



TECHNISCHER BERICHT 95-03

Fliessfähiger, hochpermeabler Mörtel für die Verfüllung von kleinen Hohlräumen

März 1996

G. Mayer, F. H. Wittmann

Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und
Korrosion, ETH Zürich

TECHNISCHER BERICHT 95-03

**Fliessfähiger, hochpermeabler
Mörtel für die Verfüllung von
kleinen Hohlräumen**

März 1996

G. Mayer, F. H. Wittmann

Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und
Korrosion, ETH Zürich

Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag der Nagra erstellt. Die Autoren haben ihre eigenen Ansichten und Schlussfolgerungen dargestellt. Diese müssen nicht unbedingt mit denjenigen der Nagra übereinstimmen.

ISSN 1015-2636

"Copyright © 1997 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw."

ZUSAMMENFASSUNG

Die meisten der schwach- und mittlerradioaktive Abfälle werden für die Entsorgung zunächst in Stahlfässer verpackt. Diese Fässer werden in Endlagercontainer eingegossen und in den Endlagerkavernen eingelagert. Die Hohlräume zwischen den Fässern in den Endlagercontainern sollen mit einem porösen, fließfähigen Mörtel, genannt "Mörtel 2" (M2), verfüllt werden. Für die Verfüllung der vertikalen Zwischenräume zwischen den Endlagercontainern und anderer grösserer Hohlräume ist ein sehr poröser, jedoch nicht fließfähiger Mörtel, genannt "Mörtel 1" (M1) vorgesehen. Eine mögliche Anordnung der Endlagercontainer und die Einsatzgebiete der verschiedenen Verfüllmörtel ist in Figur 1 dargestellt.

Beide Mörtel sollen eine hohe Gaspermeabilität aufweisen, damit Gase, die bei der Korrosion resp. Degradation der Abfälle entstehen, aus dem Endlager entweichen können, ohne einen übermässigen Druck aufzubauen.

Im vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse von Laboruntersuchungen an unterschiedlichen Mischungen von Mörtel M2 beschrieben. Die Mörtel sind durch die Zugabe von fein verteiltem Aluminiumpulver (1 - 3 ‰ vom Zementgewicht) modifiziert und zeigen folgende charakteristische Eigenschaften:

- Der Frischmörtel weist eine fließfähige Konsistenz auf. Im Frischmörtel entsteht durch die Reaktion des Aluminiumpulvers im alkalischen Milieu Wasserstoffgas (1.67 l pro g Aluminium). Dies führt zur Bildung von Poren, welche die gewünschte hohe Gaspermeabilität bewirken. Ein Grossteil des entstehenden Wasserstoffgases kann aus dem Frischmörtel entweichen, weshalb bei der Herstellung für eine ausreichende Belüftung zu sorgen ist.
- Der erhärtete Mörtel weist inhomogene Festmörteleigenschaften auf. Durch das Eigengewicht des Mörtels werden die Gasblasen im Frischmörtel unterschiedlich stark komprimiert. Im „unteren“ Teil eines Mörtelelementes befinden sich daher weniger grosse Poren als im „oberen“ Bereich. Die Porosität liegt zwischen 38 und 60 %. Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen ergibt Werte zwischen 3 und 15 N/mm². Die Permeabilität der Mörtel erreicht Werte zwischen 10⁻¹⁴ und 10⁻¹² m² und liegt um 3 Zehnerpotenzen über den Werten vergleichbarer Mörtel ohne Aluminiumpulverzusatz.

SUMMARY

Prior to disposal, most of the low- and intermediate-level wastes are packaged in steel drums which are then placed in disposal containers and emplaced in the repository caverns. The voids between the drums in the disposal containers will be infilled with a porous free-flowing mortar called "mortar 2" (M2), while the vertical voids between the disposal containers itself and the disposal containers and the cavern walls will be backfilled with a mortar called "mortar 1" (M1) which is very porous but not free-flowing. A possible arrangement of the disposal containers and the zones of application of the different mortars are shown in figure 1.

Both mortars should have a high gas permeability to allow gases produced when the waste corrodes or degrades to escape from the repository without any excessive build-up of pressure.

This report describes the results of laboratory experiments performed on different mixtures of mortar M2. The mortars are modified by addition of finely dispersed aluminium powder (1 - 3 ‰ of the cement weight) and have the following characteristics:

- The fresh mortar has a free-flowing consistency and the reaction of the aluminium powder in this alkaline milieu produces hydrogen gas (1.67 l per g aluminium). This leads to formation of pores and ensures the desired high gas permeability. A large component of the hydrogen gas produced can escape from the fresh mortar and it should thus be ensured that there is sufficient ventilation during mortar production.
- The hardened mortar has inhomogeneous properties. The weight of the mortar compresses the gas bubbles which are present in the fresh mortar and the „lower“ section of the mortar element thus has less large pores than the „upper“ section. The porosity is between 38 and 60 %. The compressive strength after 28 days varies between 3 and 15 N/mm² and the permeability of the mortars reaches values between 10⁻¹⁴ and 10⁻¹² m²; this is three orders of magnitude higher than the values for similar mortars without the addition of aluminium powder.

RÉSUMÉ

La plupart des déchets faiblement et moyennement radioactifs est d'abord placée dans des tonneaux en acier. Ces tonneaux sont conditionnés dans des conteneurs et emplacedés dans des cavernes de dépôt final. L'espace entre les tonneaux et les conteneurs est rempli par un mortier poreux et plastique, dénommé "mortier 2" (M2). Les espaces verticaux entre les conteneurs et les espaces entre les conteneur et la coté de la caverne sont remplis d'un mortier très poreux, mais non plastique, dénommé "mortier 1" (M1). La figure 1 présente une disposition possible des conteneurs et les zones de mise en place des différents mortiers.

Les deux mortiers doivent présenter une forte perméabilité au gaz, afin que le gaz produit par la corrosion ou la dégradation des déchets puisse être évacué du dépôt final sans produire une surpression excessive.

Le présent rapport décrit les résultats des essais de laboratoire sur plusieurs différents mélanges de mortier M2. Les propriétés des mortiers sont modifiées par l'adjonction de poudre d'aluminium finement dispersée (1 à 3 ‰ du poids en ciment), et sont caractérisées de manière suivante:

- Le mortier frais présente une consistance visqueuse. La poudre d'aluminium provoque en ce milieu alcalin la libération de gaz d'hydrogène (1.67 l par g d'Al). Cela génère des pores qui produisent la perméabilité au gaz élevée souhaitée. La plus grande partie de l'hydrogène produit peut s'échapper du mortier frais. C'est pourquoi qu'il faut prendre soin de fournir une aération suffisante lors de la production du mortier.
- Le mortier durci présente des inhomogénéités. En effet, le poids propre du mortier comprime les bulles de gaz dans le mortier frais. C'est pourquoi dans la partie „inférieure“ des éléments de mortier on trouve moins de pores volumineux que dans la partie „supérieure“. La porosité varie entre 38 et 60 %, la résistance à la compression après 28 jours entre 3 et 15 N/mm² et la perméabilité entre 10⁻¹⁴ et 10⁻¹² m², c'est à dire qu'elle est d'une puissance 3 plus élevée que celle des mortiers équivalents, mais sans adjonction de poudre d'aluminium.

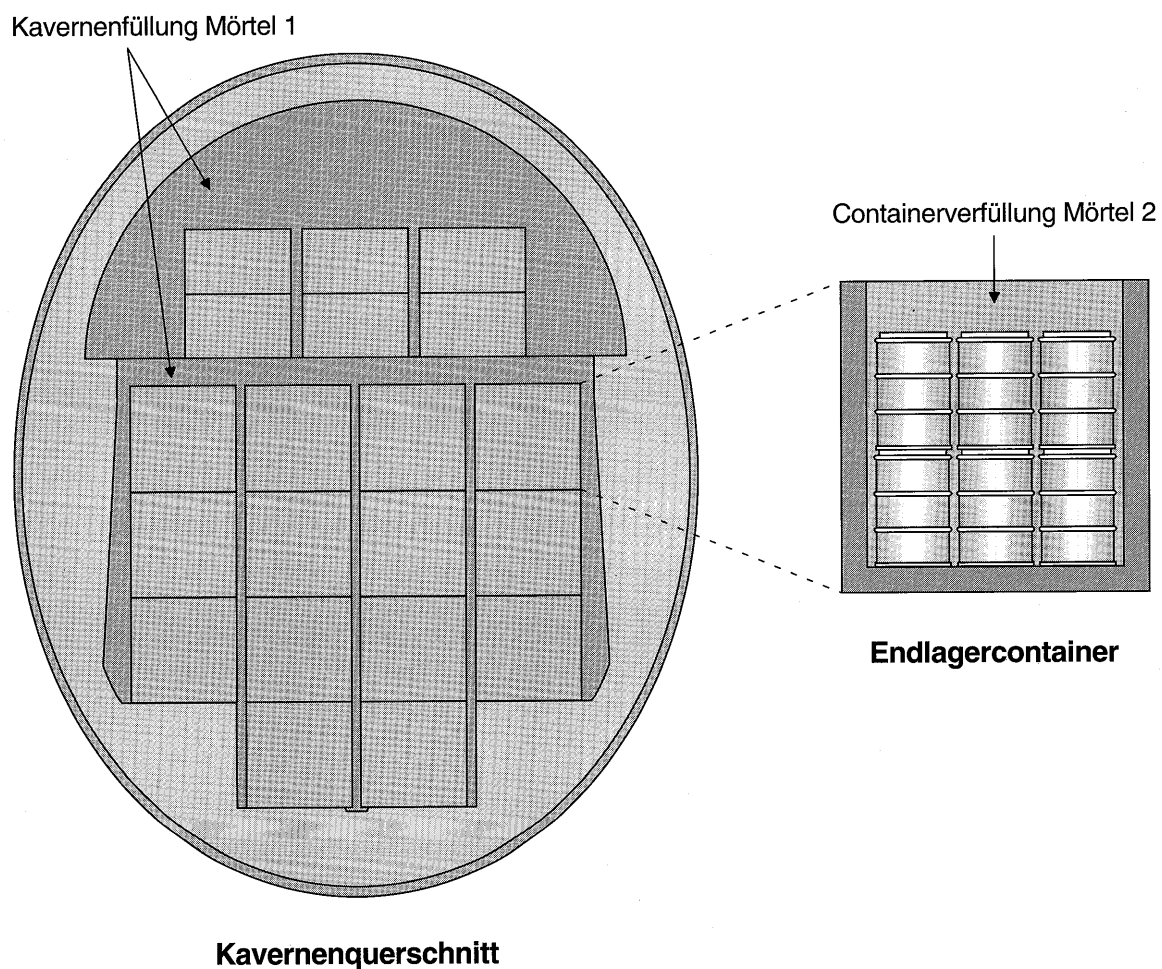


Fig. 1: Beispiel für die Einlagerung der Abfallgebinde in den Endlagerkavernen

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG.....	I
SUMMARY	II
RÉSUMÉ	III
INHALTSVERZEICHNIS	V
VERZEICHNIS DER FIGUREN.....	VI
VERZEICHNIS DER TABELLEN	VII
1 EINLEITUNG	1
2 EXPERIMENTE.....	3
2.1 Ausgangsstoffe.....	3
2.2 Herstellung.....	5
2.3 Frischmörteleigenschaften.....	5
2.3.1 Verarbeitbarkeit.....	5
2.3.2 Wasserstoffentwicklung.....	7
2.3.3 Verlauf der Wärmefreisetzung	9
2.4 Festmörteleigenschaften.....	10
2.4.1 Rohdichte.....	11
2.4.2 Porosität.....	13
2.4.3 Druckfestigkeit.....	13
2.4.4 E-Modul.....	13
2.4.5 Drei-Punkt-Biegezugfestigkeit.....	17
2.4.6 Permeabilität	17
2.4.6.1 Gaspermeabilität.....	17
2.4.6.2 Wasserpermeabilität.....	17
2.4.7 Druckfestigkeit und Gaspermeabilität als Funktion der Rohdichte	21
3 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	23
4 LITERATURVERZEICHNIS	26
5 ANHANG	A1

