

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
GEOTECHNISCHE SERIE

herausgegeben von der

Schweizerischen Geotechnischen Kommission
(Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft)

MATÉRIAUX POUR LA GÉOLOGIE DE LA SUISSE
SÉRIE GÉOTECHNIQUE

publiés par la

Commission Géotechnique Suisse
(Organe de la Société Helvétique des Sciences Naturelles)

Lieferung 71

Nationalfondsprojekt 4.292.0.79.07

Kiesschlammverwertung, ein Beitrag zur Nutzbarmachung und Bewirtschaftung stark verlehmteter Kiesvorkommen

Th. Mumenthaler, Tj. Peters und R. Iberg

1987

In Kommission bei Kümmerly & Frey AG, Geographischer Verlag, Bern

Publiziert mit Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds zur
Förderung der wissenschaftlichen Forschung

Satz und Druck: Börsig AG, Erlenbach

ISBN 3-907997 04 2

VORWORT DER SCHWEIZERISCHEN GEOTECHNISCHEN KOMMISSION

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Nutzbarmachung und Bewirtschaftung des Kiesschlammes, welcher bei der Ausbeutung stark verlehmteter Kiesvorkommen in grossen Mengen anfällt. Es besteht somit auch eine Verbindung zu den durch die Geotechnische Kommission publizierten Untersuchungen über Alternativmaterialien, welche zur Schonung der Vorräte an hochwertigen Alluvialkiesen abgebaut werden könnten (Lfg. 68). Bei der Verwertung vieler dieser Lockergesteine, aber auch von Molassenagelfluh, fällt viel Feinmaterial an. Beide Arbeiten entstanden im Rahmen des Teiles C des Nationalen Forschungsprogrammes Nr. 7 des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung mit dem Thema «Rohstoff und Materialprobleme».

Das vorliegende Werk fasst den aktuellen Wissensstand über die Möglichkeiten der optimalen Nutzbarmachung und Verwertung eines Nebenprodukts der Kiesgewinnung zusammen, welches früher meist als lästiges Deponiermaterial betrachtet wurde und dessen Beseitigung mit beträchtlichen Problemen und Kosten verbunden ist. Es wird sowohl in wissenschaftlicher wie in praktischer Hinsicht Bezug auf Ergebnisse von Labor- und Werkversuchen genommen. Besonders eingegan-

gen wird auf die verschiedenen Möglichkeiten der Verwertung von Kiesschlamm sowie auf die technische Prüfung der auf diese Weise fabrizierten Produkte.

Die Schweizerische Geotechnische Kommission freut sich, diese aktuelle Arbeit in ihre Reihe «Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie» aufnehmen zu können und dankt den Autoren und ihren Mitarbeitern für ihre wertvolle Arbeit.

Die Drucklegung wurde dank der namhaften Unterstützung durch den Schweizerischen Nationalfonds möglich, wofür sich die Kommission bestens bedanken möchte.

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

Zürich, Oktober 1987

Der Präsident der Schweizerischen
Geotechnischen Kommission

C. Schindler

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission	III	VIII. Kiesschlamm als potentieller Rohstoff	15
Inhaltsverzeichnis	IV	1. Zusammensetzung und Eigenschaften von Kiesschlämmen	15
Projektübersicht	VIII	1.1 Charakterisierung der untersuchten Kiesschlammtypen mit den entsprechenden Kiesvorkommen und Kiesaufbereitungsanlagen	16
I. Zusammenfassung	1	1.1.1 Kiesvorkommen	16
II. Résumé	3	1.1.1.1 Kornverteilung und Feinstanteilgehalt der Rohmaterialien	17
III. Abstract	5	1.1.1.2 Petrographie der Kiesfraktionen	18
IV. Einleitung	6	1.1.2 Kieswerke	18
V. Problemstellung und Zielsetzung	8	1.1.3 Kiesschlämme	18
VI. Besondere Probleme der Kiesgewinnung aus verlehnten Kiesvorkommen	9	1.2 Zusammensetzung und Eigenschaften der Feinstfraktionen	19
VII. Vorgehen und Methodik	11	1.2.1 Korngrößenverteilung	20
1. Übersicht	11	1.2.2 Chemische Zusammensetzung	22
2. Kiesschlammverwertung	11	1.2.3 Mineralogische Zusammensetzung	24
2.1 Auswahl der Kiesschlammtypen	11	1.2.4 Spezifische Oberfläche und Ionenaustauschkapazität	24
2.2 Charakterisierung der entsprechenden Kiesvorkommen bzw. Kieswerke	11	2. Zusammenstellung der Verwertungsmöglichkeiten	26
2.3 Untersuchungen an Feinstfraktionen	11	3. Verwertung als Rohstoff für die Ziegelindustrie	26
2.4 Verwertungsstudien	12	3.1 Einleitung	26
2.4.1 Laborversuche	12	3.2 Übersicht der Versuche	26
2.4.2 Fabrikationsversuche im Werk	12	3.3 Kiesschlamm als Zusatzkomponente zu einem kalkreichen, tonhaltigen Ziegeleilehm der Oberen Süsswasser-Molasse (OSM)	27
2.4.3 Granulometrische, chemisch-mineralogische Untersuchungen an Ausgangsstoffen und Zwischenprodukten	12	3.3.1 Zielsetzung	27
2.4.4 Chemisch-physikalische Untersuchungen der Endprodukte	12	3.3.2 Versuche und Untersuchungen	27
3. Abklärungen im Zusammenhang mit der Entwässerung und Entsorgung von Kiesschlamm	13	3.3.3 Zusammensetzung der Einzelkomponenten und der Rohmaterialmischungen	28
3.1 Umfrage beim Fachverband für Sand und Kies (FSK)	13	3.3.4 Trocknungsverhalten	29
3.2 Laboruntersuchungen	13	3.3.5 Sortierergergebnisse	29
3.3 Geotechnische Untersuchungen an einem Kiesschlammweiher	13	3.3.6 Physikalische Eigenschaften der gebrannten Steine	29
3.4 Stand der Technik bei der mechanischen Entwässerung von Kiesschlämmen	13	3.3.7 Mineralogische Zusammensetzung der gebrannten Steine	30
		3.3.8 Evaluation der Ergebnisse und Folgerungen	30
		3.4 Kiesschlamm als Zusatzkomponente zu einem hochwertigen, tonreichen Ziegeleilehm der Oberen Süsswasser-Molasse (OSM)	30
		3.4.1 Zielsetzung	30
		3.4.2 Versuche und Untersuchungen	31
		3.4.3 Zusammensetzung der Rohstoffkomponenten	31

3.4.4	Zusammensetzung der Rohstoffmischungen	31	5.	Sinter- und Schmelzverhalten von Kiesschlämmen, mögliche Anwendungen für Keramik- und Glasmaterialien	60
3.4.5	Fabrikationsbedingungen	33	5.1	Einleitung	60
3.4.6	Sortiererergebnisse	33	5.2	Problemstellung	60
3.4.7	Physikalische Eigenschaften der gebrannten Steine	34	5.3	Sintereigenschaften der Kiesschlämme	62
3.4.8	Ergebnisse der Laborbrandversuche	35	5.3.1	Sinterversuche	62
3.4.9	Strukturmerkmale und physikalische Parameter der gebrannten Scherben	36	5.3.2	Schlickergiessen	63
3.4.10	Folgerungen	37	5.3.3	Bläueigenschaften	64
3.5	Kiesschlamm als Zusatzkomponente zu einem tonreichen und kalkarmen Ton (Opalinuston)	38	5.4	Schmelzverhalten der Kiesschlämme	64
3.5.1	Einführung und Zielsetzung	38	5.4.1	Viskosität der Kiesschlammsschmelzen	64
3.5.2	Versuche und Untersuchungen	38	5.4.2	Messung der Viskosität	65
3.5.3	Fabrikationsversuche mit unterschiedlichem Kiesschlammzusatz (Typ D)	38	5.4.3	Chemische Zusammensetzung und Schmelzeigenschaften	66
3.5.3.1	Zusammensetzung der Rohstoffkomponenten und -mischungen	38	5.4.4	Eigenschaften von Kiesschlammsschmelzen und -gläsern	67
3.5.3.2	Fabrikationsparameter	38	5.5	Zusammenfassung	68
3.5.3.3	Qualitative Beurteilung der gebrannten Steine	38	5.6	Schlussfolgerungen	70
3.5.3.4	Mineralogische Zusammensetzung und Struktur der gebrannten Scherben	40			
3.5.3.5	Versuche mit der Röntgen-Heizkamera	44	IX. Entwässerung und Entsorgung von Kiesschlamm		71
3.5.4	Laborversuche mit Mischungen aus Opalinuston und den 7 Kiesschlammtypen	45	1. Situation in der Schweiz (Stand Ende 1983)		71
3.5.4.1	Zusammensetzung der Rohmaterialmischungen	45	1.1	Verlehmungsgrad des Rohmaterials und Menge des anfallenden Kiesschlammes	71
3.5.4.2	Fabrikationsparameter	45	1.2	Kiesschlammmentwässerung	71
3.5.4.3	Eigenschaften der gebrannten Probekörper	46	1.3	Kiesschlammmentsorgung	71
3.5.4.4	Mineralogische Zusammensetzung der gebrannten Probekörper	47	1.4	Kiesschlammverwertung	72
3.5.5	Folgerungen	50	2. Untersuchungen im Zusammenhang mit der Kiesschlammmentwässerung		72
4. Thermisch aktivierter Kiesschlamm als hydraulisches Bindemittel		50	2.1	Natürliche Kiesschlammmentwässerung	72
4.1	Einleitung und Problemstellung	50	2.1.1	Sedimentationsversuche im Labor	72
4.2	Thermische Aktivierung	51	2.1.2	Sedimentation in wasserdurchlässigen Absetzräumen, meist in Schottergruben über dem Grundwasserspiegel	73
4.3	Zusammensetzung der aktivierten Kiesschlämme	51	2.1.3	Sedimentation in Absetzbecken ohne wesentliche seitliche Entwässerung: eine Fallstudie	73
4.4	Versuche mit aktiviertem Kiesschlamm	52	2.1.4	Vergleich mit natürlichen Sedimenten	74
4.5	Eigenschaften der Frischmörtel	53	2.2	Mechanische Kiesschlammmentwässerung	75
4.6	Physikalische Eigenschaften der gehärteten Mörtel	55	2.2.1	Entwässerungsverfahren	75
4.7	Zusammensetzung und Mikrogefüge der erhärteten Mörtel und Bindemittelmischungen	57	2.2.1.1	Feinsandrückgewinnung	75
4.8	Klassifikation als Bindemittel	58	2.2.1.2	Voreindickung mittels Flockulierung	77
4.9	Folgerungen	59	2.2.1.3	Eindickung	77
			2.2.2	Vergleich der Entwässerungsverfahren	81
			3. Kiesschlammmentsorgung		82
			X. Folgerung und Ausblick		83
			XI. Literaturverzeichnis		85

FIGURENVERZEICHNIS, TABELLENVERZEICHNIS

FIGUREN

1	Kiesgewinnung aus stark verlehnten Kiesvorkommen im Vergleich mit der Kiesgewinnung aus Schottervorkommen	09	17	Versuchskörper	53
2	Prinzipschema einer Kiesgewinnung	09	18	Wärmeentwicklung während der Hydratation der Bindemittelmischung PC + aktivierter Kiesschlamm (AS Typ B)	55
3	Kieswerk ohne naheliegenden Deponieraum	09	19	Wärmeentwicklung während der Hydratation der Bindemittelmischung (PC + hydraulischer Kalk (HK))	55
4	Kiesschlamm nach natürlicher Austrocknung im Kiesschlammweiher	09	20	Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Zugabe von thermisch aktiviertem Kiesschlamm zu Zement	55
5	Zusammenhang zwischen Ionenaustauschkapazität und Tonmineralgehalt der Kornfraktion <0.063 mm	26	21	Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Verhältnisses gebundenes CaO/freies CaO im aktivierten Kiesschlamm	55
6	Zusammenhang zwischen Ionenaustauschkapazität und spezifischer Gesamtoberfläche der Kornfraktion <0.063 mm	26	22	Zusammensetzung der Bindemasse von hydraulischem Kalk und den aktivierten Kiesschlämmen D, E und G im Rankin-Diagramm	59
7	Druckfestigkeit von Backsteinen in Funktion des Tonfraktionsgehaltes der Rohmaterialmischung	34	23	Lineare Brennschwindung (%) von gepressten zylindrischen Kiesschlammproben	62
8	Steindruckfestigkeit in Funktion der Brenntemperatur	36	24	Durch Giessen von Kiesschlämmen (<0.063 mm) hergestellte Tiegel	63
9	Druckfestigkeit und Wasserersaugvermögen von gebrannten Backsteinen in Funktion der Kiesschlammzugabe (Typ D)	39	25	Schaumglaskörper aus 60% Kiesschlamm F und 40% Abfallglaspulver	64
10	Beurteilung der Gefügetextur an geschliffenen Backsteinquerschnitten	39	26	Viskositätsänderung von Kiesschlamm-schmelzen in Abhängigkeit von der Temperatur	66
11	REM-Aufnahmen des gebrannten Scherbens aus 100% Opalinuston	42	27	DTA-Kurven von Kiesschlammgläsern	69
12	REM-Aufnahmen des gebrannten Scherbens aus der Mischung 75% Opalinuston + 25% Kiesschlamm	42	28	Sedimentationsvolumen in Funktion des Tonmineraliengehaltes von Kiesschlamm	73
13	REM-Aufnahmen des gebrannten Scherbens aus der Mischung 50% Opalinuston + 50% Kiesschlamm	43	29	Raumgewicht des sedimentierten Kiesschlammes in Funktion des Tonmineraliengehaltes	73
14	REM-Aufnahmen des gebrannten Scherbens aus der Mischung 20% Opalinuston + 80% Kiesschlamm	43	30	Ausbaustufen Kiesschlammmentwässerung	76
15	Reaktionsverlauf der einzelnen Mineralphasen beim Brennen der vier Rohstoffmischungen	44	31	Vakuum - Trommelfilter	78
16	Reaktionsverlauf der einzelnen Mineralphasen beim Brennen der Rohstoffmischungen aus 50% Opalinuston + 50% Kiesschlamm. Aufnahme mit der Röntgenheizkamera	48	32	Schlammmentwässerung mittels Vakuum-Trommelfilter	79
			33	Kammerfilterpresse	80
			34	Siebbandpresse	80
			35	Schnittbild einer Dekanterzentrifuge	81

TABELLEN

1	Verzeichnis der untersuchten Kiesschlamm- typen, Kieswerke und Kiesvorkommen	15	30	Zusammensetzung der Rohstoffkompo- nenten und Rohmaterialmischungen	39
2	Geologie und Petrographie	16	31	Eigenschaften der gebrannten Steine (ohne Sortierung)	40
3	Abbautechnische Daten	17	32	Mineralogische Zusammensetzung der gebrannten Scherben	41
4	Kornverteilung der Rohmaterialproben	18	33	Feinstruktur der gebrannten Scherben (Beobachtungen mit dem Raster-Elektro- nenmikroskop)	41
5	Petrographie der Kiesfraktionen	19	34	Granulometrische und mineralogisch- chemische Zusammensetzung der Roh- materialmischungen	45
6	Kieswerke: technische Einrichtungen, Pro- duktionsmengen und Produkte	20	35	Eigenschaften der gebrannten Probekörper	46
7	Kiesschlammwässerung und -ent- sorgung	21	36	Mineralogische Zusammensetzung der gebrannten Probekörper	47
8	Korngrößenverteilung der Kiesschlämme und der Rohmaterialfeinstfraktionen	21	37	Evaluation der Ergebnisse aus den Fabrika- tionsversuchen	50
9	Chemische Zusammensetzung der Kies- schlämme und der Rohmaterialfeinst- fraktionen	22	38	Aktivierungsbedingungen der sieben Kies- schlammtypen	51
10	Mineralogische Zusammensetzung	23	39	Zusammensetzung der aktivierten Kies- schlämme	52
11	Mineralogische Zusammensetzung; Ver- gleich Probeentnahme 1977-1980	23	40	Siebrückstand und spezifische Oberfläche der aktivierten, gemahlenen Kiessschlämme	52
12	Ionenaustauschkapazität, spezifische Gesamtoberfläche und Tonmineralanteil der Fraktion <0.063 mm aus den Kiesroh- materialien	24	41	Mörtelmischungen	53
13	Verwertungsmöglichkeiten von Kies- schlamm	25	42	Zusammensetzung und Eigenschaften der Frischmörtel	54
14	Versuche Ziegeleirohstoffe mit Kies- schlammzusatz	27	43	Druckfestigkeit der gehärteten Mörtel	56
15	Zusammenstellung der Versuche	27	44	Hydraulischer Index der aktivierten Kies- schlämme	57
16	Korngrößenverteilung, Quarz- und Kalk- gehalt der Einzelkomponenten und der Rohmaterialmischungen (Strangproben)	28	45	E-Modul von Mörtelprismen	57
17	Zusammensetzung der Tonfraktion <0.002 mm der Einzelkomponenten	28	46	Normalisierte Schwindung von erhärteten Mörtelproben	57
18	Trockenschwindung und Anmachwasserge- halt in Funktion der Kiesschlammzugabe	29	47	Menge und Zusammensetzung der Binde- masse am Beispiel von hydraulischem Kalk und drei aktivierten Kiessschlämmen	58
19	Festigkeitseigenschaften und Wassersaug- vermögen der gebrannten Backsteine	29	48	Zusammensetzung der Fraktion <0.063 mm verschiedener Kiesschlammtypen	60
20	Mineralneubildungen in den gebrannten Scherben in Gew. %	30	49	Chemische Zusammensetzung (Gew. %) der Kiesschlammfraktion	61
21	Evaluation der Ergebnisse	30	50	Oxidische Zusammensetzung (Gew. %) der Kiesschlammfraktionen (<0.063 mm), bezogen auf glühverlustfreie Proben	61
22	Zusammenstellung der Versuche	31	51	Brennschwindung von gepressten Kies- schlammproben	62
23	Zusammensetzung der Rohstoff- komponenten	32	52	Viskosität von geschmolzenen Kies- schlammproben	66
24	Zusammensetzung der Rohstoff- mischungen	33	53	Kiesschlamm F, modifiziert für dünnflüssi- gere Glasschmelzen	68
25	Druckfestigkeit, Querkzugfestigkeit und Wassersaugvermögen der gebrannten Back- steine (BS 17,5 M, BS 18)	34	54	Korngrössendifferentiation im Kies- schlammweiher und Vergleich mit eiszeit- lichen Seeablagerungen	75
26	Physikalische Eigenschaften der im Labor gebrannten Steine	35	55	Vergleich der Entwässerungsverfahren	82
27	Gefügestruktur der gebrannten Scherben	36			
28	Physikalische Parameter der gebrannten Scherben	37			
29	Fabrikationsversuche mit Mischungen aus Opalinuston und Kiesschlamm	38			

PROJEKTÜBERSICHT

Schweizerischer Nationalfonds

Nationale Forschungsprogramme

ROHSTOFF- UND MATERIALPROBLEME

Teilprogramm C: Mineralische Rohstoffe

Projekt-Nummer: 4.292 – 0.79.07

Projektnehmer

Prof. Dr. Tj. Peters	Min.-Petr. Institut der Universität Bern
Dr. R. Iberg	Zürcher Ziegeleien, Zürich

Koordination und Redaktion

Dr. Th. Mumenthaler	Zürcher Ziegeleien, Zürich
---------------------	----------------------------

Mitarbeiter und Institutionen, die am Projekt mitwirkten

Prof. Dr. G. Bayer	Institut für Kristallographie und Petrographie der ETH Zürich
T. Ramholt, Dr. Ch. Schlüchter	Institut für Grundbau und Bodenmechanik der ETH Zürich-Hönggerberg
C. Frei, H. Fuhrmann	Fa. U. Ammann Maschinenfabrik AG, Langenthal BE
Dr. D. Hody, Dr. E. Kratz, J. Steffen	Fa. Sulzer-Escher Wyss AG, Zürich
A. Dörflinger	FSK, Verband für Sand und Kies, Nidau BE

I. ZUSAMMENFASSUNG

In der Schweiz werden abbaubare Vorkommen von hochwertigen, sauberen Alluvialkiesen immer seltener, was eine *zunehmende Mangelsituation* in der Versorgung der mineralischen Rohstoffe Sand und Kies mittelfristig ergeben wird. Dies führt zwangsläufig zu der Frage nach *Alternativen* durch Verlagerung auf bisher wenig beachtete, minderwertigere Rohstoffquellen wie Deckenschotter, Moränen, Gehängeschutt, Molassengelfluh und Festgesteine (JÄCKLI und SCHINDLER 1986).

Der Abbau von *verlehmt* Kiesvorkommen (Schottermoräne, Moräne) könnte insofern eine interessante Alternative sein, wenn sich eine technisch und wirtschaftlich vertretbare *Verwertung* des beim Aufbereitungsprozess in grossen Mengen anfallenden *Kiesschlamm*es anbieten würde. Dem vorliegenden Forschungsprojekt liegt somit die Zielsetzung zugrunde, durch eine systematische Erforschung der Kiesschlammeeigenschaften Chancen und Möglichkeiten für eine nutzbare Verwertung dieses der Kiesgewinnung stark belastenden Abfallstoffes aufzuzeigen. Gegenwärtig fallen in der Schweiz bereits mehr als 1,6 Mio. t Kiesschlamm (Feststoffmasse) pro Jahr an, eine sehr bedeutende Abfallmenge, die aber auch ein potentieller Rohstoff darstellen könnte.

Untersucht wurde zuerst die *granulometrische, chemische und mineralogische Zusammensetzung* von 7 repräsentativen *Kiesschlamm*typen aus der ganzen Schweiz. Kiesschlämme sind sehr feinkörnige (Körnung zum grössten Teil $< 0,06$ mm) und homogene Mineralgemische. Sie bestehen vorwiegend aus Karbonaten (Calcit, Dolomit), Quarz, Feldspäte (Albit, K-Feldspat) und Tonmineralien (Illit, Chlorit, Montmorillonit, Kaolinit). Die Granulometrie ist sehr stark von der Kornverteilung der Feinstfraktion im Rohmaterial beeinflusst und hängt auch davon ab, bei welcher Korngrenze die nutzbaren Sandkomponenten von den Schlammstoffen abgetrennt werden. In Übereinstimmung mit früheren Analysen an Kiesschlammern zeigen die hier untersuchten Kiesschlammtypen eine *regionbedingte Systematik* in der mineralogischen Zusammensetzung. Bezeichnend ist dabei, dass der Gehalt an Dolomit, Kaolinit und Montmorillonit von der West- nach der Ostschweiz zunimmt. Kiesschlämme zeichnen sich durch eine relativ *hohe spezifische Oberfläche* und ein deutliches *Ionenaustauschvermögen* aus, die weitgehend mit der Tonmineralienmenge korreliert werden können.

Basierend auf der granulometrischen, chemisch-mine-

ralogischen Zusammensetzung und den Eigenschaften von Kiesschlamm lassen sich bezüglich *Verwertungsmöglichkeiten* interessante Überlegungen und Grundsatzbetrachtungen anhand technologischer Modelle anstellen (vgl. Tabelle 13), einige davon wurden mittels ausgedehnten *Labor- und Fabrikationsversuchsreihen* eingehend überprüft.

Der Einsatz von Kiesschlamm als *Zusatzkomponente* für die *Ziegelindustrie* erscheint vielversprechend zu sein. Untersucht wurde der Kiesschlammzusatz in verschiedenen Dosierungen bei folgenden drei Ziegelei- rohstofftypen:

- Typ a Kalkreicher, tonhaltiger Lehm der Oberen Süsswasser-Molasse (ÖSM):
40–50% Kalk (Karbonate), 30–35% Ton (Fraktion $< 0,002$ mm)
- Typ b Kalkhaltiger, tonreicher Lehm (ÖSM):
18–20% Kalk, 60–65% Ton
- Typ c Kalkarmer, tonreicher Lehm (Opalinuston):
10% Kalk, 55–60% Ton

Eine Kiesschlammbeimischung zu einem kalkreichen Lehm von mehr als 40% Kalk (*Typ a*) ist, wegen des ungünstigen Magerungseffektes auf den ohnehin bescheidenen Tongehalt eines solchen Lehm, *nicht zweckmässig*. Anders dagegen liegen die Verhältnisse bei tonreichen Rohmaterialien vom *Typ b*, wo mit Kiesschlamm verschiedenartige Auswirkungen manifest werden, die sowohl *fabrikationstechnische Erleichterungen* (Verbesserung der Trocken- und Brennempfindlichkeit) als auch *qualitative Vorteile* bringen können. Dabei hat sich auch gezeigt, dass Kiesschlamm mehr als nur ein Magerungsmittel ist und als *thermisch reaktionsfähige* Zweitkomponente betrachtet werden kann, was in den allgemein *erhöhten* Festigkeitseigenschaften zum Ausdruck kommt. Besonders wirksam ist Kiesschlamm, wenn dieser einem kalkarmen und tonreichen Lehm vom *Typ c* (Opalinuston) beigemischt wird. Als Folge der im Brennprozess stattfindenden Reaktionen und den daraus hervorgehenden Mineralneubildungsphasen nimmt die *Kristallinität* der Gefügestruktur in gebrannten Produkten mit steigender Schlamm dosierung zu. Dadurch können die als Begleiterscheinung des Dichtbrennens von Opalinuston auftretenden unerwünschten Blähungen und schwarzen Reduktionszonen unterbunden werden. Ferner kann in Funktion der Kiesschlamm dosierung eine Palette von nach Druckfestigkeit und Wassersaugvermögen spezialisierten Endproduktequalitäten erhalten werden.

In einer weiteren Verwertungsstudie wurde das *hydraulische* Verhalten von bei 900 °C *thermisch aktiviertem Kiesschlamm* untersucht. Anhand von Prismen und gemauerten 3-Stein-Körpern wurde eine Vielzahl systematisch formulierter Mörtelmischungen aus Normsand und den Bindemitteln Zement, hydraulischer Kalk und aktivierter Kiesschlamm geprüft und miteinander verglichen. Im Unterschied zum Portlandzement, der als reines, homogenes Bindemittel definiert werden kann, stellen sowohl der hydraulische Kalk wie die aktivierten Kiesschlämme heterogene Gemische dar. Sie enthalten neben der eigentlichen hydraulischen Bindemasse noch erhebliche Anteile an nicht hydraulischen Komponenten, wie Calcit und Quarz beim hydraulischen Kalk, CaO, Quarz und Feldspäte bei den aktivierten Kiesschlämmen, die z. T. als Filler qualifiziert werden können. Von Interesse für eine Klassifikation der aktivierten Kiesschlämme als Bindemittel sind vor allem Menge und Zusammensetzung der Bindemasse. Diese Merkmale können aus der Menge löslichem SiO₂, umgesetztem CaO und Al₂O₃ aus den Tonmineralien abgeleitet werden. Daraus ist ersichtlich, dass die aktivierten Kiesschlämme recht unterschiedliche Bindemassenanteile besitzen, die einen direkten Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften der entsprechenden Mörtel haben. Von den sieben untersuchten Kiesschlammtypen zeigen deren drei (Schlammtypen B, C, E) eine ausgeprägte *hydraulische Wirkung*, die mit einem erhöhten Bindemittelanteil korreliert werden kann. Voraussetzung für diese hydraulische Aktivität ist ein genügender Ton- und Kalkgehalt, was nicht bei allen Kiesschlämmen gleichermassen zutrifft. In Frage kommen die *gleichen Anwendungsgebiete* wie beim *hydraulischen Kalk*. In Kombination mit Portlandzement ist der hydraulische Kalk als Mörtelbindemittel gefragt. Diese sogenannten verlängerten Mörtel sind weniger druckfest, wirken aber spannungsausgleichend und verbessern geringfügig die Wärmeisolation. Bekannt ist ferner, dass verlängerte Mörtel eine vorzügliche Verarbeitbarkeit zeigen, was mit thermisch aktiviertem Kiesschlamm auch der Fall ist.

Zur Untersuchung der Verwendungsmöglichkeit von Kiesschlämmen als *Sekundär-Rohstoffe bei der Produktion von Keramik- und Glasmaterialien* wurden Sinter- und Schmelzversuche an den sieben Kiesschlammtypen durchgeführt. Diese Versuche zeigen, dass solche homogenen und feinkörnigen Mineralgemische beim Erhitzen sehr leicht reagieren. Lässt man wirtschaftliche Erwägungen ausser Betracht, wäre es durchaus möglich, derartige «Sekundärrohstoffe» mit geeigneter Zusammensetzung bei der Herstellung von Feinkeramik und Gläsern einzusetzen. Dabei könnten gewisse, vor allem Fe-oxidarme Kiesschlämme direkt verwendet werden, andere müssten durch Zusatz von

weiteren Rohstoffen (Ton, Feldspat, Karbonate, Soda) für die Verarbeitung zu bestimmten Produkten modifiziert werden. Im Prinzip wären z. B. folgende *Anwendungen* denkbar:

- Herstellung von *poröser bis dichter Feinkeramik* (z. B. Fliesen, Tiegel, Filter, Haushaltkeramik), wobei bei tonarmen Kiesschlämmen die Rohstoffmischung mit Kaolinzusatz zu verbessern wäre.
- Herstellung von *geschäumten Leichtbaustoffen*, unter Zusatz von etwa 25–50% Abfallglaspulver und eines Blähmittels wie z. B. SiC, MnO₂, Talk, SrCO₃.
- Herstellung von *Mineralglasfasern*, wobei bei den meisten Kiesschlämmen ein Zusatz von billigen Rohstoffen (Ton, Feldspat, Quarz, Calcit) zur Korrektur der chemischen Zusammensetzung erforderlich wäre.

Im letzten Teil der Arbeit werden die *Entwässerung* und die *Entsorgung* von Kiesschlamm behandelt. Basierend auf einer *Umfrage* bei den Mitgliedern des Fachverbandes für Sand und Kies wird die Situation in der Schweiz per Ende 1983 kurz dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Kiesschlamm Entsorgung für viele Kiesunternehmer ein technisch wie wirtschaftlich akutes Problem darstellt und dass bis zu diesem Zeitpunkt noch nirgends eine regelmässige und konsequente Kiesschlammverwertung stattfindet. Weiter wurde das Sedimentations- und Konsolidationsverhalten von Kiesschlamm sowohl im Labor als auch in einem natürlichen Sedimentationsbecken (Kiesschlammweiher) geotechnisch untersucht. Hervorzuheben sind dabei die hohen, im Zusammenhang mit dem Tonmineralienanteil stehenden *Kiesschlamm-Sedimentvolumen*. Besonders ungünstig verläuft die *Konsolidation* solcher Sedimente in Absetzbecken ohne wirksame seitliche Entwässerung, was zu erheblichen Problemen bei der Rekultivierung und Nutzung dieser Absetzräume führen kann. Zum Schluss werden die Prinzipien der *mechanischen Kiesschlamm Entwässerung* sowie die dazu gehörenden apparativen Konzepte vorgestellt und miteinander verglichen.

Hauptanliegen des Projektes ist es, den Kiesproduzenten, den Behörden und potentiellen Verwertern von Kiesschlamm technologische Grundlagen als Entscheidungshilfen und als Impulse für Problemlösungen zur Verfügung zu stellen.

Ein erster Schritt in dieser Richtung bildet die seit Ende 1984 mit Erfolg praktizierte Verarbeitung von Kiesschlamm für die Produktion von Backsteinen durch eine bedeutende Ziegelei der Nordwestschweiz.

II. RÉSUMÉ

Utilisation des boues de lavage, une contribution à la mise en valeur de gisements de gravier fortement argileux

En Suisse, les gisements exploitables de gravier propre et de haute qualité, comme ceux des terrasses alluvionnaires récentes, deviennent de plus en plus rares, ce qui, dans un avenir assez proche, va provoquer une *pénurie de matière première* dans le domaine des sables et graviers. Au vu de cette situation, il semble indispensable de rechercher toutes les *alternatives* et d'étudier les possibilités d'exploiter d'autres sources de matières premières comme par exemple les terrasses d'alluvions anciennes, les moraines, les éboulis, les poudingues molassiques et les roches compactes (JÄCKLI et SCHINDLER 1986).

L'exploitation de gisements de *gravier fortement argileux* (moraine argilo-limoneuse à cailloux) pourrait, dans ce contexte, devenir une alternative intéressante à condition de trouver une *utilisation* techniquement et économiquement valable pour l'énorme quantité de boues résultant du lavage de ce genre de matériau. Le but du projet de recherche est d'évaluer, par une étude systématique de la composition et des propriétés de ces boues, les chances et les possibilités d'une utilisation rationnelle de ce déchet encombrant. La quantité de boues de lavage de gravier produite à l'heure actuelle en Suisse s'élève déjà à plus de 1.6 mio. t par an, une quantité énorme de déchet mais peut-être aussi une source de matière première potentielle.

Dans un premier temps, la *composition granulométrique, chimique et minéralogique* de 7 types de boues provenant de toute la Suisse a été déterminée. Les boues de lavage de gravier consistent en un mélange très fin et homogène de divers minéraux, notamment de carbonates (calcite, dolomite), de quartz, de feldspaths (albite, feldspath potassique) et de minéraux argileux (illite, chlorite, montmorillonite, kaolinite). La granulométrie varie d'une part en fonction de la répartition granulométrique de la partie fine de la matière première, dépend d'autre part aussi du système de lavage, notamment du niveau de séparation entre la partie grossière récupérable (sable) et les parties fines inutilisables. La composition minéralogique des boues présente une *répartition régionale* caractéristique et systématique déjà constatée dans des recherches ultérieures, consistant en une augmentation de la teneur en dolomite, kaolinite et montmorillonite en passant de l'ouest à l'est de la Suisse. Les boues de lavage de gravier pos-

sèdent une *surface spécifique* relativement élevée et une nette *capacité d'échange d'ions*, propriétés pouvant être mises en relation avec la teneur en minéraux argileux.

En se basant sur la composition granulométrique, chimique et minéralogique des boues de lavage, ainsi que sur leurs propriétés, il est possible d'établir une liste d'*utilisations potentielles* tenant compte des possibilités technologiques actuelles (voir table 13). Certaines de ces utilisations ont été vérifiées dans le cadre de ce projet par des séries d'*essais en laboratoire* et de nombreux *essais de fabrication*.

L'utilisation de boue de lavage comme *composant additionnel* dans l'*industrie de la terre cuite* semble être prometteur. De nombreux essais de fabrication ont été effectués avec des ajouts de boue de lavage aux matières premières pour terre cuite suivantes:

- Type a Marne riche en calcaire, argileuse, de la Molasse d'eau douce supérieure:
40-50% de carbonates, 30-35% de fraction argileuse (< 0,002 mm)
- Type b Marne très argileuse, calcaire de la Molasse d'eau douce supérieure:
18-20% de carbonates, 60-65% de fraction argileuse
- Type c Argile peu calcaire (Opalinuston)
10% de carbonates, 55-60% de fraction argileuse.

Un ajout de boue de lavage à une marne à teneur en carbonates dépassant 40% (*type a*) n'est *pas indiqué* à cause de l'effet amaigrissant défavorable sur une matière première déjà pauvre en argile. Il en va tout autrement pour le matériau riche en argile du *type b* pour lequel l'adjonction de boue de lavage se révèle être *favorable*, non seulement lors du processus de fabrication (amélioration du comportement au séchage et à la cuisson), mais encore en ce qui concerne la *qualité du produit fini*. La boue de lavage se révèle être plus qu'un simple ajout amaigrissant et peut être considérée comme un composant secondaire thermiquement *réactif*, ce qui se traduit par une *amélioration* des résistances mécaniques. L'adjonction de boue de lavage à une argile pauvre en carbonates du *type c* (Opalinuston) est particulièrement *efficace*. A la suite des réactions en cours de cuisson, conduisant à la formation de nouveaux minéraux, il est possible d'observer une augmen-

tation de la *crystallinité* du produit cuit en fonction du dosage de la boue de lavage. De ce fait, les effets défavorables dus au comportement à la cuisson de l'Opalinuston (structure vitreuse et particulièrement dense, boursofflures, zones de réduction) peuvent être supprimés. De plus, il est possible d'obtenir toute une palette de produits finis dont les caractéristiques (résistance à la compression, absorption d'eau) varient en fonction de la quantité de boue de lavage dans le mélange.

L'étude des possibilités d'utilisation de *boue activée* par un court traitement thermique à 900 °C en tant que *liant hydraulique* constitue un autre volet du projet de recherche. Pour ce faire, les propriétés de nombreuses séries de mortiers à dosages variables, constitués de sable normalisé et de divers liants (ciment, chaux hydraulique, boue activée) ont été déterminées et comparées les unes aux autres. A la différence du ciment Portland qui peut être défini comme un liant pur et homogène, la chaux hydraulique, de même que la boue activée, sont des mélanges hétérogènes contenant, à côté du liant hydraulique proprement dit, une quantité non négligeable de composants non hydrauliques comme la calcite et le quartz dans la chaux hydraulique, le CaO, le quartz et les feldspaths dans la boue activée. Pour entreprendre une classification de la boue activée en tant que liant, il est important de connaître la quantité et la composition de la *partie hydraulique active*, ce qui peut être déduit à partir des quantités de SiO₂ soluble, du CaO combiné et du Al₂O₃ provenant des minéraux argileux. A partir de ces indications, on constate que les différents types de boues activées possèdent une quantité de liant hydraulique très variable, ce qui a un effet direct sur les propriétés mécaniques des mortiers. Parmi les 7 types de boues étudiés, trois d'entre eux (Types B, C, E) possèdent un effet hydraulique marqué, pouvant être mis en relation avec une proportion importante de minéraux argileux et de calcite dans la matière première. Les *possibilités d'application* devraient être les mêmes que pour la *chaux hydraulique*. Combinée au ciment, la chaux hydraulique est un liant pour mortiers apprécié. Ce genre de mortier, dit mortier bâtard, possède une résistance mécanique moindre mais a l'avantage d'égaliser les contraintes et d'améliorer l'isolation thermique. Un autre avantage est l'excellente ouvrabilité du mortier bâtard, qualité également observée avec la boue activée.

Les possibilités d'emploi des boues de lavage comme matières premières pour la *production de matériaux de céramique et verre* ont été étudiées au moyen d'essais de frittage et de fusion sur les 7 types de boues. Les essais montrent que ces mélanges homogènes très fins de minéraux réagissent très facilement lors du chauffage. Si l'on ne tient pas compte de considérations économiques, il serait sans aucun doute possible d'employer

de telles matières premières pour la production de céramique fine et de verre. Certaines de ces boues, en particulier celles pauvres en fer, pourraient convenir directement, d'autres devraient être modifiées par l'adjonction de matières premières diverses (argile, feldspath, carbonates, carbonate de soude, poudre de verre) en vue de productions bien déterminées. En principe, les *possibilités d'emploi* suivantes peuvent être envisagées:

- Production de *céramique poreuse à dense* (par ex. carreaux, creusets, filtres, vaisselle utilitaire). Pour ce faire, les boues pauvres en argile devraient être améliorées par un ajout de kaolin.
- Production de *matériaux de construction en mousse de verre*, avec adjonction de 25-50% de poudre de verre et un agent gonflant comme par exemple SiC, MnO₂, du talc, SrO₃.
- Production de *fibres de verre* minérales, avec adjonction, dans la plupart des cas, d'une matière première (argile, feldspath, quartz, calcite) afin d'obtenir une composition chimique adéquate.

La dernière partie du projet est consacrée aux procédés techniques de *récupération* des boues et aux problèmes liés à l'*évacuation* et au *dépôt* de ces déchets. Une enquête effectuée fin 1983 auprès des membres de l'Association suisse des gravières montre que l'évacuation des boues de lavage représente pour beaucoup d'entrepreneurs de gravier un problème économique et technique difficile à résoudre, et qu'à ce jour il n'existe encore nulle part un programme conséquent d'emploi de ce déchet encombrant. Le comportement des boues lors de leur sédimentation et de leur consolidation a fait l'objet d'une étude géotechnique menée en laboratoire et sur un bassin de décantation naturel sans drainage latéral. Cette étude met en relief les *volumes de sédimentation* énormes des boues qui sont directement proportionnels à la teneur en minéraux argileux. La *consolidation* de ces sédiments est particulièrement problématique dans le cas d'un bassin de décantation pratiquement étanche et peut conduire à de grosses difficultés lors du remblayage et de l'utilisation ultérieure de la surface. Enfin, les divers *procédés techniques de récupération* des boues sont présentés et évalués.

Le but principal du projet est de mettre à disposition des exploitants de gravier, des utilisateurs potentiels des boues et des autorités un certain nombre d'idées et de bases technologiques en tant qu'éléments pouvant servir à résoudre les problèmes liés aux boues de lavage de gravier. Un premier pas dans cette direction constitue l'utilisation, couronnée de succès, d'une quantité notable de boue de lavage par une importante briquetterie du nord-ouest de la Suisse, ceci à partir de fin 1984.

III. ABSTRACT

Due to conflicting interests, like the protection of groundwater resources, exploitable high-grade *gravel deposits* will become *scarce* in Switzerland in the near future. This will inevitably lead to the search for *alternative*, lower-grade resources such as terrace gravels, moraines, talus material, molasse conglomerates and hard rocks.

The use of *impure silty moraines* as a substitute might be of interest, provided an economical solution for the *use of the mud* from gravel washeries can be found. The purpose of this study is to investigate the properties of the washing mud and its possible uses. The yearly amount of 1.6 million tons of washing mud in Switzerland does not only represent a considerable amount of waste but also a potential resource of raw material.

Out of a total of 150 mineralogically investigated muds, *seven characteristic types* were chosen and *studied* in detail. Their grain size distribution is characterized by a large amount, less than 60 microns in size, and is composed of carbonates with quartz, feldspars and clay minerals. They show a large *specific surface* and a distinct *cation exchange capacity* which, to a large extent, are related to the amount of clay minerals.

Based on these granulometric, mineralogical and chemical properties, possible uses were evaluated (Table 13), among which several were studied on a *laboratory* as well as a *factory scale*. For the *use as a raw material component in brick-making*, washing mud was added in different ratios to three types of raw material:

- Type a) carbonate-rich marl of the Upper Fresh-Water Molasse, 40–50% carbonates, 30–35% clay
- Type b) marl with 18–20% carbonates and 60–65% clay
- Type c) Opalinus clay with 10% carbonates and 55–60% clay

An admixture of washing mud to the *first type* did *lower the quality* of the fired products due to extreme leaning. By contrast, the clay mineral-rich raw materials of *type b* exhibited *improved technical properties* such as reduced drying and firing shrinkage, thus, the washing mud acted as a *thermally reactive component*. Especially the admixtures to *type c* greatly *improved the quality* of the fired products. This is mainly due to a

better crystallized texture. With different ratios of both components, a whole range of technical properties can be obtained.

For the use as mortar, the *hydraulic properties* of washing mud *thermally activated* at 900 °C were studied on mortar prisms and mortar walls composed of three bricks. Several series of standard sand with variable proportions of cement, hydraulic lime and activated washing mud were tested and compared. The properties of thermally activated mud are comparable with *hydraulic lime* and can substitute the latter in order to optimize the processing of cement-based mortar. The differences in the technical properties of the seven investigated muds can be correlated with varying contents in soluble SiO₂, CaO and Al₂O₃.

In order to investigate the use of washing muds as secondary raw material for the production of *ceramics and glasses*, the sintering and melting behaviour were studied. The fine-grained homogeneous materials prove to be highly reactive and, with the help of certain additives, the following *uses* can be envisaged:

- *porous and dense* ceramics such as tiles, filters, china, in which case only the Al₂O₃-poor muds need some additional kaolinite.
- manufacturing of *foam glasses* with the addition of 25–50% used glass powder and an expanding agent.
- production of mineral *glass fibres* with only very minor variable additives to obtain the proper chemical composition.

In a last chapter, the *dehydration* and *disposal* of washing mud are discussed. A nation-wide inquiry has shown that disposal represents a technically and economically acute problem. Several *dehydration methods* were tested and their results compared. *Sedimentation* and *consolidation* of washing muds were studied *geo-technically*. Unless there is lateral drainage, it was found the recultivation and its use as a building site is problematic.

Out of the different possible uses of muds from gravel washeries investigated in this study, the addition to brick-making raw material is satisfactorily running in a large plant since 1984.

IV. EINLEITUNG

Das Forschungsprojekt «Beitrag zur Nutzbarmachung und Bewirtschaftung stark verlehmteter Kiesvorkommen» ist in der Periode vom 1. Juli 1979 bis 30. Juni 1984 als Zusammenarbeit zwischen dem

Mineralogisch-petrographischen Institut der Universität Bern, Prof. Dr. Tj. Peters, Projektleiter und Hauptgesuchsteller,

und den

Zürcher Ziegeleien, Zürich

Dr. R. Iberg, Projektleiter und Mitgesuchsteller,

Dr. Th. Mumenthaler, Koordination und Redaktion,

ausgeführt worden.

Folgende Personen, Firmen und Institutionen haben im Rahmen des Projektes verschiedentlich mitgewirkt, wofür an dieser Stelle bestens gedankt sei:

- Herr Prof. Dr. G. Bayer, Institut für Kristallographie und Petrographie, ETH Zürich (Sinter- und Schmelzverhalten von Kiesschlämmen, mögliche Anwendungen für Keramik und Glasmaterialien, vgl. Kapitel VIII/5.)
- Herren T. Ramholt, Dr. Ch. Schlüchter, R. Wullemann und J. Jedelhauser (IGB Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH-Z Hönggerberg) für zahlreiche geotechnische Untersuchungen sowie für wertvolle Diskussionen und Anregungen (vgl. Kapitel IX/2.1.3)
- Fa. U. Ammann Maschinenfabrik AG in Langenthal/BE, Herren C. Frei und H. Fuhrmann (Mechanische Kiesschlammmentwässerung, vgl. Kapitel IX/2.2)
- Fa. Sulzer-Escher Wyss AG, Zürich, Herren Dr. D. Hody, Dr. E. Kratz und J. Steffen (Entwässerung von mineralischen Schlämmen).
- Der Schweiz. Verband für Sand und Kies in Nidau, Herr A. Dörflinger, Geschäftsführer (Umfrage bei den Verbandsmitgliedern).
- Herren Prof. Dr. C. Schindler (Ingenieurgeologie ETH-Z Hönggerberg), M. Gyger, Dr. R. Wildberger und H. Bühl (Geol. Büro Dr. von Moos AG) sowie Prof. Dr. H. Jäckli und Dr. U. Aeberli (Geol. Büro

Dr. H. Jäckli AG) für wertvolle Diskussionen und die Bereitstellung von diversen Unterlagen.

- Sämtliche Kiesunternehmungen, die uns bei Probenentnahmen und durch Beantwortung des Fragebogens behilflich waren.
- Dem Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, der Expertenkommission und dem Teilprogrammleiter Herrn Dr. F. Hofmann danken wir für das entgegengebrachte Vertrauen und die wertvolle Unterstützung.

Über die im Verlaufe des Forschungsprojektes erarbeiteten Ergebnisse wurde bis heute wie folgt Bericht erstattet:

- Interne Berichte zu Händen des Schweiz. Nationalfonds
 - Nr. 1 Charakterisierung und Typisierung stark verlehmteter Kiesvorkommen vom Juli 1980
 - Nr. 2 Verwertung von Kiesschlämmen im ziegeletechnischen Prozess vom 10. September 1981
 - Nr. 3 Untersuchungen über das technologische Verhalten von thermisch aktiviertem Kiesschlamm vom 11. August 1982
 - Nr. 4 Untersuchungen über das Sinter- und Schmelzverhalten von Kiesschlämmen, mögliche Anwendungen für Keramik- und Glasmaterialien vom 30. Juni 1983
 - Nr. 5 Schlussbericht vom 30. Juni 1984
- Publikationen

Peters, Tj., Iberg, R., Mumenthaler, Th. (1982): «Kiesschlamm als potentieller Rohstoff?», Schweizer Ingenieur und Architekt, 19. Nachdruck in: Die Schweizer Baustoffindustrie, 6/82.

