

**Design von Baustoffen  
am Beispiel eines Putzes  
und eines Betons  
mit Glaszuschlag**

**DISSERTATION**

Zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Naturwissenschaften

vorgelegt von

**Dipl.-Mineralogin Ewa Warianka**

aus Rummelsburg

eingereicht beim Fachbereich 8  
der Universität-Gesamthochschule Siegen

Siegen 2000

---

Die vorliegende Arbeit entstand im Institut für Bau- und Werkstoffchemie der Universität-GH Siegen unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. D. Knöfel.

Für die Vergabe des interessanten Themas und fachliche Betreuung während meiner Promotion möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Knöfel sehr herzlich bedanken.

Herrn Prof. Dr. J. Stark und Herrn Prof. Dr. H. D. Lutz danke ich für Ihre Mitwirkung in der Prüfungskommission.

Für Ihre Mithilfe beim Praktischen Teil der Arbeit danke ich Frau F. Dooster, Frau I. Hommel, Herrn Müller und Herrn Hamid Hosein Mardi. Herrn S. Henkel danke ich besonders für den Bau der Nebelkammer.

Allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe, insbesondere Frau P. Arens, Frau B. Blachnik, Frau Dörr, Herrn Dr. F. Winnefeld, Herrn D. Stephan, Herrn R. Mallmann und Herrn Dr. K. G. Böttger, die im Laufe der Zeit auch meine Freunde geworden sind, danke ich sowohl für die fachliche Unterstützung und anregende Diskussionen, wie auch für die mir entgegengebrachte Freundschaft.

Bei Frau L. Donner möchte ich mich für die freundliche Hilfestellung in allen Lebenslagen bedanken.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern, meinem Bruder Tadeusz und seiner Frau, die mir während meiner Arbeit hilfreich zu Seite standen.

Für die Finanzierung der Arbeit danke ich der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück.

---

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung .....	6
2.	Literaturübersicht .....	8
2.1	Putze zur Sanierung historischer Bauwerke .....	8
2.2	Glasverwendung in Baustoffen.....	13
2.3	Alkali-Kieselsäure-Reaktion.....	14
3	Untersuchungsmethoden.....	21
3.1	Frischmörteluntersuchungen.....	21
3.1.1	Konsistenz.....	21
3.1.2	Wasserrückhaltevermögen.....	21
3.1.3	Frischmörtelrohddichte und Luftporengehalt.....	21
3.2	Festmörteluntersuchungen.....	21
3.2.1	Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit.....	21
3.2.2	Dynamischer Elastizitätsmodul.....	22
3.2.3	Wasseraufnahmekoeffizient.....	22
3.2.4	Frost-Tauwechsel-Widerstand.....	22
3.2.5	Längenänderung an erhärteten Prismen.....	22
3.2.6	Feuchtedehnung.....	23
3.2.7	Wasserdampf-Diffusion.....	23
3.2.8	Ausblühverhalten.....	23
3.3	Quecksilberdruckporosimetrie .....	23
3.4	Lasergranulometrie .....	24
3.5	Reindichte.....	24
3.6	Mikroskopie.....	24
3.6.1	Lichtmikroskopie .....	24
3.6.1.1	Fluoreszenzmikroskopie .....	24
3.6.1.2	Durchlichtmikroskopie.....	25
3.6.2	Rasterelektronenmikroskopie .....	25
3.7	Untersuchung historischer Proben.....	25
3.7.1	Bestimmung des Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisses.....	26
3.7.2	Bestimmung der Sieblinie .....	26

---

3.7.3	Röntgendiffraktometrie .....	27
3.7.4	Ionenchromatographie und Atomabsorptionsspektroskopie .....	27
4	Putz für die Parochialkirche .....	28
4.1	Geschichte der Parochialkirche .....	28
4.2	Untersuchung historischer Putze .....	31
4.2	Untersuchung des Untergrundes.....	34
4.3	Anforderungsprofil.....	36
4.4	Materialien und Ausgangsstoffe .....	37
4.4.1	Bindemittel.....	37
4.4.2	Zuschlag.....	38
4.4.3	Zusatzmittel.....	38
4.5	Putzrezepturen.....	40
4.6	Herstellung und Lagerung der Prüfkörper.....	41
4.7	Ergebnisse.....	42
4.8	Applikation.....	46
4.9	Zusammenfassung zu Kapitel 4.....	51
5	Glas im Beton.....	53
5.1	Materialien und Ausgangsstoffe .....	54
5.1.1	Bindemittel.....	54
5.1.2	Zuschlag.....	54
5.1.3	Zusatzmittel und Zusatzstoffe .....	55
5.2	Rezepturen.....	57
5.3	Herstellung der Prüfkörper .....	58
5.4	Lagerung der Prüfkörper .....	58
5.5	Ergebnisse.....	59
5.5.1	Makroskopischen Beobachtungen.....	59
5.5.2	Mikroskopie.....	60
5.5.2.1	Auflichtmikroskopie .....	61
5.5.2.2	Durchlichtmikroskopie.....	63
5.5.2.3	Rasterelektronenmikroskopie.....	68
5.5.3	Technologische Kennwerte.....	75
5.5.3.1	Luftporengehalte im Frischmörtel.....	75

---

5.5.3.2 Längenänderung.....	76
5.5.3.3 Festigkeiten und E Modul.....	81
5.5.3.4 Frost-Tauwechsel-Widerstand.....	86
5.5.3.5 Porosität.....	90
5.6 Zusammenfassung zu Kapitel 5.....	93
6 Zusammenfassung.....	95
7 Literatur .....	104
8 Anhang .....	110

## 1 Einleitung und Problemstellung

Die folgende Arbeit gliedert sich in zwei Teile. Die beide Teile beschäftigen sich mit verschiedenen Baustoffsystemen, werden andererseits durch das Thema der gezielten Entwicklung eines Baustoffes für eine bestimmte Anforderung verbunden.

Im Rahmen des ersten Teils wurde ein geeigneter Fassadenputz auf der Basis eines hydraulischen Kalkes zur Sanierung von Ziegelmauerwerk entwickelt. Dieser Putz sollte neben den denkmalpflegerischen auch speziellen Anforderungen entsprechen, die im Zusammenhang mit dem Gebäude stehen. Dazu gehörte unter anderem die geforderte Dicke des Putzes, die maximal 1 cm betragen sollte, um den Unregelmäßigkeiten des Mauerwerks zu folgen und damit den lebhaften architektonischen Charakter der Wände zu erhalten.

Trotz der geringen Dicke sollte der Putz einen ausreichenden Schutz gegen die derzeitigen Umwelteinflüsse bieten.



Abbildung 1: Parochialkirche Berlin (Ansicht von der Klosterstraße)

Bei dem Mauerwerk handelt es sich um das Kirchenschiff der frühbarocken Parochialkirche (Abb. 1) in Berlin. Dort treten großflächig Schäden an den historischen Putzmörteln auf. Am Bauwerk wurden Putzreste mit einer Dicke von 1 cm gefunden, die Anteile an hydraulischem Kalk enthielten (ULLRICH 1994).

Um ein genaues Anforderungsprofil für den zu entwickelten Putz zu erstellen, ist eine Untersuchung der alten, am Gebäude noch vorhandenen Putze, sowie des Untergrundes notwendig. Aus diesem Grunde wurden an der Parochialkirche bei zwei Ortsterminen Putz- und Ziegelproben genommen.

Aufgrund der Befunde und der denkmalpflegerischen Aspekte der Putzentwicklung wurden für die Restaurierputze zwei Bindemittelsysteme, zum einen hydraulischer Kalk mit Hochofenzement, zum anderen Weißkalkhydrat mit Hochofenzement untersucht.

Zusätzlich wurden Hydrophobierer, Kunststoffdispersion und Methylcellulose eingesetzt, um die Dauerhaftigkeit und Resistenz gegen Umwelteinflüsse zu erreichen, aber auch um die Verarbeitbarkeit zu verbessern. Der systematische Einsatz der verschiedenen Zusätze erlaubt Aussagen über deren Einfluß auf die Mörteleneigenschaften.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde zur optischen Gestaltung von Sichtbeton farbiger Glasbruch als Betonzuschlag eingesetzt. Da eine Reaktion zwischen Glas und Zementstein im Beton bekannt ist, war es erforderlich, die Eignung dieses Zuschlags, seinen Einfluß auf die Betoneigenschaften sowie mögliche Schädigungen der Betonteile zu untersuchen.

Alkaliempfindliche Zuschläge wie Opal, Flint oder Glas, die reaktives, amorphes  $\text{SiO}_2$ , enthalten reagieren mit den in der stark basischen Porenlösung des Betons gelösten Alkalien aus dem Zement. Bei dieser Reaktion entsteht voluminöses Alkalisilicatgel, welches zu schädlichen Treiberscheinungen führen kann. Weiterhin kann ein Haftungsverlust zwischen Zementmatrix und Glaskörnern aufgrund der Glasanätzung auftreten.

In dieser Arbeit wurde der Einfluß von Zusatzmitteln wie Hydrophobierer, Fließmittel, Kunststoffdispersion, Glasmehl, Mikrosilica und Luftporenbildner auf Ausmaß und Art der entstehenden Schädigung unter verschiedenen Umweltbedingungen untersucht. Mit der Verwendung von drei unterschiedlichen Glasarten und verschiedener Glasgehalte wurde der Einfluß der im Glas befindlichen Alkalien auf die Reaktion beobachtet werden.

Bei der Herstellung der Proben wurde Normsand nach DIN EN 196-1 als Zuschlag verwendet. Die Korngrößen des Normsandes sind keine betontypischen Korngrößen, doch die verwendeten Zusätze sind typisch für die Betonherstellung. Aus diesem Grund können die Ergebnisse der Untersuchungen auf Beton übertragen werden.

---

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Putze zur Sanierung historischer Bauwerke

Im Bereich der Denkmalsanierung sind häufig neue Putzflächen auf heute nicht mehr üblichen Untergründen herzustellen. Bei der Parochialkirche handelt es sich z.B. um Ziegel unterschiedlicher Qualität, die nebeneinander vorzufinden sind (s. Kapitel 4.2).

Nach BALKOWSKI 1992 herrscht häufig unter Fachleuten eine falsche Verherrlichung alter Handwerksqualitäten. Die Handwerker waren damals informierter über ein kleines Arbeitsgebiet und hatten Zeit auch komplizierte Arbeiten mit entsprechender Sorgfalt auszuführen. Dagegen waren die Materialien von ausgesprochen „unzureichender“ Qualität. Es ist daher seiner Meinung nach, nicht möglich mit heutigen Materialien und mit der heute üblichen Arbeitsweise die alten Putzeigenschaften wieder herstellen zu wollen.

Die Kenntnisse der Bindemittel - die in gemahlenem oder gestoßenem Zustand, mit Wasser zu plastischen Massen angemischt, für sich alleine oder mit unterschiedlich gekörnten mineralischen Zuschlagstoffen, zu steinartigen hochfesten Materialien erhärten – reichen bis in die ägyptische Hochkultur ca. 8000 v. Chr. zurück (MEYER 1994).

Bei den Bindemitteln haben sich in Laufe der Jahrhunderte die Herstellungsverfahren geändert, die Reaktionen, die zur Erstarrung und Erhärtung führen, blieben gleich.

Hierbei handelt sich um folgende Erhärtungsreaktionen:

- karbonatisch:



- hydraulisch (exemplarisch):



Nach HILBERT 1975 haben die einzelnen Bindemittel ihre Vor- und Nachteile. Die karbonatisch gebundenen Bindemittel besitzen niedrige Festigkeiten und viele Kapillarporen, die einen Transport vom Wasser und Salzen erlauben. Sie werden häufig als historische Bindemittel angesehen. Diese Bindemittel können nicht auf ständig feuchtem Untergrund verwendet werden. Sie sind weiterhin nicht resistent gegen Schäden durch Salzkristallisation in den Poren und können demzufolge auch nicht auf Salz belastetem Untergrund angewendet

werden. Die durch Salz verstopften Poren verursachen Feuchtestau und führen zur erheblichen Schäden. Die hydraulisch gebundenen Baustoffe sind resistenter gegen Salzsprengung und dadurch dauerhafter auf belastetem Untergrund. Sie behalten längere Zeit ihre ausblühungsfreie Oberflächen trotz der Salzaufnahme. Absolut gesehen besitzt diese Baustoffart nur eine kleine Aufnahmekapazität für Salze und einen niedrigen „effektiven“ Feuchtetransport.

Neben den reinen Bindemitteln sind, beginnend mit der Antike, bis in die heutige Zeit immer wieder Zusätze bzw. Additive zu Mörtelmischungen und Putzen vorgeschlagen und entwickelt worden, um in erster Linie Eigenschaftsmängel auszugleichen bzw. Eigenschaftsprofile zu erweitern und zu verbessern. MEYER 1994 stellt die Zeitmäßigkeit der historischen Putz- und Mörtelzusätze in Frage. Die historischen Zusätze wie Blut, Tierexkremate, Heringslake oder Tierhaare stellen Handwerker vor diverse Probleme. Einerseits handelt es sich hierbei um Probleme im Bereich der Qualitätssicherung sowie der Dauerhaftigkeit und des Schadstoffeintrages durch verschiedene, chemisch nicht genau definierte Zusätze. Darüber hinaus bestehen für die historischen Additive weder eine Normierung noch irgendwelche Spezifikationen, so daß ein gleichbleibender Qualitätsstandard, nicht garantiert werden kann. Aus diesen Gründen sind seiner Meinung nach, die zur Verfügung stehenden, „historischen“ meist direkt aus der Natur entnommenen Zusatzmittel, abgesehen von wenigen Ausnahmen, verglichen mit den heutigen, auf einem hohen technischen Niveau stehenden Putz- und Mörteladditiven weitgehend als überholt zu bewerten.

Heutzutage entsprechen gute Werk trockenmörtel in ihren physikalischen Eigenschaften den historischen Vorbildern, sind aber an die technischen Anforderungen unserer Zeit angepaßt (KROLKLIWICZ 1991). Die Putzmörtel müssen je nach Putzart und Putzanwendung die in DIN 18550 gestellten Anforderungen erfüllen. Sie werden entsprechend dieser Norm in fünf Mörtelgruppen eingeteilt. Als Bindemittel kommen Gips, Kalk, Zement oder eine Kalk-Zement Mischung in Frage. Als Zuschlag können Quarz-, Kalkstein- oder Marmorsand verwendet werden.

Für die Restaurierung historischer Gebäude werden Mörtelsysteme gefordert, die niedrige Festigkeiten, hohe Verformbarkeit und eine hohe Durchlässigkeit gegenüber Wasserdampf aufweisen. Dies kann in der Regel alleine mit hochhydraulischen, zementgebundenen Bindemitteln nicht erreicht werden. Kalkgebundene Mörtel zeigen hingegen vergleichsweise

hohe Schwindwerte und eine geringe Widerstandsfähigkeit gegenüber äußeren Einflüssen. Eine Kombination der beiden Bindemittel bietet ein breites Spektrum an Einflußnahmen auf Mörtleigenschaften.

Die Zusammensetzung und Eigenschaften der heutigen Bindemittelgruppen werden in den Normen DIN 1060, DIN 1164 und DIN EN 196 beschrieben.

In kalkgebundenen Mörteln können die Festigkeiten durch die Wahl der Zusammensetzung in einem breiten Bereich variiert werden. Durch den geeigneten Anteil an hydraulischen, latent-hydraulischen oder puzzolanischen Zusatzstoffen oder durch Zusatzmittel können die technologischen Eigenschaften gezielt eingestellt werden. Auf der Basis langjähriger Untersuchungen im Institut für Bau- und Werkstoffchemie der Universität GH-Siegen wurden bei der Entwicklung des Putzes für die Parochialkirche Mischungen aus hydraulischem Kalk oder Weißkalkhydrat mit Hochofenzement eingesetzt. Durch die relativ niedrigen Zementgehalte werden die Festigkeiten und E-Moduli, sowie die Widerstandsfähigkeit erhöht, während die Verträglichkeit der Putze mit dem historischen Untergrund nicht beeinträchtigt wird.

Eine weitere Optimierung der Baustoffe kann mit der Hilfe von Zusatzmitteln vorgenommen werden. Die Eigenschaften der Mörtel, wie z. B. Hydrophobie, Wasserrückhaltevermögen, Verarbeitbarkeit, Haftung usw., können durch die unterschiedlichsten Additive mehr oder weniger selektiv beeinflusst werden. Da sich die Zusatzmittel auch untereinander beeinflussen, können Effekte auftreten, die nicht im Bereich der gewünschten Modifizierung liegen.

Die Wirkungsweise der eingesetzten Zusatzmittel wird in den Kapiteln 4.4.3 und 5.1.3 beschrieben.

Ein weitere Möglichkeit bei der Sanierung ist der Einsatz industriell hergestellter Sanierputze. Sie sind speziell für Anwendung auf feuchten und salzbelasteten Mauerwerk entwickelt worden. Die Grundzusammensetzung und Funktionsweise der Sanierputze wurden von GRÜN 1989, KOLLMANN /1981, 1992/, HILBERT 1992, beschrieben.

Als die ersten Sanierputze auf den Markt kamen, gab es 2 oder 3 Hersteller. Inzwischen bieten etwa 30 Hersteller Sanierputze an. Daher wurde von der WTA (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V.) ein Merkblatt mit dem Titel: „Die bauphysikalischen und technischen Anforderungen an Sanierputze“ (1985) ausgearbeitet und herausgegeben.

---

Nach diesem Merkblatt muß Sanierputz folgende drei Haupteigenschaften aufweisen:

- geringe kapillare Leitfähigkeit
- gute Wasserdampfdurchlässigkeit
- hohes Porenvolumen.

Die salzhaltige Lösung aus dem Untergrund wird also nur wenige Millimeter vom Sanierputz kapillar angesaugt. Der Wasseranteil der Lösung verdunstet innerhalb des Putzes und die Salze kristallisieren in den Poren aus. Der entstehende Wasserdampf kann leicht nach außen wandern, transportiert dabei aber keine Salze mehr.

Da Sanierputze auf die speziellen Eigenschaften von Altbaumauerwerk abgestimmt sind, besitzen sie u. a. niedrige Festigkeiten. Sie lassen sich in der Regel sowohl von der Hand als auch mit einer geeigneten Putzmaschine verarbeiten. Sie sind hydrophob eingestellt und enthalten in der Regel Luftporenbildner. Im neuen Merkblatt des WTA (1991) werden Aussagen über die stoffliche Zusammensetzung von Sanierputzen gemacht, die in der ersten Ausgabe nicht vorhanden waren. Das Bindemittel muß relativ rasch hydraulisch abbinden und der Zuschlag dicht und salzresistent sein.

Um eine erfolgreiche Applikation zu erreichen, muß eine gründliche Vorbereitung des Untergrundes gewährleistet werden. Am wichtigsten ist die Entfernung alter Putzreste und lockerer Bestandteile des Mauerwerks. Die Fugen müssen mindestens 2 cm tief ausgeräumt und nicht tragfähige Steine ausgewechselt oder bis auf die tragfähige Schicht abgetragen werden. Um die zum Abbinden und Aushärten der Baustoffe notwendige Wassermenge zu sichern, vor allem bei stark saugenden Untergründen, wie historisches Ziegelmaterial, muß das Mauerwerk vorgeätzt werden (BALKOWSKI 1992).