VERZEICHNIS DER FIGUREN

Fig. 1: Einlagerung der Abfallgebinde in die Endlagerkaverne	IV
Fig. 2: Siebdurchgang der verwendeten Zuschlagsstoffe von Mörtel M2	4
Fig. 3: Bestimmung des Blähvermögens von Mörtel M2.....	6
Fig. 4: Volumen vs. Zeit von Frischmörtel M2 in einem 1'000 ml Standzylinder.....	6
Fig. 5: Versuchsaufbau zur Bestimmung der freigesetzten Gasmenge	8
Fig. 6: Spezifische Gasentwicklung im Mörtel M2 als Funktion der Zeit.....	8
Fig. 7: Temperaturentwicklung im Frischmörtel	10
Fig. 8: Holzschalung zur Herstellung der Probekörper.....	11
Fig. 9: Rohdichte von Mörtelmischung I	12
Fig. 10: Rohdichte von Mörtelmischung II.....	12
Fig. 11: Rohdichte von Mörtelmischung III.....	12
Fig. 12: Porosität von Mörtelmischung I.....	14
Fig. 13: Porosität von Mörtelmischung II.....	14
Fig. 14: Porosität von Mörtelmischung III	14
Fig. 15: Druckfestigkeit von Mörtelmischung I	15
Fig. 16: Druckfestigkeit von Mörtelmischung II.....	15
Fig. 17: Druckfestigkeit von Mörtelmischung III.....	15
Fig. 18: E-Modul von Mörtelmischung I.....	16
Fig. 19: E-Modul von Mörtelmischung II.....	16
Fig. 20: E-Modul von Mörtelmischung III	16
Fig. 21: Drei-Punkt-Biegezugfestigkeit von Mörtelmischung I	18
Fig. 22: Drei-Punkt-Biegezugfestigkeit von Mörtelmischung II.....	18
Fig. 23: Drei-Punkt-Biegezugfestigkeit von Mörtelmischung III.....	18
Fig. 24: Gaspermeabilität von Mörtelmischung I	19
Fig. 25: Gaspermeabilität von Mörtelmischung II.....	19
Fig. 26: Gaspermeabilität von Mörtelmischung III.....	19
Fig. 27: Wasserpermeabilität von Mörtelmischung I.....	20
Fig. 28: Wasserpermeabilität von Mörtelmischung II.....	20
Fig. 29: Wasserpermeabilität von Mörtelmischung III	20
Fig. 30: Druckfestigkeit von Mörtel M2 als Funktion der Dichte	21
Fig. 31: Gaspermeabilität von Mörtel M2 als Funktion der Dichte	22
Fig. 32: typische Porenstruktur v. geblähtem Mörtel M2.....	24
Fig. 33: Mischung I, II und III: Zylinderdruckfestigkeit f_c und Gaspermeabilität k nach 28 Tagen in Abhängigkeit von der Rohdichte ρ	24

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tab. 1: Ausgangsstoffe von Mörtel M2	3
Tab. 2: Zusammensetzung von Mörtel M2	4
Tab. 3: Siebdurchgang der verwendeten Zuschlagsstoffe von Mörtel M2	5
Tab. 4: Frischmörteleigenschaften von Mörtel M2.....	7
Tab. 5: Thermische Eigenschaften von Mörtel M2	10
Tab. 6: Festmörteleigenschaften von Mischung I.....	A2
Tab. 7: Festmörteleigenschaften von Mischung II.....	A2
Tab. 8: Festmörteleigenschaften von Mischung III	A3

1 EINLEITUNG

In einem Endlager für schwach-/mittelaktiven Abfall (SMA) entstehen u.a. durch Korrosions- und Degradationsprozesse Gase. Diese Gase müssen ohne zu viel Wasser zu verdrängen aus dem Endlager entweichen können. Im weiteren muss ein starker Druckaufbau, der im Extremfall Schäden an den Endlagerstrukturen verursachen könnte, vermieden werden.

In den vergangenen Jahren wurde im Auftrag der NAGRA an der ETH Zürich, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion (IBWK), ein hochpermeabler, zementgebundener, jedoch steifer Verfüllmörtel (M1) entwickelt (JACOBS, MAYER & WITTMANN 1994, JACOBS 1994), der sich vor allem für die Verfüllung grosser Hohlräume gut eignet.

Für die Verfüllung kleiner Hohlräume in den Containern wird ein fließfähiger Mörtel (M2) benötigt, der ebenfalls eine genügend hohe Gaspermeabilität aufweisen soll. Aus diesem Grund muss der Mörtel eine stark erhöhte Porosität gegenüber einem normalen Mörtel aufweisen. In der Praxis werden für die Herstellung sehr poröser Mörtel vier Verfahren angewandt:

- 1. Verwendung poröser Zuschläge** (z.B. Blähton {Leca}, Bims, Perlit) (AURICH 1971): Untersuchungen zeigen jedoch, dass sich die Grenzschicht zwischen den porösen Zuschlägen und dem Zementstein mit der Zeit sehr stark verdichtet. Als Folge nimmt die Permeabilität solcher Mörtel mit der Zeit drastisch ab.
- 2. Einsatz eines Luftporen oder Schaumbildners** (z.B. Vinsol Resin) (DEN BOER & SIEMES 1986): Dem Frischmörtel wird ein vorfabrizierter Schaum auf der Basis anionenaktiver Tenside (z.B. Alkylsulfonate) unterschichtet. Die Porosität des Mörtels wird wesentlich durch den Herstellungsprozess bestimmt. Die Schaumbildner scheiden für den Einsatz in einem Endlager aus, da die organischen Bestandteile der Schaumbildner unerwünscht sind.
- 3. Einsatz eines anorganischen Gasbildners** (Aluminiumpulver): Die Poren im Frischmörtel entstehen durch die Bildung von Gas, das den Frischmörtel aufbläht. Die

erzielte Porosität wird durch die Dosierung des Gasbildners gesteuert. Als Gasbildner wird in der Regel Aluminiumpulver eingesetzt. Dieses Verfahren wird auch für die Herstellung von Porenbeton angewandt (ARONI et al. 1993).

4. Mörtel aus Zuschlägen einer Kornfraktion, sogenannte Einkorn- bzw. Monokornmörtel: (JACOBS, MAYER & WITTMANN 1994). Die Zementleimmenge ist so bemessen, dass die Zuschläge zwar fest miteinander verkittet, die Haufwerksporen des Korngemisches aber nicht mit Zementleim verfüllt werden. Diese Mörtel sind jedoch nicht fließfähig.

Für die Herstellung von Mörtel M2 wurde die dritte Variante, der Einsatz eines anorganischen Gasbildners, vorgezogen.

Bei Mörtel M2 handelt es sich um einen Feinmörtel mit einem Grösstkorn von 1 mm. Durch Zugabe eines Gasbildners (Aluminiumpulver) werden im Frischmörtel Poren erzeugt, die nach der Erhärtung im Mörtel verbleiben. Die erzeugte Porenmenge und damit die Porosität von Mörtel M2 wird von mehreren Faktoren bestimmt:

1. Die entstehende Gasmenge bildet die Poren und ist direkt proportional zur zugegebenen Aluminiummenge.
2. Es werden inhomogene Festmörteleigenschaften erwartet, da die im Frischmörtel entstehenden Gasblasen durch das Eigengewicht des Mörtels komprimiert werden. In einem Mörtelelement wird daher im unteren Bereich eine geringere Porosität (höhere Dichte) erwartet als im oberen Bereich.

Zunächst wurden in Vorversuchen verschiedene Probemischungen hergestellt. Es wurden dabei die Sieblinie, der Zementgehalt, der w/z-Wert und die Menge an Aluminiumpulver variiert. Basierend auf den Frischmörteleigenschaften und den Festmörteleigenschaften, die 7 Tage nach der Herstellung ermittelt wurden, konnten 3 geeignete Mischungen für die Hauptuntersuchungen ausgewählt werden. An den 3 Mischungen wurden die Festmörteleigenschaften in Abhängigkeit des Alters und der Dichte sowie das Abbindeverhalten und die Gasentwicklung untersucht.

2 EXPERIMENTE

2.1 Ausgangsstoffe

Als Zuschlagsstoffe wurden zwei Sande unterschiedlicher Sieblinie ausgewählt. Ausgangsmaterial für die Mischungen I und II war Sand 0 - 4 mm vom Kieswerk Weiach. Im Labor wurde die Kornfraktion kleiner 1 mm ausgesiebt und für die Herstellung der Mischungen verwendet. Für die Mischung III wurde Schlämmsand 0 - 1 mm vom Kieswerk Ibach verwendet. Die Sieblinien der Zuschläge sind Tabelle 3 und Figur 2 zu entnehmen. Als Bindemittel wurde sulfatbeständiger Portlandzement verwendet. Das Aluminiumpulver wurde von der Firma Merck bezogen. Die Ausgangsstoffe bzw. die Zusammensetzung der drei verschiedenen Mischungen von Mörtel M2 sind in Tabelle 1 bzw. Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 1: Ausgangsstoffe von Mörtel M2

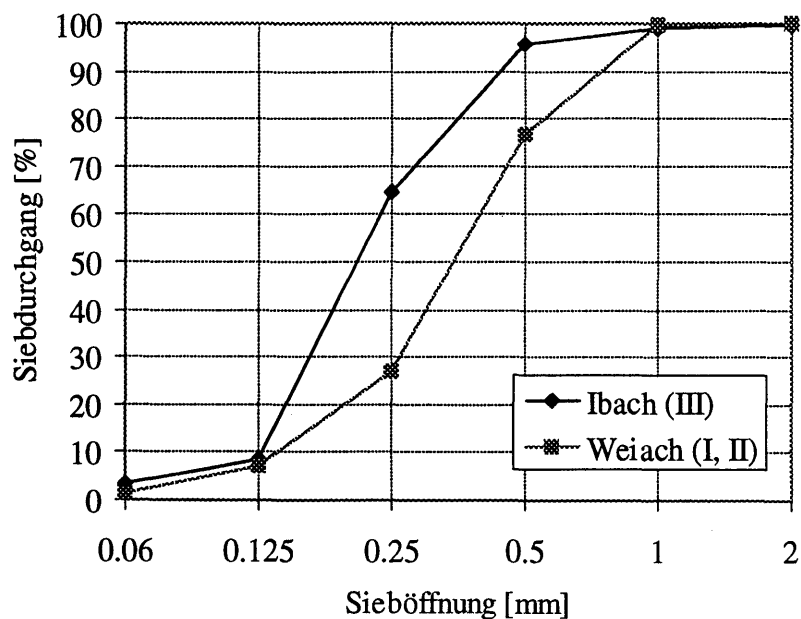
	<i>Bezeichnung</i>	<i>Herkunft</i>
Zement	PCHS	Portlandzementwerk Olten gemäss SIA 215
Wasser	Trinkwasser	Zürich
Zuschläge	Sand, Fraktion 0 bis 1 mm ausgesiebt ca. 40 ^m ‰ Kalkstein ca. 60 ^m ‰ Quarz	Kieswerk Weiach
	Schlämmsand	Kieswerk Ibach
Mörtel- zusatzmittel	Aluminium, 99 % fein gepulvert	Merck, Bestellnummer : 1056.1000

Tab. 2: Zusammensetzung von Mörtel M2

Mischung	I		II		III	
	MT ¹⁾	[kg/m ³]	MT ¹⁾	[kg/m ³]	MT ¹⁾	[kg/m ³]
Zement	1	471.3	1	472.6	1	472.6
Wasser	0.75	353.4	0.75	354.5	0.88	415.9
Zuschläge ²⁾	2.47 (W)	1'163.9	2.47 (W)	1'167.4	2.33 (I)	1'101.1
Al-Pulver	0.003	1.414	0.001	0.473	0.001	0.473
total	4.223	1990	4.221	1995	4.221	1990

1) Massenteile bezogen auf das Zementgewicht

2) Herkunft: W = Weiach, I = Ibach

**Fig. 2:** Siebdurchgang der verwendeten Zuschlagsstoffe von Mörtel M2

Tab. 3: Siebdurchgang der verwendeten Zuschlagsstoffe von Mörtel M2

Sieböffnung [mm]	Sand Ibach	Sand Weiach
0.06	3.3	1.4
0.125	8.6	7
0.25	64.5	27.1
0.5	95.6	76.8
1	98.9	99.55
2	99.5	100

2.2 Herstellung

Für die Herstellung der Mischungen wurde ein Zwangsmischer (Zyklus) mit einem Fassungsvermögen von 75 l verwendet. Zunächst wurden die Zuschläge mit dem Zement und dem Aluminiumpulver 2 min lang vorgemischt, um das feine Aluminiumpulver gleichmässig zu verteilen. Nach der Wasserzugabe wurde weitere 2 min lang gemischt. Der Frischmörtel wurde nach dem Mischen mit 10 l Eimern in die vorbereitete Holzschalung bis ca. 10 cm unter den Rand gefüllt. Bei den Mörtelmischungen I und II traten geringe Mengen an Wasser (ca 6 l / m²) durch die mit Fugenbändern abgedichteten Stossfugen. Bei Mörtelmischung III trat ca. die 3 fache Menge (≈ 20 l Wasser/m³ Mörtel) aus der Schalung.