Iberg, R., Peters, Tj., Mumenthaler, Th. (1983): «Kiesschlamm als potentieller Rohstoff? II. Technologisches Verhalten von thermisch aktiviertem Kiesschlamm», Schweizer Ingenieur und Architekt, 36. Nachdruck in: Die Schweizer Baustoffindustrie, 6/83.

Bayer, G., Iberg, R. (1983):
«Kiesschlamm als potentieller Rohstoff? III. Sinter-
und Schmelzverhalten von Kiesschlamm», Schwei-
zer Ingenieur und Architekt, 39.
Nachdruck in: Die Schweizer Baustoffindustrie,
1/84.

In der vorliegenden Publikation sind die wesentlichen
Ergebnisse dieses Forschungsprojektes systematisch
zusammengefasst.

V. PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

In den letzten Jahren ist es immer deutlicher geworden, dass der Mensch mit Rohstoffen haushälterisch umgehen muss, will man nicht die Entwicklungsmöglichkeiten späterer Generationen schwerwiegend beeinträchtigen. Dies gilt nicht nur für existenznotwendige oder strategische Rohstoffe wie Erdöl und Metalle, sondern auch für die einheimischen Rohstoffe.

Die Bedeutung von Kies und Sand hat seit einigen Jahrzehnten in der Schweiz, wie auch in andern europäischen Ländern, ausserordentlich zugenommen. Parallel dazu hat in der Rohstoffgewinnung ein bedeutender Industrialisierungsprozess stattgefunden. Aus früheren kleinen Kieswerken mit lokalem Charakter sind zum Teil hochmechanisierte Industrieunternehmen von überregionaler Bedeutung hervorgegangen. Als typisches Beispiel hierfür kann die Kies- und Sandausbeutung im Rafzerfeld angeführt werden (STAHEL 1973). Kies und Sand nehmen in der schweizerischen Industrie der Steine und Erden – sei es als Betonzuschlagstoffe im Tief- und Hochbau, als Strassenschüttmaterial oder als Zuschlagstoff für die Baustoffindustrie – einen wichtigen Platz ein. Eine nachhaltig ausreichende Versorgung dieser Rohstoffe ist volkswirtschaftlich von grosser Bedeutung.

Die einheimischen Kiesvorkommen sind als Verfrachtungen sehr grosser Schuttmengen aus den Alpen in das schweizerische Mittelland durch Gletscher- und Flusstransport entstanden. Diese ausgedehnten fluvioglazialen Schotterablagerungen bilden bezüglich Menge und Qualität die wichtigsten Rohmaterialvorkommen in unserem Land (DE QUERVAIN 1969). Hauptlieferanten des Rohstoffes Kies sind die aus gut sortiertem, sauberem Kies- und Sandmaterial bestehenden Niederterrassenschotter unserer Haupttäler, wo viele Kiesabbaustellen zu verzeichnen sind, wie z. B. entlang dem Rhein zwischen Basel und Schaffhausen, dem Reusstal oder dem Aaretal zwischen Bern und Waldshut.

Die intensive und grossräumige Nutzung von hochwertigen Kiesvorkommen steht heute und zukünftig immer mehr im Spannungsfeld wichtiger öffentlicher Anliegen:

Grundwasserschutz. Kiesvorkommen sind in vielen Fällen auch wertvolle Grundwasserspeicher. Bewilligungsverfahren werden in diesem Zusammenhang restriktiv gehandhabt und Kiesausbeutungen in Grundwasserschutzzonen untersagt.

Siedlungs- und Erholungsraum. Die oft in der Nähe von grossen Agglomerationen liegenden Schotterter-

rassen werden aufgrund guter Baugrundvoraussetzungen für grössere Siedlungsprojekte, Industrie- und Infrastrukturbauten prioritätsmässig beansprucht.

Natur- und Umweltschutz. Das dichtbesiedelte schweizerische Mittelland ist in bezug auf Natur- und Umweltschutz sensibilisiert. Die Konzentration von Kiesabbaustellen wirft Probleme auf, die in Zukunft neue Abbauprojekte in Frage stellen könnten.

Wald. Der Wald übt eine eminent wichtige Schutzfunktion aus, als Erholungsraum und immerwährende Rohstoffquelle ist seine Bedeutung unermesslich. Deshalb sind Kiesvorkommen unter Wald prinzipiell unantastbar.

Alle diese Begrenzungsfaktoren führen im Endeffekt dazu, dass die im schweizerischen Mittelland vorhandenen guten Kieslager nicht unbegrenzt zugänglich sind und für die weitere Zukunft sogar mit stärker eingeschränkten Nutzungsmöglichkeiten gerechnet werden muss. Dies führt zwangsläufig zu der Frage nach Alternativen und Möglichkeiten, wie die Ausschöpfung hochwertiger Kiesqualitäten durch entsprechende Verlagerung auf bisher wenig beachtete, minderwertigere Rohstoffquellen entlastet werden könnte (vgl. auch JÄCKLI UND SCHINDLER 1986). Diese Problematik ist ebenfalls in einer vom Kanton Genf (RÉPUBLIQUE ET CANTON DE GENÈVE 1984) herausgegebenen Studie ausgezeichnet dargestellt und dokumentiert.

In Regionen, wo keine Schottervorkommen vorliegen, werden zur Deckung des örtlichen Kiesbedarfes Vorkommen abgebaut, die bedeutend heterogener und verlehmt sind als Niederterrassenschotter. Das Spektrum reicht vom verlehmtten Schotter bis zur kiesigen Moräne, wobei heute bereits Vorkommen abgebaut werden, die bis 30 Prozent unbrauchbaren Feinstanteil aufweisen. Mit der Verknappung abbaubarer hochwertiger Schottervorkommen ist vorauszusehen, dass stark verlehmtte Kiesvorkommen an Bedeutung gewinnen werden.

Der bewusste Abbau von verlehmttem Kiesmaterial könnte insofern interessant sein, wenn sich eine technisch und wirtschaftlich vertretbare Verwertung von Kieswaschschlamm anbieten würde.

Dem vorliegenden Forschungsprojekt liegt somit die Zielsetzung zugrunde, durch eine systematische Erforschung der Kiesschlammigenschaften Chancen und Möglichkeiten für eine nutzbare Verwertung des zur Diskussion stehenden Kieswaschabfalles aufzuzeigen.

VI. BESONDERE PROBLEME DER KIESGEWINNUNG AUS VERLEHMTE KIESVORKOMMEN

Die Aufarbeitung stark verlehmt Kiesvorkommen stellt Probleme besonderer Art, die technisch und von den wirtschaftlichen Überlegungen her mit dem stark erhöhten Waschaufwand und der Beseitigung von grösseren Kiesschlammvolumen zusammenhängen (Fig. 1).

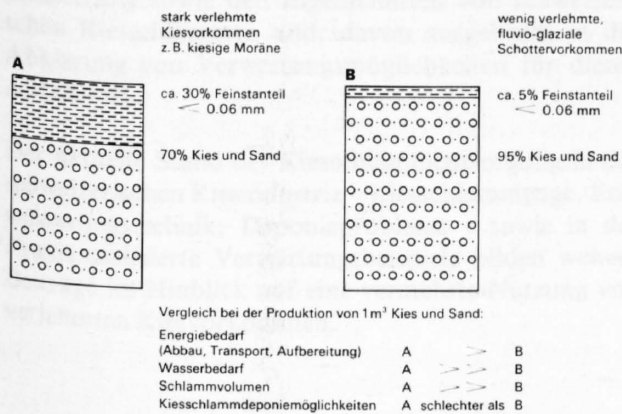


Fig. 1: Kiesgewinnung aus stark verlehmt Kiesvorkommen im Vergleich mit der Kiesgewinnung aus Schottervorkommen.

Anders als bei der Kiesgewinnung aus Schottervorkommen, wo die Kiesschlambeseitigung ohne spezielle Vorkehrungen leicht zu bewältigen ist (Fig. 2, oben), fallen bei stark verlehmt Kiesvorkommen riesige Kiesschlammengen an, deren Entwässerung und Deposition mit grossen Schwierigkeiten verbunden sind (Fig. 2, unten).

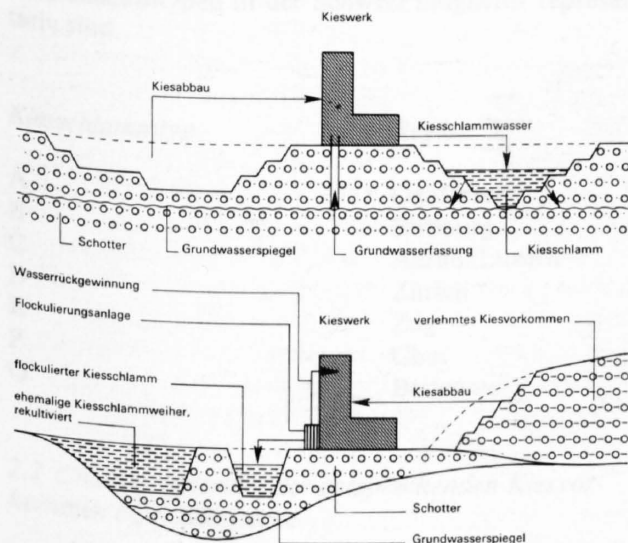


Fig. 2: Prinzipschema einer Kiesgewinnung; oben: Schottervorkommen; unten: verlehmt Kiesvorkommen.

Besonders kritisch werden diese Entsorgungsprobleme, wenn das Rohmaterial aus entfernten Abbaustellen hergeführt werden muss, was eine aufwendige Kiesschlammmentwässerung mit Rücktransport des Abfallstoffes bedingt (Fig. 3).

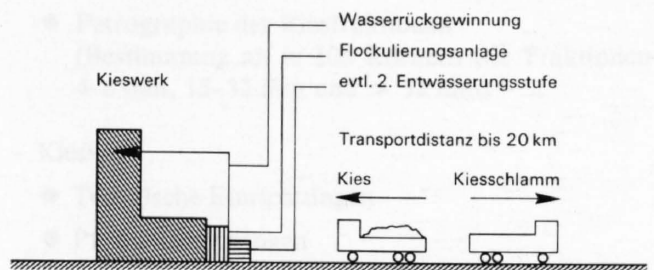


Fig. 3: Kieswerk ohne naheliegenden Deponieraum.

Durch die Kiesschlammmentwässerung – eine wichtige technische Massnahme – wird eine erhebliche Reduktion des Schlammvolumens einerseits und eine Rückgewinnung des Waschwassers andererseits erreicht. Es stellt sich nun das Problem, diesen eingedickten Schlamm, der bisher als nicht verwertbarer Abfall ansteht (Fig. 4), entweder zweckmässig zu deponieren oder technisch zu verwerten.



Fig. 4: Kiesschlamm nach natürlicher Austrocknung im Kiesschlammweiher. Die breiten Trockenrisse deuten auf die hohe Feinheit des Abfallstoffes.

Die Verwertung von stark verlehmt Kiesvorkommen kann unter dem Druck erheblicher Gewinnungs- und Aufbereitungskosten in Frage gestellt sein, sofern für Kiesschlamm zukünftig nicht interessante, wertvolle Verarbeitungs- und Verwendungsmöglichkeiten er-

bracht werden können. Um aber die notwendigerweise auf Wirtschaftlichkeitsüberlegungen abgestützten Verwertungsmöglichkeiten von Kiesschlamm als zukünftige, potentielle Rohstoffquelle beurteilen zu können,

müssen zuerst qualitative Bewertungskriterien für dieses Rohmaterial durch technische Untersuchungen erarbeitet werden.

VII. VORGEHEN UND METHODIK

1. Übersicht

Der Schwerpunkt des vorliegenden Forschungsvorhabens liegt in der systematischen Erfassung der Zusammensetzung sowie den Eigenschaften von schweizerischen Kiesschlammungen und, davon ausgehend, in der Abklärung von Verwertungsmöglichkeiten für diesen Abfallstoff.

Der aktuelle Stand der Kiesschlammungsorgung in der schweizerischen Kiesindustrie – Kiesschlammmenge, Entwässerungstechnik, Deponieprobleme – sowie in der Praxis realisierte Verwertungsbeispiele bilden weitere Beiträge im Hinblick auf eine vermehrte Nutzung von verlehnten Kiesvorkommen.

2. Kiesschlammverwertung

2.1 Auswahl der Kiesschlammtypen

Basierend auf den Erfahrungen einer früheren Arbeit über schweizerische Kiesschlammungen (MUMENTHALER 1979) wurden für die weiteren Untersuchungen 7 Kiesschlammungen ausgewählt, die bezüglich Korngrößenverteilung, chemisch-mineralogische Zusammensetzung und geographische Situation für die verschiedenen Kiesschlammtypen in der Schweiz möglichst repräsentativ sind.

Kiesschlammtyp	Region
A	Genfersee
B	Fribourg
C	Aarau/Luzern
D	Zürich
E	Zug
F	Chur
G	Bodensee

2.2 Charakterisierung der entsprechenden Kiesvorkommen bzw. Kieswerke

Sowohl das Ausgangsmaterial (Rohmaterialvorkommen) der 7 ausgewählten Kiesschlammtypen als auch das dazugehörige Kieswerk wurden näher definiert.

– Ausgangsmaterial (Rohmaterialvorkommen, Probenentnahme : ca. 100 kg)

- Geologie
- Kornverteilung und Feinstanteilgehalt ($< 0,063$ mm)
- Petrographie der Kiesfraktionen (Bestimmung an je 100 Körnern der Fraktionen 4–8 mm, 15–32 mm und > 32 mm)

– Kieswerk

- Technische Einrichtungen
- Produktionsmengen
- Kiesschlammbehandlung und -beseitigung

2.3 Untersuchungen an Feinstfraktionen

Untersucht wurden:

- die im Kieswerk anfallenden Kiesschlammungen
- die im Labor gewonnenen Feinstfraktionen $< 0,063$ mm aus den Rohmaterialien
- die aus den Kiesschlammungen gewonnenen Fraktionen $< 0,002$ mm («Tonfraktionen»).

Probeentnahme und -aufbereitung

Die Probeentnahme der Kiesschlammungen erfolgte in der Regel nach der Flockulierungsanlage. In Kieswerken, die keine Flockulierungsanlagen haben, wurde der Kiesschlamm entweder aus dem Kiesschlammweiher oder beim Kiesschlammereinlauf im Schlammweiher entnommen. Anschliessend wurden diese Proben bei 105°C getrocknet und in einer Prallmühle dispergiert. Aus einem Teil der Probe wurde zusätzlich noch die Fraktion $< 0,002$ mm («Tonfraktion») durch Sedimentation gewonnen.

Die Feinstfraktionen $< 0,063$ mm wurden bei der Nassaufbereitung der Rohmaterialien im Labor gewonnen und gleich wie die Kiesschlammungen aufbereitet (Trocknung und Dispergierung).

Untersuchungsmethoden

Die Korngrössenanalyse erfolgte nach dem Prinzip von

Andreasen unter Verwendung einer Doppelpipette (Sedimentationsanalyse). Bestimmt wurden dabei die Kornfraktionen $< 0,002$ mm («Tonfraktion»), $0,002-0,020$ mm («Schlufffraktion») und $> 0,020$ mm («Sandfraktion»).

Die chemischen Totalanalysen wurden mit der Röntgenfluoreszenz-Methode durchgeführt.

Die quantitative, mineralogische Zusammensetzung der Proben wurde röntgenographisch und chemisch bestimmt:

- Quarz wurde nach der Methode von TALVITIE (1951) mit 83% Phosphorsäure bestimmt, indem die Begleitminerale in Lösung gebracht werden.
- Bestimmung der Karbonate Calcit und Dolomit: Ca^{++} und Mg^{++} komplexometrisch, CO_2 gravimetrisch.
- Bestimmung der Feldspäte Albit und K-Feldspat : Röntgenanalyse mit einem Philips-Diffraktometer ($\text{CuK}\alpha$ -Strahlung), drehendes disorientiertes Präparat mit LiF als interner Standard.
- Bestimmung der Tonminerale Illit, Chlorit, Montmorillonit und Kaolinit an dekarbonatisierten Tonfraktionen : Röntgenanalyse mit einem Philips-Diffraktometer ($\text{CuK}\alpha$ -Strahlung), orientiertes Präparat mit Äthylen-Glykol behandelt. Auf Grund ihrer Basisreflexintensitäten können die relativen Mengenverhältnisse der Tonminerale bestimmt und die Gehalte der einzelnen Tonminerale in den verschiedenen Fraktionen berechnet werden (semiquantitative Werte).

Die Differential-Thermo-Analyse (DTA) wurde mit einer Netsch-Apparatur an 0,7 g Substanz durchgeführt. Platin-Rhodium-Thermoelemente, normale Atmosphäre, Aufheizgeschwindigkeit: $10^\circ\text{C}/\text{Min}$.

Die äussere Oberfläche (BET) wurde nach der Stickstoffabsorptionsmethode von Brunauer, Emmet und Teller (BET) bestimmt.

Die Bestimmung der Totaloberfläche (innere und äussere Oberfläche) erfolgte nach der Glyzerin-Methode, indem das von den Proben bei 150°C als Einsicht-Komplex absorbierte Glyzerin bestimmt wurde, welches proportional zur totalen Oberfläche ist (MADSEN 1976).

Die Ionenaustauschkapazität (Kationen) wurde nach bodenkundlichen Gesichtspunkten, ohne Zerstörung der Karbonate, gepuffert auf pH von 8,5, durchgeführt. Sie erfolgte durch sehr langsame Perkolation mit einer BaCl_2 -Lösung und Bestimmung von Na^+ , K^+ , Ca^{2+} und Mg^{2+} im Filtrat, die Summe ausgedrückt in m Val pro 100 g Trockensubstanz.

2.4 Verwertungsstudien

Basis der Verwertungsstudien bildet eine möglichst lückenlose Literaturübersicht in den Gebieten der technischen Geologie und Mineralogie, der Geotechnik, der Silikatechnik und Verfahrenstechnik.

2.4.1 Laborversuche

Dem Verwertungsprojekt entsprechend wurden einzelne, punktuelle Laborversuche bis ausgedehnte Laborversuchsreihen mit den 7 Kiesschlammtypen durchgeführt:

- einzelne Laborversuche mit kleinen Rohmaterialmengen von 1–5 kg pro Kiesschlamm
 - Anwendung für Keramik- und Glasmaterialien
- Laborversuchsreihen mit kleinen Rohmaterialmengen von 1–5 kg pro Kiesschlamm
 - Anwendung für Keramik- und Glasmaterialien
 - Anwendung für die Grobkeramik (Ziegeleibaustoffe)
- Versuchsreihen mit Pilotanlagen im Labormassstab (Rohmaterialmenge 50–100 kg pro Kiesschlammtyp)
 - Anwendung für hydraulisch sowie hydrothermal gehärtete Baustoffe
 - Anwendung für die Grobkeramik.

2.4.2 Fabrikationsversuche im Werk

Diese sehr aufwendigen, praxiskonformen Fabrikationsversuche fanden in den Werken der Zürcher Ziegeleien statt. Eingesetzt wurden dabei die zwei Kiesschlammtypen D und G mit Rohmaterialmengen von über 100 m^3 pro Sorte.

2.4.3 Granulometrische, chemisch-mineralogische Untersuchungen der Ausgangsstoffe und Zwischenprodukte

Bei jeder Verwertungsstudie wurde versucht, die granulometrische sowie chemisch-mineralogische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe, Rohmaterialmischungen und Zwischenprodukte möglichst lückenlos zu erfassen. Dabei wurden vor allem die Methoden eingesetzt, die unter Ziff. 2.3 beschrieben sind. Weitere, spezifische Untersuchungsmethoden werden jeweils bei den einzelnen Verwertungsstudien beschrieben.

2.4.4 Chemisch-physikalische Untersuchungen der Endprodukte

Zur Beurteilung der Endprodukte aus den Verwertungsversuchen wurden chemisch-physikalische Prü-

ungen durchgeführt, wenn möglich nach schweizerischen Normen (SIA, SNV). Die einzelnen Prüfmethoden sind bei den Verwertungsstudien beschrieben.

3. Abklärungen im Zusammenhang mit der Entwässerung und Entsorgung von Kiesschlamm

3.1 Umfrage beim Fachverband für Sand und Kies (FSK)

Durch eine per Ende 1983 durchgeführte Umfrage bei den Mitgliedern des Fachverbandes für Sand und Kies (FSK) wurde versucht, die Situation bezüglich Kiesschlammmentwässerung und -beseitigung in der schweizerischen Kiesindustrie zu erfassen. Ausgewertet wurden die Angaben von 94 Kieswerken mit einer Gesamtproduktion von 12 Mio. m³ Kies und Sand, was etwa die Hälfte des gesamten Materialausstosses innerhalb des Verbandes darstellt.

3.2 Laboruntersuchungen

Mit 8 Kiesschlammtypen wurden Sedimentationsversuche in Masszylindern durchgeführt. Bestimmt wurden dabei die Sedimentationsgeschwindigkeit, das Sedimentvolumen sowie das Raumgewicht des sedimentierten Kiesschlammes.

3.3 Geotechnische Untersuchungen an einem Kiesschlammweiher

Die Stabilitätsprobleme bei der Auffüllung und Rekultivierung von sogenannten Kiesschlammweihern wurde an einem Beispiel der Region Zürich vom Institut für

Grundbau und Bodenmechanik (IGB) der ETH Zürich untersucht. Die Studie wurde im Auftrag einer Kiesunternehmung durchgeführt, die Ergebnisse davon konnten aber auf sinnvolle Weise im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes benutzt werden.

Untersucht wurden dabei:

- die hydrogeologischen Verhältnisse des Ablagerungsraumes
- die geotechnischen Parameter des Kiesschlammes
- das zeitliche und räumliche Vorgehen der Kiesschlamm auffüllung (Höhenmessung der Kiesschlammoberfläche, granulometrische Verteilung des Kiesschlammes)
- Zustand des Kiesschlammes in Funktion der Lagerungszeit und des Lagerungsdruckes (Porenwasserdruckmessungen mittels Piezometer, Bestimmung der Lagerungsdichte und des Wassergehaltes)
- Setzung der Kiesschlammoberfläche nach Ende der Kiesschlammzufuhr

Aus diesen Untersuchungen erfolgte dann eine Prognose der zu erwartenden Setzungen sowie der Stabilitätsverhältnisse im Auffüllgebiet im Hinblick auf die zukünftige Rekultivierung.

3.4 Stand der Technik bei der mechanischen Entwässerung von Kiesschlamm

Beschreibung und Vergleich der wichtigsten Schlamm-entwässerungsverfahren. Dabei konnte vor allem auf die verfahrenstechnische Erfahrung der Firmen U. Amman, Maschinenfabrik AG in Langenthal BE, und Sulzer-Escher Wyss AG in Zürich zurückgegriffen werden.

VIII. KIESSCHLAMM ALS POTENTIELLER ROHSTOFF

1. Zusammensetzung und Eigenschaften von Kiesschlämmen

Kiesschlämme entstehen beim Waschvorgang von quartären Ablagerungen (Schotter, Moränen), die zur Gewinnung von Kies und Sand abgebaut und in Kieswerken aufbereitet werden. Ihre mineralogische Zusammensetzung entspricht weitgehend derjenigen der

Feinstfraktionen aus den gewonnenen Rohmaterialien, die ihrerseits von den regionalen quartärgeologischen Gegebenheiten abhängig ist. Von Bedeutung dabei sind sowohl die Materialzufuhr aus relativ weit entfernten voralpinen und alpinen Einheiten, den grossen Vergletscherungsgebieten entsprechend (Rhône, Aare, Reuss, Linth, Rhein), als auch die starken Einflüsse aus dem Ablagerungsgebiet selbst (Aufarbeitung von Molasse-sedimenten aus dem Untergrund durch Gletscher). Lokale Vergletscherungen, z.B. aus dem Jura oder

Tabelle 1: Verzeichnis der untersuchten Kiesschlammtypen, Kieswerke und Kiesvorkommen

Kiesschlamm-Typ Region	Unternehmung Kieswerk	Koordinaten Kieswerk	Kiesvorkommen	Koordinaten Kiesvorkommen
A Region Genfersee	Giobellina J. SA 1023 Crissier (VD) Kieswerk Crissier	533.340/155.280	Montricher (VD)	519.500/160.950
B Region Fribourg	Sables et Gravieres Tuffière Losinger SA 1701 Fribourg (FR) Kieswerk Tuffière (FR)	573.425/177.750	Tuffière bei Corpataux (FR)	573.625/177.675
C Region Luzern-Aarau	S. Müller AG, Betonwerke 6211 Rickenbach (LU) Kieswerk Rickenbach	652.775/233.000	Buttenberg bei Rickenbach (LU)	653.125/230.325
			Kulmerau (LU)	649.875/234.400
D Region Zürich	Hard AG 8604 Volketswil (ZH) Kieswerk Volketswil	694.850/248.700	Bietenholz bei Effretikon (ZH)	694.325/252.250
E Region Zug	Sand AG Neuheim 6345 Neuheim (ZG) Kieswerk Neuheim	686.900/228.950	Neuheim (ZG)	687.375/228.675
F Region Chur	Kieswerk Calanda AG 7000 Chur (GR) Kieswerk Reichenau (GR)	750.800/187.750	Reichenau (GR)	750.925/187.625
G Region Bodensee	A. Gerschwiler + Co. AG 9403 Goldach (SG) Kieswerk Goldach	752.825/261.200	Räuchlisberg bei Amriswil (TG)	740.375/266.325

Tabelle 2: Geologie und Petrographie

Kiesvorkommen	Geologie	Petrographie	Geotechnische Klassifikation USCS
Montricher (VD)	postglaziale Schotter am Jurafuss	vorwiegend helle Jurakalke, untergeordnet alpine und voralpine Elemente (Rhonegletscher)	saubere Kiese mit Sand GW
Tuffière bei Corpataux (FR)	interglaziale Schotter (Riss-Würm?)	vorwiegend voralpine Kalke und Sandsteine	saubere bis siltige Kiese mit Sand GW-GM
Buttenberg bei Rickenbach (LU) Kulmerau (LU)	fluvio-glaziale Schotter der letzten Vergletscherung (Würm)	vorwiegend voralpine Kalke und Sandsteine, z. T. sekundär verkittete Kiesnagelfluh	saubere bis leicht siltige Kiese mit Sand GW
Bietenholz bei Effretikon (ZH)	vom Gletscher überfahrene würmeiszeitliche Schotter, z. T. mit Moränenfacies	vorwiegend voralpine Gesteine, wenig kristalline Gesteine	tonige bis siltige Kiese mit Sand GM-GC
Neuheim (ZG)	Moräne und fluvio-glaziale Schotter der letzten Vergletscherung (Würm)	voralpine Gesteine	GM-GC bis GW
Reichenau (GR)	Flutablagerung im Zusammenhang mit dem Bergsturz Ilanz-Flims-Domleschg	vorwiegend kristalline Gesteine, untergeordnet voralpine Sandsteine und Kalke	siltige Kiese mit Sand GM
Räuchlisberg bei Amriswil (TG)	Hochterrassenschotter (Riss?)	vorwiegend voralpine Kalke und Sandsteine, wenig kristalline Gesteine	saubere Kiese mit Sand GW

Schwarzwald, spielen diesbezüglich nur am Rande der grossen Vergletscherungsgebiete eine gewisse Rolle.

Untersuchungen an Kiesschlammten aus dem schweizerischen Mittelland haben eine regionbedingte Systematik in der mineralogischen Zusammensetzung aufgezeigt (MUMENTHALER 1979). Bezeichnend ist dabei, dass der Gehalt an Dolomit, Kaolinit und Montmorillonit von der West- nach der Ostschweiz allgemein zunimmt, eine Tendenz, die ebenfalls bei den Molasse-sedimenten zu erkennen ist.

Die Kiesschlammzusammensetzung ist auch noch von der granulometrischen Trenngrenze abhängig, die beim Waschprozess im Kieswerk zwischen dem noch sauber zu gewinnenden Feinsand und dem unbrauchbaren Kiesschlamm erreicht wird. Entscheidend dabei ist die Wirksamkeit der Feinsandrückgewinnungsanlage. Diese Trenngrenze liegt in modernen Kiesaufbereitungsanlagen heute bei etwa 0,05–0,06 mm. Jede Verschiebung

der Trenngrenze nach höheren Korngrössen hat eine Veränderung der Kiesschlammzusammensetzung zur Folge, wobei insbesondere Quarz, Feldspäte und Karbonate auf Kosten der Tonmineralien zunehmen.

1.1 Charakterisierung der untersuchten Kiesschlamm-typen mit den entsprechenden Kiesvorkommen und Kieswerken

1.1.1 Kiesvorkommen

Die wichtigsten Daten der untersuchten Kiesvorkommen sind in den Tabellen 2 und 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Abbautechnische Daten

Kiesvorkommen	Abbaustelle	Transportdistanz Abbaustelle – Kieswerk	Abbaubegrenzungs- faktoren	Auffüllung und Rekultivierung
Montricher (VD)	gross Abbauwand ca. 5–7 m hoch	ca. 16 km	Grundwasserschutz	z. T. mit Kiesschlamm Rekultivierung auf tiefere Ebene
Tuffière bei Corpataux (FR)	sehr gross Abbauwand ca. 40–50 m hoch	ca. 0,2 km	Grundwasserschutz	Abtragung von einem Schotterhügel → wenig Deponie- raum Rekultivierung auf tiefere Ebene
Buttenberg bei Rickenbach (LU)	gross Abbauwand ca. 30 m hoch	ca. 3 km	Wald	Rekultivierung auf tiefere Ebene
Kulmerau (LU)	mittelgross Abbauwand ca. 20 m hoch	ca. 4 km	Wald	Rekultivierung auf tiefere Ebene
Bietenholz bei Effretikon (ZH)	sehr gross Abbauwand ca. 40 m hoch	ca. 5 km	Siedlungen	Auffüllung mit Aushubmaterial Rekultivierung auf die ursprüngliche Ebene
Neuheim (ZG)	sehr gross Abbauwand ca. 40 m hoch	ca. 0,5 km	Landschaftsschutz	Auffüllung mit Kiesschlamm Rekultivierung bis ± ursprüngliche Topographie
Reichenau (GR)	sehr gross Abbauwand ca. 40 m hoch	ca. 0,2 km	Wald	Auffüllung z. T. mit Kiesschlamm
Räuchlisberg bei Amriswil (TG)	mittelgross Abbauwand ca. 15–20 m hoch	ca. 18 km	Wald	Rekultivierung auf tiefere Ebene

1.1.1.1 Kornverteilung und Feinstanteilgehalt der Rohmaterialien

Von jedem Kiesvorkommen wurde eine repräsentative Probe von ca. 100 kg entnommen. Diese Proben wurden im Labor nass aufbereitet und dabei die Kornverteilung (Tabelle 4) bestimmt. Weiter erfolgte eine Abtrennung des Feinstanteiles < 0,063 mm. Diese Feinstfraktion wurde getrocknet, gewogen und zur weiteren Bearbeitung aufbewahrt.

Vom Feinstanteil her können die Rohmaterialien in 3 Gruppen unterteilt werden:

- wenig verlehnte Rohmaterialien
Feinstanteil < 5%
< 0,063 mm
Montricher VD
Kulmerau LU
Buttenberg LU
Räuchlisberg TG
- mittelmässig verlehnte Rohmaterialien
Feinstanteil 5–10%
< 0,063 mm
Reichenau GR
Tuffière FR
- stark verlehnte Rohmaterialien
Feinstanteil > 10%
< 0,063 mm
Bietenholz ZH
Neuheim (ZG)

Tabelle 4: Kornverteilung der Rohmaterialproben. Siebrückstände in Gew. %

Sieb	mit runden Löchern														mit Maschen					Feinst- anteil < 0,063 mm
	Rundlochweite in mm														Maschenweite in mm					
Probe	31,5	25	20	18	15	12	10	8	6	4	3	2	1	0,5	0,3	0,2	0,12	0,063	Gew.-%	
Grube Montricher (VD) J. Giobellina SA Crissier (VD)	24,9	6,5	5,9	2,3	4,4	5,2	3,6	4,0	4,9	5,9	4,0	5,0	7,3	5,2	3,6	1,4	1,2	0,9	3,8	
Grube Truffière Losinger SA (FR)	25,6	8,7	7,4	3,1	6,6	5,8	4,0	4,0	4,6	5,0	3,0	3,4	4,5	3,0	2,1	0,9	0,7	0,6	7,0	
Grube Kulmerau S. Müller AG Rickenbach (LU)	16,9	5,2	4,8	2,9	7,6	7,6	6,3	6,5	8,1	9,9	5,4	5,2	4,4	1,2	0,8	0,5	0,4	0,6	5,7	
Grube Buttenberg S. Müller AG Rickenbach (LU)	24,2	5,9	6,5	2,1	6,3	4,9	3,9	4,1	5,1	6,4	4,4	5,6	7,5	3,2	2,0	1,1	1,2	1,2	4,4	
Grube Bietenholz Hard AG, Volketswil (ZH) P-1980-49	16,9	5,3	3,7	1,9	2,8	3,1	1,9	2,2	2,6	3,0	2,2	2,3	3,8	2,9	3,7	3,2	5,4	10,5	22,6	
Grube Neuheim Sand AG, Neuheim (ZG) P-1980-51	11,6	6,5	4,8	1,7	4,9	5,2	4,0	4,1	5,6	6,7	4,4	5,0	6,5	3,7	3,1	1,9	3,0	3,1	14,2	
Grube Reichenau Calanda AG, Chur (GR) P-1980-58	22,4	4,5	3,4	1,6	2,9	3,0	2,3	2,4	3,5	5,3	4,2	6,0	9,1	6,6	4,5	2,0	2,3	5,4	8,6	
Grube Räuchlisberg (TG) A. Gerschwiler + Co. AG Goldach (SG), P-1980-53	15,6	8,0	7,4	3,2	8,0	6,9	5,2	5,2	5,4	5,0	2,5	2,3	2,3	1,6	1,4	7,3	5,7	3,5	3,5	

1.1.1.2 Petrographie der Kiesfraktionen

Die Bestimmung der Petrographie erfolgte an je 100 Körnern der 3 Kiesfraktionen > 31,5 mm, 15–31,5 mm und 4–8 mm. Die Ergebnisse davon sind in Tabelle 5 ersichtlich. Je nach Lage des Rohmaterialvorkommens können charakteristische petrographische Zusammensetzungen beobachtet werden. So ist das Rohmaterial von Montricher VD am Jurarand vorwiegend aus Jura-Kalkmaterial, dasjenige von Reichenau GR vorwiegend aus alpinen Gesteinen und diejenigen von Neuheim ZG und Tuffière FR aus voralpinen Gesteinen zusammengesetzt.

1.1.2 Kieswerke

Die wichtigsten Merkmale der untersuchten Kieswerke sind in der Tabelle 6 zusammengefasst.

1.1.3 Kiesschlämme

Der Kiesschlammanfall ist je nach Werk, in Funktion der Produktionsmenge und des Verlehmungsgrades des Rohmaterials stark verschieden (vgl. Tabelle 7). Im allgemeinen wird das Kiesschlammwasser durch Flocku-

Tabelle 5: Petrographie der Kiesfraktion (\varnothing der Fraktionen > 31,5 mm, 15–31,5 mm und 4–8 mm)

Petrographie	Vorkommen	Mon-tricher (VD)	Tuf-fièrè (FR)	Butten-berg (LU)	Kul-merau (LU)	Bieten-holz (ZH)	Neu-heim (ZG)	Rei-chenau (GR)	Räuch-lisberg (TG)
Dunkelgraue, feinkörnige Kiesel- und Sandkalke (vorwiegend aus den Voralpen und Alpen). Sehr fest und kompakt, hart.		6	47	66	51	40	57	16	67
Graue, rostbräunliche, meist feinkörnige und quarzreiche alpine Sandsteine. Sehr fest und kompakt, hart.		2	30	25	25	26	19	10	15
Verschiedene, kristalline Gesteine (Granite, Gneisse, Quarzite, Grünsteine usw.), daneben auch Quarz und Hornsteine aus Adern und Knauern. Fest und kompakt, jedoch etwas spröde, sehr hart.		6	0	3	17	9	0	71	3
Kalksteine von jurassischen Typen (vorwiegend beige bis hellbraun) und alpinen Typen (vorwiegend hell- bis dunkelgrau). Fest und kompakt, mittelhart.		83	22	4	2	24	18	2	6
Weiche und poröse, angewitterte Körner (Molassesandsteine, angewitterte Gesteine, schwach verfestigte Nagelfluhanteile, Schiefer).		3	1	2	5	1	6	1	9
Total Anteil an harten Gesteinskörnern		14	77	94	93	75	76	97	85
mittelharten Körnern		83	22	4	2	24	18	2	6
weichen Körnern		3	1	2	5	1	6	1	9

lierung eingedickt. Die Entsorgung des Kiesschlammes bereitet bei allen untersuchten Kieswerken entweder hohe Transportkosten oder Schwierigkeiten im Zusammenhang mit dem oft knappen Deponieraum. In einigen Fällen wird zur weiteren Reduzierung des Schlammvolumens sogar eine 2. Entwässerungsstufe in Betracht gezogen. In keinem Kieswerk erfolgt eine regelmässige Verwertung des anfallenden Kiesschlammes, obwohl bereits Verwertungsversuche – besonders im Ziegeleisektor – durchgeführt worden sind. Nicht zu vernachlässigen ist jedoch die positive Auswirkung dieses Abfallstoffes bei der Auffüllung, Gestaltung und Rekultivierung der Kiesgruben.

1.2 Zusammensetzung und Eigenschaften der Feinstfraktionen

Die im Kieswerk anfallenden Kiesschlämme (Durchschnittsproben und Tonfraktionen < 0,002 mm) sowie die im Labor gewonnenen Feinstfraktionen < 0,063 mm aus den Rohmaterialien wurden eingehend untersucht.

Tabelle 6: Kieswerke: Technische Einrichtungen, Produktionsmengen und Produkte

Kieswerk	Aufbereitungsanlagen	Produktionsmenge	Produkte	Absatzgebiet
Crissier (VD)	Brechanlage in der Grube Rohmaterialtransport (Lastwagen): 16 km Wasch- und Sortieranlage relativ klein, modern	ca. 70 000 m ³	Kies und Sand Frischbeton	Lausanne und Umgebung
Tuffière (FR)	Aufbereitungsanlage mittelgross, modern im Grubenareal Sandrückgewinnungsanlage	ca. 150 000 m ³	Kies und Sand Frischbeton	Fribourg und Umgebung
Rickenbach (LU)	Aufbereitungsanlage mittelgross, modern Rohmaterialtransport (Lastwagen): 5 km Sandrückgewinnungsanlage	ca. 80 000 m ³	Kies und Sand Frischbeton Betonprodukte	Reinach-Menziken Sursee
Volketswil (ZH)	Grosse Vorwaschanlage Aufbereitungsanlage gross, modern Rohmaterialtransport (Lastwagen): 5 km Sandrückgewinnungsanlage	ca. 250 000 m ³	Kies und Sand Frischbeton Frischbelag Betonprodukte Kalksandsteine	Zürich-Winterthur und Umgebung
Neuheim (ZG)	Aufbereitungsanlage sehr gross, modern am Grubenrand Sandrückgewinnungsanlage	ca. 400 000 m ³	Kies und Sand Frischbeton	Zug und Umgebung
Reichenau (GR)	Aufbereitungsanlage mittelgross, modern am Grubenrand Sandrückgewinnungsanlage	ca. 100 000 m ³	Kies und Sand Frischbeton Frischbelag	Chur und Umgebung
Goldach (SG)	Aufbereitungsanlage gross, relativ alt Rohmaterialtransport (Lastwagen): 18 km Sandrückgewinnungsanlage	ca. 100 000 m ³	Kies und Sand Frischbeton	Arbon-Rorschach St. Gallen

1.2.1 Korngrössenverteilung

Aus der Tabelle 8 ist ersichtlich, dass die Kornverteilung der Kiesschlämme in erster Linie von der Kornverteilung der Feinstfraktion im Rohmaterial abhängig ist. Der Wirkungsgrad der Feinsand-Rückgewinnungsanlage, bemessen am Anteil der Fraktion $> 0,063$ mm in den Kiesschlämmen, ist bei fast allen Kieswerken ziemlich gut. Besonders hoch liegt dieser Wirkungsgrad

beim Kieswerk B, bedingt zum Teil durch die effiziente, moderne Rückgewinnungsanlage, zum Teil aber auch durch die Tatsache, dass der Rohstoff im kritischen Trennbereich von 0,06 bis 0,2 mm nur wenig Material enthält (vgl. Tabelle 4). Gerade umgekehrt sind die Verhältnisse bei den Kieswerken D, F und G, bei welchen das Rohmaterial einen grossen Anteil der Fraktion 0,06 bis 0,2 mm enthält, der die Feinsand-Rückgewinnungsanlage überlastet und deren Wirkungsgrad herunterdrückt.

Tabelle 7: Kiesschlammmentwässerung und -entsorgung

Kieswerk	Kiesschlamm				Kies- schlamm- Typ
	Menge in t Trockensubstanz pro Jahr	Entwässerung	Transport	Deponie	
Crissier (VD)	ca. 6000 t	Flockulierung ca. 50% Feststoff	Spezial- lastwagen (18 km)	Grube Montricher (VD)	A
Tuffière (FR)	20–25 000 t	Flockulierung ca. 50% Feststoff	Leitung	Grubenareal (Schlammweiher) knapper Deponieraum	B
Rickenbach (LU)	ca. 10 000 t	Flockulierung Absetzbecken 2. Entwässerungs- stufe geplant	Lastwagen	in verschiedenen Gruben	C
Volketswil (ZH)	ca. 100 000 t	Keine	Leitung ca. 1 km	Grubenareal (Schlammweiher) knapper Deponieraum	D
Neuheim (ZG)	ca. 100–150 000 t	Flockulierung	Leitung ca. 0,3 km	Grubenareal (Schlammweiher) knapper Deponieraum	E
Reichenau (GR)	ca. 20 000 t	Flockulierung	Leitung ca. 0,1 km	Grubenareal (Schlammweiher) eher knapper Deponieraum	F
Goldach (SG)	ca. 10 000 t	Keine	Leitung ca. 0,2 km	Grubenareal (Schlammweiher) knapper Deponieraum	G

Tabelle 8: Korngrößenverteilung der Kiesschlämme (a) und der Rohmaterialfeinstfraktionen < 0,063 mm (b)

Kieswerk Region Probe	A Genfersee		B Fribourg		C Aarau/Luzern		D Zürich		E Zug		F Chur		G Bodensee	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
	Granulometrie (Gew. %)													
Fraktion < 0,002 mm	32,3	36,7	45,1	58,7	28,9	40,1	10,2	26,0	35,6	35,6	10,6	9,2	20,0	17,4
0,002–0,020 mm	48,0	51,1	41,8	34,2	50,3	45,6	50,3	46,2	40,1	42,4	51,4	56,8	33,3	47,9
0,020–0,063 mm	10,6	12,2	12,6	7,1	17,3	14,3	23,7	27,8	17,2	22,0	29,3	34,0	28,7	34,7
0,063–0,200 mm	9,1	–	0,5	–	3,5	–	14,2	–	6,9	–	8,5	–	18,0	–
> 0,200 mm	0	–	0	–	0	–	1,6	–	0,2	–	0,2	–	0	–

Tabelle 9: Chemische Zusammensetzung der Kiesschlämme (Durchschnittsprobe und Fraktion < 0,002 mm) und der Rohmaterialfeinstfraktion < 0,063 mm

Kieswerk Region	A Genfersee	B Fribourg	C Aarau/Luzern	D Zürich	E Zug	F Chur	G Bodensee
Kiesschlamm Durchschnittsprobe							
Glühverlust	29,92	24,79	7,37	21,81	22,08	13,29	25,46
SiO ₂	23,17	32,08	47,35	43,61	36,36	49,54	33,91
Al ₂ O ₃	6,87	7,98	12,60	4,13	9,12	12,08	6,86
Fe ₂ O ₃	2,65	2,85	5,03	1,47	3,43	5,07	2,84
TiO ₂	0,33	0,33	0,56	0,26	0,42	0,50	0,31
CaO	33,37	27,78	21,00	24,02	23,32	12,85	21,95
MgO	1,59	2,11	2,17	2,91	2,99	2,97	6,93
MnO	0,06	0,07	0,13	0,06	0,08	0,15	0,09
K ₂ O	1,06	1,52	2,35	0,70	1,74	2,28	1,30
Na ₂ O	0,47	0,48	0,85	0,89	0,59	1,65	0,70
P ₂ O ₅	0,12	0,10	0,15	0,09	0,11	0,13	0,09
Total	99,61	100,09	99,56	99,95	100,24	100,51	100,44
Fraktion < 0,063 mm aus Rohmaterial							
Glühverlust	29,84	23,06	16,11	23,52	21,64	13,36	29,62
SiO ₂	22,62	33,46	42,36	38,96	36,77	45,88	26,40
Al ₂ O ₃	6,86	9,33	13,44	5,12	9,34	13,91	5,76
Fe ₂ O ₃	2,61	3,34	5,38	1,86	3,63	5,93	2,56
TiO ₂	0,32	0,40	0,59	0,28	0,48	0,56	0,29
CaO	34,09	25,74	16,37	26,11	24,10	12,61	26,34
MgO	1,56	2,19	2,62	2,95	2,09	3,21	7,92
MnO	0,06	0,07	0,11	0,06	0,09	0,14	0,11
K ₂ O	1,09	1,82	2,56	0,85	1,67	2,73	0,95
Na ₂ O	0,57	0,36	0,62	0,80	0,53	1,63	0,47
P ₂ O ₅	0,11	0,11	0,12	0,10	0,12	0,13	0,08
Total	99,73	99,88	100,28	100,61	100,46	100,09	100,50
Fraktion < 0,002 mm («Tonfraktion») aus Kiesschlamm							
Glühverlust	27,36	21,21	15,73	27,44	17,15	14,50	16,26
SiO ₂	23,25	33,26	38,71	23,97	37,63	34,79	39,96
Al ₂ O ₃	12,12	12,81	16,81	8,98	16,10	19,33	16,02
Fe ₂ O ₃	4,94	4,44	7,57	3,92	6,02	10,33	7,53
TiO ₂	0,41	0,44	0,65	0,30	0,51	0,81	0,54
CaO	27,81	22,43	14,56	30,73	16,07	11,87	13,47
MgO	1,87	2,40	2,59	2,42	2,62	2,93	3,20
MnO	0,10	0,06	0,12	0,10	0,08	0,39	0,15
K ₂ O	1,72	2,61	3,07	1,62	3,19	3,91	2,63
Na ₂ O	0,15	0,19	0,38	0,28	0,35	1,15	0,40
P ₂ O ₅	0,20	0,12	0,16	0,11	0,12	0,09	0,17
Total	99,93	99,97	100,35	99,87	99,84	100,10	100,33

1.2.2 Chemische Zusammensetzung (Tabelle 9)

Im allgemeinen kann eine gute Übereinstimmung zwischen der chemischen Zusammensetzung der Kiesschlämme und den Fraktionen < 0.063 mm aus den Rohmaterialien festgestellt werden, wobei diese Korrelation bei den gröberen Kiesschlämmen der Kieswerke D und G deutlich schlechter ist. Hauptbestandteile sind SiO₂ und CaO, das Mol.-Verhältnis SiO₂/CaO liegt

zwischen 0,64 (Kieswerk A) und 3,73 (Kieswerk F). Bei den CaO-ärmeren Proben liegt ein nicht unbedeutender Anteil an Al₂O₃ und Alkalien vor. Der MgO-Gehalt ist in allen Proben relativ tief, ausser beim Kieswerk G.

