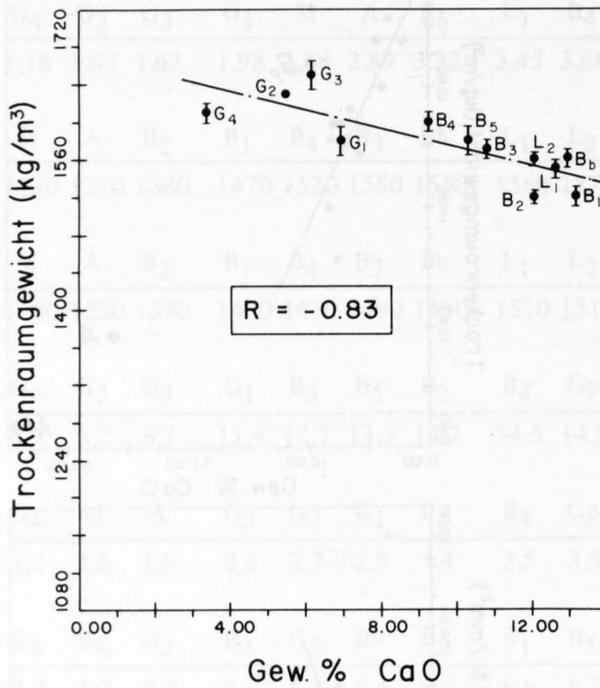


Fig. 11

Trockenraumgewicht, Druck- und Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit vom aktiven CaO-Gehalt bei den vollständig bzw. unvollständig gehärteten Proben G_p, A und M.

VERPRESSTE PROBEN



GEGOSSENE PROBEN

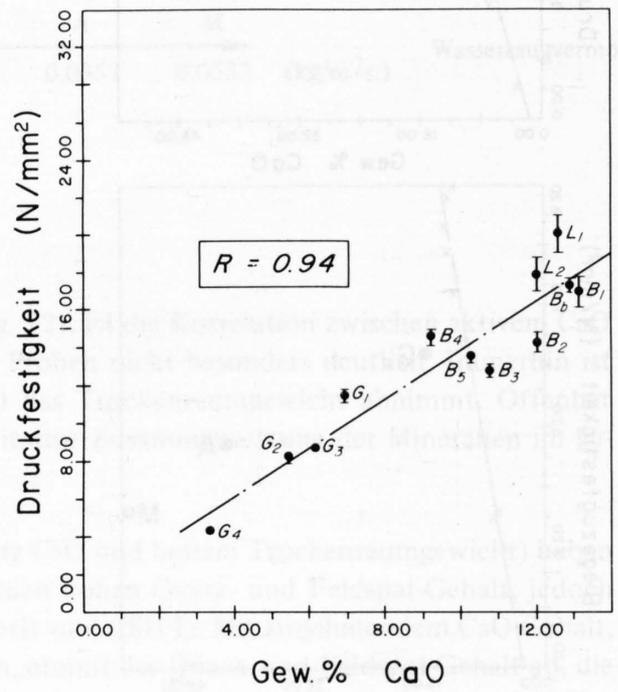
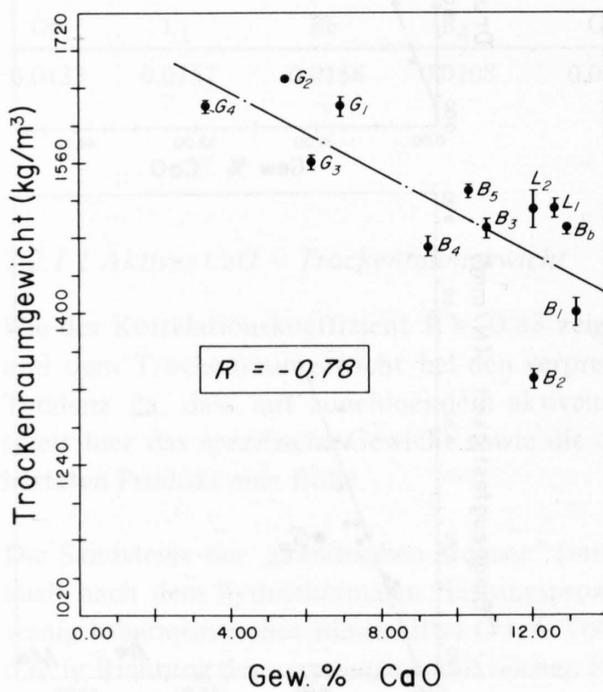


Fig. 12
Trockenraumgewicht, bzw. Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom aktiven CaO-Gehalt bei den vollständig gehärteten Proben.

Die Korrelation zwischen aktivem CaO und Trockenraumgewicht bei den gegossenen Proben ($R = -0,78$) ist noch etwas schlechter als bei den verpressten Proben (Fig. 12) ($R = -0,83$). Mit zunehmendem CaO-Gehalt nimmt das Trockenraumgewicht deutlich ab. Die Gründe wurden bei den verpressten Proben genannt. Das deutliche Abfallen von B₂ ist auf den etwas zu hohen Wassergehalt in der Rohmischung zurückzuführen.

7.2.1.2 Aktives CaO – Druckfestigkeit

Bei den verpressten Proben erkennt man (Fig. 12) eine deutliche Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom aktiven CaO-Gehalt (Korrelationskoeffizient $R = 0,96$). Gründe für den Anstieg der Druckfestigkeit mit zunehmendem CaO-Gehalt sind:

Zunahme der tobermoritischen Bindemasse und dadurch bedingte Abnahme der Porosität; Zunahme der Verflechtung bzw. Verfilzung von 11 Å Tobermorit.

Die im Verhältnis zum CaO-Wert niederen Druckfestigkeiten von G_p, A und M, stehen im Zusammenhang mit der unvollständigen Härtung dieser Proben; sie weisen neben 11 Å Tobermorit und CSH I noch α -C₂SH und Ca(OH)₂ bzw. Mg(OH)₂ auf. Offenbar leisten die drei letztgenannten, oft idiomorph auskristallisierten Phasen, wegen ihrer geringen Verknüpfung der Kristalle, nur einen kleinen Beitrag an die Bindung. Niedrige Druckfestigkeiten weisen die Sandsteine der „granitischen Molasse“ auf. Höhere Druckfestigkeiten zeigen die Berner Sandsteine, während die Plattensandsteine und der Chramburg Sandstein die höchsten Werte erbringen.

Bei den gegossenen Proben ist die Korrelation zwischen aktivem CaO und der Druckfestigkeit der gegossenen Proben recht gut (Fig. 12) ($R = 0,94$): deutliche Zunahme der Druckfestigkeit mit zunehmendem CaO-Gehalt. Die Gründe wurden bei den verpressten Proben genannt. A und M konnten wegen Rissbildungen nicht geprüft werden.

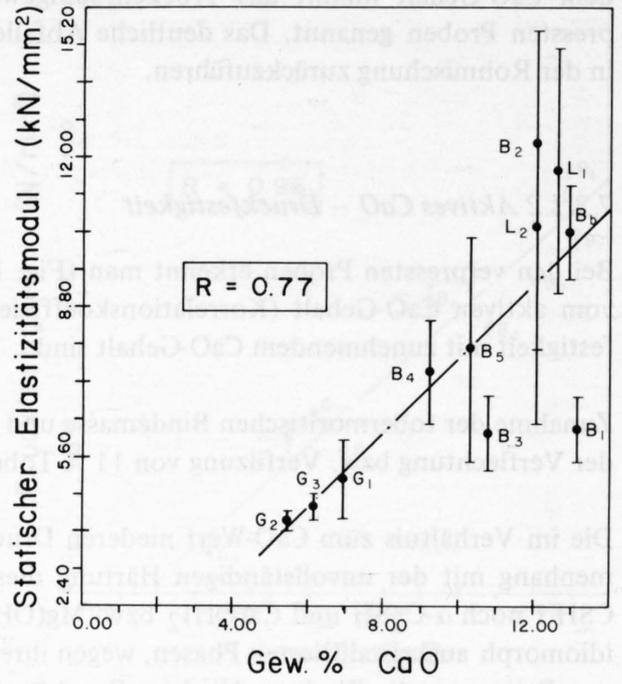
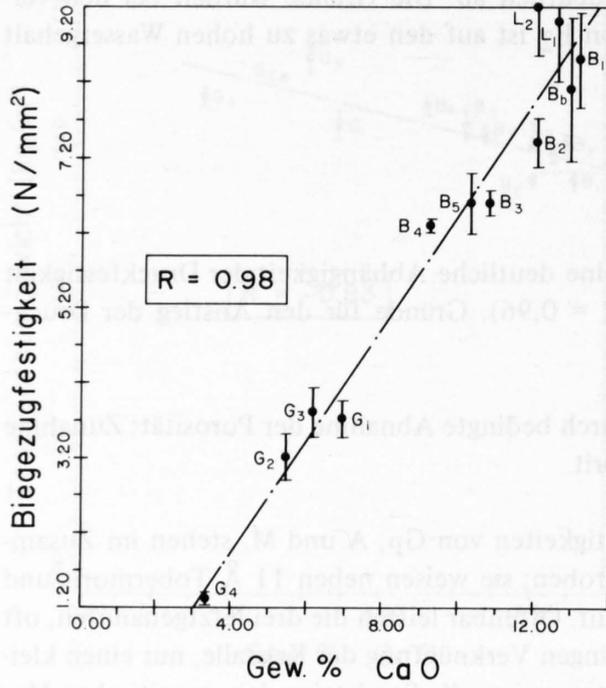
7.2.1.3 Aktives CaO – Biegezugfestigkeit

Bei den verpressten Proben ist die Wechselbeziehung zwischen dem aktiven CaO und der Biegezugfestigkeit aufgrund der berechneten Korrelationen ($R = 0,98$) noch etwas ausgeprägter als bei der Druckfestigkeit (Fig. 13). Die Gründe für diese enge gegenseitige Abhängigkeit sind dieselben wie sie bei der Druckfestigkeit im vorhergehenden Kapitel beschrieben wurden. Ob der geringe Unterschied der beiden Korrelations-Koeffizienten signifikant ist für die Druck- bzw. Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit vom aktiven CaO, ist schwer abzuschätzen. Ein Grund für den genannten Unterschied könnte auch durch die unterschiedlichen Dimensionen der Prüfkörper bedingt sein.

Niedere Biegezugfestigkeiten weisen die Sandsteine der „granitischen Molasse“, höhere Biegezugfestigkeiten die Berner Sandsteine sowie der Chramburg Sandstein auf, während die höchsten Werte wiederum die Plattensandsteine erbringen.

Bei den gegossenen Proben beträgt der Korrelations-Koeffizient $R = 0,92$ (Fig. 13). Mit zunehmendem CaO-Gehalt erfolgt eine Zunahme der Biegezugfestigkeit. Die Gründe wurden genannt.

VERPRESSTE PROBEN



GEGOSSENE PROBEN

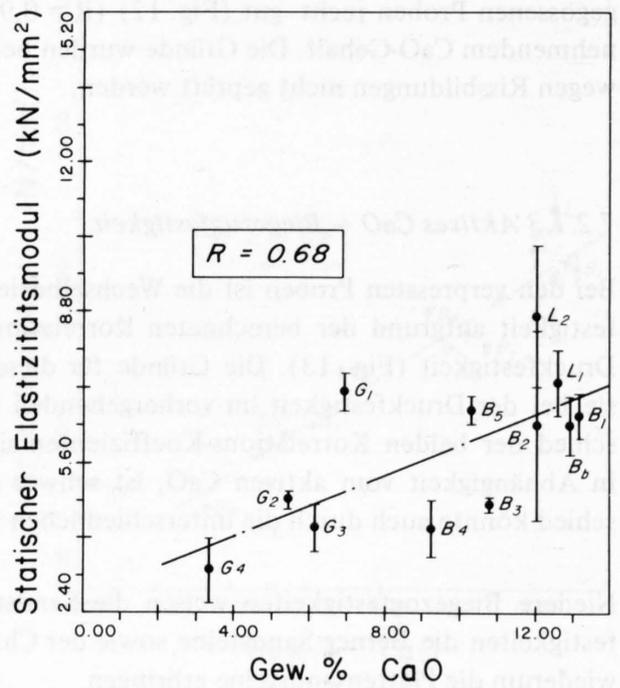
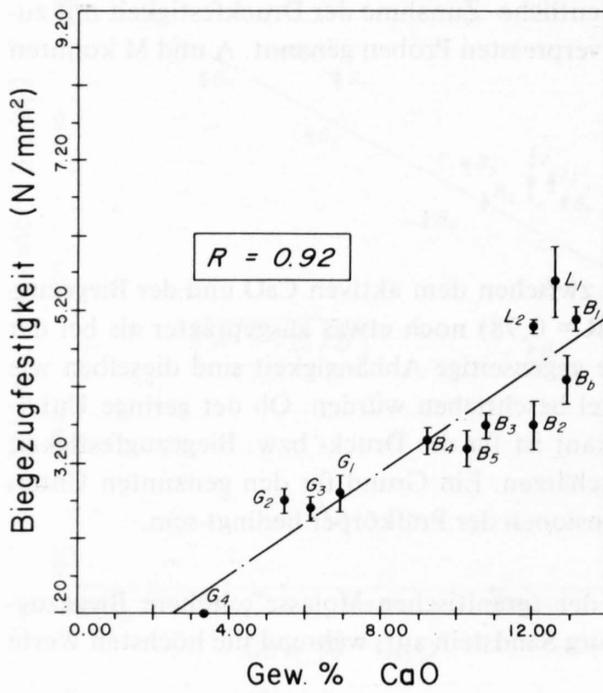


Fig. 13
Biegezugfestigkeit, bzw. E-Modul in Abhängigkeit vom aktiven CaO-Gehalt bei den vollständig gehärteten Proben.