2.3 Frischmörteleigenschaften

2.3.1 Verarbeitbarkeit

Der Mörtel M2 hat eine fliessfähige Konsistenz und kann unabhängig vom Blähmittel selbst mit handelsüblichen Pumpen eingebracht werden. Der Mörtel beginnt bereits während dem Mischvorgang mit dem Blähen. Zur Quantifizierung der Blähwirkung wurde ein Standzylinder (1'000 ml) direkt nach dem Mischen mit Frischmörtel bis zur

500 ml Markierung gefüllt (Figur 3). Die zeitliche Volumenzunahme wurde durch wiederholtes Ablesen des Füllstandes des Zylinders bestimmt (Figur 4). Nach ca. 1.5 h war die Volumenzunahme abgeschlossen. In Tabelle 4 sind die Frischmörteleigenschaften dargestellt.

Standzylinder 1000 ml aus Polyethylen

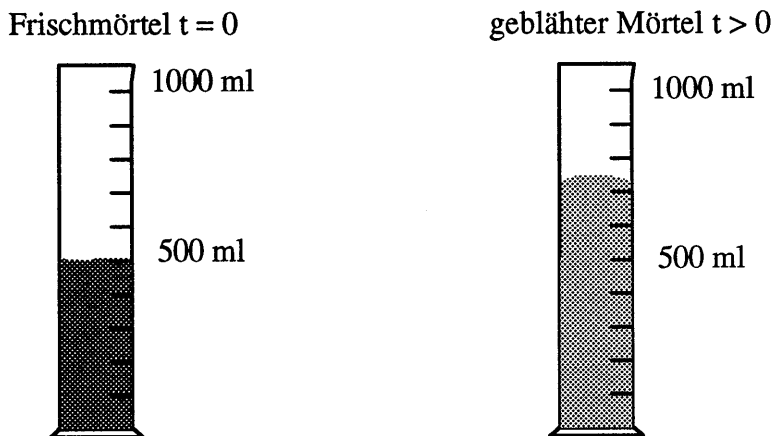


Fig. 3: Bestimmung des Blähvermögens von Mörtel M2

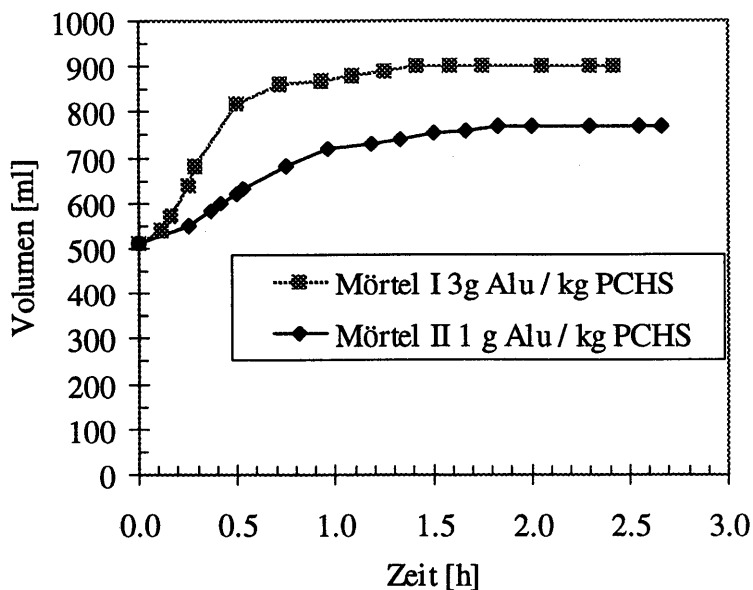


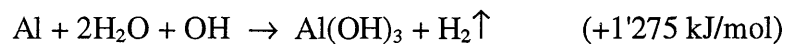
Fig. 4: Volumen vs. Zeit von Frischmörtel M2 in einem 1'000 ml Standzylinder
(Kurve Mörtel II identisch mit Kurve Mörtel III)

Tab. 4: Frischmörteleigenschaften von Mörtel M2

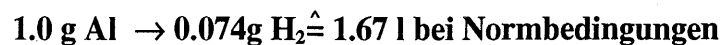
<i>Mischung</i>	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>
Frischmörtel - Rohdichte ρ_0 [kg/m ³]	1'990	1'995	1'990
Mörtelausbreitmass (DIN 18 555 Teil 1) [cm]	24	24	26
durchschnittliche Volumenzunahme [%]	80	53	53
Beginn der Expansion des Frischmörtels	sofort	sofort	sofort
Ende der Expansion des Frischmörtels	ca. 1.5 h	ca. 1.5 h	ca. 1.5 h

2.3.2 Wasserstoffentwicklung

Bei der chemischen Umsetzung von Aluminium im alkalischen Milieu des Frischmörtels entsteht Aluminiumhydroxid unter Bildung von freiem Wasserstoff. Die Bildung von Aluminiumhydroxid ist eine exotherme Reaktion bei der Wärme frei wird. Die Reaktionsgleichung lautet:



Daraus ergibt sich folgende Massen- und Volumenbilanz:



Normbedingungen: $T_n = 273.15 \text{ K}$, $p_n = 1013.25 \text{ hPa}$

In einem Modellexperiment (Figur 5) wurde die entstehende Wasserstoffmenge im Mörtel M2 gemessen. Direkt nach dem Mischen wurde Frischmörtel in einen Erlenmeyerkolben eingebracht und mit einer wassergefüllten Bürette verbunden. Das aus dem Erlenmeyerkolben verdrängte Gas stieg in der Bürette nach oben und verdrängte die entsprechende Wassermenge, die in einem Becherglas aufgefangen wurde. Der zeitliche Verlauf der aus dem Erlenmeyerkolben verdrängten Gasmenge ist in Figur 6 dargestellt. (Kurve Mörtel II identisch mit Kurve Mörtel III). Nach ca. 3 h war die Gasfreisetzung praktisch abgeschlossen. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden ca. 1.2 l H₂ pro g Aluminiumpulver ermittelt. Da ein Teil des Gases bereits beim Mischvorgang entweicht

und die chemische Umsetzung möglicherweise nicht vollständig oder verzögert abläuft, wurden nur ca. 72 % der stöchiometrischen Menge an Wasserstoffgas ermittelt.