Im Vergleich zu den Kiesschlämmen zeigen die «Tonfraktionen» < 0,002 mm allgemein tiefere CaO- und Na₂O-Gehalte sowie höhere Al₂O₃-, Fe₂O₃- und K₂O-Gehalte.

Tabelle 10: Mineralogische Zusammensetzung

Mineralien in Gew.-%		Calcit	Dolomit	Quarz	Albit	K-Feldspat	Tonminerale			
							Illit	Chlorit	Montmorillonit	Kaolinit
Kiesschlamm Durchschnittsprobe										
A	Genfersee	56,8	2,4	11,3	3	2	13	4	1	2
B	Fribourg	47,0	4,4	16,3	3	2	17	4	1	-
C	Aarau-Luzern	27,7	3,9	21,1	8	3	20	4	4	-
D	Zürich	37,9	8,3	33,9	9	4	4	2	< 1	-
E	Zug	38,4	6,4	18,4	5	2	18	4	1	2
F	Chur	20,0	6,1	26,3	14	3	10	2	-	-
G	Bodensee	28,6	21,9	21,1	6	6	10	2	3	1
Fraktion < 0,063 mm aus Rohmaterial							Total Tonminerale:			
A	Genfersee	59,0	2,2	10,7	3	-	ca. 20%			
B	Fribourg	42,7	3,1	15,4	3	-	ca. 30%			
C	Aarau-Luzern	26,3	2,6	16,9	4	3	ca. 40%			
D	Zürich	40,9	8,1	28,3	7	2	ca. 10%			
E	Zug	43,5	3,3	20,7	6	-	ca. 25%			
F	Chur	21,4	3,5	24,5	15	3	ca. 10%			
G	Bodensee	39,2	25,2	14,9	5	1	ca. 15%			
Fraktion < 0,002 mm aus Kiesschlamm										
A	Genfersee	44,9	2,2	2,8	-	-	33	8	3	6
B	Fribourg	33,2	3,7	9,0	1	-	42	9	3	-
C	Aarau-Luzern	22,8	1,8	7,7	1	-	50	8	9	-
D	Zürich	50,9	3,3	7,2	2	-	21	12	3	-
E	Zug	26,6	1,5	8,8	1	-	43	11	3	5
F	Chur	17,8	3,1	3,9	3	1	57	14	-	-
G	Bodensee	21,3	2,8	9,4	1	-	38	8	13	6

Tabelle 11: Mineralogische Zusammensetzung – Vergleich Probeentnahme 1977–1980

Kiesschlammtyp	A		B		C		D		E		F		G	
Probeentnahme 1 = 1977 2 = 1980	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Zusammensetzung														
in Gew. %														
Quarz	10,7	11,3	23,3	16,3	22,4	21,1	32,5	33,9	24,6	18,4	27,3	26,3	17,1	21,1
Calcit	50,9	56,8	43,6	47,0	35,5	27,7	32,5	37,9	35,5	38,4	21,3	20,0	27,1	28,6
Dolomit	1,7	2,4	2,0	4,4	2,2	3,9	9,0	8,3	7,3	6,4	3,7	6,1	28,7	21,9
Tonminerale	30	20	21	22	25	28	10	7	15	25	19	12	16	16

1.2.3 Mineralogische Zusammensetzung

Die Kiesschlämme, wie auch die Fraktionen < 0,06 mm aus den Rohmaterialien enthalten Calcit, Tonmineralien, Quarz und Feldspäte in stark wechselnden Verhältnissen. Sie können mineralogisch wie folgt typisiert werden (vgl. Tabelle 10):

Kiesschlammtyp

- A und B sehr calcitreich, quarzarm, mit mittlerem Tonmineraliengehalt
- C tonmineralienreich, mit mittlerem Calcit- und Quarz-Gehalt
- D quarz- und calcitreich, mit tiefem Tonmineraliengehalt
- E calcitreich, mit mittlerem Quarz- und Tonmineraliengehalt
- F quarzreich, mit mittlerem Calcitgehalt und tiefem Tonmineraliengehalt
- G calcit- und dolomitreich, mit mittlerem Quarzgehalt und tiefem Tonmineraliengehalt

Die vorliegenden Ergebnisse stehen in guter Übereinstimmung mit denjenigen einer früheren Arbeit (MUMENTHALER 1979). Daraus ist ersichtlich (Tabelle 11), dass die Kiesschlammzusammensetzung aus dem gleichen Kieswerk ziemlich konstant bleibt.

Bei den Fraktionen < 0,002 mm («Tonfraktionen») fällt besonders der hohe Calcitgehalt sowie die tiefen Quarz- und Dolomitanteile auf. Daraus kann geschlossen werden, dass Calcit in allen Korngrößen relativ gleichmässig verteilt ist, währenddem Quarz und Dolomit eher in den gröberen Fraktionen vorkommen.

1.2.4 Spezifische Oberfläche und Ionenaustausch-Kapazität der Fraktionen < 0,063 mm

Kiesschlämme von der Korngrößenfraktion < 0.063 mm zeichnen sich durch eine relativ hohe spezifische Oberfläche und ein deutliches Ionenaustauschvermögen aus. Die in Tabelle 12 dargestellten Kationenaustauschkapazitäten können weitgehend mit dem Tonmineralanteil und der spezifischen Gesamtoberfläche korreliert werden (Fig. 5 und 6). Dabei lassen sich grössere Abweichungen als Folge der verschiedenen Tonmineralarten interpretieren. So weisen montmorillonithaltige Proben eine grössere Kationenaustauschkapazität aus. In allen untersuchten Fraktionen ist Ca²⁺ in der Ionenbelegung dominierend. Ferner tritt Mg²⁺ in montmorillonit-reicheren Proben verstärkt auf.

Tabelle 12: Ionenaustauschkapazität, spezifische Gesamtoberfläche und Tonmineralanteil der Fraktionen < 0,063 mm aus den Kiesrohmaterialien

Fraktion < 0,063 mm Herkunft	A Region Genfersee	B Region Fribourg	C Region Aarau-Luzern	D Region Zürich	E Region Zug	F Region Chur	G Region Bodensee
Ionenaustauschkapazität (m Val/100 g)							
Na ⁺	0,41	0,37	0,36	0,18	0,37	0,19	0,72
K ⁺	0,18	0,33	0,42	0,13	0,20	0,01	0,21
Mg ²⁺	0,99	2,60	2,03	0,84	0,89	0,58	2,86
Ca ²⁺	13,43	16,60	19,98	8,66	12,38	6,00	10,91
Total	15,0	19,9	22,8	9,8	13,8	6,8	14,7
Spezifische Gesamt- oberfläche (m ² / g)	143	150	181	83	112	69	113
Tonmineralienanteil (%)	20	35	40	10	25	10	15

Tabelle 13: Verwertungsmöglichkeiten von Kiesschlamm

Kiesschlammzustand	Verwertungsmöglichkeit	Literatur	Bemerkungen
dünnflüssig (Kiesschlamm unbehandelt)	<ul style="list-style-type: none"> - Mineralisierung von Böden, insbesondere Waldböden 		<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Transportkosten
dickflüssig (Kiesschlamm flockuliert)	<ul style="list-style-type: none"> - Mineralischer Zusatz zu stark organischen Böden oder zu organischen Abfällen (Klärschlämme) - Dichtungsmittel für Mülldeponien (mit oder ohne Bentonit) 	<ul style="list-style-type: none"> · Tillmanns (1982, 1984) · SIA-Zeitung (1983) 	<ul style="list-style-type: none"> - Dosierung begrenzt, Mischschwierigkeiten - Adsorption von Schwermetallen durch Tonmineralien - Enthält noch viel Wasser, wenig standfest
stichfest (Kiesschlamm flockuliert und zweite Entwässerungsstufe)	<ul style="list-style-type: none"> - Dichtungsmittel für Mülldeponien - Rohstoffkomponente bei der Herstellung von grobkeramischen Produkten - Material für den Strassenunterbau nach Stabilisierung mit CaO oder Zement - Rohmaterial für den Lehmbau 	<ul style="list-style-type: none"> · Peters et al. (1982) · Fetz (1974) · Laquerbe (1982) · Fedi, Händle, Königer (1982) · Hugli (1983) 	<ul style="list-style-type: none"> - vgl. Kapitel VIII/3 - Einsatzmöglichkeiten in der Schweiz fraglich
granuliert, getrocknet	<ul style="list-style-type: none"> - Substrat oder Füllstoff für chemische Produkte - Adsorptions- und Neutralisierungsmittel für Filteranlagen 		
aktiviert (Schnellbrand bis ca. 900°C)	<ul style="list-style-type: none"> - Stabilisierungsmittel im Strassenbau (ähnlich CaO oder Zement), gemahlen - Adsorptions- und Neutralisierungsmittel für Filteranlagen, granuliert oder gemahlen - Hydrothermal härtendes Bindemittel, gemahlen - Hydraulisch härtendes Bindemittel, gemahlen - Härter für Wasserglas-Sande in Giessereien, gemahlen 	<ul style="list-style-type: none"> · Mumenthaler (1969) · Iberg et al. (1983) · Hofmann (1982) 	<ul style="list-style-type: none"> - vgl. Kapitel VIII/4 - schwache, gegenüber anderen Härtern ungenügende Wirkung
getrocknet, gemahlen	<ul style="list-style-type: none"> - Rohstoffkomponente für die Zementherstellung - Rohstoffkomponente für Sinterkeramik (Feinkeramik) - Rohstoffkomponente für geschäumte Leichtbaustoffe 	<ul style="list-style-type: none"> · Bayer, Iberg (1983) · Bayer, Iberg (1983) 	<ul style="list-style-type: none"> - vgl. Kapitel VIII/5 - vgl. Kapitel VIII/5
getrocknet, stückig	<ul style="list-style-type: none"> - Rohstoffkomponente für Mineralglasfasern 	<ul style="list-style-type: none"> · Bayer, Iberg (1983) 	<ul style="list-style-type: none"> - vgl. Kapitel VIII/5

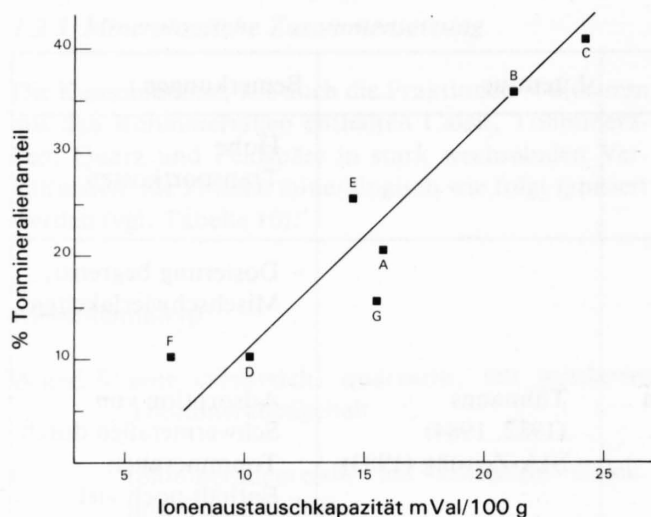


Fig. 5: Zusammenhang zwischen Ionenaustauschkapazität und Tonmineralgehalt der Korngrößenfraktion < 0,063 mm

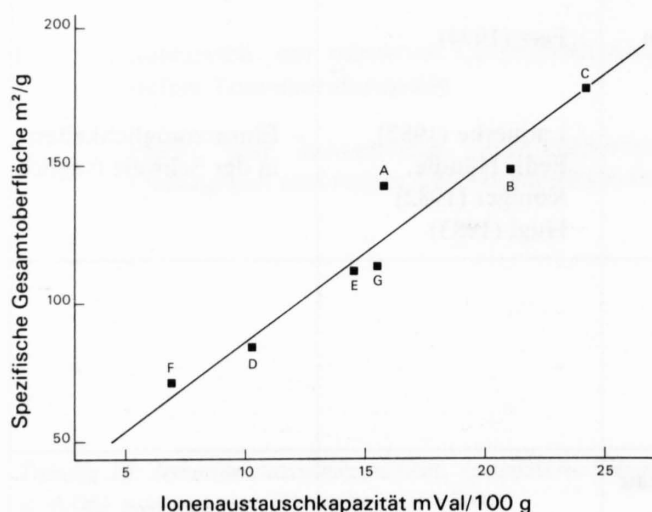


Fig. 6: Zusammenhang zwischen Ionenaustauschkapazität und spezifischer Gesamtoberfläche der Korngrößenfraktion < 0,063 mm

Kiesschlamm stellt demzufolge nicht eine inerte Substanz dar. Wegen des Kationenaustauschvermögens wirkt Kiesschlamm oberflächenaktiv und kann somit auch unter bodenkundlichen Gesichtspunkten betrachtet werden. So spielt der Ionenaustausch im Boden eine wichtige Rolle bei der Pflanzenernährung. Die von den Pflanzenwurzeln über den Atmungsprozess erzeugten Wasserstoffionen (H^+ -Ionen) vermögen die an den aktiven Oberflächen der Tonmineralien haftenden Kationen, z. B. K^+ , Mg^{2+} und Ca^{2+} , durch Austauschreaktionen derart zu mobilisieren, dass diese als Nährionen von den Pflanzenwurzeln aufgenommen werden.

2. Zusammenstellung der Verwertungsmöglichkeiten

Basierend auf der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung und den Eigenschaften von Kiesschlamm lassen sich bezüglich Verwertungsmöglichkeiten interessante Überlegungen und Grundsatzbetrachtungen anhand technologischer Modelle anstellen, die in der Tabelle 13 zusammengefasst sind.

3. Verwertung als Rohstoff für die Ziegelindustrie

3.1 Einleitung

Kiesschlämme können ziegeleitechnisch als «magere», kalkreiche Lehme qualifiziert werden und sind als Hauptkomponente für die Produktion von hochwertigen Ziegeleiprodukten kaum brauchbar. Der Grund dafür liegt in erster Linie in einem zu kleinen Tonmineraliengehalt, verbunden mit einem zu hohen Karbonatgehalt. Dagegen erscheint der Einsatz von Kiesschlamm als Magerungskomponente zu relativ «fetten» (= tonmineralienreichen) Hauptkomponenten vielversprechend zu sein. Dadurch könnten die Trocken- und Brennpflichkeit der «fetten» Hauptkomponente durch die «Magerungsmineralien» (Quarz, Feldspäte, Karbonate) vom Kiesschlamm weitgehend reduziert werden. Ausserdem wäre durch die mineralisierende Wirkung der im Kiesschlamm enthaltenen feinverteilten Karbonate eine allgemeine Verbesserung der physikalischen Eigenschaften der gebrannten Endprodukte zu erwarten (IBERG 1971, IBERG ET AL. 1972, PETERS UND JENNI 1973, PETERS UND MUMENTHALER 1977, PETERS UND IBERG 1978, MUMENTHALER 1979, MEYER ET AL. 1984)

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist, anhand einiger Modellfälle, die Möglichkeiten und Grenzen der Kiesschlammverwertung in der Ziegelindustrie aufzuzeigen.

3.2 Übersicht der Versuche

Ausgehend von drei Ziegelei Rohstoffen mit stark unterschiedlicher Zusammensetzung wurden sowohl Grossversuche im Werk wie auch Laborversuche mit unterschiedlich hohem Kiesschlammzusatz durchgeführt (Tabelle 14).

Tabelle 14: Versuche Ziegeleirohstoffe mit Kiesschlammzusatz

Kiesschlamm		Ziegeleirohstoffe		
Typ/Region		kalkreicher, tonhaltiger Lehm der Oberen Süss- wasser-Molasse (OSM)	kalkhaltiger, tonreicher Lehm der Oberen Süss- wasser-Molasse (OSM)	kalkarmer, tonreicher Lehm (Opalinuston)
Grossversuche im Werk	D Zürich	W (0-25) ¹ L (0-25) ¹	W (0-50) ¹ L (0-50) ¹	W (0-80) ²
	G Bodensee/Thurtal	-	W (0-33) ¹	
Laborversuche	A Genfersee	-	-	L (50) ²
	B Fribourg	-	-	L (50) ²
	C Aarau/Luzern	-	-	L (50) ²
	D Zürich	-	-	L (50) ²
	E Zug	-	-	L (50) ²
	F Chur	-	-	L (50) ²
	G Bodensee	-	-	L (50) ²

()^{1, 2} Kiesschlamm-Dosierung in Vol. %, bezogen auf die Ziegeleirohstoff-Komponente bzw. auf die Rohstoffmischung
W = Grossversuche im Werk
L = Laborversuche

Tabelle 15: Zusammenstellung der Versuche

Versuch Nr.	Rohmaterialmischung Vol. %			Trocknungs- programm Std.
	Ziegeleilehm BN-Mischung	Kiesschlamm	Sägemehl	
1 BN-Mischung	100	-	15	64
Versuchsmischung	100	10	15	64
2 BN-Mischung	100	-	15	44
Versuchsmischung	100	10	15	44
3 BN-Mischung	100	-	15	44
Versuchsmischung	100	25	15	44
4 Versuchsmischung	100	25	15	64,44

3.3 Kiesschlamm als Zusatzkomponente zu einem kalkreichen, tonhaltigen Ziegeleilehm der Oberen Süsswasser-Molasse (OSM)

3.3.1 Zielsetzung

Mit dem Kiesschlammzusatz wurde versucht, die Trockenempfindlichkeit des Ziegeleilehmes, der die Rohstoffbasis für die Produktion von Backsteinen der normalen Qualität (BN-Qualität nach SIA-Norm 113) bildet, herabzusetzen.

3.3.2 Versuche und Untersuchungen

Insgesamt wurden vier Fabrikationsversuche mit unterschiedlichem Kiesschlammzusatz (10 und 25 Vol.%) und Trocknungsprogramm (44 und 64 Stunden) durchgeführt (Tabelle 15). Eingesetzt wurde dabei der Kiesschlammtyp D (Region Zürich). Parallel zu den Mischungen mit Kiesschlamm wurde bei den drei ersten Versuchen auch noch mit der normalen Mischung (BN-Mischung) produziert (Vergleichsbasis).

Tabelle 16: Korngrößenverteilung, Quarz- und Kalkgehalt der Einzelkomponenten und der Rohmaterialmischungen (Strangproben)

	Korngrößenverteilung			Quarz	Kalk
	Ton < 0,002 mm Gew. %	Schluff 0,002–0,020 mm Gew. %	Sand > 0,020 mm Gew. %	Gew. %	Gew. %
Rohstoffkomponenten					
– Kiesschlamm Typ D	26,4	40,6	33,0	27,5	47,5
– Ziegeleilehm BN-Mischung	28,5	38,8	32,7	21,1	46,3
Strangproben					
1. Versuch					
– 10% Kiesschlamm	33,7	37,2	29,1	21,5	44,9
– Normale BN-Mischung	34,5	39,1	26,4	21,1	44,9
2. Versuch					
– 10% Kiesschlamm	34,5	38,8	26,7	21,2	46,2
– Normale BN-Mischung	34,7	38,6	26,7	20,9	45,0
3. Versuch					
– 25% Kiesschlamm	31,8	36,0	32,2	23,0	45,6
– Normale BN-Mischung	34,4	24,7	40,9	20,9	43,3
4. Versuch					
– 25% Kiesschlamm	33,3	35,9	30,8	26,6	44,7

Tabelle 17: Zusammensetzung der Tonfraktion < 0,002 mm der Einzelkomponenten

	Quarz	Karbonate	Tonminerale		
			Illit %*	Chlorit %*	Montmorillonit %*
Ziegeleilehm Fraktion < 0,002 mm	viel	wenig	40	27	33
Kiesschlamm Typ D Fraktion < 0,002 mm	mittelmässig vorhanden	viel	66	25	9

* bezogen auf 100% Tonminerale

Untersucht wurden dabei die granulometrische und mineralogische Zusammensetzung der Einzelkomponenten sowie der Rohmaterialmischungen, die Sortierergebnisse (Produktequalität nach Trocknung und Brand) und die physikalischen Eigenschaften der Endprodukte.

3.3.3 Zusammensetzung der Einzelkomponenten und der Rohmaterialmischungen

Der eingesetzte Kiesschlamm Typ D ist granulometrisch und mineralogisch dem Ziegeleilehm ziemlich ähnlich. Die Zusammensetzung der Rohmaterialmi-

schungen zeigt demzufolge nur geringe Variationen in Funktion des Kiesschlammzusatzes (Tabelle 16).

Die Tonfraktionen (< 0.002 mm) der beiden Rohstoffe unterscheiden sich allerdings klar voneinander (Tabelle 17). Auffallend dabei ist der hohe Montmorillonitgehalt der Tonfraktion des Ziegeleilehmes, was auch das schwierige Trocknungsverhalten dieses Rohmaterials erklären könnte. Die entsprechende Fraktion des Kiesschlammes enthält dagegen nur wenig Montmorillonit, dafür viel Illit und Karbonate.

3.3.4 Trocknungsverhalten

Die Bestimmung des Trocknungsverhaltens von drei Mischungen mit 0, 10, 25% Kiesschlammzusatz erfolgte an Laborstrangproben 5 × 3 × 16 cm. Mit der Zugabe von Kiesschlamm wird die Trockenschwindung herabgesetzt, wobei die maximale Auswirkung diesbezüglich bereits bei einer Zugabe von 10 Vol.% erreicht ist (Tabelle 18).

3.3.5 Sortierungsergebnisse

Der Kiesschlammzusatz bringt keine wesentliche Verbesserung sowohl der Trocken- als auch der Brennsortierung (Ausbeute an Steinen ohne Risse und mit gutem Klang).

3.3.6 Physikalische Eigenschaften der gebrannten Steine

Aus der Tabelle 19 ist ersichtlich, dass die physikalischen Eigenschaften der Steine aus den Mischungen mit Kiesschlamm allgemein schlechter sind (tiefere Festigkeiten sowie höhere Wassersaugvermögen) als diejenigen aus der normalen BN-Mischung.

Tabelle 18: Trockenschwindung und Anmachwassergehalt in Funktion der Kiesschlammzugabe

Mischung	Anmachwassergehalt bei 12 mm HIBO (konstante Plastizität) Gew. %	Trockenschwindung %
100% BN-Mischung	23,0	9,0
100% BN-Mischung (+ 10% Kiesschlamm)	21,9	7,6
100% BN-Mischung (+ 25% Kiesschlamm)	21,3	7,7

Tabelle 19: Festigkeitseigenschaften und Wassersaugvermögen der gebrannten Backsteine

Mischung	Druckfestigkeit N/mm²	Querzugfestigkeit N/mm²	Wassersaugvermögen g dm²/min.
1. Versuch			
- Normale BN-Mischung	28,4	8,8	29,7
- BN-Mischung + 10% Kiesschlamm	25,7	7,5	34,8
2. Versuch			
- Normale BN-Mischung	28,8	8,5	32,2
- BN-Mischung + 10% Kiesschlamm	27,5	7,9	30,1
3. Versuch			
- Normale BN-Mischung	31,9	9,6	23,8
- BN-Mischung + 25% Kiesschlamm	25,7	8,0	33,6
4. Versuch			
- BN-Mischung + 25% Kiesschlamm	25,5	8,4	30,6

3.3.7 Mineralogische Zusammensetzung der gebrannten Scherben

Durch den Kiesschlammzusatz wird die mineralogische Zusammensetzung der gebrannten Scherben nur unwesentlich verändert. Die Anwesenheit kleiner Mengen von freiem CaO und Erhöhung des Gehlenitgehaltes in den Scherben der Steine mit Kiesschlammzusatz deuten auf einen etwas schlechteren Brenngrad.

3.3.8. Evaluation der Ergebnisse und Folgerungen

Die vorliegende Fabrikationsversuchsreihe zeigt, dass durch eine Kiesschlammzugabe das Trocknungsverhalten der BN-Mischung nur unwesentlich verbessert werden kann und dass die physikalischen Eigenschaften der gebrannten Steine eher etwas verschlechtert werden. Die normale BN-Mischung ist offensichtlich zu

kalkreich und enthält einen zu kleinen Anteil Tonmineralien um, bei Zugabe eines kalkreichen und tonmineralienarmen Kiesschlammes, eine Steigerung der BN-Steinqualität zu ergeben. Somit ist der Einsatz von Kiesschlamm in einer solchen BN-Mischung als nicht zweckmässig zu betrachten.

3.4 Kiesschlamm als Magerungskomponente zu einem hochwertigen, tonreichen Ziegeleilehm der Oberen Süsswasser-Molasse (OSM)

3.4.1 Zielsetzung

Anhand einer Versuchsserie im Werk und im Labor ist der Einsatz von Kiesschlamm in einer Rohmaterialmischung zur Produktion von hochwertigen Backsteinen (BS-Qualität nach SIA-Norm 113) und dessen Auswir-

Tabelle 20: Mineralneubildungen in den gebrannten Scherben in Gew. %

Probe	CaO	Gehlenit	Plagioklas	Wollastonit	Diopsid
- Normale BN-Mischung	0	20	5	5	15
- BN-Mischung + 10% Kiesschlamm	Spuren	24	0	8	12
- BN-Mischung + 25% Kiesschlamm	Spuren	27	0	7	15

Tabelle 21: Evaluation der Ergebnisse

Fabrikations- und Qualitätsparameter	Mischungen mit Kiesschlammzusatz Veränderung gegenüber der normalen BN-Mischung	
	+ 10% Kiesschlamm	+ 25% Kiesschlamm
Verpressung	=	=
Trockenschwindung	++	++
Trocknungsverhalten	+	+
Brennverhalten	=	=
Brenngrad	-	-
Druckfestigkeit	-	--
Wassersaugvermögen	-	-

++ besser

= - gleich

-- schlechter

+ etwas besser

- etwas schlechter

Tabelle 22: Zusammenstellung der Versuche

Fabrikationsversuche im Werk	Mergel aus der Oberen Süsswasser- Molasse (OSM) Vol. %	Feinsand aus der Oberen Süsswasser- Molasse (OSM) Vol. %	Kiesschlamm		Sägemehl Vol. %
			Typ D	Typ G	
			Vol. %	Vol. %	
1.1 Normale BS-Mischung	100	40			15
1.2 Versuchsmischung	100		30		15
2.1 Normale BS-Mischung	100	40			15
2.2 Versuchsmischung	100		50		30
3.1 Normale BS-Mischung	100	40			15
3.2 Versuchsmischung	100	40	20		15
4.1 Normale BS-Mischung	100	40			15
4.2 Versuchsmischung	100	40		20	15
5.1 Normale BS-Mischung	100	40			15
5.2 Versuchsmischung	100	40		25	15
6.1 Versuchsmischung	100	30		33	15

kungen auf die Qualität des Endproduktes zu untersuchen. Dabei ist unter anderem zu überprüfen, inwieweit der Kiesschlamm die Magerungskomponente der heutigen Mischung, ein glimmerhaltiger Feinsand aus der Oberen Süsswasser-Molasse, ersetzen könnte.

3.4.2 Versuche und Untersuchungen

Durchgeführt wurden insgesamt 6 Fabrikationsversuche im Werk, jeweils mit den folgenden zwei Rohmaterialmischungen:

- normale BS-Mischung (Ziegeleilehm der OSM)
- Versuchsmischung mit Kiesschlammzusatz

Eingesetzt wurden dabei zwei Kiesschlammtypen (Typ D, Region Zürich, und Typ G, Region Bodensee/Thur-tal, vgl. Tabelle 22).

Parallel zu den Werkversuchen wurde noch durch La-borbrände die Entwicklung der Druckfestigkeit und

das Wassersaugvermögen der Backsteine in Funktion der Garbrandtemperatur untersucht.

3.4.3 Zusammensetzung der Rohstoffkomponenten

Die chemische, mineralogische und granulometrische Zusammensetzung der Rohstoffkomponenten ist in der Tabelle 23 zusammengestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die zwei eingesetzten Kiesschlämme sich deutlich vom Feinsand aus der OSM unterscheiden (deutlich hö-here Karbonat- und Tonmineralienanteile).

3.4.4 Zusammensetzung der Rohstoffmischungen

Die chemische, mineralogische und granulometrische Zusammensetzung der Rohstoffmischungen ist in der Tabelle 24 ersichtlich. Kennzeichnend dabei ist die Er-höhung der Karbonate (Calcit und Dolomit) in den Mi-schungen mit Kiesschlammzusatz.

Tabelle 23: Zusammensetzung der Rohstoffkomponenten

	Mergel aus der Oberen Süßwasser- Molasse (OSM)	Feinsand aus der Oberen Süßwasser- Molasse (OSM) (Glimmersand- schüttung)	Kiesschlamm	
			Typ D	Typ G
Chemische Zusammensetzung	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %
Glühverlust	16,14	12,99	21,68	28,32
SiO ₂	44,94	57,91	42,05	29,85
Al ₂ O ₃	15,91	8,23	6,38	5,68
Fe ₂ O ₃	4,68	2,62	2,06	2,16
TiO ₂	0,49	0,41	0,40	0,25
CaO	11,98	9,76	22,29	24,24
MgO	3,24	4,65	3,11	7,72
MnO	0,00	0,04	0,18	0,07
K ₂ O	0,28	1,62	0,91	1,06
Na ₂ O	0,66	0,06	0,88	0,28
P ₂ O ₅	0,06	0,09	0,11	0,09
Total	100,38	98,38	100,05	99,72
Mineralogische Zusammensetzung				
Quarz	18,8	39,5	31,2	19,1
Calcit	18,7	17,2	31,9	30,1
Dolomit	3,4	7,4	7,2	20,6
Tonmineralien	50–55	1–3	5–10	15–20
Feldspäte	0–5	20–25	5–10	5–10
Glimmer	–	3–6	1–2	1–2
Verteilung der einzelnen Tonmineralien bez. auf 100% Tonmineralien				
Illit	35–40		60	50
Chlorit	< 5		30	10
Montmorillonit	45–50		10	30
Kaolinit	10–15		–	10
Granulometrie				
«Tonfraktion» < 0,002 mm	69,8	8,0	15,7	23,0
«Schlufffraktion» 0,002–0,020 mm	27,9	13,4	41,4	33,2
«Sandfraktion» > 0,020 mm	2,3	78,6	42,9	43,8

Tabelle 24: Zusammensetzung der Rohstoffmischungen

Versuch Nr.	1.1	1.2	3.1	3.2	4.2
	Vol. %	Vol. %	Vol. %	Vol. %	Vol. %
Mergel	100	100	100	100	100
Feinsand	40		40	40	40
Kiesschlamm Typ D		30		20	
Kiesschlamm Typ G					20
Sägemehl	15	15	15	15	15
	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %
Glühverlust	13,11	17,53	13,75	14,95	16,33
SiO ₂	53,40	45,00	53,12	51,48	49,80
Al ₂ O ₃	13,06	12,85	12,81	11,55	12,18
Fe ₂ O ₃	4,46	4,36	4,10	3,81	3,91
TiO ₂	0,77	0,66	0,67	0,52	0,52
CaO	9,68	14,32	9,90	12,03	11,81
MgO	3,13	3,02	3,08	2,77	3,33
MnO	0,07	0,08	Sp.	Sp.	Sp.
K ₂ O	0,70	1,10	1,43	1,81	1,85
Na ₂ O	0,91	0,28	0,45	0,91	0,81
P ₂ O ₅	Sp.	Sp.	0,07	0,09	0,08
Total	99,29	99,20	99,38	99,92	100,62
Quarz	20,3	18,7	27,1	28,1	26,8
Calcit	11,7	20,6	12,2	16,8	14,8
Dolomit	4,4	6,4	5,5	5,9	7,9
Granulometrie					
«Tonfraktion» < 0,002 mm	49,1	55,0	46,7	42,8	44,6
«Schlufffraktion» 0,002–0,020 mm	23,3	29,1	23,4	27,0	25,0
«Sandfraktion» > 0,020 mm	27,6	15,9	29,9	30,2	30,4

3.4.5 Fabrikationsbedingungen

Alle Fabrikationsversuche wurden mit konstanten Verpressungs-, Trocknungs- und Brennparametern gefahren.

- Verpressung:
 - Plastizität des Stranges ca. 12 mm HIBO (Eindringtiefe)
 - Temperatur des Stranges ca. 65 °C
 - Vakuum ca. 80%
- Trocknung:
 - In Trocknungskammer, automatisch nach Temperatur und Feuchtigkeit geregelt.
 - Trocknungsprogramm: 96 Std.
- Brennen:
 - Aufheizgeschwindigkeit ca. 100 °C/h
 - Brenntemperatur 1020 °C
 - Haltezeit 4 Std.
 - Totale Brennzeit 48 Std.

Merkliche Unterschiede im Fabrikationsverhalten zwischen den einzelnen Mischungen sind nicht festgestellt worden.

3.4.6 Sortiierungsergebnisse

Die Sortiierungsergebnisse nach Trocknung (rissfrei – Risse) und nach Brand (Ausbeute an Backsteinen Sonderqualität nach SIA-Norm 113) werden durch den Kiesschlammzusatz allgemein verbessert. Dabei zeichnen sich zwei interessante Möglichkeiten ab:

- Zusatz von 20–25% Kiesschlamm zur bestehenden Mischung mit dem Feinsand der OSM.
- Zusatz von 50% Kiesschlamm zum Mergel aus der OSM (ohne Feinsand der OSM) unter Erhöhung des Sägemehlanteils (30% anstatt 15%).

Tabelle 25: Druckfestigkeit, Querzugfestigkeit und Wasseraugvermögen der gebrannten Backsteine (BS 17,5 M, BS 18)

Fabrikationsversuche	Mischung in Vol %					Physikalische Eigenschaften		
	Mergel OSM	Feinsand OSM	Kiesschlamm Typ D	Kiesschlamm Typ G	Sägemehl	Druckfestigkeit N/mm ²	Querzugfestigkeit N/mm ²	Wasseraugvermögen g/dm ² min.
1.1 Normale BS-Mischung	100	40			15	44,6	–	8,7
1.2 Versuchsmischung	100		30		15	64,7	15,7	6,8
2.1 Normale BS-Mischung	100	40			15	45,1	–	8,7
2.2 Versuchsmischung	100		50		30	47,5	13,6	11,4
3.1 Normale BS-Mischung	100	40			15	46,5	14,4	6,3
3.2 Versuchsmischung	100	40	20		15	43,3	16,8	10,8
4.1 Normale BS-Mischung	100	40			15	41,2	–	9,0
4.2 Versuchsmischung	100	40		20	15	47,3	–	8,5
5.1 Normale BS-Mischung	100	40			15	51,7	–	7,7
5.2 Versuchsmischung	100	40		25	15	50,6	–	9,3
6.1 Versuchsmischung	100	30		33	15	50,8	–	8,0

3.4.7 Physikalische Eigenschaften der gebrannten Backsteine

Lochanteil: 37–42%
Raumgewicht der Steine: 0,98–1,05 g/cm³
Raumgewicht des Scherbens: 1,65–1,80 g/cm³

Die Mischungen mit Kiesschlammzusatz zeigen allgemein höhere Druckfestigkeiten als die normalen BS-Mischungen. Dies kommt in der Figur 7 deutlich zum Ausdruck, in welcher die Korrelation zwischen dem Tongehalt der Rohmaterialmischung und der Druckfestigkeit der entsprechenden Backsteinqualität gezeigt wird. Daraus kann für jeden Mischungstyp (normale BS-Mischung und Mischung mit Kiesschlamm) eine Regressionskurve berechnet werden, wobei diejenige der Mischungen mit Kiesschlamm deutlich nach höheren Druckfestigkeiten verschoben ist.

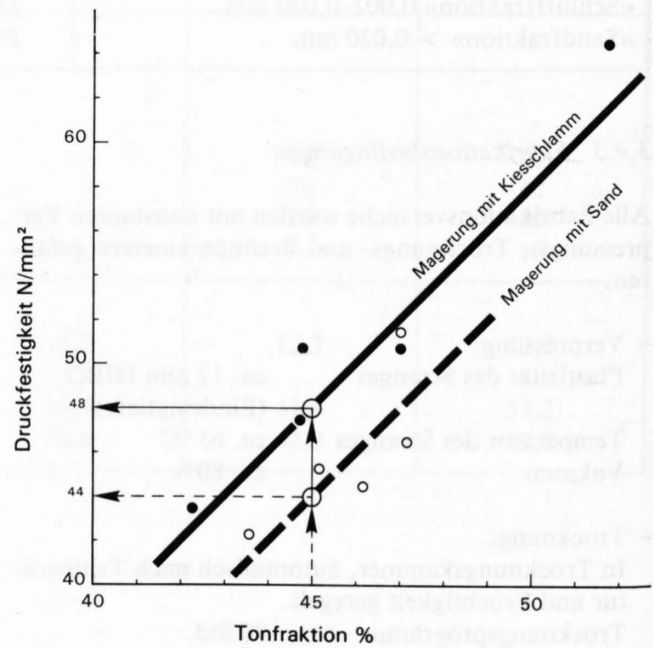


Fig. 7: Druckfestigkeit von Backsteinen in Funktion des Tonfraktionsgehaltes der Rohmaterialmischung.

3.4.8 Ergebnisse der Laborbrandversuche

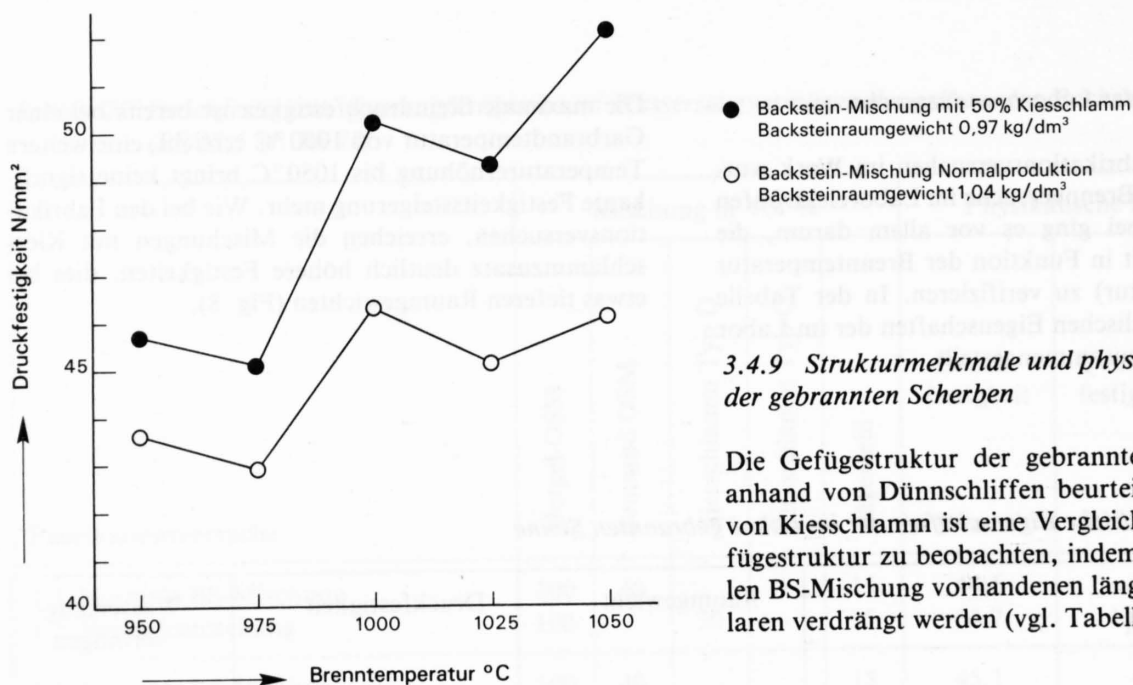
Parallel zu den Fabrikationsversuchen im Werk wurden fallweise noch Brennversuche im Laborelektroofen durchgeführt. Dabei ging es vor allem darum, die Steindruckfestigkeit in Funktion der Brenntemperatur (Garbrandtemperatur) zu verifizieren. In der Tabelle 26 sind die physikalischen Eigenschaften der im Labor gebrannten Steine zusammengestellt.

Die maximale Steindruckfestigkeit ist bereits bei einer Garbrandtemperatur von 1000 °C erreicht, eine weitere Temperaturerhöhung bis 1050 °C bringt keine signifikante Festigkeitssteigerung mehr. Wie bei den Fabrikationsversuchen, erreichen die Mischungen mit Kiesschlammzusatz deutlich höhere Festigkeiten, dies bei etwas tieferen Raumgewichten (Fig. 8).

Tabelle 26: Physikalische Eigenschaften der im Labor gebrannten Steine

Versuch Nr. Brennbedingungen	Raumgewicht kg/dm ³	Druckfestigkeit N/mm ²	Wassersaug- vermögen g/dm ² min.
1.1 Normale BS-Mischung			
50/ 975/5*	1,03	35,9	11,4
50/1000/5	1,03	34,9	11,0
50/1025/5	1,03	38,8	11,2
25/1050/5	-	-	-
1.2 Mischung mit 30% Kiesschlamm Typ D			
50/ 975/5	0,98	57,4	9,8
50/1000/5	0,99	58,8	7,5
50/1025/5	1,00	58,9	7,3
25/1050/5	1,06	45,7	9,2
2.1 Normale BS-Mischung			
50/ 950/5	1,03	42,6	10,8
50/ 975/5	1,03	41,9	11,2
50/1000/5	1,05	46,3	9,1
50/1025/5	1,04	45,1	10,5
50/1050/5	1,05	46,1	8,8
2.2 Mischung mit 50% Kiesschlamm Typ D			
50/ 950/5	0,96	45,7	14,2
50/ 975/5	0,96	45,1	14,6
50/1000/5	0,97	51,2	12,5
50/1025/5	0,97	49,2	13,6
50/1050/5	0,99	52,1	10,4
3.1 Normale BS-Mischung			
50/1025/5	1,07	42,1	7,7
3.2 Mischung mit 20% Kiesschlamm Typ D			
50/1025/5	1,05	50,6	9,9

* Brennbedingungen: Aufheizgeschwindigkeit in °C pro Std. / Garbrandtemperatur in °C / Haltezeit in Std.



3.4.9 Strukturmerkmale und physikalische Parameter der gebrannten Scherben

Die Gefügestruktur der gebrannten Scherben wurde anhand von Dünnschliffen beurteilt. Mit der Zugabe von Kiesschlamm ist eine Vergleichsmässigung der Gefügestruktur zu beobachten, indem die bei der normalen BS-Mischung vorhandenen längsorientierten Kapillaren verdrängt werden (vgl. Tabelle 27).

Fig. 8: Steindruckfestigkeit in Funktion der Brenntemperatur

Tabelle 27: Gefügestruktur der gebrannten Scherben

	Versuchsmischungen mit Kiesschlamm			Normale BS-Mischung
Mergel OSM Vol. %	100	100	100	100
Feinsand OSM			40	40
Kiesschlamm Typ D	30	50	20	
Sägemehl	15	30	15	15
Versuch Nr.	1.2	2.2	3.2	3.1
Grobporosität Rundporen, Lunkern und Grobkapillaren > 20 µ	viel Rundporen gleichmässig verteilt	längsgestreckte Grobporen und viele Rundporen, gleichmässig verteilt	viel längsgestreckte Grobporen und viele Rundporen gleichmässig verteilt	sehr viel längsgestreckte Grobporen und -kapillaren, wenig runde Grobporen
Feinporosität Kapillaren 1-20 µ	wenig	rel. viel längsorientiert	rel. viel längsorientiert	viel längsorientiert
Poren 1-20 µ	viel	viel	viel	wenig
Feinstkapillaren und -poren < 1 µ	viel gleichmässig verteilt	viel gleichmässig verteilt	viel gleichmässig verteilt	wenig
Risse	keine	keine	in Hartzuschlagkörnern vorhanden	in Hartzuschlagkörnern vorhanden
Zuschlagstoffe (Magerung)	dicht und regelmässig verteilt 0,04-0,08 mm	dicht und regelmässig verteilt 0,04-0,08 mm	grob, regelmässig verteilt 0,1-0,2 mm	grob, regelmässig verteilt 0,04-0,25 mm

Durch Zugabe von Kiesschlamm wird die Rohdichte des gebrannten Scherbens kleiner, der E-Modul jedoch grösser. Die Kiesschlammzugabe bewirkt auch eine erhöhte offene Porosität, die sich bei den Wassersättigungswerten bemerkbar macht (vgl. Tabelle 28).

3.4.10 Folgerungen

Die durchgeführten Fabrikationsversuche zeigen, dass die Zugabe von Kiesschlamm zu einem hochwertigen, tonreichen Ziegeleilehm (Mergel der OSM) ohne besondere fabrikationstechnische Schwierigkeiten möglich

ist und grundsätzlich positive Auswirkungen auf die Endproduktequalität hat. Besonders interessant erscheint die Zugabe von 20–30% Kiesschlamm zur normalen BS-Mischung (hochwertiger Ziegeleilehm + Glimmersand). Dadurch wird

- die Trocken- und Brennsortierung verbessert,
- die Struktur des gebrannten Scherbens vergleichmässigt und
- die Druckfestigkeit sowie der E-Modul deutlich erhöht.

Weiter bildet der Einsatz von Kiesschlamm als Magerungskomponente zum hochwertigen Ziegeleilehm eine Alternative zum heute verwendeten Glimmersand der

Tabelle 28: Physikalische Parameter der gebrannten Scherben

		Versuchsmischungen mit Kiesschlamm			Normale BS-Mischung
Mergel OSM	Vol. %	100	100	100	100
Feinsand OSM				40	40
Kiesschlamm Typ D		30	50	20	
Sägemehl		15	30	15	15
Versuch Nr.		1.2	2.2	3.2	3.1
Rohdichte kg/dm ³		1,76	1,68	1,82	1,87
E-Modul 10 ³ N/mm ²		10,9	10,1	8,4	7,1
Porosität LA 0,02–1,4 mm Ø		6,4	9,7	6,6	9,5
Porosität L-300 0,02–0,3 mm Ø		2,7	3,5	3,5	5,9
% L-300 von LA		42,2	36,1	53,0	62,1
Wassersättigung bei 5 Tagen Wasserlagerung A5	Vol. %	26,4	29,4	26,1	21,1
Wassersättigung bei 200 mm Hg Restdruck A200	Vol. %	29,3	33,6	29,2	23,4
Wassersättigung bei Vakuum A v	Vol. %	36,2	39,5	34,0	27,7
Sättigungswert A5 / A v		0,73	0,74	0,77	0,76
Sättigungswert A200 / A v		0,81	0,85	0,86	0,85

OSM. Allerdings ist, um einen genügenden Magerungseffekt zu erreichen, die Kiesschlamm dosierung bis auf 50% zu erhöhen, was eine starke Veränderung der Mikrostruktur und eine Erhöhung der Porosität des gebrannten Scherbens zur Folge hat.