7.2.1.4 Aktives CaO – E-Modul

Generell nimmt der E-Modul bei den verpressten Proben mit zunehmendem CaO-Gehalt zu (Fig. 13); sein Verhalten ist vergleichbar mit demjenigen der Druck- bzw. Biegezugfestigkeiten in Abhängigkeit vom aktiven CaO. Die Korrelation des E-Moduls ist jedoch nicht besonders gut ($R = 0,77$). Interessant ist, dass der höchste E-Modul-Wert bei Gp (Sandstein/Mergel-Probe) gemessen wurde. Dies dürfte durch den ursprünglich hohen Anteil an blättrigen Tonmineralien bedingt sein. Der Einfluss der Tonmineralien auf die Bildung von Calciumsilikathydraten wurde von ŠAUMAN (1969) diskutiert. Von den Tonmineralien Illit, Montmorillonit und Kaolinit soll vor allem Kaolinit einen wesentlichen Einfluss auf Bildungsmenge, Chemie und Struktur von 11 \AA Tobermorit haben. In Gp lagen ursprünglich alle drei genannten Tonmineralien vor. REM-Aufnahmen von Gp zeigen vor allem blättrige Ausbildung des tobermoritischen Bindemittels.

Der Korrelations-Koeffizient bei den gegossenen Proben beträgt in diesem Falle nur noch $R = 0,68$ (Fig. 13); Gp weist auch bei den gegossenen Proben den höchsten Wert auf. Im Gegensatz zu den übrigen gegossenen Proben, zeigen REM-Aufnahmen von Gp vor allem eine blättrige Ausbildung der Bindemasse. A und M konnten wegen Rissbildungen nicht geprüft werden.

7.2.1.5 Aktives CaO – Schwinden

Die Zunahme des Schwindens mit zunehmendem aktivem CaO-Gehalt (Fig. 14) bei den verpressten Proben dürfte durch die Zunahme der Bindemittelmasse und deren Ausbildung bedingt sein. Die Schwindung der eigentlichen Sandsteine (ohne Gp, A und M) kann in diesem Falle nicht in Abhängigkeit mit der Art der Calciumsilikathydrate gebracht werden; sie haben alle die gleiche Bindemittel-Mineralogie (vor allem 11 \AA Tobermorit evtl. CSH I). Ein eher gegenteiliges Verhalten weisen Gp?, A und M auf. Die Abnahme des Schwindverhaltens ist in diesem Falle wohl durch das Auftreten von $\alpha\text{-C}_2\text{SH}$ sowie durch die Zunahme der freien Hydroxide Ca(OH)_2 bzw. Mg(OH)_2 bedingt. BESSEY (1964) in TAYLOR (1964) nimmt an, dass die Schwindung in Abhängigkeit von der Art der Neubildung wie folgt abnimmt:

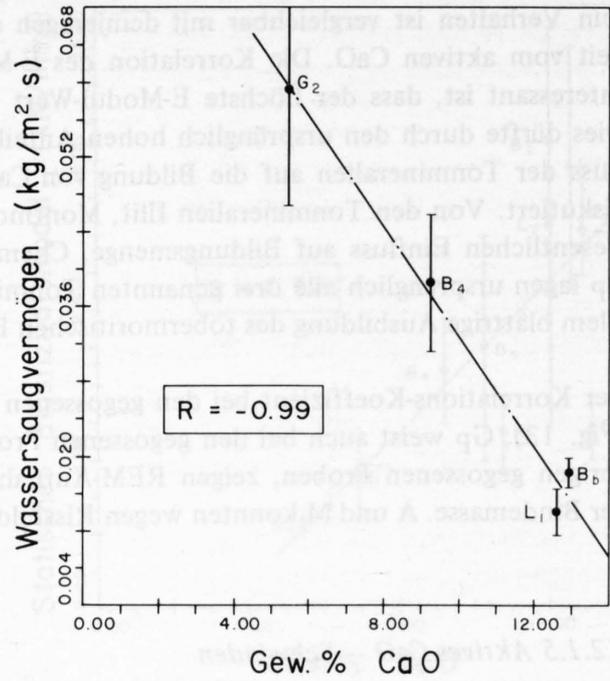
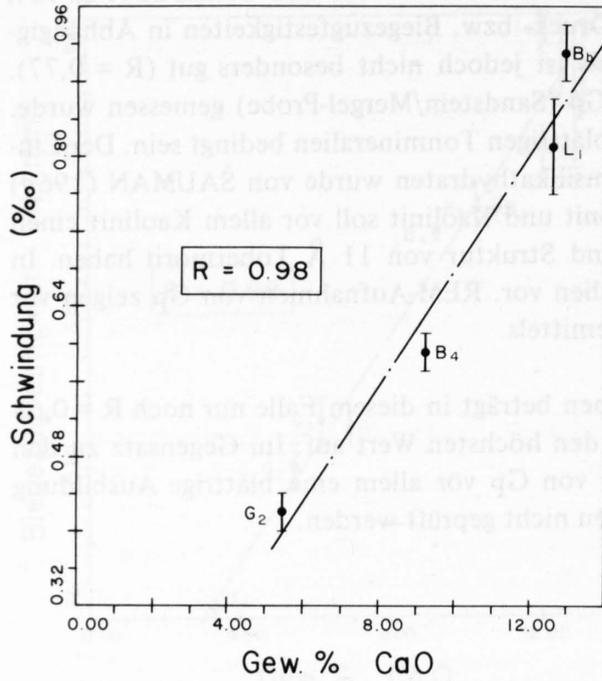


Aufgrund der früheren Resultate wurde das Schwindverhalten nur noch an einem repräsentativen Beispiel pro Sandstein-Typ ermittelt. Die Korrelation ($R = -0,99$) zwischen aktivem CaO und dem Schwindverhalten der gegossenen Proben ist in diesem Falle noch etwas besser als bei den verpressten Proben ($R = 0,98$) (Fig. 14).

7.2.1.6 Aktives CaO – Wassersaugvermögen

Die Abnahme des Wassersaugvermögens ($R = -0,99$) mit zunehmendem CaO-Gehalt bei den verpressten als auch den gegossenen Proben dürfte durch die Zunahme der Bindemittelmenge bedingt sein, was eine Verringerung der Porosität und Verkleinerung der kommunizierenden Hohlräume zur Folge hat. Das Verhalten von Gp, A und M ist auf ihr dichtes Gefüge (geringe Porosität) zurückzuführen.

VERPRESSTE PROBEN



GEGOSSENE PROBEN

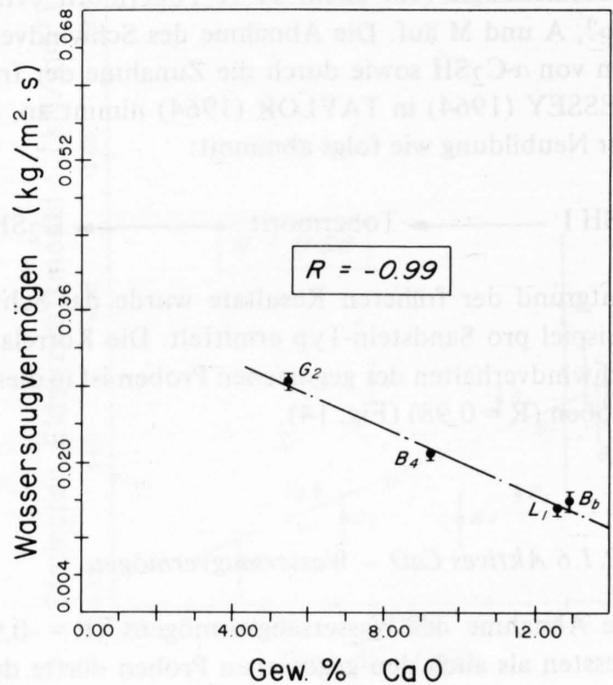
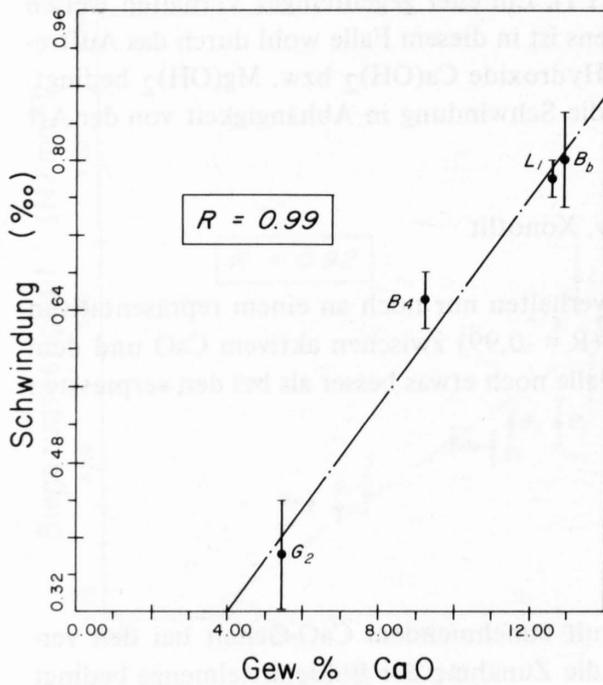


Fig. 14 Schwindung, bzw. Wassersaugvermögen in Abhängigkeit vom aktiven CaO-Gehalt bei den vollständig gehärteten Proben.

7.2.1.7 Vergleich der physikalischen Eigenschaften der verpressten mit den gegossenen Proben in Abhängigkeit vom aktiven CaO-Gehalt

Die physikalischen Eigenschaften der verpressten Proben zeigen durchwegs eine bessere Korrelation mit dem aktiven CaO-Gehalt als die gegossenen Proben. Der Grund für dieses Verhalten muss in der verschiedenen Herstellung der Rohmischung der verpressten bzw. gegossenen Proben liegen.

Trockenraumgewicht

Bei niederen CaO-Gehalten verhalten sich die gegossenen Proben etwa gleich den verpressten (Fig. 15). Bei höheren CaO-Werten bzw. höherer Bindemittelmenge, nimmt das Trockenraumgewicht der gegossenen Proben stärker ab als bei den verpressten. Dieses Verhalten wird durch die ca. doppelt so grosse negative Steigung der Regressionsgerade der gegossenen Proben deutlich.

Die mit Ausnahme von G₁, G₂ und G₄ kleineren Trockenraumgewichte der gegossenen Proben, sind auf den hohen Wassergehalt in der Rohmischung zurückzuführen; dieser kann bis dreimal so gross sein (siehe Fig. 10) wie jener in der Rohmischung der verpressten Proben. Der hohe Wassergehalt hat zur Folge, dass in den Stahlformen 4 x 4 x 16 cm bei den gegossenen Proben weniger Material Platz hat, die Probekörper daher leichter sind und das Raumgewicht entsprechend niedriger ist, als bei den verpressten Proben.

REM-Übersichtsaufnahmen zeigen, dass bei den gegossenen Probekörpern die Mikroporosität etwa gleich oder kleiner als bei den verpressten Proben ist. Der vermutete höhere Bindemassegehalt der gegossenen Proben konnte nicht bestätigt werden; die stärkere negative Steigung der Regressionsgerade bei den gegossenen Proben, dürfte daher auf eine submikroskopische Porosität der Bindemasse zurückzuführen sein.

Druckfestigkeit

Bei niederen CaO-Gehalten sind die Druckfestigkeiten der gegossenen Proben etwa gleich gross oder grösser als die der verpressten Proben (Fig. 15). Die Gründe dürften sein: Die bei den gegossenen Proben der aquitanen Sandsteine (G) ausgeprägte Mikroporositätsverkleinerung sowie das etwas höhere Raumgewicht gegenüber den verpressten Proben.

Die bei den verpressten Proben G₄ beobachtete, teilweise oberflächliche Austrocknung der Rohlinge kurz vor der Dampfhärtung, dürfte sich wegen des zu geringen Wassergehaltes ebenfalls negativ auf die Druckfestigkeit ausgewirkt haben.

Bei höheren CaO-Gehalten ist die Druckfestigkeit der verpressten Proben stets grösser als jene der gegossenen Proben. Dies ist auf die höheren Trockenraumgewichte der verpressten Proben zurückzuführen.

Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeiten der gegossenen wie der verpressten Proben verhalten sich nur im Falle von G₄ etwa gleich (Fig. 15). Mit zunehmendem aktivem CaO-Gehalt nimmt die Biegezugfestigkeit der gegossenen Proben nur etwa halb so stark zu wie die der verpressten Proben. Wiederum sind für die höheren Biegezugfestigkeiten der verpressten Proben wohl deren höheres Raumgewicht verantwortlich zu machen.