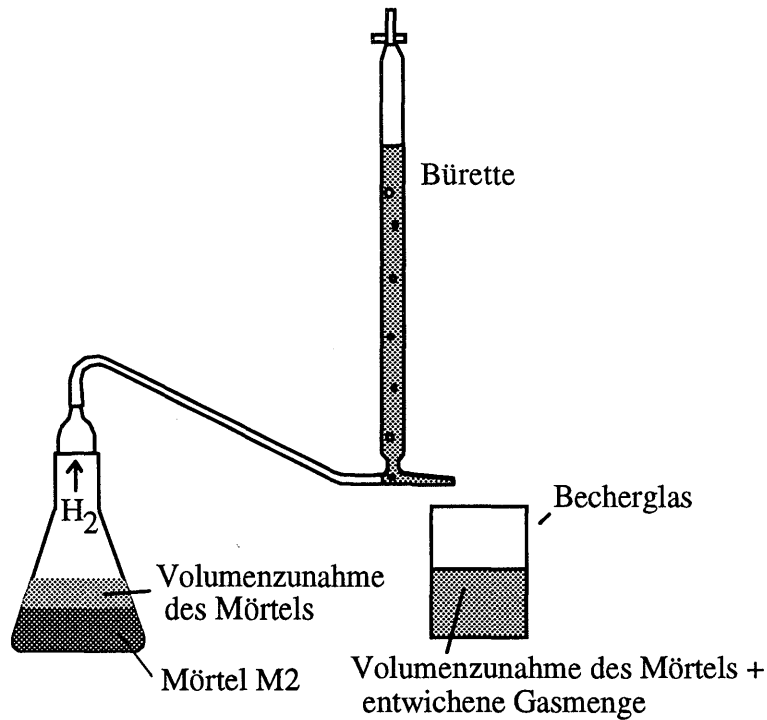


Fig. 5: Versuchsaufbau zur Bestimmung der freigesetzten Gasmenge

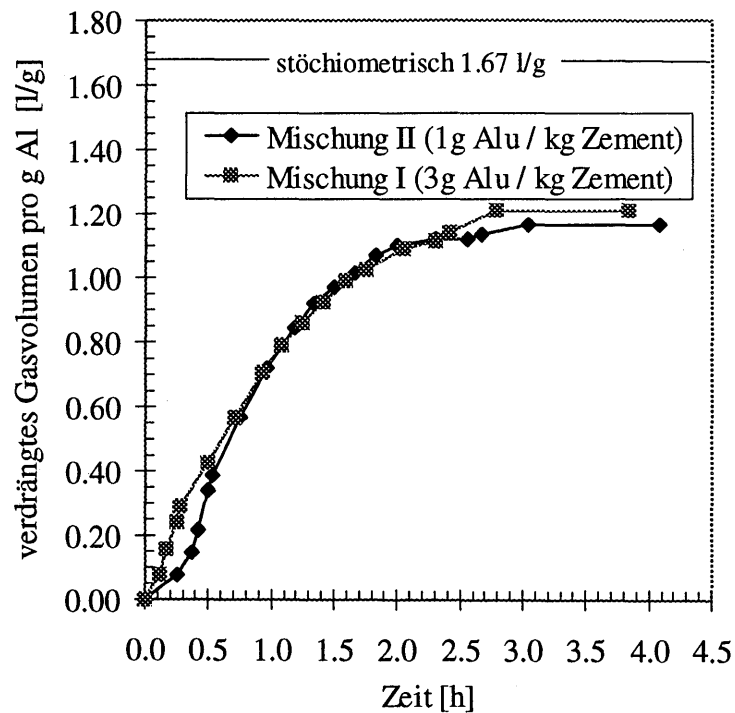


Fig. 6: Spezifische Gasentwicklung im Mörtel M2 als Funktion der Zeit

2.3.3 Verlauf der Wärmefreisetzung

Im folgenden Versuch wurde überprüft, inwieweit die Zugabe von Aluminiumpulver das Abbindeverhalten des Zementes (PCHS) beeinflusst. Dazu wurden die Temperaturverläufe im Frischmörtel und in einem Referenzmörtel ohne Aluminiumpulver gemessen. Ein mit 150 g Frischmörtel gefüllter PTFE Becher wurde mit einem Thermoelement bestückt und in ein Dewargefäss plaziert. Der Temperaturverlauf wurde mit einem Schreiber aufgenommen und die Daten auf einen PC übertragen. In Figur 7 sind die Temperaturkurven der verschiedenen Mörtelmischungen dargestellt. Bei den Mörtelmischungen mit Aluminiumpulverzusatz ist ein rascher Anstieg der Temperatur innerhalb der ersten 3 Stunden zu beobachten. Dieser Temperaturanstieg beruht auf der Freisetzung der Bildungsenthalpie von Aluminiumhydroxid. Mit zunehmender Al-Menge verstärkt sich der Temperaturanstieg, erhöht sich die erreichte Maximaltemperatur und verkürzt sich die Zeit bis zum Erreichen des Temperaturmaximums. Die Referenzmischung ohne Aluminiumpulver zeigt einen deutlichen Temperaturanstieg hingegen erst nach 5 Stunden, das Maximum in der Temperaturkurve liegt bei ca. 20 h. Bei einer Zugabe von 1 g Al pro kg Zement wird der Hydratationsverlauf nur geringfügig beschleunigt, das Maximum in der Temperaturkurve liegt bei 18 h. Bei einer Zugabe von 3 g Al pro kg Zement tritt das Temperaturmaximum bereits nach 10 h auf. In Tabelle 5 sind die Wärmemengen zusammengetragen, die beim Abbinden der Aluminiummörtel frei werden. Die Hydratationswärme vom sulfatbeständigen Portlandzement PCHS wurde durch Summation der Hydratationswärmern der Klinkerkomponenten gemäss TAYLOR (1990) berechnet. Die Bildungswärme von Aluminiumhydroxid ist WEAST (1983) entnommen.

Zusammenfassend bewirkt die Zugabe von Aluminiumpulver einen frühen Temperaturanstieg im Frischmörtel, der die Hydratation beschleunigt. Gemäss Figur 6 ist die Gasentwicklung und damit die Blähwirkung nach 2 Stunden nahezu abgeschlossen. Um die Blähwirkung des Mörtels zum optimalen Verfüllen kleiner Hohlräume auszunutzen, sollte der Mörtel innerhalb dieser Zeitspanne eingebracht werden.

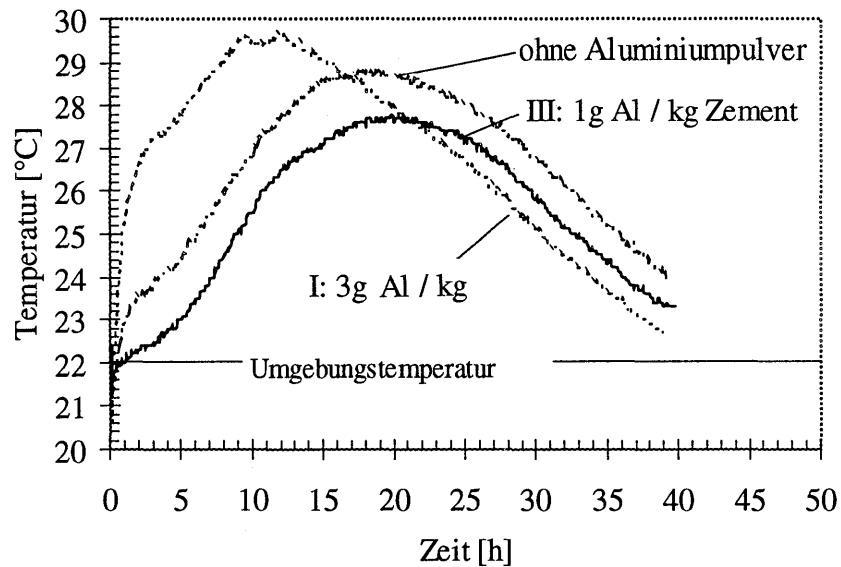


Fig. 7: Temperaturentwicklung im Frischmörtel

Tab. 5: Thermische Eigenschaften von Mörtel M2

	Wärmekapazität [kJ/(kg ¹ K)]	Hydrations- wärme ^{*)} [kJ/kg ¹]	Bildungsenthalpie von Al(OH) ₃ ^{**)} [kJ/kg ¹]	gesamte Wärmemenge [kJ/kg ¹]
Mischung I	1.43	91	34	125
Mischung II	1.43	91	11	102
Mischung III	1.54	91	11	102

^{*)} siehe TAYLOR (1990), ^{**)} siehe WEAST (1983), ¹⁾ bezogen auf 1 kg Frischmörtel

2.4 Festmörteleigenschaften

Die Probekörper für die Bestimmung der Festmörteleigenschaften wurden in einer speziell angefertigten Holzschalung (Figur 8) hergestellt. Ein Wandschalung (h = 1.5 m, b = 0.6 m, t = 0.3 m) wurde durch Schikanen in drei übereinander liegende Abteile unterteilt. Aus allen drei Abteilen wurden durch Sägen resp. Bohren Probekörper entnommen. Auf diese Weise konnten die Festmörteleigenschaften als Funktion der Höhe ermittelt werden. Der Mörtelblock wurde 3 Tage nach der Herstellung ausgeschalt und aus den Abteilen Probekörper für die Festbetonprüfung herausgetrennt. Bis zur Prüfung

wurden die Probekörper im Feuchtraum gelagert. Die Festmörteleigenschaften wurden nach 28 und 150 Tagen ermittelt.

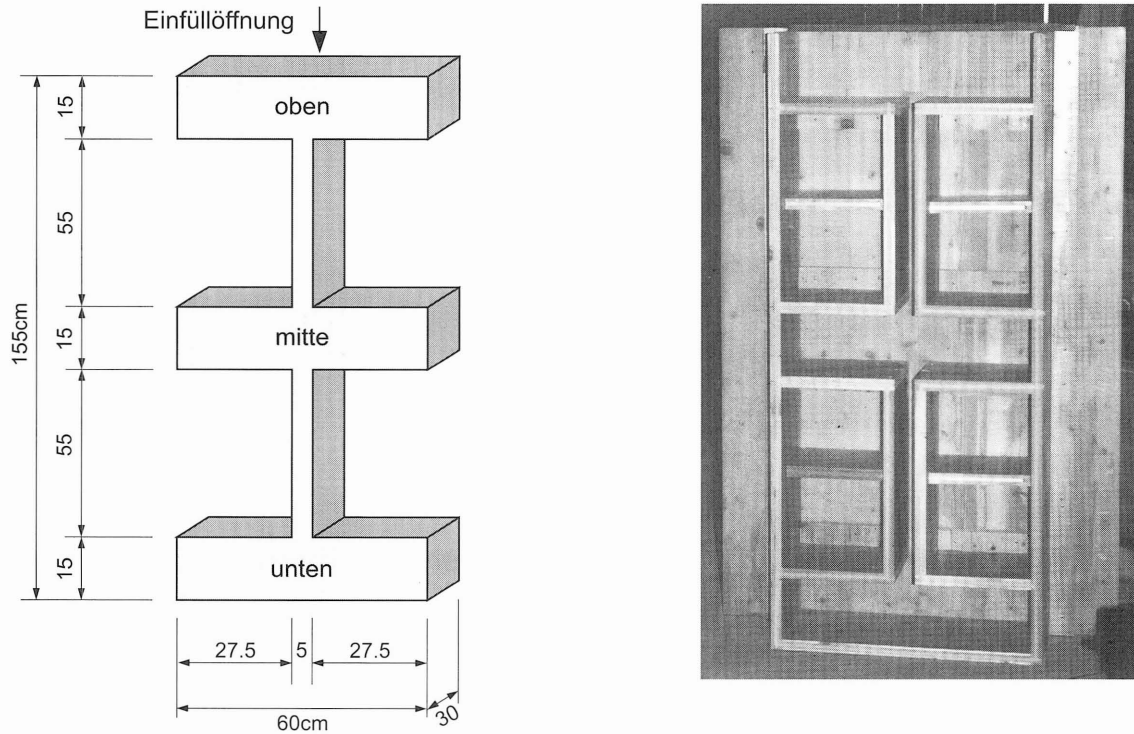


Fig. 8: Holzschalung zur Herstellung der Probekörper

2.4.1 Rohdichte

Die Rohdichte wurde an Prismen bestimmt, die anschliessend für den Biegezugversuch herangezogen wurden. Die Rohdichten der 3 Mischungen liegen in einem Bereich von 1'100 bis 1'800 kg/m³ (Figur 9 - 11) ¹. Mit zunehmender Entnahmehöhe der Probekörper nimmt die Dichte ab. Die Unterschiede zwischen den Rohdichten nach 28 und 150 Tagen liegt innerhalb der Streubreite der Messungen. Mischung I zeigt die niedrigsten Dichten, gleichzeitig kann die geringste Höhenabhängigkeit beobachtet werden. Mischung III zeigt im mittleren und unteren Bereich die höchste ermittelte Dichte.

¹ Die den Figuren 9-33 zugrunde liegenden Zahlenwerte sind in den Tabellen 6-8 im Anhang aufgeführt.

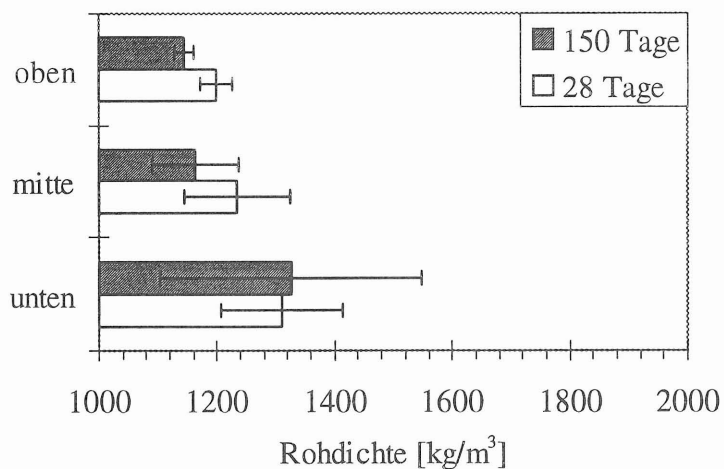


Fig. 9: Rohdichte von Mörtelmischung I

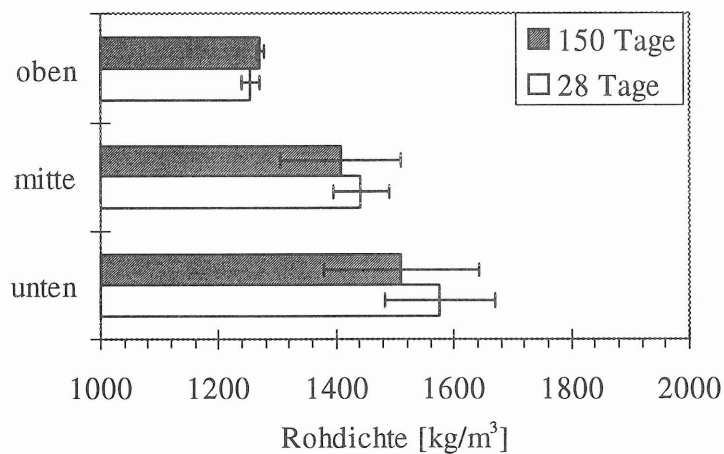


Fig. 10: Rohdichte von Mörtelmischung II

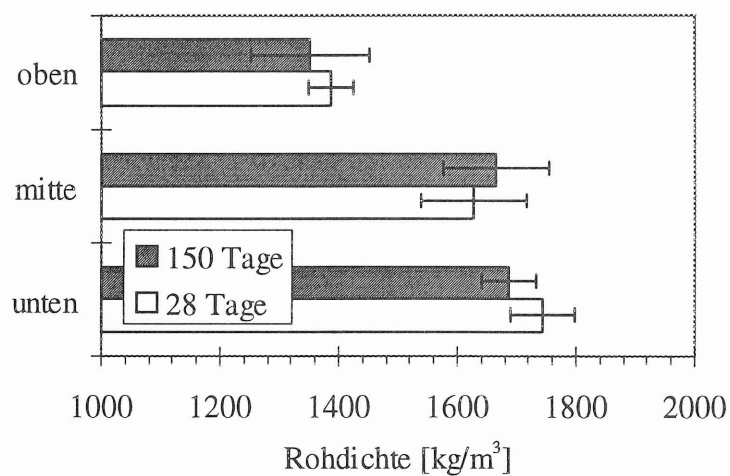


Fig. 11: Rohdichte von Mörtelmischung III

2.4.2 Porosität

Die Porosität der Mischungen wurde gravimetrisch bestimmt. Dazu werden die vakuumgesättigten Proben bei 105°C 48 h lang getrocknet. Aus dem Gewichtsverlust bei der Trocknung lässt sich die Gesamtporosität bestimmen. Die Porositäten der Mischungen liegen zwischen 38 und 60 % (Figuren 12 - 14). Bei jeder Mischung wurden im oberen Bereich die höchsten Porositäten ermittelt. Von den drei getesteten Mörtelmischungen erreichte Mischung I mit der höchsten Aluminiumpulverdosierung die höchsten Porositäten. Mit zunehmendem Alter (28 resp. 150 Tage) konnte keine signifikante Änderung der Porosität beobachtet werden.