Weitere Beschaffenheiten des Untergrundes und ihr Einfluß auf die Eigenschaften und Dauerhaftigkeit eines Putzes werden von GEYMAYER 1979 beschrieben. Auf die notwendige Sauberkeit des Untergrundes wurde bereits hingewiesen. Darüber hinaus ist bei angestrebter Gleichmäßigkeit der Putzstärke auf die Ebenheit des Untergrundes zu achten. Beim Auftreten von Ausblühungen sollte auf jeden Fall ihr Ursprung und der Transportweg der Salze bestimmt werden. Hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit muß bei dem Putz genau darauf geachtet werden, ob er für rauhe oder glatte Oberflächen konzipiert wurde oder ob er gegebenenfalls eine Haftbrücke bzw. Putzträger benötigt. Die Kenntnis über die Porenstruktur und somit die Wasseraufnahmefähigkeit des Untergrundes ist einerseits für

---

Einstellung der Frischmörteleigenschaften, andererseits für die Porosität der Putze von größter Wichtigkeit. Ein saugender Putzgrund wird dem frischen Mörtel Wasser entziehen, d. h. Konsistenz und Wasserrückhaltevermögen des Mörtels sowie die Vorbehandlung des Untergrundes müssen dem Saugverhalten angepaßt werden. Liegt ein stark saugender Putzgrund unter einem grobkapillaren Putz, so wird eindringendes Wasser angesaugt und gehalten und damit eine Austrocknung behindert. Weiterhin können starke Unterschiede im Diffusionsverhalten von Putzgrund und Putz zu Kondenswasserbildung und zu Schäden führen, besonders wenn ein dichter Putz auf einem diffusionsfreudigen Untergrund aufgebracht wird. Mit der alten Grundregel, daß die Festigkeiten der einzelnen Schichten von innen nach außen abnehmen sollte, werden die besten Voraussetzungen für dauerhafte und problemfreie Putze geschaffen. Das unterschiedliche Verformungsbestreben von Putz und Untergrund wird Spannungen und Schäden im Putz verursachen. Nicht selten sind auf einer Wandfläche auch ganz verschiedenartige Putzgründe anzutreffen. In solchen Fällen sollte ein Spritzbewurf zur Verbesserung der Haftung verwendet werden.

BALKOWSKI 1992 beschreibt neben der Untergrundvorbereitung auch die bei der Applikation auftretende Rißbildung und ihre Ursachen. Wie schon erwähnt, brauchen alle hydraulisch abbindenden Putze eine ausreichende Feuchte für die chemische Reaktion. Feuchtigkeitsabwanderung in den Untergrund oder zu schnelle Austrocknung der Oberfläche führt zur Unterbrechung des Abbindevorganges und damit zur Schädigung der Putzschicht. Die Folge ist eine Schwindrißbildung. Ungleichmäßig dicke Putzschichten ergeben ungleichmäßiges Schwinden mit anschließenden Schäden wie Ablösungen und/oder Rissen an den Übergangsstellen. Eine sehr wichtige Rolle, vor allem bei hydraulisch abbindenden Mörtelschichten, spielt die Nachbehandlung der Frischmörtel. Fehlt sie, so trocknen vor allem dickere Putzschichten an der Oberfläche schnell ab. Die Hydratation verläuft ungleichmäßig, was zu Schwindrissen führen kann. Außerdem muß der Verputzer davon ausgehen, daß die heute verendeten Fertigputze keine „Wundermittel“ sind, und daß er sich wieder darauf besinnen muß, besondere Maßnahmen zu beachten, um alte Untergründe schadensfrei zu verputzen.

## 2.2 Glasverwendung in Baustoffen

Glasbruch als Zuschlag im Beton und seine Reaktion mit dem Zementstein wurden nur von wenigen Autoren beschrieben. Da die Probleme mit Zuschlägen aus mikrokristallinem bzw. amorphen  $\text{SiO}_2$ , wie Flint oder Opal bekannt sind und die „Verwandtschaft“ zur Glas ebenfalls, wurde Glas als Zuschlag bislang kaum eingesetzt. Einzelnen Versuche, wie der von PICKEL 1992 beschriebene, schlugen fehl. In der jüngsten Zeit wurden z. B. in Amerika aus Recycling Gründen die Verwendung von Glas in Baustoffen angestrebt (MEYER 1997). In Deutschland wird die Anwendung von Glas als Zuschlag in Baustoffen meistens aus ästhetischen Gründen, auf der Suche nach neuen gestalterischen Möglichkeiten, angestrebt. Des weiteren ist das farbige Glas billiger und einfacher zu beschaffen als farbige Gesteine, die z.B. zur Farbgebung von Fassadenplatten verwendet werden.

Die bei der Verwendung von Glas im Beton auftretenden Probleme wurden von PICKEL 1992 beschrieben. Es handelt sich um

- Verlust der Haftung zwischen Glaskörnern und der Zementmatrix aufgrund der Anätzung des Glases
- Treiberscheinungen, die den Beton zerstören.

Beschrieben werden die Schäden in einem Bodenbelag aus Betonwerkstein, bei dem im Vorsatzbeton bunter Glasbruch bis 20 mm eingestreut wurde. Die Oberfläche der Betonsteine wurde grob geschliffen, und bei der Reinigung wurde reichlich Wasser verwendet. Nach relativ kurzer Zeit entstanden Abplatzungen größeren Ausmaßes. An den Bruchstellen zeigte sich an den Glasflächen ein weißer bis transparenter Belag. Nach einer mikroskopischen Untersuchung wurde klar, daß die Glasteilchen von der stark alkalischen Lösung aus dem Zementstein angeätzt wurde. Durch Neubildungen entstanden Spannungen, und es kam zu Rissen und Abplatzungen. Durch die mechanischen Einflüsse, denen ein Bodenbelag ausgesetzt wird, werden diese Effekte noch verstärkt. Der Autor schlägt vor, das Glas mit einem beständigen Schutzfilm zu umgeben, wenn es in Verbindung mit Beton verwendet werden soll, um die Farbigkeit des Glases zu nutzen.

FIGG 1992 beschreibt ein weiteres Beispiel für die Glasverwendung. In den Jahren 1967-68 wurde in London ein kleines Industriegebäude errichtet. Die Fassadenelemente wurden aus weißem Portlandzement und blaßrosafarbenem Kunstglaszuschlag hergestellt. Kunstgläser können günstig durch einfache Herstellungsprozesse hergestellt werden. Sie können hohe

chemische Stabilität besitzen. Eine durch geeignete Prozesse geschaffene Waben- bzw. Zellenstruktur verleiht den Kunstgläsern die Eigenschaft einer guten Wärmedämmung. An der Oberfläche der Fassadenplatten wurde ein Oberflächenverzögerer verwendet, so daß nach der weiteren Behandlung, die Grobzuschläge an der Oberfläche sichtbar waren (Waschbeton). Doch das Ergebnis war nicht ganz zufriedenstellend und es kam noch eine Sandstrahlbehandlung zum Einsatz. Nach zehn Jahren fiel ein Stück Beton von der Fasadplatte ab und man stellte Ribbildung und Deformationen fest. Die Risse waren regellos angeordnet und ihre Menge stieg mit der Höhe des Gebäudes an. Dort sahen sie landkartenartig aus. Im Inneren und um viele Risse waren weiße Flecken zu beobachten. Eine mikroskopische Untersuchung zeigte in den Zuschlagpartikeln zahlreiche Risse, die manchmal das ganze Korn durchquerend sich in der Matrix fortsetzten. In vielen Fällen waren die Risse und Hohlräume mit isotropem Gel oder mit mikrokristallinem doppelbrechenden Material gefüllt. Aufgrund dieser Erscheinungen wurde der Schaden als typische Alkali-Zuschlagreaktion eingestuft. Ungewöhnlich an diesem Fall ist die Tatsache, daß der weiße Zement in Großbritannien ein NA-Zement und damit bezüglich der Alkali-Kieselsäure-Reaktion als unbedenklich eingestuft war.

### **2.3 Alkali-Kieselsäure-Reaktion**

Etwa 1940 wurden in den USA als Ursache für Betonschäden erstmals Reaktionen zwischen den Alkalien des Zements und bestimmten Zuschlägen festgestellt. Anfang der 50er Jahre wurde diese Reaktion in Australien bekannt. Ende der 50er Jahre wurde in Dänemark als Ursache von Betonschäden eine Alkali-Zuschlagreaktion festgestellt. Danach wurden aus immer mehr Ländern Schäden infolge Alkalireaktion bekannt. Bis etwa 1965 war man in Deutschland der Ansicht, daß es hier eine Alkalireaktion nicht gibt. Als erstes Beispiel gilt die 1965/66 in Lübeck erbaute Lachwehrbrücke, die bereits im Frühjahr 1968 wegen Gefährdung der Standsicherheit aufgrund der Schäden durch Alkalireaktion abgerissen werden mußte (DAHMS 1994).

Unter Alkali-Zuschlagreaktion versteht man alle Reaktionen, die zwischen alkaliempfindlichen Bestandteilen des Zuschlags und der alkalihaltigen Porenlösung unter Bildung von quellenden Alkalisilikaten ablaufen.

Je nach Art des angegriffenen Zuschlags wird zwischen Alkali-Kieselsäure-, Alkali-Silikat- und Alkali-Dolomit-Reaktion unterschieden.

Die Alkalien befinden sich meistens im Zement und können auch durch Zusatzstoffe und Zusatzmittel in den Mörtel gelangen oder nachträglich z. B. mit Tausalzlösung und Meerwasser in den Mörtel eindringen. Art und Umfang der Reaktion und die mögliche Schädigung des Mörtels hängen hauptsächlich von der Konzentration der Alkalihydroxidlösung und von der löslichen Kieselsäuremenge ab. Während die Löslichkeit von kristallinem  $\text{SiO}_2$  mit steigendem pH-Wert etwa linear zunimmt, steigt sie bei amorphem  $\text{SiO}_2$  im Bereich der pH-Werte von 10 bis 14 exponentiell an (Abb. 2).

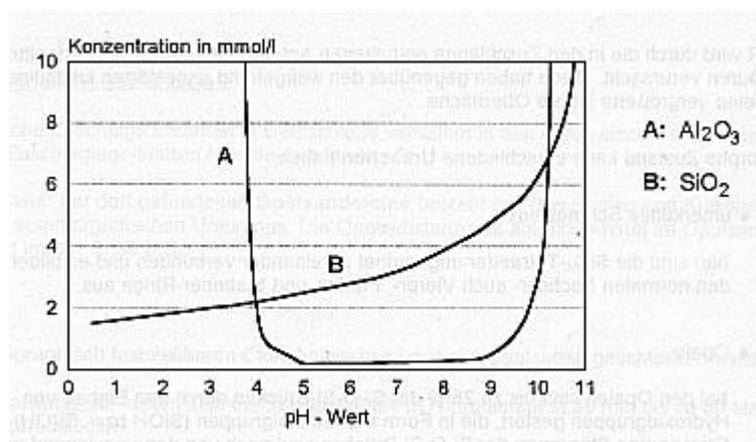
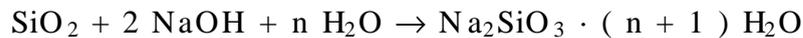


Abbildung 2: Löslichkeit von amorphem  $\text{SiO}_2$  in Abhängigkeit vom pH-Wert der Lösung (STARK 1995).

Ebenso können auch die Dichtigkeit, die Festigkeit, das Formänderungsvermögen des Mörtels bzw. Betons und dessen Abmessung und Form auf die Reaktion Auswirkungen haben. Die Durchlässigkeit des Betons bedingt den Transport der Alkalien zu den reaktiven Zuschlägen. Weiterhin werden die Alkalireaktionen auch durch die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Die Reaktion läuft nur in Gegenwart von Feuchtigkeit ab. Bei Temperaturen um  $20^\circ\text{C}$  erweist sich eine Luftfeuchtigkeit von 85-90 % und bei Temperaturen um  $40^\circ\text{C}$  von mindestens 90 % als pessimal hinsichtlich der Schädigung. Menge und Korngröße des Zuschlags spielen auch eine sehr wichtige Rolle. Als besonders ungünstig für den Beton hat sich erwiesen, wenn der Anteil des Zuschlags mit alkaliempfindlicher Kieselsäure in der Kornfraktion 2/8 mm ca. 10 bis 20 Gew.-% des Zuschlaggemisches beträgt (WALZ 1973, STARK 1995, SPRUNG 1998).

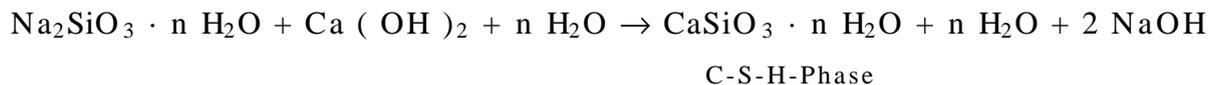
Eine schädliche Alkali-Kieselsäure-Reaktion ist nur möglich, wenn der Beton außer alkaliempfindlichen Bestandteilen eine Alkalihydroxidlösung in größerer Menge und mit hoher Konzentration enthält. Voraussetzung ist daher ein ausreichendes Angebot an Feuchtigkeit und an Natrium- und/oder Kaliumhydroxid. Die deutschen Zementrohstoffe und dementsprechend die Zementklinker enthalten die Oxide des Kaliums und des Natriums im Massenverhältniss von 4:1 bis 10:1 (STARK 1995). Bei Verwendung eines Zementes mit einem niedrigen wirksamen Alkaligehalt - NA - Zement - sind Schäden ausgeschlossen, weil der Alkaligehalt den Schwellenwert nicht übersteigt, vorausgesetzt es erfolgt keine zusätzliche Alkalizufuhr.

Die Treibreaktion zwischen den Alkalien des Zementes und der amorphen Kieselsäure des Zuschlags kann vereinfacht folgendermaßen beschrieben werden:



amorphe oder teilkristalline Kieselsäure + Alkalihydroxid + Wasser → Alkali-Silikat-Gel

Die Reaktion kann z.T. weitergehen :



Amorphe bzw. stark gittergestörte Kieselsäuren zeigen gegenüber ungestörten kristallinen Zustandsformen eine verstärkte Reaktion.

Das Alkali-Silikat-Gel besitzt ein größeres Volumen als die Ausgangsprodukte der Reaktion (Abb. 3). Der bei dieser Reaktion entstehende Druck übersteigt die von Beton aufnehmbare Zugspannung, was zu schädlichen Treiberscheinungen führt. Nach STARK 1995 wurden bei Untersuchungen Quelldrücke bis zu ca. 20 N/mm<sup>2</sup> gemessen. Die Folgen sind netzförmige Risse, Abplatzungen und gelförmige Ausblühungen.

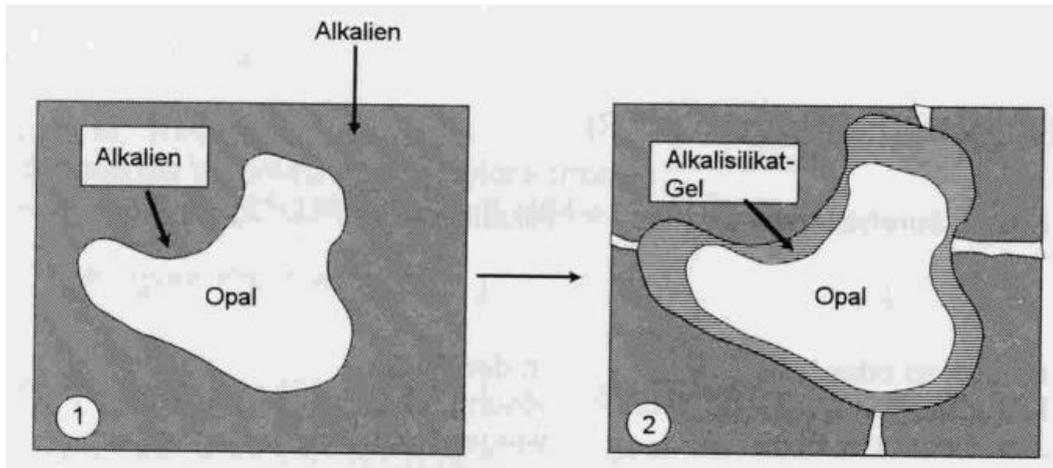


Abbildung 3: Aufbau von Quelldruckspannung durch Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)  
(STARK 1995)

Die Reaktion zwischen der Kieselsäure und der Hydroxidlösung läuft immer ab, aber nur bei einer großen Menge reaktivem  $\text{SiO}_2$  und hohem  $\text{Na}_2\text{O}$  - Äquivalent ist sie betonschädigend. In der Regel werden bei der Umsetzung der reaktiven Kieselsäure mit Alkalisalzen am Ende der Reaktion wieder die Alkalien in Form des Hydroxids freigesetzt, um erneut in tieferen Schichten des bereits angegriffenen Zuschlagkorns weiter zu reagieren.

Eine plötzliche Gefährdung der Standsicherheit von Bauwerken ist nicht zu befürchten. Das Schadensmaximum tritt in der Regel nach  $\frac{1}{2}$  - 1 Jahr ein.

STARK 1995 beschreibt

- a) die Schadensmerkmale, die durch diese Treibreaktion hervorgerufen werden:
  - Ausscheidung von trüben und relativ festwerdenden Geltropfen an der Betonoberfläche
  - weiße, punkt- bis ringförmige Karbonatisierungsprodukte der Ausscheidungen durch das  $\text{CO}_2$  der Luft; sie sind meist nur an den Innenwänden feststellbar
  - oberflächige Auswachsungen und/oder trichterförmige Abplatzungen
  - feine, netzartige Risse
  - treibende Volumenveränderungen;
- b) die Faktoren, die auf die Reaktion Einfluß haben:
  - Umweltbedingungen, insbesondere Temperatur und Luftfeuchtigkeit
  - Menge und Korngröße des Zuschlags

- Durchlässigkeit von Beton
- Alkaligehalt des Zementes
- Zementgehalt des Betons
- Alkalizufuhr von außen
- Puzzolanische Zusätze zum Zement.

Die Vorgehensweise zur Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion wurde in einer Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) zusammengestellt. Diese Richtlinie "Alkalireaktion im Beton; Vorbeugende Maßnahmen gegen schädliche Alkalireaktion im Beton" von 1986 hat heute noch uneingeschränkt Gültigkeit.

Sie gliedert sich in folgende drei Teile:

1. Teil: "Allgemeines, Feuchtigkeitsklassen und Anforderungen"
2. Teil: "Eignungsnachweis und Überwachung des Zuschlags"
3. Teil: "Prüfung des Zuschlags"

Die Richtlinie ist auf die Erfassung und Beurteilung von Zuschlägen aus eng begrenzten Bereichen Norddeutschlands (Abb. 4) und speziell auf dort vorkommenden Opalsandsteine und Flinte abgestimmt.

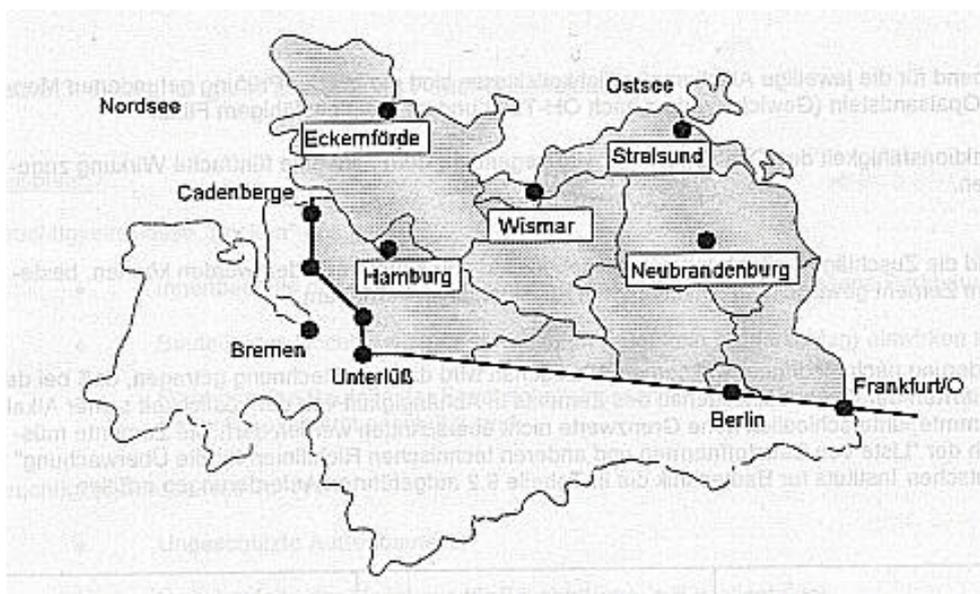


Abbildung 4: Geltungsbereich der Alkalirichtlinien seit 1990 (STARK1995)

Die in der Literatur beschriebenen Alkali-Kieselsäure-Reaktionen beschränken sich auf die alkaliempfindlichen mineralischen Zuschläge wie Opalsandstein, Kieselkreide (verkieSELten Kreidekalk), opalinen Flint (oder Feuerstein) oder bestimmte Grauwacken (mit Gehalten an Kieselschiefer und Glimmermineralen). Nur einige wenige Autoren beschäftigen sich mit Glas als Zuschlag im Baustoffen.