3.5 Kiesschlamm als Zweitkomponente zu einem tonreichen und kalkarmen Ton (Opalinuston)

3.5.1 Einführung und Zielsetzung

Der Opalinuston ist ein tonreicher und kalkarmer Tonschiefer, der im Nordteil des schweizerischen Juras mit einer Mächtigkeit von ca. 100 m vorkommt. Er bildet für die Produktion von gebrannten Baustoffen eine interessante Rohmaterialquelle und wird von mehreren Ziegeleien der Nordschweiz zu diesem Zwecke intensiv abgebaut. Dieser Rohstoff ist aber sehr tonreich und demzufolge in der Fabrikation sehr empfindlich. Dieser schwerwiegende Nachteil wird allgemein durch den Zusatz einer mageren Zweitkomponente wie z. B. fluvioglaziale Lehme (Bändertone) oder sandige Molassemergel behoben. In dieser dritten Versuchsreihe soll abgeklärt werden, ob Kiesschlamm als Zweitkomponente zum Opalinuston für die Produktion von Backsteinen der BN-Qualität geeignet ist und welche Endprodukteigenschaften mit dieser Mischung zu erwarten sind.

3.5.2 Versuche und Untersuchungen

Durchgeführt wurden vier Fabrikationsversuche mit unterschiedlichen Kiesschlamm dosierungen (vgl. Tabelle 29).

Tabelle 29: Fabrikationsversuche mit Mischungen aus Opalinuston und Kiesschlamm

Versuch Nr.	Opalinuston Schinznach (AG)	Kiesschlamm Typ D
1	100 Vol. %	– Vol. %
2	75 Vol. %	25 Vol. %
3	50 Vol. %	50 Vol. %
4	20 Vol. %	80 Vol. %

In einer Laborversuchsreihe wurde die Verwertbarkeit der sieben Kiesschlammtypen als Zweitkomponenten zum Opalinuston geprüft und die zu erwartenden Endprodukteigenschaften abgegrenzt.

3.5.3 Fabrikationsversuche mit unterschiedlichem Kiesschlammzusatz (Typ D)

3.5.3.1 Zusammensetzung der Rohstoffkomponenten und -mischungen

Die tonreiche Hauptkomponente (Opalinuston) und die Magerungskomponenten (Kiesschlamm Typ D) unterscheiden sich sehr stark in ihrem Tonmineralien- und Karbonatgehalt. Mit zunehmender Kiesschlamm dosierung wird dementsprechend in den Rohmaterialmischungen die Tonfraktion herabgesetzt und der Karbonatgehalt stark erhöht (vgl. Tabelle 30).

3.5.3.2 Fabrikationsparameter

Alle Fabrikationsversuche wurden mit konstanten Verpressungs-, Trocknungs- und Brennparametern gefahren.

- Verpressung:
 - Plastizität des Stranges 10 mm HIBO
 - Temperatur des Stranges 40 °C
 - Vakuum 92%
- Trocknung:
 - In Trocknungskammer, automatisch nach Temperatur und Feuchtigkeit geregelt.
 - Trocknungsprogramm 24 Std.
- Brennen:
 - Aufheizgeschwindigkeit ca. 100 °C/Std.
 - Garbrandtemperatur 1020 °C
 - Haltezeit 5 Std.
 - totale Brennzeit ca. 44 Std.

Die Sortierung nach der Trocknung und nach dem Brand wurde ausgelassen, da es sich dabei um einen vollautomatischen Fabrikationsablauf ohne Zwischen- und Endsortierung handelt.

3.5.3.3 Qualitative Beurteilung der gebrannten Steine

Durch den Kiesschlammzusatz werden die Eigenschaften der gebrannten Steine stark beeinflusst (Tabelle 31). Insbesondere nehmen die Festigkeitseigenschaften mit zunehmender Kiesschlamm dosierung ab, die Wassersaugfähigkeit dagegen zu (vgl. Fig. 9).

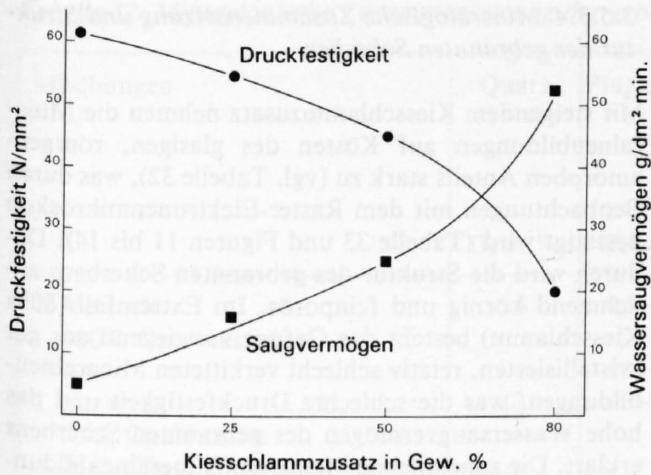


Fig. 9. Druckfestigkeit und Wassersaugvermögen von gebrannten Backsteinen in Funktion der Kiesschlammzugabe (Typ D). Mittelwerte aus je zehn Steinen.

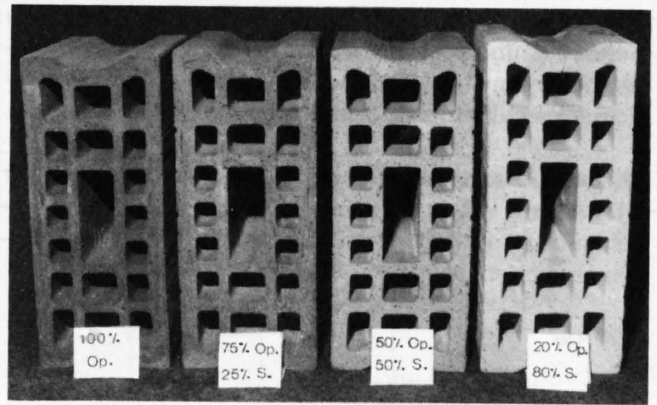


Fig. 10. Beurteilung der Gefügetextur an geschliffenen Backsteinquerschnitten

Tabelle 30: Zusammensetzung der Rohstoffkomponenten und Rohmaterialmischungen

	Korngrößenverteilung Gew. %			Mineralogische Zusammensetzung Gew. %						
	Tonfraktion < 0,002 mm	Schluff 0,002–0,02 mm	Sand > 0,02 mm	Quarz	Calcit	Dolomit	Illit	Chlorit	Montmorillonit	Kaolinit
Rohstoffkomponenten										
Kiesschlamm Typ D	28,4	49,8	21,8	25,5	40,4	7,9	12	7	1	–
Opalinuston Schinznach (AG)	50,3	37,7	12,0	19,1	7,9	2,6	31	12	–	22
Rohmaterialmischungen										
1. Versuch 100% Opalinuston	50,3	37,7	12,0	19,1	7,9	2,6	–	–	–	–
2. Versuch 75% Opalinuston 25% Kiesschlamm	45,3	40,1	14,6	21,5	15,3	4,6	–	–	–	–
3. Versuch 50% Opalinuston 50% Kiesschlamm	43,3	40,4	16,3	22,7	20,5	5,3	–	–	–	–
4. Versuch 20% Opalinuston 80% Kiesschlamm	38,7	43,3	18,0	23,5	29,8	7,4	–	–	–	–

In Fig. 10 ist, ausser dem ausgeprägten, schwarzen Reduktionskern beim Backstein ohne Kiesschlammzusatz sowie der starken Texturbildung im Backstein mit 25% Kiesschlamm, noch die starke Erhellung des gebrannten Scherbens (ziegelrot nach hellgelb) mit zunehmendem Kiesschlammzusatz ersichtlich.

In der Gesamtbeurteilung als BN-Qualität nach der SIA-Norm 113 schneiden die Steine mit 50% Kiesschlammzusatz mit guten, ausgeglichenen Eigenschaften am besten ab.

3.5.3.4 Mineralogische Zusammensetzung und Struktur der gebrannten Scherben

Mit steigendem Kiesschlammzusatz nehmen die Mineralneubildungen auf Kosten des glasigen, röntgenamorphen Anteils stark zu (vgl. Tabelle 32), was durch Beobachtungen mit dem Raster-Elektronenmikroskop bestätigt wird (Tabelle 33 und Figuren 11 bis 14). Dadurch wird die Struktur des gebrannten Scherbens zunehmend körnig und feinporös. Im Extremfall (80% Kiesschlamm) besteht das Gefüge vorwiegend aus gut kristallisierten, relativ schlecht verkitteten Mineralneubildungen, was die schlechte Druckfestigkeit und das hohe Wassersaugvermögen des gebrannten Scherbens erklärt. Die zunehmende Menge der Mineralneubildungen kann mit der Karbonatzunahme in der Rohmaterialmischung in Zusammenhang gebracht werden.

Tabelle 31: Eigenschaften der gebrannten Steine (ohne Sortierung)

Mischung		Versuche			
		1.	2.	3.	4.
Opalinuston	%	100	75	50	20
Kiesschlamm Typ D	%	-	25	50	80
Lochanteil	%	43	42	43	41
Raumgewicht	kg/dm ³	1,10	1,01	1,00	0,93
Anzahl Risse pro Stein					
> 30 mm		1,6*	2,9	0,7	4,9
< 30 mm		1,6	1,7	0,3	7,3
Druckfestigkeit	N/mm ²	61,5	53,4	44,6	19,9
Querzugfestigkeit	N/mm ²	14,1	10,2	10,4	7,5
Wassersaugvermögen	g/dm ² min.	4,6	15,9	23,9	52,3
Ausblühtendenz		keine	schwach	keine	ausgeprägt
Gefügetextur vgl. Fig. 10		Homogen, feinkörnig mit Texturen und Reduktions- kern	Homogen, feinkörnig mit vielen Texturen	Homogen, feinkörnig	Homogen, feinkörnig mit Rissen
Beurteilung als BN-Qualität nach SIA-Norm 113		knapp* BN-Qualität	keine BN-Qualität	gute BN-Qualität	keine BN-Qualität

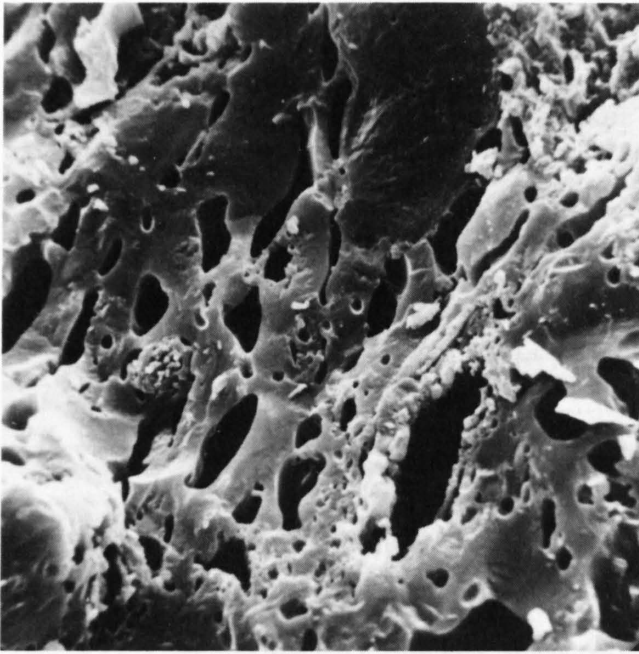
* wegen erhöhter Rissigkeit

Tabelle 32: Mineralogische Zusammensetzung der gebrannten Scherben

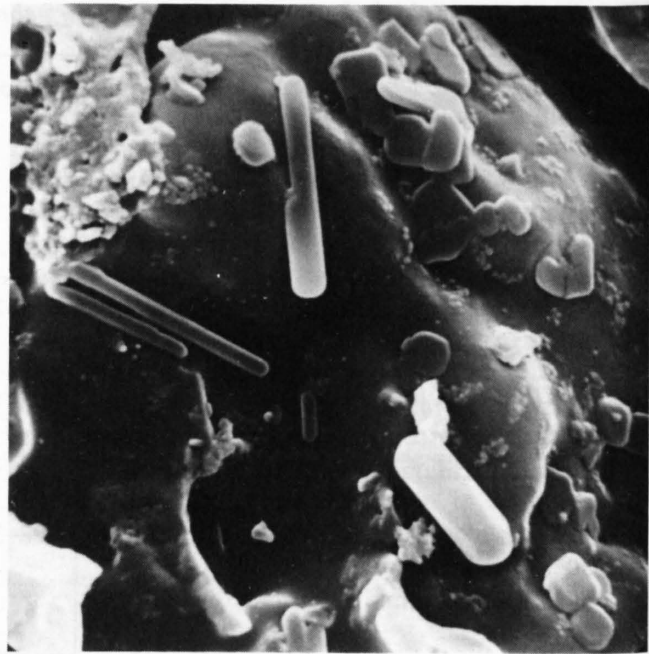
Mischungen	Quarz	Plagioklas	Wolla- stonit	Diopsid	Gehlenit	Hämatit	Rest: amorphe Substanz Glas?
	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %
1. Versuch 100% Opalinuston	15	15–20				5	60–65
2. Versuch 75% Opalinuston 25% Kiesschlamm	13	23–30		10		7	40–47
3. Versuch 50% Opalinuston 50% Kiesschlamm	10	22–30	Spuren	19	2	3	36–44
4. Versuch 20% Opalinuston 80% Kiesschlamm	10	15–21	12	23			36–40

Tabelle 33: Feinstruktur der gebrannten Scherben (Beobachtungen mit dem Raster-Elektronenmikroskop)

Mischungen	Beobachtungen
1. Versuch 100% Opalinuston	Ausgeprägt «glasiger» Aspekt mit langgestreckten Poren und Kapillaren (Fig. 11a). Vereinzelte stengelige Neubildungen (Fig. 11b).
2. Versuch 75% Opalinuston 25% Kiesschlamm	Grundmasse nur noch z. T. glasig und grobporig (Fig. 12a). Neubildungen vorhanden, aber nicht kristallisiert (Fig. 12b).
3. Versuch 50% Opalinuston 50% Kiesschlamm	Grundmasse vorwiegend körnig-kristallin (Fig. 13a). Neubildungen häufig vorhanden und relativ gut ausgebildet (Fig 13b).
4. Versuch 20% Opalinuston 80% Kiesschlamm	Grundmasse ausgesprochen körnig und grobkristallin (Fig. 14a). Gut kristallisierte Neubildungen dominieren das Gefüge (Fig. 14b).

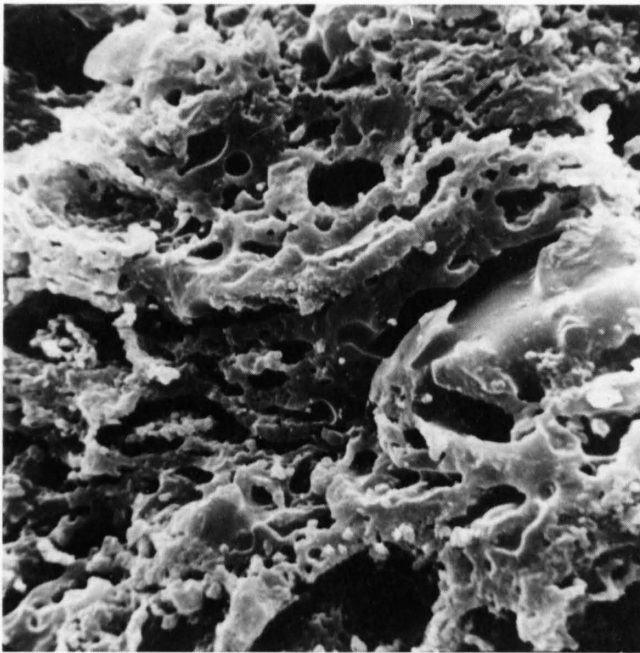


a) Vergr. ca. 1850 ×

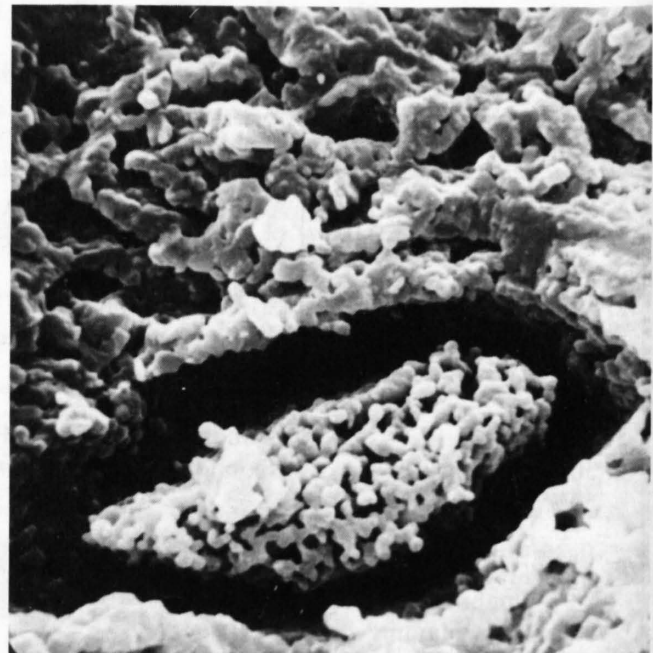


b) Vergr. ca. 4600 ×

Fig. 11: REM-Aufnahmen des gebrannten Scherbens aus 100% Opalinuston

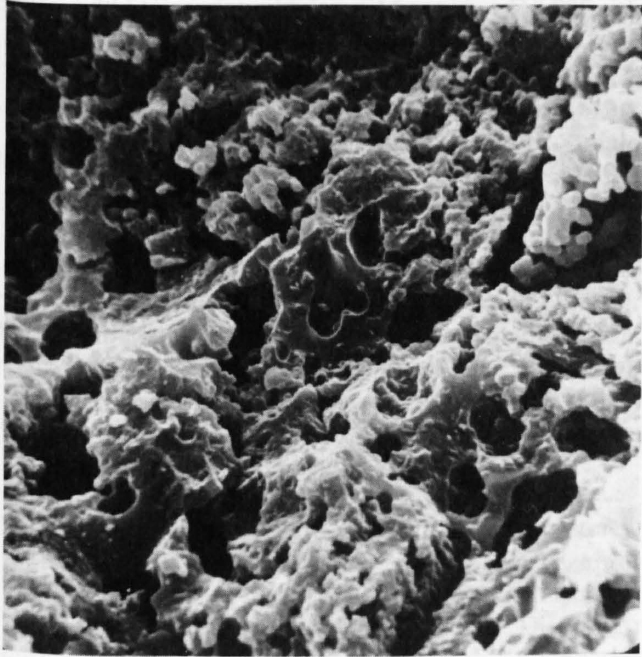


a) Vergr. ca. 1850 ×

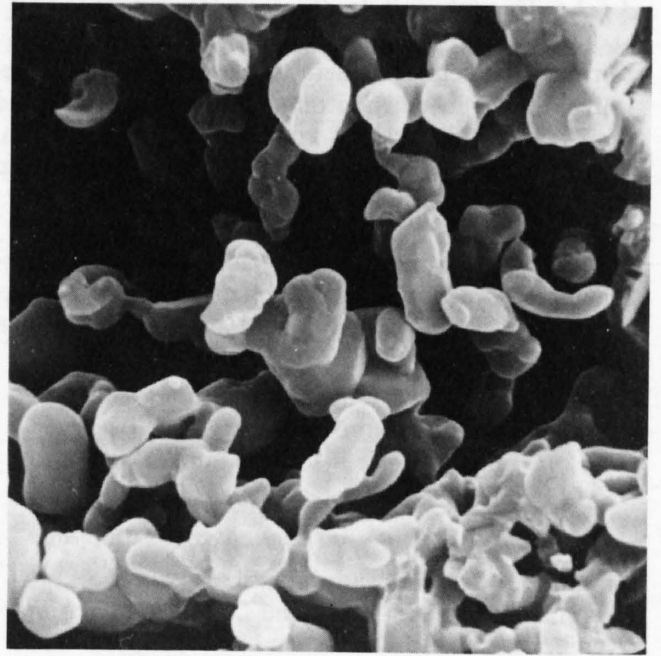


b) Vergr. ca. 4600 ×

Fig. 12: REM-Aufnahmen des gebrannten Scherbens aus der Mischung 75% Opalinuston + 25% Kiesschlamm



a) Vergr. ca. 1850 \times

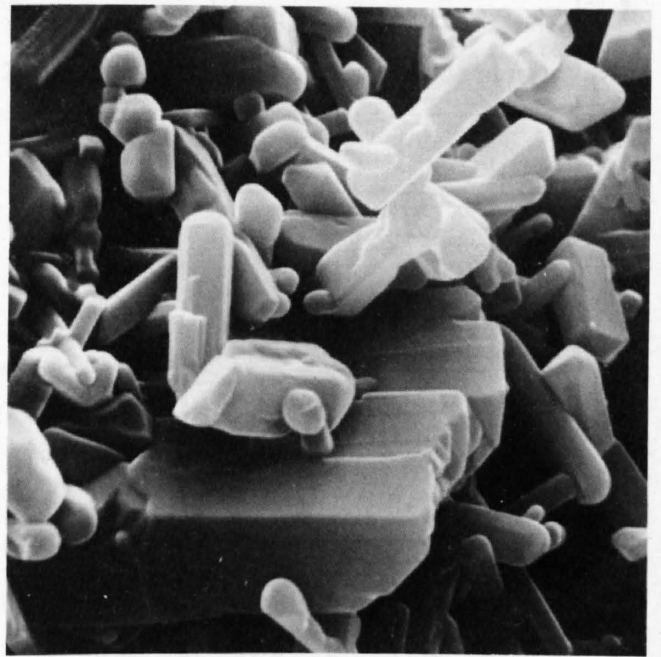


b) Vergr. ca. 4600 \times

Fig. 13: REM-Aufnahmen des gebrannten Scherbens aus der Mischung 50% Opalinuston + 50% Kiesschlamm



a) Vergr. ca. 1850 \times



b) Vergr. ca. 4600 \times

Fig. 14: REM-Aufnahmen des gebrannten Scherbens aus der Mischung 20% Opalinuston + 80% Kiesschlamm

3.5.3.5 Versuche mit der Röntgen-Heizkamera

Mit der Röntgenheizkamera ist es möglich, die Mineralreaktionen in einem Rohmaterialgemisch während des Brennens bis 1050 °C kontinuierlich zu verfolgen. Das Prinzip und die Apparatur ist von PETERS UND JENNI (1973) beschrieben worden.

Die vier Mischungen aus Opalinuston und Kiesschlamm wurden mit der Röntgen-Heizkamera untersucht (vgl. Fig. 15). Dabei sind die drei bekannten Brennphasen ersichtlich:

- bis 700 °C Mineralabbauphase (Abbau von Karbonaten und z.T. der Tonmineralien)
- von 600–1000 °C «aktive» Zwischenphase mit freiem CaO aus dem Karbonatabbau
- ab 850 °C Mineralneubildungsphase (Entstehung von Neubildungsphasen aus der Reaktion CaO – Silikate).

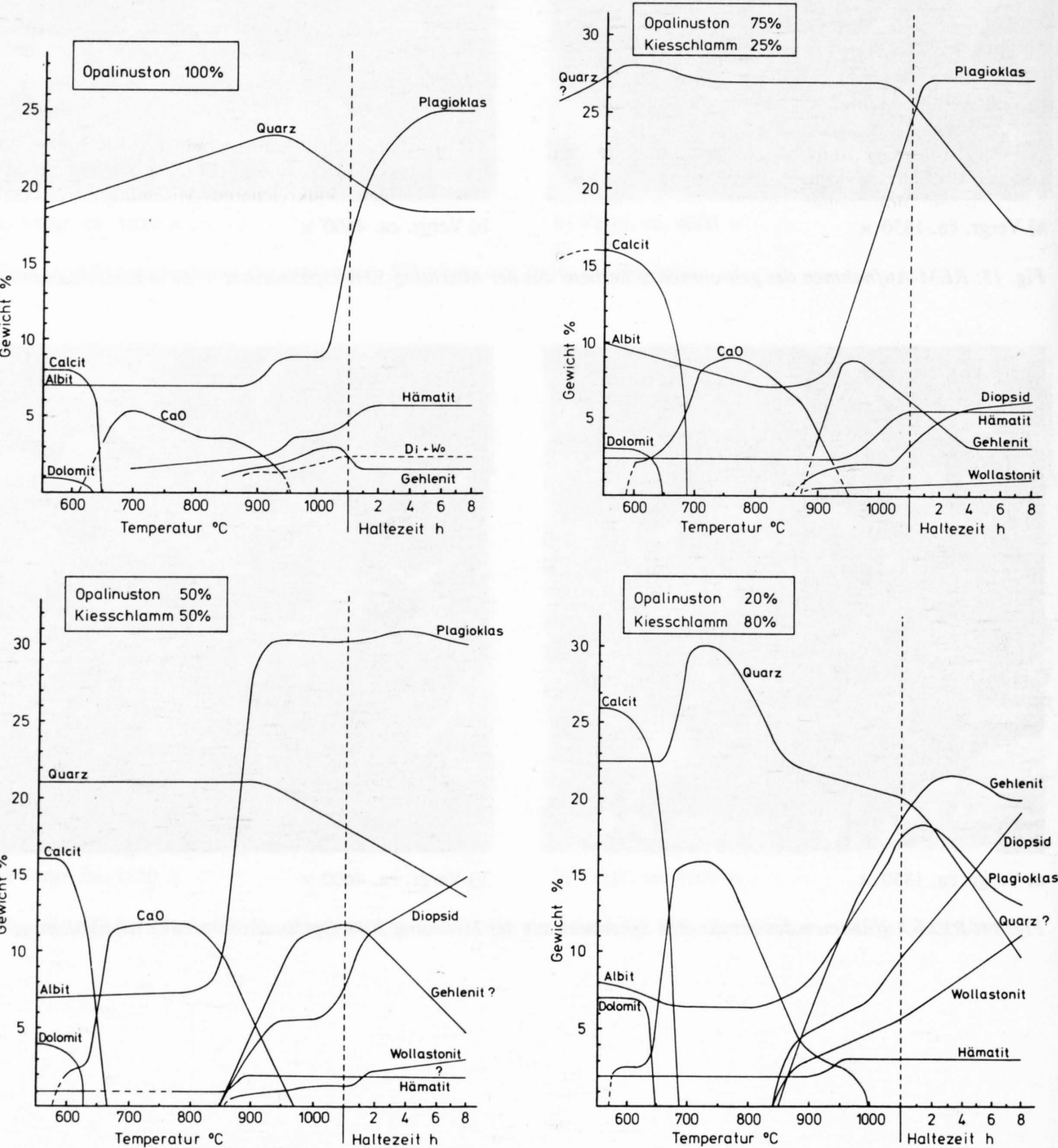


Fig. 15: Reaktionsverlauf der einzelnen Mineralphasen beim Brennen der vier Rohstoffmischungen. Aufnahmen mit der Röntgenheizkamera, Aufheizgeschwindigkeit 1 °C/Min.

In der Mineralneubildungsphase bildet sich bei den opalinustonreichen Mischungen vor allem Plagioklas (Feldspat), bei den kiesschlammreichen Proben neben Plagioklas $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ noch Diopsid $\text{CaO} - \text{MgO} - 2\text{SiO}_2$ und Wollastonit $\text{CaO} - \text{SiO}_2$. Mit Zunahme der Kiesschlamm dosierung nimmt am Anfang der Mineralneubildungsphase auch die Menge Gehlenit stark zu. In den Mischungen mit genügend Opalinuston nimmt dann diese Neubildung mit zunehmender Brenntemperatur und Haltezeit wieder ab. In der Mischung 20% Opalinuston/80% Kiesschlamm bildet Gehlenit die Hauptneubildungsphase und nimmt mit zunehmendem Brenngrad nur geringfügig ab. Gehlenit, als metastabile Neubildungsphase, ist oft indikativ für einen ungenügenden Brand.

In den werkgebrannten Backsteinen konnten interessanterweise nur unbedeutende Mengen Gehlenit gefunden werden, im Gegensatz zu laborgebrannten Steinen und den Proben der Röntgen-Heizkamera. Dies zeigt, dass in einem industriellen Tunnelofen bei annähernd gleichen Brenntemperaturen und -dauer höhere Brenngrade erreicht werden können als im Laborelektroofen. Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang der nicht unbedeutende Einfluss der Brenn-atmosphäre auf die Neubildungskinetik.

Tabelle 34: Granulometrische und mineralogisch-chemische Zusammensetzung der Rohmaterialmischungen

Versuch Nr. Kiesschlamm-Typ	108 A	107 B	105 C	102 D	103 E	106 F	104 G
	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %
Tonfraktion < 0,002 mm	49,2	50,7	46,1	40,6	47,0	35,7	35,0
Schluff 0,002–0,02 mm	36,5	38,3	40,7	42,6	38,4	43,8	32,3
Sand > 0,02 mm	14,3	11,0	13,2	16,8	14,6	20,5	32,7
Quarz	14,8	17,5	18,7	22,8	18,1	22,1	21,1
Karbonate (Calcit und Dolomit)	34,7	28,7	21,3	29,1	25,9	17,0	34,3

3.5.4.2 Fabrikationsparameter

Aus jeder Mischung 50% Kiesschlamm + 50% Opalinuston sowie aus 100% Opalinuston (Vergleichsprobe) wurden Probekörper (5 × 3 × 12 cm) mit einer Laborpresse unter Vakuum bei konstanter Plastizität (12 mm HIBO) angefertigt. Unter diesen Bedingungen wurde eine einwandfreie Verpressung bei allen Mischungen mit Kiesschlamm erreicht. Eine Ausnahme bildete der reine Opalinuston, der steifer (10 mm

3.5.4 Laborversuche mit Mischungen aus Opalinuston und den sieben Kiesschlammtypen (Mischungsverhältnis: 50%/50%)

3.5.4.1 Zusammensetzung der Rohmaterialmischungen

Die Zusammensetzung der Rohmaterialmischungen (Tabelle 34) zeigt, je nach Zusammensetzung des zugegebenen Schlammes, typische Variationen:

- Die tonarmen Kiesschlämme Typ D, F und G ergeben relativ «magere» Mischungen mit einer Tonfraktion < 0,002 mm von 35–40%.
- Die relativ tonreicheren übrigen Kiesschlämme ergeben «fette» Mischungen mit 46–51% Tonfraktion.
- Im Karbonatgehalt kann zwischen den Rohmaterialmischungen Typ C und G (17–22% Karbonate) und den übrigen, kalkreicheren Mischungen (26–35% Karbonate) unterschieden werden.

HIBO) gepresst werden musste. Die Probekörper wurden anschliessend getrocknet und unter folgenden Bedingungen gebrannt:

- *-50°C / 1000°C / 5 Std.

-50°C / 1050°C / 5 Std.

Einfluss Brenntemperatur
- 50°C / 1000°C / 0 Std.

-25°C / 1000°C / 0 Std.

Einfluss Aufheizgeschwindigkeit

* Aufheizzeit / max. Brenntemperatur / Haltezeit

Mit dem Zusatz von Kiesschlamm werden die Trocken- und Brennschwindungen allgemein deutlich herabgesetzt, dies besonders bei den tonarmen und sandreichen Kiesschlamm (Typ F und G), bei welchen sogar ein Wachsen beim Brennprozess eintreten kann.

3.5.4.3 Eigenschaften der gebrannten Probekörper

Mit der Kiesschlammzugabe können, im Vergleich zum reinen Opalinuston, allgemein gleich gute Druckfestig-

keiten bei niedrigeren Raumgewichten erreicht werden. Bezüglich Kalktreiber, Ausblühneigung und Reduktionskern schneiden die Mischungen mit Kiesschlammzugabe deutlich besser ab als der reine Opalinuston. Mit der Kiesschlammzugabe wird das Wassersaugvermögen und die Wasseraufnahme bei 5-Tage-Wasserlagerung stark erhöht. Schonende Heizgradienten von 25 °C/Std. ergeben bei einigen Mischungen mit Kiesschlamm besonders hohe Druckfestigkeiten.

Tabelle 35: Eigenschaften der gebrannten Probekörper

Versuch Nr. Kiesschlamm	543	108 50% Typ A	107 50% Typ B	105 50% Typ C	102 50% Typ D	103 50% Typ E	106 50% Typ F	104 50% Typ G
Opalinuston	100%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
50 °C / 1000 °C / 5 h*								
Raumgewicht kg/dm ³	1,83	1,56	1,64	1,63	1,63	1,59	1,63	1,61
Druckfestigkeit N/mm ²	56,2	36,8	38,8	60,9	61,6	47,7	52,3	60,2
Wassersaugvermögen g/dm ² /min.	3,8	44,6	29,8	21,1	35,2	35,2	33,3	28,1
Wasseraufnahme** Gew. %	8,3	19,7	17,3	15,4	17,0	17,0	16,9	18,6
Anzahl Kalktreiber	4	0	0	0	0	0	0	0
Ausblühneigung	mittel	stark	sehr schwach	0	0	0	0	0
Reduktionskern	stark	0	0	0	0	0	0	0
50 °C / 1050 °C / 5 h								
Raumgewicht kg/dm ³	1,79	1,51	1,63	1,75	1,67	1,63	1,64	1,61
Druckfestigkeit N/mm ²	71,8	42,3	52,1	83,9	43,9	59,8	55,3	62,3
Wassersaugvermögen g/dm ² /min.	0	43,1	37,2	14,9	35,9	28,7	26,7	35,2
Wasseraufnahme Gew. %	5,7	21,5	17,0	11,6	17,1	16,3	15,3	17,5
Anzahl Kalktreiber	0	0	0	0	0	0	0	0
Ausblühneigung	mittel	stark	0	0	0	0	0	mittel
Reduktionskern	stark	0	0	0	0	0	0	0
50 °C / 1000 °C / 0 h								
Raumgewicht kg/dm ³	1,82	1,57	1,63	1,66	1,63	1,62	1,64	1,56
Druckfestigkeit N/mm ²	40,0	28,9	35,0	36,6	57,6	41,3	33,0	61,9
Wassersaugvermögen g/dm ² /min.	7,6	22,3	22,3	14,4	21,1	21,6	26,7	27,2
Wasseraufnahme Gew. %	10,3	19,2	17,7	15,4	16,2	17,0	16,0	18,5
Anzahl Kalktreiber	12	6	1	1	0	10	1	1
Ausblühneigung	mittel	schwach	stark	schwach	stark	schwach	0	sehr schwach
Reduktionskern	stark	0	0	0	0	0	0	0
25 °C / 1000 °C / 0 h								
Raumgewicht kg/dm ³	1,84	1,64	1,75	1,67	1,74	1,70	1,64	1,63
Druckfestigkeit N/mm ²	53,9	33,9	52,1	54,1	103,1	69,5	45,3	66,7
Wassersaugvermögen g/dm ² /min.	3,8	15,2	15,8	14,4	22,3	14,9	33,3	28,1
Wasseraufnahme Gew. %	9,8	19,6	14,9	15,0	15,1	15,0	16,8	17,4
Anzahl Kalktreiber	2	13	1	0	3	11	1	0
Ausblühneigung	mittel	schwach	stark	schwach	mittel	schwach	0	sehr schwach
Reduktionskern	stark	0	0	0	0	0	0	0

* Brennbedingungen: Aufheizgeschwindigkeit / Brenntemperatur / Haltezeit bei max. Brenntemperatur

** Wasseraufnahme bei einer 5-Tage-Wasserlagerung

Tabelle 36: Mineralogische Zusammensetzung der gebrannten Probekörper (Brennbedingungen: 50 °C/h–1050 °C–5 h)

Versuch Nr. Kiesschlamm	543	108 50% Typ A	107 50% Typ B	105 50% Typ C	102 50% Typ D	103 50% Typ E	106 50% Typ F	104 50% Typ G
Opalinuston	100%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %
Quarz	8	8	6	8	11	7	14	11
Plagioklas	24	9	16	22	15	20	22	6
Diopsid	–	13	16	15	19	19	16	23
Wollastonit	–	9	7	–	5	3	–	3
Gehlenit	–	14	–	Spuren	Spuren	–	–	5
Hämatit	2	2	1	1–2	1	1–2	3	Spuren
Glasphase, Amorphe Phase	66	45	54	53	49	49	45	52

3.5.4.4 Mineralogische Zusammensetzung der gebrannten Körper

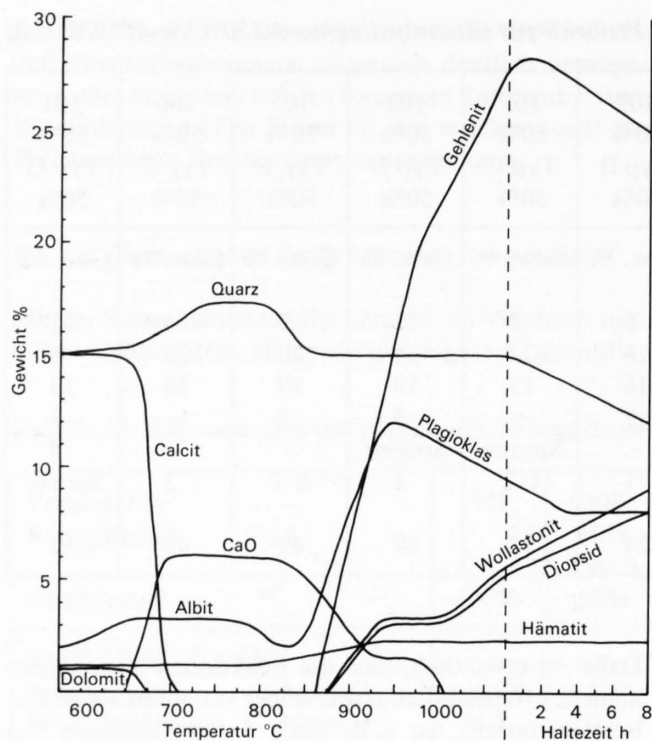
Die mineralogische Zusammensetzung der bei 1050 °C und 5 Std. Haltezeit gebrannten Probekörper wurde quantitativ mit dem Röntgendiffraktometer ermittelt (vgl. Tabelle 36).

Durch die Zugabe von Kiesschlamm wird die Entstehung von kristallinen Neubildungsphasen deutlich gefördert. Neben Plagioklas, der im Probekörper mit reinem Opalinuston als einzige Neubildung auftritt, bilden sich in den Probekörpern mit Kiesschlammzusatz reichlich Diopsid und Wollastonit. In den Proben aus den besonders kalkreichen Mischungen Nr. 104 und 108 wird noch die metastabile Phase Gehlenit beobachtet.

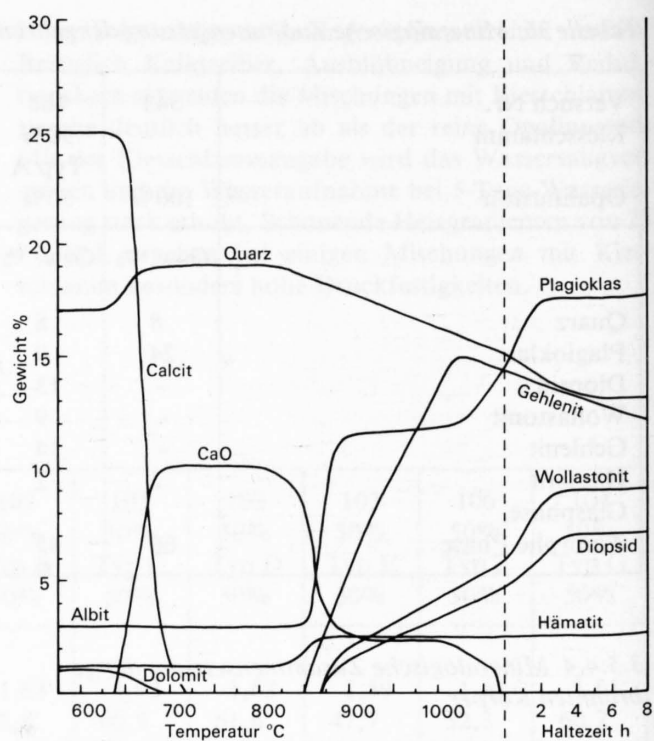
Mit der Röntgenheizkamera wurde von den verschiedenen Rohmaterialmischungen der Verlauf der Mineralreaktionen während des Brandes verfolgt (vgl. Fig. 16).

Dabei ist ersichtlich, dass die Reaktionen in der Heizkamera offensichtlich etwas träger verlaufen als im Laborelektroofen, wo z.B. nach 5 Std. Haltezeit bei 1050 °C in den meisten Proben kein Gehlenit mehr festzustellen ist, im Gegensatz zu den Heizkamera-Proben, die bei gleichen Bedingungen gebrannt worden sind.

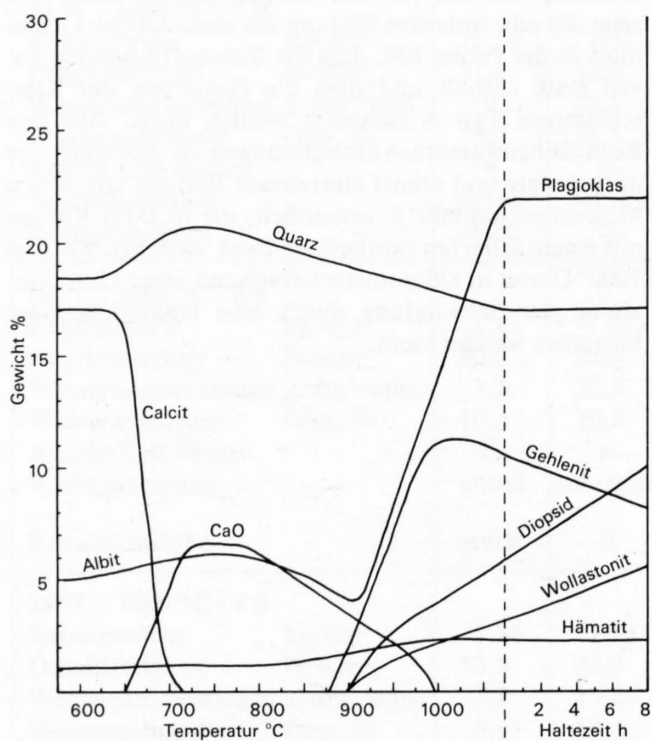
Indikativ für jede Rohstoffmischung sind jedoch der generelle Verlauf sowie die Intensität der einzelnen Reaktionen und die Art der neugebildeten Phasen. So zeigt die sehr intensive Bildung des metastabilen Gehlenites in der Probe 108, dass die Rohstoffmischung zu viel Kalk enthält und dass die Dosierung des Kiesschlammes Typ A reduziert werden muss. Aus den Röntgenheizkamera-Aufzeichnungen ist ebenfalls die ausgeprägte und scharf eintretende Bildung von neuen Mineralien um 900 °C ersichtlich, die in DTA-Kurven mit einem scharfen exothermen Peak zwischen 900 und 1000 °C und in Dilatometerkurven mit einer Unterbrechung der Schwindung durch eine Dilatationsphase korreliert werden kann.



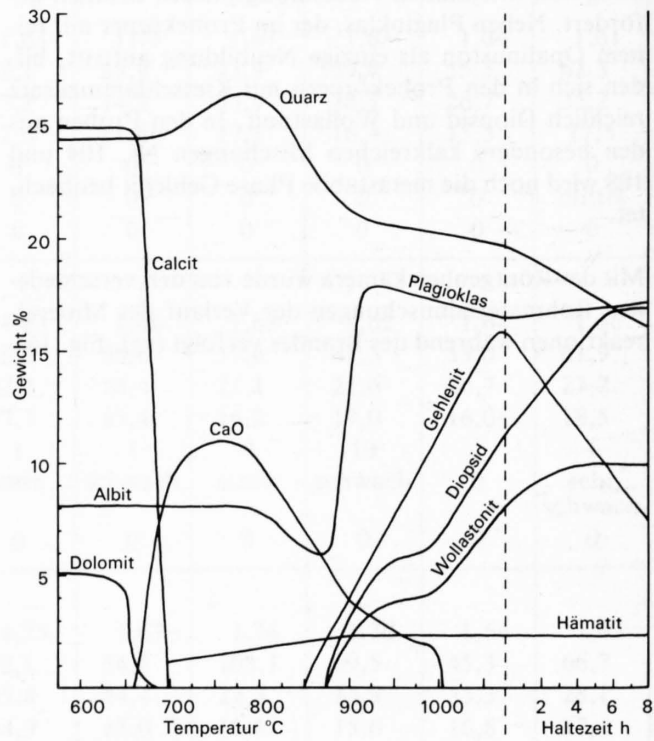
Kiesschlamm Typ A



Kiesschlamm Typ B

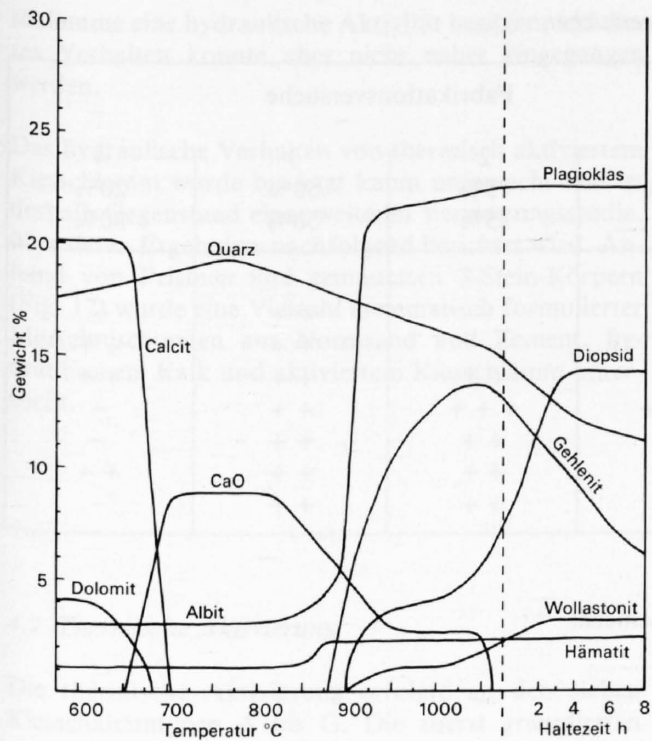


Kiesschlamm Typ C

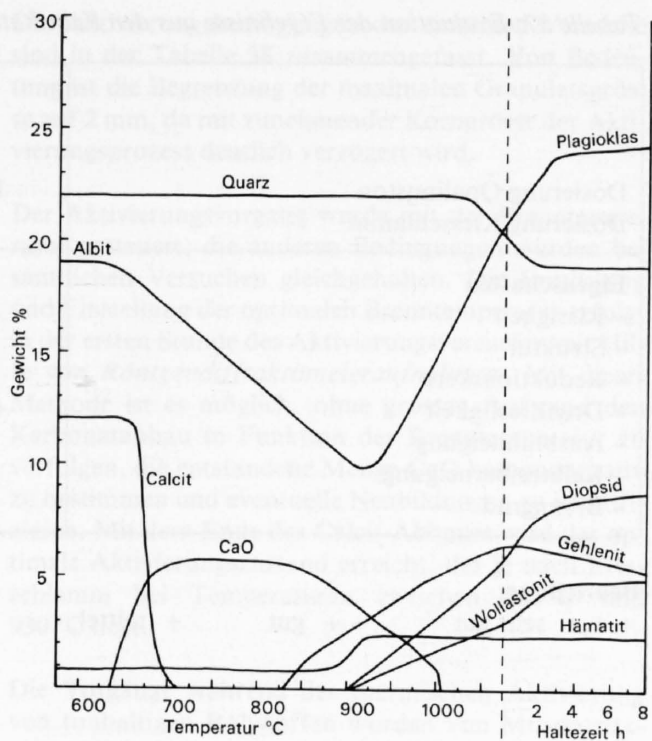


Kiesschlamm Typ D

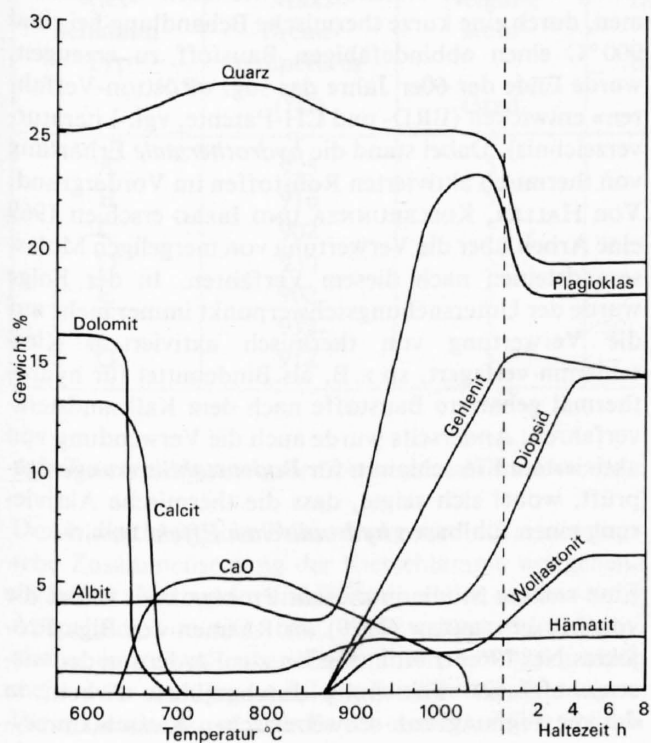
Fig. 16: Reaktionsverlauf der einzelnen Mineralphasen beim Brennen der Rohstoffmischungen aus 50% Opalinuston + 50% Kiesschlamm. Aufnahme mit der Röntgenheizkamera. Aufheizgeschwindigkeit: 1 °C/Min.