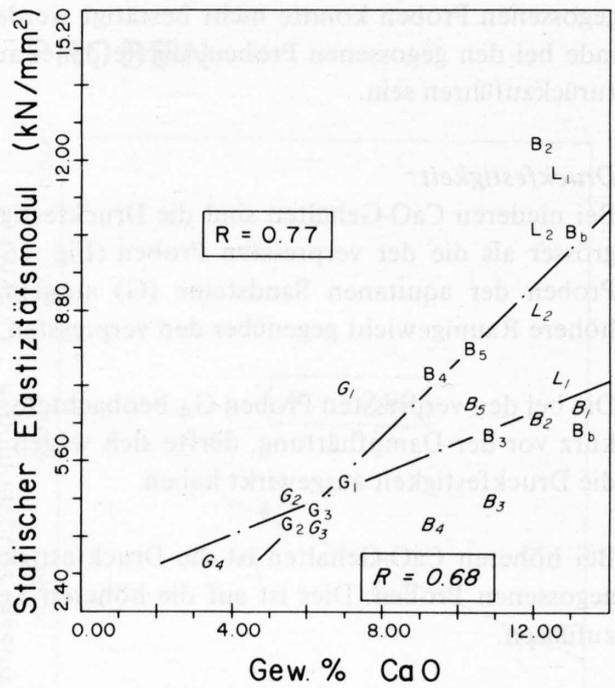
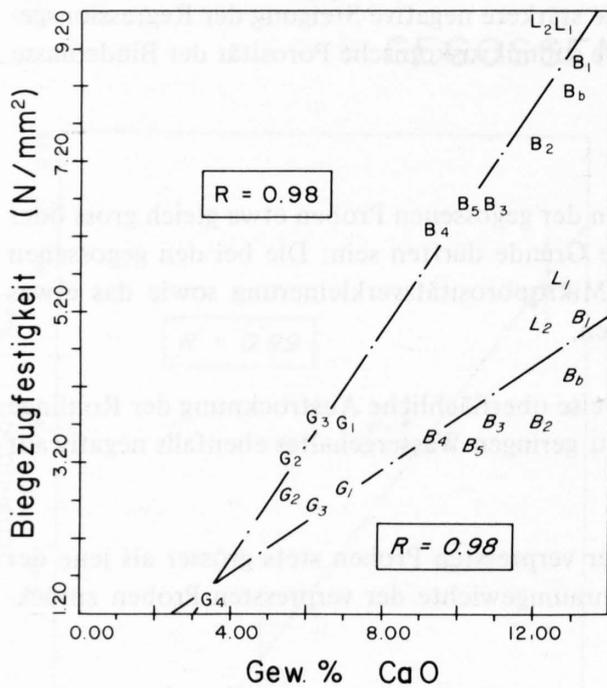
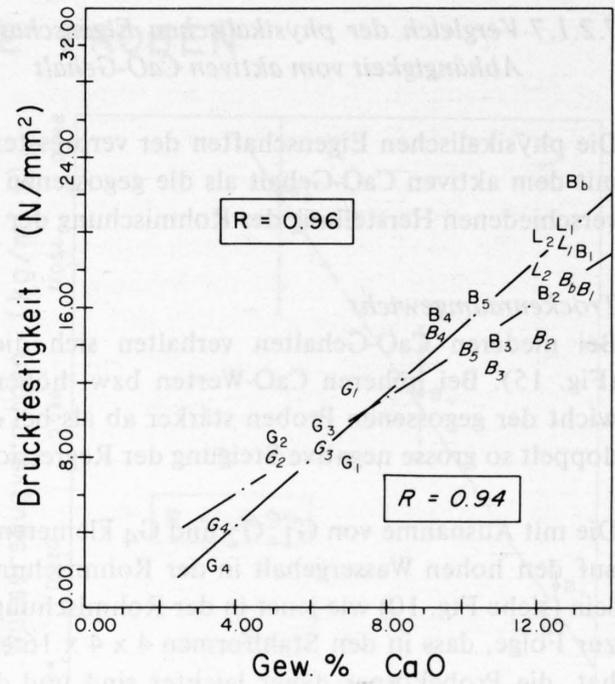
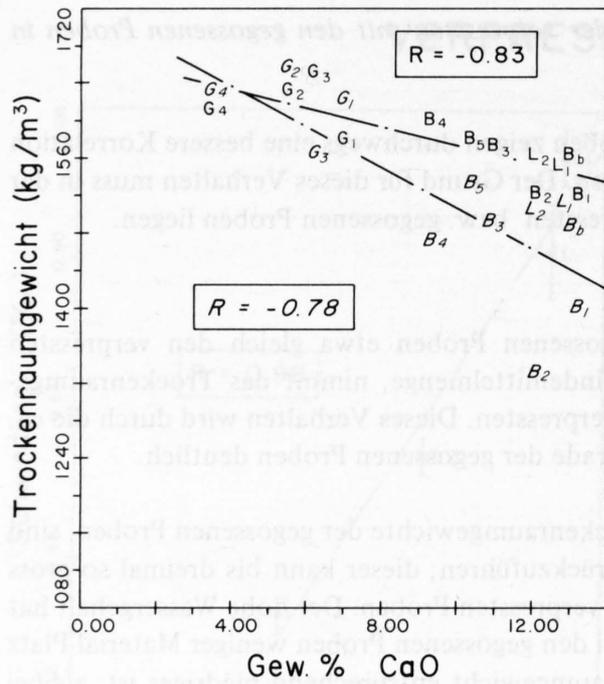


Fig. 15 Vergleich der physikalischen Eigenschaften der verpressten mit den gegossenen Proben in Abhängigkeit vom aktiven CaO-Gehalt (gegossene Proben *kursiv* geschrieben).

Die starke Divergenz der Werte für die Biegezugfestigkeit der verpressten bzw. gegossenen Proben bei höheren CaO-Gehalten, könnte mit der Ausbildung der tobermoritischen Bindemasse in Zusammenhang stehen; bei den verpressten Proben dominieren leistenförmige bis blättrige Ausbildungen, während bei den gegossenen Proben mehr körnig bis kurzplattige Formen der Bindemasse zu beobachten sind. Die leistenförmigen bis blättrigen Formen sind meist als dichter Filz ausgebildet; sie leisten möglicherweise den Biege- und Zugkräften einen grösseren Widerstand als die krustenbildenden körnigen bis kurzplattigen Ausbildungen.

E-Modul

Bei kleinen CaO-Gehalten zeigen die gegossenen wie die verpressten Proben etwa die gleichen Werte (Fig. 15); bei höheren CaO-Gehalten divergieren die Werte deutlich, wobei die verpressten Proben z.T. wesentlich höhere E-Modul aufweisen als die gegossenen.

Schwinden

Wie die beiden Regressionsgeraden der verpressten bzw. gegossenen Proben zeigen, besteht kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Typen (Fig. 16).

Wassersaugvermögen

Bei niederen CaO-Gehalten weisen die gegossenen Proben ein wesentlich kleineres Wassersaugvermögen auf als die entsprechend verpressten Proben (Fig. 16). Bei höheren CaO-Gehalten konvergieren die Werte der beiden Probe-Typen.

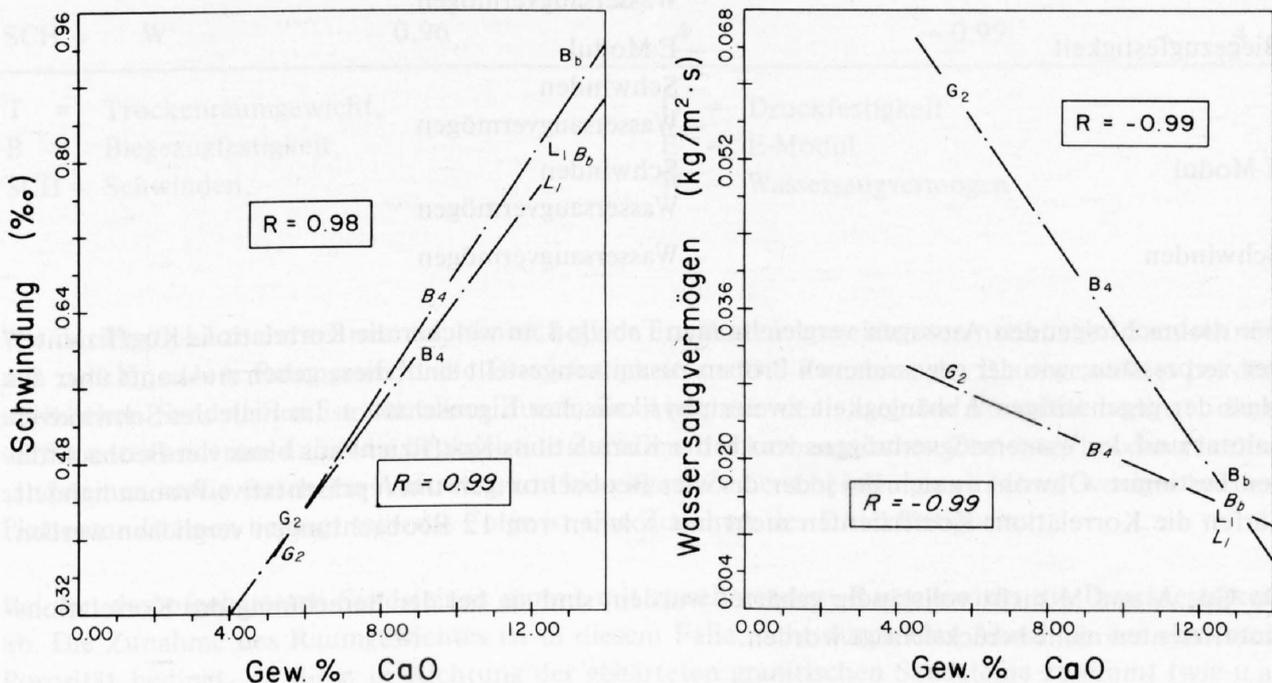


Fig. 16

Vergleich der physikalischen Eigenschaften der verpressten mit den gegossenen Proben in Abhängigkeit vom aktiven CaO-Gehalt (gegossene Proben *kursiv* geschrieben).

Wie REM-Aufnahmen zeigen (Fig. 21 und 22), haben die gegossenen Proben bei niederen CaO-Gehalten eine kleinere Mikroporosität als die entsprechenden verpressten Proben. Bei höheren CaO-Gehalten wird der Porositäts-Unterschied zwischen den beiden Probe-Typen immer kleiner, da offenbar in beiden Fällen genug Bindemasse gebildet wurde, um die Poren mehr oder weniger auszufüllen.

7.2.2 DIE GEGENSEITIGEN ABHÄNGIGKEITEN DER PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN

Setzt man die 6 physikalischen Eigenschaften miteinander in Beziehung, so resultieren 15 Möglichkeiten sowohl für die verpressten wie für die gegossenen Proben:

Trockenraumgewicht	– Druckfestigkeit
	– Biegezugfestigkeit
	– E-Modul
	– Schwinden
	– Wasseraugvermögen
Druckfestigkeit	– Biegezugfestigkeit
	– E-Modul
	– Schwinden
	– Wasseraugvermögen
Biegezugfestigkeit	– E-Modul
	– Schwinden
	– Wasseraugvermögen
E-Modul	– Schwinden
	– Wasseraugvermögen
Schwinden	– Wasseraugvermögen

Für die nachfolgenden Aussagen vergleiche man Tabelle 8, in welcher die Korrelations-Koeffizienten der verpressten, wie der gegossenen Proben zusammengestellt sind; diese geben Auskunft über das Mass der gegenseitigen Abhängigkeit zweier physikalischer Eigenschaften. Im Falle des Schwindverhaltens und des Wasseraugvermögens wurde der Korrelations-Koeffizient aus bloss vier Beobachtungen bestimmt. Obwohl es sich bei jeder der vier Beobachtungen um repräsentative Proben handelt, dürfen die Korrelations-Koeffizienten nicht mit solchen von 12 Beobachtungen verglichen werden.

Da Gp, A und M nicht vollständig gehärtet wurden, sind sie bei der Berechnung der Korrelations-Koeffizienten nicht berücksichtigt worden.

Die Korrelationen zwischen dem Trockenraumgewicht und den Festigkeiten bzw. dem E-Modul (Tab. 8) sind bei den verpressten und den gegossenen Proben schlecht. Zudem nehmen sie mit zunehmendem Trockenraumgewicht ab. Der Grund für dieses abnorm erscheinende Verhalten soll im Vergleich zu den Druckfestigkeiten der natürlichen, ungehärteten Sandsteine besprochen werden.

Tabelle 8

Die gegenseitigen Abhängigkeiten der physikalischen Eigenschaften bei den verpressten und gegossenen Proben: Ein Vergleich der Korrelations-Koeffizienten.