Laut FIGG 1981 reagiert der Glaszuschlag mit der stark alkalischen Porenlösung des Betons. Die Hydroxidionen der Lösung reagieren mit dem „Kieselsäurenetzwerk“ und bewirken eine Auslaugung der Alkalien und ggf. der Borationen. Dadurch entstehen Poren im Kieselsäuregerüst. Die gelösten Alkalien können wiederum das Glas angreifen und Bildung von Alkali-Silikat-Gelen bewirken. Demzufolge wäre die Quellreaktion durch das Glas im Beton verursacht und somit anders als bei den anderen kieselsäurehaltigen Zuschlägen, wo alleine die alkalihaltige Porenlösung die Ursache der Reaktion ist.

TANG MING-SHU 1987 geht davon aus, daß keine der von ihm hergestellten Glasproben alkaliresistent ist und zumindest zu einem gewissen Teil mit der Porenlösung des Zementes reagiert.

Sie gehen von folgenden drei Teilschritten der Alkali-Kieselsäure-Reaktion aus:

1. Reaktion der Kieselsäure zu einem Gel
2. Aufnahme von Wasser
3. Quellen des Gels

SPRUNG 1998 untersuchte neben vielen alkaliempfindlichen Zuschlägen auch das besonders empfindliche Duranglas als Zuschlag im Beton. Dabei stellte er eine Besonderheit der Reaktion des Duranglaszuschlags mit Alkalien fest. Bei Gefügeuntersuchungen konnten keine Reaktionssäume an der Oberfläche der Körner nachgewiesen werden. Die Duranglaszuschläge zeigten nicht das typische Reißbild natürlicher Zuschläge. Die Risse waren immer mit Gel gefüllt und verliefen in vielfältigen Varianten durch den Zuschlag. SPRUNG beschreibt in seinem Artikel den Schadensmechanismus (Abb. 5) der Alkali-Kieselsäure-Reaktion.

	Ausgangszuschlagkorn mit alkaliempfindlicher Kieselsäure
	Oberflächenreaktion mit Alkali- und Calcium-Ionen des Zements zu nicht quellendem Alkalicalciumsilicathydrat → semipermeable Membran
	Diffusion von Alkali-Ionen und Wasser in das Zuschlagkorninnere und Reaktion mit alkaliempfindlicher Kieselsäure zu Alkalikieselgel
	Durch fortschreitende Reaktion und Wasseraufnahme Erhöhung des Innendrucks
	Rißbildung bei Überschreiten der Zugspannung des Zuschlagkorns; geringe Gelbildung
	Auflösung des Zuschlagkorns von innen heraus; starke Gelbildung

Abbildung 5: Schadensmechanismus der Alkali-Kieselsäure-Reaktion nach SPRUNG 1998

Die bei der Hydratation des Zements freiwerdenden Alkalien reichern sich zunächst in der Porenlösung an. Ein Abbau der Konzentration tritt erst bei einer nennenswerten Reaktion mit reaktionsfähiger Kieselsäure ein. Die Reaktion kann zunächst nur an der Oberfläche reaktionsfähiger Bestandteile stattfinden. Als Reaktionsprodukt bildet sich ein quellfähiges Alkalikieselgel. Das Gel ist jedoch in Gegenwart von Calcium-Ionen nicht stabil und wird zu einem nicht quellenden Alkalicalciumsilicathydrat umgewandelt. Durch Anreicherung an den Oberflächen eines Zuschlagkorns kann nach VIVAN 1950 eine semipermeable Membran oder Schicht entstehen, die bevorzugt nur Alkali-Ionen und Wasser durchläßt. Durch diese Reaktionszone aus Alkalicalciumsilicathydrat diffundieren keine Calcium-Ionen in das Innere des Zuschlags. Treffen die durchgelassenen Alkalien im Zuschlagkorn auf reaktionsfähige Kieselsäure entsteht quellfähiges Alkalikieselgel. Eine fortschreitende Reaktion und gleichzeitige Wasseraufnahme erhöhen stetig den Innendruck im Zuschlagkorn und führt schließlich zur Rißbildung.

---

## **3 Untersuchungsmethoden**

### **3.1 Frischmörteluntersuchungen**

#### **3.1.1 Konsistenz**

Die Konsistenz eines Frischmörtels ist ein Maß für seine Verformbarkeit unter bestimmten Beanspruchungen. Sie wurde mit dem Ausbreitmaß nach DIN 18 555 Teil 2 bestimmt. Die Menge des für eine bestimmte Konsistenz benötigten Wassers ergibt den Wasser/Bindemittel-Wert (W/B-Wert).

#### **3.1.2 Wasserrückhaltevermögen**

Das Wasserrückhaltevermögen wurde nach DIN 18 555 Teil 7 mit dem Filterplattenverfahren bestimmt. Nach der Norm ist das Wasserrückhaltevermögen der in Prozent ausgedrückte Wasseranteil, der nach dem kapillaren Wasserentzug durch eine saugfähige Unterlage nach 5 min im Mörtel verbleibt.

#### **3.1.3 Frischmörtelrohddichte und Luftporengehalt**

Die Rohddichte und der Luftporengehalt des Frischmörtels wurden mit dem Druckausgleichsverfahren nach DIN 18555 Teil 2 bestimmt.

### **3.2 Festmörteluntersuchungen**

#### **3.2.1 Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit**

Die Ermittlung der Druck- und Biegezugfestigkeit von Putzen dient u. a. zur Beurteilung der Anpassung an die Untergrundeigenschaften, bei Beton dient sie der Einordnung in Betonfestigkeitsklassen. Die Messung der Biegezugfestigkeit  $\beta_{Bz}$  erfolgte nach DIN 18 555 Teil 3 an Prismen der Größe 4 x 4 x 16 cm bzw. 2 x 4 x 16 cm. Die Druckfestigkeit  $\beta_D$  wurde

---

nach DIN 18 555 Teil 3 an Prismenhälften gemessen. Beide Prüfungen wurden mit einer hydraulischen Presse der Fa. RK Toni Technik, Typ Toni Comp III durchgeführt.

### **3.2.2 Dynamischer Elastizitätsmodul**

Der dynamische Elastizitätsmodul  $E_{\text{dyn}}$ , der die Verformungsbereitschaft eines Werkstoffs beschreibt, wurde nach dem Resonanzverfahren nach KOTTAS 1964 bestimmt. Die Untersuchung erfolgte mit einem Meßgerät der Fa. Labeck, Typ DIGI EG-2.

### **3.2.3 Wasseraufnahmekoeffizient**

Der Wasseraufnahmekoeffizient als Kennzeichen der Kapillareigenschaften eines Baustoffes wurde in Anlehnung an DIN 52 617 bestimmt.

### **3.2.4 Frost-Tauwechsel-Widerstand**

Die Untersuchung des Frost-Tauwechsel-Widerstandes wurde nach dem Verfahren von KNÖFEL 1993, Methode A7M durchgeführt. Die Bewertung erfolgte über die Beurteilung der Ribbildung nach 50 Frost ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) – Tau ( $+20^{\circ}\text{C}$ ) – Wechsel Zyklen. Zusätzlich wurde die Druckfestigkeit der geprüften Prismenhälften bestimmt.

### **3.2.5 Längenänderung an erhärteten Prismen**

Die Bestimmung der Längenänderung der Mörtel wurde nach der Methode A6M von KNÖFEL 1993 durchgeführt. Die Prismen wurden auf zwei gegenüberliegenden Seiten mit Meßzapfen im Abstand von 10 cm beklebt und die Längenänderung im Laufe der Zeit mit einem BAM-Setz-Dehnungsmesser der Fa. Staeger, Berlin bestimmt.

### **3.2.6 Feuchtedehnung**

Das hygrische Quellen und Schwinden, also die Längenänderung eines Prüfkörpers infolge Feuchteänderung, dient der Beurteilung der Verformungs- und Rißigenschaften der Baustoffe. Die Längenänderung wird nach der Methode A6M von KNÖFEL 1993 gemessen.

### **3.2.7 Wasserdampf-Diffusion**

Zur Beurteilung der Wasserdampfdurchlässigkeit wurde die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl ( $\mu$ -Wert) nach DIN 52 615 im Feuchtbereichsverfahren ermittelt.

### **3.2.8 Ausblühverhalten**

Zur Prüfung der Ausblühneigung eines Baustoffs wurde die Methode B6M von KNÖFEL 1993 verwendet.

## **3.3 Quecksilberdruckporosimetrie**

Mittels Quecksilberdruckporosimetrie läßt sich die Porenradienverteilung eines Stoffes ermitteln. Dabei wird Quecksilber in immer höheren Druckstufen in den Zementstein eingepreßt und das eindringende Volumen bestimmt. Nach Berechnung von WASHBURN 1921 entspricht der dabei benötigte Quecksilberdruck unter Annahme zylindrischer Poren bei bekanntem Randwinkel und bekannter Oberflächenspannung des Quecksilbers einem definierten Porenradius. Die Proben wurden auf eine Größe zwischen 2 und 4 mm zerkleinert und bei 40°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Untersuchung wurde mit dem Gerät der Fa. Micromeritics, Typ 9220 durchgeführt.

### **3.4 Lasergranulometrie**

Mit der Lasergranulometrie lassen sich neben der spezifischen Oberfläche einer Substanz auch deren Korngrößenverteilung bestimmen. Das benutzte Lasergranulometer ist von Typ Helos 12KA/LA der Fa. Sympatec.

### **3.5 Reindichte**

Für die Bestimmung der Reindichte wurde ein Heliumpyknometer Typ „Accu pyc“ der Fa. Micromeritics eingesetzt.

### **3.6 Mikroskopie**

Die mikroskopischen Untersuchungen dienen in der Baustoffkunde der Feststellung der mineralogischen Zusammensetzung oder z.B. vorhandener Schäden.

#### **3.6.1 Lichtmikroskopie**

##### **3.6.1.1 Fluoreszenzmikroskopie im Auflicht**

Während die normale Hellfeld-Mikroskopie durch Lichtabsorption die Strukturen der Präparate für das Auge sichtbar macht, arbeitet das Fluoreszenzmikroskop nach einem anderem Prinzip. Wird im Fluoreszenzmikroskop eine nicht fluoreszierende Substanz beobachtet, erscheint das Gesichtsfeld dunkel. Befinden sich im Gesichtsfeld aber fluoreszierende Substanzen, so werden sie durch Bestrahlen mit ultraviolettem, violetter, blauem oder grünem Licht zum Leuchten gebracht.

Die Proben wurden einige Tage im Trockenschrank bei einer Temperatur von 40° C gelagert, und dann in einem fluoreszierenden Harz eingebettet. Der Harz füllte die vorhandenen Poren, Spalten und Risse, und erlaubt somit beim Mikroskopieren auch eine bessere Erkennung der Schäden.

---

Aus den mit Harz präparierten Proben wurden Anschliffe hergestellt und unter dem Mikroskop untersucht.

### **3.6.1.2 Durchlichtmikroskopie**

Die durchlichtmikroskopische Untersuchung der Mörtelproben erfolgte an abgedeckten Dünnschliffen der Dicke 20 µm an einem Durchlichtmikroskop Typ Ortholux (Hersteller: Fa. Leitz). Bei der Präparation der Dünnschliffe wurden die Poren und Hohlräume mit blaugefärbten Harz gefüllt, um sie besser sichtbar zu machen.

### **3.6.2 Rasterelektronenmikroskopie**

Die Rasterelektronenmikroskopie (REM) dient zur Untersuchung der Oberflächen beliebig geformter Proben. Der auf die Probe fallende, fokussierte Elektronenstrahl tastet eine Fläche zeilenweise ab. Die bei der Wechselwirkung zwischen dem Elektronenstrahl und der Probe entstehenden Sekundärelektronen werden detektiert und in ein Bildsignal umgewandelt. Es entsteht ein plastisches Bild. Da die Proben elektrisch leitend sein müssen, werden nicht leitende Proben mit Graphit oder Gold beschichtet.

Die Untersuchung wurde mit einem Rasterelektronenmikroskop Typ XL 30 der Firma Philips durchgeführt.

## **3.7 Untersuchung historischer Proben**

Die Analyse historischer Mörtel liefert u. a. Informationen über die stoffliche Zusammensetzung der Mörtel (z. B. Bindemittelart und -gehalt, Zuschlagart und -sieblinie), mechanische und hygrische Eigenschaften (z. B. Druckfestigkeit, Wasseraufnahme, µ-Wert) oder auch über die Art und den Gehalt an schädlichen Salzen (Röntgenbeugungsanalyse, Ionenbestimmungen mit Atomabsorptionsspektroskopie oder Ionenchromatographie). Diese Daten sind von Bedeutung für die Deutung von Schadensmechanismen, die Konzeptionierung der Sanierungsmaßnahme und für die Nachstellung der Mörtel. Die Ermittlung der Kennwerte der Mörtel und auch der des jeweiligen Mauersteins ist erforderlich für die Auswahl

dauerhafter Reparaturmaterialien. Diese Materialien müssen sowohl chemisch (z. B. ausreichender Sulfatwiderstand) als auch hinsichtlich der mechanischen und hygri-schen Kennwerte an das Altmaterial angepaßt sein.

### 3.7.1 Bestimmung des Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisses

Der naßchemische Mörteltrennungsgang nach Wisser/Knöfel dient der Bestimmung des Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisses und des Anteils an löslichem  $\text{SiO}_2$ . Der durch den Trennungsgang abgetrennte Zuschlag wird zur Bestimmung der Sieblinie verwendet.

Nach Möglichkeit wurde mit mindestens 100 g Probenmaterial gearbeitet, um Probeninhomogenitäten auszuschalten. Die Proben wurden vorher bei 40°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Zuerst wurde der Carbonatgehalt der Probe volumetrisch bestimmt. Dazu wurden etwa 1 g gemörserte Probe mit 10 ml 1:3 verdünnter Salzsäure versetzt, wodurch aus dem vorhandenen Carbonat Kohlendioxid freigesetzt wird. Aus dem Volumen des Kohlendioxids wurde der Gehalt der Probe an Calciumcarbonat berechnet.

Für den Mörteltrennungsgang wurde die bei 40°C getrocknete Probe (1. Trockengewicht) mit der dreifachen Menge verdünnter Salzsäure versetzt, deren Konzentration sich nach dem vorher bestimmten Carbonatgehalt richtete. Nach 24 Stunden wurde die Lösung filtriert, der Rückstand mit Wasser gewaschen und bei 110°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet (2. Trockengewicht). Der Rückstand wurde mit 100 ml konzentrierter Natriumcarbonatlösung aufgeköcht, heiß filtriert, gewaschen und anschließend bei 110°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet (3. Trockengewicht).

Aus den drei Trockengewichten läßt sich das Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis in Gewichtsteilen bezogen auf den erhärteten Festmörtel und der Anteil an löslichem  $\text{SiO}_2$  im Festmörtel berechnen (WISSER 1987).

### 3.7.2 Bestimmung der Sieblinie

Die Bestimmung der Sieblinie ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die Zuschlagkörnung des historischen Mörtels nachgestellt werden soll.

Die Sieblinie des jeweiligen Zuschlags wurde aus dem unlöslichen Rückstand der naßchemischen Analyse bestimmt. Zur Sieblinienbestimmung wurden Siebe mit folgenden Maschenweiten benutzt: 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,09; 0,063 mm.

### 3.7.3 Röntgendiffraktometrie

Die Röntgenbeugungsanalyse dient der Bestimmung der qualitativen Phasenzusammensetzung der Mörtel. Die Untersuchungen wurden mit einem Röntgendiffraktometer D 500 (Hersteller: Siemens AG) mit Cu K $\alpha$ -Röntgenstrahlung durchgeführt. Die Generatorspannung betrug 40 kV, der Röhrenstrom 30 mA. Die Mörtelproben wurden im Winkelbereich von 3° bis 65° 2 $\Theta$  bei einer Winkelgeschwindigkeit von 1,2° 2 $\Theta$  pro Minute untersucht.

### 3.7.4 Ionenchromatographie und Atomabsorptionsspektroskopie

Die Bestimmung der wasserlöslichen Salze liefert ergänzend zur Röntgenbeugungsanalyse Informationen über im Mörtel enthaltene Salze, welche u. U. Schädigungen verursachen können bzw. bereits verursacht haben.

Die Kationen Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> und Ca<sup>2+</sup> wurden mittels Atomabsorptionsspektroskopie, die Anionen Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> mittels Ionenchromatographie quantitativ bestimmt. Von den Proben wurden wäßrige Auszüge hergestellt, indem 1 g feingemörserte (> 63  $\mu$ m) Probe in 100 ml bidestilliertem Wasser 30 Minuten geschüttelt wurde. Die Anionengehalte wurden mit dem Ionenchromatographen der Fa. Dionex, Typ DX, die Kationengehalte mit einem Atomabsorptionsspektroskop der Fa. Perkin Elmer, Typ 1100 B bestimmt.

## 4 Entwicklung eines Putzmörtels für die Parochialkirche

### 4.1 Geschichte der Parochialkirche

Die in den Jahren 1695-1714 erbaute Parochialkirche ist ein Denkmal der barocken Sakralbaukunst. Sie war der erste nachreformatorische Kirchenneubau innerhalb der Berliner Stadtgrenzen.



Abbildung 6: Parochialkirche nach dem Bau des Turms im Jahre 1715 (BERICHT PLANER IN DER PANKEMÜHLE)

Am 15. August 1695 wird der Grundstein für die Kirche in der Klosterstraße gelegt. Der Entwurf für den Bau stammt von Arnold Nering, der kurz danach stirbt. Er prägte das Bild vom damaligen Berlin mit Bauten wie dem Charlottenburger Schloß, dem Marstall und dem Zeughaus, vor allem aber mit der Stadtanlage der Friedrichstadt.

Die Bauleitung wird von Grünberg übernommen. Er nimmt eine Vereinfachung und Verkleinerung des Baus vor. Am 27. September 1698 stürzt das fast fertige Gewölbe ein, was

zu weiteren Änderungen führt. Am 8. Juli 1703 wird die Parochialkirche geweiht, und der erste reformierte Stadtpfarrer vollzieht die Selbsteinführung in das Gemeindeleben. Der Grundriß (Abb. 7) der Kirche mit vier an das Mittelquadrat angesetzten halbrunden Apsiden ist zu der damaligen Zeit einmalig nördlich der Alpen. Das Vorbild für die Grundkonfiguration steht in der umbrischen Stadt Todi. Für das westliche Portal stand „Il Redentore“ in Venedig Pate. Die Kirche ist vollständig unterkellert und bietet in dreißig gewölbten Kammern, die durch kreuzförmig angelegte Gänge verbunden sind, Raum für Beisetzungen. Durch gute Durchlüftung kommt es in den Gewölben nicht zur Verwesung, die Leichen werden „mumifiziert“.