Kiesschlamm Typ E



Kiesschlamm Typ F



Kiesschlamm Typ G

Tabelle 37: Evaluation der Ergebnisse aus den Fabrikationsversuchen

	Fabrikationsversuche			
	1	2	3	4
	100%	75%	50%	20%
Dosierung Opalinuston	-	25%	50%	80%
Dosierung Kiesschlamm				
Eigenschaften				
- Rissigkeit	+	-	++	-
- Struktur	++	-	++	++
- Reduktionskern	-	++	++	++
- Druckfestigkeit	+++	+++	++	-
- Ausblühneigung	++	++	++	-
- Kalktreiberneigung	++	++	++	++
- Brenngrad	++	++	++	-

Beurteilung:
+++ sehr gut ++ gut + mittel - schlecht

3.5.5 Folgerungen

Aus der Evaluation der Ergebnisse der *Fabrikationsversuche* (vgl. Tabelle 37) ist ersichtlich, dass die Mischung 50% Opalinuston/50% Kiesschlamm Typ D gesamthaft die besten und ausgeglichensten Backsteineigenschaften ergibt. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass mit dieser Rohmaterialmischung ein gutes Produkt der BN-Qualität produziert werden kann.

Die durchgeführten *Laborversuche* zeigen, dass praktisch alle Kiesschlämme als Magerungskomponenten zum Opalinuston geeignet sind. Eine Ausnahme diesbezüglich bildet der sehr kalkreiche Kiesschlamm Typ A. Allerdings dürfte eine Reduktion der Kiesschlamm-dosierung deutlich unter 50% auch bei diesem Kiesschlammtyp zu positiven Ergebnissen führen.

Kiesschlämme können allgemein als wertvolle Zusatzkomponenten zum tonreichen, relativ kalkarmen Opalinuston qualifiziert werden. Die Wirkung dieser Magerungskomponente ist sowohl in der Fabrikation (Herabsetzung der Trocken- und Brennempfindlichkeit) als auch in Bezug auf die Endproduktqualität (Erhöhung der Porosität und des Wassersaugvermögens, Vergleichsmässigung der Gefügestruktur durch vermehrte Mineralneubildungen, Verbesserung der Schrotbarkeit, Verschwinden der qualitätsmindernden Reduktionskerne) als positiv zu werten. Allerdings muss der Einsatz von Kiesschlamm und insbesondere dessen optimale Dosierung im voraus durch Rohstoffanalysen, Laborversuche und vor allem Fabrikationsversuche von Fall zu Fall abgeklärt werden. Beim Kiesschlamm ist vor allem auf eine Korngrössenbegrenzung von max. 0,2 mm zu achten (Kalktreibergefahr beim Vorhandensein von gröberen Körnern).

4. Thermisch aktivierter Kiesschlamm als hydraulisches Bindemittel

4.1 Einleitung und Problemstellung

Durch die Idee, aus ton- und kalkhaltigen, *sogenannt wenig wertvollen Rohstoffen*, wie auch Kiesschlämmen, durch eine kurze thermische Behandlung bei rund 900 °C einen abbindefähigen Baustoff zu erzeugen, wurde Ende der 60er Jahre das sog. «Röstton-Verfahren» entwickelt (BRD- und CH-Patente, vgl. Literaturverzeichnis). Dabei stand die *hydrothermale* Erhärtung von thermisch aktivierten Rohstoffen im Vordergrund. Von HALLER, KOLLBRUNNER UND IBERG erschien 1969 eine Arbeit über die Verwertung von mergeligen Molasandesandsteinen nach diesem Verfahren. In der Folge wurde der Untersuchungsschwerpunkt immer mehr auf die Verwertung von thermisch aktiviertem Kiesschlamm verlagert, so z. B. als Bindemittel für hydrothermal gehärtete Baustoffe nach dem Kalksandsteinverfahren. Andererseits wurde auch die Verwendung von aktiviertem Kiesschlamm für *Bodenstabilisierungen* geprüft, wobei sich zeigte, dass die thermische Aktivierung einen fühlbaren *hydraulischen Effekt* bewirkt.

Eine weitere Studie in diesem Problemkreis bildet die von MUMENTHALER (1979) im Rahmen des Biga-Projektes Nr. 796 der Kommission zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung durchgeführte Arbeit, in der die Eignung von schweizerischen Kiesschlammtypen als hydrothermales Bindemittel untersucht wurde. Eingehend behandelt wurden dabei die *Mineralreaktionen*, die während des Brennens bei etwa 900 °C (sog. Aktivierung), der Hydratisierung und der hydrothermalen Erhärtung im Autoklav bei 200 °C ablaufen, sowie die physikalischen Eigenschaften an erhärteten Probekörpern. Auch bei diesen Untersuchungen wurde erkannt, dass vereinzelte thermisch aktivierte Kies-

schlämme eine hydraulische Aktivität besitzen, auf dieses Verhalten konnte aber nicht näher eingegangen werden.

Das hydraulische Verhalten von thermisch aktiviertem Kiesschlamm wurde bis jetzt kaum untersucht und ist deshalb Gegenstand einer weiteren Verwertungsstudie, über deren Ergebnisse nachfolgend berichtet wird. Anhand von Prismen und gemauerten 3-Stein-Körpern (Fig. 17) wurde eine Vielzahl systematisch formulierter Mörtelmischungen aus Normsand und Zement, hydraulischem Kalk und aktiviertem Kiesschlamm untersucht.

4.2 Thermische Aktivierung

Die thermische Aktivierung erfolgte an den sieben Kiesschlammtypen A bis G. Die zuerst granulierten und getrockneten Kiesschlämme wurden in einem Labordrehrohr-Ofen aktiviert.

Die Aktivierungsbedingungen der einzelnen Versuche sind in der Tabelle 38 zusammengefasst. Von Bedeutung ist die Begrenzung der maximalen Granulatsgrösse auf 2 mm, da mit zunehmender Korngrösse der Aktivierungsprozess deutlich verzögert wird.

Der Aktivierungsvorgang wurde mit der Brenntemperatur gesteuert, die anderen Bedingungen wurden bei sämtlichen Versuchen gleichgehalten. Die Ermittlung und Einstellung der optimalen Brenntemperatur erfolgt in der ersten Stunde des Aktivierungsversuches mit Hilfe von *Röntgendiffraktometeraufnahmen*. Mit dieser Methode ist es möglich, ohne grossen Aufwand den Karbonatabbau in Funktion der Brenntemperatur zu verfolgen, die entstandene Menge CaO halbquantitativ zu bestimmen und eventuelle Neubildungen zu identifizieren. Mit dem Ende des Calcit-Abbaues wird der optimale Aktivierungszustand erreicht, der je nach Kiesschlamm bei Temperaturen zwischen 900°C und 930°C liegt.

Die Vorgänge während der thermischen Aktivierung von tonhaltigen Rohstoffen wurden von MUMENTHALER (1979), ZGRAGGEN UND PETERS (1980) sowie BÜHLER (1986) eingehend beschrieben.

Tabelle 38: Aktivierungsbedingungen der sieben Kiesschlammtypen

Kies-schlamm Typ	Max. Brenn- temperatur (°C)	Neigung Rohr Grad	Drehzahl Rohr pro Min.	Menge akt. Material pro Min. (g)	Durchlaufzeit Material (Min.)	Korngrösse des Granulates (mm)
A	925	5	11,5	35-45	2-3	0-2
B	916	5	11,5	35-45	2-3	0-2
C	902	5	11,5	35-45	2-3	0-2
D	930	5	11,5	35-45	2-3	0-2
E	902	5	11,5	35-45	2-3	0-2
F	912	5	11,5	35-45	2-3	0-2
G	912	5	11,5	35-45	2-3	0-2

4.3 Zusammensetzung der aktivierten Kiesschlämme

Durch die thermische Behandlung wird die mineralogische Zusammensetzung der Kiesschlämme weitgehend verändert; Karbonate und Tonminerale werden unter Abspaltung von CO₂ bzw. H₂O weitgehend zerstört, und es entstehen, neben CaO, amorphe Phasen sowie mehr oder weniger stabile kristalline Neubildungen. Diese Gemische, in Tabelle 39 charakterisiert, bilden das Ausgangsmaterial für die Mörtelversuche.

Das durch die thermische Behandlung umgesetzte CaO liegt einerseits in mehr oder wenig stabilen kristallinen Neubildungen wie Gehlenit (2 CaO · Al₂O₃ · SiO₂) und C₂S (2 CaO · SiO₂) und andererseits wahrscheinlich in Teilschmelzen und amorphen Verbindungen vor. Interessant ist festzustellen, dass mit zunehmendem Tonmi-

neralienanteil im Rohschlamm das Verhältnis gebundenes CaO/freies CaO im aktivierten Kiesschlamm zunimmt. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Bindung des frei werdenden CaO während des sehr kurzen Aktivierungsprozesses (2-3 Minuten!) hauptsächlich durch Festkörperreaktionen und Teilschmelzen mit Tonmineralien erfolgt.

Nach der thermischen Aktivierung wurde das Granulat gemahlen (Laborprallmühle) und bei 0,1 mm gesiebt. Das Material wurde in dichten Plastiksäcken trocken bis zu den jeweiligen Mörtelversuchen aufbewahrt. Die spezifische Oberfläche und der Siebrückstand dieser Proben sind aus Tabelle 40 ersichtlich.

Tabelle 39: Zusammensetzung der aktivierten Kiesschlämme

Kiesschlamm-Typ Herkunft	A Region Genfersee	B Region Fribourg	C Region Aarau/Luzern	D Region Zürich	E Region Zug	F Region Chur	G Region Bodensee
	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰
Glühverlust bei 1000 °C	1,1	1,95	1,5	1,1	1,33	0,9	1,3
CO ₂	0,55	1,0	0,72	0,5	0,2	0,65	1,0
H ₂ O	0,55	0,95	0,78	0,6	1,1	0,25	0,3
Tot. CaO ¹	51,3	26,0	19,9	27,5	29,7	14,0	36,1
Tot. MgO ¹	2,8	3,3	3,5	3,9	3,7	3,2	9,8
freies CaO ²	33,2	14,3	10,0	21,3	13,2	10,5	27,0
gebundenes CaO ³	18,1	11,7	9,9	6,2	16,5	3,5	9,1
CaCO ₃	1,2	2,0	1,5	1,5	0,4	1,2	1,3
Ca(OH) ₂	2,3	3,9	3,2	2,5	4,5	1,0	1,2
Quarz	ca. 15	ca. 20–25	ca. 25	ca. 35	ca. 20	ca. 40	ca. 30
Feldspäte (Albit. K-Feldspat)	ca. 10	10	15	20	10	25	10
Gehlenit } C ₂ S }	7 ++	7 +	4 +	4 +	5 +	1–2 Spuren	> 1 +
Neubildungen							

¹ lösliches CaO und MgO in HCL 6-n

² nach der Zucker-Methode

³ Differenz totales CaO – freies CaO

+ = wenig

++ = mittel

Tabelle 40: Siebrückstände und spezifische Oberfläche der aktivierten, gemahlenen Kiesschlämme

Kiesschlamm-Typ	A	B	C	D	E	F	G
Siebrückstände ‰ > 0,09 mm	5,5	4,4	6,0	5,8	5,0	7,6	4,0
Spezifische Oberfläche nach Blaine (cm ² /g)	16 150	9300	8120	5490	8790	5610	7540

4.4 Versuche mit aktiviertem Kiesschlamm

Anhand von insgesamt 33 Mörtelmischungen (vgl. Tabelle 41) mit den folgenden Materialkomponenten

- Normsand der T.F.B. Wildegg gemäss Norm SIA 215 (1978)
- Schweizerischer Portlandzement (PC)
- Schweizerischer hydraulischer Kalk (HK)
- sieben aktivierte Kiesschlämme (AS), Typ A bis G

wurde die Wirkung von aktiviertem Kiesschlamm als hydraulisches Bindemittel untersucht.

Die Mischungsverhältnisse Sand/Bindemittel, in Gew.-% bezogen auf die Trockenmischungen ausgedrückt, liegen zwischen 86%/14% und 81%/19%.

Die Aufbereitung der Mörtelmischungen sowie die Herstellung und Lagerung erfolgte grundsätzlich nach der Norm SIA 215 «Mineralische Bindemittel», jedoch mit folgenden Abweichungen:

- Die Wasserdosierung der verschiedenen Mörtelmischungen wurde nicht konstant gehalten, sondern erfolgte in Funktion einer konstanten, vorgegebenen Konsistenz des Mörtelbreies (50 mm Ausbreitmass);
- Die Lagerung der Mörtelprismen 40×40×160 mm erfolgte in geschlossenen Kesseln bei 20 °C und 100% relativer Feuchtigkeit.

Parallel zu der normalen, atmosphärischen Härtung wurden Mörtelprismen 40×40×160 mm im Laborautoklav gehärtet. Härtezyklus: zwei Stunden Aufheizzeit von 20 °C bis 200 °C (16 at), sechs Stunden Haltezeit bei 200 °C und anschliessend drei Stunden Abkühl-

zeit bis 20°C. Mit jeder Mörtelmischung wurden zusätzlich 3-Stein-Körper mit Backsteinen der BN-Qualität angefertigt (vgl. Fig. 17).

Tabelle 41: Mörtelmischungen

Ver- such	Formulierung der Mörtelmischungen Dosierung in kg pro m³ Frischmörtel		
	Zement PC	Hydr. Kalk HK	Akt. Kies- schlamm AS
Nr.	PC	HK	AS
1.1	300	–	–
1.2	300	50	–
1.3	300	–	50
2.1	250	100	–
2.2	250	–	100
3.1	100	250	–
3.2	100	–	250
4.1	–	300	–
4.2	–	–	300

4.5 Eigenschaften der Frischmörtel

Durch die Zugabe von aktiviertem Schlamm zu Portlandzement werden, bei gleichbleibender Konsistenz,

die Eigenschaften des Frischmörtels in Funktion des freien CaO vom aktivierten Schlamm deutlich verändert. So wird mit zunehmendem freiem CaO das W/B-Verhältnis und die Temperatur des Frischmörtels stark erhöht sowie dessen Raumgewicht herabgesetzt. Bei der Zugabe von hydraulischem Kalk ist eine ähnliche Veränderung zwar erkennbar, diese bleibt aber selbst bei höheren HK-Dosierungen schwach. Die Verarbeitbarkeit des Frischmörtels wird durch die Zugabe von AS allgemein verbessert, indem die Mörtelmasse plastischer wird. Negativ zu werten ist allerdings der erhöhte Wasserbedarf der Mörtelmischungen mit AS, was die Festigkeitseigenschaften der Mörtelproben allgemein verschlechtert (Tabelle 42).

Die Hydratation des Portlandzementes ist durch eine ausgeprägte Wärmeentwicklung gekennzeichnet, die etwa fünf Stunden nach dem Anmachen mit Wasser einsetzt. Sie ist auf die Hydratation der Klinkerphasen des Zementes und ihre progressive Umwandlung in gel-förmige CSH-Phasen und Ca(OH)₂ (Portlandit) zurückzuführen. Dieser Prozess führt zu einer deutlichen Verfestigung des Zementgefüges und kann als erste und wichtigste Abbindephase bezeichnet werden. Durch die simultane Aufnahme der Wärmeentwicklung von Portlandzement mit zunehmendem Anteil an aktiviertem Schlamm vom Typ B bzw. an hydraulischem Kalk wurde versucht, den Einfluss dieser zwei Zusätze auf den Abbindevorgang des Zementes abzuklären. Aus den Figuren 18 und 19 ist ersichtlich, dass der Zusatz von aktiviertem Kiesschlamm den Abbindevorgang von PC beschleunigt, im Gegensatz zum eher als Verzögerer wirkenden hydraulischen Kalk.

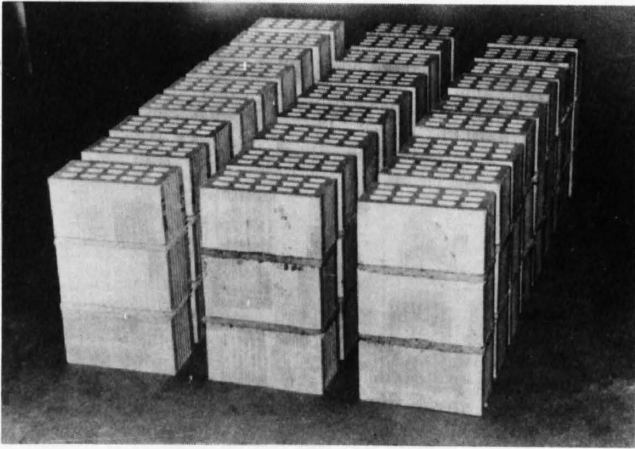
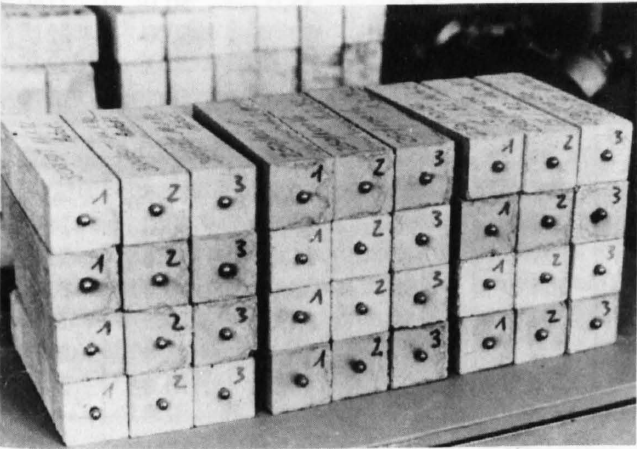


Fig. 17: Versuchskörper. Links: Mörtelprismen 40×40×160 mm. Rechts: 3-Stein-Körper

Tabelle 42: Zusammensetzung und Eigenschaften der Frischmörtel

Versuch Nr.	Formulierung Mörtelmischungen			Effektiver Bindemittelgehalt			W/Z bzw. W/B*	Temperatur °C	Konsistenz: Ausbreitmass in cm	Raumgewicht kg/m³
	Dosierung in kg pro m³ Frischmörtel			in kg pro m³ Frischmörtel						
	PC	HK	AS	PC	HK	AS				
1.1	300	-	-	290	-	-	0,80	20	50,5	2310
1.2	300	50	-	296	49	-	0,65	22,5	50,0	2280
1.3	300	-	50 A	305	-	51 A	0,73	25,5	50,0	2280
	300	-	50 B	293	-	49 B	0,66	22,0	49,5	2270
	300	-	50 C	299	-	50 C	0,66	23,5	50,0	2270
	300	-	50 D	305	-	51 D	0,66	22,5	50,0	2310
	300	-	50 E	301	-	50 E	0,67	22,5	50,0	2280
	300	-	50 F	292	-	49 F	0,70	21,0	50,0	2270
	300	-	50 G	294	-	49 G	0,68	22,5	50,0	2290
	2.1	250	100	-	250	100	-	0,67	24	51,0
2.2	250	-	100 A	234	-	94 A	0,97	32,5	50,0	2160
	250	-	100 B	260	-	104 B	0,67	24,0	50,0	2280
	250	-	100 C	246	-	98 C	0,72	26,0	50,0	2260
	250	-	100 D	252	-	101 D	0,70	26,0	49,5	2270
	250	-	100 E	249	-	99 E	0,71	24,5	50,5	2260
	250	-	100 F	248	-	99 F	0,70	22,5	50,5	2250
	250	-	100 G	249	-	100 G	0,72	27,0	50,0	2250
	3.1	100	250	-	102	255	-	0,69	22	50,5
3.2	100	-	250 A	105	-	262 A	1,14	46,5	50,5	2040
			250 B	101	-	253 B	0,71	27,0	49,5	2230
			250 C	99	-	249 C	0,83	30,0	50,0	2200
			250 D	98	-	246 D	0,89	35,0	50,0	2180
			250 E	98	-	244 E	0,84	30,0	50,0	2210
			250 F	101	-	252 F	0,75	25,5	49,5	2220
			250 G	99	-	248 G	0,91	38,0	50,5	2170
	4.1	-	300	-	-	304	-	0,79	21,5	50,0
4.2	-	-	300 A	-	-	313 A	1,24	50,0	49,5	2060
			300 B	-	-	293 B	0,95	33,0	50,0	2190
			300 C	-	-	299 C	0,91	31,0	50,0	2170
			300 D	-	-	304 D	0,98	34,0	50,0	2170
			300 E	-	-	303 E	0,89	32,0	50,5	2170
			300 F	-	-	302 F	0,91	26,5	53,0	2190
			300 G	-	-	280 G	1,07	40,5	50,0	2090

* Wasser/Zement- bzw. Wasser/Bindemittel (PC + HK + AS)-Verhältnis

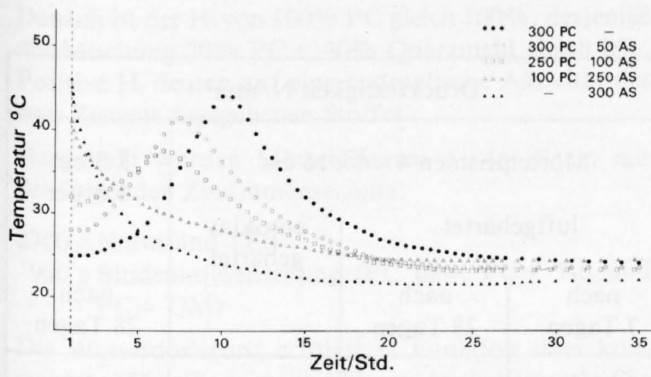


Fig. 18: Wärmeentwicklung während der Hydratation der Bindemittelmischung PC+ aktivierter Kiesschlamm (AS Typ B)

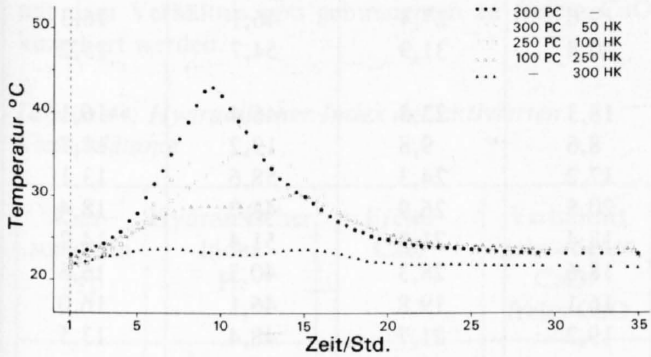


Fig. 19: Wärmeentwicklung während der Hydratation der Bindemittelmischung PC+ hydraulischer Kalk (HK)

4.6 Physikalische Eigenschaften der gehärteten Mörtel

Aus der Druckfestigkeitsprüfung der Mörtelprismen und 3-Stein-Körper können folgende Erkenntnisse gezogen werden:

- Die autoklavgehärteten Mörtelprismen zeigen höhere Druckfestigkeiten als die normalerhärteten Prismen. Eine deutliche Parallelität besteht jedoch zwischen diesen zwei Druckfestigkeitsreihen, indem mit zunehmender Dosierung von AS bzw. HK ein beinahe linearer Abfall der Festigkeiten festgestellt werden kann (vgl. Fig. 20 und Tabelle 43).
- Die Druckfestigkeit der 3-Stein-Körper liegt bei höherer Zementdosierung deutlich unter der Druckfestigkeit der normalgehärteten Mörtelprismen. Da aber mit zunehmender AS- bzw. HK-Dosierung nur ein verhältnismässig kleiner Festigkeitsabfall eintritt, liegen die Druckfestigkeiten der 3-Stein-Körper bei hohen AS- bzw. HK-Dosierungen höher als die der normalgehärteten Mörtelprismen (vgl. Fig. 20 und Tabelle 43).

- Die aktivierten Kiesschlammtypen B, C und E zeigen bei der Normalhärtung ähnliche Festigkeitseigenschaften wie der hydraulische Kalk (HK). Dagegen liegen die AS-Typen A, D, F und G festigkeitsmässig schlechter. Dabei kann die Abhängigkeit zwischen der Druckfestigkeit der Mörtelprismen mit AS 300 und dem Verhältnis gebundenes CaO/freies CaO der aktivierten Kiesschlämme erkannt werden (vgl. Fig. 21).
- Bei kleineren AS-Dosierungen (bis etwa 100 kg/m³ Frischmörtel) zum PC werden allgemein recht gute Festigkeitseigenschaften erzielt, die oft höher liegen als die der Mischungen mit den gleichen HK-Dosierungen.

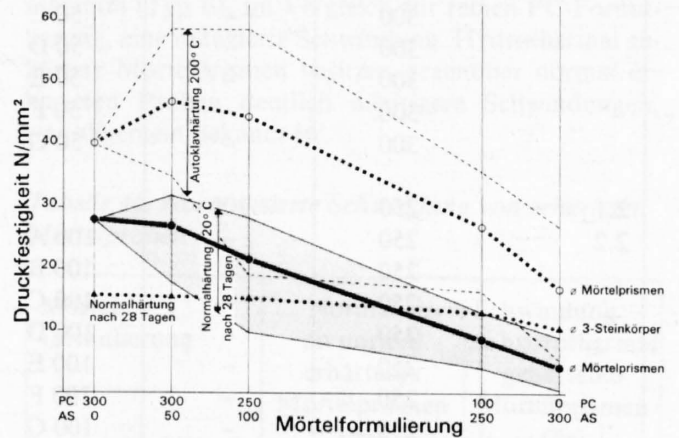


Fig. 20: Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Zugabe von thermisch aktiviertem Kiesschlamm zu Zement

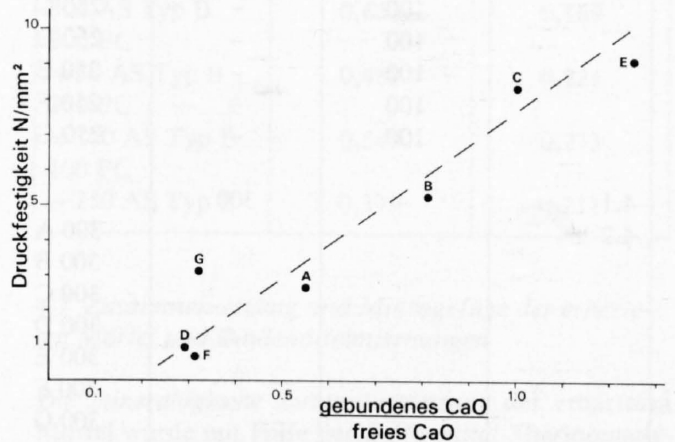


Fig. 21: Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Verhältnisses gebundenes CaO/freies CaO im aktivierten Kiesschlamm (Mörtelprismen mit AS 300)

Tabelle 43: Druckfestigkeit der gehärteten Mörtel

Versuch Nr.	Formulierung Mörtelmischungen			Druckfestigkeit N/mm ²				
				Mörtelprismen 4 × 4 × 16 cm			3-Stein- Körper	
	Dosierung in kg pro m ³ Frishmörtel			luftgehärtet		autoklav gehärtet		
	PC	HK	AS	nach 7 Tagen	nach 28 Tagen			nach 28 Tagen
1.1	300	–	–	23,3	27,9	40,1	15,9	
1.2	300	50	–	21,7	23,4	48,0	15,8	
1.3	300	–	50 A	18,6	17,9	35,0	15,3	
	300	–	50 B	22,4	26,5	42,2	13,7	
	300	–	50 C	21,4	28,3	50,6	17,0	
	300	–	50 D	20,0	25,0	58,6	15,7	
	300	–	50 E	26,3	31,1	41,9	16,4	
	300	–	50 F	19,6	27,4	46,1	16,3	
	300	–	50 G	20,8	31,9	54,7	15,2	
	2.1	250	100	–	18,3	22,5	46,4	16,1
	2.2	250	–	100 A	8,6	9,8	19,2	14,7
250		–	100 B	17,2	24,3	58,6	13,1	
250		–	100 C	20,5	26,9	48,0	18,4	
250		–	100 D	18,4	21,3	51,4	14,7	
250		–	100 E	18,6	28,3	40,3	16,6	
250		–	100 F	16,1	19,8	46,1	16,0	
250		–	100 G	19,2	21,7	48,4	13,5	
3.1		100	250	–	8,9	14,8	47,8	15,6
3.2	100	–	250 A	2,8	4,2	16,4	12,3	
	100	–	250 B	4,2	10,9	35,9	12,3	
	100	–	250 C	9,7	14,3	24,8	13,9	
	100	–	250 D	2,2	4,5	31,8	11,6	
	100	–	250 E	8,6	13,0	17,0	15,2	
	100	–	250 F	3,0	5,8	31,5	13,6	
	100	–	250 G	4,7	8,1	31,1	12,5	
	4.1	–	300	–	5,6	7,1	19,5	12,2
4.2	–	–	300 A	2,0	2,7	20,3	11,8	
			300 B	1,5	5,3	18,2	10,0	
			300 C	4,6	8,6	8,8	10,2	
			300 D	0,9	0,9	23,8	8,3	
			300 E	4,9	9,1	13,9	13,0	
			300 F	1,1	0,7	6,6	9,4	
			300 G	1,6	3,1	26,9	10,5	

Als weitere Möglichkeit zur Quantifizierung der hydraulischen Aktivität der thermisch behandelten Kiesschlämme wurde die Bestimmung des *hydraulischen Index* (H_i) nach KEIL (1971) herangezogen.

Der hydraulische Index (H_i) wird nach der folgenden Gleichung bestimmt:

$$H_i = \frac{D_{28} \left(\begin{smallmatrix} 70\% \text{ PC} \\ 30\% \text{ AS} \end{smallmatrix} \right) - D_{28} \left(\begin{smallmatrix} 70\% \text{ PC} \\ 30\% \text{ QM} \end{smallmatrix} \right)}{D_{28} (100\% \text{ PC}) - D_{28} \left(\begin{smallmatrix} 70\% \text{ PC} \\ 30\% \text{ QM} \end{smallmatrix} \right)} \cdot 100$$

D₂₈ = Druckfestigkeit Mörtelprismen nach 28 Tagen
PC = Portlandzement
AS = thermisch aktivierter Kiesschlamm
QM = Quarzmehl < 0,1 mm (Blaine: 4100 cm²/g)

Danach ist der H_i von 100% PC gleich 100%, derjenige der Mischung 70% PC + 30% Quarzmehl gleich 0%. Positive H_i deuten auf eine hydraulische Aktivität des zum Zement zugegebenen Stoffes.

Hergestellt wurden Mörtelprismen 4×4×16 cm mit der folgenden Zusammensetzung:

- 2700 g Normsand TFB
- 900 g Bindemittelmischung (PC bzw. PC + AS und PC + QM)

Die Wasserdosierung erfolgte in Funktion einer konstanten Mörtelkonsistenz (50 cm Ausbreitmass). Die Herstellung und die Lagerung der Mörtelprismen wurde nach den ISO-Vorschriften durchgeführt. Wie aus Tabelle 44 zu entnehmen ist, zeigen die aktivierten Kiesschlämme B, C, E positive H_i -Werte, bei allen anderen Proben waren diese negativ. Die H_i -Werte können einerseits mit dem freien CaO und andererseits mit dem Verhältnis von gebundenem zu freiem CaO korreliert werden.

Tabelle 44: Hydraulischer Index der aktivierten Kiesschlämme

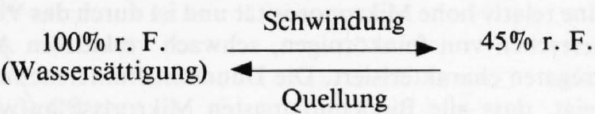
Kies-schlamm Typ	Hydraulischer Index H_i	Freies CaO	Verhältnis gebundenes CaO/ freies CaO
A	- 259	33,2	0,54
B	+ 7	14,3	0,82
C	+ 75	10,0	0,99
D	- 92	21,9	0,29
E	+ 41	13,2	1,25
F	- 58	10,5	0,33
G	- 51	27,0	0,34

Die normal erhärteten Mörtelprismen mit aktiviertem Kiesschlamm oder hydraulischem Kalk als Bindemittel zeigen *deutlich tiefere E-Moduli* als die mit Portlandzement, wobei dieser Abfall bei den Proben mit aktiviertem Kiesschlamm etwas ausgeprägter ist (Tabelle 45).

Tabelle 45: E-Modul von Mörtelprismen

Mörtel-formulierung	E-Modul	
	normal erhärtete Mörtelprismen (N/mm ²)	hydrothermal gehärtete Mörtelprismen (N/mm ²)
300 PC	34000	23680
300 HK	9300	12700
100 PC + 250 HK	22500	23980
300 AS Typ B	7700	15170
100 PC + 250 AS Typ B	15800	12690

Die Messung der *normalisierten Schwindung* (= reversible Schwindung) an erhärteten Mörtelprismen in Funktion der relativen Feuchtigkeit:



zeigt bei den normal erhärteten Mörtelprismen und je nach Mörtelformulierung ein recht unterschiedliches Bild (Tabelle 46). Während die Mörtelprismen mit hydraulischem Kalk (HK) deutlich höhere Schwindungen zeigen als die Mörtelkörper mit reinem Portlandzement, bewirkt die Zugabe von aktiviertem Kiesschlamm (Typ B), im Vergleich zur reinen PC-Formulierung, eine reduzierte Schwindung. Hydrothermal gehärtete Mörtelprismen besitzen gegenüber normal erhärteten Proben deutlich niedrigere Schwindungen, was allgemein bekannt ist.

Tabelle 46: Normalisierte Schwindung von erhärteten Mörtelproben

Mörtel-formulierung	Normalisierte Schwindung	
	an normal erhärteten Mörtelprismen (‰)	an hydrothermal gehärteten Mörtelprismen (‰)
300 PC	0,684	0,232
300 HK	0,873	0,360
100 PC + 250 HK	0,864	0,379
300 AS Typ B	0,653	0,169
300 PC + 50 AS Typ B	0,483	0,221
250 PC + 100 AS Typ B	0,548	0,273
100 PC + 250 AS Typ B	0,379	0,211

4.7 Zusammensetzung und Mikrogefüge der erhärteten Mörtel und Bindemittelmischungen

Die *mineralogische Zusammensetzung* der erhärteten Mörtel wurde mit Hilfe der *Differential-Thermoanalyse* (DTA) und der *Röntgendiffraktometrie* (XRD) untersucht. Stark dominierend sind die Mineralien aus der Sandkomponente (Quarz, Calcit, Dolomit, Feldspäte und Glimmer). Die Bindemasse der normal erhärteten Proben besteht zur Hauptsache aus gelartigen, mineralogisch schlecht definierbaren Verbindungen und teilweise Ca(OH)₂, die der hydrothermal gehärteten Mörtelproben aus 11Å Tobermorit und semi-kristallinen CSH-Phasen.

Das *Mikrogefüge* der reinen Zementpaste ist ziemlich dicht und gekennzeichnet durch eine sehr feine, diffuse Mikroporosität sowie durch eingebettete plattige Port-

landit-Kristallite ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$). Die Paste aus reinem hydraulischem Kalk zeigt eine etwas gröbere Mikroporosität und relativ viele, eher rundliche Körner (Quarz und Calcit). Der hydratisierte Kiesschlamm Typ B hat eine relativ hohe Mikroporosität und ist durch das Vorherrschen von feinkörnigen, schwach verkitteten Aggregaten charakterisiert. Die Dünnschliffuntersuchung zeigt, dass alle Bindemittelpasten Mikrorisse aufweisen, die teilweise durchgehend, teilweise aber nur einige Millimeter lang sind. Die Anzahl Rundporen wird mit der Zugabe von HK oder AS vom Typ B allgemein erhöht.

4.8 Klassifikation als Bindemittel

Im Unterschied zum Portlandzement, der als reines, homogenes Bindemittel definiert werden kann, stellen sowohl der hydraulische Kalk wie die aktivierten Kiesschlämme heterogene Gemische dar. Sie enthalten neben der eigentlichen hydraulischen Bindemasse noch erhebliche Anteile an nicht hydraulischen Komponenten,

wie Calcit und Quarz beim hydraulischen Kalk, CaO , Quarz und Feldspäte bei den aktivierten Kiesschlämmen, die z. T. als Filler qualifiziert werden können. Von Interesse für eine Klassifikation der aktivierten Kiesschlämme als Bindemittel sind vor allem Menge und Zusammensetzung der Bindemasse. Diese Merkmale können aus der Menge löslichem SiO_2 , umgesetztem CaO und Al_2O_3 aus den Tonmineralien abgeleitet werden (Tabelle 47).

Daraus ist ersichtlich, dass die aktivierten Kiesschlämme recht unterschiedliche Bindemassenanteile besitzen, die einen direkten Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften der entsprechenden Mörtel haben. Andererseits ergibt die Umrechnung auf 100% Bindemasse die approximative Zusammensetzung des hydraulischen Anteils (Tabelle 47), die im *Ranking-Diagramm* mit anderen hydraulischen Bindemitteln verglichen werden kann (Fig. 22). Auffallend dabei ist, dass die hier dargestellten aktivierten Kiesschlammtypen von der Bindemasse her nahe beim hydraulischen Kalk liegen.

Tabelle 47: Menge und Zusammensetzung der Bindemasse am Beispiel von hydraulischem Kalk und drei aktivierten Kiesschlämmen (E, G und D)

	HK	aktivierte Kiesschlämme		
	(Gew.-%)	Typ E (Gew.-%)	Typ G (Gew.-%)	Typ D (Gew.-%)
lösliches SiO_2^*	11,6	11,9	4,6	3,5
umgesetztes CaO	22,1	16,3	8,4	5,4
Al_2O_3 aus Tonmineralien	ca. 8	ca. 7,5	ca. 5	ca. 2
Bindemasse	41,7	35,7	18,0	10,9
Umrechnung auf 100% Bindemasse				
SiO_2	27,8	33,4	25,7	32,4
CaO	53,0	45,6	46,5	49,2
Al_2O_3	19,2	21,0	27,8	18,4
Total	100,0	100,0	100,0	100,0

* nach FLORENTIN (1926)

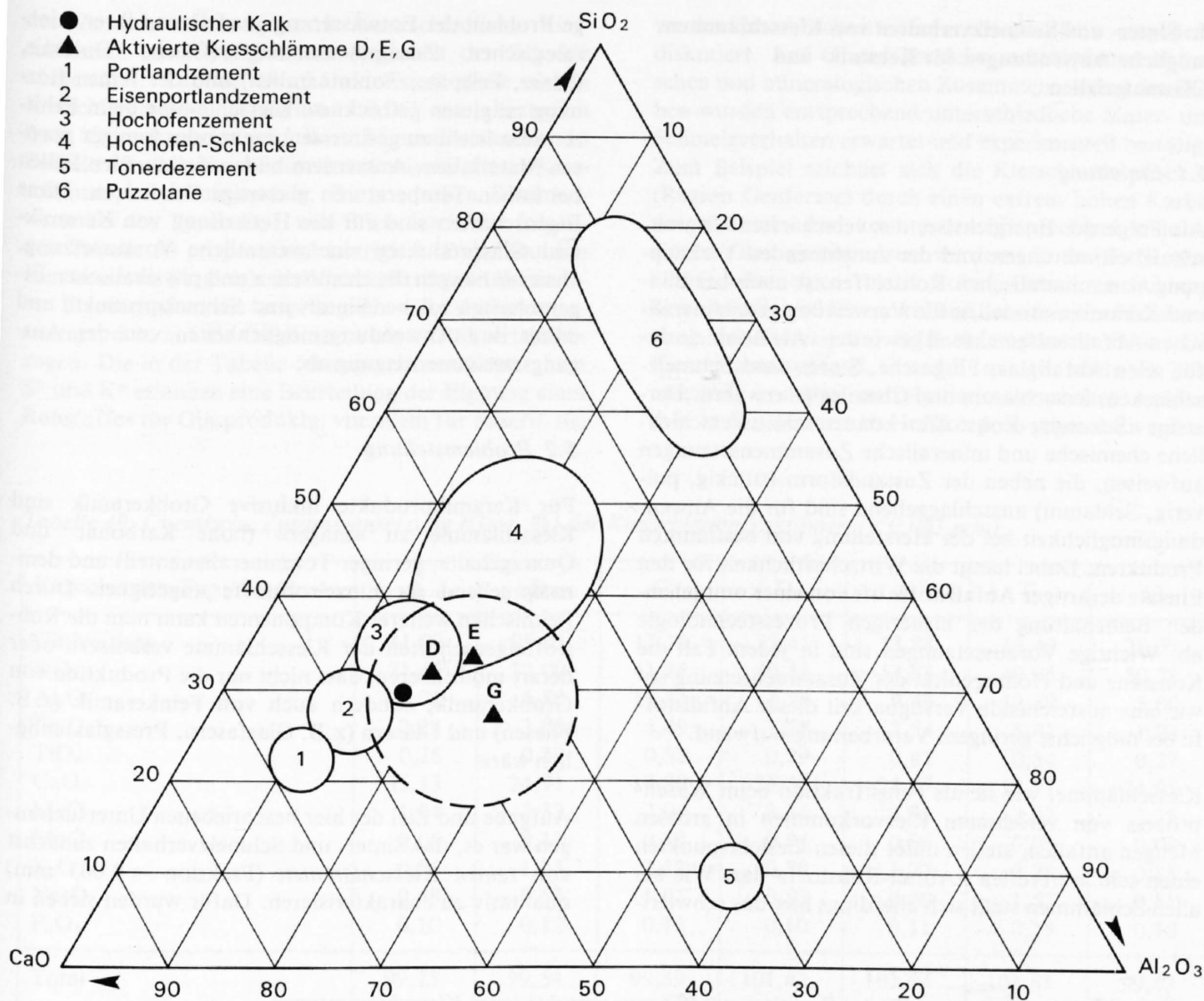


Fig. 22. Zusammensetzung der Bindemasse von hydraulischem Kalk und den aktivierten Kiesschlämmen D, E und G im Ranking-Diagramm (nach KRENKLER [1980], modifiziert)

4.9 Folgerungen

Aus Kiesschlamm kann nach Entwässerung durch eine kurze thermische Einwirkung bei etwa 900 °C ein hydraulisches Bindemittel ähnlich dem gebräuchlichen hydraulischen Kalk (HK) gewonnen werden (Norm SIA 215, 1978). Voraussetzung dazu ist ein genügender Ton- und Kalkgehalt, was nicht bei allen Kiesschlämmen gleichermassen zutrifft. Von den sieben untersuchten repräsentativen Kiesschlammtypen der Schweiz zeigen deren drei eine ausgeprägte Eignung (Schlammtypen B, C, E).

Es kommen dabei die gleichen Anwendungsgebiete in Frage wie beim HK. In Kombination mit Portlandzement (PC) ist HK als Mörtelbindemittel gefragt. So werden beispielsweise in der Norm SIA 242 (1978) optimale Mörtelmischungen mit HK für Zementmörtelanwurf, Grund- und Deckputze im Hochbau vorgeschlagen. In den Empfehlungen der AG Kalk, Zürich, und

der Technischen Forschungs- und Beratungsstelle der Schweizerischen Zementindustrie, Wildeg, wird speziell auf die Bedeutung von HK als Hauptbindemittel im Grundputz sowie auch als Zusatz für Sichtbeton hingewiesen. In der Norm SIA 177 (1980) wird die Verwendung von verlängertem Mörtel auf der Basis von 250 kg HK + 100 kg PC je Kubikmeter fertigen Mörtel im Mauerwerkbau geregelt. Verlängerte Mörtel sind weniger druckfest, wirken aber spannungsausgleichend und verbessern geringfügig die Wärmeisolation (Norm SIA 177, Ziff. 4 – 222 – 3). Bekannt ist ferner auch, dass verlängerte Mörtel eine vorzügliche Verarbeitbarkeit zeigen. Mit thermisch aktiviertem Kiesschlamm ist diese Erscheinung ausgeprägt.

Zu bedenken gilt es aber, dass mit thermisch aktiviertem Kiesschlamm – so sehr die Eigenschaften interessant sind – weder eine Marktlücke abgedeckt noch ein neues Bedürfnis im Bindemittelsektor geschaffen wird.

5. Sinter- und Schmelzverhalten von Kiesschlämmen, mögliche Anwendungen für Keramik- und Glasmaterialien

5.1 Einleitung

Als Folge der Energiekrise, der verschärften Umweltschutzbestimmungen und der zunehmenden Verknappung von mineralischen Rohstoffen ist auch bei Bau- und Keramikmaterialien die Verwertung von mineralischen Abfallstoffen aktuell geworden. Als Beispiele dafür seien Abfallglas, Flugasche, Sinter- und Schmelzschlacken, Rotschlamm und Chemiegips erwähnt. Derartige «Sekundär-Rohstoffe» können sehr unterschiedliche chemische und mineralische Zusammensetzungen aufweisen, die neben der Zustandsform (stückig, pulverig, Schlamm) ausschlaggebend sind für die Anwendungsmöglichkeit bei der Herstellung von bestimmten Produkten. Dabei hängt die Wirtschaftlichkeit für den Einsatz derartiger Abfallstoffe oft von einer weitgehenden Beibehaltung der bisherigen Prozesstechnologie ab. Wichtige Voraussetzungen sind in jedem Fall die Konstanz und Homogenität der Zusammensetzung sowie eine ausreichende Verfügbarkeit dieser Abfallstoffe bei möglichst geringem Verarbeitungsaufwand.