Physikalische Eigenschaften	Verpresste Proben		Gegossene Proben	
	Korr.-Koeff.	Anzahl Beob.	Korr.-Koeff.	Anzahl Beob.
T – D	- 0,68	12	- 0,61	12
– B	- 0,76	12	- 0,58	12
– E	- 0,67	11	- 0,28	12
– SCH	- 0,96	4	- 0,87	4
– W	+ 0,99	4	+ 0,81	4
D – B	+ 0,97	12	+ 0,97	12
– E	+ 0,79	11	+ 0,75	12
– SCH	+ 0,99	4	+ 0,96	4
– W	- 0,97	4	- 0,98	4
B – E	+ 0,79	11	+ 0,74	12
– SCH	+ 0,93	4	+ 0,84	4
– W	- 0,99	4	- 0,90	4
E – SCH	+ 0,94	4	+ 0,67	4
– W	- 0,99	4	- 0,75	4
SCH – W	- 0,96	4	- 0,99	4

T = Trockenraumgewicht,

B = Biegezugfestigkeit,

SCH = Schwinden,

D = Druckfestigkeit

E = E-Modul

W = Wassersaugvermögen

Wie der Figur 17 zu entnehmen ist, nimmt bei den erwähnten, ungehärteten natürlichen Sandsteinen mit zunehmendem Raumgewicht die Druckfestigkeit zu. Die Zunahme des Raumgewichtes bei den natürlichen Sandsteinen ist vor allem durch die Abnahme der absoluten Porosität bedingt; diese dürfte unter anderem durch die beobachtete Zunahme des karbonatischen Zementes bei den Plattensandsteinen sowie durch das Auftreten von kieseligem Zement bei den granitischen weniger bei den Plattensandsteinen bedingt sein; die Folge ist eine Zunahme der Druckfestigkeit.

Bei den dampfgehärteten Sandsteinen nimmt mit zunehmendem Raumgewicht die Druckfestigkeit ab. Die Zunahme des Raumgewichtes ist in diesem Falle nicht durch eine Abnahme der absoluten Porosität bedingt, da diese in Richtung der gehärteten granitischen Sandsteine zunimmt (wie u.a. REM-Aufnahmen entnommen werden kann); sie ist eine Folge des abnehmenden CaO-Gehaltes und der damit verbundenen Abnahme der CSH-Bindemasse. L^A hat einen hohen Anteil an CSH-Bindemasse und daher relativ hohe Druckfestigkeit. Das Raumgewicht ist jedoch wegen dem niederen spezifischen Gewicht der tobermoritischen CSH-Phasen gegenüber Quarz und Feldspat relativ tief.

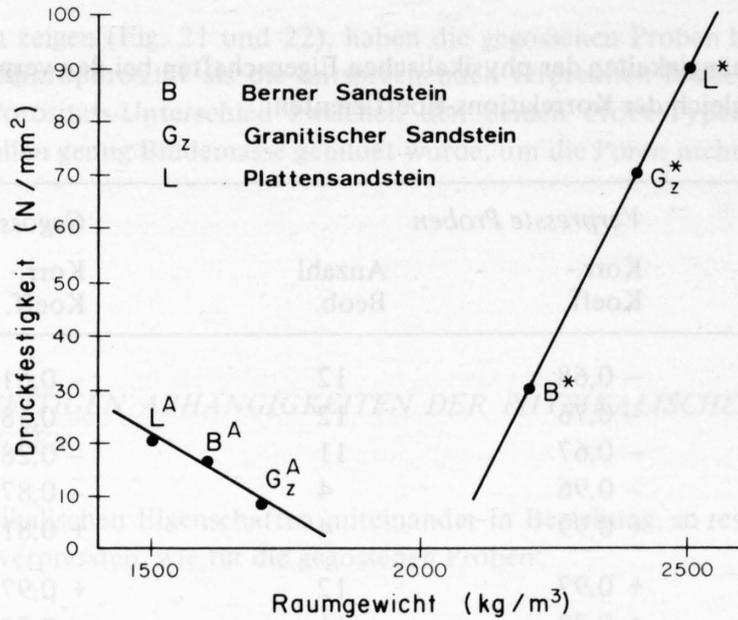


Fig. 17
Die Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Raumgewicht bei den natürlichen* und den Autoklav^A-gehärteten Sandsteinen.

G_Z^A hat einen niederen Anteil an CSH-Bindemasse und daher eine geringe Druckfestigkeit. Das Raumgewicht ist aus den genannten Gründen, wegen dem deutlichen Überwiegen von Quarz und Feldspat gegenüber den tobermoritischen CSH-Phasen, relativ hoch.

Eine gute Korrelation scheint bei den verpressten Proben zwischen dem Trockenraumgewicht und der Schwindung bzw. dem Wasseraugvermögen zu bestehen (Tab. 8). Die Abnahme des Schwindens mit zunehmendem Trockenraumgewicht ist durch die Abnahme der Bindemasse bedingt. Die Zunahme des Wasseraugvermögens mit zunehmendem Trockenraumgewicht folgt aus der Abnahme der Bindemasse und der damit verbundenen Zunahme der Porosität.

Eine deutliche Abhängigkeit der Biegezugfestigkeit von der Druckfestigkeit kann sowohl bei den verpressten wie bei den gegossenen Proben festgestellt werden (Fig. 18); sie ist bedingt durch die Zunahme des aktiven CaO-Gehaltes und der damit verbundenen Zunahme der Bindemasse. KOMOCHOV (1962) beschreibt diese Abhängigkeit mit der Gleichung:

$$B = 0,182 D$$

und die von uns ermittelten Regressionsgleichungen:

Verpresste Proben	}	$B = 0,403 D + 0,371$
		$B = 0,425 D$ (Nullmodell)
Gegossene Proben	}	$B = 0,264 D + 0,133$
		$B = 0,273 D$ (Nullmodell)

Eine eher schlechte Korrelation besteht für beide Probe-Typen zwischen den Festigkeiten und dem E-Modul (Tab. 8). Hingegen scheint die Korrelation der Festigkeiten und des E-Moduls mit der Schwindung vor allem bei den verpressten Proben gut zu sein (Tab. 8). In Figur 18 ist die Abhängigkeit der Schwindung von der Druckfestigkeit aufgezeigt. Eine Proportionalität zwischen Schwindung und Festigkeit stellte WASHA (1965) bereits fest. Auch in diesem Falle dürfte die Zunahme der Bindemittelmasse für dieses Verhalten verantwortlich sein.

Mit zunehmenden Festigkeiten bzw. E-Modul nimmt das Wasseraugvermögen ab (Tab. 8). Diese Abnahme des Wasseraugvermögens ist durch die Zunahme des Bindemittel-Gehaltes und der damit verbundenen Abnahme der Porosität bedingt. In Figur 18 ist die Beziehung zwischen Biegezugfestigkeit und Wasseraugvermögen festgehalten.

Ein interessanter Zusammenhang besteht zwischen dem Schwindverhalten und dem Wasseraugvermögen (Fig. 18). Mit zunehmender Schwindung nimmt das Wasseraugvermögen ab. Die Zunahme der Schwindung ist vor allem durch die Zunahme der Bindemittelmenge bedingt; diese Zunahme hat aber eine Abnahme der Porosität zur Folge, was die Abnahme des Wasseraugvermögens erklärt. Der Einfluss der Körnung, welche bei den einzelnen Sandstein-Typen verschieden ist, unterstützt das beobachtete Verhalten zwischen Schwinden und Wasseraugvermögen. Die Grösse dieses Einflusses bei unterschiedlichen Gehalten an aktivem CaO ist schwer abzuschätzen.

7.2.3 VERGLEICH DER GEGENSEITIGEN ABHÄNGIGKEITEN DER PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN DER VERPRESSTEN MIT DEN GEGOSSENEN PROBEN

Vergleicht man die Korrelations-Koeffizienten der verpressten mit den gegossenen Proben (Tab. 8), so stellt man fest, dass abgesehen von drei Fällen, die Korrelations-Koeffizienten bei den verpressten Proben besser sind. Der Grund für die schlechteren Korrelationen bei den gegossenen Proben muss in der andersartigen Herstellung und der damit verbundenen differenzierten Mineralogie gegenüber den verpressten Proben liegen. Anhand der Diagramme in Fig. 18 soll, wegen den guten Korrelationen, auf ein paar Unterschiede und deren Ursachen hingewiesen werden.

Die gegenseitige Abhängigkeit von Druck- und Biegezugfestigkeit zeigt, dass im Falle der verpressten Proben die Werte für die Biegezugfestigkeit knapp halb so gross sind wie die Druckfestigkeitswerte, während bei den gegossenen Proben die Biegezugfestigkeiten etwa ein Viertel der Druckfestigkeiten ausmachen. Nach GUNDLACH (1973) spielt bei der Ermittlung dieser Relation Prüfmethode, Prüfkörpergrösse und Feuchtigkeitsgehalt der Prüfkörper eine Rolle. In unserem Falle sind zudem gewisse Unterschiede in der Mineralogie der verpressten bzw. gegossenen Proben von Bedeutung.

Wie bereits im Kapitel 7.2.1.7 unter Biegezugfestigkeit erwähnt wurde, ist vor allem das Gefüge der Bindemasse (ein leistenförmiger bis blättriger Filz) bei den verpressten Proben der Grund, dass die Biegezugfestigkeiten etwa halben Druckfestigkeiten entsprechen. Im Gegensatz dazu sind nur etwa ein Viertel der Druckfestigkeit ausmachenden Biegezugfestigkeiten der gegossenen Proben die Folge des hauptsächlich körnig-kurzplattigen Gefüges der ebenfalls tobermoritischen Bindemasse.

Figur 18 zeigt auch die Abhängigkeit der Schwindung von der Druckfestigkeit. Es besteht kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Probe-Typen. Die Verschiebung der Regressionsge-

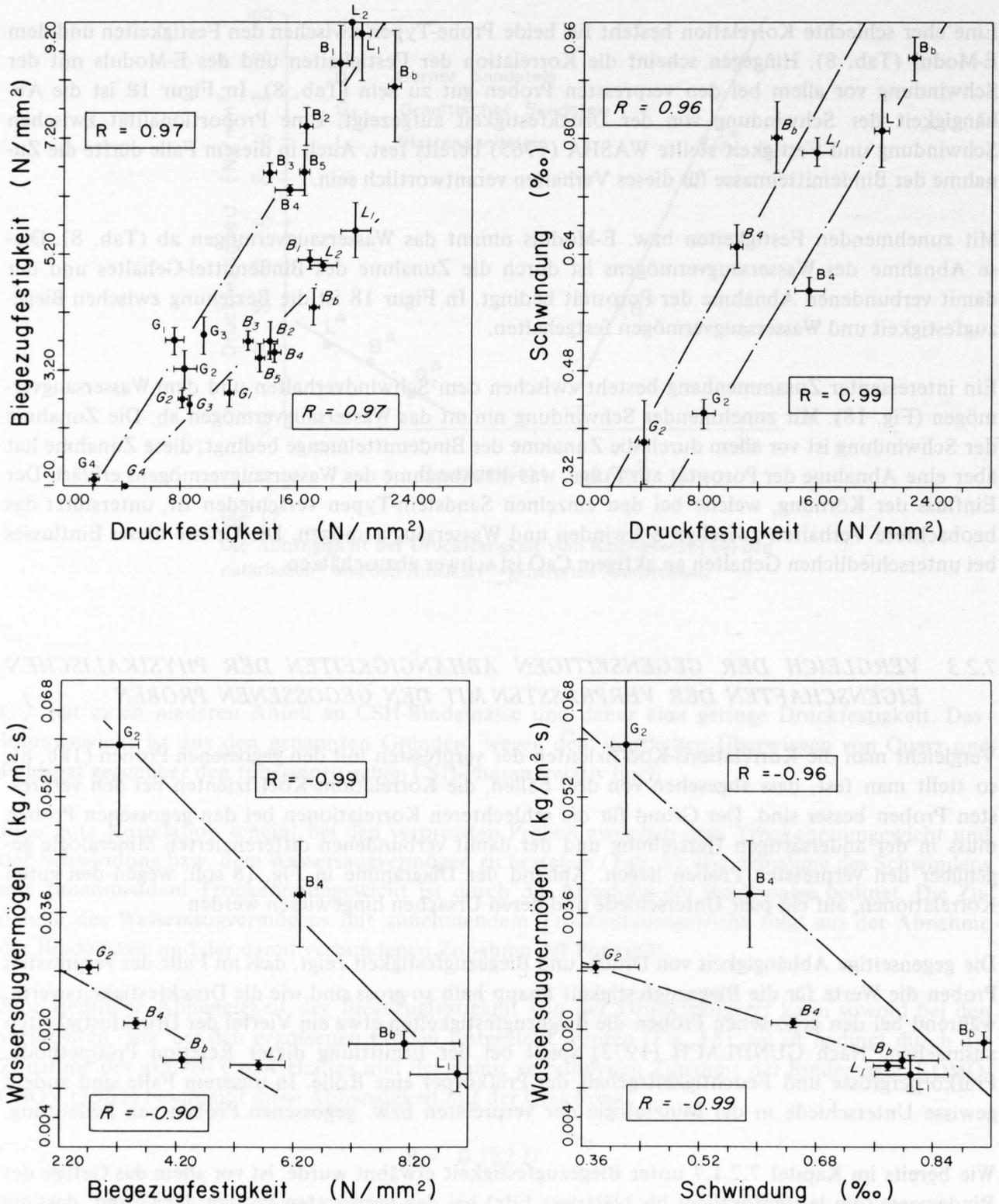


Fig. 18
Die gegenseitigen Abhängigkeiten der physikalischen Eigenschaften bei den verpressten bzw. gegossenen Proben (gegossene Proben *kursiv* geschrieben).

rade nach etwas höheren Schwindwerten bei den gegossenen Proben ist eine Folge des ursprünglich höheren Wassergehaltes gegenüber den verpressten Proben. .