2.4.3 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde an Zylindern ($\varnothing = 90$ mm, $h = 180$ mm) nach 28 und 150 Tagen bestimmt (Figuren 15 - 17). Nach 28 Tagen liegen die Druckfestigkeiten zwischen 3 N/mm² (Mischung I oben) und 16 N/mm² (Mischung II unten). Bei allen Mischungen kann eine Abnahme der Druckfestigkeit mit zunehmender Höhe und eine Zunahme der Festigkeit mit zunehmendem Alter beobachtet werden. Ausgehend von der 28 Tage Festigkeit nimmt die Festigkeit bis zum 150. Tag um ca. 50 bis 80 % zu, d.h. auf 5 bis 28 N/mm² (Mischung III unten).

2.4.4 E-Modul

Der E-Modul wurde an Zylindern ($\varnothing = 90$ mm, $h = 180$ mm) nach 28 und 150 Tagen bestimmt (Figuren 18 - 20). Nach 28 Tagen liegt der E-Modul zwischen 4'000 N/mm² (Mischung I oben) und 14'000 N/mm² (Mischung II unten). Bei allen Mischungen kann eine Abnahme des E-Moduls mit zunehmender Höhe beobachtet werden, besonders ausgeprägt ist dieser Effekt bei Mischung III. Mit zunehmendem Alter nimmt der E-Modul zu. Die Zunahme beträgt zwischen 5 und 50 %, d.h. auf 5'000 bis 15'000 N/mm² (Mischung II unten).