Kiesschlämme, wie sie als Feinstfraktion beim Waschprozess von verlehmteten Kiesvorkommen in grossen Mengen anfallen, stellen unter diesen Gesichtspunkten einen sehr wertvollen «Abfall-Rohstoff» dar. Wie bei allen Schlämmen stellt sich allerdings hier das schwierige

Problem der Entwässerung. Auf Grund ihrer mineralogischen Zusammensetzung (Calcit, Dolomit, Quarz, Felspäte, Tonmineralien) und der feinen Körnung reagieren getrocknete Kiesschlämme beim Erhitzen sehr leicht zu gesinterten, mehr oder weniger porösen Materialien. Ausserdem bilden sie in vielen Fällen bei hohen Temperaturen glasartige Schmelzen. Diese Eigenschaften sind für die Herstellung von Keramik- und Glasprodukten eine wesentliche Voraussetzung. Generell hängen die chemischen und physikalischen Eigenschaften solcher Sinter- und Schmelzprodukte und damit ihre Anwendungsmöglichkeiten von der Ausgangszusammensetzung ab.

5.2 Problemstellung

Für Keramikprodukte inklusive Grobkeramik sind Kiesschlämme zu «mager» (hohe Karbonat- und Quarzgehalte, geringer Tonmineralienanteil) und dementsprechend als Einzelrohstoffe ungeeignet. Durch Beimischen weiterer Komponenten kann man die Rohstoffeigenschaften der Kiesschlämme verbessern oder derart modifizieren, dass nicht nur die Produktion von Grobkeramik, sondern auch von Feinkeramik (z.B. Fliesen) und Gläsern (z.B. Glasfasern, Pressglas) möglich wäre.

Aufgabe und Ziel der hier beschriebenen Untersuchungen war es, das Sinter- und Schmelzverhalten zunächst von *reinen Kiesschlämmen* (Fraktion < 0,063 mm) qualitativ zu charakterisieren. Dafür wurden sieben in

Tabelle 48: Zusammensetzung der Fraktion < 0,063 mm verschiedener Kiesschlammtypen

Kiesschlamm-Typ Herkunft	A Region Genfersee	B Region Fribourg	C Region Aarau/Luzern	D Region Zürich	E Region Zug	F Region Chur	G Region Bodensee
Labor-Nr.: P-	1982-1815	1982-1816	1982-1817	1981-2050	1981-2051	1981-2052	1982-1818
Granulometrie Gew. %							
Fraktion < 0,002 mm	32,8	30,6	35,1	17,6	42,2	13,1	18,5
0,002-0,020 mm	51,8	48,9	54,6	57,7	45,2	52,9	44,3
> 0,020 mm	15,4	20,5	10,3	24,7	12,6	34,0	37,2
Mineralogie Gew. %							
Calcit	59,2	38,5	27,0	42,3	38,6	20,3	35,2
Dolomit	4,2	8,1	5,7	6,1	8,3	7,0	22,3
Quarz	10,3	23,6	18,4	29,7	17,6	27,7	19,5
Albit	3,0	4,0	4,0	7,0	5,0	15,0	5,0
K-Feldspat	-	1,0	4,0	2,0	-	3,0	1,0
Tonmineralien	ca. 20	ca. 25	ca. 30	ca. 10	ca. 25	ca. 10 + div. Phyllite, Glimmer, Serizit, Chlorit ca. 15%	ca. 15

der Zusammensetzung stark unterschiedliche Kiesschlämme aus verschiedenen Regionen der Schweiz ausgewählt. Tabelle 48 charakterisiert diese sieben Kiesschlammtypen (Fraktion <0,063 mm) bezüglich ihrer Granulometrie und ihres Mineralbestandes. In Tabelle 49 sind die chemischen Analysen dieser Kiesschlammproben angegeben. Die zu hohen Summenwerte bei den Typen D, E und F wurden in der folgenden Tabelle 50 proportional korrigiert. Dabei wurden zum besseren Vergleich der Viskositätsdaten und anderer Eigenschaften die ursprünglichen Analysen umgerechnet, d. h. auf die Oxidsumme ohne Glühverlust bezogen. Die in der Tabelle 50 angegebenen Kennzahlen S* und K* erlauben eine Beurteilung der Eignung eines Rohstoffes für Glasprodukte, vor allem für Fasern. Sie

werden im Abschnitt «Schmelzverhalten» eingehend diskutiert. Auf Grund der sehr verschiedenen chemischen und mineralogischen Zusammensetzung der Proben wurden entsprechend unterschiedliche Sinter- und Schmelzverhalten erwartet und experimentell bestätigt. Zum Beispiel zeichnet sich die Kiesschlammprobe A (Region Genfersee) durch einen extrem hohen Kohlenstoffgehalt aus und konnte dementsprechend nicht zu einem Glas geschmolzen werden. Probe F (Region Chur) weist einen relativ hohen Gehalt an Feldspat bzw. Alkali- und Eisenoxid auf, was zu einer Herabsetzung der Sinter- und Schmelztemperatur führt. Die Kiesschlammtypen B, C und E, mit den höchsten Tonanteilen, konnten nassplastisch verarbeitet werden, d. h. in Gipsformen zu Hohlkörpern gegossen werden.

Tabelle 49: Chemische Zusammensetzung (Gew. %) der Kiesschlammfraktionen (< 0,063 mm)

Kiesschlamm-Typ	A	B	C	D	E	F	G
Glühverlust	31,09	23,03	17,78	23,41	23,88	13,40	28,07
SiO ₂	21,45	37,09	41,28	40,53	34,83	49,95	30,28
Al ₂ O ₃	5,72	6,80	11,31	4,78	9,46	12,39	5,00
Fe ₂ O ₃	2,14	3,05	4,49	1,78	3,54	5,41	1,94
TiO ₂	0,28	0,29	0,52	0,29	0,41	0,54	0,27
CaO	35,13	24,91	18,80	25,55	24,07	13,11	24,85
MgO	1,84	2,32	2,04	3,34	3,91	2,92	7,35
MnO	0,06	0,13	0,12	0,04	0,06	0,08	0,08
K ₂ O	0,96	1,23	2,12	0,78	1,77	2,29	0,88
Na ₂ O	0,48	0,57	1,01	0,82	0,50	1,57	0,61
P ₂ O ₅	0,10	0,12	0,12	0,10	0,11	0,15	0,10
Total	99,25	99,54	99,59	101,42	102,54	101,81	99,43

Tabelle 50: Oxidische Zusammensetzung (Gew. %) der Kiesschlammfraktionen (< 0,063 mm), bezogen auf glühverlustfreie Proben

Kiesschlamm-Typ	A	B	C	D	E	F	G
SiO ₂	31,47	48,48	50,46	51,95	44,28	56,50	42,43
Al ₂ O ₃	8,39	8,89	13,82	6,13	12,03	14,01	7,01
Fe ₂ O ₃	3,14	3,99	5,49	2,28	4,50	6,12	2,72
TiO ₂	0,41	0,38	0,64	0,37	0,52	0,61	0,38
CaO	51,54	32,56	22,98	32,75	30,60	14,83	34,82
MgO	2,70	3,03	2,49	4,28	4,97	3,30	10,30
MnO	0,09	0,17	0,15	0,05	0,08	0,09	0,11
K ₂ O	1,41	1,61	2,59	1,00	2,25	2,59	1,23
Na ₂ O	0,70	0,75	1,23	1,05	0,64	1,78	0,85
P ₂ O ₅	0,15	0,16	0,15	0,13	0,14	0,17	0,14
Total	100,00	100,02	100,00	99,99	100,01	100,00	99,99
Säuregrad Kennzahl	S* = 0,73 K* = 0,67	S* = 1,61 K* = 1,35	S* = 2,52 K* = 1,81	S* = 1,57 K* = 1,39	S* = 1,58 K* = 1,30	S* = 3,89 K* = 2,41	S* = 1,10 K* = 0,98

$$S^* = \frac{Al_2O_3 + SiO_2}{CaO + MgO}$$

$$K^* = \frac{Al_2O_3 + SiO_2 + P_2O_5}{Rest}$$

Die hier beschriebenen Versuche sollten vor allem Anhaltspunkte dafür liefern, ob es möglich ist, reine Kiesschlämme aus bestimmten Vorkommen zu *stabilen Gläsern* zu schmelzen. Da für die Verarbeitbarkeit zu verschiedenen Glasprodukten (Hohlglas, Pressglas, Glasfasern) die Viskositäts-/Temperatur-Kurve der Glasschmelzen eine ausschlaggebende Rolle spielt, war die Kenntnis dieser Eigenschaftsbeziehung erforderlich. Die Messungen wurden im *Institut für Glaskunde* an der *Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule* in *Aachen* durchgeführt. Im folgenden werden die Untersuchungen über das Sinter- und über das Schmelzverhalten der sieben Kiesschlammproben diskutiert sowie Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt.

5.3 Sinter Eigenschaften der Kiesschlämme

Sintervorgänge laufen im allgemeinen erst bei höheren Temperaturen ab und sind in der Werkstofftechnologie von grosser Bedeutung. Das wichtigste Anwendungsgebiet liegt in der keramischen (und auch pulvermetallurgischen) Formgebung und Verfestigung. Ausserdem werden aber auch staubfeine Erze zu Pellets vorgesintert und so erst für den Verhüttungsprozess verwendbar. Durch das bei höheren Temperaturen ablaufende Zusammensintern der Teilchen erhalten die gepressten Formkörper oder losen Pulverschüttungen die gewünschten Eigenschaften. Bedingt durch die Art der Pulver und durch die Prozessparameter können dabei unterschiedlich poröse bis vollkommen dichte Materialien erzeugt werden. Der noch nicht völlig geklärte Ab-

lauf der Sinterung wird weiter kompliziert, wenn mehrphasige Pulver vorliegen. Hier finden durch Festkörper- und z. T. Schmelzreaktionen Phasenneu- und -umbildungen statt, die den Sinterprozess verändern und überlagern. Dies ist z. B. der Fall bei den hier untersuchten Kiesschlämmen, bei denen nach Zerfall der Karbonate und Tonmineralien Festkörperreaktionen der Zerfallsprodukte untereinander und mit dem im Kiesschlamm vorhandenen Quarz und den Feldspäten auftreten. Als neugebildete Phasen treten vor allem Diopsid ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$), Gehlenit ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), Wollastonit (CaSiO_3), Plagioklase ($\text{Ca}_{1-x}\text{Na}_x\text{Al}_{2-x}\text{Si}_{2+x}\text{O}_8$) und Glasphase auf.

5.3.1 Sinterversuche

Für die Herstellung der Proben wurden Kiesschlammpulver zu Pillen gepresst ($\varnothing = 15,3 \text{ mm}$, $h \sim 3 \text{ mm}$, Pressdruck 10 N/mm^2) und bei steigender Temperatur jeweils zwei Stunden erhitzt. Bedingt durch die Ton- und Karbonatzersetzung, gefolgt von Festkörperreaktionen und Sintervorgängen, zeigen die Probekörper dabei unterschiedliche Dimensionsänderungen. In der Keramik ist es üblich, diesen temperaturabhängigen Effekt durch Messung der sogenannten *linearen Brennschwindung* qualitativ zu charakterisieren.

In Tabelle 51 sind die Werte für die untersuchten Kiesschlämme zusammengefasst. Fig. 23 zeigt die entsprechende graphische Darstellung.

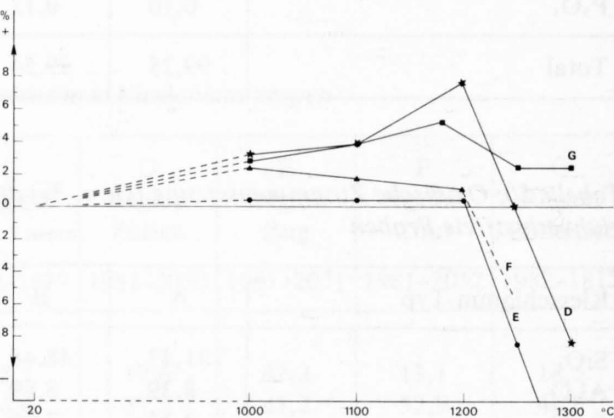
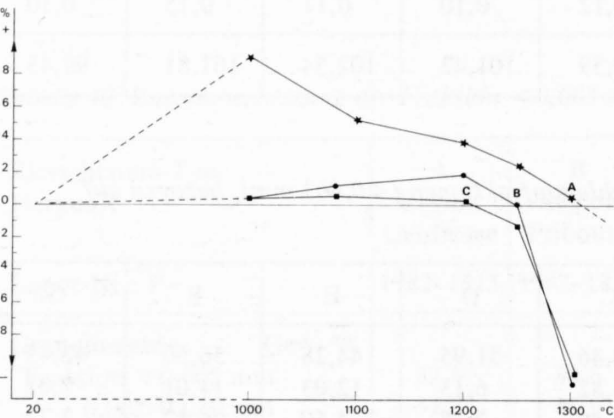


Fig. 23: Lineare Brennschwindung (%) von gepressten zylindrischen Kiesschlammproben

Tabelle 51: Brennschwindung ($\Delta t/t \cdot 100$) von gepressten Kiesschlammtypen

Kiesschlamm-Typ	A %	B %	C %	D %	E %	F %	G %
20°C	-	-	-	-	-	-	-
1000°C	+ 9,15	+ 0,65	+ 0,65	+ 3,27	- 0,65	+ 2,61	+ 2,61
1100°C	+ 5,23	+ 1,31	+ 0,65	+ 3,92	- 0,65	+ 1,96	+ 3,92
1200°C	+ 3,92	+ 1,96	0	+ 7,84	- 0,65	+ 1,31	+ 5,23
1250°C	+ 2,61	0	- 1,31	0	- 8,50	geschmolzen	+ 2,61
1300°C	+ 0,65	- 11,11	- 10,46	- 8,50	geschmolzen	geschmolzen	+ 2,61

Die sehr unterschiedliche mineralogische und chemische Zusammensetzung der Kiesschlämme äussert sich in ihrem Sinterverhalten. Besonders wirken sich dabei höhere Gehalte an Alkali-, Eisen- und Aluminiumoxid aus. So zeigen die Proben E und vor allem F oberhalb 1200 °C eine sehr starke Sinterung infolge Bildung von Schmelzphase. Bereits um 1250 °C schmilzt der Fe₂O₃- und alkalireichste Kiesschlamm F vollständig zusammen, gefolgt von Kiesschlamm E bei etwa 1300 °C. Die ebenfalls alkali- und Fe₂O₃-reichen Kiesschlämme B und C zeigen bei 1300 °C eine starke Sinterung, die auch beim Kiesschlamm D auftritt, bedingt durch den Gehalt an Natronfeldspat. Dagegen zeigen die Kiesschlämme A und G bei 1300 °C noch keine Sinterreaktion. Ausschlaggebend für dieses Verhalten dürfte der sehr niedrige Gehalt dieser beiden Kiesschlämme an Alkali- und Eisenoxid sein sowie an SiO₂, das für die Schmelzphasenbildung ebenfalls erforderlich ist. Ausserdem wirken sich der besonders hohe Gehalt an CaO in Probe A und an MgO in Probe G in Richtung auf eine Erhöhung der Schmelztemperatur aus.

Stark fördernd für die Sinterung sind also Fe-oxidreiche Tone und höhere Feldspatanteile. Die letzten werden deswegen auch bei der Herstellung von Feinkeramik als alkalihaltige Flussmittel zugesetzt. Die beim Aufheizen verschiedener Kiesschlammproben anfänglich beobachtete Expansion beruht auf dem Zerfall und der Umordnung der Pulverteilchen (hier Karbonate, Tone) mit entsprechenden Änderungen des Porengefüges. Die CaO-reichste Probe A zeigt nach Erhitzen auf 1000 °C besonders starke Expansion und Rissbildung infolge Bildung von freiem, reaktivem CaO. Die bei den Kiesschlämmen D und G zwischen 1100–1200 °C gefundene Volumenzunahme ist wahrscheinlich auf eine Phasenneubildung (mit geringerer Dichte) zurückzuführen.

Röntgenpulveraufnahmen der verschiedenen Proben zeigen die auch bei früheren Untersuchungen (PETERS UND IBERG, 1979) gefundenen Mineralphasen Wollastonit, Gehlenit, Diopsid, Plagioklase, Restquarz und glasig-amorphe Anteile.

Je nach chemischer und mineralogischer Zusammensetzung der Kiesschlämme ergibt sich ein verschiedenartiger Reaktionsablauf und damit Phasenbestand. In den bei 1200 °C erhitzten Proben waren qualitativ folgende Unterschiede festzustellen: Im weitaus CaO-reichsten Kiesschlamm A dominierte Gehlenit als Hauptphase, etwas weniger auch in den Typen B, D, E und G. Die letzte Probe zeigte ausserdem freies, noch unreaktiertes MgO. Nur in der CaO-reichsten Probe war Dikalziumsilikat röntgenographisch deutlich erkennbar. Praktisch alle Proben enthielten Feldspatanteile, besonders die Al₂O₃- und SiO₂-reichen Proben C und F. Wollastonit war in allen Proben in grösserer Menge vorhanden, mit Ausnahme der CaO-reichsten (Typ A) und der CaO-ärmsten (Typ F). Vor allem die SiO₂-reichste Probe F zeigte einen beträchtlichen Gehalt an freiem Quarz, während die Proben A und E da-

von frei waren. Diopsid tritt vor allem in der Probe F auf.

5.3.2 Schlickergiessen

Bei den Kiesschlämmen, die höhere Gehalte an Tonmineralien aufweisen, wurde auch versucht, nassplastische, keramische Formgebungsmethoden (Schlickergiessen in Gipsformen) anzuwenden. So konnten die Kiesschlämme A, B, C und E ohne Zusätze nach Aufschlämmen mit Wasser (+ 0,3% Na₂CO₃) in Gipsformen zu Hohlkörpern gegossen werden. Nach leichtem Antrocknen konnten diese ohne Schwierigkeiten aus der Form genommen werden. Das Brennen dieser Kiesschlammteigel erfolgte bei 1200 °C (oxidierende Atmosphäre) und führte zu porösen, z. T. harten und mechanisch festen Keramikmaterialien. Bei den Kiesschlämmen D, F und G war es infolge des wesentlich kleineren Tongehaltes (10–15%) und teilweise zu niedrigen Flussmittelgehaltes erforderlich, für das Schlickergiessen und Sintern entsprechende Zusätze zu machen. Als Tonkomponente wurde Kaolin beigemischt und als Flussmittel Na-Feldspat bzw. Duranglaspulver, das sich als besonders wirksam erwies und zu dicht gesinterten Materialien führte. Fig. 24 zeigt einige derartige, nassplastisch hergestellte Tiegel, die bei 1200 °C gebrannt wurden.

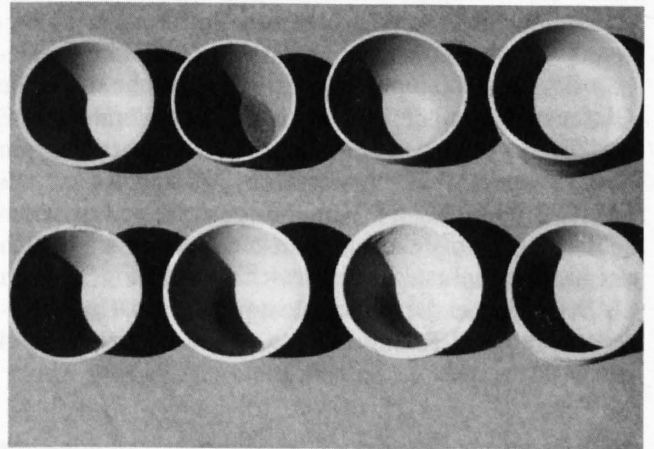


Fig. 24: Durch Giessen von Kiesschlämmen (< 0,063 mm) hergestellte Tiegel. Brenntemperatur 1200 °C

Obere Reihe (von links nach rechts):
Reine Kiesschlämme A, B, C und E

Untere Reihe (von links nach rechts):
Kiesschlämme mit Kaolin und Flussmittelzusatz

70% Kiesschlamm D, 20% Kaolin, 10% Duranglas
70% Kiesschlamm D, 20% Kaolin, 10% Na-Feldspat
80% Kiesschlamm D, 12% Kaolin, 8% Na-Feldspat
80% Kiesschlamm G, 12% Kaolin, 8% Na-Feldspat

5.3.3 Bläheigenschaften

Im Rahmen der Sinterversuche wurde auch das Bläverhalten von Kiesschlämmen untersucht. Der Grund dafür war das gegenwärtige Interesse für isolierende Leichtbaustoffe, d.h. poröse, schaumähnliche Formsteine von ausreichender Festigkeit. In früheren eigenen Versuchen (BAYER UND KOESE, 1979) wurde gefunden, dass für die Schaumglasherstellung SiC (Siliciumkarbid) ein besonders wirksames Blähmittel ist und dass Zusätze von mineralischen Füllstoffen (z. B. Tone, Quarzmehl) zur Schaumglasmischung in Mengen bis 50% und mehr möglich sind. Die Blähreaktion zwischen SiC und verschiedenen Komponenten des Glases unter Mitwirkung des Luftsauerstoffes läuft im Erweichungsbereich der Gläser ab, d.h. etwa zwischen 900–1150 °C. Es wurde daher versucht, die Kiesschlämme ebenfalls mit Hilfe von SiC-Zusätzen (1–5%) zu blähen. Dabei erwies sich zunächst, dass Kiesschlammpulver direkt keine Reaktion mit SiC zeigen. Nach Aufschmelzen der Kiesschlämme zu Gläsern konnten sie dann in gepulverter Form (< 0,063 mm) auch bei Zusatz von 5% SiC nur ganz schwach gebläht werden. Die stärkste Reaktion zeigte dabei das alkali- und Fe₂O₃-reichste Kiesschlammglaspulver F.

Für die Herstellung von stark geschäumten, grobporigen Materialien war es aber notwendig, Natron-Kalk-Glaspulver, z. B. das hier verwendete Abfallglaspulver, beizumischen. Der Vorteil dabei ist, dass dann die Kiesschlämme direkt, ohne vorheriges Aufschmelzen, verwendet werden können. Je nach Alkali- und Fe₂O₃-Gehalt des Kiesschlammes lag der erforderliche minimale Glaszusatz zwischen 25% bei den Kiesschlämmen C, E und F, bis zu etwa 50% bei den flussmittelärmeren Kiesschlämmen. Für eine starke Blähung waren 1% SiC 800 (< 0,007 mm) und Temperaturen zwischen 1050–1150 °C ausreichend. Am geeignetsten erwies sich der niedrigst schmelzende Kiesschlamm F. Fig. 25 zeigt als Beispiel zwei derartige Schaumkörper, die geschlossene Poren und Raumgewichte zwischen etwa 0,2–0,4 g/cm³ aufweisen.

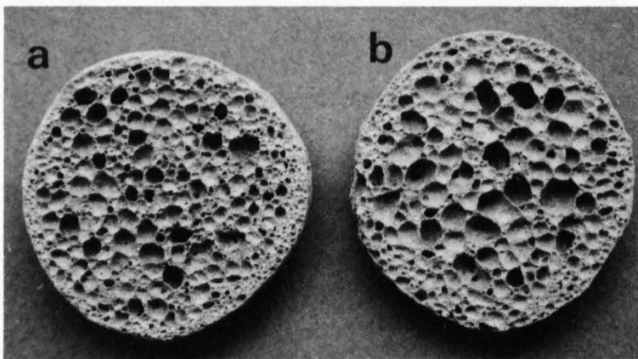


Fig. 25: Schaumglaskörper aus 60% Kiesschlamm F und 40% Abfallglaspulver. Blähtemperatur 1150 °C.

- a) mit 2,6% SiC-Zusatz
- b) mit 1,3% SiC-Zusatz

5.4 Schmelzverhalten der Kiesschlämme

Bei kristallinen, einphasigen Materialien ist der Übergang vom festen in den flüssigen Zustand durch den *Schmelzpunkt* T_s charakterisiert. Im Gegensatz dazu erfolgt dieser Übergang bei Gläsern allmählich, über einen grösseren Temperaturbereich, der den sogenannten *Transformationsbereich* (Übergang Festkörper → unterkühlte Schmelze) und den *Erweichungsbereich* (Übergang zur Schmelze) umfasst. Diese Bereiche lassen sich durch entsprechende Viskositätswerte angeben: Transformationspunkt T_g mit $\eta = 10^{13.5}$ dPa·s (η = dynamischer Viskositätskoeffizient) und Erweichungspunkt E_w mit $\eta = 4,46 \cdot 10^7$ dPa·s. Bei Mischungen aus mehreren kristallinen Stoffen, eventuell auch mit amorphen Komponenten, benutzt man dagegen den Ausdruck «*Schmelzverhalten*». Dieser Begriff ist allerdings nicht genau definiert und wird vielfach in Anlehnung an Aschen- und Schlackenuntersuchungen mit der Formänderung und dem Erweichen von zylindrischen Probekörpern beschrieben. Die hier diskutierten Kiesschlämme sind demnach ebenfalls durch ihr Schmelzverhalten zu charakterisieren, sie zeigen weder einen definierten Schmelzpunkt noch rein glasähnliches Erweichen. Dies ist aus dem Sinterverhalten ersichtlich, wo der Kiesschlamm F und Kiesschlamm E bei etwa 1200 °C bzw. 1300 °C in den Schmelzzustand übergehen. Dabei ist anzunehmen, dass noch kein vollständiges Durchschmelzen stattgefunden hat. Dieses erfolgt erst bei Temperaturen im Bereich von 1450–1500 °C, wobei homogene glasige Schmelzen gebildet werden, die ohne Rekristallisation ausgegossen werden können. Erst diese Kiesschlammgläser zeigen die typischen Glaseigenschaften.

5.4.1 Viskosität der Kiesschlammsschmelzen

Glasschmelzen haben die Eigenschaft, dass sich ihre Viskosität (oder Zähigkeit) reversibel über einen weiten Temperaturbereich um viele Größenordnungen kontinuierlich ändern kann. Dies unterscheidet sie von den meisten anderen Schmelzen, bei denen die Viskosität beim Übergang flüssig → fest in der Nähe von T_s schlagartig von wenigen cPa·s (Schmelze) auf $> 10^{18}$ dPa·s (Kristall) zunimmt.

Die Viskosität einer Glasschmelze ist von ihrer Zusammensetzung abhängig, das heisst vor allem vom Gehalt an *Netzwerkbildnern* (SiO₂, Al₂O₃) und *Netzwerkwandlern* (Alkali-, Erdalkalioxide), wobei sie mit steigender Temperatur mehr oder weniger steil abfällt. Diese Temperaturabhängigkeit der Viskosität ist durch die chemische Zusammensetzung der Gläser kontrollierbar und ist von grosser Wichtigkeit für die Möglichkeiten der Formgebung. Während Glasschmelzen mit einer steilen η/T -Kurve die Verarbeitung nur in einem relativ kleinen Temperaturbereich zulassen («kurze Gläser»), liegt bei flachen η/T -Kurven ein wesentlich grösserer Verarbeitungsbereich vor («lange Gläser»). Für eine vollautomatische Verarbeitung (Hohlglas,

Flachglas) ist z. B. eine gewisse «Länge» der Gläser eine notwendige Voraussetzung.

Bei den untersuchten Kiesschlamm-schmelzen war auf Grund ihrer chemischen Zusammensetzung, d. h. relativ niedriger SiO_2 -Gehalt und hoher CaO -Gehalt, anzunehmen, dass es sich hier um «kurze» Gläser handelt. Dies konnte durch die im folgenden diskutierten Viskositätsmessungen bestätigt werden. Für die Verarbeitung der Glasschmelzen sind ausserdem die bereits erwähnten Viskositätsfixpunkte von Interesse, vor allem der Transformationspunkt T_g , der Erweichungspunkt E_w und der Verarbeitungspunkt V_a (Temperatur für $\eta = 10^4 \text{ dPa} \cdot \text{s}$). Beim Durchschreiten des Transformationsbereiches verändern sich die physikalischen Eigenschaften der Gläser kontinuierlich. Nach dem Formgebungsprozess, bei dem die Temperatur ja stets oberhalb des Transformationspunktes liegt, muss daher das Glas langsam auf Raumtemperatur abgekühlt werden, um dabei entstehende thermische Spannungen klein zu halten.

Die Abkühlungsgeschwindigkeit hängt vom Wärmeausdehnungskoeffizienten und der Dicke des Glasartikels ab. Alkalioxide erniedrigen den Transformations- und Erweichungspunkt von Gläsern. Magnesium- und Kalziumoxid erhöhen dagegen beide Werte.

Da die vorliegenden Kiesschlammgläser im Vergleich zu Gebrauchsgläsern weit geringere Gehalte an Alkalioxiden aufweisen, dagegen aber sehr hohe CaO (+ MgO)-Werte, wurden entsprechend auch wesentlich höhere Transformations- und Erweichungspunkte erwartet und gefunden. Bei Natronkalkgläsern liegt T_g etwa im Bereich von $450\text{--}550^\circ\text{C}$. Die Bestimmung erfolgt üblicherweise dilatometrisch, kann aber auch aus dem Auftreten eines endothermen Peaks in der DTA näherungsweise ermittelt werden. Diese Methode wurde für die bei $1500\text{--}1550^\circ\text{C}$ aufgeschmolzenen Kiesschlammproben benutzt. Für die Bestimmung der DTA-Kurve wurden jeweils 250 mg Glaspulver ($< 0,5 \text{ mm}$) mit $4^\circ\text{C}/\text{min.}$ in einer Mettler-Thermowaage bis 1000°C erhitzt. Die schwachen endothermen Reaktionen, entsprechend den Transformationspunkten, lagen bei den untersuchten Kiesschlammgläsern zwischen etwa 700°C für Typ F (flussmittelreichster Kiesschlamm) und 820°C für Typ G (flussmittelarmer, MgO -reichster Kiesschlamm). Diese Werte sind vergleichbar mit Transformationstemperaturen, wie sie in der Literatur für verschiedene Gesteinsgläser angegeben werden. Ganz allgemein hängt T_g auch von der Kühlgeschwindigkeit nach der Glasverarbeitung ab, bei hohen Kühlgeschwindigkeiten (z. B. Faserherstellung) wird T_g zu höheren Temperaturen verschoben. Was die Werte für die Erweichungspunkte betrifft, so können diese näherungsweise aus den η/T -Kurven (Fig. 26) durch Extrapolation bestimmt werden. Sie variieren zwischen etwa 1100°C (F) und 1300°C (G).

5.4.2 Messung der Viskosität

Es wurden jeweils 100 g der Kiesschlammfraktionen $< 0,063 \text{ mm}$ in Korundtiegeln von etwa 200 ml Fassungsvermögen bei 1500°C über zwei Stunden vorge-schmolzen. Dazu wurde ein elektrisch beheizter Ofen benutzt mit oxidierender Atmosphäre. Die Schmelze wurde bei 1500°C aus dem Ofen genommen und in den 60 ml fassenden zylindrischen Messtiegel aus Pt/Rh $70/30$ gegossen, der anschliessend sofort in den Viskosimeterofen eingefahren wurde.

Die Messung der Viskosität erfolgte in Anlehnung an DIN 52312 mit einem Rotationsviskosimeter vom Searle-Typ, zylindrischer Tiegel mit ebenem Boden und zylindrischer Rotationskörper mit Kegelflächen, beides aus Pt/Rh . Es handelt sich dabei um ein Relativverfahren. Die Apparatekonstanten konnten durch Eichmessungen an Baysilon-Ölen, an B_2O_3 -Schmelzen und an Standardglasschmelzen ermittelt werden. Die Messungen wurden bei fallender Temperatur, von 1500°C ausgehend, normalerweise im Abstand von 50°C durchgeführt. Im Gebiet starker Viskositätsänderungen wurden kleinere Temperaturschritte gewählt. Die so gemessenen Werte sind in Tabelle 52 zusammengefasst und in Fig. 26 in der üblichen grafischen Darstellung, d. h. $\log \eta$ gegen T ($^\circ\text{C}$), gezeigt. Zum Vergleich wurde auch die Viskositätskurve eines typischen Natron-Kalkglases miteingezeichnet. Die Unterschiede in der Viskositäts-Temperaturabhängigkeit sind stark ausgeprägt und durch die verschiedene chemische Zusammensetzung der Glasschmelzen bedingt. Während das Kalknatronglas ein ausgesprochen langes Glas darstellt, handelt es sich bei den Kiesschlammgläsern B, D, E und besonders bei G um kurze Gläser. Die ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$)-reichsten Kiesschlammgläser C und F dagegen entsprechen im Verarbeitungsbereich von etwa $1200\text{--}1500^\circ\text{C}$ eher langen Gläsern. Für die Glasfaserherstellung z. B. soll die Viskositäts-Temperaturkurve der von kurzen Gläsern entsprechen. Der Kiesschlamm A, der extrem CaO -reich ist, konnte auch bei 1600°C nicht zu einem Glas geschmolzen werden.

Tabelle 52: Viskosität von geschmolzenen Kiesschlammproben (in dPa·s)

Kiesschlamm-Typ	B	C	D	E	F	G
Temperatur °C						
1500	$1,05 \cdot 10^1$	$2,60 \cdot 10^1$	$1,42 \cdot 10^1$	$1,15 \cdot 10^1$	$1,13 \cdot 10^2$	$4,50 \cdot 10^0$
1450	$1,50 \cdot 10^1$	$4,20 \cdot 10^1$	$1,86 \cdot 10^1$	$1,66 \cdot 10^1$	$1,68 \cdot 10^2$	$5,45 \cdot 10^0$
1400	$2,35 \cdot 10^1$	$7,30 \cdot 10^1$	$2,68 \cdot 10^1$	$2,41 \cdot 10^1$	$2,77 \cdot 10^2$	$7,60 \cdot 10^0$
1375	-	-	-	-	-	$1,00 \cdot 10^1$
1350	$3,60 \cdot 10^1$	$1,28 \cdot 10^2$	$5,60 \cdot 10^1$	$3,73 \cdot 10^1$	$4,60 \cdot 10^2$	$4,50 \cdot 10^1$
1335	-	-	-	-	-	$4,12 \cdot 10^2$
1320	-	-	-	-	-	$2,50 \cdot 10^3$
1310	-	-	-	-	-	$1,80 \cdot 10^4$
1300	$5,70 \cdot 10^1$	$2,20 \cdot 10^2$	$3,10 \cdot 10^2$	$5,95 \cdot 10^1$	$8,20 \cdot 10^2$	$2,22 \cdot 10^5$
1272	$8,90 \cdot 10^1$	-	-	-	-	-
1250	$1,99 \cdot 10^3$	$4,18 \cdot 10^2$	$3,50 \cdot 10^3$	$1,06 \cdot 10^2$	$1,64 \cdot 10^3$	-
1225	$5,35 \cdot 10^5$	-	$2,55 \cdot 10^4$	$1,80 \cdot 10^2$	-	-
1212	$2,92 \cdot 10^6$	-	-	-	-	-
1200	-	$8,45 \cdot 10^2$	$7,50 \cdot 10^6$	$2,00 \cdot 10^3$	$3,88 \cdot 10^3$	-
1185	-	-	-	$1,55 \cdot 10^4$	-	-
1175	-	$1,30 \cdot 10^3$	-	$8,50 \cdot 10^4$	$6,30 \cdot 10^3$	-
1150	-	$2,76 \cdot 10^3$	-	$7,00 \cdot 10^6$	$1,45 \cdot 10^4$	-
1145	-	$1,60 \cdot 10^4$	-	-	-	-
1140	-	$4,20 \cdot 10^5$	-	-	-	-
1125	-	-	-	-	$3,80 \cdot 10^5$	-
1115	-	-	-	-	$7,00 \cdot 10^6$	-

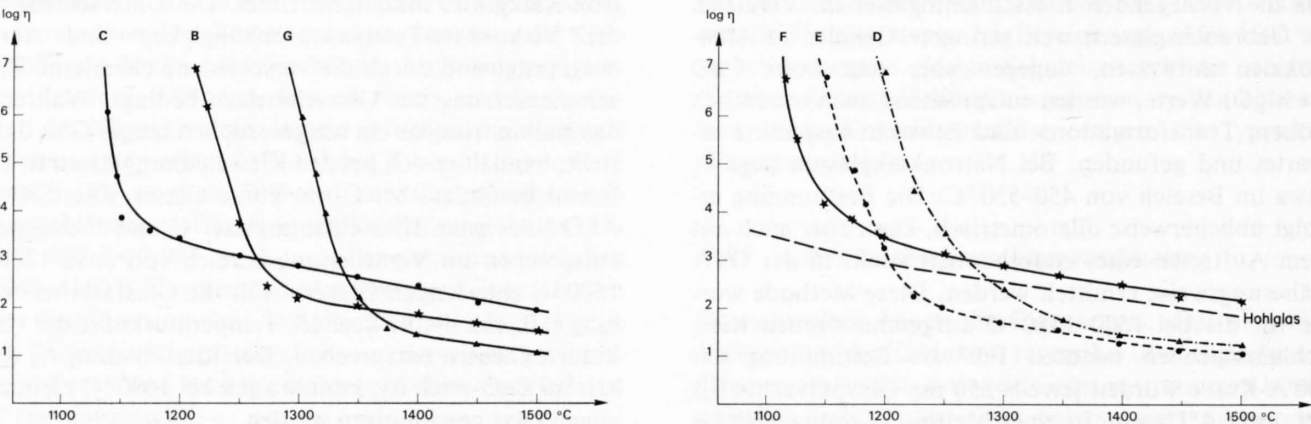


Fig. 26: Viskositätsänderung von Kiesschlammsschmelzen in Abhängigkeit von der Temperatur

5.4.3 Chemische Zusammensetzung und Schmelzeigenschaften

Aus der Gesamtanalyse können die Schmelzeigenschaften von Gesteinsgläsern näherungsweise vorausgesagt werden. Sie sind im wesentlichen von den Hauptkomponenten (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Alkalioxide) abhängig, werden aber auch durch die Nebenkomponten (Fe-, Mn-, Ti-oxid) noch zusätzlich beeinflusst. Trotzdem ist es möglich, mit Kennzahlen aus der chemischen Analyse, eine qualitative Charakterisierung der Schmelzeigenschaften zu geben.

Vor allem hat sich in der Mineralglasfaser-Industrie für die Beurteilung der Eignung eines Rohstoffes der sogenannte Säuregrad S^* bewährt.

$$S^* = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}} \text{ (Gew. \%)}$$

Wenn grössere Mengen von Alkali-, Eisen- und Manganoxyden vorhanden sind, erreicht man eine bessere Beurteilung der Schmelzeigenschaften mit der Bezugzahl K^*

$$K^* = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{P}_2\text{O}_5}{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}} \text{ (Gew. \%)}$$

Bei Rohstoffen mit einem S^* -Wert zwischen etwa 1,0–2,5 erhält man Mineralglasfasern guter Qualität. Wenn S^* grösser als 1,8 wird, so verschlechtert sich allerdings die Qualität der Fasern, d.h. Länge und Elastizität

nehmen ab, der Durchmesser nimmt zu und ebenso der Perlenghalt. Andererseits sind solche $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ -reicheren Fasern aber chemisch widerstandsfähiger als die mit einem sehr niedrigen Säuregrad. In der Literatur wird als optimaler Säuregrad, z. B. bei Hochofenschlacken, ein Wert von $S^* = 1,22$ angegeben, dabei ist die Glasschmelze wie folgt zusammengesetzt (Gew.-%):

40 SiO_2 , 15 Al_2O_3 , 30 CaO , 15 HgO

Die meisten Mineralglasfasern haben aber höhere SiO_2 - und niedrigere $\text{CaO} + \text{MgO}$ -Gehalte. Entsprechend benötigen sie höhere Schmelztemperaturen, d. h. etwa 1500–1550 °C. Über den Einfluss der verschiedenen Oxidkomponenten auf die Schmelzeigenschaften von Gesteinsgläsern sind zahlreiche Untersuchungen durchgeführt worden.

Die Viskosität nimmt allgemein mit steigendem Anteil an SiO_2 und auch Al_2O_3 zu. CaO wirkt ebenso wie MgO viskositätserniedrigend. Der Gehalt an diesen beiden Oxiden sollte aber < 50% sein, wobei der MgO -Anteil bis zu 20% betragen kann. Ein hoher Kalziumgehalt erhöht ausserdem die Auslaugbarkeit der Fasern durch Wasser, so dass es zum Faserzerfall kommen kann. Der CaO -Gehalt einer Mineralwolle sollte daher nicht über 35% betragen. Der Eisengehalt der Rohstoffe spielt bei der Mineralfaser-Herstellung eine besondere Rolle. FeO wirkt in der Schmelze als Flussmittel, bei Oxidation des FeO zu Fe_2O_3 wird die Viskosität aber erhöht. Über die Wirkung der Alkalioxide auf das Schmelzverhalten und auf die Faserqualität liegen Untersuchungen auf dem Gebiet der Glasfasern vor. Es ist bekannt, dass höhere Gehalte an Alkalioxiden die Gläser «lang» machen, das bedeutet ein grosses Intervall zwischen Erweichungs- und Schmelzbereich.

Auch die Kristallisationsneigung des Glases ist wichtig. Einerseits können bei der Verarbeitung der Schmelze zu Fasern trotz grosser Abkühlgeschwindigkeit kristalline Phasen ausgeschieden werden, andererseits werden die Fasern bei der Verwendung oft längere Zeit erhöhter Temperatur ausgesetzt, wodurch die Kristallisation ebenfalls begünstigt wird. Diese Umwandlungen führen zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften der Fasern.

5.4.4 Eigenschaften von Kiesschlammsschmelzen und -gläsern

Tabelle 50 zeigt die sieben untersuchten Kiesschlämme mit ihrer Zusammensetzung (bezogen auf glühverlustfreie Proben) und den daraus ermittelten Kennzahlen S^* und K^* . Bei zahlreichen Schmelzversuchen mit diesen Rohmaterialien (jeweils 25 g, Platintiegel, oxidierende Atmosphäre, 1450–1550 °C) konnte festgestellt werden, dass die Kiesschlämme B, D und E bereits bei 1450 °C dünnflüssige Glasschmelzen ergeben, die problemlos ausgegossen oder zu dünnen Glasfasern gezogen werden können. Dies ist in Übereinstimmung mit ihrem S^* -Wert und mit der in Fig. 26 gezeigten Viskosi-

täts-Temperaturkurve. In diesen Fällen handelt es sich um «kurze» Glasschmelzen, die beim Absenken der Temperatur rasch erstarren.

Sie besitzen die für eine Glasfaserherstellung erforderliche niedrige Viskosität, d. h. etwa 10–30 dPa·s, etwa ab 1400 °C. Dagegen zeigen die Kiesschlammgläser C und F eine andersartige Viskositäts-Temperaturabhängigkeit. Bedingt durch ihren hohen Alkali- und Fe_2O_3 -Gehalt sowie den geringeren CaO -Gehalt sind diese Gläser auch bei hohen Temperaturen (1500 °C) noch sehr zähflüssig. Der viskositätserniedrigende Abbau des Fe_2O_3 zum FeO erfolgt nur teilweise und sehr langsam. Erst bei 1550 °C konnten diese Glasschmelzen ausgegossen und zu relativ dicken Fäden gezogen werden. Die Viskositätskurve in Fig. 26 zeigt, dass diese Glasschmelzen im Vergleich zu den drei anderen Kiesschlammsschmelzen wesentlich länger sind. Dies kommt auch in den sehr hohen S^* -Werten dieser Kiesschlämme zum Ausdruck. Durch Zusätze von CaCO_3 bzw. Na_2CO_3 wurde daher versucht, die Schmelzeigenschaften dieser Kiesschlämme zu verbessern. Als Beispiel wird in Tabelle 53 die ursprüngliche Zusammensetzung des Kiesschlammes F mit den beiden modifizierten Mischungen verglichen. Die gerechneten S^* - und K^* -Werte zeigen, dass durch den CaCO_3 -Zusatz die für die Glasfaserherstellung gewünschte Erniedrigung von S^* und damit der Viskosität erreicht wird. Dies konnte durch Schmelzversuche bestätigt werden, wobei das so erhaltene Glas im Bereich von 1450–1500 °C gute Giess- und Fadenzieheigenschaften zeigte. Interessanterweise bewirkt der Zusatz von Na_2CO_3 ebenfalls eine Verbesserung der Glaseigenschaften, obwohl der S^* -Wert dadurch ja nicht beeinflusst wird, dagegen aber der K^* -Wert. Obwohl diese Glasschmelze viskoser ist als die mit CaCO_3 -Zusatz modifizierte, kann sie bei etwa 1500 °C ausgegossen und zu langen Fäden gezogen werden. Die Schmelzeigenschaften dieses Fe-oxidreichen Kiesschlammes F – mit und ohne Zusätze – sind aber trotzdem komplex und sehr stark temperatur- und zeitabhängig. Dies beruht auf dem variablen Verhältnis $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, was entsprechende Auswirkungen auf die Viskositätseigenschaften hat.

Der Kiesschlamm G zeigt ein stark abweichendes Schmelzverhalten. Wahrscheinlich durch den sehr hohen MgO -Gehalt bedingt, sind die damit erhaltenen Glasschmelzen extrem kurz und nicht zu Fäden ziehbar. Fig. 26 und Tabelle 52 zeigen, dass innerhalb von nur 50 °C (1300–1350 °C) die Viskosität um vier Größenordnungen abfällt. Auch hier könnte eine Verbesserung der Glaseigenschaften durch entsprechende Zusätze, in diesem Fall SiO_2 und Al_2O_3 , erreicht werden. Das Gleiche gilt für den extrem CaO -reichen Kiesschlamm A, der wie erwähnt überhaupt nicht mehr zu einem Glas geschmolzen werden konnte.

Das Rekristallisationsverhalten der Kiesschlammgläser wurde durch kontinuierliches Aufheizen (4 °C/min) in der Thermowaage bis 1000 °C und durch getrennte isotherme Temperversuche (20 h) zwischen 700–900 °C ebenfalls untersucht.

Tabelle 53: Kiesschlamm F, modifiziert für dünnflüssigere Glasschmelzen

	Kiesschlamm F (ohne Glühverlust)	Korrektur 1 100 g F + 41,5 g CaCO ₃ = 23,3 g CaO	Korrektur 2 100 g F + 15,0 g Na ₂ CO ₃ = 8,77 g Na ₂ O
	%	%	%
SiO ₂	56,50	45,82	51,94
Al ₂ O ₃	14,01	11,36	12,88
Fe ₂ O ₃	6,12	4,96	5,63
TiO ₂	0,61	0,49	0,56
CaO	14,83	30,94	13,63
MgO	3,30	2,68	3,03
MnO	0,09	0,07	0,08
K ₂ O	2,59	2,10	2,38
Na ₂ O	1,78	1,44	9,71
P ₂ O ₅	0,17	0,14	0,16
	$S^* = \frac{70,51}{18,13} = 3,89$	$S^* = \frac{57,18}{33,62} = 1,70$	$S^* = \frac{64,82}{16,66} = 3,89$
	$K^* = \frac{70,68}{29,32} = 2,41$	$K^* = \frac{57,32}{42,68} = 1,34$	$K^* = \frac{64,98}{35,02} = 1,86$

$$S^* = \frac{Al_2O_3 + SiO_2}{CaO + MgO}$$

$$K^* = \frac{Al_2O_3 + SiO_2 + P_2O_5}{Rest}$$

Für Glasprodukte ist ja bekanntlich eine Voraussetzung, dass ihre Entmischungs- und Kristallisationstendenz möglichst gering sein muss. Für die Kiesschlammgläser trifft dies bei raschem Abkühlen weitgehend zu, nur die Kiesschlammgläser C und F zeigten bei langsamem Abkühlen infolge Reoxidation $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ Entmischungserscheinungen.