Wie der Figur 18 zu entnehmen ist, ist das Wasseraugvermögen in Abhängigkeit der Biegezugfestigkeit bei den verpressten Proben G₂ und B₄ etwa doppelt so gross wie dieses bei den entsprechenden gegossenen Proben. Der Grund liegt in der grösseren Mikroporosität der verpressten Proben G₂ und B₄. B_b und L₁ zeigen bei beiden Probe-Typen etwa gleiches Wasseraugvermögen. Wie REM-Aufnahmen zeigen, ist dies eine Folge etwa gleicher Mikroporosität. Die deutlich höheren Biegezugfestigkeiten bei den verpressten Proben B₄, B_b und L₁ sind wohl auf den Typ Bindemittel-Filz (intensive Verflechtung von leistenförmigen bis blättrigen 11 Å Tobermorit) zurückzuführen.

Die Wechselbeziehung zwischen Schwindung und Wasseraugvermögen ist wie folgt (Fig. 18): Bei kleinen Schwindwerten unterscheiden sich die verpressten von den gegossenen Proben deutlich. Bei höheren Schwindwerten verschwindet dieser Unterschied. Bei kleinen Schwindwerten ist der Mikroporositätsunterschied der beiden Probe-Typen am grössten; bei höheren Schwindwerten wird der Mikroporositätsunterschied infolge der Zunahme der Bindemasse kleiner.

Stellt man die physikalischen Eigenschaften der verpressten Proben den entsprechenden Eigenschaften der gegossenen gegenüber, so stellt man fest:

Mit Ausnahme der aquitanen Sandsteine G₁, G₂ und G₄ weisen die verpressten Proben höhere Trockenraumgewichte auf als die gegossenen. Die verpressten Proben weisen nur geringfügig höhere Druckfestigkeiten auf, dagegen sind die Biegezugfestigkeiten bei den verpressten Proben deutlich höher. Generell ist trotz grosser Streuung ein höherer E-Modul festzustellen. Die Schwindung ist nur im Falle von B₄ grösser bei den gegossenen Proben, sonst etwas grösser bei den verpressten Proben. Das Wasseraugvermögen der verpressten Proben ist gleich oder grösser als jenes der gegossenen Proben.

7.2.4 VERGLEICH DER PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN DER AUS MOLASSE-SANDSTEIN HERGESTELLTEN PROBEKÖRPER MIT KOMMERZIELLEN KALK-SANDSTEINPRODUKTEN

In der Baustoffindustrie versteht man unter dem Begriff Kalksandstein einen dichten, kleinformatigen Baustein, welcher durch Verpressung und anschliessende Autoklavhärtung von einem wasserarmen Gemisch aus Sand und gebranntem Kalk und/oder Zement entsteht (MUMENTHALER und PETERS, 1977). Um die Eigenschaften der von uns hergestellten Kalksandsteine bewerten zu können, sind in Tabelle 9 deren physikalische Eigenschaften mit dem Kalksandstein der Firma HARD AG, VOLKETSCHWIL, verglichen worden.

Ganz allgemein stellt man fest, dass die Werte für die Rohdichte unserer Proben niedriger, das Schwindverhalten jedoch höher liegt als beim Kalksandstein der Hard AG. Während die kleinere Rohdichte als günstig anzusehen ist (relativ leichte Bausteine), ist das höhere Schwinden und Wasseraugvermögen eher ungünstig.

Die Resultate betreffend E-Moduls und Festigkeiten (vergleiche Tab. 6), liegen für die E-Moduls und Druckfestigkeiten generell tiefer als beim Kalksandstein der Hard AG, während die Biegezug-

festigkeiten in der Mehrzahl z.T. deutlich höhere Werte ergeben. Der Minimalwert des Wassersaugvermögens ist bei unseren Proben etwas höher ($0.014 \text{ kg/m}^2\text{s}$) als jener des Kalksandsteins der Hard AG ($0.008 \text{ kg/m}^2\text{s}$).

Tabelle 9:

Vergleich der physikalischen Eigenschaften der verpressten, dampfgehärteten Proben mit dem Kalksandstein der Firma HARD AG, VOLKETSCHWIL

		Kalksandstein HARD	unsere Proben
Rohdichte	kg/m^3	2000	1500 – 1700
Statischer E-Modul	kN/mm^2	> 10	4.2 – 13.4
Druckfestigkeit	N/mm^2	> 20	2.1 – 22.6
Biegezugfestigkeit	N/mm^2	ca. 5	1.3 – 9.2
Schwindung	mm/m	0.2	0.4 – 0.9
Wassersaugvermögen	$\text{kg/m}^2\text{s}$	> 0.008	0.014 – 0.059

Im Vergleich zum Kalksandstein der Hard AG, zeigen, mit Ausnahme der Schwindung, die Platten-sandsteine sowie der Chramburg- und Appenzeller Sandstein die besten Resultate, während die Berner Sandsteine nur teilweise die Werte des Kalksandsteins der Hard AG erbringen. Mit Ausnahme von Gp, der Sandstein/Mergelprobe, welche recht gute physikalische Eigenschaften aufweist, sind die physikalischen Resultate der Sandsteine der „granitischen Molasse“ ungenügend.

Die Resultate zeigen, dass die von uns hergestellten verpressten und dampfgehärteten Proben den physikalischen Eigenschaften eines kommerziell hergestellten Kalksandsteins im allgemeinen entsprechen, allerdings müsste die Herstellung jeder Probe noch optimalisiert werden.

8. Mineralogische Untersuchungen an den dampfgehärteten Molassesandsteinen

8.1 RÖNTGENDIFFRAKTION

Die röntgenographische Bestimmung der Mineralien der Bindemasse ist nicht ganz unproblematisch. Der Grund liegt vor allem darin, dass die charakteristischen Reflexe einer CSH-Phase entweder geringere Intensitäten aufweisen oder mit Reflexen einer anderen Phase teilweise zusammenfallen; oft trifft beides zu. Ein weiteres Problem ist die mögliche Veränderung der Kristallstruktur durch den Einbau von Fremdstoffen, welche einen mehr oder weniger starken Einfluss auf die charakteristischen Beugungsreflexe zur Folge haben. Solche Veränderungen wurden von KALOUSEK (1957) sowie von DIAMOND et al. (1966) im Falle von 11 \AA Tobermorit aufgezeigt. In unserem Falle ergaben die Ausmessungen der Basisreflexe von 11 \AA Tobermorit – bezogen auf den Quarz-Reflex bei 4.26 \AA – Werte zwischen 11.34 und 11.54 \AA ($2\theta \text{ CuK}\alpha$ 7.79 und 7.65°) (Fig. 19).

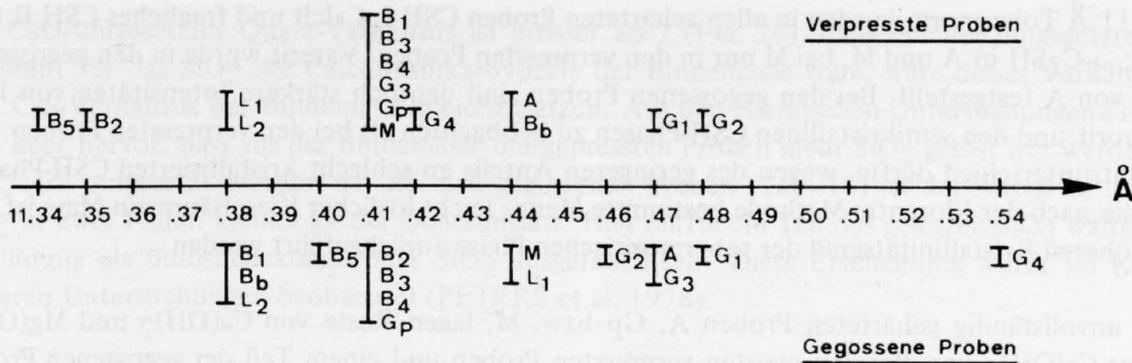


Fig. 19:
Basisreflexe von 11 Å Tobermorit bei den verschiedenen dampfgehärteten Proben.

Abgesehen von gewissen Schwankungen zwischen den Basisreflexen einer bestimmten Probe, je nach dem Herstellungs-Verfahren, fällt auf, dass die gehärteten Sandsteine der „granitischen Molasse“ generell höhere d-Werte aufweisen, als die übrigen Proben. Die Verschiebung der basalen Beugungsreflexe nach höheren d-Werten ist nach den genannten Autoren durch den Einbau von Aluminium bedingt. Nach Tabelle 4 weisen G₁ bis G₄ die höchsten Al₂O₃-Werte auf; diese sind auf den hohen Feldspat-Gehalt zurückzuführen. Das Aluminium im Tobermorit dürfte somit eher aus dem Feldspat als von Tonmineralien stammen. Neben Quarz müssen beim hydrothermalen Härtingsprozess geringfügig andere Silikate in Lösung gehen, sind doch die Gehalte an gelöstem SiO₂ meist höher als der Quarzumsatz (Tab. 10).

Tabelle 10:

Quarz-Gehalte (n. Talvitie), leicht lösliches SiO₂ (n. Florentin), schwer lösliches SiO₂ (Englische Methode), CaO-Gehalte und die berechneten CaO/SiO₂-Molverhältnisse der Bindemasse einer Auswahl von gepressten Proben (Kalksandstein Modell) und gegossenen Proben (Gasbeton Modell). Werte in Gew. %, bezogen auf geblühte Proben.

Probe Nr.	Glühverlust	leicht lösliches SiO ₂	schwer lösliches SiO ₂	Quarz-Gehalt vor nach Autoklavbehandlung		Quarzumsatz	CaO-Gehalt	CaO/SiO ₂ Verhältnis der CSH-Masse
Gepresste Proben								
B _b	5.35	6.66	15.74	47.0	36.56	10.44	12.92	0.88
B ₄	4.98	3.37	11.89	52.6	41.15	11.45	9.24	0.83
L ₁	6.21	5.76	12.37	50.0	40.62	9.38	12.6	1.09
G ₂	3.86	2.60	6.34	46.7	42.04	4.66	5.46	0.93
Gegossene Proben								
B _b	6.0	4.15	15.85	47.0	35.32	11.68	12.92	0.87
B ₄	5.17	3.16	12.97	52.6	38.7	13.9	9.24	0.76
L ₁	6.12	4.58	14.70	50.0	35.47	14.53	12.6	0.92
G ₂	3.50	1.97	6.42	46.7	37.72	8.98	5.46	0.91

Neben 11 Å Tobermorit wurden in allen gehärteten Proben CSH I, Calcit und fragliches CSH II festgestellt; α -C₂SH in A und M; bei M nur in den verpressten Proben. Vaterit wurde in den gegossenen Proben von A festgestellt. Bei den gegossenen Proben sind deutlich stärkere Intensitäten von 11 Å Tobermorit und den semikristallinen CSH-Phasen zu beobachten als bei den verpressten Proben. Der Intensitätsunterschied dürfte, wegen des geringeren Anteils an schlecht kristallisierten CSH-Phasen, wofür die nach der Florentin-Methode bestimmte Menge leicht löslicher Kieselsäure ein Mass ist, auf einen höheren Kristallinitätsgrad der tobermoritischen Phase zurückgeführt werden.

In den unvollständig gehärteten Proben A, Gp bzw. M, lagen Reste von Ca(OH)₂ und Mg(OH)₂ bzw. nur Ca(OH)₂ vor. Bei den meisten verpressten Proben und einem Teil der gegossenen Proben wurde der bei der Dampfhärtung umgesetzte Quarz ermittelt. Zu diesem Zwecke musste der Quarz-Gehalt der Proben vor bzw. nach dem Autoklav-Prozess chemisch (TALVITIE, 1951) bestimmt werden. In Figur 20 wurde der umgesetzte Quarz in Abhängigkeit des aktiven CaO-Gehaltes aufgetragen, wobei nur die vollständig gehärteten Proben, d.h. ohne A, Gp und M, berücksichtigt wurden. Wie dem Korrelations-Koeffizienten R = 0.94 zu entnehmen ist, besteht eine gute Korrelation zwischen den beiden Eigenschaften.