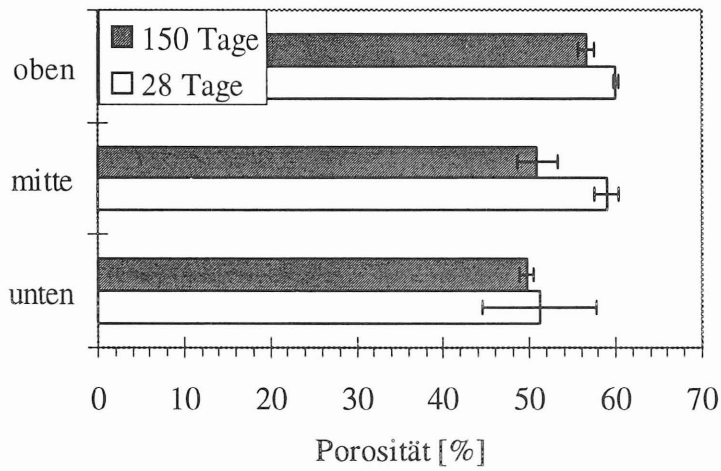


Fig. 12: Porosität von Mörtelmischung I

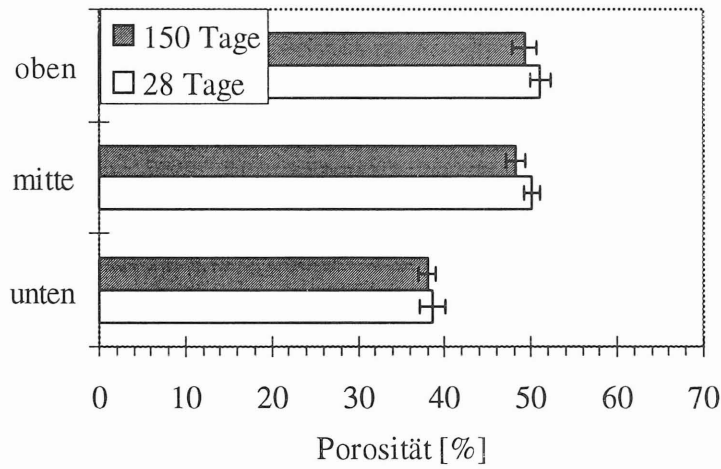


Fig. 13: Porosität von Mörtelmischung II

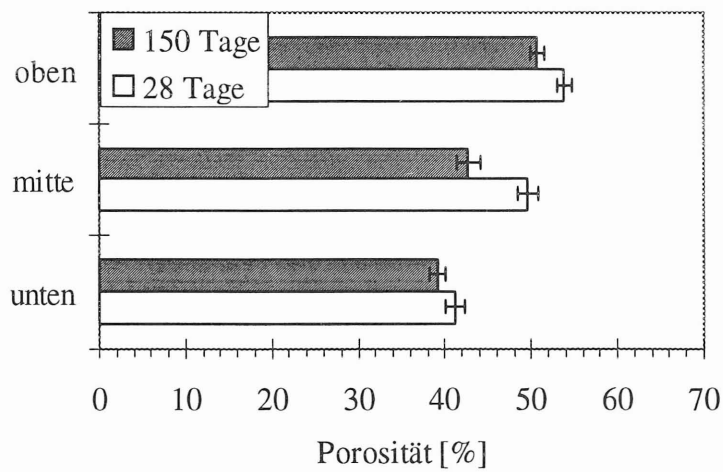


Fig. 14: Porosität von Mörtelmischung III

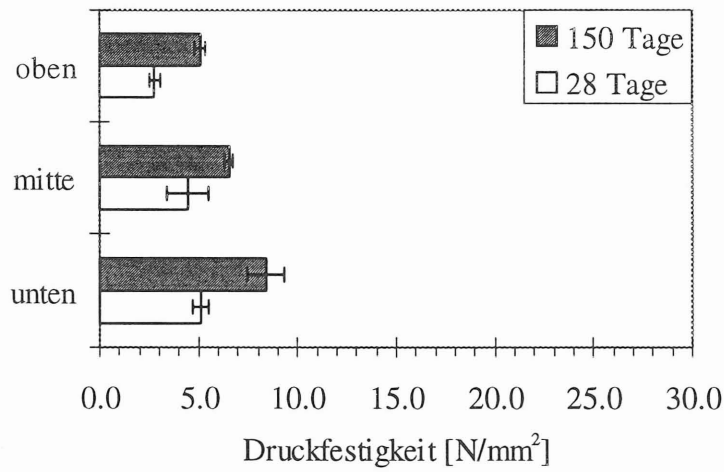


Fig. 15: Druckfestigkeit von Mörtelmischung I

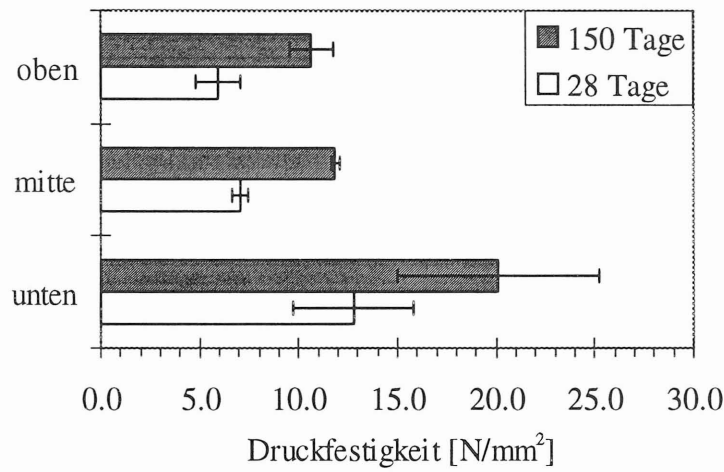


Fig. 16: Druckfestigkeit von Mörtelmischung II

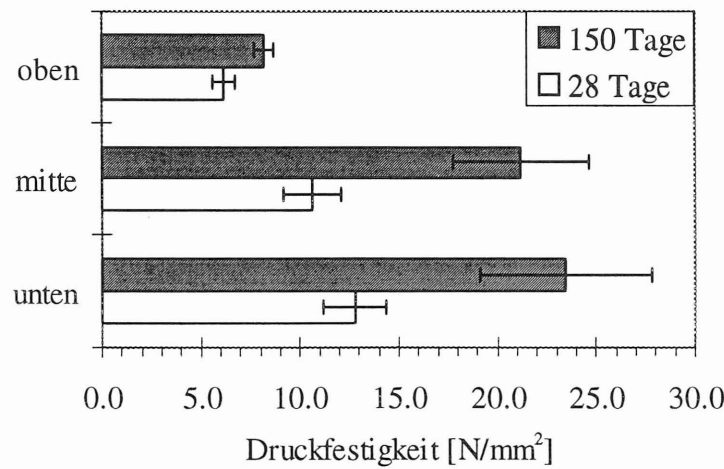


Fig. 17: Druckfestigkeit von Mörtelmischung III

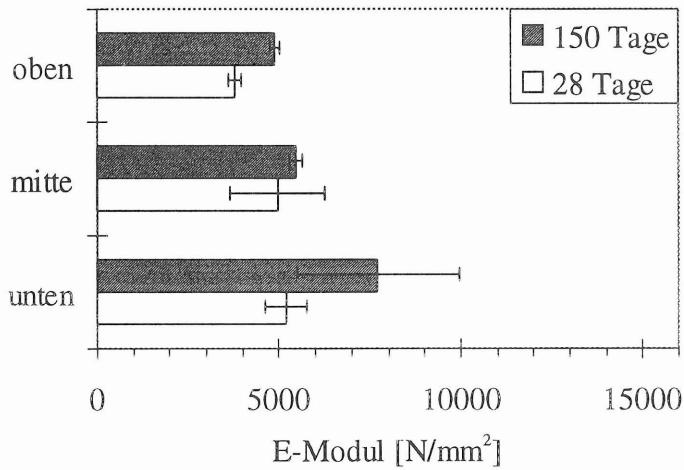


Fig. 18: E-Modul von Mörtelmischung I

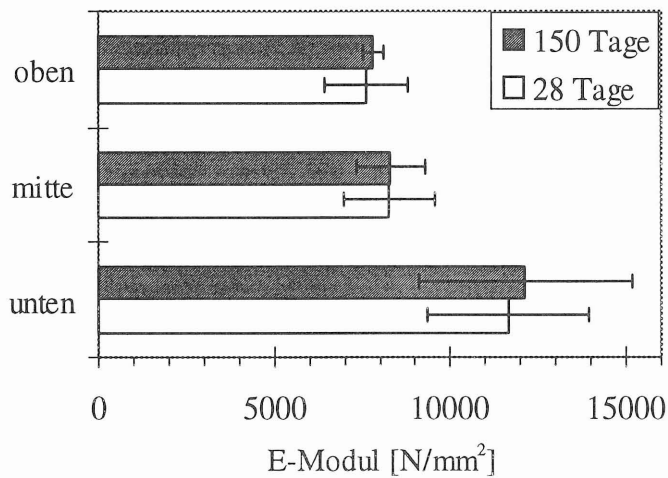


Fig. 19: E-Modul von Mörtelmischung II

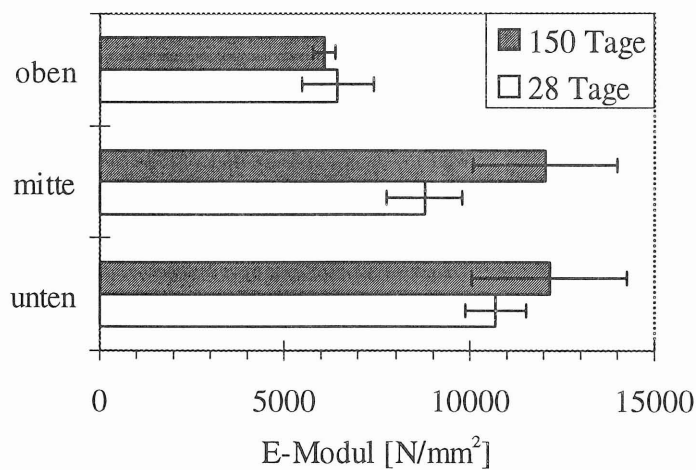


Fig. 20: E-Modul von Mörtelmischung III

2.4.5 Drei-Punkt-Biegezugfestigkeit

Die Drei-Punkt-Biegezugfestigkeit wurde an Prismen (40 x 40 x 160 mm) nach 28 und 150 Tagen bestimmt (Figuren 21 - 23). Nach 28 Tagen wurden Biegezugfestigkeiten von 0.8 bis 4.1 N/mm² erzielt. Nach 150 Tagen nahm die Biegezugfestigkeit im Mittel um 50 % zu, d.h. auf 1.1 bis 5.0 N/mm².

2.4.6 Permeabilität

2.4.6.1 Gaspermeabilität

Die Gaspermeabilität wurde an Bohrkernen ($\varnothing = 90$ mm, $h = 60$ mm) bestimmt (Figur 24 - 26). Nach 28 Tagen zeigte Mörtelmischung I (oben) die höchste Permeabilität von ca. $2 \cdot 10^{-12}$ m². Dagegen wurden mit Mörtelmischung III (unten) Permeabilitäten von ca. 10^{-14} m² gemessen. Die Änderungen der Gaspermeabilität mit zunehmendem Alter sind nicht signifikant und liegen innerhalb der Streubreite der Messungen. Wassergesättigte Proben zeigten einen Schwellendruck von weniger als 100 mbar.

2.4.6.2 Wasserpermeabilität

Die Wasserpermeabilität (Figuren 27 - 29) wurde an wassergesättigten Bohrkernproben ($\varnothing = 90$ mm, $h = 60$ mm) bestimmt. Mörtelmischung I zeigte die höchsten Wasserpermeabilitäten sowohl nach 28 als auch nach 150 Tagen. Die oben entnommenen Mörtelproben ergeben Werte von ca. $4 \cdot 10^{-13}$ m². Unten wurden ca. $7 \cdot 10^{-14}$ m² ermittelt. Die Permeabilitäten der Mörtelmischungen II und III liegen um 1 bis 2 Zehnerpotenzen unter der von Mischung I. Die Änderungen der Wasserpermeabilität mit zunehmendem Alter liegen innerhalb der Streubreite der Messungen. Die mit Gas ermittelten Permeabilitäten liegen um ca. eine Zehnerpotenzen über den entsprechenden Wasserpermeabilitäten.