Für die Aufheiz- und Temperversuche wurden jeweils gepulverte Proben verwendet (< 0,5 mm), die naturgemäss durch ihre vergrösserte und gestörte Oberfläche eher zur Kristallisation neigen als kompakte Gläser. Diese Versuche zeigten, dass die Gläser aber trotzdem sehr stabil sind. In den DTA-Kurven (Fig. 27) ist der exotherme Rekrystallisationspeak besonders beim Kiesschlammglas D bei etwa 920°C sehr deutlich sichtbar, ebenso noch beim Glas G, während er beim Glas F durch den über 800°C einsetzenden starken Abfall der DTA-Kurve überlagert wird.

Diese Kristallisationstemperaturen im Bereich um 900°C stimmen gut mit der Erfahrung überein, wonach Gläser etwa 100–200°C oberhalb ihrer Transformationstemperatur die stärkste Tendenz zur Kristallisation aufweisen. Für die Höhe des DTA-Peaks ist neben der Konzentration auch die Bildungsenthalpie der jeweiligen kristallinen Phase ausschlaggebend.

Die Röntgenaufnahmen der drei Kiesschlammproben nach dem DTA-Versuch zeigten unterschiedliche Pri-

märkristallisation: Bei D hauptsächlich Wollastonit und etwas Plagioklas, bei F praktisch nur Diopsid-Pyroxen und bei G vor allem Gehlenit neben Wollastonit und Diopsid. Bei den isothermen Temperversuchen setzte die Kristallisation dieser Phasen erst oberhalb 800°C ein. Die Anwendungsgrenze derartiger Kiesschlammgläser dürfte demnach auf etwa 750°C begrenzt sein. Auslaugeversuche an gepulverten Kiesschlammgläsern (< 0,1 mm, 100 mg/20 cm³ dest. H₂O bzw. 2% HCl, RT, 50 h) zeigten keine Veränderungen des Gewichts der Proben bzw. des pH-Wertes der Lösungen.

5.5 Zusammenfassung

Zur Untersuchung der Verwendungsmöglichkeit von Kiesschlämmen als *Sekundär-Rohstoffe bei der Produktion von Keramik- und Glasmaterialien* wurden Sinter- und Schmelzversuche durchgeführt. Dafür wurden sieben Kiesschlämme (Fraktion < 0,063 mm) unterschiedlicher chemischer und mineralischer Zusammensetzung ausgewählt. Der Typ A zeigt den weitaus höchsten Gehalt an Calcit. Die Kiesschlammtypen B, C und E sind die tonreichsten. D und F enthalten die grösste Menge an freiem Quarz, wobei der Kiesschlamm F den niedrigsten Gehalt an Karbonaten und den höchsten Feldspatanteil aufweist. Der Kiesschlammtyp G schliesslich zeigt einen aussergewöhnlich hohen Dolomitgehalt.

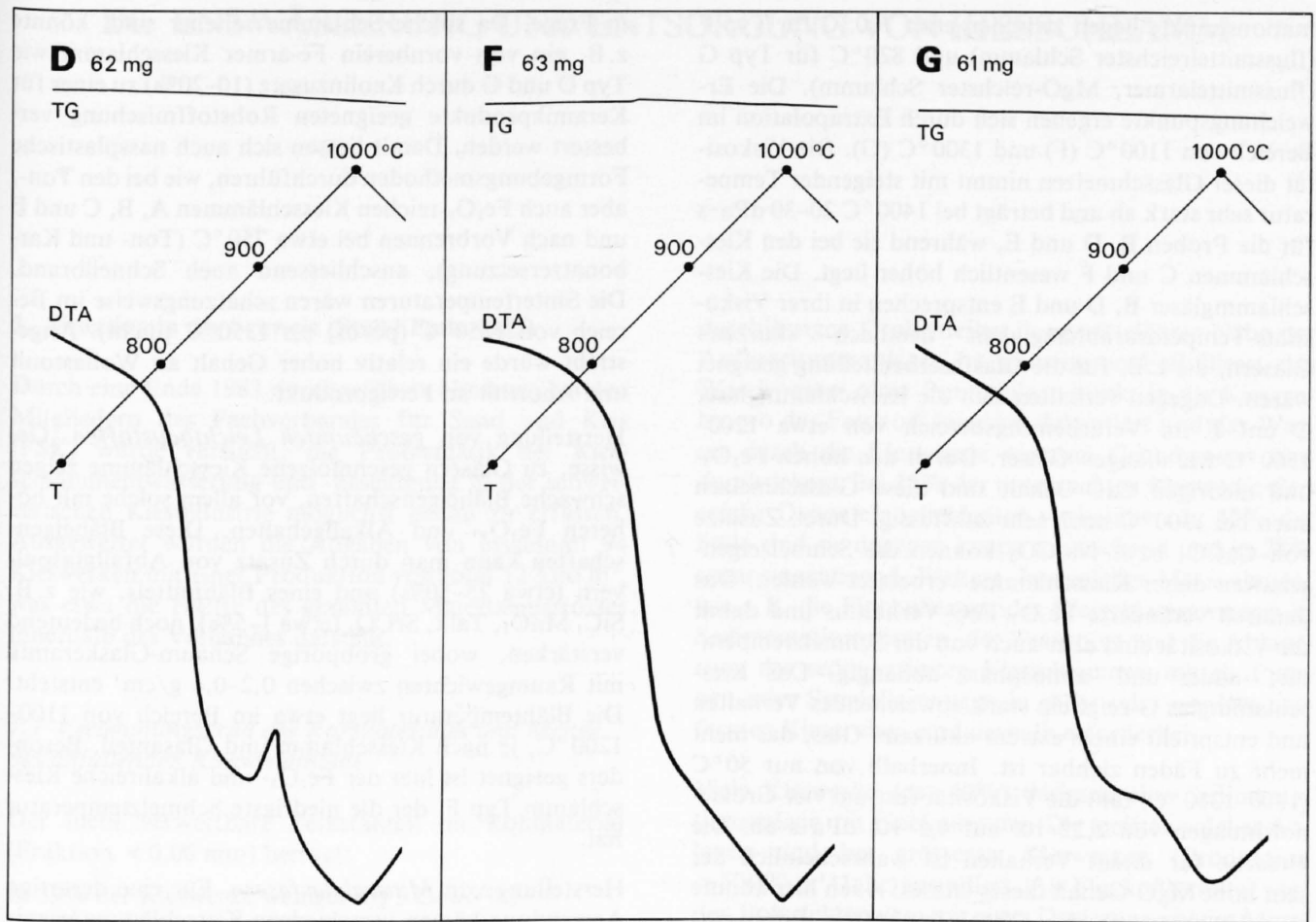


Fig. 27: DTA-Kurven von Kiesschlammgläsern (gepulvert, < 0,5 mm, 4 °C/min.)

Wie erwartet konnten ausgeprägte Unterschiede im Sinter- und im Schmelzverhalten dieser Kiesschlämme festgestellt werden. Diese sind im folgenden zusammengefasst.

Der Fe_2O_3 - und alkalireichste Kiesschlamm F schmilzt bereits bei 1250 °C vollständig zusammen, gefolgt von Kiesschlamm E bei etwa 1300 °C. Infolge des hohen Fe_2O_3 -Gehalts sind die geschmolzenen Proben dunkelbraun gefärbt. Die ebenfalls alkali- und Fe_2O_3 -reichen Kiesschlämme B und C weisen bei 1300 °C eine starke Sinterung mit entsprechender Braunfärbung auf. Dagegen tritt bei den karbonatreichsten Proben A und G bei 1300 °C noch keine Sinterung ein, da bei diesen alkali- und eisenoxidärmsten Kiesschlämmen auch der SiO_2 -Gehalt niedriger ist. Stark fördernd für die Sinterung wirken sich also vor allem Flussmittel wie Feoxidreiche Tone und Alkalifeldspäte aus. Was den Phasenbestand der bei 1200 °C erhitzten Proben betrifft, so lassen sich folgende Unterschiede feststellen: Im weitaus CaO-reichsten Kiesschlamm A dominiert Gehlenit als Hauptphase, weniger stark auch in den Typen B, D, E und G. Die letzte Probe zeigt Anteile von freiem, noch unreaktiertem MgO. Praktisch alle Proben enthalten Feldspat, besonders die Al_2O_3 -reichen Proben C und F. Wollastonit tritt in allen auf 1200 °C erhitzten Kiesschlämmen in grösserer Menge auf, mit Ausnahme des CaO-reichsten Types (A) und des CaO-

ärmsten Types (F). Die letzte Probe zeigte ausserdem den höchsten Gehalt an freiem Quarz und an Diopsid.

Die tonreichsten Kiesschlämme A, B, C und E können ohne Zusätze nassplastisch in Gipsformen zu Hohlkörpern gegossen werden. Diese können nach dem Trocknen bei 1150–1250 °C zu poröser bis dichter Tonkeramik gesintert werden. Die «mageren» und z.T. flussmittelarmen Kiesschlämme D, F und G können nach Beimischen von 12 bis 20% Ton und 10% Flussmittel (Na-Feldspat oder Duranglaspulver) ebenfalls nassplastisch zu Formkörpern gegossen werden, die je nach Temperatur und Flussmittelzusatz mehr oder weniger dicht gesintert werden können.

Nach Zusatz von Abfallglaspulver (20–33% in der Mischung) und von SiC (1–2%) als Blähmittel können Kiesschlämme durch Erhitzen auf 1100–1150 °C zu stark porösen Keramikmaterialien geschäumt werden. Das Raumgewicht liegt etwa zwischen 0,2–0,4 g/cm³. Die stärkste Blähreaktion zeigt dabei der am niedrigsten schmelzende Kiesschlamm F, wobei sich auch der hohe Fe_2O_3 -Gehalt (Reduktion durch SiC) günstig auswirkt.

Alle hier untersuchten Kiesschlämme, mit Ausnahme des CaO-reichsten (A), können bei Temperaturen zwischen 1450–1550 °C zu Gläsern geschmolzen werden, die typische Eigenschaften aufweisen. Ihre Transfor-

mationspunkte liegen zwischen etwa 700°C für Typ F (flussmittelreichster Schlamm) und 820°C für Typ G (flussmittelarmer, MgO-reichster Schlamm). Die Erweichungspunkte ergeben sich durch Extrapolation im Bereich von 1100°C (F) und 1300°C (G). Die Viskosität dieser Glasschmelzen nimmt mit steigender Temperatur sehr stark ab und beträgt bei 1400°C 20–30 dPa·s für die Proben B, D und E, während sie bei den Kiesschlammgläsern C und F wesentlich höher liegt. Die Kiesschlammgläser B, D und E entsprechen in ihrer Viskositäts-Temperaturabhängigkeit demnach «kurzen» Gläsern, die z. B. für die Glasfaserherstellung geeignet wären. Dagegen verhalten sich die Kiesschlammgläser C und F im Verarbeitungsbereich von etwa 1200–1500°C wie «lange» Gläser. Durch den hohen Fe₂O₃- und niedrigen CaO-Gehalt sind diese Glasschmelzen auch bei 1500°C noch sehr zähflüssig. Durch Zusätze von CaCO₃ bzw. Na₂CO₃ können die Schmelzeigenschaften dieser Kiesschlämme verbessert werden. Das dadurch veränderte Fe₂O₃/FeO-Verhältnis und damit die Viskosität sind aber auch von der Schmelztemperatur, -dauer und -atmosphäre abhängig. Das Kiesschlammglas G zeigt ein stark abweichendes Verhalten und entspricht einem extrem «kurzen» Glas, das nicht mehr zu Fäden ziehbar ist. Innerhalb von nur 50°C (1300–1350°C) fällt die Viskosität fast um vier Grössenordnungen von $2,22 \cdot 10^5$ auf $4,5 \cdot 10^1$ dPa·s ab. Die Ursache für dieses Verhalten ist wahrscheinlich der sehr hohe MgO-Gehalt dieses Glases. Auch hier könnte eine Verbesserung der Glaseigenschaften durch entsprechende Zusätze wie SiO₂ oder Feldspat erreicht werden.

Versuche über das Rekristallisationsverhalten der Kiesschlammgläser zeigten, dass diese relativ stabil sind. Erst etwa 100°C über der Transformationstemperatur, d. h. um 800–900°C, erfolgte bei gepulverten Glasproben allmählich Kristallisation: Als Hauptphasen wurden Wollastonit, Gehlenit und Diopsid röntgenographisch identifiziert.

5.6 Schlussfolgerungen

Die hier beschriebenen Sinter- und Schmelzversuche an sieben repräsentativen Kiesschlammgläsern (< 0,063 mm) zeigten, dass solche homogenen und feinkörnigen Mineralgemische beim Erhitzen sehr leicht reagieren. Wenn man wirtschaftliche Erwägungen ausser Betracht lässt, wäre es durchaus möglich, derartige «Sekundärrohstoffe» mit geeigneter Zusammensetzung bei der Herstellung von Feinkeramik und Gläsern einzusetzen. Dabei könnten gewisse, vor allem Fe-oxidarme Kiesschlämme direkt verwendet werden, andere müssten durch Zusatz von weiteren Rohstoffen (Ton, Feldspat, Karbonate, Soda) für die Verarbeitung zu bestimmten Produkten modifiziert werden. Im Prinzip wären z. B. folgende Anwendungen denkbar:

Herstellung von *poröser bis dichter Feinkeramik* (z. B. Fliesen, Tiegel, Filter, Haushaltkeramik). Dafür kämen tonreiche (> 20%) Kiesschlämme mit möglichst niedrigen Fe₂O₃- (< 3%) und CaO-Gehalten (< 30%)

in Frage. Da solche Schlämme seltener sind, könnte z. B. ein von vornherein Fe-armer Kiesschlamm wie Typ D und G durch Kaolinzusatz (10–20%) zu einer für Keramikprodukte geeigneten Rohstoffmischung verbessert werden. Damit liessen sich auch nassplastische Formgebungsmethoden durchführen, wie bei den Ton-, aber auch Fe₂O₃-reichen Kiesschlammgläsern A, B, C und E und nach Vorbrennen bei etwa 750°C (Ton- und Karbonatzersetzung), anschliessend auch Schnellbrand. Die Sintertemperaturen wären schätzungsweise im Bereich von 1250°C (porös) bis 1350°C (dicht). Angestrebt würde ein relativ hoher Gehalt an Wollastonit und Anorthit im Fertigprodukt.

Herstellung von *geschäumten Leichtbaustoffen*. Gewisse, zu Gläsern geschmolzene Kiesschlämme zeigen schwache Bläheigenschaften, vor allem solche mit höheren Fe₂O₃- und Alkaligehalten. Diese Bläheigenschaften kann man durch Zusatz von Abfallglaspulvern (etwa 25–50%) und eines Blähmittels, wie z. B. SiC, MnO₂, Talk, SrCO₃ (etwa 1–5%), noch bedeutend verstärken, wobei grobporige Schaum-Glaskeramik mit Raumgewichten zwischen 0,2–0,4 g/cm³ entsteht. Die Blähtemperatur liegt etwa im Bereich von 1100–1200°C, je nach Kiesschlamm und Glasanteil. Besonders geeignet ist hier der Fe₂O₃- und alkalireiche Kiesschlamm Typ F, der die niedrigste Schmelztemperatur hat.

Herstellung von *Mineralglasfasern*. Für eine derartige Anwendung kämen verschiedene Kiesschlämme in reiner Form, ohne Zusätze, in Frage. Voraussetzung ist, dass der Säuregrad (Verhältnis SiO₂ + Al₂O₃/CaO + MgO) etwa zwischen 1,2–2 liegt und dass der Eisenoxidgehalt unter 5% liegt. Derartige Kiesschlammglas-schmelzen, wie z. B. B, D und E, haben die für die Faserherstellung gewünschten Eigenschaften, d. h. sie entsprechen kurzen Gläsern mit niedriger Viskosität (10–30 dPa·s) im Bereich von 1400–1500°C. Für eine möglichst hohe chemische Stabilität der Glasfasern sollte der CaO + MgO-Gehalt etwa 40% nicht übersteigen. Dies trifft für die obengenannten Kiesschlämme zu. Korrekturen der Zusammensetzung durch Zusatz billiger Rohstoffe (Ton, Feldspat, Quarz, Calcit) wären in den anderen Fällen erforderlich. Welche Bedeutung man der Entwicklung von chemisch beständigen Mineralglasfasern zumisst, z. B. als *Asbestersatz*, geht daraus hervor, dass weltweit auf diesem Gebiet Forschungs- und Entwicklungsprojekte laufen. So wird ein grosses Projekt an der *University of California*, Los Angeles (Prof. J.D. MacKenzie), durchgeführt, das sich mit der Herstellung von alkalibeständigen Glasfasern durch Schmelzen von Schiefer + Kalksteinmischungen befasst. Für die Anwendung der üblichen Schmelzverfahren bei der Mineralglasfaserherstellung, d. h. Kupol- oder Schachtöfen, die mit dem stückigen Rohmaterial (50–100 mm) und Koks beschickt werden, müssten die Kiesschlämme allerdings vorbrikettiert und vorgesintert werden. In neuer Zeit ist auch die Möglichkeit des Schmelzens in Wannenöfen untersucht worden, wobei dann eine derartige Vorbehandlung nicht mehr erforderlich wäre.

IX. ENTWÄSSERUNG UND ENTSORGUNG VON KIESSCHLAMM

1. Situation in der Schweiz (Stand Ende 1983)

Durch eine Ende 1983 durchgeführte Umfrage bei den Mitgliedern des Fachverbandes für Sand und Kies (FSK) wurde versucht, die Problematik der Kiesschlammmentwässerung und -beseitigung in der schweizerischen Kiesindustrie möglichst genau zu erfassen. Ausgewertet wurden die Angaben von insgesamt 94 Kieswerken mit einer Produktion von total 12 Mio m³, was etwa die Hälfte des gesamten Materialausstosses innerhalb des Verbandes darstellt.

1.1 Verlehmungsgrad des Rohmaterials und Menge des anfallenden Kiesschlammes

Der nicht verwertbare Feinstanteil im Rohmaterial (Fraktion < 0,06 mm) beträgt:

in 39% der Kieswerke weniger als 5 Gew.-%,
in 48% der Kieswerke zwischen 5 und 10 Gew.-%,
in 8% der Kieswerke zwischen 10 und 20 Gew.-%,
in 4% der Kieswerke zwischen 20 und 30 Gew.-% und
in 1% der Kieswerke über 30 Gew.-%.

Der jährliche Kiesschlammmanfall kann für die 94 Kieswerke auf ca. 1.6 Mio Tonnen Trockensubstanz veranschlagt werden. Im Mittel fallen pro m³ abgebautem Kies ca. 140 kg (ca. 6 Gew.-%) Trockenschlamm an. Pro Werk schwankt der Schlammanfall, je nach Verlehmung des Rohmaterials und Kiesproduktion, zwischen einigen Tausend t/Jahr und 120000 t/Jahr.

Für die Aufbereitung von einem m³ Kies und Sand braucht es 1 m³ Washwasser bei sehr sauberem Kiesmaterial (z. B. Schotter) bis 6 m³ Washwasser bei verlehmttem Kiesmaterial (z. B. Moräne). Der Feststoffanteil im Kiesschlammwasser liegt im Mittel bei ca. 50 g/Liter (min. ca. 20 g/l, max. > 100 g/l). Die für die Kiesaufbereitung benötigten Wassermengen sind enorm und können mehr als 1 Mio m³ pro Werk und Jahr betragen. In den meisten Fällen wird mit der Flockulierung ein erheblicher Teil (bis nahezu 90%) des Washwassers zurückgewonnen und dem Waschprozess wieder zugeführt.

1.2 Kiesschlammmentwässerung

Die einfachste und wirtschaftlichste Art Kiesschlamm zu entwässern und zu beseitigen ist die Deponie des Kiesschlammwassers in bereits abgebauten, wasser-

durchlässigen Grubenteilen in unmittelbarer Nähe der Aufbereitungsanlage. Im günstigsten Fall fliesst das Washwasser ohne Pumpanlage direkt in die Kiesgrube, wo der Feststoff langsam dekantiert und das Wasser durch die Kieswände bis zum Grundwasser hindurchsickert. Bei 35% der untersuchten Kieswerke sind solche Deponiemöglichkeiten vorhanden. In 40% der Fälle sind sie dagegen knapp ausreichend und in 25% sogar ungenügend. Weitere, kostspielige Massnahmen, wie z. B. die Flockulierung des Kiesschlammwassers in Sedimentationstürmen, der Transport und die Ablagerung des sedimentierten Kiesschlammes mittels Pumpen oder Speziallastwagen in mehr oder weniger entfernten Kiesgruben sind deshalb erforderlich.

Viele Kieswerke (ca. 40%) besitzen eine Sedimentationsanlage mit Flockulierung. Die meisten solcher Anlagen sind bei grösseren Kieswerken (Produktion > 50000 m³/Jahr) installiert. Als Flockungsmittel werden Polyelektrolyten mit einer Dosierung von im Mittel ca. 9 g/m³ verwendet. Der Feststoffgehalt des sedimentierten Schlammes beträgt im Mittel ca. 475 g/l, was grössenordnungsmässig einer Reduktion des Kiesschlammvolumens von rund 90% entspricht.

Eine weitere Entwässerungsstufe zwecks stärkerer Kiesschlammmeindickung ist dann notwendig, wenn der Kiesschlamm über weitere Distanzen transportiert werden muss. In einigen Kieswerken ist diese zweite Entwässerungsstufe in den letzten Jahren bereits eingebaut worden. Bis Ende 1983 hat sich lediglich das Verfahren mit dem Vakuumtrommelfilter durchgesetzt (drei Anlagen in der Schweiz). Nach diesem Verfahren wird der Kiesschlamm mit einem Restwassergehalt von 23–28 Gew.-% stichfest und mit offenen Lastwagen gut transportfähig. Durch diese zweite Entwässerungsstufe wird beispielsweise das Schlammvolumen nochmals um etwa die Hälfte reduziert.

1.3 Kiesschlammmentsorgung

Bei vielen Kieswerken (ca. 55%) wird Kiesschlamm über längere Distanzen transportiert:

- mit Rohrleitungen und Pumpen (ca. 27%), auf Transportdistanzen bis 2800 m, im Mittel 660 m.
- mit Lastwagen (28%), auf Transportdistanzen bis 20 km, im Mittel 6,2 km.

Nur in wenigen Fällen (ca. 8%) sind Kieswerke darauf angewiesen, auf fremde Deponien auszuweichen.

1.4 Kiesschlammverwertung

In den letzten Jahren sind in Bezug auf Kiesschlammverwertung verschiedene Untersuchungen und Versuche durchgeführt worden:

- Rohmaterial für Ziegeleien und als Zusatz zur Herstellung von hydraulischen Bindemitteln
- Kiesschlamm in aktivierter Form (thermische Behandlung bei 900 °C) zur Herstellung von Baustoffen
- Dichtungsmaterial in Mülldeponien, als Schlamm-sand für den Kanalisationsbau und im Strassenbau (mit gebranntem Kalk stabilisiert).
- Einsatzmöglichkeiten in der Bodenstabilisierung (in aktivierter Form)
- Als Zusatzkomponente bei der Kompostierung.

Bis Ende 1983 ist es aber noch zu keiner regelmässigen und konsequenten Kiesschlammverwertung gekommen.

2. Untersuchungen im Zusammenhang mit der Kiesschlammmentwässerung

Mit dem zunehmenden Verlehmungsgrad des Rohmaterials und der Verknappung von geeigneten Deponieräumen in unmittelbarer Nähe der Kiesaufbereitungsanlagen sind die Probleme im Zusammenhang mit der Kiesschlammmentwässerung und -entsorgung bedeutend grösser geworden. Durch Sedimentationsversuche im Labor, Beobachtungen und Messungen an natürlichen Kiesschlammweiher sowie die Darstellung und Bewertung von möglichen mechanischen Entwässerungssystemen wurde versucht, einen Beitrag für eine optimale Lösung in diesem Problembereich zu leisten.

2.1 Natürliche Kiesschlammmentwässerung

Obwohl die mechanische Kiesschlammmentwässerung (Sedimentationsbecken mit Flockulierung, zweite Entwässerungsstufe) von Jahr zu Jahr an Bedeutung zunimmt, bleibt die Kiesschlamm-sedimentation in bereits abgebauten Kiesgrubenteilen (Schlammweiher) immer noch das meist verbreitete System für die Kiesschlammmentwässerung. Da es bei weitem die einfachste und wirtschaftlichste Lösung ist, wird es überall dort angewendet, wo Deponieräume in der Nähe der Aufbereitungsanlage zur Verfügung stehen.

Grundsätzlich kann, je nach Beschaffenheit des Absetzraumes, zwischen zwei Typen von Kiesschlamm-sedimentation unterschieden werden:

- Sedimentation in gut wasserdurchlässigen Gruben
- Sedimentation in Gruben ohne seitliche Entwässerung

2.1.1 Sedimentationsversuche im Labor

Sedimentationsversuche in Messzylindern, durchgeführt an Fraktionen $< 0,063$ mm aus acht schwach bis stark verlehnten Kiesvorkommen haben folgende Erkenntnisse gebracht:

- Auch ohne Flockulierungsmittel besteht im Waschwasser eine deutliche Neigung zur Flockulierung, die bereits eine hohe Sedimentationsgeschwindigkeit des Kiesschlammes bewirkt. Bei der Schwerkraft-sedimentation sinken kleine Teilchen in einer Suspension mit einer Geschwindigkeit, die von den Flüssigkeitseigenschaften sowie der Masse und Form der Teilchen abhängig ist. So beträgt die Fallzeit für kugelförmige Teilchen mit einer Dichte von 2,65 (ähnlich Kiesschlammteilchen) im Wasser bei 20 °C:

Durchmesser mm	Fallzeit für 10 cm
0,020	4 Min. 38 Sek.
0,002	7 Std. 43 Min.
0,001	31 Std. 15 Min.

Bei den acht Sedimentationsversuchen betrug die Fallzeit für 10 cm (Trennlinie zwischen dem sedimentierenden Kiesschlamm und der klaren Flüssigkeit) nur 5 bis ca. 30 Minuten, was der flockulierte Zustand der feinsten Partikel klar zum Ausdruck bringt.

- Mit zunehmendem Tonmineraliengehalt im Kiesschlamm nimmt allgemein die Sedimentationsgeschwindigkeit ab, das Sedimentvolumen wird dagegen grösser (vgl. Fig. 28), was sich auf die Lagerungsdichte des Kiesschlammes auswirkt (vgl. Fig. 29). Die Dichte des sedimentierten, nicht konsolidierten Kiesschlammes liegt zwischen ca. 1,3 und 1,5.
- Durch den Zusatz von Flockulierungsmitteln wird zwar die Sedimentationsgeschwindigkeit erheblich beschleunigt, das Sedimentvolumen wird aber allgemein grösser als dasjenige des nicht mit Flockulierungsmitteln behandelten Kiesschlammes.

Auch bei der Sedimentation im Kiesschlammweiher ist zu erwarten, dass mit zunehmendem Tonmineraliengehalt die Lagerungsdichte und demzufolge auch die Eigenkonsolidation des Kiesschlammes kleiner werden.

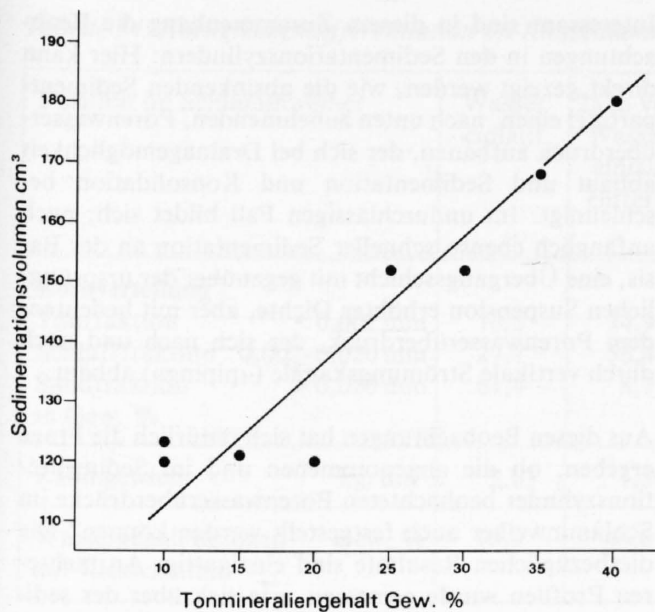


Fig. 28: Sedimentationsvolumen in Funktion des Tonmineraliengehaltes von Kiesschlamm (Messzylinder von 1000 cm³, $\varnothing \cong 6$ cm, Höhe $\cong 35$ cm, Kiesschlammvolumen 1000 cm³, Feststoffgehalt 100 g/l)

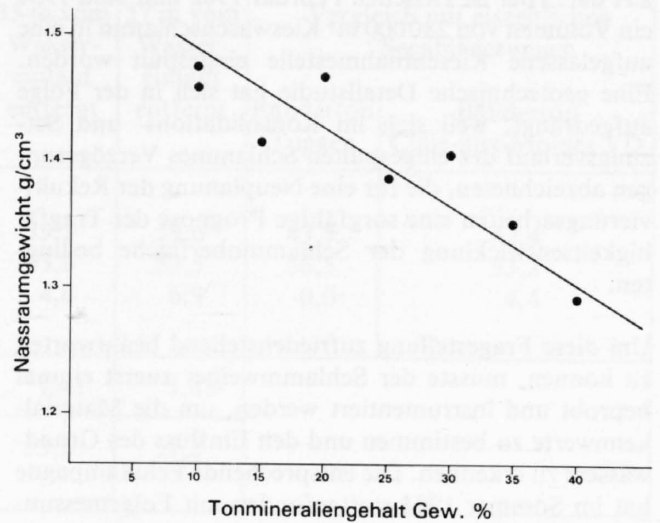


Fig. 29: Raumgewicht des sedimentierten Kiesschlammes in Funktion des Tonmineraliengehaltes

2.1.2 Sedimentation in wasserdurchlässigen Absetzräumen, meist Schottergrube über dem Grundwasserspiegel

Die Kiesschlammmentwässerung erfolgt kontinuierlich durch die Grubenwände. Der Kiesschlamm sedimentiert in Form eines sehr ausgedehnten, flachen Deltas, dessen Oberfläche zum grössten Teil über dem Wasserspiegel liegt und von unregelmässig verlaufenden Schlammströmen durchquert ist. Im Bereich der über dem Wasserspiegel liegenden Absetzfläche werden eher grobe Fraktionen abgelagert, während die feineren Fraktionen durch die Strömung bis in die unter Wasser stehenden Schlammweiherteile verfrachtet werden. Mit zunehmender Entfernung ab Schlammeinlauf nimmt allgemein die Korngrösse des sedimentierten Kiesschlammes ab.

Die Kiesschlammmentwässerung in durchlässigen Kiesgruben bietet keine besonderen Probleme, die Deponiekapazität solcher Gruben ist relativ gross, da der Kiesschlamm sich fortlaufend entwässern kann und die guten Drainageeigenschaften der Grubenwände die Verdichtung des sedimentierten Kiesschlammes (Eigenkonsolidation) begünstigen. Allerdings muss bei der Rekultivierung und besonders bei allfälligen grösseren Bodenbelastungen (schwere Baumaschinen, Dammschüttungen, Deponien, Bauten, Strassenbau) berücksichtigt werden, dass Kiesschlammweiher auch nach Jahren äusserst schlechte Baugrundeigenschaften besitzen (Grundbruchgefahr, Setzungen).

2.1.3 Sedimentation in Absetzräumen ohne wesentliche seitliche Entwässerung: eine Fallstudie

Diese Kategorie umfasst alle Absetzräume, bei welchen die natürliche Entwässerung nur zum Teil oder gar nicht stattfinden kann, im allgemeinen Gruben in nicht oder schlecht durchlässigem Moränenmaterial bzw. verlehmttem Schottermaterial.

Charakteristisch für solche Absetzräume ist, dass die Kiesschlamm sedimentation in einem wassergefüllten Weiher oder Becken erfolgt und dass keine oder nur eine minime seitliche Entwässerung stattfindet. Das überschüssige Wasser wird entweder mit Pumpen für die Kiesaufbereitung zurückgewonnen bzw. in naheliegende Grundwasserträger (Schotter) zur Versickerung gebracht oder fliesst mit Überlauf in ein weiteres Klärbecken und gelangt, nach vollständiger Dekantation, schlussendlich in einen Vorfluter.

Absetzräume dieser Art sind nicht häufig, da aber zukünftig mit einer Zunahme von Abbaustellen in stark verlehmtten Kiesvorkommen zu rechnen ist, wird sich immer mehr das Problem der Kiesschlamm Lagerung in solchen wasserundurchlässigen Becken stellen. Über die Sedimentation, Lagerungsdichte und Konsolidation von Kiesschlamm unter Wasser liegen nur wenige Erkenntnisse vor, deshalb wurde versucht, diesen Problembereich näher zu beleuchten.

Eine diesbezügliche Fallstudie stellen die Untersuchungen in einem Kieswasch-Schlammbecken bei Gutenswil ZH dar. Hier ist zwischen Februar 1982 und Juni 1984 ein Volumen von 280 000 m³ Kieswaschschlamm in eine aufgelassene Kiesentnahmestelle eingespült worden. Eine geotechnische Detailstudie hat sich in der Folge aufgedrängt, weil sich im Konsolidations- und Setzungsverlauf des eingespülten Schlammes Verzögerungen abzeichneten, die für eine Neuplanung der Rekultivierungsarbeiten eine sorgfältige Prognose der Tragfähigkeitsentwicklung der Schlammoberfläche bedingten.

Um diese Fragestellung zufriedenstellend beantworten zu können, musste der Schlammweiher zuerst einmal beprobt und instrumentiert werden, um die Materialkennwerte zu bestimmen und den Einfluss des Grundwassers zu erkennen. Die entsprechende Feldkampagne hat im Sommer 1984 stattgefunden mit Folgemessungen bis in den Winter 1985/86. Einzelne Aspekte dieser Untersuchungen sind bereits anderweitig dargestellt worden (RAMHOLT, SCHLÜCHTER UND MUMENTHALER, 1987), so dass nachstehend kurz zusammenfassend berichtet wird.

In zwei Querprofilen sind von einer schwimmenden Arbeitsplattform aus über die ganze Schlammtiefe ungestörte Proben entnommen worden, ebenso sind Flügelversuche und Rammsondierungen durchgeführt worden. Zusätzlich wurden Porenwasserdruckgeber in verschiedenen Schlammstiefen eingebaut. Die Laboruntersuchungen erfolgten nach den SNV-Standardmethoden. Zusätzlich sind Sedimentationsversuche mit dem Gutenswilerschlamm in Absetzzyindern (drainiert und undrainiert) durchgeführt worden.

Bereits wichtige Resultate lieferten die Bestimmungen von Wassergehalt und Lagerungsdichte über die beprobte Schlammtiefe; drei Zonen sind dabei unterscheidbar:

- (1) eine oberste mächtige Zone mit hohem Wassergehalt, der wohl linear abnimmt, aber wesentlich über der Fließgrenze des Materials bleibt (= Suspension);
- (2) eine geringmächtige Übergangszone mit sprunghaftem Anstieg von Lagerungsdichte und entsprechender Abnahme des Wassergehalts (= Sedimentationszone);
- (3) eine Zone mit Wassergehalt im Bereich der Fließgrenze des Schlammes und erhöhte, konstante Lagerungsdichte (= Konsolidationszone).

Der Nachweis einer basalen, sedimentierten und sich normalkonsolidierenden Schlammsschicht erfolgte ebenfalls mit den Flügelversuchen und Rammsondierungen. Wichtig ist die Feststellung, dass die sedimentierte Schlammsschicht nicht nur an der ehemaligen Kiesgrubensohle, sondern auch seitlich an den steilen Böschungen vorhanden ist.

Interessant sind in diesem Zusammenhang die Beobachtungen in den Sedimentationszylindern: Hier kann direkt gezeigt werden, wie die absinkenden Sedimentpartikel einen, nach unten zunehmenden, Porenwasserüberdruck aufbauen, der sich bei Drainagemöglichkeit abbaut und Sedimentation und Konsolidation beschleunigt. Im undurchlässigen Fall bildet sich, nach anfänglich ebenso schneller Sedimentation an der Basis, eine Übergangsschicht mit gegenüber der ursprünglichen Suspension erhöhter Dichte, aber mit bedeutendem Porenwasserüberdruck, der sich nach und nach durch vertikale Strömungskanäle («piping») abbaut.

Aus diesen Beobachtungen hat sich natürlich die Frage ergeben, ob die angenommenen und im Sedimentationszylinder beobachteten Porenwasserüberdrücke im Schlammweiher auch festgestellt werden können? Die diesbezüglichen Resultate sind einzigartig: An mehreren Profilen wurde gemessen, wie sich über der sedimentierten Basisschicht ein Überdruck aufbaut – mit einem deutlichen Maximum unmittelbar darüber. Jene Piezometer, welche in den anstehenden Schotter im Liegenden der Schlammdeponie versetzt wurden, zeigen entsprechend tiefe Druckniveaus, da sie einerseits über dem regionalen Grundwasserspiegel liegen, andererseits durch die Basisschicht der Deponie vom Druckniveau im Schlamm abgeschirmt sind.

Aus den Verteilungsprofilen von Raumgewicht (Lagerungsdichte), Wassergehalt und Scherfestigkeit sowie des Porenwasserdruckes im Schlamm zeigt sich, dass der jetzige Zustand Sedimentations- und Konsolidationsverhältnissen in einer «Badewanne» entspricht. Eine offenbar ursprünglich vorhandene, allerdings nicht bedeutende Durchlässigkeit der Kiesgrube ist durch rasche Sedimentation und Kolmatierung versiegelt worden (= basale, normalkonsolidierte Schicht), deren Durchlässigkeit so gering ist, dass der weitere Druckabbau nach unten und zur Seite hin nicht mehr erfolgt. So hat sich nun auch im Schlammweiher – analog dem Sedimentationszylinder – Druckabbau entlang vertikaler Strömungskanäle von 20 bis 30 cm Durchmesser («piping») eingestellt (Nov./Dez. 1986).

Demgegenüber ist im Einlaufsbereich, und dem dort aufgeschütteten Delta, wegen der unmittelbar abgelagerten gröberen Fraktion (Sand) und der «Ereignisschichtung» infolge der Pumpintervalle die Konsolidation ohne Verzögerung abgelaufen. Eine einfache, und sich aus diesen Beobachtungen geradezu aufdrängende Massnahme, zur Verhinderung weiterer ähnlicher Störfälle, ist das periodische Umstellen des Einlaufes in das Absetzbecken, so dass im ganzen Beckenbereich sandigere Schichten abgelagert werden, die dann die seitliche Entwässerung aufrechterhalten.

2.1.4 Vergleich mit natürlichen Sedimenten

Späteiszeitliche Seebodenlehme zeigen bezüglich Kornverteilung und Mineralogie Ähnlichkeiten mit der Kies-

Tabelle 54: Korngrössendifferentiation im Kiesschlammweiher und Vergleich mit eiszeitlichen Seeablagerungen

Position im Schlammweiher	Wasser einlauf	25 m vom Wasser- einlauf entfernt	35 m vom Wasser- einlauf entfernt	57 m vom Wasser- einlauf entfernt	Vergleich mit eiszeitlichen Seeablagerungen	
					Bänderton Tuggen	Bänderton Claie-aux-Moines VD
Kornverteilung						
Tonfraktion < 0,002 mm	10,5	34,9	39,5	39,6	43,5	42,4
Schlufffraktion 0,002–0,020 mm	27,7	56,4	55,9	53,5	56,5	53,2
Sandfraktion > 0,020 mm	61,8	8,7	4,6	6,9	0,0	4,4
in Gew. %						
Raumgewicht kg/dm³	2,03	1,50	1,41	1,43		
Wassergehalt bezogen auf Kiesschlamm Gew. %	19,9	46,8	53,2	51,2		

schlammfraktion, die in einem Kiesschlammweiher ausserhalb des Deltabereiches sedimentiert (Tabelle 54). Aus geotechnischen Untersuchungen, die an Seebodenlehmprofilen vom Zürichsee durchgeführt wurden (GYGER, MÜLLER-VONMOOS, SCHINDLER 1976, SCHLÜCHTER 1984), sind, mit zunehmender Tiefe ab Seeboden, eine Abnahme des Wassergehaltes bzw. eine Zunahme der Lagerungsdichte des Seebodenlehmes zu entnehmen, die praktisch im gleichen Rahmen verlaufen, wie in einem wassergefüllten, dichten Kiesschlammweiher. Ab Ende der Kiesschlammwasserzufuhr kann sich der Kiesschlamm, im Gegensatz zum Seebodenlehm, von der Oberfläche her (Verdunstung, Entwässerung) jedoch weiter konsolidieren.

2.2 Mechanische Kiesschlammmentwässerung

Bei der Kiesaufbereitung werden im Kieswaschprozess grosse Mengen von schlammhaltigem Abwasser mit geringer Feststoffkonzentration produziert. Je nach Kiesvorkommen kann dieser feinstkörnige Mineralanteil zwischen 5 bis 20 Gewichtsprozent betragen. Probleme können entstehen bei der Deckung des grossen Frischwasserbedarfs für den Waschprozess sowie bei der Entsorgung der Kieswerke von grossen Schlammwasservolumina.

Verfahren für die Schlammwasserbehandlung wurden entwickelt und erprobt mit der Zielsetzung, gerade noch pumpbare oder stichfeste Schlämme zu produzieren. Bei diesen Verfahren wird Waschwasser zurückgewonnen, als Folge der Frischwasserkonsum eingeschränkt und die zu entsorgenden Schlammvolumina erheblich reduziert.

Die in Zukunft denkbare Verwertungsmöglichkeit von stichfesten Schlämmen oder von silierfähigem Trockenschlamm würde Schlammdeponien gänzlich erübrigen.

2.2.1 Entwässerungsverfahren

In Fig. 30 sind verschiedene Stufen der Kiesschlamm-entwässerung schematisch dargestellt. Die Entwässerungsverfahren werden nachstehend beschrieben und anhand von Beispielen erläutert.

2.2.1.1 Feinsandrückgewinnung

Die Feinsandrückgewinnung und gleichzeitig die Schlammabscheidung erfolgt in *Hydrozyklonen*.

Hydrozyklone sind Klassierer, in welchen die Trennung der Teilchen auf Grund der Gewichtsunterschiede und unter Ausnützung der Zentrifugalkraft erfolgt. Um eine optimale Trennung erzielen zu können, sollte die Feststoffkonzentration im Zulauf 15 Gewichtsprozent nicht überschreiten. Der Gewichtsanteil der Mineralteilchen im Zulauf, die kleiner sind als 63 Mikron, kann dabei im Bereich zwischen 30 und 75 Prozent variieren. Hydrozyklone produzieren keinen klaren Überlauf. Sie sind deshalb für eine bestimmte Trennkorngrösse ausgelegt, z. B. für 63 Mikron.

In unserem Beispiel bedeutet das, dass im Unterlauf des Zyklons Feinsand mit Korngrössen von über 63 Mikron anfällt und im Überlauf ein Schlamm mit typisch 7 Gewichtsprozent Feststoff mit Teilchengrössen, die unter 63 Mikron liegen. Sofern nur diese Verfahrensstufe zur Anwendung gelangt, ist das Kieswerk vom Zyklon-Überlauf zu entsorgen. Das sind 14,3 Tonnen Schlammwasser pro Tonne Trockenschlamm, die in die Deponie zu pumpen sind. Der Waschwasserverlust pro Tonne ausgewaschenen Trockenschlamm beträgt 13,3 Tonnen und ist durch eine entsprechende Frischwassereinspeisung in das Kieswerk zu kompensieren.

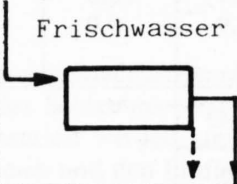
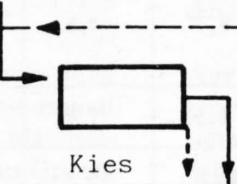
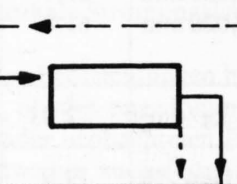
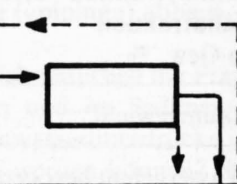
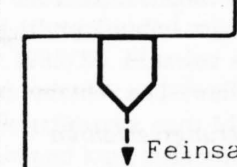
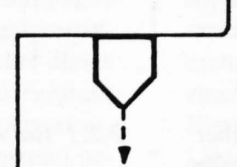
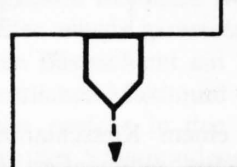
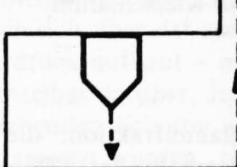
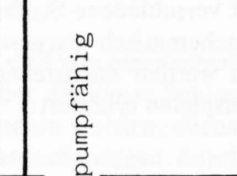

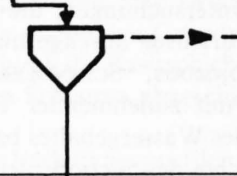
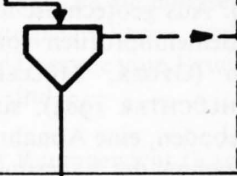
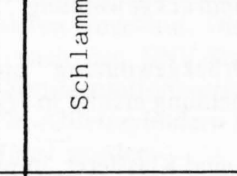
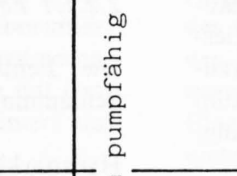

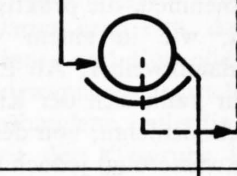
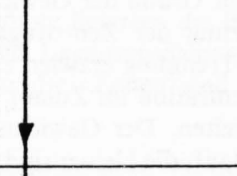
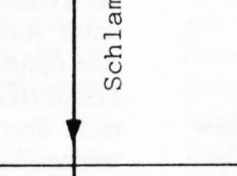
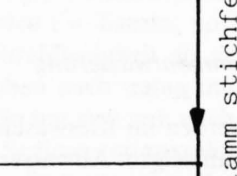

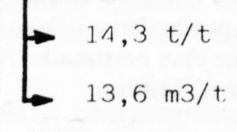
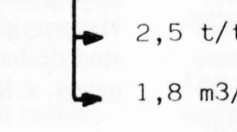
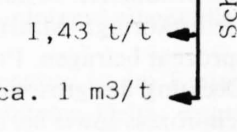
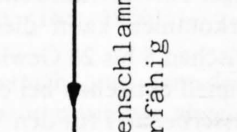
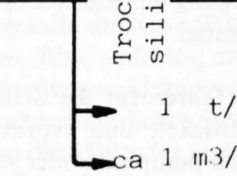
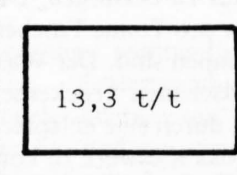
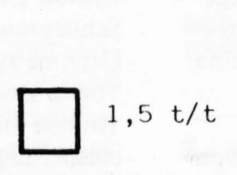
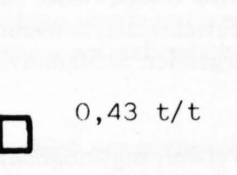
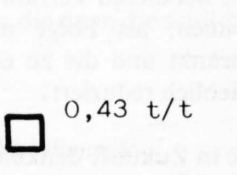
Ausbau	Feinsandrück- gewinnung	Schlammwasser- klärung	Schlamm- eindickung	Schlamm- trocknung
Verfahrens- stufen:	1.Kieswaschung 2.Feinsand- rückgewinnung 6.Deponie	1.Kieswaschung 2.Feinsand- rückgewinnung 3.Voreindickung 6.Deponie	1.Kieswaschung 2.Feinsand- rückgewinnung 3.Voreindickung 4.Eindickung 6.Deponie	1.Kieswaschung 2.Feinsand- rückgewinnung 3.Voreindickung 4.Eindickung 5.Trocknung 6.Trockenschlamm
1.Kies- waschung:				
2.Feinsand- rückge- gewinnung:				
3.Vorein- dickung mittels Flockulie- rung				
4.Eindickung (mittels Vakuumtrom- melfilter)				
5.Trocknung:				
6.Deponie Gewichte: Volumina:				
Trocken- schlamm Gewichte: Volumina:				
Frischwasser- bedarf				

Fig. 30: Ausbaustufen Kiesschlammmentwässerung. Die Deponiegewichte und -volumina, wie auch der Frischwasserbedarf, sind auf eine Tonne Trockenschlamm bezogen.