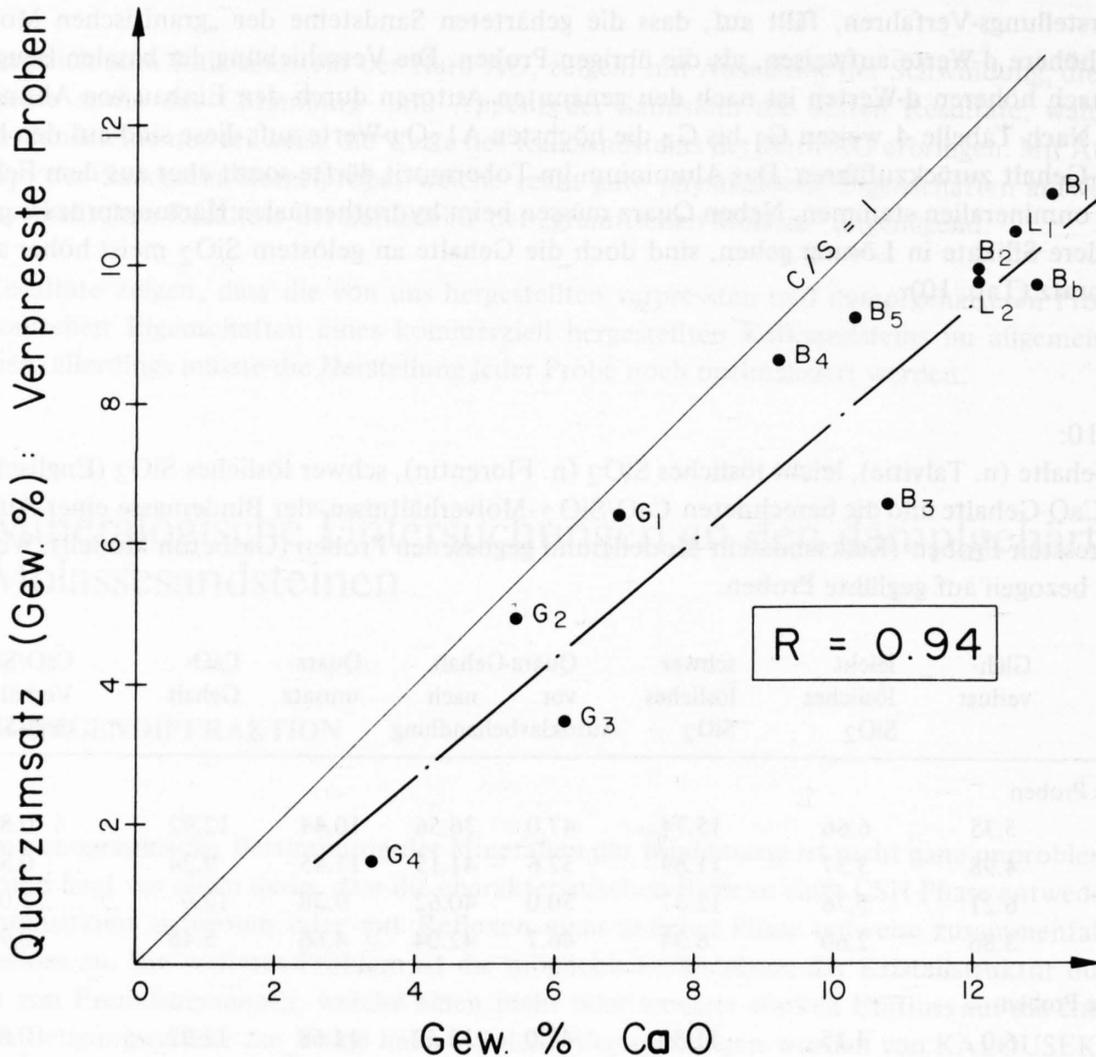


Fig. 20
Umgesetzter Quarz der verpressten Proben während der hydrothermalen Härtung in Abhängigkeit des aktiven CaO-Gehaltes der aktivierten Molassesandsteine.

Das CaO/umgesetzter Quarz-Verhältnis ist grösser als 1 (Fig. 20). Falls nur der umgesetzte Quarz Lieferant für das SiO₂ der Calciumsilikathydrate der Bindemasse wäre, wäre dieses Verhältnis mit dem C/S-Verhältnis der Bindemasse gleichzusetzen. Aus den chemischen Untersuchungen (Tab. 10) geht aber hervor, dass aus der Bindemasse der gepressten Proben mehr SiO₂ gelöst werden kann als Quarz umgesetzt worden ist. Bei den gegossenen Proben (Tab. 10) ist der Anteil an löslichem SiO₂ in zwei Fällen kleiner als der Quarzumsatz. Hier dürfte ein Teil des gelösten SiO₂ während der Abkühlung als unlösliches amorphes SiO₂ ausgefallen sein. Diese Erscheinung wurde im REM bei früheren Untersuchungen beobachtet (PETERS et al, 1978).

Die in Tabelle 10 aufgeführten C/S-Verhältnisse wurden errechnet aus dem schwerlöslichen SiO₂ und dem CaO der aktivierten Proben. Trotz unterschiedlichen CaO-Gehalten und Herstellungsbedingungen sind die C/S-Verhältnisse sehr ähnlich. Die Werte um 0.8 – 0.9 sind ein Hinweis dafür, dass die Bindemasse zum grössten Teil aus 11 Å Tobermorit (C/S-ratio: 0.8) und einem geringen Anteil Calciumsilikathydrate mit grösseren C/S-Verhältnissen bestehen muss. Die Menge von leichtlöslichem SiO₂ dürfte ein Mass sein für schlecht kristallisiertes CSH I und CSH II mit variablen C/S-Verhältnissen. Auf Grund der Daten aus Tabelle 10 ist demnach in den gegossenen Proben der Anteil an schlecht kristallisierten CSH-Phasen in der Bindemasse gegenüber den gepressten Proben geringer.

8.2 GEFÜGEUNTERSUCHUNGEN MIT DEM RASTERELEKTRONENMIKROSKOP (REM)

Die REM-Untersuchungen geben Auskunft über Grösse und Ausbildung der ursprünglichen Rohmaterial-Gemengteile Quarz, Feldspat und Glimmer sowie der neugebildeten Bindemasse-Minerale, der sog. Calciumsilikathydrate (CSH) und Karbonate. Die Bestimmung der CSH-Phasen und von Vaterit, erfolgte auf Grund der Röntgendiffraktometrie-Resultate und aus Morphologie-Analogieschlüssen im REM, da das benutzte REM-Gerät keinen Analysen-Zusatz besass.

Bei den vollständig gehärteten Proben (ohne A, G_p und M) beobachtet man innerhalb der verpressten Proben eine Zunahme der Mikroporosität von B₁ über L₁, B₄, G₂ zu G₄; diese dürfte durch die Abnahme des aktiven CaO-Gehaltes von ca. 13% auf 3.5% bedingt sein (Tab. 5), was einer Abnahme der CSH-Bindemasse entspricht. B₁ zeigt ein dichtes Gefüge; Bindemasse und gebundene Gemengteile können nur schlecht voneinander unterschieden werden. Bei L₁ erkennt man bereits Mikroporen sowie die ungefähren Korngrössen und -formen der körnigen Gemengteile. Durch das Auftreten ausgeprägter Mikroporen und intergranularer Hohlräume bei B₄ und G₂ (Fig. 21) werden Korngrösse und -umrisse der Gemengteile deutlich. Bei G₄ fällt das sehr lockere Gefüge auf, welches durch den niedrigen Bindemasse-Gehalt bedingt ist; der CSH-Rasen, welcher die körnigen Gemengteile überzieht, hat nur noch eine geringe bindende Wirkung.

Vergleicht man die gegossenen Proben (Fig. 22 und 24) mit den entsprechenden verpressten Proben (Fig. 21 und 23) so fällt auf, dass das Gefüge der gegossenen Proben etwa gleich dicht oder dichter als jenes der verpressten Proben ist. Eine Abnahme der Gefügedichte mit abnehmendem CaO-Gehalt ist, mit Ausnahme von G₄ (Fig. 21 und 22) bei den gegossenen Proben, nicht zu erkennen.



Fig. 21
 Verpresste, dampfgehärtete Probe G4. Lockeres Gefüge.
 Ausgeprägte intergranulare Zwischenräume und Mikro-
 poren. Vergrößerung: 120 x.

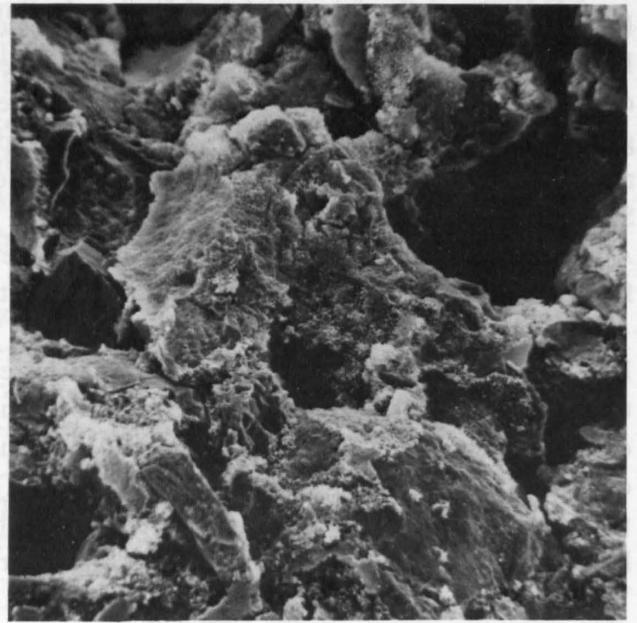


Fig. 22
 Gegossene, dampfgehärtete Probe G4. Grosse Mikro-
 poren in relativ dichtem Gefüge. Vergrößerung: 115 x.



Fig. 23
 Verpresste, dampfgehärtete Probe B3. Quarz mit filz-
 iger tobermoritischer Bindemasse. Vergrößerung: 1050x.



Fig. 24
 Gegossene, dampfgehärtete Probe B2. Deutlich ange-
 ätzter Quarz, tobermoritische Bindemasse, kurzplattig,
 körnig. Typisch für Proben B und L. Vergrößerung:
 5425 x.

Man hat den Eindruck, dass bei den gegossenen Proben mehr Bindemasse im Autoklav gebildet wurde als bei den entsprechenden verpressten Proben. Nach den bisherigen chemischen Untersuchungen konnte diese Annahme nicht bestätigt werden. Die Ausbildung der Bindemasse der gegossenen Proben scheint – wegen des ursprünglich höheren Wassergehaltes gegenüber den verpressten Proben – voluminöser zu sein, und da eine Mikroporosität in den REM-Aufnahmen nicht beobachtet werden kann, muss es sich um eine submikroskopische Porosität handeln.

Bei den verpressten Proben beobachtet man eine Zunahme der Korngrösse von B₁ nach G₄. Diese Tatsache wurde bereits bei der Dünnschliff-Mikroskopie der Sandsteine festgestellt und bestätigt nochmals die Annahme (siehe 4.), dass die Sandsteine beim Mahlen im wesentlichen in ihre ursprüngliche Sandfraktion zerlegt wurden.

Die Ausbildung der CSH-Bindemasse wie sie typisch ist für die dampfgehärteten verpressten Berner- und Plattensandsteine sowie dem Chramburg Sandstein, zeigt Figur 23. Die Hohlräume werden z.T. von grobblättrigen CSH-Phasen ausgefüllt, die Gemengteile von einem dichten tobermoritischen Filz überzogen, welcher eine innige Verflechtung lineal- bis leistenförmiger Kristalle von 11 Å Tobermorit zeigt. Dieser Filz dürfte u.a. der Grund für die höheren Biegezugfestigkeiten gegenüber den gegossenen Proben sein; diesen ist eher eine krustenförmige, kurzplattig-körnige Ausbildung der tobermoritischen Bindemasse eigen (Fig. 24).

Die Autoklav-behandelten Sandsteine der „granitischen Molasse“ zeigen, wegen ihres geringeren Bindemasse-Gehaltes, z.T. gewisse Abweichungen zu den unmittelbar besprochenen Sandstein-Typen. Falls genügend Bindemasse zur Verfügung stand, kann eine recht gute Bindung zwischen den Gemengteilen Quarz, Feldspat, Glimmer etc. und den neugebildeten CSH-Phasen beobachtet werden.

Der in der Literatur oft beschriebene leere Raum zwischen Quarz und der CSH-Bindemasse, wurde in unseren Proben selten beobachtet (Fig. 23 und 24). Das Vorhandensein bzw. Fehlen einer solchen Aetzlücke zwischen Quarz und Bindemasse, bedingt durch den beim Autoklavprozess teilweise in Lösung gehenden Quarz, dürfte von verschiedenen Faktoren abhängen: Mineralogie und Körnung der Gemengteile, aktiver CaO-Gehalt, Autoklavbedingungen (Länge der Aufheiz-, Halte- und Abkühlzeit), Diffusionsvorgänge etc. In jedem Fall dürfte es sich im Bereich zwischen Quarz und Bindemasse um eine potentielle Schwächezone handeln, ansonst wären die zahlreichen, von Bindemasse abgedeckten Quarzoberflächen wohl kaum zu erklären, wie sie bei der Herstellung der REM-Präparate entstehen. Wegen der geringeren Löslichkeit der Feldspäte gegenüber Quarz im Autoklavprozess (siehe 8.1.) konnten Aetzlücken, bzw. bei der Präparation infolge einer Schwächezone entstandenen Risse zwischen Feldspat und Bindemittel, nicht beobachtet werden. Die CSH-Bindemasse haftet offenbar gut auf den Feldspatoberflächen, so dass solche nur selten in Erscheinung treten. Wie Aufnahmen zeigen, könnten die zahlreichen Spaltrisse der Feldspäte, bedingt durch ihre Spaltbarkeit, die Haftung der CSH-Bindemasse ebenfalls begünstigen.

Falls genügend Raum zur Verfügung steht, wie in intergranularen Hohlräumen oder grösseren Poren, ist eine Zunahme der Kristallgrösse wie der Mannigfaltigkeit der Kristallformen der CSH-Phasen festzustellen.