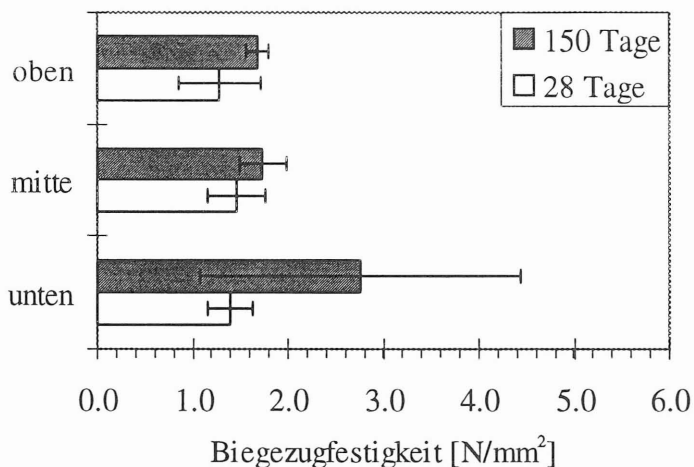


Fig. 21: Drei-Punkt-Biegezugfestigkeit von Mörtelmischung I

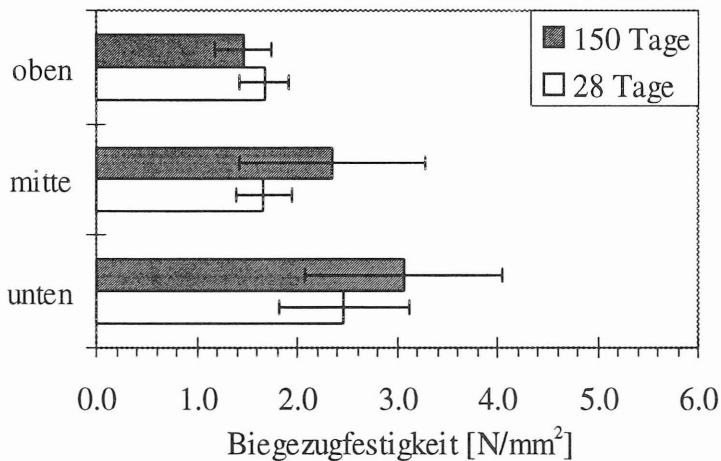


Fig. 22: Drei-Punkt-Biegezugfestigkeit von Mörtelmischung II

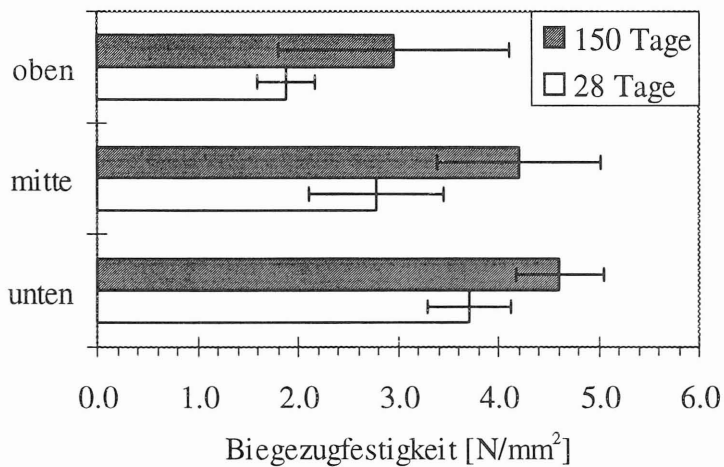


Fig. 23: Drei-Punkt-Biegezugfestigkeit von Mörtelmischung III

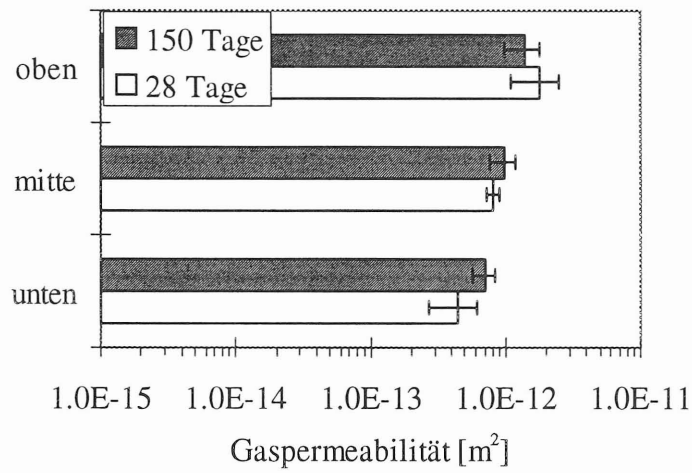


Fig. 24: Gaspermeabilität von Mörtelmischung I

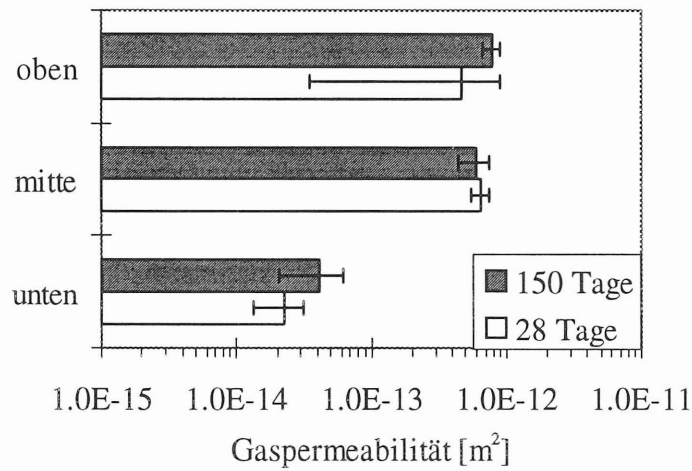


Fig. 25: Gaspermeabilität von Mörtelmischung II

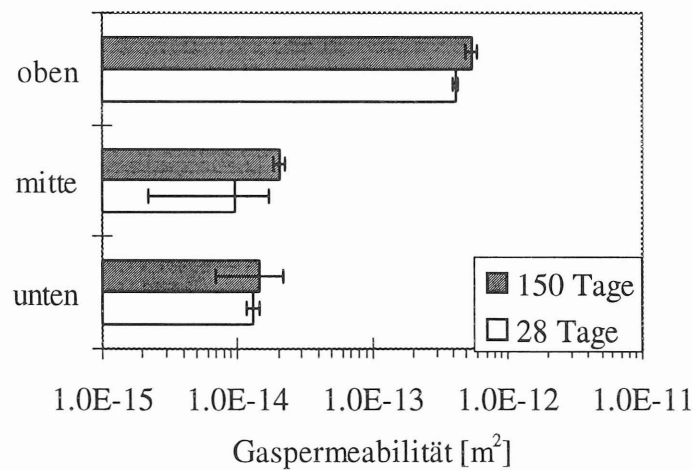


Fig. 26: Gaspermeabilität von Mörtelmischung III

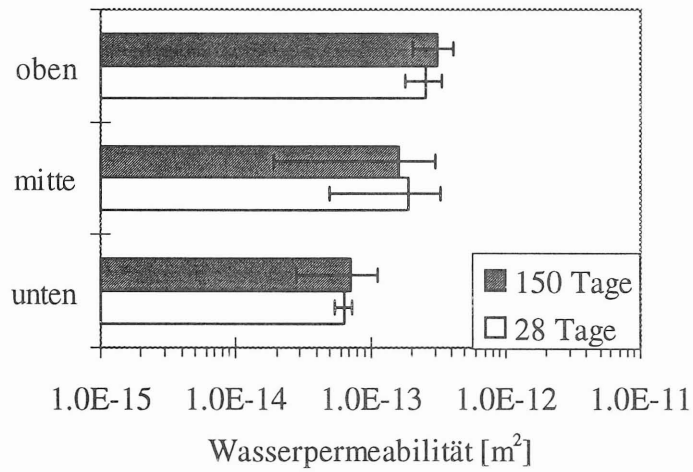


Fig. 27: Wasserpermeabilität von Mörtelmischung I

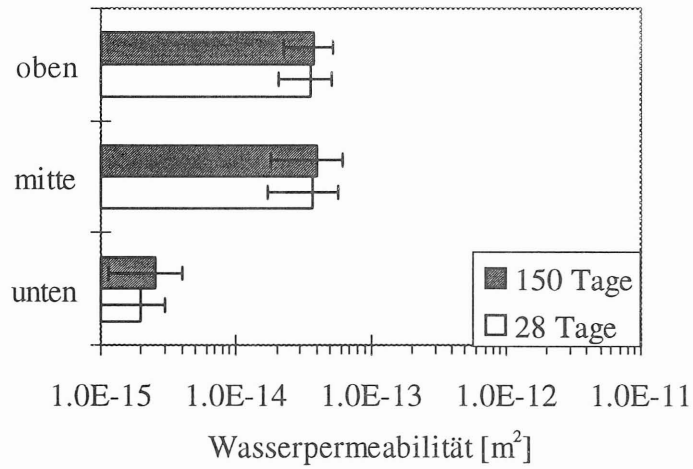


Fig. 28: Wasserpermeabilität von Mörtelmischung II

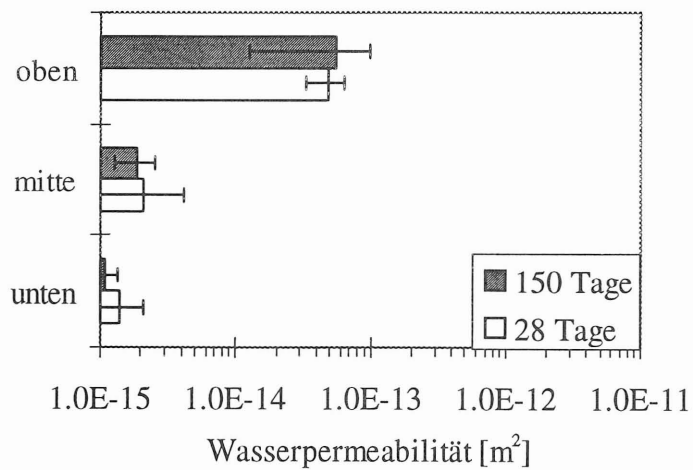


Fig. 29: Wasserpermeabilität von Mörtelmischung III

2.4.7 Druckfestigkeit und Gaspermeabilität als Funktion der Rohdichte

In den Figuren 30 und 31 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeit und der Gaspermeabilität als Funktion der Rohdichte dargestellt.

Die Druckfestigkeit der Mörtelmischungen steigt nahezu linear mit zunehmender Rohdichte der Mörtel. Dieser Effekt nimmt mit zunehmendem Alter (Hydratationsgrad) zu. Neben der Rohdichte hat das Alter der Proben einen massgeblichen Einfluss auf die Druckfestigkeit der Proben.

Die Gaspermeabilität nimmt mit zunehmender Rohdichte exponentiell ab. Zwischen dem 28. und dem 150. Tage ist eine geringe Abnahme der Permeabilität zu verzeichnen. Der Einfluss des Alters auf die Gaspermeabilität ist gering verglichen mit dem Einfluss der Rohdichte.

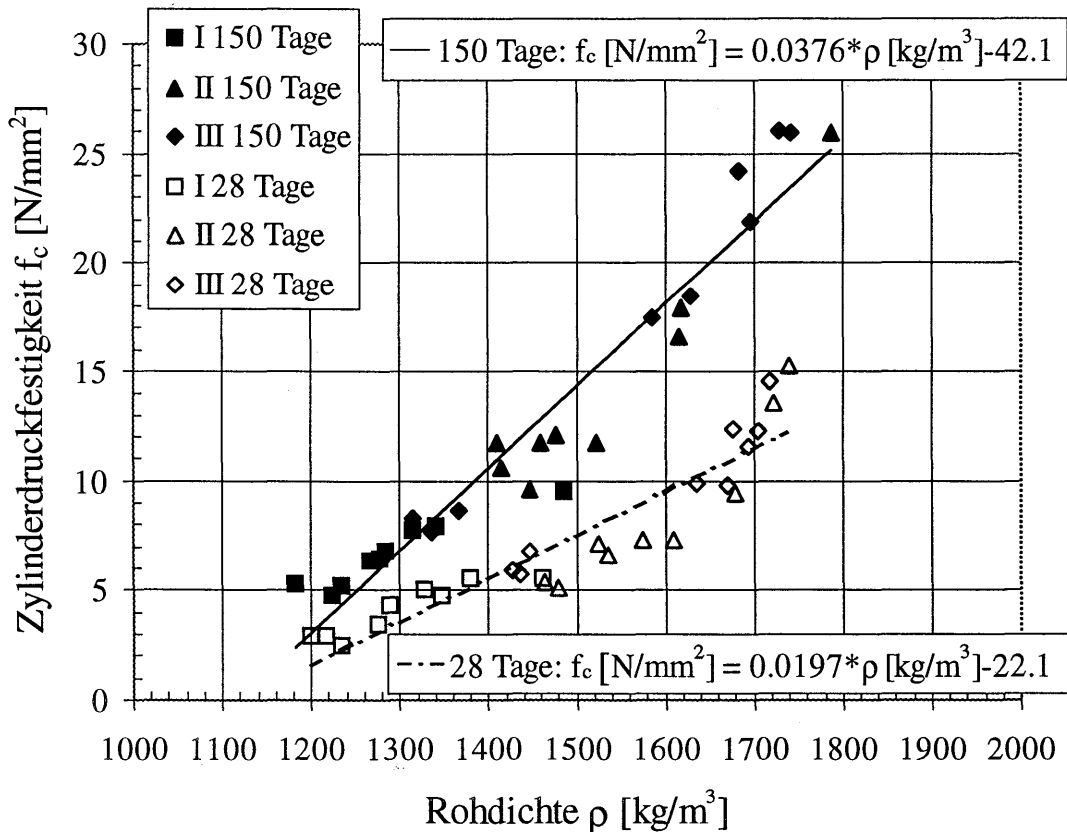


Fig. 30: Druckfestigkeit von Mörtel M2 als Funktion der Dichte

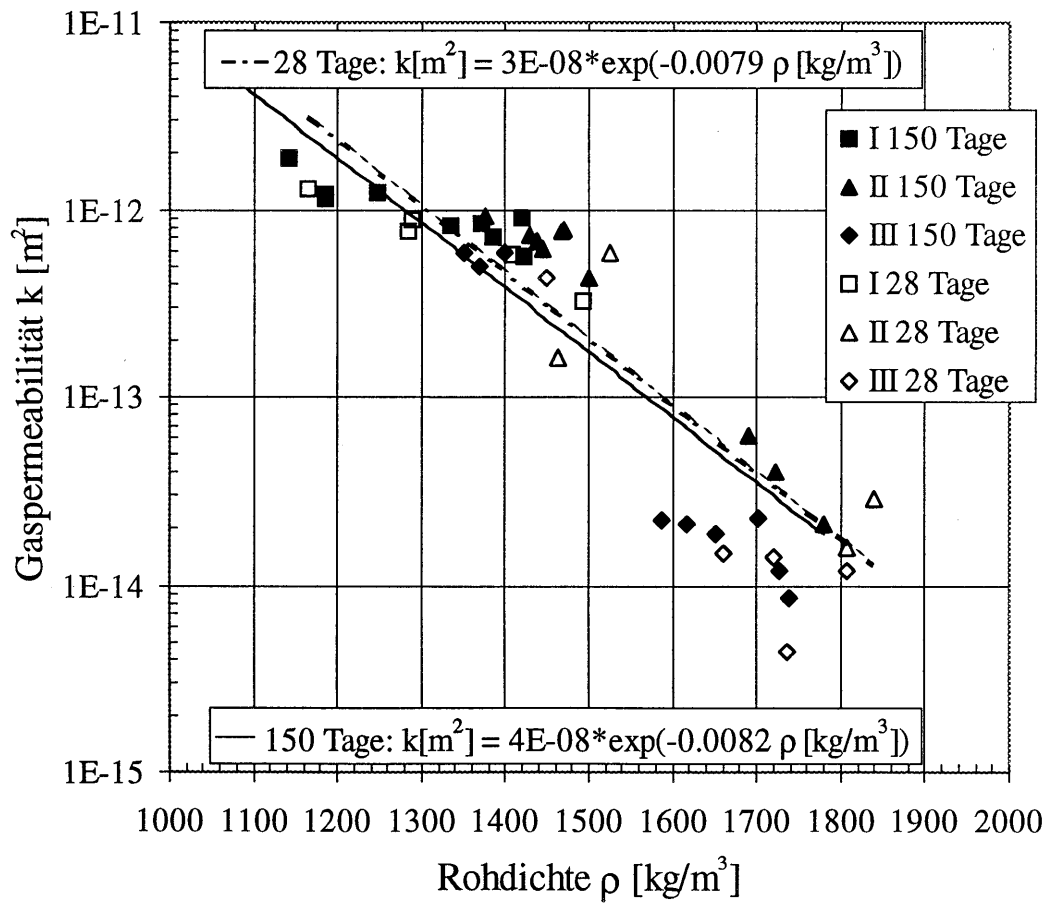


Fig. 31: Gaspermeabilität von Mörtel M2 als Funktion der Dichte

3 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse von Laboruntersuchungen an zementgebundenen Feinmörteln für die Verfüllung kleiner Hohlräume (Breite < 1 cm) beschrieben. Die Mörtel sind durch die Zugabe von fein verteiltem Aluminiumpulver modifiziert und zeigen folgende charakteristische Eigenschaften:

- Der Frischmörtel weist eine fliessfähige Konsistenz auf. Im Frischmörtel entsteht durch die Reaktion des Aluminiumpulvers im alkalischen Milieu Wasserstoffgas, das zur Bildung von Poren führt, welche die gewünschte Gasfreisetzung erlauben. Der Frischmörtel bläht durch die Bildung von Gasblasen auf. Durch 1g Aluminiumpulver entstehen bei Standardbedingungen theoretisch 1.67 l Wasserstoff, unter Freisetzung von Wärme.
- Der erhärtete Mörtel weist inhomogene Festmörteleigenschaften auf, die durch den Blähvorgang bedingt sind. Durch das Eigengewicht des Mörtels werden die Gasblasen im Frischmörtel komprimiert. Dadurch befinden sich im „unteren“ Teil eines Mörtелеlementes weniger grosse Poren als im „oberen“ Bereich.

Nach Vorversuchen wurden für das detaillierte Hauptversuchsprogramm drei Mörtelmischungen ausgewählt. Die Mischungen unterscheiden sich in der Sieblinie, dem w/z-Wert und der Dosierung des Aluminiumpulvers. Als Zement wurde jeweils sulfatbeständiger Portlandzement (PCHS) mit einer Dosierung von 500 kg/m³ gewählt:

- | | | | |
|------|-------------------------------------|-------------|--------------------|
| I: | Sand 0 - 1 (Kieswerk Weiach), | w/z = 0.75, | Al = 3 g/kg Zement |
| II: | Sand 0 - 1 (Kieswerk Weiach), | w/z = 0.75, | Al = 1 g/kg Zement |
| III: | Schlämmsand 0 - 1 (Kieswerk Ibach), | w/z = 0.88, | Al = 1 g/kg Zement |

Hinsichtlich der Frischmörteleigenschaften zeigen alle Mischungen ein Mörtelausbreitmass ≥ 24 cm. Während bei den Mischung I und II dies mit einem w/z-Wert von 0.75 erreicht wird, hat Mischung III aufgrund des hohen Feinanteils des Schlämmsandes einen deutlich höheren Wasseranspruch bei gleicher Verarbeitbarkeit.