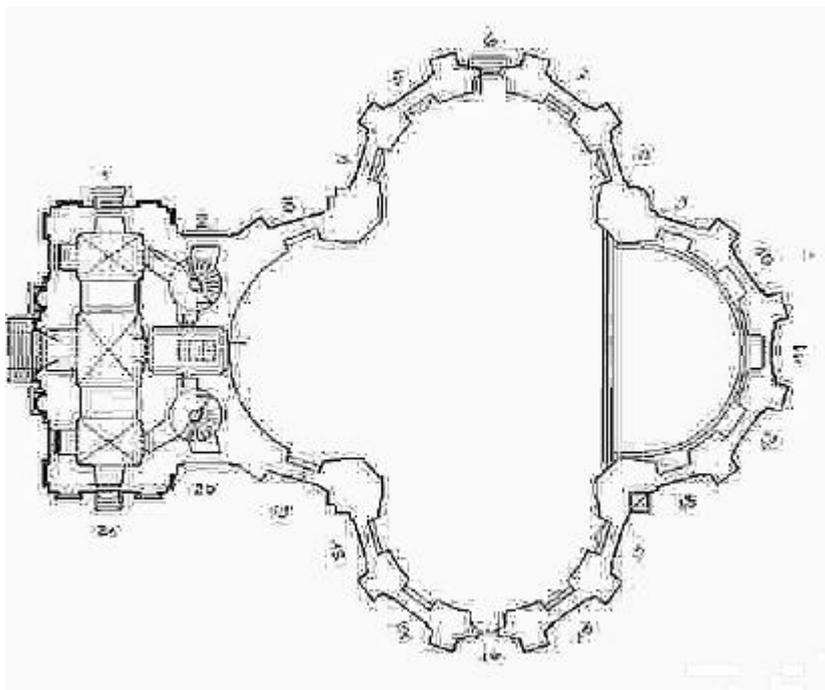


Abbildung 7: Grundriß der Parochialkirche (BERICHT PLANER IN DER PANKEMÜHLE)

Fünf Jahre später (1708) fängt die Planung für den Bau des Turms über der Vorhalle an. Der Entwurf kommt von Jean de Bodt. Nach acht Jahren (1715) erklingt zum ersten Mal vom vollendeten Turm das von Friedrich-Wilhelm I der Parochialkirche geschenkte Glockenspiel. Da die ersten Glocken musikalisch sehr unsauber klingen, wird im November von Johann Albert de Grave in Amsterdam ein neues Glockenspiel gegossen. Mit seinen 37 Glocken gilt es als eines der besten der damaligen Zeit. Neben den manuell ausgeführten Konzerten bestimmt das Glockenspiel mit stündlichen Chorälen und zur Viertel, Halben und Dreiviertelstunde über eine große Walze abgespielten Zwischenmelodien, den Rhythmus der Stadt.

Im Jahre 1734 bekommt die Kirche eine Orgel, die von Joachim Wagner gebaut wurde.

Hundert Jahre später (1837/38) wird der Innenraum der Parochialkirche zum ersten Mal umgebaut. Es werden Emporen in der Kirche eingebaut, um zusätzliche Sitzplätze zu bekommen. Bei einem weiteren Umbau des Innenraumes in den Jahren 1884/85 werden die Emporen bis auf die Orgelepore wieder entfernt. Des Weiteren werden Altarstufen für einen Hochaltar eingefügt und Anbauten zur Gewinnung von Nebenräumen vorgenommen.

Im Mai 1944 wird die Kirche von einer Brandbombe getroffen. Der brennende Turmaufbau fällt in das Kirchenschiff, das völlig ausbrennt. Durch die thermischen Spannungen während des Brandes werden Teile des noch aus dem späten 19. Jh. stammenden Fasadensputzes großflächig beschädigt.

Erst sieben Jahre später, 1951, wird das Dach des Kirchenschiffes in der alten Form rekonstruiert. Doch diese Maßnahme reicht nicht aus, um das Mauerwerk vollkommen trocken zu legen. Infolge der Undichtigkeit des Daches und der fehlenden Regenentwässerung waren Teile der Fassaden längere Zeit durchfeuchtet. Im Jahre 1988 wird das Dach neu gedeckt.

Die Schäden an den Fasadensputzen wurden bis heute nicht repariert. Das Mauerwerk, das an diesen Stellen mittlerweile fünfzig Jahre frei liegt, ist ungeschützt der Bewitterung und der Belastung durch Schadstoffe ausgesetzt. Dabei handelt es sich um Schwebstaub, also Partikel aus der Luft z. B. hervorgerufen durch Braunkohlekraftwerke, Abgase der Industrie und Abrieb von Kraftfahrzeugreifen. Außerdem treten hohe Gehalte von Schwefeldioxid und Stickoxiden in der Luft auf, bedingt durch den hohen Anteil der mit Festbrennstoffen betriebenen Heizkraftwerke und Hausöfen im östlichen Teil Berlins nach dem zweiten Weltkrieg.

Die Schadstoffbelastung des Mauerwerks ist besonders hoch, da die Kirche sich in Berlin - Mitte, in unmittelbarer Nähe der Kreuzungsbereiche der vielbefahrenen Alexander-, Stralauer- und der sechsspurigen Grunerstraße befindet.

Als Ergebnis der Umwelteinflüsse sind an der Parochialkirche vergipste Fugen und somit Verschleißung der äußeren Poren zu finden, weiterhin liegt eine starke Salzbelastung des Mauerwerks und der historischen Putze vor. Die Salzbelastung der noch vorhandenen Putze sowie des Untergrundes wurden untersucht und als eine der Grundlagen für die Konzipierung des neuen Putzes verwendet.

## 4.2 Untersuchung der historischen Putze

Um die neuen Putze in ihren Eigenschaften den historischen anzugleichen, wurde unter anderem das B/Z-Verhältnis sowie die Sieblinie des Zuschlags der historischen Putze bestimmt.

Bei der Probenahme am 07.05.1996 an der Parochialkirche wurden Proben von drei verschiedenen Putze genommen. Dabei handelte es sich einerseits um einen bräunlichen Putz (PA 1), dessen Reste auf der linken Seite direkt neben der Nordtür zu finden waren. Er wurde von ULLRICH 1994 auf 1836-38 datiert und als kalkhaltiger Quetschmörtel mit harzigen Bestandteilen beschrieben. Auffällig ist eine geringe Dicke dieses Putzes, die ca. 0,5-1 cm beträgt. Zweite Putzart (PJ 1 bis 5) ist ein grauer Putz, der wesentlich dicker ist (ca. 3 cm). Er ist am Kirchenschiff und am Turm zu finden. Bei der dritten Putzart (PN 1) handelt es sich nicht um einen historischen Putz sondern um einen traßhaltigen bräunlichen Restaurierputz, der 1993 angebracht wurde. Die Probe wurde an einer Stelle genommen, wo bereits die ersten Schäden aufgetreten sind, um die Salzbelastung zu untersuchen.

Eine genaue Auflistung der Proben und der Probenahmestellen befindet sich in der Tabelle 1 im Anhang

Mit der Röntgendiffraktometrie wurde die qualitative Zusammensetzung der Putzproben ermittelt. In der Tabelle 1 sind exemplarisch die Mörtelproben mit den identifizierten Phasen angegeben. Die Proben PJ 1 bis 5 weisen den gleichen Phasenbestand auf. Die Probenmenge der Probe PA 1 erlaubte keine Analyse.

Tabelle 1: Qualitative Phasenzusammensetzung der Mörtelproben der Parochialkirche, Berlin, mittels Röntgenbeugungsanalyse bestimmt (s. auch Abb. 1 und 2 im Anhang).

Probe	Quarz	Alit	Belit	Ferrat	Aluminat	Calcit	Ettringit	Gips
PN 1	+++	+	+	+	+	++	+	+
PJ 2	+++	+	+	+	+	++	+	+

+++ sehr deutlich, ++ deutlich, + erkennbar

Die Diffraktogramme zeigen deutlich einen Quarzsand als Zuschlag. Weiterhin werden Reste der nicht hydratisierten Zementphasen beobachtet. Erkennbar ist auch die Belastung mit

bauschädlichen Salzen wie Ettringit und Gips. Die in der Tabelle nicht genannten Silikathydratphasen sind auch andeutungsweise in den Diagrammen zu erkennen.

Die naßchemische Analyse der Proben ergab die Bindemittel/Zuschlagverhältnisse und die Salzgehalte in den Putzen. Der B/Z-Verhältnis der Probe PA 1 konnte aufgrund der geringen Probenmenge nicht bestimmt werden. Bei den Proben PJ 1 –5 betrug das B/Z-Verhältnis 1:2,3 bis 2,4. Der untersuchte Sanierputz wurde hergestellt mit dem B/Z-Verhältnis von 1:4.

Die Ergebnisse der Salzuntersuchung sind vergleichbar mit den Ergebnissen, die im Gutachten der Firma Bayplan (Tabelle A2 im Anhang) zusammengestellt sind, sie bestätigen auch die Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalyse.

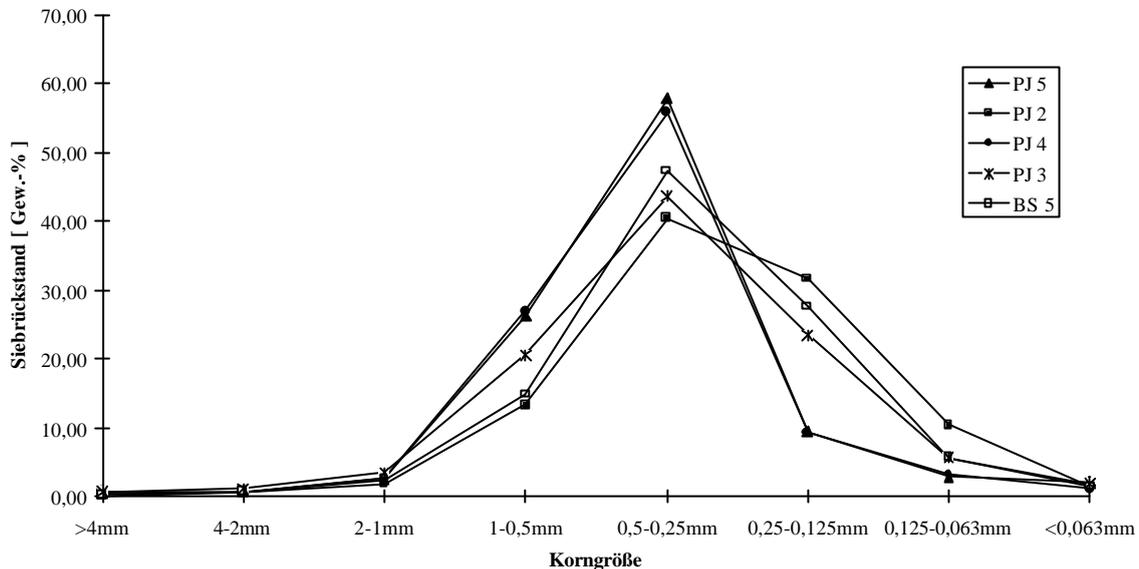
Tabelle 2: Ergebnisse der naßchemischen Analyse zur Mörtelzusammensetzung der Parochialkirche, Berlin

Probe	B/Z Verhältnis [GT]	K <sup>+</sup> [M.-%]	Na <sup>+</sup> [M.-%]	Ca <sup>2+</sup> [M.-%]	Mg <sup>2+</sup> [M.-%]	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [M.-%]	Cl <sup>-</sup> [M.-%]	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [M.-%]
PN 1	1 : 4	0,22	0,39	8,63	0,35	3,98	0,11	0,37
PJ 2	1 : 2,4	0,08	0,10	7,33	0,75	0,96	0,20	0,50
PJ 3	1 : 2,4	0,05	0,05	8,61	0,28	1,64	0,04	0,10
PJ 5	1 : 2,3	0,02	0,01	5,30	0,04	1,19	0,01	0,03

Erkennbar ist starke Sulfatbelastung, die makroskopisch als Gipskruste an den Fugenmörteln und Ziegeln zu erkennen ist. Die Belastung durch andere Salze ist sehr viel kleiner. Auffällig sind die vergleichbar hohen K<sup>+</sup>- und Na<sup>+</sup>- sowie SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>- und NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Gehalte in der Sanierputzprobe. Da es sich dabei um eine Probe handelt, die an eine Stelle genommen wurde wo das Regen-Fallrohr fehlte und das Regenwasser an der Wand entlang floß, können diese Salzgehalte auf diesen Eintrag zurückzuführen sein. Diese Ionen können ebenso aus dem Traßgehalt des Mörtels kommen.

Die Ergebnisse der Zuschlagsuntersuchungen sind in der Abbildung 8 zu sehen. Die Sieblinien der Zuschläge wurden aus den unlöslichen Rückständen der naßchemischen Analyse bestimmt.

Abbildung 8: Sieblinien der Putzmörtelzuschläge der Parochialkirche im Vergleich mit der Sieblinie des zu Mörtelentwicklung verwendetem Grubensandes (BS 5) der Fa. Kluwe. Die Kornsummenkurven befinden sich im Anhang.



Die Analyse ergab Sande mit einem hohen Anteil der Kornfraktion 0,25-0,5 mm. Mikroskopisch betrachtet sind das Flußsande mit runder Körnung.

Die Sieblinien der Proben (PJ 4 u. PJ 5), die am Turm genommen wurden, unterscheiden sich von den restlichen, die aus dem Kirchenschiff stammen. Ein Grund dafür kann die spätere Bauperiode und die damit verbundene Änderung der Bezugsquelle für die Baumaterialien sein.

## 4.2 Untersuchung des Untergrundes

Beim Bau der Parochialkirche wurde eine Vielfalt an Ziegelarten verwendet. Es konnten mindestens vier verschiedene Ziegelarten nach äußeren Kennzeichen identifiziert, beprobt und beschrieben werden. Im Mauerwerk kamen verschiedene Ziegelarten etwa gleichmäßig verteilt nebeneinander vor, während in Fensterbögen nur Ziegel einer Varietät eingesetzt wurden.

Bei der Probenahme am 16.07.1996 wurde die Wand an der SO-Seite auf verschiedene Ziegelarten untersucht und im unteren Bereich der Wand wurden Bohrkerns gezogen. Schon während der Probenahme konnten bei den gezogenen Bohrkernen Unterschiede festgestellt werden. Neben der verschiedenen Färbung, die von gelb über hell rosa und hell rot bis dunkelrot reichte (Tabelle 3), wurden beim Anbohren der Ziegel unterschiedliche Festigkeiten beobachtet. Diese Beobachtung konnte bei den Druckfestigkeitsprüfungen bestätigt werden.

Tabelle 3: Ergebnisse der Untersuchung der Ziegel der Parochialkirche, Berlin.

Probe	Nr.	Farbe	Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Wasseraufnahme- koeffizient $\omega$ [kg/m <sup>2</sup> *h <sup>0,5</sup> ]
BPK 1	1	hell rosa	32,8	14,2
	2		33,4	15,1
BPK 2	1	gelb	13,2	35,5
	2		17,0	32,2
	3		17,1	
	4		13,0	
BPK 3	1	hell rot	8,5	29,9
	2		11,5	30,6
BPK 5	1	dunkel rot	7,7	20,2
	2		7,3	20,3
	3		5,5	

Auffällig sind die großen Unterschiede bei den Druckfestigkeiten der Ziegelarten. Des weiteren mußten auch die sehr hohen Wasseraufnahmekoeffizienten der Ziegel (Tab. 3) bei

der Mörtelentwicklung berücksichtigt werden. Eine besondere Schwierigkeit stellte die Tatsache dar, daß die unterschiedlichen Ziegel im Mauerwerk nebeneinander verwendet wurden.

Vergleichbare Ergebnisse finden sich auch in der Literatur, z. B. bei FRANKE 1992 oder bei FREYBURG 1994. Letztere ergänzt die Kennwerte unter anderen durch die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen ( $\mu$ ), die bei den von ihr untersuchten Ziegeln zwischen 6,8 und 66,5 liegen.

Die Tabelle 4 zeigt die Salzbelastung der Ziegel. Die Ergebnisse zeigen, daß Sulfate, vorwiegend Gips, den größten Teil der Salzbelastung ausmachen.

Die Untersuchung der Firma Bayplan bestätigt die große Wasseraufnahmefähigkeit der Ziegel.

Tabelle 4: Salzbelastung der Ziegel des Kirchenschiffes abhängig von der Lage der Wände (Gutachten Firma Bayplan).

Richtung	Chlorid (M.-%)	Sulfat (M.-%)	Nitrat (M.-%)	max. Wasser - aufnahme (M.-%)
S	0,01	0,2 - 0,3	0,02 - 0,03	11,5 - 11,9
SW	< 0,01	< 0,01	0,02 - 0,03	4,7 - 28,6
SO	< 0,01	< 0,01	0,02 - 0,03	11,3 - 14,6
NW	0,01	< 0,01	0,02 - 0,04	10,15 - 12,5
W	0,1	< 0,01	0,4	11,15

Die etwas erhöhten Nitratgehalte könnten eventuell infolge einer lokalen Belastung durch Mikroorganismen (BOCK 1988) oder tierische Exkremete (Tauben o. ä.) entstanden sein.

### 4.3 Anforderungsprofil

An die zu entwickelnden Putze für die Parochialkirche werden - auch unter Berücksichtigung der Objektuntersuchungen - mehrere grundsätzliche Anforderungen gestellt.

Die Putzdicke sollte maximal 1 cm betragen, trotzdem sollte eine hohe Dauerhaftigkeit und hohe Resistenz gegen Umwelteinflüsse gewährleistet sein. Bei der Auswahl der Bindemittel sollte berücksichtigt werden, daß der Putz eine helle, am besten weiße Farbe besitzen sollte. Diese Anforderungen wurden, wegen des stark saugenden Untergrundes um ein hohes Wasserrückhaltevermögen der Putze, ergänzt.

Die meisten Anforderungen werden erfüllt, wenn die Putze unter anderem niedrige dyn. E-Moduli aufweisen, etwa unterhalb von  $10\,000\text{ N/mm}^2$ . Weiterhin sollte die Druckfestigkeit der Putze im Bereich von etwa  $5\text{-}10\text{ N/mm}^2$  liegen, bei möglichst hoher Biegezugfestigkeit.

Aufgrund der Schutzfunktion der Putze sollten sie - mit einem niedrigen Wasseraufnahmekoeffizienten ( $<0.5\text{ kg/m}^2\text{h}^{0.5}$ ) - das Eindringen des Wassers ins Mauerwerk und das Wandern der dort vorhandenen Salze verhindern. Der Wasseraufnahmekoeffizient steht auch in Verbindung mit dem geforderten hohen Frost-Tauwechsel-Widerstand. Das bereits erwähnte hohe Wasserrückhaltevermögen der zu entwickelnden Putze sollte größer als 90 M.-% sein. Mit einem geringen 1. Schwinden ( $< 1\text{ mm/m}$ ) beim Erstarren und Erhärten, sowie geringem hygrischen Quellen und Schwinden ( $< 0,3\text{ mm/m}$ ) wird die Rißneigung der Putze verringert.

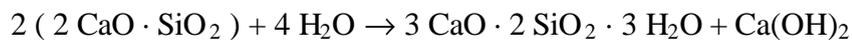
Um das Mauerwerk nicht mit einem Putz gegen Wasserdampf abzudichten, wurde mit  $\mu < 15$  eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit gefordert. So werden das Sammeln des Wassers und der Salze an der Grenze der beiden Schichten (Stein/Putz) und die damit verbundenen langfristigen Schäden verhindert.

## 4.4 Materialien und Ausgangsstoffe

### 4.4.1 Bindemittel

#### Hydraulischer Kalk

Nach DIN 1060-1 bestehen hydraulische Kalke vorwiegend aus Calciumsilikaten, Calciumaluminaten und Calciumhydroxid. Sie werden hergestellt durch Brennen von tonhaltigem Kalkstein und nachfolgendem Trocken-Löschen und Mahlen. Diese Kalke erstarren und erhärten auch unter Wasser. Die Erhärtungs-Reaktion verläuft wie folgt (vereinfacht):



Bei der Putzentwicklung für die Parochialkirche wurde hydraulischer Kalk HL 2 der Fa. Otterbein verwendet. Die chemische Zusammensetzung des Kalkes befindet sich im Anhang (Tabelle A7).

#### Hochofenzement

Ein Hochofenzement wie der verwendete Zement CEM III/B 32,5 NW/HS/NA der Fa. Anneliese besteht nach der Definition in der DIN 1164 aus 20 bis 34 M.-% Portlandzementklinker, 66 bis 80 M.-% Hüttensand und 0 bis 5 M.-% Nebenbestandteilen wie z. B. Füller.