2.2.1.2 Voreindickung mittels Flockulierung

An die Voreindickungsstufe werden folgende Forderungen gestellt:

- Abscheiden der Mineralteilchen aus dem Zyklon-Überlauf
- Eindickung des Schlammes auf eine noch pumpbare Feststoffkonzentration.

Schlammwasser lässt sich im Klärbecken durch Sedimentation der Mineralteilchen in einen eingedickten Schlamm und Reinwasser zerlegen. Je nach Dichte und Durchmesser sinken die Schlamnteilchen mit verschiedenen Geschwindigkeiten auf den Boden des Beckens. Dabei ist die Sinkgeschwindigkeit einzelner Teilchen, die kleiner als 60 Mikron sind, äusserst gering und beträgt z. B. für Teilchen von 10 Mikron gerade noch 0,3 m/h.

Durch Beimischung von Flockungsmitteln in das Schlammwasser agglomerieren einzelne Schlamnteilchen zu Flocken. Diese Flocken haben eine höhere Sinkgeschwindigkeit als Einzelteilchen, und dadurch lässt sich der Sedimentationsvorgang beschleunigen und wirtschaftlich optimieren. Flockungsmittel werden in Wasser gelöst und kommen stark verdünnt zum Einsatz. Es handelt sich meist um synthetische Polymere, zum grossen Teil auf der Basis Acrylamid. Für die Kiesschlammzubereitung werden hauptsächlich anionenaktive Makromoleküle eingesetzt. Um eine gute Flockungswirkung zu erreichen, sind sie gleichmässig mit dem Schlammwasser zu vermischen, und zwar in bestimmten Konzentrationen und Dosierungen, die für den jeweiligen Einsatz individuell zu bestimmen sind.

In Laborversuchen wird das Sedimentationsverhalten von Kiesschlamm, der sich aus Teilchen verschiedener Korngrössen zusammensetzt (z. B. 95% kleiner als 63 Mikron, 60% kleiner als 10 Mikron und 30% kleiner als 2 Mikron) unter Zugabe von Flockungsmitteln praxisnah bestimmt. Diese Versuche erlauben es, die Dekantationsgeschwindigkeit w (m/h) festzulegen. Die erforderliche Klärfläche F (m²) lässt sich dann nach folgender Beziehung ermitteln

$$F = \frac{V^*}{w}$$

V^* (m³/h) bedeutet das zu klärende Schlammvolumen. F wird in der Regel noch mit einem Sicherheitszuschlag von 30% versehen.

Schlammwasserkläranlagen erlauben eine Eindickung auf einen mittleren Feststoffgehalt von etwa 40 Gewichtsprozenten entsprechend einem Deponiegewicht von 2,5 Tonnen Schlammwasser pro Tonne Feststoff. Dies entspricht einem Waschwasserungsverlust von 1,5 Tonnen pro Tonne Schlamm. Anders ausgedrückt werden von den 13,3 Tonnen Wasser aus der Feinsand-

rückgewinnungsstufe 11.8 Tonnen für die Kieswaschung zurückgewonnen.

Apparative Konzepte

Der gewünschte optimale Feststoffgehalt des Schlammes (40 Gewichtsprozent) kann nur erreicht werden, wenn eine bestimmte Klärfläche in den Kläranlagen gewährleistet wird, die in den vorgängig beschriebenen Absetzversuchen ermittelt wurde. Die Eindickung kann dabei durch geeignete Rührreinrichtungen gefördert werden. Dies geschieht in apparativen Lösungen mit zentralangeordneten Rührwerken oder mittels Verdichtungsgittern.

Die Schlammpumpe kann in Abhängigkeit des Eindickungsgrades automatisch zu- und abgeschaltet werden. Dabei ist zu beachten, dass im Klärbecken keine Trichterbildung (rat-holing) mit Durchfliessen von geklärtem Wasser erfolgt. Die Schlammpumpe kann über die Stromaufnahme des Gitters, den Feststoffgehalt des Schlammes oder den Schlamminhalt des Klärbeckens geregelt werden. Die Förderung des eingedickten, abrasiven Schlammes erfordert schon bei kurzen Leitungslängen hohe Pumpendrucke und damit eine entsprechende Pumpenkonstruktion. Zum Einsatz gelangen Spezialkonstruktionen von Zentrifugalpumpen, hauptsächlich aber volumetrische Pumpen, im besonderen Exzentrerschneckenpumpen, Kolbenmembranpumpen und Schlauchpumpen.

Das geklärte Wasser fliesst in eine Reinwasser-Überlaufrinne und wird durch ein Ablaufrohr in die Kieswaschstufe zurückgeführt.

2.2.1.3 Eindickung

Die Forderung an die Eindickungsstufe ist die Produktion eines nicht mehr tropfenden, sogenannt stichfesten Schlammes mit etwa 70 Gewichtsprozent Feststoffanteil.

Die Vorteile der Eindickung sind:

- Verlängerte Nutzungsdauer der Deponie.
- Der stichfeste Schlamm kann über grössere Distanzen ohne Strassenverschmutzung mit Lastwagen transportiert werden. Der Kieslaster, der in der Regel nach dem Kiestransport leer in die Kiesgrube zurückfährt, kann auf der Rückfahrt stichfesten Schlamm transportieren.
- Zusätzliches Waschwasser wird zurückgewonnen.

Verfahrenstechnisch wird diese Aufgabe durch Zentrifugieren oder Filtrieren gelöst.

Beim Filtrieren ist die treibende Kraft für den Trennvorgang eine Druckdifferenz. Beim Vakuumfilter wird

diese Druckdifferenz zwischen dem Umgebungsdruck und einem maschinell erzeugten Unterdruck gebildet, bei Druckfiltern zwischen dem Umgebungsdruck und einem Überdruck im eingesetzten Filter. Bei Vakuumfiltern kann die wirksame Druckdifferenz maximal 1 bar (praktisch etwa 0,8 bar) und bei Druckfiltern bis 25 bar betragen.

Die Trennung der beiden Phasen «Flüssig und Fest» erfolgt mit Hilfe eines Filtertuchs, das auf einem Stützgerüst aufgezogen ist.

Die Schlamnteilchen werden durch ein Filtertuch und den sich auf dem Filtertuch bildenden Filterkuchen zurückgehalten. Das durch den Filterkuchen durchgehende, geklärte Wasser wird Filtrat genannt und für die Kieswaschung zurückgewonnen.

Beim Zentrifugieren beruht der Trenneffekt, wie bei der Voreindickung im Klärbecken, auf dem Prinzip der Sedimentation. Beim Voreindicken wird nur Zwischenraumwasser, beim Zentrifugieren Teile des stärker an die Feststoffe gebundenen Haft-, Adhäsions- sowie Kapillarwassers entfernt. Ein Schwerfeld mit einfacher Fallbeschleunigung ist nicht mehr ausreichend, es wird ein künstlich verstärktes Schwerfeld erzeugt, dessen Stärke als Vielfaches der Erdbeschleunigung (1 g) angegeben wird.

Apparative Konzepte

a) Vakuum-Trommelfilter

Von den Vakuumfiltern hat sich das Trommelfilter gegenüber dem Scheibenfilter durchgesetzt. Bei gleicher Grundfläche lassen sich beim Scheibenfilter grössere Filterflächen unterbringen. Es ist aber komplizierter im Aufbau, und die Abnahme des Filterkuchens bringt Schwierigkeiten.

Die Wirkungsweise von Vakuum-Trommelfiltern ist in der Fig. 31 dargestellt. Eine drehende Trommel durchläuft drei Zonen:

- die Saugzone
- die Trocknuzone
- die Abnahmezone

Eine Trommel mit aufgezogenem Filtertuch wird evakuiert. Bei der Drehung der Trommel durch die Filterwanne wird durch das Vakuum voreingedickter Kiesschlamm angesaugt. Es bildet sich auf der Filtertuchoberfläche eine Kiesschlammsschicht, welche nach dem Austritt aus der Filterwanne weiter entwässert wird. Die Abnahme des Filterkuchens erfolgt mittels Abnahmewalze oder Schaber. Vakuum-Trommelfilter erge-

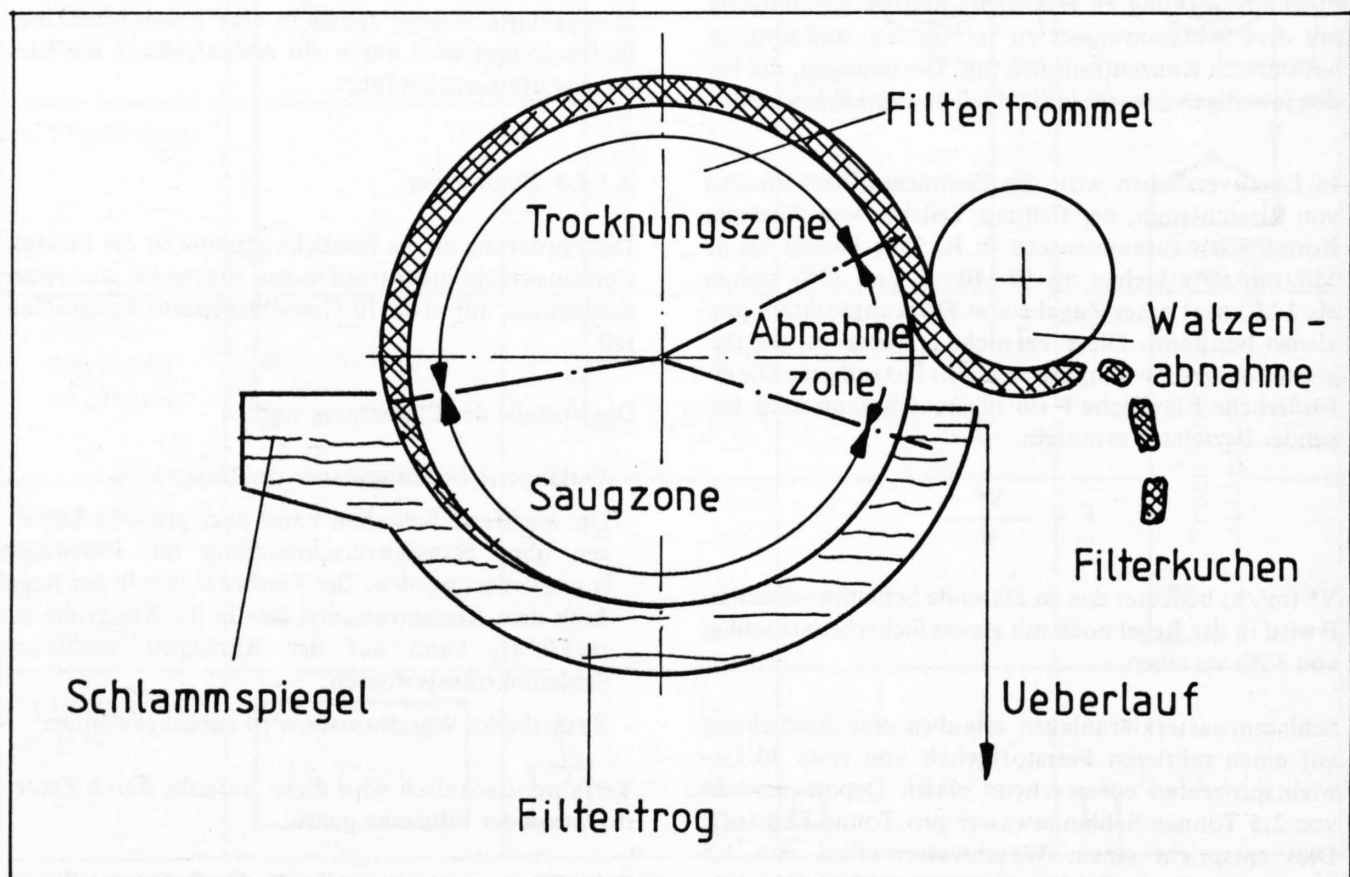


Fig. 31: Vakuum-Trommelfilter

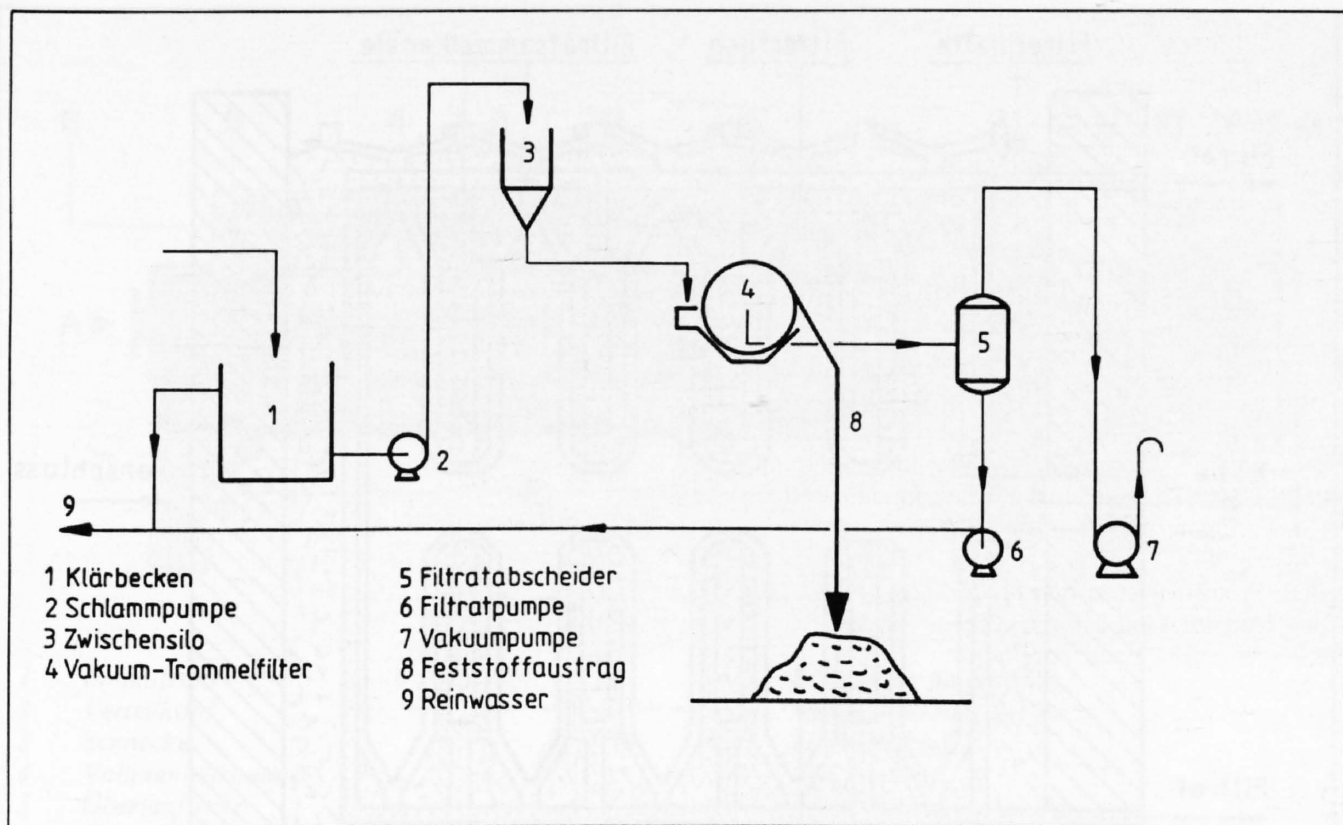


Fig. 32: Schlamm entwässerung mittels Vakuum-Trommelfilter

ben in der Regel einen stichfesten Schlamm mit 70 Gewichtsprozent Feststoff, entsprechend einem Depnierungsgewicht von 1,43 Tonnen feuchtem Schlamm pro Tonne Feststoff. Das entspricht einem Wasserverlust, der durch Frischwasser gedeckt werden muss, von nur noch 0,43 Tonnen pro Tonne Feststoff.

Die Filtrationsleistungen liegen bei etwa 80–250 kg/m² h (Trockensubstanz bezogen auf die gesamte Filtertrommeloberfläche und Stunde). Es ist darauf hinzuweisen, dass Klärschlämme verschiedener Kieswerke unterschiedliche Sedimentations- und Filtrationsverhalten aufweisen. Daher müssen Voreindickungs- und Filtrationssysteme individuell ausgelegt werden. Bereits mit kleinen Mustern lassen sich aber derartige Anlagen, wie in Fig. 32 schematisch dargestellt, dimensionieren.

b) Kammerfilterpressen

Kammerfilterpressen werden schon seit mehr als einem halben Jahrhundert zur Entwässerung von diversen Schlämmen benutzt. Sie bestehen gemäß Fig. 33 aus einer Anzahl von viereckigen, schmalen Filterelementen aus Metallgussrahmen mit aufgespannten Filtertüchern. Bei Betriebsbeginn werden die Elemente durch Hydraulikdruck aneinandergepresst, so dass eine Anzahl abgeschlossener Kammern entsteht. Der Schlamm wird mit einer Hochdruckpumpe (Kolbenmembranpumpe) in die Kammern gepumpt. Nach einem Filtrationszyklus, der nach Erreichen des maximal zulässigen

Betriebsdruckes von 15 bis 25 bar abgeschlossen ist, müssen die nun mit Feststoff gefüllten Kammern geöffnet und entleert werden. Das Filtrat wurde vorgängig durch die Filtertücher und ein Sammelrohr aus dem Filter gedrückt. Der hohe Arbeitsdruck erfordert eine robuste Maschine und der diskontinuierliche Betrieb einen hohen Bedienungsaufwand. Moderne Pressfilterautomaten vereinigen grundsätzlich die Vorzüge der Kammerfilterpressen, nämlich hohe Feststoffgehalte, und lassen sich wie kontinuierlich arbeitende Filter mit geringem Personalaufwand betreiben.

c) Siebbandpressen

Siebbandpressen werden häufig für Schlamm entwässerungen eingesetzt, wobei eine Vielzahl von Konstruktionen zur Verfügung steht.

Wie in Fig. 34 dargestellt, wird der Schlamm zwischen zwei horizontal angeordneten und endlos umlaufenden Bändern hindurchgeführt.

Die Entwässerung erfolgt in drei Phasen. Nach einer Schwerkraftentwässerung auf dem vorgezogenen Unterband folgt eine Druckentwässerung in der einstellbaren Keilzone. In der Presszone, wo durch eine versetzte Druckwalzenanordnung eine Scherbeanspruchung bewirkt wird, wird auf den Endtrockengehalt entwässert. Filtrat und Bandreinigungswasser werden gemeinsam zentral abgeleitet.

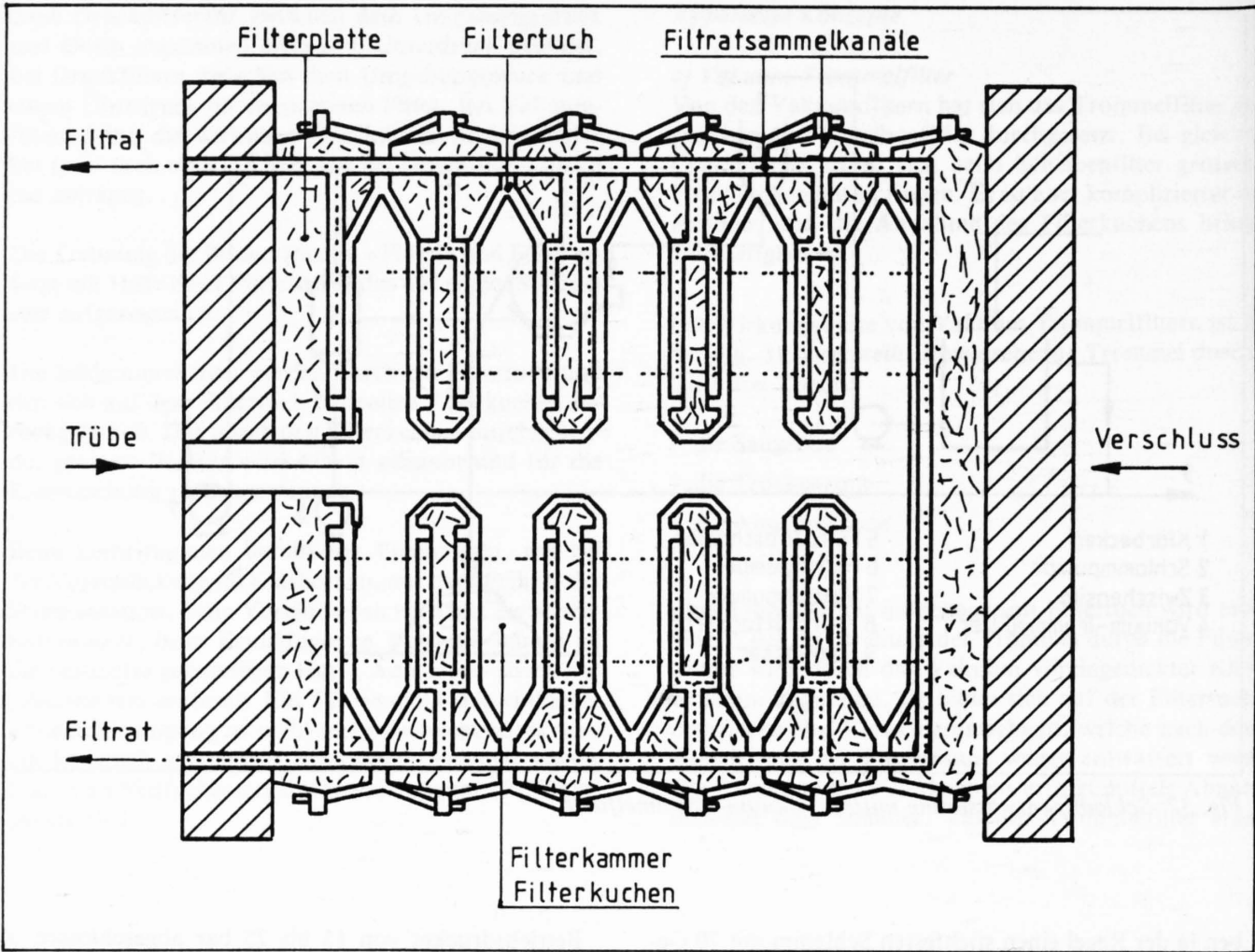


Fig. 33: Kammerfilterpresse

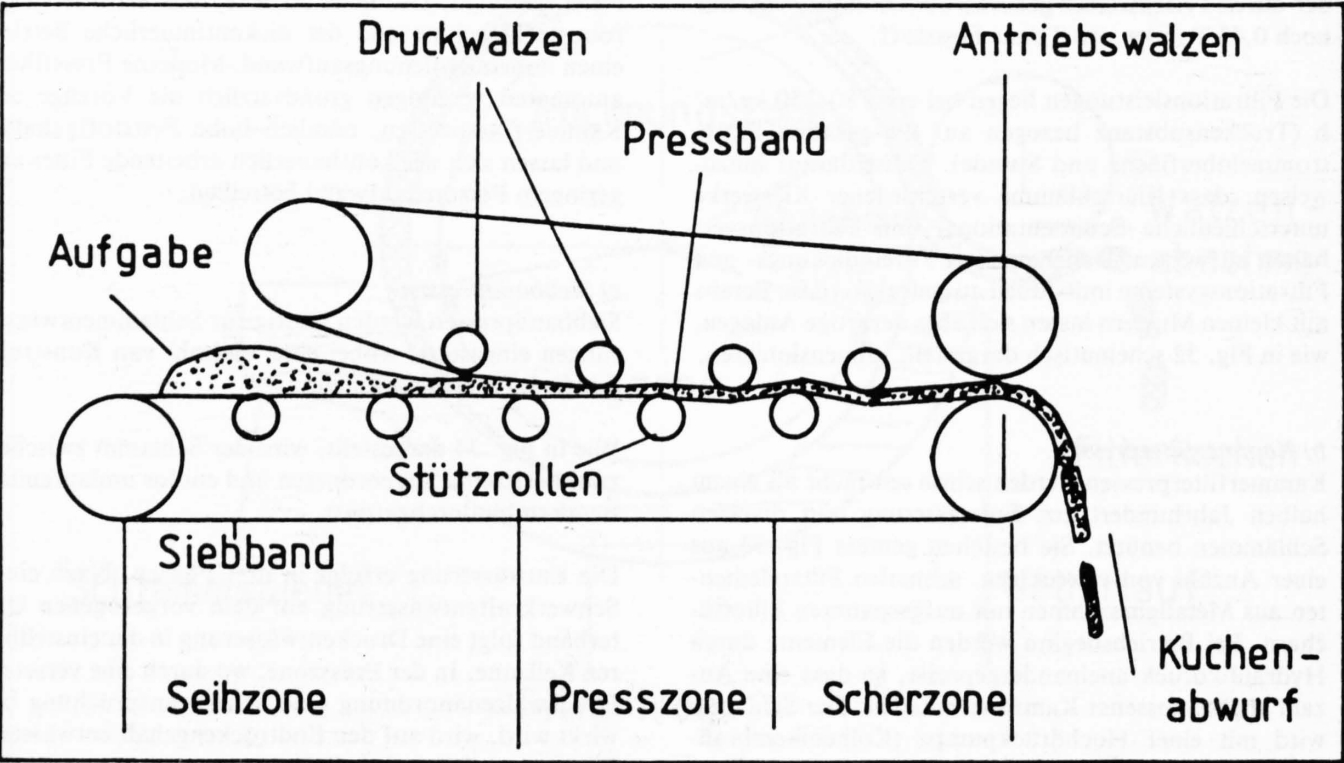
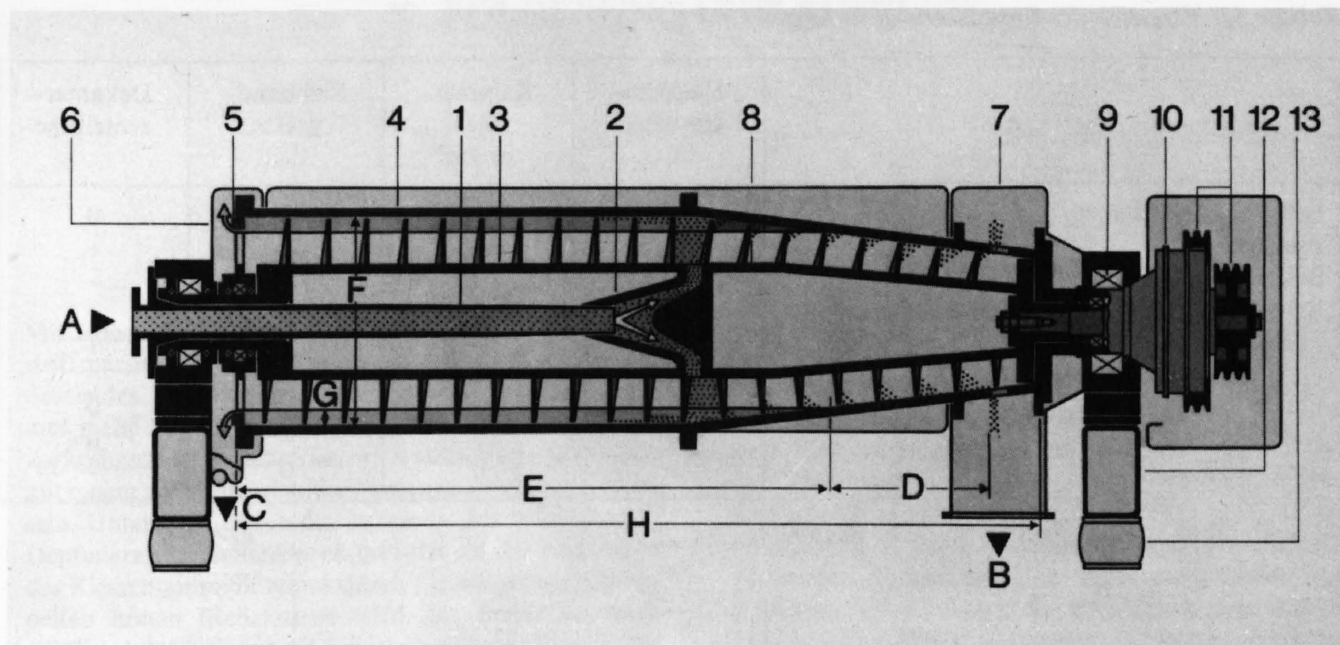


Fig. 34: Siebbandpresse



- 1 Einlaufrohr
- 2 Verteilkopf
- 3 Schnecke
- 4 Vollmanteltrommel
- 5 Überlaufwehr
- 6 Zentrat Gehäuse
- 7 Abdeckhaube
- 8 Feststoff Gehäuse
- 9 Wälzlager
- 10 Umlaufgetriebe
- 11 Keilriemenscheiben
- 12 Grundrahmen
- 13 Elastische Abstützung

- A Einlauf der Suspension
- B Austrag des Feststoffes
- C Zentratablauf
- D Trockenzone
- E Klärzone
- F Trommeldurchmesser
- G Wehrhöhe
- H Trommellänge

Fig. 35: Schnittbild einer Dekanterzentrifuge

Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Siebandpressen sind standfeste und kompressible Filterkuchen, damit ein seitliches Austreten des Schlammes verhindert wird.

d) Dekanterzentrifugen

Von den zur Verfügung stehenden Zentrifugen wird die kontinuierlich arbeitende Dekanterzentrifuge häufig für Schlammmentwässerungen eingesetzt.

Wie in Fig. 35 dargestellt, erfolgt der Schlammzulauf durch ein zentrales Rohr in den Rotor. Zum Austrag des Schlammkuchens befindet sich im Rotorinnern eine Förderschnecke, die sich schneller dreht als der Rotor selbst, mit Förderrichtung auf das konische Ende.

Versuche mit Zentrifugen mit einem Kiesschlamm von 34 Gewichtsprozent Feststoff im Einlauf und unter Flockungsmittelbeigabe haben einen eingedickten Schlamm mit 80 Gewichtsprozent Feststoff ergeben und eine einwandfreie Reinwasserqualität im Ablauf. Als Hauptproblem wurde ein hoher Verschleiss der Schnecke festgestellt.

2.2.2 Vergleich der Entwässerungsverfahren

Die verschiedenen Entwässerungsverfahren werden in der Tabelle 55 verglichen.

In der Schweiz standen Ende 1983 drei Vakuumtrommelfilter und eine Durchlaufzentrifuge (KRATZ, HODY, STEFFEN, 1984) im Betriebseinsatz. Heute (Ende 1986) liegt die Zahl der eingesetzten Entwässerungsanlagen bereits deutlich höher, dabei sind alle vier Entwässerungsverfahren vertreten.

Tabelle 55: Vergleich der Entwässerungsverfahren

	Vaku- um- trommel- filter	Kammer- filter- presse	Siebband- presse	Dekanter- zentrifuge
Installationskosten	0	0	+	0
Platzbedarf	0	+	0	+
Betriebskosten	0	–	–	–
Restfeuchte	0	+	+	+
Filtratreinheit	+	0	0	+
Flockungsmittelbedarf	0	+	–	–
Elektr. Energiebedarf	–	+	+	0
Reinigungsaufwand	+	0	–	0
Verschleiss	+	0	0	–

+ vorteilhaft 0 neutral – nachteilig

3. Kiesschlamm Entsorgung

Da eine wirtschaftlich vertretbare Verwertung von Kiesschlamm immer noch die Ausnahme bildet, muss in den meisten Fällen dieser Abfallstoff ungenutzt deponiert werden, sei es als unbehandeltes Kiesschlammwasser, als flockulierter oder als stichfester, mechanisch entwässerter Kiesschlamm.

Kiesschlammdeponien sind einerseits positiv zu beurteilen, da sie, besonders in Regionen, wo geeignetes Auffüllmaterial fehlt, entscheidend zur raschen Wiederauffüllung und Rekultivierung von Rohmaterialabbaustellen beitragen. Andererseits sind Auffüllungen aus nicht behandeltem oder nur flockuliertem Kiesschlamm wegen ihrer sehr schlechten Baugrundeigenschaften besonders problematisch.

Die *Rekultivierung* ist nach den Richtlinien des Schweiz. Fachverbandes für Sand und Kies (FSK-Dokumentation, 1972–83) durchzuführen, wobei besonders folgende Punkte zu beachten sind:

- Nach Ende der Kiesschlammzufuhr ist eine Austrocknungs- und Konsolidationszeit von ca. 2–3 Jahren vorzusehen, bevor die definitive Geländegestaltung und Humusierung durchgeführt wird.

- Bei der Geländegestaltung mit Aushub- und Abdeckmaterial sind, wegen der akuten Grundbruchgefahr, grössere Belastungen des Kiesschlammuntergrundes zu vermeiden (keine schweren Baumaschinen, Begrenzung der Aufschütthöhe usw.). Kompensation von allfälligen, langfristigen Setzungen durch eine leicht erhöhte Terrainoberfläche.

Die *Nutzung* des mit unbehandeltem oder nur flockuliertem Kiesschlamm aufgefüllten Areales ist stark eingeschränkt. Im Prinzip kommt nur eine land- und forstwirtschaftliche Nutzung in Frage (Nutzungsklasse III nach ZEINDLER, 1974). Belastungsversuche im Gebiet von ehemaligen Kiesschlammweihern haben gezeigt, dass solche Untergründe sehr setzungsempfindlich und grundbruchgefährdet sind. Jede bauliche Massnahme – wie z. B. Materialdeponien, Dammschüttungen, Strassenbau, Bauten – sollte deshalb vorgängig einer eingehenden geotechnischen Beurteilung unterzogen werden, wobei in den meisten Fällen mit unverhältnismässig teuren Konsolidationsmassnahmen zu rechnen ist. Ähnliche Probleme stellen sich bei Dammschüttungen auf weichen Seeablagerungen im Zusammenhang mit dem Nationalstrassenbau, wo Setzungen von mehreren Metern gemessen worden sind (GYGER, 1974 und 1980).

X. FOLGERUNG UND AUSBLICK

Mit einem Jahresanfall von mehr als 1,5 Mio t Feststoffmasse stellt Kiesschlamm in der Schweiz ein bedeutendes Abfallvolumen dar. Da die Kiesindustrie immer mehr auf die Aufarbeitung von verlehmteten Kiesvorkommen angewiesen ist, wird zukünftig sogar noch mit einem zunehmenden Kiesschlammfall zu rechnen sein. Unter dem Druck der immer prekärer werdenden Deponieraummöglichkeiten und der an die Reduktion des Kiesschlammvolumens durch Entwässerung gekoppelten hohen Mehrkosten wird das Bedürfnis nach einer nutzbringenden und wirtschaftlich vertretbaren Kiesschlammverwertung immer ausgeprägter.

Die im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass Kiesschlamm, als homogenes, feindisperses und oberflächenaktives Mineraliengemisch, ein potentieller Rohstoff mit vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten ist.

Bei allen zur Diskussion stehenden Lösungsmöglichkeiten stellt sich unausweichlich und mit Nachdruck die Frage nach der Durchführbarkeit sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht, die jeweils in einer Kosten-Nutzen-Beurteilung abzuwägen ist. Eine genaue wirtschaftliche Gewichtung der verschiedenen Verwertungsmöglichkeiten kann im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes aber nicht abgegeben werden, da eine solche von konkreten, von Fall zu Fall stark variierenden Begleitumständen und nicht zuletzt von den individuellen unternehmerischen Überlegungen abhängt.

Der Sinn der vorliegenden Untersuchungen liegt deshalb in erster Linie in der Bereitstellung von technologischen Grundlagen, die als Entscheidungshilfen und Impulsgeber für die Problemlösung dienen sollen.

Als Illustration sei hier die erste bedeutende Realisierung einer Kiesschlammverwertung kurz besprochen, die, ausgelöst durch die Kiesschlammverwertungsstudien der letzten Jahre, seit Ende 1984 mit Erfolg praktiziert wird. Es handelt sich um eine bedeutende Ziegelei der Nordwest-Schweiz, die für die Backsteinfabrikation eine Mischung bestehend aus 75% Opalinuston/Obtususton + 20% Kiesschlamm und 5% Sägemehl verwendet. Eingesetzt wird dabei die gesamte Kiesschlammproduktion (ca. 10000 t/Jahr) eines Kieswerkes des aargauischen Rheintales. In der obenerwähnten Rohmaterialmischung hat der Kiesschlamm einen Keupermergel ersetzt, wobei folgende positive Auswirkungen erzielt worden sind:

- Herabsetzung der Sägemehldosierung
- Herabsetzung des Aufbereitungsaufwandes
- weniger Aufheizrisse
- leichterer, poröserer Scherben, weniger hart und glasig
- Verschwinden der schwarzen Reduktionskerne
- bessere Vermauerungseigenschaften (höheres Wassersaugvermögen und bessere Schrotbarkeit)

Nachteilig dabei sind einzig die hohen Transportkosten (Transportdistanz ca. 25 km) und die Schwierigkeiten bei der Lagerung des dickflüssigen, flockulierten Kiesschlammes.

Im Rahmen der vorliegenden Studie konnten nicht alle Verwertungsmöglichkeiten untersucht werden. Es bleibt zu hoffen, dass, basierend auf den bis jetzt erarbeiteten Unterlagen, weitere Verwertungsstudien in Angriff genommen werden, mit dem Ziel, eine effizientere und umweltgerechte Nutzung unserer einheimischen Rohstoffe zu gewährleisten.

XI. LITERATURVERZEICHNIS

- BAKOS, J. (1977): Herstellung von Faserstoffen auf Silikatbasis aus Rhyolythtuff-Rohmaterialien. – Silikattechnik, 28, 10
- BAYER, G., KOESE, S. (1979): Reaction of foaming additives with waste glass powders in the preparation of light-weight materials. – Rivista della Staz. Sper. Vetro, Vol. 9, 5, 310–320
- BAYER, G., IBERG, R. (1983): Kiesschlamm als potentieller Rohstoff? III. Sinter- und Schmelzverhalten von Kiesschlämmen. – Schweizer Ingenieur und Architekt, 39
- BÜHLER, CH. (1986): Untersuchungen über die Verwendung karbonatreicher Mergel als Rohstoff für die Herstellung hydrothermalgehärteter Baustoffe. – Untersuchung des Mikrogefüges hydrothermal gehärteter Erzeugnisse. – Experimenteller Teil: Reaktion von Tonmineralien bei der hydrothermalen Härtung. – Dissertation, Min.-petr. Inst. Univ. Bern.
- DE QUERVAIN, F. (1969): Die nutzbaren Gesteine der Schweiz. – Kümmerly + Frey, Bern
- ENDELL, K., KLEY, R. (1939): Über die Abhängigkeit der Temperatur-Zähigkeits-Beziehungen saurer Hochofenschlacken von der chemischen Zusammensetzung. – Stahl und Eisen, 59, 677–685
- EULER, R., WINKLER, H.G.F. (1957): Über die Viskosität von Gesteins- und Silikatschmelzen. – Glas-techn. Berichte 30, 8
- FEDI, J.-PH., HAENDLE, F., KOENIGER, R. (1982): Die Herstellung von Stargil in der Praxis. – Ziegelindustrie International, 10, 580–584
- FETZ, L.B. (1974): Stabilisierung von Schlamm aus Absetzbecken. – Schweiz. Handelszeitung, 35, 31
- FLORENTIN, O. (1926): Annales de Chimie analytique et de Chimie appliquée, 8, 11, 321
- GYGER, M. (1974): Dammschüttungen auf weichen Seeablagerungen. – Strasse und Verkehr, 4
- GYGER, M. (1980): Langjährige Messungen an Dammschüttungen auf weichem Baugrund. – Mitt. Schweiz. Ges. für Boden und Felsmechanik, Nr. 102
- GYGER, M., MÜLLER-VONMOOS, M., SCHINDLER, C. (1976): Untersuchungen zur Klassifikation spät- und nacheiszeitlicher Sedimente aus dem Zürichsee. – Schweiz. min. petr. Mitt., 56, 387–406
- HALLER, P., KOLLBRUNNER, C.F., IBERG, R. (1969): Aktivierter Ton (Röstton-Verfahren) – Institut für bauwissenschaftliche Forschung, Heft 7
- HOFMANN, F. (1982): Versuche über die Eignung von aktiviertem Kiesschlamm als Härter für Wasserglassande in Giessereien. – Persönliche Mitteilung.
- HUGI, H.R. (1983): Angepasste Technologien für Entwicklungsländer. – Schweizer Ingenieur und Architekt, 50
- IBERG, R. (1971): Beitrag zur Thermochemie von Ziegelton. – Tonind. Ztg., 95, 3, 79–81
- IBERG, R., PETERS, T.J., MUMENTHALER, TH. (1972): Beitrag zur Thermochemie von Ziegelton. – Tonind. Ztg., 96, 2, 34–37
- IBERG, R., PETERS, T.J., MUMENTHALER, TH. (1983): Kiesschlamm als potentieller Rohstoff? II. Technologisches Verhalten von thermisch aktiviertem Kiesschlamm. – Schweizer Ingenieur und Architekt, 36
- JÄCKLI, H., SCHINDLER, C. (1986): Möglichkeiten der Substitution hochwertiger Alluvialkiese durch andere mineralische Rohstoffe. – Beitr. Geol. Schweiz. geotechn. Ser. 68
- KEIL, F. (1971): Zement. – Springer Verlag, Berlin
- KRATZ, E., HODY, D., STEFFEN, J. (1984): Beitrag über die Entwässerung von mineralischen Schlämmen am Beispiel von Rübenschlamm aus der Aufbereitung von Zuckerrüben. – Schlussbericht vom 30. Juni 1984 des Schweiz. Nationalfondsprojektes Nr. 4.292.-0.79.07, 37–48
- KRENKLER, K. (1980): Chemie des Bauwesens. – Springer Verlag, Berlin
- LAUERBE, M. (1982): Herstellung und Verwendung von Baustoffen auf der Grundlage von kaltstabilisiertem Ton. – Ziegelindustrie International, 10, 571–579
- LEVIN, W.S., MOLOV, W.F. (1973): Kristallisation von eisenhaltigem, glaskristallinem Material in Abhängigkeit vom Verhältnis des zwei- und dreiwertigen Eisens. – Steklo i Keramika, 30, 10, 9–10
- MADSEN, F.T. (1976): Quelldruckmessung an Tongesteinen und Berechnung des Quelldrucks nach der DLVD-Theorie. – Mitt. Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik ETH Zürich, Nr. 108.
- MEYER, CH., KAUFMANN, B., KELLER, H.J. (1984): Das Mikrogefüge grobkeramischer Scherben. – Beitr. Geol. Schweiz. geotechn. Ser., 63
- MUMENTHALER, TH. (1979): Zusammensetzung und Verwertbarkeit von schweizerischen Kiesschlämmen im hydrothermalen Härtungsprozess. – Beitr. Geol. Schweiz. geotechn. Ser., 58
- PAVLUSKIN, N.M., SARKISOV, P.D. (1973): Mechanismus der Kristallisation eisenhaltiger Gläser mit unterschiedlichen Fe^{2+}/Fe^{3+} -Verhältnissen. – Neorg. Mater. 9, 12, 2198–2201
- PETERS, T.J., IBERG, R. (1979): Mineralogical Changes During Firing of Calcium-Rich Brick Clays. – Am. Cer. Soc. Bull., 57/5, 503–506

- PETERS, T.J., IBERG, R., MUMENTHALER, TH. (1982): Kiesschlamm als potentieller Rohstoff? – Schweizer Ingenieur und Architekt, 19
- PETERS, T.J., JENNI, J.P. (1973): Mineralogische Untersuchungen über das Brennverhalten von Ziegeltonen. – Beitr. Geol. Schweiz, geotechn. Ser., 50
- PETERS, T.J., MUMENTHALER, TH. (1977): Mineralische Baustoffe – Chance für die Schweiz. – Neue Zürcher Zeitung, Forschung und Technik, 3. Aug. 1977
- RAMHOLT, T., SCHLÜCHTER, CHR., MUMENTHALER, TH. (1987): Kieswaschschlamm als problematisches Deponiematerial. – Mitt. Schweiz. Ges. Boden- und Felsmechanik, 114, 53–56
- RÉPUBLIQUE ET CANTON DE GENÈVE (1984): Les ressources en gravier du Canton de Genève et l'avenir de son approvisionnement. – Département de l'intérieur et de l'agriculture du Canton de Genève
- SCHLÜCHTER, CHR. (1984): Geotechnical properties of Zübo-sediments. – In: Contributions to Sedimentology, vol. 13, 35–140
- SIA-Zeitung (1983): Zur Abdichtung von gesicherten Deponien. – Schweiz. Ing. und Architekt, 46
- STAHEL, M. (1973): Der Einfluss der Kiesgewinnung auf die wirtschaftsgeographische Struktur des nördlichen Kantons Zürich. – Juris Druck + Verlag, Zürich.
- STEINKOPF, B. (1967): Relative Berechnung der Viskosität komplexer Silikatschmelzen bei der Steinwolle-Herstellung. – Glastechn. Berichte 40, 329
- TALVITIE, N.A. (1951): Determination of Quarz in Presence of Silicates using Phosphoric Acid. – Anal. Chem., 23, 623–626.
- TILLMANN, W. (1982): Zur Bedeutung von Tonmineralen als Adsorbens für Schwermetalle. – Tonindustrie-Ztg., 106, 2, 137–139
- TILLMANN, W. (1984): Bedeutung von Tonlagerstätten und Einsatz von Tonmineralen in der Abfallwirtschaft. – Tonindustrie-Ztg., 108, 2, 92–94
- ZAGAR, L. (1979): Zusammenhänge zwischen Viskosität, chemischer Zusammensetzung und Temperatur von Basaltschmelzen aufgrund einer statistischen Bearbeitung experimenteller Ergebnisse. Glastechn. Berichte 40, 78 R, 1443
- ZAGAR, L., SCHÄFFER-ROLFFS, W. (1981): Untersuchung von magmatischen Gesteinen im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit für die Herstellung von Gesteinsfasern. – Sprechsaal, 114, 7
- ZEINDLER, H. (1974): Wiederauffüllung von Kies- und Sandgruben mit Aushubmaterial. – FSK-Dokumentation, S. 822–1.

Patente

BRD-Patent	Nr. 1 646 416 (1967)
CH-Patent	Nr. 495 299 (1968)
BRD-Patent	Nr. 2 122 201 (1971)
CH-Patent	Nr. 544 727 (1971)

Richtlinien und Normen

FSK-Dokumentation:	Zusammenstellung von Vorschriften und Richtlinien für den Abbau von Sand und Kies. Schweiz. Fachverband für Sand und Kies, 1972–1983
NORM SIA 113 (1965):	Mauerwerk aus künstlichen Steinen
NORM SIA 215 (1978):	Mineralische Bindemittel
NORM SIA 242 (1978):	Verputzarbeiten und Gipserarbeiten
NORM SIA 177 (1980):	Mauerwerk