Bei den getesteten Mischungen liegt die Rohdichte des geblähten Mörtels nach 28 Tagen zwischen 1'200 und 1'800 kg/m³ und die Porosität zwischen 38 und 60 % (siehe Figur 32). Die Mischungen weisen nach 28 Tagen Druckfestigkeiten zwischen 3 und 15 N/mm² auf. Nach 150 Tagen wurde eine Zunahme der Druckfestigkeiten um ca. 80 % beobachtet.

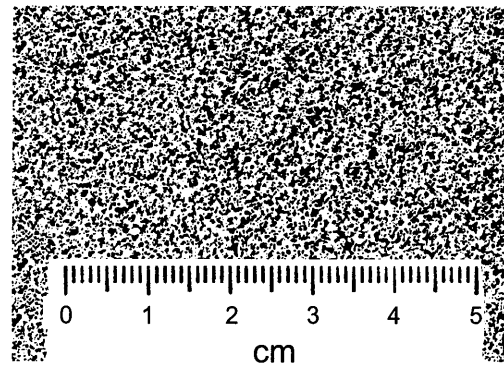


Fig. 32: typische Porenstruktur von geblähtem Mörtel M2.

Durch die erhöhte Porosität der geblähten Mörtel wird deren Permeabilität um bis zu 3 Zehnerpotenzen erhöht gegenüber vergleichbaren Mörteln ohne Aluminiumpulverzusatz. Die Gaspermeabilität der Proben geringerer Dichte beträgt ca. 10⁻¹² m², die der Proben höherer Dichte ca. 10⁻¹⁴ m². Die Wasserpermeabilität liegt jeweils knapp eine Zehnerpotenz darunter. Mit zunehmendem Alter konnte keine signifikante Veränderung in der Permeabilität beobachtet werden.

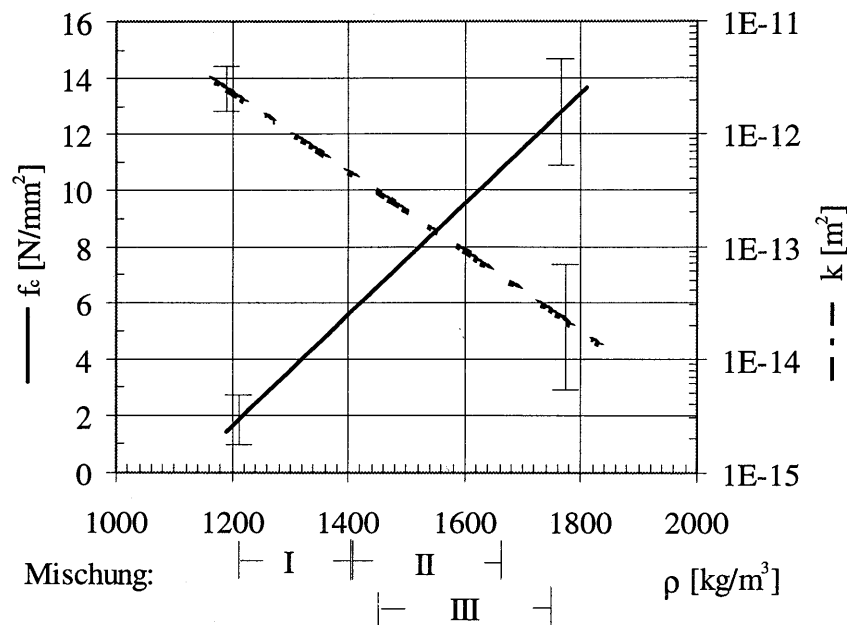


Fig. 33: Mischung I, II und III: Zylinderdruckfestigkeit f_c und Gaspermeabilität k nach 28 Tagen in Abhängigkeit von der Rohdichte ρ .

Zusammenfassend gibt Figur 33 einen Überblick über ausgewählte Festmörteleigenschaften der Mischungen. Sie zeigt den Zusammenhang zwischen Rohdichte, Festigkeit und Gaspermeabilität: Mit zunehmender Rohdichte steigt die Druckfestigkeit nahezu linear an, die Gaspermeabilität nimmt hingegen exponentiell ab. Die Mörtelmischung mit dem höchsten Aluminiumpulvergehalt (I) weist im Mittel die geringste Dichte und damit die geringste Festigkeit und höchste Gaspermeabilität auf. Die Mörtelmischungen II und III mit der geringeren Aluminiumpulverdosierung zeigen eine deutlich höhere Rohdichte, und verbunden damit, eine höhere Festigkeit bzw. geringere Gaspermeabilität.

Empfehlungen für den Einsatz von mit Aluminiumpulver geblähten Mörteln:

- Durch die Dosierung des Aluminiumpulvers können die Festmörteleigenschaften und die Permeabilität gesteuert werden. Mit zunehmender Dosierung nimmt die Rohdichte und die Festigkeit ab. Gleichzeitig nimmt die Permeabilität zu.
- Der Bläheeffekt und die Porenbildung der Mörtelmischungen ist in dichten Schalungen, z.B. in einer Holzschalung, bei der in die Stossfugen der Schalungsbretter Dichtungsbänder eingelegt sind oder in einem Behälter aus Normalbeton wie er für die Containereinlagerung vorgesehen ist, am ausgeprägtesten.
- In einer undichten Schalung (z.B. Einlagerungselement LF aus Mörtel M1) tritt sowohl ein geringerer Bläheeffekt als auch eine verminderte Porenbildung auf, da Wasser und Wasserstoffgas durch die durchlässige Schalung entweichen können.
- Durch das Blähen des Mörtels entsteht eine wellige unebene Oberfläche. Eine glatte Oberfläche kann durch eine geeignete Abdeckung gewährleistet werden.
- Bei der Herstellung und Verarbeitung ist wegen der H₂-Bildung für eine ausreichende Belüftung zu sorgen.

4 LITERATURVERZEICHNIS

ARONI S., DE GROOT G.J., ROBINSON M.J., SVANHOLM G., WITTMANN F.H.
1993: Autoclaved Aerated Concrete, Properties Testing and Design: Rilem
Recommended Practice, E&FN Spon London

AURICH H. 1971: Kleine Leichtbetonkunde: Bauverlag GmbH, Wiesbaden u. Berlin

DEN BOER J.F., SIEMES A.J.M. 1986: Literatuurstudie Schuimbeton: CUR Bericht
86-3, Civieltechnisch centrumuitvoering research en regelgeving, Gouda
Niederlande

JACOBS F. PH., MAYER G., WITTMANN F.H. 1994: Hochpermeable,
zementgebundene Verfüllmörtel für SMA Endlager: NAGRA Technischer Bericht
NTB 92-11; NAGRA, Wettingen

JACOBS F. PH: 1994: Permeabilität und Porengefüge zementgebundener Werkstoffe:
Aedificatio Publishers IRB Verlag, Unterengstringen

WEAST R.A. (Ed.) 1983: CRC Handbook Of Chemistry And Physics: CRC Press, Boca
Raton, USA

TAYLOR H.F.W. 1990: Cement chemistry: Academic Press

5 ANHANG

Festmörteleigenschaften der 3 Mischungen

Tab. 6: Festmörteleigenschaften von Mischung I

28 Tage	unten	mitte	oben
Rohdichte [kg/m ³]	1311 ± 104	1235 ± 90	1199 ± 27
Porosität [%]	51 ± 7	59 ± 1	60 ± 1
Druckfestigkeit [N/m ²]	5.1 ± 0.4	4.4 ± 1.0	2.8 ± 0.3
E-Modul [N/mm ²]	5206 ± 559	4972 ± 1297	3806 ± 172
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	1.4 ± 0.2	1.5 ± 0.3	1.3 ± 0.4
Gaspermeabilität [10 ⁻¹⁵ m ²]	450 ± 180	820 ± 85	1800 ± 710
Wasserpermeabilität [10 ⁻¹⁵ m ²]	64 ± 10	190 ± 140	260 ± 80

150 Tage	unten	mitte	oben
Rohdichte [kg/m ³]	1326 ± 223	1164 ± 73	1145 ± 17
Porosität [%]	50 ± 1	51 ± 2	57 ± 1
Druckfestigkeit [N/m ²]	8.4 ± 0.9	6.5 ± 0.2	5.1 ± 0.3
E-Modul [N/mm ²]	7731 ± 2214	5475 ± 180	4906 ± 126
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	2.8 ± 1.7	1.7 ± 0.2	1.7 ± 0.1
Gaspermeabilität [10 ⁻¹⁵ m ²]	700 ± 140	990 ± 210	1400 ± 410
Wasserpermeabilität [10 ⁻¹⁵ m ²]	71 ± 43	160 ± 240	310 ± 100

Tab. 7: Festmörteleigenschaften von Mischung II

28 Tage	unten	mitte	oben
Rohdichte [kg/m ³]	1576 ± 94	1442 ± 48	1255 ± 14
Porosität [%]	39 ± 2	50 ± 1	51 ± 1
Druckfestigkeit [N/m ²]	12.8 ± 3.0	7.1 ± 0.4	5.9 ± 1.1
E-Modul [N/mm ²]	11666 ± 2304	8266 ± 1285	7611 ± 1182
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	2.5 ± 0.6	1.7 ± 0.3	1.7 ± 0.2
Gaspermeabilität [10 ⁻¹⁵ m ²]	23 ± 9.2	650 ± 92	470 ± 430
Wasserpermeabilität [10 ⁻¹⁵ m ²]	2.0 ± 1.0	37 ± 20	36 ± 15

150 Tage	unten	mitte	oben
Rohdichte [kg/m ³]	1510 ± 132	1408 ± 103	1271 ± 7
Porosität [%]	38 ± 1	48 ± 1	49 ± 1
Druckfestigkeit [N/m ²]	20.1 ± 5.1	11.9 ± 0.2	10.7 ± 1.1
E-Modul [N/mm ²]	12144 ± 3018	8316 ± 975	7814 ± 279
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	3.1 ± 1.0	2.4 ± 0.9	1.5 ± 0.3
Gaspermeabilität [10 ⁻¹⁵ m ²]	41 ± 20	590 ± 150	790 ± 120
Wasserpermeabilität [10 ⁻¹⁵ m ²]	2.6 ± 1.4	40 ± 22	38 ± 15

Tab. 8: Festmörteleigenschaften von Mischung III

28 Tage	unten	mitte	oben
Rohdichte [kg/m ³]	1743 ± 54	1627 ± 89	1386 ± 38
Porosität [%]	41 ± 1	50 ± 1	54 ± 1
Druckfestigkeit [N/m ²]	12.8 ± 1.6	10.7 ± 1.5	6.2 ± 0.5
E-Modul [N/mm ²]	10708 ± 837	8794 ± 1022	6430 ± 970
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	3.7 ± 0.4	2.8 ± 0.7	1.9 ± 0.3
Gaspermeabilität [10 ⁻¹⁵ m ²]	13 ± 1.4	9.7 ± 7.5	420 ± 21
Wasserpermeabilität [10 ⁻¹⁵ m ²]	1.4 ± 0.7	2.1 ± 2.0	48 ± 15
150 Tage	unten	mitte	oben
Rohdichte [kg/m ³]	1687 ± 46	1665 ± 89	1352 ± 100
Porosität [%]	39 ± 1	43 ± 1	51 ± 1
Druckfestigkeit [N/m ²]	23.5 ± 4.4	21.2 ± 3.5	8.2 ± 0.5
E-Modul [N/mm ²]	12161 ± 2115	12045 ± 1945	6083 ± 305
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	4.6 ± 0.4	4.2 ± 0.8	3.0 ± 1.1
Gaspermeabilität [10 ⁻¹⁵ m ²]	15 ± 7.5	21 ± 1.7	550 ± 52
Wasserpermeabilität [10 ⁻¹⁵ m ²]	1.1 ± 0.2	1.9 ± 0.6	56 ± 43