Hüttensand ist eine granuliert Hochofenschlacke, also eine abgeschreckte Kalk-Tonerde-Silikatschmelze mit latent-hydraulischen Eigenschaften. Hüttensand enthält hauptsächlich CaO, SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, somit ist seine Zusammensetzung ähnlich der des Portlandzementes. Die hydraulische Reaktivität des Hüttensandes wird durch seine chemische Zusammensetzung und Basizität sowie seinen Glasgehalt bestimmt.

Die chemische Analyse ist der Tabelle A7 im Anhang zu entnehmen.

## Weißkalk

Nach DIN 1060-1 ist der Weißkalk ein durch Brennen unterhalb der Sintergrenze aus reinem Kalkstein hergestellter Branntkalk. Er enthält  $\geq 70\%$  CaO + MgO, was der Bezeichnung zu entnehmen ist. Demzufolge besteht der verwendete Weißkalk CL 90 der Fa. Fels zu = 90 M.-% aus CaO + MgO (Tabelle A7 im Anhang).

### 4.4.2 Zuschlag

Da die Art, Kornverteilung und Kornform der Zuschläge einen wichtigen Einfluß auf die Mörtel­eigenschaften haben, wurde für die Mörtel­entwicklung nach einem Zuschlag (0-2 mm) gesucht, welcher vor Ort vorhanden ist.

Nach einem Vergleich der Sieblinien sechs verschiedener Bausande (s. Abb. 3 im Anhang) aus dem Berliner Raum mit denen der historischen Zuschläge (PJ 2 - PJ 5), wurde der Grubensand (BS 5) als Zuschlag ausgewählt und verwendet.

### 4.4.3 Zusatzmittel

#### Verdicker

Verdicker - in Form von Pangel S 9 der Fa. OMYA GmbH - wurde eingesetzt, um durch die gute Verarbeitbarkeit der Mörtel dünnes Auftragen der Putze zu ermöglichen. Pangel ist ein rheologisches Additiv, das aus Sepiolith, einem hydratisierten Magnesiumschichtsilikat ( $\text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}(\text{OH})_4(\text{OH}_2)_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ), besteht. Laut Herstellerangaben besteht Pangel aus nadelförmigen Partikeln und hat verdickende, pseudoplastische und thixotrope Eigenschaften. Die nadelförmigen Partikel ermöglichen die Bildung eines dreidimensionalen Gerüsts, wodurch Lösungsmittel, Füllstoffe oder kolloidale Teilchen aufgefangen werden. Damit wird die Viskosität erhöht und die Sedimentation der Komponenten vermindert. Gleichzeitig weisen Pangel-Suspensionen ein thixotropes und ein pseudoplastisches Verhalten auf, d. h., wird die Suspension einer Scherkraft ausgesetzt, nimmt ihre Viskosität ab. Diese Eigenschaft erleichtert das dünne Auftragen des Putzes, was für die Anwendung des Pangels ausschlaggebend war.

## **Luftporenbildner**

Luftporenbildner verbessern den Frost-Tauwechsel-Widerstand der Mörtel und der Betone durch die Bildung kugelförmigen Mikroluftporen (bis 0,3 mm Ø). Diese Luftporen liegen gleichmäßig in geringen Abständen im Gefüge verteilt vor. Durch den erhöhten Luftporen-Gehalt im Frischmörtel wird die Verarbeitbarkeit verbessert und die Wasseraufnahme verringert. Die Rohstoffbasis für Luftporenbildner bilden Stoffe, wie z.B. Harzseifen. Bei der Putzentwicklung für die Parochialkirche wurde der Luftporenbildner Marlon ARL der Firma HÜLS AG verwendet.

## **Methylcellulose**

Methylcellulose dient zur Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens des Mörtels. Nach MANN 1979 und MEHLMANN 1984 reduziert die Methylcellulose die Gefahr des Verdurstens der Mörtel auf stark saugenden Untergründen.

Die Methylcellulose Culminal MHEC 25.000 PF Firma AQUALON, die verwendet wurde, ist ein Celluloseether, der durch Reaktion von Cellulose mit Monochlormethan und Ethylenoxid hergestellt wurde. Sie besitzt funktionelle Eigenschaften wie Wasserrückhaltung, Verdickung und Stabilisierung.

## **Kunststoffdispersion**

Die Kunststoffdispersion Vinnapas RE 551 Z der Fa. WACKER ist ein in Wasser redispersierbares Dispersionspulver eines Terpolymeren aus Ethylen, Vinylacrylat und Vinylchlorid. Sie kann im Zusammenwirken mit hydraulischen Bindemitteln dichtende Eigenschaften entwickeln (NÄGELE 1986). Sie verbessert die Haftung am Untergrund und den Zusammenhalt des Frischmörtels. Kunststoffdispersionen haben einen positiven Einfluß auf die Verarbeitbarkeit und stabilisieren die Luftporen der Frischmörtel. Sie senken häufig den E-Modul (SCHULZE 1993, BOENKENDORF 1995) und reduzieren die Wasseraufnahme.

## **Hydrophobierer**

Als Hydrophobierer wurde Zinkstearat angewendet. Er verteilt sich homogen sowohl in den Luftporen als auch an den Wandungen der Kapillarporen der Mörtel. Dadurch wird die

---

Saugwirkung der Kapillaren gebremst und das Zusammenlaufen der Oberflächenfilme in den Luftporen verhindert (DROLL 1996).

#### 4.5 Putzrezepturen

Aus Verträglichkeits- und optischen Gründen wurden zwei Bindemittelsysteme erprobt. Es wurde ein Bindemittel aus hydraulischem Kalk und Hochofenzement im Verhältnis 80 zu 20 und ein zweites aus Weißkalkhydrat und Hochofenzement im Verhältnis 70 zu 30 verwendet. Um die geforderten Eigenschaften zu erreichen, wurden verschiedene Zusatzstoffe und Zusatzmittel eingesetzt. Es wurden Verdicker, Luftporenbildner, Methylcellulose, Kunststoffdispersion und Hydrophobierer verwendet. Die Angaben zu Konzentrationen sind im Anhang (Tabelle A4) zu finden.

Unter der Verwendung obengenannter Zusatzmittel wurden mehrere Bindemittelmischungen (Tabelle 5) zusammengestellt. Die genauen Zusammensetzungen der Mörtel sind der Tabelle 4 im Anhang zu entnehmen. Zusätzlich wurden 4 Sanierputze namhafter Hersteller ausgesucht, die vergleichend mit untersucht wurden.

In Vorversuchen wurde der Einfluß der Zusätze auf die Verarbeitung untersucht. Dabei wurde festgestellt, daß eine gleichzeitige Verwendung von Methylcellulose und des Luftporenbildners nicht möglich ist. Die übrigen Zusatzmittelkombinationen lassen sich gut verarbeiten und wurden allen Untersuchungen unterzogen.

Das Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis der Putze betrug in der ersten Phase der Entwicklung 1:4. Im zweiten Schritt der Mörtelentwicklung - nach der ersten Applikation - wurde dann der Einfluß des Bindemittel/Zuschlag Verhältnisses auf die Eigenschaften untersucht. Dabei wurden ausgewählten Proben mit den B/Z Verhältnissen von 1:5, 1:7 und 1:9 untersucht.

Tabelle 5: Zusammensetzung der für die Parochialkirche in Berlin untersuchten Putze, inklusive der 4 Industrie-Sanierputze.

HK/HOZ	WKH/HOZ
HK/HOZ/P	WKH/HOZ/P
HK/HOZ/K/H	WKH/HOZ/K/H
HK/HOZ/K/H/P	WKH/HOZ/K/H/P
HK/HOZ/K/H/L	WKH/HOZ/K/H/L
HK/HOZ/K/H/L/P	WKH/HOZ/K/H/L/P
HK/HOZ/K/H/M	WKH/HOZ/K/H/M
HK/HOZ/K/H/M/P	WKH/HOZ/K/H/M/P
S1	S3
S2	S4

Erläuterungen: HK hydr. Kalk, HOZ Hochofenzement, WKH Weißkalkhydrat, K Kunststoffdispersion, P Verdicker, H Hydrophobierer, M Methylcellulose, L Luftporenbildner; S Sanierputz

#### 4.6 Herstellung und Lagerung der Prüfkörper

Die Mörtel wurden in Anlehnung an EN 196 Teil 1 hergestellt, der Wasser/Bindemittel-Wert (W/B-Wert) wurde entsprechend einem Ausbreitmaß von  $17 \pm 0,5$  cm eingestellt. Als Prüfkörper wurden - mit Ausnahme für die Biegezug- und Druckfestigkeits- und Wasserdampfdiffusionsprüfung - Normprismen der Abmessungen 4 cm x 4 cm x 16 cm hergestellt. Für Biegezug- und Druckfestigkeit wurden entsprechend DIN 18555 Prismen der Abmessungen 4 cm x 2 cm x 16 cm hergestellt und für Wasserdampf-Diffusion Scheiben mit dem Durchmesser von 14,5 cm und einer Dicke von 1,5 cm.

Die Prüfkörper wurden zunächst 7 Tage beim Klima 20/95, danach bis zum Prüftermin beim Klima 20/65 und erhöhter CO<sub>2</sub> - Konzentration (1 Vol.-%) gelagert.

## 4.7 Ergebnisse

Da hier die Entwicklung eines Baustoffs bzw. eines Putzes dargestellt werden soll, erfolgt an dieser Stelle eine Konzentration auf die Untersuchungsergebnisse, die zur Auswahl der geeigneten Mörtel für die Applikation dienen.

In der Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Frisch- sowie Festmörtel-Untersuchungen nach einer 56-tägigen Lagerung der Proben zusammengestellt. Diese Werte wurden aus Zeitgründen als Grundlage für die Entscheidung über die Auswahl der Putze zur Applikation genommen. Die Tabelle wurde mit Ergebnissen der Putze ergänzt, die in der zweiten Phase der Entwicklung, also nach der ersten Applikation, erzielt wurden. Die Ergebnisse der 28- und 90-Tage Untersuchungen befinden sich im Anhang (Tabelle A5).

Alle Kennwerte sind sowohl vom eingesetzten Bindemittel als auch von den Zusätzen abhängig. Die Zusätze verändern die Mörtel Eigenschaften der eingesetzten Grundmischungen und beeinflussen die Wirkung der parallel verwendeten Zusatzmittel. Die Wirkungsweise der Zusatzmittel bei einer nicht mit anderen Produkten kombinierten Anwendung wurde bereits im Kapitel 4.4.3 beschrieben. Der Einfluß auf die technologischen Kennwerte der Mörtel mit den hier eingesetzten Bindemitteln wurde untersucht und in Hinsicht auf die geforderten Eigenschaften des zu entwickelten Putzes beurteilt.

Das Pangel als Verdicker/Verarbeitungsverbesserer, macht den Mörtel geschmeidig und ermöglicht das dünne Auftragen der Putze. Sepiolith verleiht dem Material eine strukturelle Stabilität, wenn er im basischen Milieu angewendet wird, wie z. B im Mörtel (MARTINEZ-RAMIREZ 1995).

In dem im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Bindemittelsystemen erhöht Sepiolith den Wasseranspruch und verstärkt damit in der Regel das Schrumpfen. Durch den erhöhten Wasseranspruch wird die Porosität derart beeinflußt, daß der Wasseraufnahmekoeffizient steigt. Das Wasserrückhaltevermögen und der E-Modul werden ebenfalls beeinflußt, die beiden Werte werden kleiner. Im Falle des E-Moduls ist es eine positive Entwicklung im Hinblick auf die geforderten Eigenschaften. Die Verwendung von Pangel hat dagegen keinen großen Einfluß auf die Festigkeiten.

---

Der gleichzeitige Einsatz von Kunststoffdispersion und Hydrophobierer erhöht im Vergleich zur Nullmischung den Wasseranspruch und erniedrigt das Schrumpfen. Die E-Moduli und die Festigkeiten verschieben sich zu niedrigeren Werten hin. Die Wasseraufnahmekoeffizienten sinken deutlich auf Werte, die wasserabweisende Eigenschaften kennzeichnen. Dies geschieht einerseits durch die Anwendung des Hydrophobierers, aber auch durch die Kunststoffdispersion, die dichtende Wirkung aufweist (NÄGELE 1986). Die Mörtel mit der Kunststoffdispersion weisen gute Haftung am Untergrund auf. Weiterhin verbessert der Kunststoff-Einsatz die Verarbeitung indem er wie ein Stabilisator wirkt und eine plastifizierende Wirkung zeigt (NÄGELE 1986).

Der verwendete Luftporenbildner erhöht den Wasseranspruch und den Wasseraufnahmekoeffizienten der Mörtel im Vergleich zu Nullmischungen. Er führt zur Erniedrigung des Schrumpfens. Der E-Modul und die Festigkeiten werden durch den Einsatz des Luftporenbildners deutlich herabgesetzt. Im der Vergleich Mörtel in denen nur Hydrophobierer oder nur Kunststoffdispersion verwendet wurde, ergeben sich keine Unterschiede im Wasserrückhaltevermögen und Wasseraufnahmekoeffizienten.

Der Einsatz der Methylcellulose erwies sich aufgrund des stark saugenden Untergrundes als notwendig, denn sie erhöht das Wasserrückhaltevermögen. Negativ wirkt sie sich auf den Wasseranspruch und somit auch auf das Schrumpfen der Mörtel aus. Die Wasseraufnahmekoeffizienten steigen und die E-Moduli werden durch die Verwendung der Methylcellulose herabgesetzt. Sie hat jedoch keinen großen Einfluß auf die gemessenen Festigkeiten der Mörtel im Vergleich zu gleichen Mischungen ohne Methylcellulose.

Tabelle 6: Untersuchungsergebnisse aller Entwicklungsreihen für den Putz der Parochialkirche nach 56-Tagen

Mischung	W/B Wert	Schrumpfen mm/m	WRV M.-%	$\omega$ kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup>	$\mu$ -Wert	hydr. Quellen/Schwinden mm/m	$E_{dyn}$ N/mm <sup>2</sup>	$\beta_{BZ}$ N/mm <sup>2</sup>	$\beta_D$ N/mm <sup>2</sup>
HK/HOZ (80/20) 1:4	0,84	-1,61	81,5	9,5	13	0,13/-0,12	10900	3,0	13,2
HK/HOZ 1:7	0,76	-0,82	73,6	n.b.	8	0,15/-0,04	5500	1,1	4,4
HK/HOZ 1:9	0,74	-0,82	70,8	n.b.	7	0,14/-0,04	6000	1,1	4,6
HK/HOZ/P 1:4	0,94	-1,38	78,1	12,6	11	0,14/-0,12	5600	1,4	10,4
HK/HOZ/H/K	0,88	-0,66	87,1	0,5	6	0,20/-0,17	6200	2,2	6,0
HK/HOZ/H/K/P	0,88	-0,74	88,8	0,6	6	0,12/-0,16	6000	2,4	6,5
HK/HOZ/H/K/L	0,95	-0,55	89,6	0,6	3	0,13/-0,17	2700	0,9	2,5
HK/HOZ/H/K/L/P	0,98	-1,06	88,3	0,9	2	0,2/-0,19	2700	1,1	2,7
HK/HOZ/H/K/M 1:4	0,95	-0,68	91,1	0,4	6	0,16/-0,12	6600	2,6	7,1
HK/HOZ/K/H/M 1:5	0,83	-0,53	89,1	n.b.	6	0,16/-0,03	5200	1,9	4,1
HK/HOZ/H/K/M 1:7	0,74	-0,73	96,6	n.b.	7	0,17/-0,05	3400	1,2	2,6
HK/HOZ/H/K/M 1:9	0,71	-0,74	93,6	n.b.	8	0,12/-0,02	3100	0,9	2,0
HK/HOZ/H/K/M/P 1:4	0,98	-0,76	93,0	0,4	5	0,18/-0,12	5400	2,3	5,7
HK/HOZ/K/H/M/P 1:5	0,86	-0,78	85,4	n.b.	5	0,17/-0,02	5300	2,0	4,4
HK/HOZ/H/K/M/P 1:7	0,79	-0,70	96,1	n.b.	7	0,19/-0,05	3400	1,1	2,6
HK/HOZ/H/K/M/P 1:9	0,74	-0,40	92,6	n.b.	6	0,13/-0,04	3000	1,0	2,0
WKH/HOZ (70/30) 1:4	0,93	-1,13	83,3	11,1	n.b.	0,15/-0,08	7600	1,1	7,8
WKH/HOZ 1:7	0,80	-0,56	74,7	n.b.	n.b.	0,16/-0,05	4600	1,0	5,8
WKH/HOZ 1:9	0,77	-0,37	72,7	n.b.	n.b.	0,15/-0,02	2600	0,9	3,7
WKH/HOZ/P 1:4	0,99	-1,31	78,2	9,8	n.b.	0,19/-0,07	6800	1,7	6,9
WKH/HOZ/H/K	1,04	-0,62	81,0	0,3	n.b.	0,13/-0,08	5300	1,8	5,1
WKH/HOZ/H/K/P	1,13	-1,12	66,2	0,7	n.b.	0,17/-0,14	4900	1,8	5,2
WKH/HOZ/H/K/L	1,11	-0,85	67,1	1,2	n.b.	0,17/-0,12	3800	1,4	3,7
WKH/HOZ/H/K/L/P	1,20	-0,91	67,7	1,9	n.b.	0,17/-0,1	3700	1,4	3,9
WKH/HOZ/K/H/M 1:4	1,19	-1,24	89,8	0,7	n.b.	0,2/-0,15	5100	2,0	5,4
WKH/HOZ/K/H/M 1:5	0,95	-1,06	77,7	n.b.	5	0,15/-0,02	4200	1,3	3,0
WKH/HOZ/K/H/M 1:7	0,83	-0,50	89,9	n.b.	n.b.	0,18/-0,03	3800	1,1	2,5
WKH/HOZ/K/H/M 1:9	0,81	-0,36	81,2	n.b.	n.b.	0,19/-0,03	3100	0,8	1,8
WKH/HOZ/K/H/M/P	1,23	-1,55	88,1	1,0	n.b.	0,17/-0,15	4600	1,1	5,0
S 1	-	-0,27	97	2,5	2	0,18/-0,08	2600	0,8	2,4
S 2	-	-0,74	92,9	0,9	3	0,15/-0,02	2900	1,1	3,6
S 3	-	-0,64	95,3	5	2	0,25/-0,11	1600	0,9	1,8
S 4	-	-0,76	77,5	4	3	0,23/-0,03	1300	0,6	1,2

Erläuterungen: HK hydr. Kalk, HOZ Hochofenzement, WKH Weißkalkhydrat, K Kunststoffdispersion,

P Verdicker, H Hydrophobierer, M Methylcellulose, L Luftporenbildner, n. b. nicht bestimmt

In 30 Zyklen wurden die Mörtel auf Frost-Tauwechsel-Widerstand getestet. Alle Proben - hergestellt aus Mischungen mit Zusätzen - überstanden die Prüfung unbeschädigt, lediglich die Grundmischung auf der Basis von Weißkalkhydrat zeigte kleine Risse.

Auch das Ausblühverhalten der Mörtel verändert sich durch die Verwendung der Zusätze. Die Grundmischungen beider Bindemittelsysteme zeigten nach 30 Zyklen Ausblühungen. Alle anderen Proben sind ausblühungsfrei. Die verwendeten Zusätze reduzieren die Wasseraufnahme und dem damit verbundenen Stofftransport innerhalb des Putzes. Das entspricht den Anforderungen, die aufgrund der Salzbelastung des Untergrundes an den Putz gestellt werden.

Die exemplarisch bestimmten  $\mu$ -Werte zeigen eine bessere Wasserdampfdurchlässigkeit der Mörtel mit Zusatz von Kunststoffdispersion, Hydrophobierer und Luftporenbildner als die der unmodifizierten Mörtel. Die Methylcellulose erhöht in einem geringem Maße die Wasserdampf-Durchlässigkeit der Putze.

Die handelsüblichen Putze haben im Vergleich zu den entwickelten Putzen sehr niedrige E-Moduli und Festigkeiten. Fast alle Industrieputze besitzen hohes Wasserrückhaltevermögen und hohe Wasserdampfdurchlässigkeit. Im Vergleich zu den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Putze, sind die untersuchten Industrie-Sanierputze viel weniger wasserabweisend. Das Schrumpfen und das hygrische Quellen/Schwinden der beiden Putzgruppen sind vergleichbar.