Zylindrische bzw. rundliche Körper von vermutlich ausgefallener amorpher Kieselsäure, konnte in Hohlräumen der verpressten Probe G₂ festgestellt werden (Fig. 25 links oben). Da der Gehalt an aktivem CaO bei G₂ nur ca. 5.5% betrug, wäre es möglich, dass für den teilweise in Lösung gehenden



Fig. 25
 Verpresste, dampfgehärtete Probe G₂. Gebogenes Glimmerpaket intensiv mit tobermoritischer Bindemasse verbunden. Vergrößerung: 1140 x.

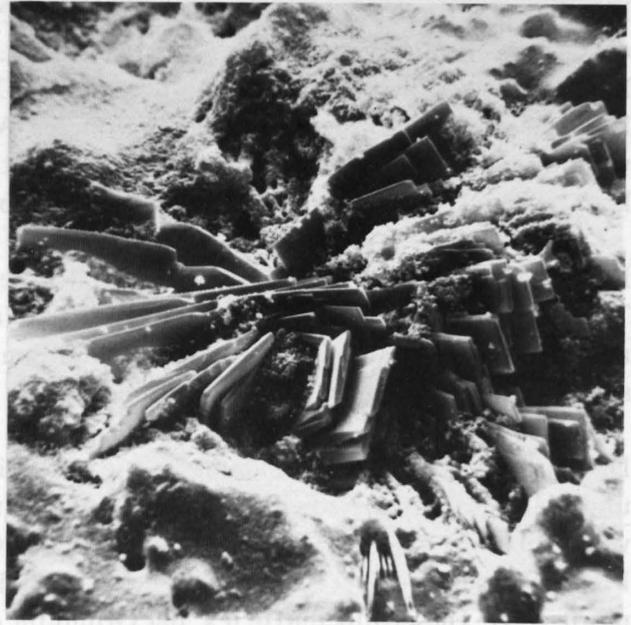


Fig. 26
 Verpresste, dampfgehärtete Probe M. α -C₂ SH-Rosette in körniger CSH-Bindemasse. Vergrößerung: 540 x.

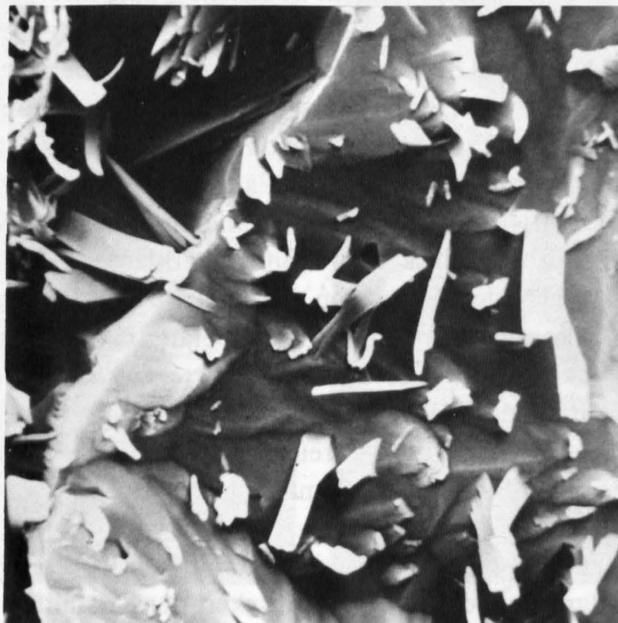


Fig. 27
 Gegossene, dampfgehärtete Probe M. Deutlich angeätzter Quarz mit aufgewachsener CSH-Phase (11 Å Tobermorit?). Vergrößerung: 5525 x.

Quarz zu wenig gelöstes $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zur Verfügung stand, um sich mit der totalen in Lösung gegangenen Kieselsäure zu CSH-Phasen zu verbinden. Beim Abkühlen des Autoklaven kam es dann zu einer SiO_2 -Übersättigung, wobei amorphe Kieselsäure ausfiel.

Beispiele der unvollständig gehärteten Proben A, Gp und M sind in Figur 26 und 27 illustriert. Die in Gp charakteristische nadelige, leistenförmige und blättrige Ausbildung der CSH-Bindemasse dürfte für hohe E-Modul-Werte (Tab. 6 und 7) verantwortlich sein. In M (Fig. 26) dominiert eine körnig ausgebildete CSH-Bindemasse, vermutlich CSH I und $\alpha\text{-C}_2\text{SH}$. Diese grossen, gut ausgebildeten Kristalle neigen zu rosettenförmiger Anordnung wie dies bereits MOERTEL und PIPER (1978) feststellten. Die intensive Anätzung von Quarz ist sehr gut bei Probe M zu beobachten. Von den rund 20% des im gebrannten Rohmaterial von M vorliegenden Quarzes gingen während des Autoklavprozesses die Hälfte in Lösung! Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - bzw. Brucit $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -Kristalle? wurden an mehreren Stellen in A beobachtet, sowie Vaterit als Drusenauskleidung. Die Bestimmung von Vaterit erfolgte aufgrund der charakteristischen Röntgenbeugungsreflexe bei 3.58 \AA und 2.059 \AA ($2\theta \text{ CuK}\alpha = 24.85$ bzw. 43.92°).

In Figur 27 erkennt man einen stark angeätzten Quarz mit aufgewachsenen CSH-Blättchen (11 \AA Tobermorit?). Die Bildung von CSH-Phasen direkt auf Quarz scheint nur unter speziellen Bedingungen einzutreten. So konnte PETERS in PETERS et al. (1978) in seinen Experimenten, betreffend die relative Beweglichkeit von Calcium und Kieselsäure bei Autoklavbedingungen, nie die Bildung von CSH-Phasen auf Quarz beobachten; der Quarz zeigte stets eine stark angeätzte Oberfläche. MOERTEL und PIPER (1978) beobachteten dagegen die direkte Bildung von $\alpha\text{-C}_2\text{SH}$, CSH II und I auf Quarz. Die Bildung der CSH-Phase direkt auf Quarz dürfte in der Abkühlphase im Autoklaven erfolgt sein. Da M nicht vollständig gehärtet wurde, ist bei der Abkühlung die Löslichkeit von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wiederum angestiegen, während diese von Quarz abnahm. Wegen des geringen Quarz-Gehaltes der Probe dürfte dann offenbar genügend lösliches $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in unmittelbarer Nähe des Quarzes vorgelegen haben, so dass es zur Bildung der CSH-Phasen direkt auf Quarz kam.

9. Diskussion der Ergebnisse

Nach den vorliegenden Untersuchungen ist es prinzipiell möglich, dampfgehärtete Werk- bzw. Baustoffe aus karbonathaltigen Molassesandsteinen sowohl nach dem Press- wie nach den Giessverfahren herzustellen. Allerdings sind nicht alle untersuchten Molassesandsteintypen in gleicher Weise dazu geeignet. Der Grund liegt hauptsächlich im unterschiedlichen Karbonat- bzw. Gehalt von aktivem CaO. Ein Vergleich der dampfgehärteten, verpressten Proben mit einem kommerziell hergestellten Kalksandstein ergaben, dass mit den Plattensandsteinen die besten Resultate erzielt wurden. Gut schnitten auch die Berner Sandsteine B₁ und B₂ sowie der Appenzeller und Helvetien Sandstein vom Belpberg (Chramburg Sandstein) ab. Beachtlich waren die physikalischen Eigenschaften der Probe Gp (Sandstein-Mergel-Mischung). Als genügend konnten die Resultate der übrigen Berner Sandsteine sowie des Muschelsandsteins M bewertet werden. Eher ungenügend fielen die physikalischen Eigenschaften der aquitanen Sandsteine aus.

Ein etwa gleiches Bild, betreffend der Qualitätseigenschaften, bezogen auf das Rohmaterial, ergaben die gegossenen Proben. Infolge ihres ursprünglich für die Verarbeitung notwendigen höheren Wassergehaltes, fallen ihre physikalischen Eigenschaften generell schlechter aus. Im Nachfolgenden soll nun versucht werden, die wesentlichsten Gründe anzuführen, welche die unterschiedliche Eignung der verschiedenen Molassesandsteine für die Herstellung dampfgehärteter Baustoffe bedingen.

Die Plattensandsteine L_1 und L_2 sowie die Berner Sandsteine B_1 und B_2 wie der Chramburg Sandstein Bb, zeichnen sich durch eine ausgewogene Mineralogie aus, d.h. mit ca. 40% Quarz, 25 (20) – 30% Feldspat und 25 – 30% Karbonat, sind die drei Hauptkomponenten grob zu gleichen Teilen vertreten. Der resultierende Gehalt an aktivem CaO von 12 – 13% ist ausreichend, um ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Zuschlagstoff (Feldspat und Quarz) und Bindemittel (Ca(OH)_2 , in Lösung gehender Quarz) zu gewährleisten. Ein weiteres Merkmal dieser Gruppe ist ihre relativ hohe Kornfeinheit. Die durchschnittliche Korngrösse liegt zwischen 0.1 – 0.18 mm. Der hohe Anteil an feinem Material <0.2 mm ist grösser als 50%. Dies hat eine höhere Reaktionsfähigkeit dieser Sande im Autoklav zur Folge. Die REM-Aufnahmen der dampfgehärteten Produkte dieser Sandsteine weisen ein recht dichtes Gefüge auf. Quarz und Feldspat werden von einem tobermoritischen, hauptsächlich filzig ausgebildeten Bindemittel zusammengehalten.

Sowohl der Appenzeller- A wie der Muschelsandstein M enthalten ca. 20% Quarz, 10% Feldspat und 70% Karbonat. Im Falle des Muschelsandsteins besteht der gesamte Karbonatgehalt aus Calcit, während beim Appenzeller Sandstein ca. die Hälfte (35%) auf Dolomit entfallen. Der Gehalt an aktivem CaO belief sich bei M auf 55%, bei A auf 42%.

Da bei der hydrothermalen Reaktion der verpressten Probe M ca. 50% des Quarzes umgesetzt wurden, so verbleiben nur noch etwa 10% Quarz und 10% Feldspat, d.h. nur noch 20% Zuschlagmaterial gegenüber 80% Bindemasse. Zudem verlief bei A und M die Dampfhärtung nicht vollständig, so dass nach der Autoklavbehandlung noch freies Ca(OH)_2 und Mg(OH)_2 vorlag. Beide Typen waren schwer verarbeitbar und wegen des relativ hohen Wassergehaltes (40 bzw. 80%) kaum verpressbar. Trotzdem weist der Appenzeller Sandstein recht gute Eigenschaften wie relativ hohe Druckfestigkeit und hohen E-Modul auf. Nach der REM-Aufnahme liegt der Grund in der körnig ausgebildeten Bindemasse (vor allem CSH I). Das Fehlen eines tobermoritischen Filzes ist eine mögliche Erklärung für die schlechte Biegezugfestigkeit. Im Falle des Muschelsandsteins sind die schlechteren Resultate auf den ursprünglich zu hohen Wasseranspruch zurückzuführen. Der noch höhere Wassergehalt bei den gegossenen Proben A und M scheint für die Schwindrisse, entstanden während der Dampfhärtung, verantwortlich zu sein. Diese beiden Sandsteintypen haben für die in dieser Untersuchung gewählten Herstellungsbedingungen zu hohe CaO-Gehalte. Durch Zugabe von Sand oder anderen karbonatarmen Zuschlagstoffen könnten daher ohne grossen Aufwand die physikalischen Eigenschaften sehr wesentlich verbessert werden.

Die recht guten Eigenschaften der Probe Gp sind vermutlich durch eine ausgeglichene Mineralogie (Quarz ca. 30%, Feldspat 20 – 25%, Karbonat 25 – 35%) sowie durch den 10 – 15%-igen Tongehalt, bedingt. Der Ton-Anteil gegenüber der Schluff-Sandfraktion liegt bei den anderen Proben ca. zwischen 1 – 7%, also generell sehr tief, so dass der Einfluss der Tonminerale bei der Aktivierung wie bei der Dampfhärtung nicht offensichtlich ist. Im Falle von Gp wird durch den Tonanteil ein Teil der Zwischenräume erfüllt, welche aus der relativ groben Sandfraktion resultieren (siehe Korngrößenverteilung Fig. 8) und dadurch zur Oberflächenvergrösserung beitragen. Der Hauptgrund für das gute Resultat von Gp scheint nach unserem Erachten jedoch darin zu liegen, dass ge-

nügend Bindemasse gebildet wurde. Die Aktivierung der Probe ergab 15% aktives CaO. Die nicht ganz vollständig gehärtete Probe dürfte mit etwas längerer Haltezeit im Autoklaven noch bessere Resultate ergeben.

Die verpressten und dampfgehärteten Berner Sandsteine B₃, B₄ und B₅ erfüllen die SIA-Norm für Kalksandsteine Nr. 113; ihre Druckfestigkeiten ergaben 14.1, 15.5 und 16.1 N/mm². Die genannte Norm fordert eine Druckfestigkeit von ≥ 15 N/mm² mit einer Streuung von $\pm 25\%$. Im Gegensatz zu B₁ und B₂ (12 – 13% aktives CaO), standen bei B₃, B₄ und B₅ 9 – 11% aktives CaO für den Härtingsprozess zur Verfügung. Zudem liegt ihre durchschnittliche Korngrösse zwischen 0,2 und 0,3 mm. Ihr Feinanteil <0.2 mm ist mit Ausnahme von B₃ <50%. B₁, B₂ und B₃ weisen daher eine kleinere spezifische Oberfläche auf. Die kleinere Reaktivität sowie der geringere Gehalt an aktivem CaO ergeben weniger Bindemasse; ein relativ lockeres Gefüge ist die Folge. Der tobermoritische Filz scheint auch hier der Grund für die recht guten Biegezugfestigkeiten zu sein (6.3 – 6.6 N/mm²).