Obwohl die Auswahl der Putze für die Applikation aufgrund der Frischmörteluntersuchungen und der Ergebnisse der Festmörteluntersuchungen nach 56 tägigen Lagerung vorgenommen wurde, wurden die Festigkeiten und die E-Moduli zusätzlich nach 28 Tagen und nach 90 Tagen gemessen. Die Ergebnisse sind im Anhang in der Tabelle A5 zu sehen.

Bei allen Mörteln steigen im Laufe der Lagerung erwartungsgemäß sowohl die E-Moduli wie auch die Festigkeiten. Bei den meisten Mörteln verändern sich die Werte zwischen 28 und 90 Tagen nur gering, was die Bestätigung dafür gibt, daß die Werte nach 56 Tagen als Grundlage der Auswahl genommen werden können.

## 4.8 Applikation

Als Auswahlkriterien für die Putzmörtel dienten die im Kapitel 3.1 vorgestellten Anforderungen. Basis für die Auswahl der Putzmörtel waren die Untersuchungsergebnisse, die nach 56 tägiger Lagerung erhalten wurden.

Anhand der Tabelle 6 läßt sich erkennen, daß nahezu alle Mischungen die gestellten Anforderungen erfüllen.

Da die Putze nur dünn (höchstens 1 cm) aufgetragen werden sollen und trotzdem eine Schutzschicht gegen die Umwelteinflüsse bilden müssen, ist der Einsatz von **Kunststoffdispersion** (K) und **Hydrophobierer** (H) in den Mörteln erforderlich. Dies verringert die Wasseraufnahme und damit die Schadstoffaufnahme. Die Ziegel der Parochialkirche weisen hohe Wasseraufnahmekoeffizienten auf, demzufolge ist die Zugabe von **Methylcellulose** (M) erforderlich, um das Wasserrückhaltevermögen zu erhöhen und um eine ungestörte Reaktion der hydraulisch erhärtenden Komponenten zu gewährleisten.

So wurden für die erste Applikation an der Parochialkirche die zwei Mischungen auf der Basis vom hydraulischen Kalk und eine auf der Basis von Weißkalkhydrat ausgewählt. Die Putze enthalten z. T. **Pangel** (P), damit die Verarbeitbarkeit verbessert wird. Des weiteren wurde auch ein industrieller Sanierputz zur Applikation ausgewählt.

Tabelle 7: Wasserbedarf der zur ersten Applikation an der Parochialkirche angewendeten Mörtel

Mörtel	Bindemittel/Zuschlag Verhältniss	Wasser [g/kg Mischung]	Wasser/Bindemittel Wert
HK/HOZ/K/H/M	1:4	189,6	0,95
HK/HOZ/P/K/H/M	1:4	195,6	0,98
WKH/HOZ/K/H/M	1:4	222,2	1,11
S2	-	348,0	-

Bei der Applikation sollten mit jeder der ausgewählten Mischungen sowie dem handelsüblichen Sanierputz sechs Musterflächen (ca. 1 m<sup>2</sup>) angelegt werden. Die zur Verputzung vorgesehenen Flächen befinden sich an der SO - und NO - Wand in je 3 Höhen (Abb. 9).

Die Musterflächen wurden anhand der vom ZHD (Deutsches Zentrum für Handwerk und Denkmalpflege, Außenstelle Potsdam) durchgeführten Kartierung der Salzbelastung, festgelegt. Die ausgesuchten Flächen wurden vorgenäßt, die offenen Fugen verfugt und anschließend sofort die Putzmörtel appliziert.

Beim Verputzen der Flächen kam es bei allen Putzen (inkl. des industriellen Sanierputzes) zur Rißbildung. Sie wurde durch eine schnelle Wasserabgabe über die Putzoberfläche verursacht, bedingt durch ungenügende Nachbehandlung und ungünstige Witterungsbedingungen (starke Sonneneinstrahlung). Eine ständige Nachbehandlung - also Feuchthaltung der Putze - war parallel zu den weiteren Arbeiten nicht möglich. Andererseits wurde ein relativ hoher Bindemittelgehalt verwendet, der eine Rißbildung begünstigt.



Abbildung 9: Musterflächen an der SO Wand der Parochialkirche in verschiedenen Höhen

Bei der Begutachtung der Musterflächen nach einem halben Jahr wurde festgestellt, daß die entstandenen Risse im Putz parallel zu den Fugen im Mauerwerk verlaufen, siehe Abb. 10. Das führte zu der Vermutung, daß die Ribbildung dort erfolgte, wo die Fugen tiefer ausgeräumt waren und das Verfugen und Verputzen aus Zeitgründen kurz hintereinander durchgeführt wurden.

Anhand der bei der ersten Applikation gewonnen Erkenntnisse wurden in einer neuen Versuchsreihe weitere Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisse untersucht. Dazu wurden Prüfkörper mit den Mischungsverhältnissen 1:5, 1:7, 1:9 hergestellt und untersucht. Zusätzlich wurden auch die Methylcellulose-Gehalte erhöht, da die Erniedrigung der Bindemittelgehalte eine Verschlechterung des Wasserrückhaltevermögens bewirkt. Die Gehalte wurden parallel zu der Änderung des B/Z Wertes von 0,08 auf 0,1 M.-% (bezogen auf den Trockenmörtel) erhöht.

Neben dem Schrumpfen beim Austrocknen wurden Quellen und Schwinden, sowie E-Modul und Festigkeiten der neuen Mischungen untersucht.

Die Ergebnisse der Untersuchungen nach einer 56-tägigen Lagerung sowie lagerungsunabhängige Kennwerte sind in der Tabelle 6 zusammengestellt.

Für die zweite Applikation im Mai 1997 wurden folgende Putze eingesetzt:

- hydraulischer Kalk (80 M.-%) /Hochofenzement (20 M.-%)  
/Kunststoffdispersion/Hydrophobierer/Methylcellulose
- hydraulischer Kalk (80 M.-%) /Hochofenzement (20 M.-%)  
/Kunststoffdispersion/Hydrophobierer/Methylcellulose/Pangel

beide mit einem B/Z-Verhältnis 1:5

Die genaue Zusammensetzung der bei der zweiten Applikation verwendeten Putze ist in der Tabelle A6 zu finden.



Abbildung 10: Rißbildung parallel zu einer Fuge in einer Musterfläche an der Wand der Parochialkirche

Die Anlage der neuen Musterflächen erfolgte aufgrund der Rißbildung bei der ersten Applikation und zur Untermauerung der Erkenntnisse aus der ersten Applikation in zwei Varianten. In der ersten Variante wurde verfugt und sofort verputzt, in der zweiten wurden die Fugen am ersten Tag gefüllt, dabei wurden die verfugten Bereiche nach einiger Zeit aufgeraut. Am zweiten Tag erfolgte dann die Applikation der Putze.

Nur die frisch (Fuge) in frisch (Putz) hergestellten Musterflächen neigten wiederum zur Rißbildung. Dickere Putzschichten trocknen an der Oberfläche schnell ab und ohne intensive Nachbehandlung verläuft die Hydratation ungleichmäßig, was zu Schwindrissen führt (BALKOWSKI 1992). Die erst nach einem Tag verputzten Flächen blieben rißfrei.

Alle Musterflächen haben einen Winter gut überstanden; außer den bei der Applikation entstandenen Rissen sind keine weitere Schäden zu erkennen.

Die an den Musterflächen durchgeführten Haftzugfestigkeitsmessungen erbrachten, die in der Tabelle 8 zusammengestellten Ergebnisse.

Tabelle 8: Haftzugfestigkeiten an den Musterflächen der Parochialkirche gemessen ein Jahr nach der Applikation.

Mischung	$\beta_{HZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
HK/HOZ/H/K/M 1:4	0,7 - 2,0
HK/HOZ/H/K/M/P 1:4	0,8 - 1,8
WKH/HOZ/K/H/M 1:4	0,8 - 1,6
S 2	0,8 - 1,6

Erläuterungen: HK-hydr. Kalk, HOZ-Hochofenzement, WKH-Weißkalkhydrat, K-Kunststoffdispersion, P-Verdicker, H-Hydrophobierer, M-Methylcellulose, L-Luftporenbildner

Die Haftung der neuen Putze ist sehr gut, was die Ergebnisse zeigen. Es besteht ein guter Verbund zwischen dem Untergrund und der aufgetragenen Putzschicht.

#### 4.9 Zusammenfassung zu Kapitel 4

Am Kirchenschiff der frühbarocken Parochialkirche, des ersten nachreformatorischen Kirchenneubaus innerhalb der Berliner Stadtgrenzen, treten großflächig Schäden an den historischen Putzmörteln auf. Aufgrund der am Bauwerk gefundenen Putzreste mit einer Dicke von max. 1 cm, die Anteile an hydraulischem Kalk enthielten, wurde ein Putz für Ziegelmauerwerk entwickelt, der mit einer geringen Dicke aufgetragen werden kann. Es wurden folgende Bindemittelsysteme mit unterschiedlichen Bindemittel/Zuschlag-Verhältnissen untersucht:

- hydraulischer Kalk/Hochofenzement (80:20, i. Gew. T.)
- Weißkalkhydrat/Hochofenzement (70:30, i. Gew. T.)
- B/Z - Verhältnisse (1:4, 1:5, 1:7, 1:9, i. Gew. T.)

Bei der geringen Schichtdicke des Putzes und in Anlehnung an das historische Material war die Verwendung eines Zuschlages mit 1 mm Größtkorn erforderlich.

Es wurden Zusätze wie Hydrophobierer, Kunststoffdispersion und Methylcellulose eingesetzt, um die geforderte Dauerhaftigkeit und Resistenz gegen Umwelteinflüsse zu erreichen. Der systematische Einsatz der verschiedenen Zusätze erlaubt Aussagen über deren Einfluß auf die Mörtel­eigenschaften. Zusätzlich erfolgte zum Vergleich die Untersuchung von vier handelsüblichen Sanierputzen namhafter Hersteller.

Untersucht wurden Frisch- und Festmörtel­eigenschaften (z. B. Festigkeiten, Elastizitätsmodul, Frost-Tauwechsel-Widerstand, hygri­sche Kennwerte) und die Eigenschaften des Mörtel-Ziegel-Verbundes (insbesondere die Haftzugfestigkeit). Das Wasserrückhaltevermögen der Putze wurde mit Methylcellulose auf den stark saugenden Untergrund abgestimmt.

Aufgrund der Untersuchungen wies eine Vielzahl von Mörteln die gewünschten Eigenschaften auf.

Ausgewählte eigene Mörtel sowie ein handelsüblicher Sanierputz wurden bei zwei Vor-Ort-Terminen (08.-10.10.1996 und 05.-07.05.1997) an der Parochialkirche appliziert. Beim ersten anlegen der Musterflächen kam es bei allen Putzen (inkl. des industriellen Sanierputzes) zur Rißbildung. Sie wurde durch eine schnelle Wasserabgabe über die Putzoberfläche verursacht. Nach einem halben Jahr (Winter-Frühling) wurden die ersten Musterflächen begutachtet. Dabei wurden die Haftzugfestigkeiten vor Ort geprüft. Es konnte ein guter Verbund zwischen

---

den Putzen und ihrem Untergrund festgestellt werden. Die bei der Applikation entstandenen Risse haben sich nicht verändert.

Die Putze der zweiten Applikation (Mai 1997) blieben bei zweistufigen Anwendung (1. Tag: Fugen verfüllen, 2. Tag: Verputzen) bis heute (3 Jahre) rißfrei.

Die Entscheidung zwischen dem entwickelten Mörtel und dem Sanierputz dürfte unter den denkmalpflegerischen Gesichtspunkt zu Gunsten des im Laufe dieser Arbeit entwickelten Putzes ausfallen. Vorgeschlagen wurden die beiden bei der zweiten Applikation erfolgreich verwendeten und rißfrei gebliebenen Putze mit hydraulischem Kalk (80 M.-%) und Hochofenzement (20 M.-%) als Bindemittel und Kunststoffdispersion, Hydrophobierer, Methylcellulose und ohne bzw. mit Pangel als Zusatzmittel.

Nach den Informationen der ZHD Potsdam wird der Kirchenschiff der Parochialkirche im Jahre 2000 mit dem in diesen Projekt entwickeltem Putz verputzt. Hierbei handelt es sich um den Putz folgender Zusammensetzung:

- hydraulischer Kalk (80 M.-%) /Hochofenzement (20 M.-%)  
/Kunststoffdispersion/Hydrophobierer/Methylcellulose/Pangel mit  
einem B/Z-Verhältnis 1:5 (s. Tab. A6)

## 5 Entwicklung eines dauerhaften Betons mit Glaszuschlag

In einer weiteren Baustoffentwicklung sollte versucht werden Buntglas als Zuschlag für dauerhaften Beton einzusetzen. Da ein Beton ohne Zusätze mit solchem Zuschlag reagieren würde, sollte durch den Zusatz von Additiven die Reaktion abgeschwächt oder vermieden werden.

Silikat Glas kann im Beton mit der alkalischen Porenlösung des Zementsteins reagieren. Wie stark sich diese Reaktion auf die Betoneigenschaften auswirkt ist in der Literatur umstritten. Es wurden deshalb in diesem Projekt Proben mit unterschiedlichen Glaszuschlägen untersucht. Bei der Herstellung der Proben wurde zusätzlich Normsand nach DIN EN 196-1 als Zuschlag verwendet. Die Korngrößen des Normsandes sind keine betontypischen Korngrößen, doch die verwendeten Zusätze sind typisch für die Betonherstellung. Glaskörnungen mit der Größe 0 bis 8 mm wurden verwendet. Daher können die Ergebnisse der Untersuchungen auf Beton übertragen werden. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit von Beton gesprochen.

Die untersuchten Betonproben wurden auf Weißzementbasis mit drei verschiedenen Glasarten hergestellt. Es wurden Zusätze wie Fließmittel, Kunststoffdispersion, Hydrophobierungsmittel, Microsilica und Hüttensandmehl verwendet. Der systematische Einsatz der verschiedenen Zusätze soll Aussagen über deren Einfluß auf die Mörtel­eigenschaften erlauben. Die Proben wurden verschiedenen - z. T. extremen - Lagerungsarten unterzogen. Untersucht wurden die im Mikrogefüge stattfindenden Veränderungen wie z. B. Rißbildung, Reaktionssäume an Kontaktzonen zwischen Glas und Zementstein in Abhängigkeit von Lagerungsart und -dauer. Weiterhin wurde auch die Änderung der technologischen Eigenschaften wie Druckfestigkeit, dyn. E-Modul und Frost-Tauwechsel-Widerstand untersucht.

Aufgrund der Ergebnisse wurden die erprobten Zusatzmittelkombinationen auf ihren Einfluß zur Minimierung der Betonschädigung durch Glas-Zuschlag beurteilt.

Die Teilergebnisse wurden bereits in folgenden Artikeln veröffentlicht: WARIANKA 1999, WINNEFELD 1999.

## **5.1 Materialien und Ausgangsstoffe**

### **5.1.1 Bindemittel**

#### **Weißzement**

Es wurde CEM I 42,5 der Fa. Dyckerhoff mit dem Handelsnamen Dyckerhoff Weiß verwendet. Bei der Herstellung wird der Eisengehalt von Zement auf  $< 0,5\% \text{ Fe}_2\text{O}_3$  reduziert, was die weiße Farbe verursacht. Um eine höhere Weißheit zu erreichen, können dem Zement Aufheller wie Titanoxid zugegeben werden (STARK 1998).

Bei den Untersuchungen wurde bewußt Weißzement verwendet, da dieser einen niedrigen wirksamen Alkaligehalt besitzt und dadurch die Gefahr einer Alkalikieselsäurereaktion zwischen Zementmatrix und alkaliempfindlichen Glasstücken vermindert wird. Außerdem kann Weißzement im Falle der Herstellung von Sichtbetonelementen das optische Aussehen der Elemente verbessern.

Der verwendete Zement hat eine Dichte von  $3,15 \text{ g/cm}^3$  und spez. Oberfläche von  $3620 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

### **5.1.2 Zuschlag**

#### **Normsand**

Als Hauptzuschlag wurde CEN- Normsand der Firma Normsand GmbH, Beckum verwendet. Dieser Normsand entspricht der DIN EN 196-1.

Zusätzlich wurden 3 Glasarten in unterschiedlichen Mengen als Zuschlag verwendet.

#### **Quarzglas**

Verwendet wurden transparente zylinderförmige Quarzglasscherben der Fa. Ilmenau GmbH, die mit einem Backenbrecher zerkleinert wurden. Die Glasstücke wurden gesiebt und dem Mörtel als Zuschlag mit der Körnung von 1-8 mm beigemischt.

## **Buntglas**

Eingesetzt wurde auch buntes Recyclingsglas der Firma Reiling. Es wurde die Körnung 1-8 mm verwendet.

## **Glasfasern**

Hierbei handelt sich um feine mineralische Fasern, die aus der Glasschmelze hergestellt und als Cem-Fil ANTI-CRAK bezeichnet werden. In der Versuchsreihe wurde rosafarbige Glasfaser der Cem-Fil international Ltd. (Vetrotex) verwendet. Die mittlere Faserlänge betrug 6 mm und der durchschnittliche Durchmesser der Fasern 20  $\mu\text{m}$ .

### **5.1.3 Zusatzmittel und Zusatzstoffe**

Die Wirkungsweise der Zusatzmittel wurde bereits zum Teil im Kapitel 4.4.3 beschrieben.

#### **Fließmittel**

Fließmittel vermindern den Wasseranspruch. Sie verbessern die Verarbeitbarkeit und erhöhen die Festigkeit des erhärteten Mörtels. Durch die Verwendung der Fließmittel lassen sich z. B. der Frost-Tau-Wechsel-Widerstand, die Dichtigkeit und der Widerstand gegen chemischen Angriff erhöhen. Als Nebenerscheinungen können Luftporenbildung oder erhöhtes Schwinden auftreten.

Durch eine Erniedrigung der Oberflächenspannung wird eine bessere Benetzung der Feststoffanteile und verbesserte Dispergierung erreicht. Die innere Reibung wird vermindert. Daraus ergibt sich eine bessere Verarbeitbarkeit bei gleichem Wasser-Bindemittel-Verhältniss. Da Wasser mit geringer Oberflächenspannung leichter und schneller aus den Kapillaren verdunstet, muß eine gute Nachbehandlung gewährleistet sein.

Verwendet wurde das Fließmittel F 93 der Firma ADDIMENT AG.

### **Hydrophobierungsmittel**

Als Hydrophobierer wurde Liga Calciumstearat 350 der Firma Peter Greven, Fett - Chemie GmbH + Co KG verwendet.

### **Kunststoffdispersion**

Allen Mischungen ohne Fließmittel wurde die Kunststoffdispersion Mowilith LDM 6880 der Hoechst AG zugegeben.

Mowilith ist eine Substanz bestehend aus einer weichmacherfreien wäßrigen Copolymerisationsdispersion auf der Basis von Acrylsäureester und Styrol.

### **Luftporenbildner**

In der Versuchsreihe wurde ein flüssiger Luftporenbildner SA-94 der Heidelberger Baustofftechnik, Produktgruppe ADDIMENT AG, Sorten- Nr. 10177 verwendet.

### **Microsilica**

Microsilica ist ein  $\text{SiO}_2$ -Staub, der als Mikrofüller verwendet wird. Der Zusatz bewirkt ein Verdichten der Bindemittelmatrix (COHEN 1994).

Es wurde flüssiges Microsilica der Fa. ELKEM GmbH verwendet. Die Rohstoffbasis von Microsilica besteht aus amorphem Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) und ist nach DIN 1045 ein Zusatzstoff zur Herstellung von Hochleistungsbeton und Mörtel.

### **Glasmehl**

Laut STARK 1995 kann durch Zusatz einer ausreichenden Menge von gemahlenem Opal die AKR verhindert werden. Ursache dafür ist, daß feingemahlener reaktiver Zuschlag im frühen Stadium der Mörtelerhärtung, d. h. wenn der Mörtel noch plastisch ist, mit den Alkalien reagiert. Es folgt eine Abpufferung der Alkalien (LOCHER 1973). Gleichzeitig jedoch bringt das Glasmehl weitere Alkalien mit in den Mörtel ein.

Verwendet wurde hier das Glasmehl der Fa. Mineralien/Mahlwerk in Kuppenheim. Das verwendete Glasmehl besteht zu 71,39 Gew.-% aus  $\text{SiO}_2$  (Tabelle A9 im Anhang). Eingesetzt wurde Glasmehl mit einer Dichte von  $2,53 \text{ g/cm}^3$  und Oberfläche von  $2450 \text{ cm}^2/\text{g}$  (Tabelle A7 im Anhang).

## 5.2 Rezepturen

Als Bindemittel wurde aus optischen Gründen Weißzement (CEM I 42,5 R) ausgewählt. Die Probekörper wurden mit einem Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis von 1:4 hergestellt.

Es wurden Fließmittel (F), Kunststoffdispersion (K), Hydrophobierungsmittel (H), Microsilica (M), Glasmehl (G) und Hüttensandmehl (HS) als Zusätze eingesetzt. Als Zuschlag wurden Normsand sowie 3 Glasarten in unterschiedlichen Zusatzmengen (15, 30, 45 M.-% vom Zuschlag) verwendet. Bei den eingesetzten Glasarten handelte es sich um Quarzglas (A), buntes Recyclingglas (B) und Glasfasern (C).

Die Kombinationen der Zusatzmittel sind der Tabelle 9 und die genaue Zusammensetzungen der Mischungen mit den Zusatzmittelgehalten befinden sich im Anhang in der Tabelle A9.

Tabelle 9: Zusammensetzung der untersuchten Mischungen

NH/F	A/H/F/G/L
A15/NH/F	A45/H/K/G/L
A/NH/F	B15/NH/F
A/H/F	B/NH/F
A/H/F/14	B/H/F
A/H/K	B/H/F/14
A/H/F/M	B/H/K
A/H/K/M	B/H/F/G/L
A/H/F/G	B45/H/K/G/L
A/H/K/G	C/NH/F
A/H/K/M/G	C/H/F

Erklärungen: NH nicht hydrophobiert, H Hydrophobierer, F Fließmittel, K Kunststoffdispersion, M Microsilica, G Glasmehl, L Luftporenbildner, Zahlen: 14 Ausbreitmaß von 14 cm, sonst 17 cm; 15, 45 Glasanteil des Zuschlags in M.-%, sonst 30 M.-%, A Quarzglas, B buntes Recyclingglas, C mineralische Fäden

### 5.3 Herstellung der Prüfkörper

Die Mörtel wurden in Anlehnung an EN 196 Teil 1 hergestellt, der Wasser/Bindemittel-Wert (W/B-Wert) wurde entsprechend einem Ausbreitmaß von 17 bzw.  $14 \pm 0,5$  cm eingestellt. Als Prüfkörper wurden - Normprismen der Abmessungen 4 cm x 4 cm x 16 cm mit einem Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis von 1:4 in Gew.-T. hergestellt. Die Prismen verblieben bis zum zehnten Tag im Klima 20 °C und 95 % r.F. Anschließend wurden sie vier verschiedenen Klimata ausgesetzt.

### 5.4 Lagerung der Prüfkörper

Zum Vergleich der Einflüsse verschiedener Klimata auf die Alkali-Kieselsäurereaktion wurden die Prüfkörper in Räumen mit vier verschiedenen Bedingungen gelagert:

- Innenraumlagerung (23°C / 50 % rel. Luftfeuchte)
- Außenlagerung ohne Überdachung (den Witterungseinflüssen ausgesetzt)
- Lagerung in einer „Nebelkammer“ (40 °C / 100 % rel. Luftfeuchte)
- Wechsellagerung: 1 Tag unter Wasser, 6 Tage Lagerung im Klima 23°C / 50 % rel. Luftfeuchte

Die „Nebelkammerlagerung“ mit 40° C und mind. 90% rel. Luftfeuchte ist nach STARK 1995 und WALZ 1973 als pessimal für die Reaktion anzusehen. Weiterhin ist wechselnde Durchfeuchtung gefährlicher als eine ständige Durchfeuchtung der Bauwerke (STARK 1995).

## 5.5 Ergebnisse

In der folgenden Kapiteln werden die für die Dauerhaftigkeit des „Glas-Betons“ relevanten Untersuchungsergebnisse beschrieben.

### 5.5.1 Makroskopischen Beobachtungen

Bei den in der Nebelkammer gelagerten Prismen können bei einigen Mischungen Risse festgestellt werden. Es handelt sich um Risse oder Rißsysteme (Abb. 11) verschiedener Breiten und Längen, vorwiegend jedoch um Haarrisse. Die einzeln auftretenden Risse mit Längen im Millimeterbereich verlaufen alle entlang der Längsseite der Prismen und sind meistens in Zusammenhang mit Glaskörnern (Abb. 12) zu bringen.

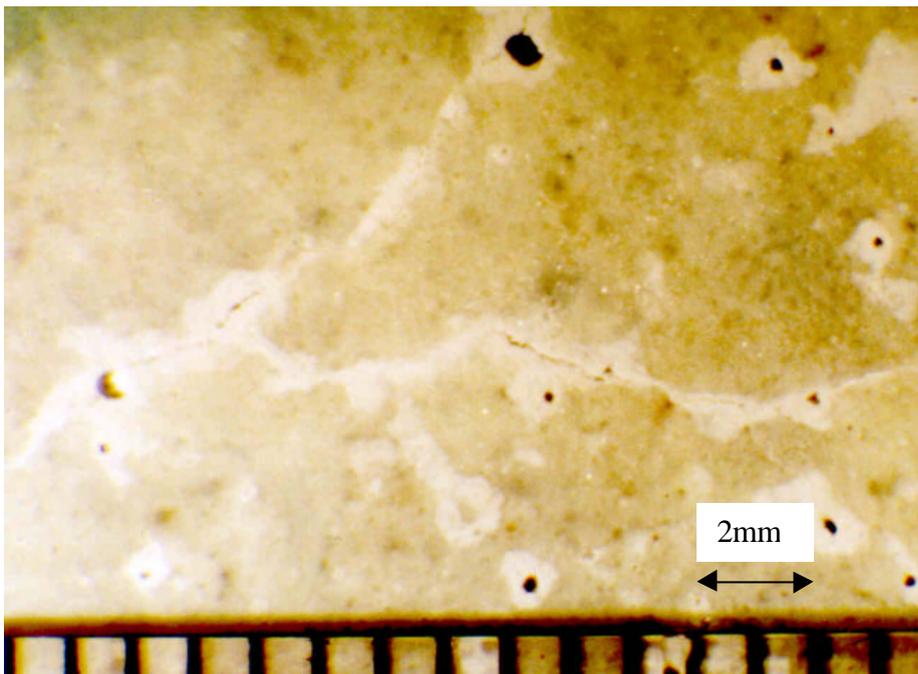


Abbildung 11: Makroskopische Aufnahme der Risse in der Probe A/H/F/G nach der halbjährigen Nebelkammerlagerung

Am stärksten geschädigt wurden Proben mit Microsilica und Glasmehl sowie die mit den höchsten Glasgehalten.



Abbildung 12: Mikroskopische Aufnahme der um ein Glaskorn angeordneten Risse in der Probe B45/H/K/G/L die 9 Monate in der Nebelkammer gelagert wurde.

### 5.5.2 Mikroskopie

Mikroskopische Untersuchungen dienen der Feststellung von Rissen in den Proben, welche z. B. auf eine Reaktion zwischen Glas und Zementsteinmatrix zurückzuführen sind. Weiterhin können Produkte der Alkali-Kieselsäurereaktion beobachtet werden.

### 5.5.2.1 Auflichtmikroskopie

Diese Untersuchungen wurden nach 3 Monaten durchgeführt. Dabei wurden besonders bei Proben mit dichterem Gefüge und Glasart A (Quarzglas) vereinzelt Risse festgestellt. An Kontaktflächen von Glas und Zementsteinmatrix sind Ablösungen zu beobachten. Die Rißbreiten liegen jedoch im  $\mu\text{m}$ -Bereich. Diese Risse können sich später eventuell zu erheblichen Schäden der Betonteile entwickeln.

Rißbildung ist zu diesem Zeitpunkt der Lagerung nur in der Nebelkammer zu beobachten, weil es sich hierbei um die Lagerung mit den extremsten Bedingungen handelt.

Die folgenden auflichtmikroskopischen Bilder (Abb. 13 und 14) zeigen Ablösungen an Kontaktflächen von Glas und Zementstein bei makroskopisch noch unbeschädigten Mörtelproben. Die entstandenen Risse setzen sich in der Zementsteinmatrix fort. Sie breiten sich strahlenförmig von den Glaskörnern aus.

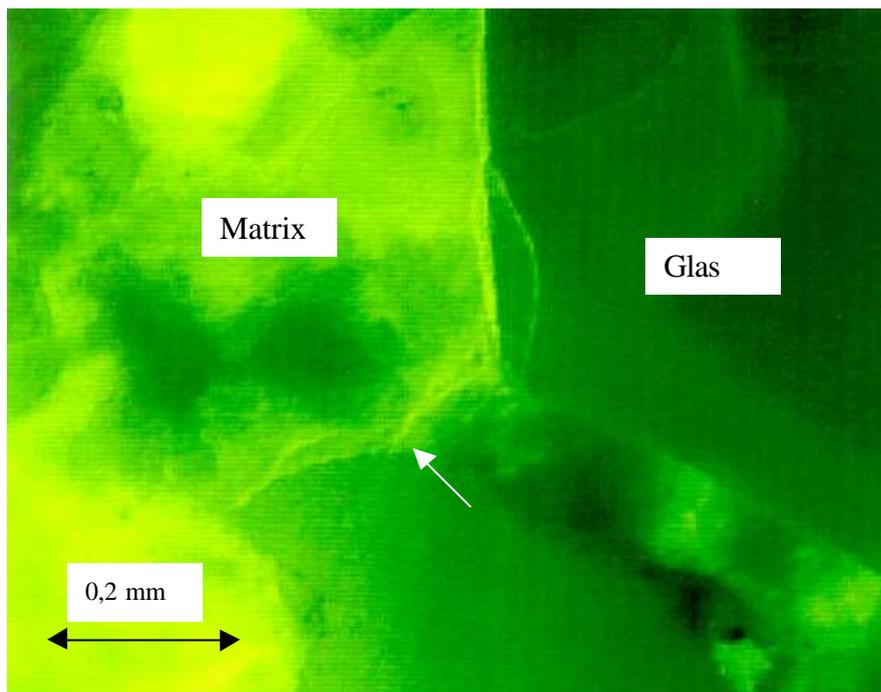


Abbildung 13: Mikroskopische Aufnahme der strahlenförmig vom Glas ausgehenden feinen Risse, die sich in der Zementsteinmatrix der Probe A/H/K/M fortsetzen; nach 3-monatiger Lagerung in der Nebelkammer

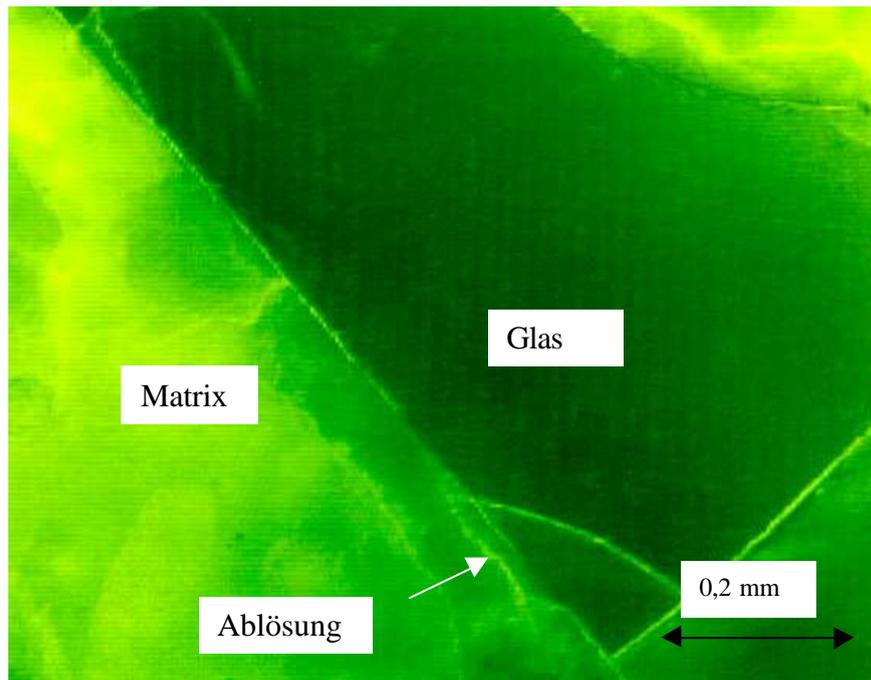


Abbildung 14: Mikroskopische Aufnahme der Ablösungen eines Glaskorns von der Zementsteinmatrix und erste Risse im Glaszuschlag der Probe A/H/K/M nach 3-monatiger Lagerung in der Nebelkammer

Auf den Bildern sind bereits einige Risse in den Glaskörnern zu sehen, die, wie später gezeigt wird, am stärksten bei der Lagerung in der Nebelkammer auftreten.

Die Risse und Ablösungen (wie z. B. in Abb. 14) wurden nur in einigen wenigen Proben beobachtet. Bei den Proben handelt es sich um die Prismen, die mit Zusatz von Quarzglas, Hydrophobierer, Kunststoffdispersion und Microsilica bzw. Glasmehl hergestellt wurden. Aufgrund der Microsilica-Verwendung stieg die Dichtigkeit der Matrix und somit die Druckfestigkeit der Proben. Diese Proben reagieren empfindlicher auf innere Drücke aufgrund der Treibreaktionen.

### 5.5.2.2 Durchlichtmikroskopie

Nach einem erfolgreichem Versuch, die Alkali-Kieselsäure-Reaktion, ihre Produkte und die entstehenden Schäden mit einem Polarisationsmikroskop im Durchlicht zu beobachten, wurden die lichtmikroskopischen Untersuchungen zu weiteren Prüfterminen an Dünnschliffen vorgenommen.

In Laufe der Lagerung wurde beobachtet, daß einige der Proben in der Nebelkammer nach 6 Monaten makroskopisch sichtbare Risse aufwiesen. Dabei handelte es sich um Proben, die, wie bereits beschrieben, nach 3 Monaten mikroskopische Schäden zeigten.

Von den geschädigten Proben wurden nach 6 und 9 Monaten Lagerungsdauer Dünnschliffe mit blau eingefärbten Kunstharz hergestellt und untersucht.

Die mikroskopische Untersuchung an den Dünnschliffen zeigte, daß das Schadensbild an den Glasstücken von der Glasart abhängt. Die Quarzglaszuschläge zeigen Risse und Rißsysteme (Abbildungen 17 und 18), während die Recyclinggläser deutliche Auflösungs- und Anätzungserscheinungen an den Korngrenzen aufweisen (Abbildungen 21 und 22).

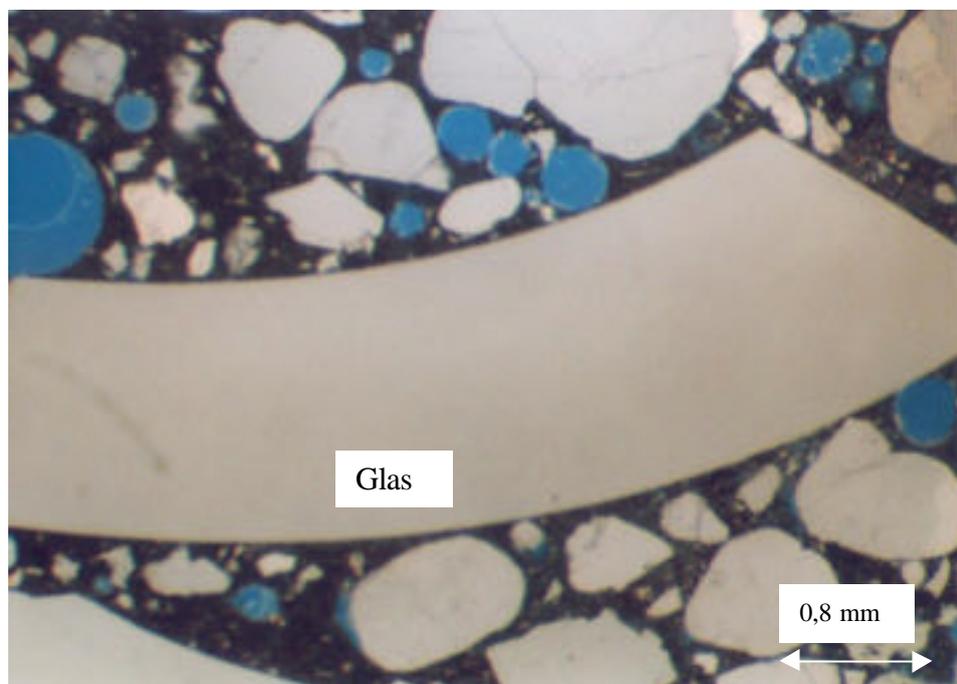


Abbildung 15: Lichtmikroskopische Aufnahme eines rißfreien Glaszuschlagkorns der Probe A45/H/K/G/L nach 9-monatigen Lagerung im Innenraum

Bei der Untersuchung zeigte sich weiterhin eine Abhängigkeit sowohl der Rißmenge wie auch der Kornanätzung von der Lagerungsart. Die in der Nebelkammer gelagerten Proben zeigen die meisten Schäden an den Glaskörnern (Abb. 16). Im Gegensatz dazu zeigen die im Innenraum gelagerten Proben gar keine Änderungen an den Glaszuschlägen (Abb. 15). Die Glaskörner der Proben aus dieser Lagerung sind rißfrei und haben scharfe Korngrenzen ohne Reaktionssäume. Die Schadenfreiheit der Glaspartikel in den Proben dieser Lagerungsart bestätigt auch, daß die Risse in den anderen Proben weder bei der Probenherstellung noch bei der Schliiffpräparation entstanden sein können.

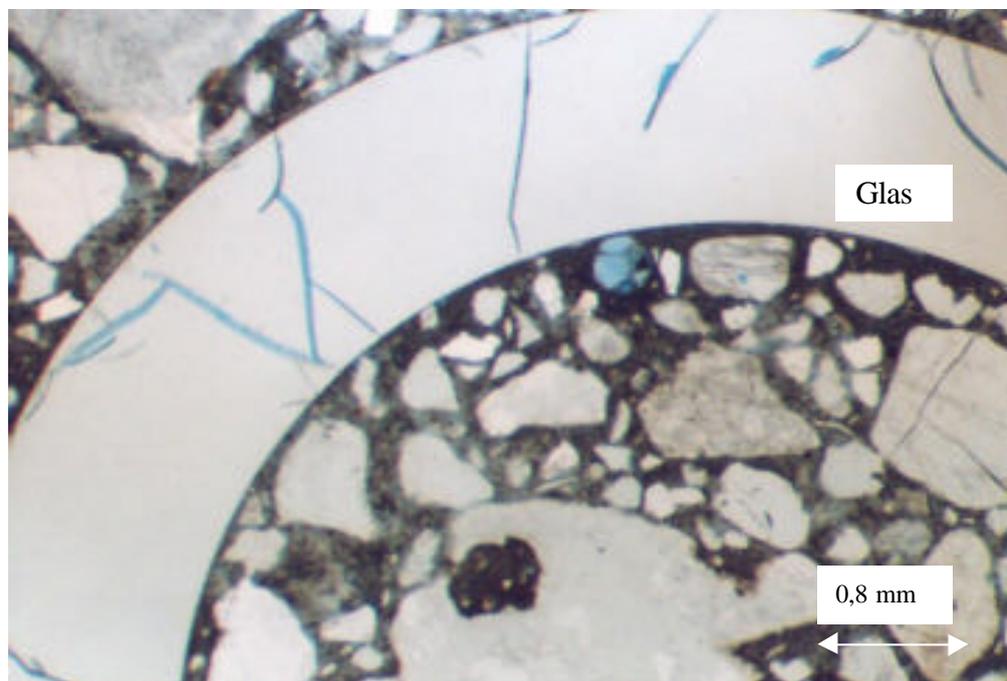


Abbildung 16: Lichtmikroskopische Aufnahme eines Glaszuschlagkorns der Probe A/H/F/G nach 9-monatigen Lagerung in der Nebelkammer

Die Proben, die den Witterungseinflüssen ausgesetzt waren und im Freien neben wechselnder Durchfeuchtung auch Temperaturwechsel erfuhren, weisen etwas stärkere Schäden auf als die feucht-trocken-wechselgelagerten Proben.