Im Falle der granitischen Sandsteine G₁ und G₂ sowie der aquitanen Sandsteine der Westschweiz ist der Gehalt an aktivem CaO von ca. 3.5 – 7% offenbar zu klein, um genügend Bindemasse zu bilden. Der hohe Anteil an relativ grobem Korn wirkt sich ebenfalls nachteilig aus. Die REM-Aufnahmen zeigen entsprechend ein lockeres bis sehr lockeres Gefüge.

Möglichkeiten zur Verbesserung der technischen Eigenschaften

Mit relativ geringem Aufwand liessen sich die Sandsteine in ihre ursprüngliche Granulometrie, die der Kornzusammensetzung der industriell hergestellten Kalksandsteine entspricht, zerlegen. Es wäre zu prüfen, ob in gewissen Fällen, für die Herstellung von Kalksandstein, die Sandsteine feiner gemahlen werden sollten. Die Folge wäre eine Erhöhung der Reaktivität. Dies wäre bei Proben zu erwägen, bei denen noch freies Ca(OH)₂ vorliegt. Bei anderen Proben, bei welchen alles Ca(OH)₂ in den CSH-Phasen bzw. in Calcit gebunden wurde, würde ein kleineres C/S-Verhältnis die Folge sein, was betreffend der Druckfestigkeit nicht unbedingt erwünscht ist, da CSH I die höchsten Druckfestigkeiten ergeben soll. Eine grössere Mahlfeinheit bringt jedoch auch Nachteile: Höherer Energieverbrauch sowie grössere Neigung zu Ringbildungen bei der Aktivierung im Ofenrohr; höherer Wasseranspruch infolge grösserer spezifischer Oberfläche, bedingt durch die grössere Feinheit und den höheren Anteil an gebrochenen Körnern. Ein höherer Wassergehalt hat aber wiederum eine grössere Porosität zur Folge, das Raumgewicht wird dadurch erniedrigt, was eine Herabsetzung der Festigkeiten bedeutet. Ein höheres Schwindmass ist bei feinerem Korn ebenfalls zu erwarten, während das Wassersaugvermögen kleiner würde. Für die Herstellung von Gasbeton ist eine Mahlfeinheit nach Blaine von mindestens 3000 cm²/g notwendig. Um ausserdem die erforderliche Menge von ca. 30% aktivem CaO zu erhalten, könnte beispielsweise dem Berner Sandstein mit einem aktiven CaO-Gehalt von ca. 9 – 13%, eine gewisse Menge Muschelsandstein zugemischt werden (aktiver CaO-Gehalt 50%).

Die Mischung zweier Sandstein-Typen wäre dann sinnvoll, wenn wie im Beispiel vom Muschelsandstein zu wenig Gerüstsubstanz (Quarz, Feldspat) im Verhältnis zum aktiven CaO steht, während im Falle der aquitanen Sandsteine gerade das Gegenteil der Fall ist. Wünschenswert wäre daher eine Zumischung von Muschelsandstein zu den aquitanen Sandsteinen der Westschweiz bzw. von Appenzeller Sandstein zum granitischen Sandstein in der Ostschweiz. Diese Idee ist auch insofern realistisch, da im günstigsten Fall beide Extremtypen in demselben Steinbruch abbaubar sind.

Die Aktivierung unserer Proben erfolgte in einem Labordrehrohrföfen. Es resultierte in allen Fällen ein gleichmässig aktiviertes, sehr reaktionsfreudiges CaO, was industriell einem sog. weichgebrannten

Kalk entspricht. Durch die relativ tiefen Brenntemperaturen von 830 – 930°C sowie die kleine Verweilzeit von ca. 5 Minuten im Ofen, konnten unerwünschte Mineralneubildungen wie beispielsweise Gehlenit, verhindert werden, was eine Verminderung des aktiven CaO-Gehaltes zur Folge gehabt hätte. Für eine grosstechnische Aktivierung wäre zu prüfen, ob Schachtofen mit Brennaggregaten nach dem Wirbelschicht- oder Schwebegasverfahren nicht vorteilhafter wären.

10. Schlussfolgerung

Diese Arbeit hat gezeigt, dass die Verwertung karbonathaltiger Molassesandsteine als Rohstoffe für dampfgehärtete Bau- bzw. Werkstoffe möglich ist. Somit erhöht sich das Rohstoffpotential für solche Baustoffe beträchtlich, da leicht abbaubare Molassesandsteine in fast unerschöpflichen Mengen im gesamten schweizerischen Mittelland vorhanden sind. Die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Probekörper sind einerseits durch die Rohmaterialverschiedenheiten und andererseits durch die Herstellungsweise bedingt. Durch Veränderung des Rohmaterials und/oder durch eine Änderung der Herstellungsbedingungen, können die Eigenschaften der hergestellten Produkte, je nach Anwendungszweck, noch verbessert bzw. optimalisiert werden.

DANKWORT

Wir möchten all jenen Personen ganz herzlich danken, welche in irgendeiner Form bei dieser Arbeit behilflich waren:

Universität Bern:

den Damen:

H. Haas und E. Regli

den Herren:

Ch. Bühler, M. Buletti, Ch. de Capitani, Dr. A. Edenharter, W. Heugel,
H. Huber, A. Liechti, J. Megert, D. Vuichard, A. Zweili.

Zürcher Ziegeleien:

den Herren:

Dr. R. Iberg, Dr. Th. Mumenthaler, P. Brunner, R. Caviezel, J. Christen,
R. Kägi,

Prüf- und Forschungsinstitut der schweizerischen Ziegelindustrie in Sursee:

den Herren:

H. Graber, R. Porubsky, Dr. P. Szabo

Holderbank Management und Beratung AG:

Herrn A. Weber.

Ferner den Herren Prof. G. Bayer (ETHZ), Dr. J.K. Habicht (Ettingen) , Prof. F. de Quervain (Schweizerische Geotechnische Kommission) und R. Guggenheim (Universität Basel).

Die Kommission zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung aus Arbeitsbeschaffungskrediten des Bundes hat die Untersuchungen finanziell unterstützt.

LITERATURVERZEICHNIS

- BAILEY E.H. and STEVENS R.E. (1960): Selective Staining of K-Feldspar and Plagioclase on Rock Slabs and Thin Sections. *Amer. Mineralogist* 45.
- BESSEY G.E. (1964): *The Chemistry of Cements*. Edt. by H.F.W. Taylor, Vol. 2. London – New York, Academic Press
- CHONE K. (1973): Entwicklung bei der Branntkalk-Herstellung und deren Bedeutung für die Kalksandstein- und Porenbeton-Erzeugung. 3. Int. Symp. für dampfgehärtete Kalziumsilikat-Baustoffe, Utrecht 1973, Paper 4.3.
- DIAMOND S., WHITE J.L. and DOLCH, W.L. (1966): Effects of isomorphous substitution in hydrothermally-synthesized tobermorite. *Amer. Mineralogist* 51.
- DICKSON J.A.D. (1966): Carbonate identification and genesis as revealed by staining. *J. sediment. Petrol.* 36.
- EVAMY B.D. and SHEARMAN D.J. (1962): The application of chemical staining techniques to the study of diagenesis in limestones. *Proc. Geol. Soc. London* 1599.
- FUECHTBAUER H. und MÜLLER G. (1970): *Sedimente und Sedimentgesteine*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart.
- GUNDLACH H. und OHNEMÜLLER W. (1967): Untersuchungen über die Beeinflussung der Festigkeit dampfgehärteter Kalksilicat-Erzeugnisse. *Tonind.-Ztg.* 91.
- GUNDLACH H. (1973): *Dampfgehärtete Baustoffe*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin.
- HALLER P., KOLLBRUNNER C.F. und IBERG R. (1969): Aktivierter Ton (Röstton-Verfahren). Institut für bauwissenschaftliche Forschung. Stiftung Kollbrunner/Rodio. Verlag Leemann Zürich.
- HEIM A. (1919): *Geologie der Schweiz*, Band I, Molasseland und Juragebirge. Leipzig, Chr. Herm. Tauchnitz.
- KALOUSEK G.L. (1957): Crystal Chemistry of Hydrous Calcium Silicates: I, substitution of Aluminium in Lattice of Tobermorite. *Jour. Amer. Cer. Soc.* 40.
- KOMOCHOV P.G. (1962) in GUNDLACH H. (1973): *Dampfgehärtete Baustoffe*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin.
- MOERTEL H. und PIPER K. (1978): Calcit und Scawtit als Neubildungen in Kalksandsteinen. *Abhandlungen des Int. Kalksandstein Symp. 1978 in Karlsruhe*. Bundesverband der Kalksandsteinindustrie, Hannover.
- MUMENTHALER Th. (1979): Zusammensetzung und Verwertbarkeit von schweizerischen Kiesschlämmen im hydrothermalen Härtingsprozess. *Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser.* 58.
- MUMENTHALER Th. und PETERS Tj. (1977): Vergleichende Untersuchungen über das Verhalten von reinem Quarzsand und einem fluvio-glazialen Sand aus dem schweizerischen Mittelland (Montet, FR) bei der hydrothermalen Härtung von Baustoffen. *Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser.* 56.
- PETERS Tj. (1965): Zur quantitativen röntgenographischen Bestimmung von Albit und Kalifeldspat in pelitischen Sedimentfraktionen. *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.* 45.
- PETERS Tj. (1970): A Simple Device to avoid Orientation Effects in X-Ray Diffractometer Samples. *Norelco Reporter* 17/2.
- PETERS Tj., IBERG R. and MUMENTHALER Th. (1978): Comparative study of the use of a Quartz poor sand and a pure Quartz sand for Lime Silica Bricks and the kinetics of the hydrothermal hardening mechanism. *Cement and Concrete Research* 8, Pergamon Press Inc.
- PETERS Tj. und JENNI J.-P. (1973): Mineralogische Untersuchungen über das Brennverhalten von Ziegeltonen. *Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser.* 50.
- DE QUERVAIN F. (1969): *Die nutzbaren Gesteine der Schweiz*. Kümmerly & Frey, Geographischer Verlag, Bern.
- DE QUERVAIN F. und JENNY V. (1951): Verhalten der Bausteine gegen Verwitterungseinflüsse in der Schweiz, Teil II. *Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser.* 30.
- RUTSCH R. (1928): *Geologie des Belpbergs*. Verlag Paul Haupt, Bern.
- ŠAUMANN Z. (1969): Der Einfluss von Tonmineralien auf die Bildung von Kalziumhydrosilikaten. 2. Int. Symp. für dampfgehärtete Kalziumsilikat-Baustoffe, Hannover 1969, Paper 73.
- Schweizerische Geotechnische Kommission* (1915): *Die natürlichen Bausteine und Dachschiefer der Schweiz*. *Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser.* 5.
- Society of Chemical Industry* (1964): *Analysis of calcareous materials*. Monograph 18.
- TALVITIE N.A. (1951): Determination of Quartz in Presence of Silicates Using Phosphoric Acid. *Analyt. Chem.* 23.
- TAYLOR H.F.W. (1964): *The Chemistry of Cements* Vol. 1 and 2. London – New York, Academic Press 1964.
- WADE W.G. (1969): Farbige Kalksandsteine. 2. Int. Symp. für dampfgehärtete Kalziumsilikat-Baustoffe, Hannover 1969, Paper 85.
- WASHA W.G. (1965): in CLEMENTI E. (1969): Der Einfluss der Rohstoffe und der Härtezeit auf die Schwindung von Gasbeton. 2. Int. Symp. für dampfgehärtete Kalziumsilikat-Baustoffe, Hannover 1969, Paper 16.
- ZGRAGGEN P. (1980): Verwertbarkeit karbonathaltiger Molassesandsteine als Rohstoffe für dampfgehärtete Baustoffe. *Diss. Univ. Bern*.

ANHANG

Tabelle 3: Zeichen-Erklärung für die 15 dampfgehärteten Molassesandsteine

A	Appenzeller Sandstein (Gstaltig)	Aufschluss 29
B ₁	Berner Sandstein (Gurten)	Aufschluss 4
B ₂	Berner Sandstein (Ruchmüli)	Aufschluss 5
B ₃	Berner Sandstein (Krauchthal)	Aufschluss 9
B ₄	Berner Sandstein (Ostermundigen)	Aufschluss 14
B ₅	Berner Sandstein (Villarlod)	Aufschluss 16
Bb	Chramburg Sandstein (Chramburg-Flue)	Aufschluss 7
G ₁	Granitischer Sandstein (St. Margrethen)	Aufschluss 20
G ₂	Granitischer Sandstein (Bollingen)	Aufschluss 36
G ₃	Lausanner Molasse (En Bouzenet)	Aufschluss 37
G ₄	Knauersandstein (Teuftal)	Aufschluss 39
Gp	Granitischer Sandstein (Guntliweid)	Aufschluss 30
L ₁	Plattensandstein (Staad)	Aufschluss 21
L ₂	Plattensandstein (Root)	Aufschluss 35
M	Muschelsandstein (Mägenwil)	Aufschluss 34