Außer der Rissen wurden auch einige Ablösungen des Zementsteines vom Glaszuschlag bei den Quarzglasstücken beobachtet (Abb. 18). Es sind deutliche Spalten zwischen den Glaskörnern und der Zementsteinmatrix zu sehen. Die Kornränder zeigen keine scharfen Grenzen sondern Gelreste auf beiden Seiten der Rißflanken.

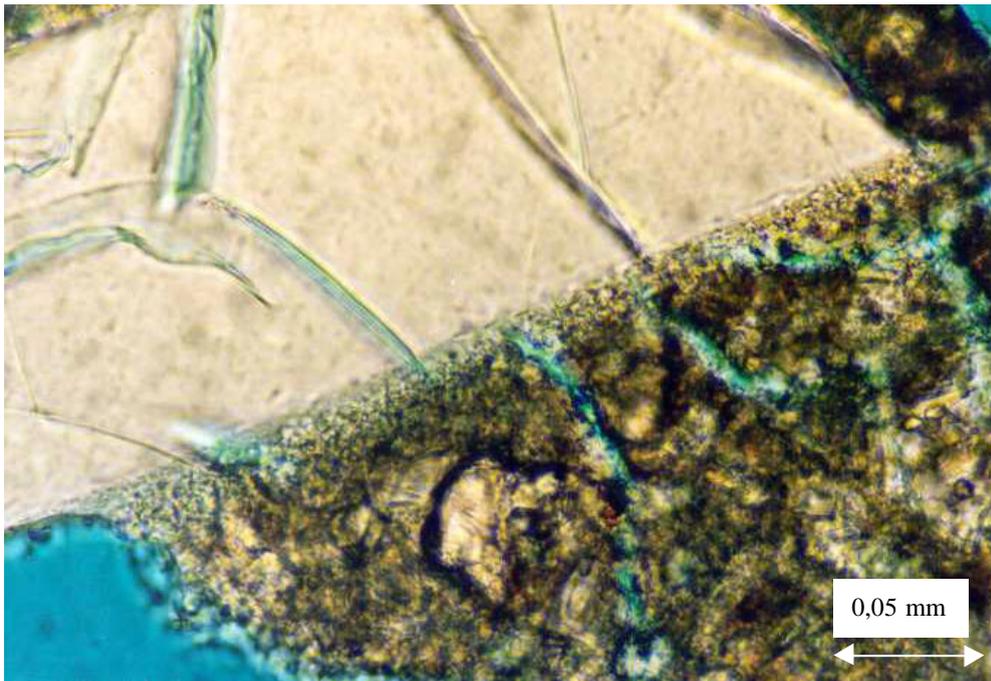


Abbildung 17: Lichtmikroskopische Aufnahme einiger Risse im Glas, die sich in der Zementmatrix der Probe A/H/F/G fortsetzen nach 6-monatiger Nebelkammerlagerung

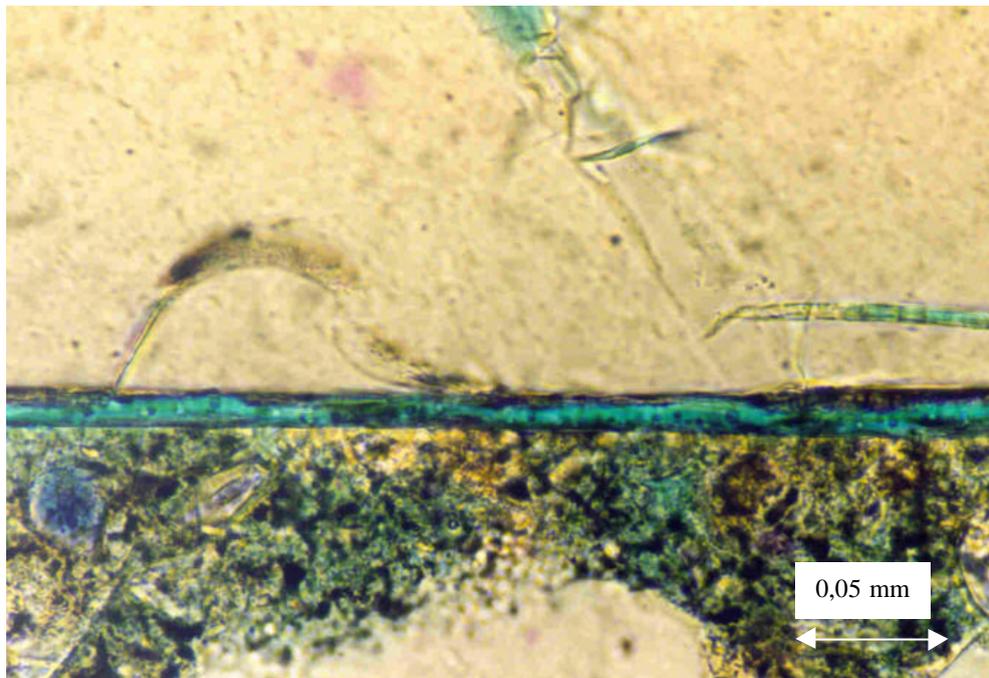


Abbildung 18: Lichtmikroskopische Aufnahme der Ablösung der Glaskörner von der Matrix in der Probe A/H/K/G nach 6-monatiger Nebelkammerlagerung

Die mikroskopischen Risse (Abb. 17) in den Proben mit Quarzglaszuschlägen, verteilen sich genauso wie die makroskopischen strahlenförmig um die Glasstücke (Abb. 12). Nicht alle Risse setzen sich in der Zementsteinmatrix fort. Die meisten Risse ziehen sich nur durch die Glaskörner. Sie verlaufen bogenförmig oder abgeknickt. Zu beobachten sind einzeln verlaufende Risse genauso wie verzweigte Rißsysteme. Manche Risse hören mitten im Korn auf. Bei starken Vergrößerungen können am Ende solcher Risse Schwächezonen (Abb. 20), die weiteren Angriff ermöglichen, sowie Gelbildung (Abb. 19), beobachtet werden. Schwächezonen können auch an anderen Stellen in den Glasstücken auftreten. Sie entstehen aufgrund von Innendruck, der bei der Alkali-Kieselsäurereaktion entsteht (SPRUNG 1998). An solchen Stellen sind viele kleine Risse, wie bei einem zerdrückten, jedoch nicht zerbrochenem Glasstück zu beobachten (Abb. 20).

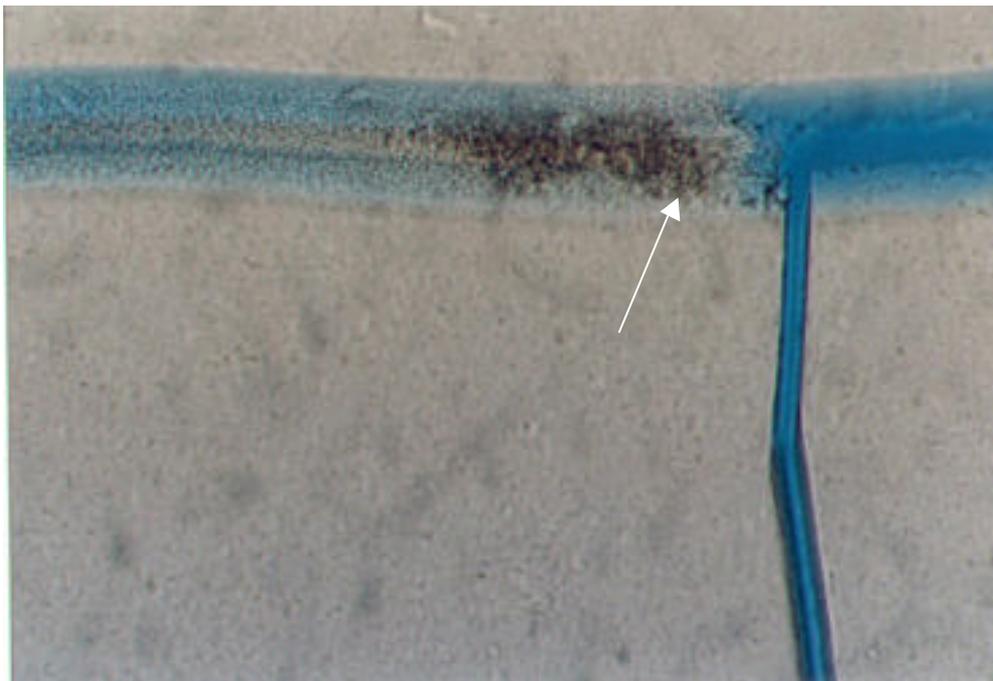


Abbildung 19: Lichtmikroskopische Aufnahme eines mit Gel gefüllten Risses im Glaskorn der Probe A45/H/K/K/G/L nach einer 9-monatigen Nebelkammerlagerung

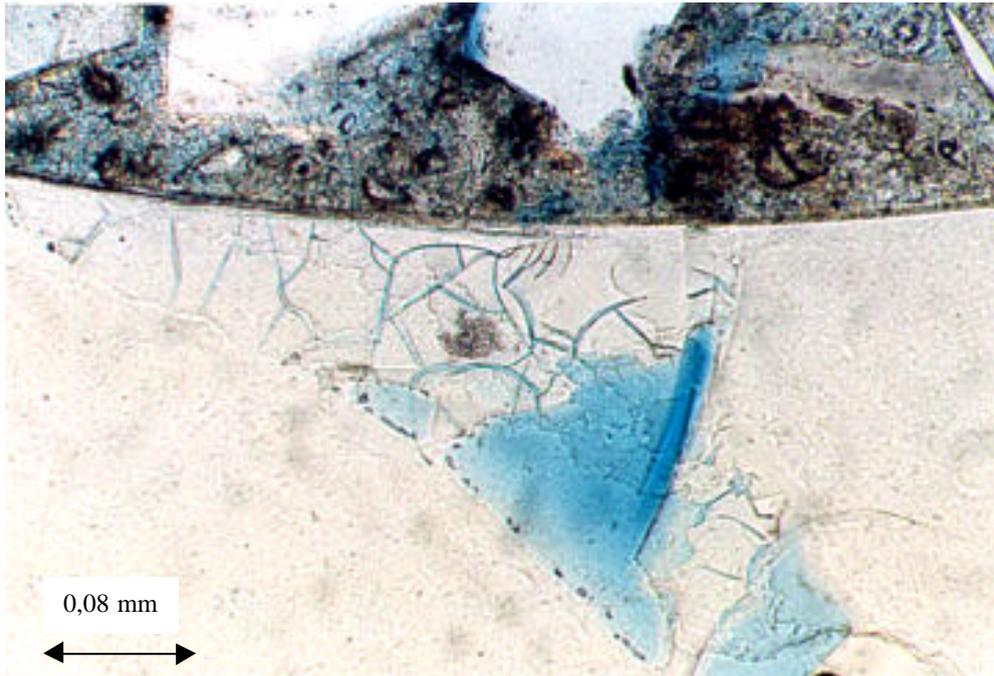


Abbildung 20: Lichtmikroskopische Aufnahme der Schäden, die vermutlich durch den Druck im Inneren der Glaskörner der Probe A/H/F/G nach einer 9-monatigen Lagerung in der Nebelkammer entstehen

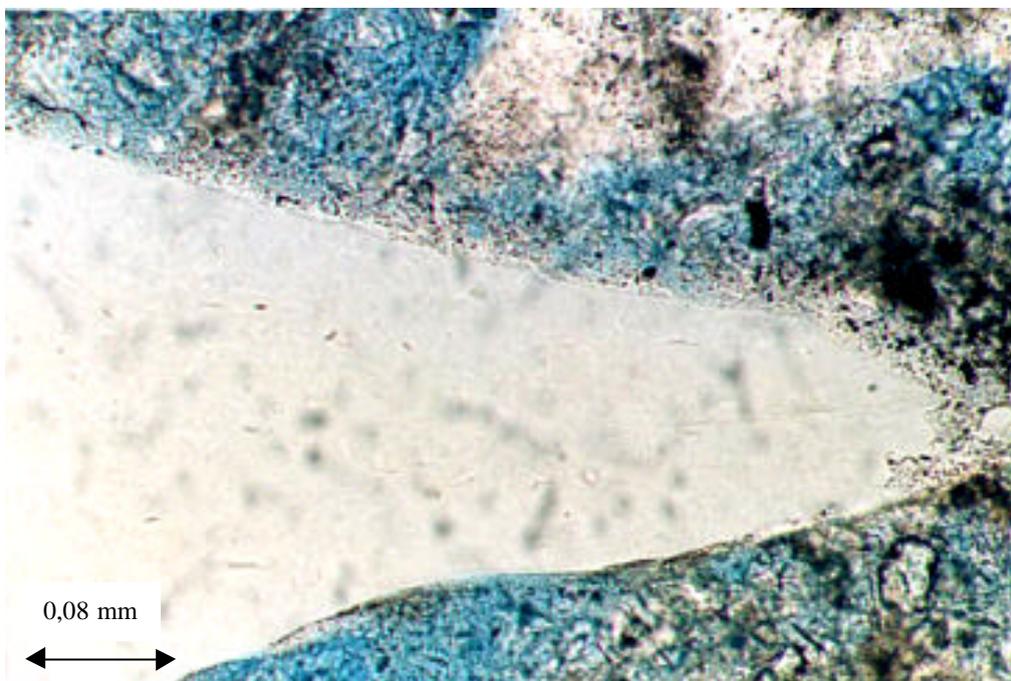


Abbildung 21: Lichtmikroskopische Aufnahme eines angelösten Buntglaskorns der Probe B45/H/K/G/L nach einer Nebelkammer-Lagerung von 9 Monaten

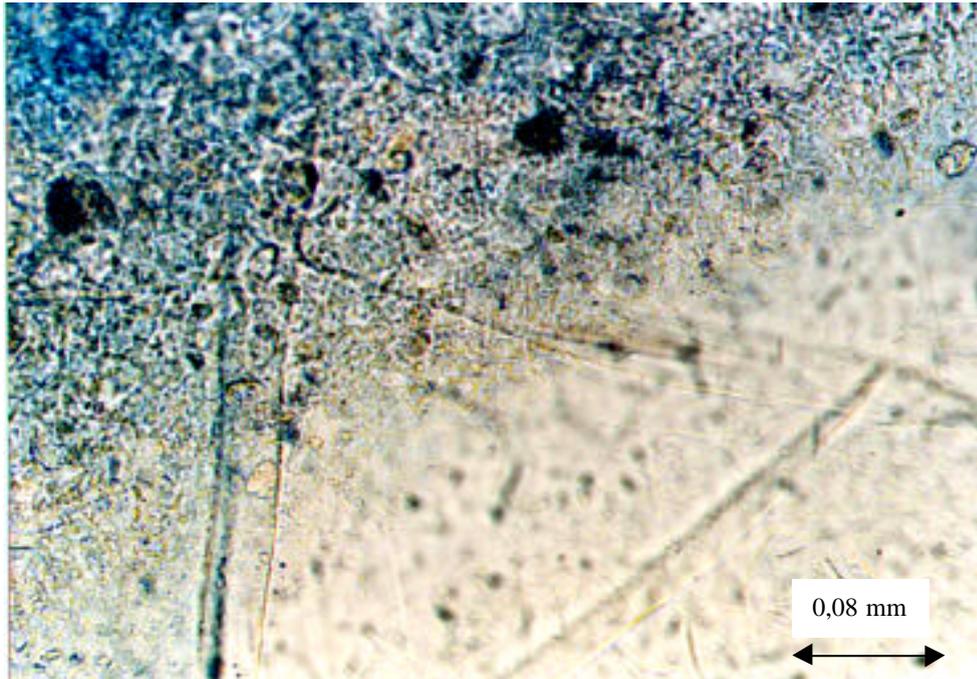


Abbildung 22: Lichtmikroskopische Aufnahme der Gelbildung an der Grenze zu einem Buntglaskorn der Probe B/NH/F nach einer 9-monatigen Nebelkammer-Lagerung

Wie bereits erwähnt, sind an den Glaskörnern des Recyclingglases Reaktionssäume sowie Gelbildung zu erkennen (Abb. 21 und 22). Die Körner sind angelöst, angeätzt und zeigen in vielen Fällen keine scharfen Korngrenzen mehr. An den Übergängen zwischen Glas und Zementsteinmatrix sind Gelstrukturen erkennbar. Die Recyclinggläser zeigen fast keine Risse.

### 5.5.2.3 Rasterelektronenmikroskopie

Die geschädigten Proben wurden auch mit dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Diese Untersuchungen erfolgten nach 3 und 9 Monaten.

Hierbei konnte bereits bei dem ersten Prüftermin bei einigen Glaskörnern eine Reaktionszone festgestellt werden, wobei zum Teil die Glasoberfläche angeätzt war. Ebenso fanden an den Kontaktflächen des Glases mit der Zementsteinmatrix einige Ablösungen statt. Auch hier sind netzartig verbreitete Risse infolge dieser Reaktion zu erkennen (Abb. 23).

Ähnliche Risse entstehen auch beim Schwinden der Bindemittelmatrix, doch hier sind sie vorwiegend an den Glasgrenzflächen zu beobachten.

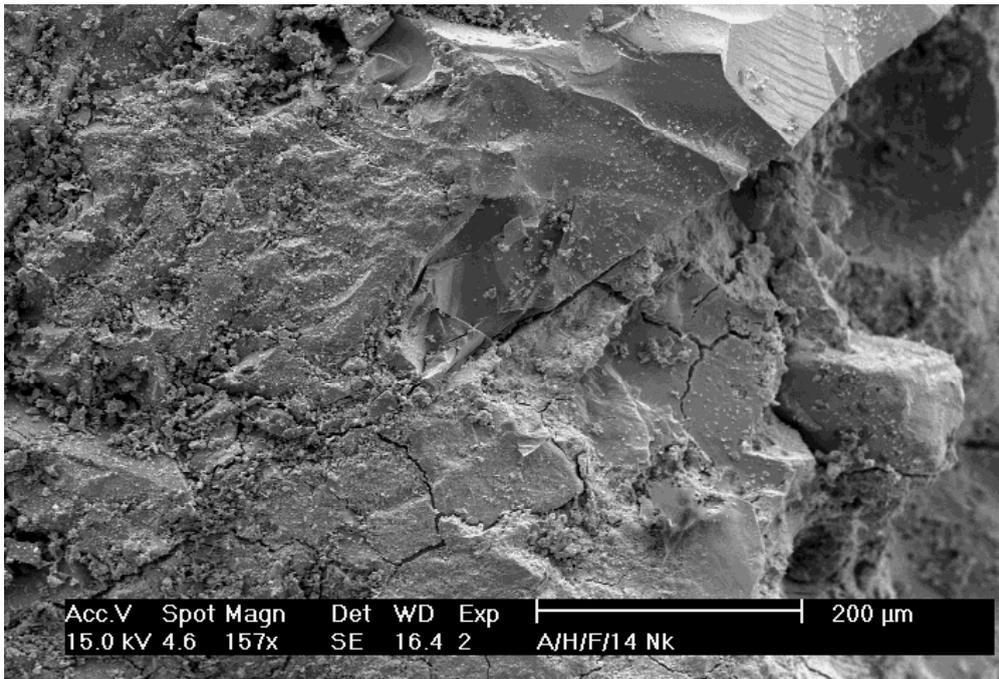
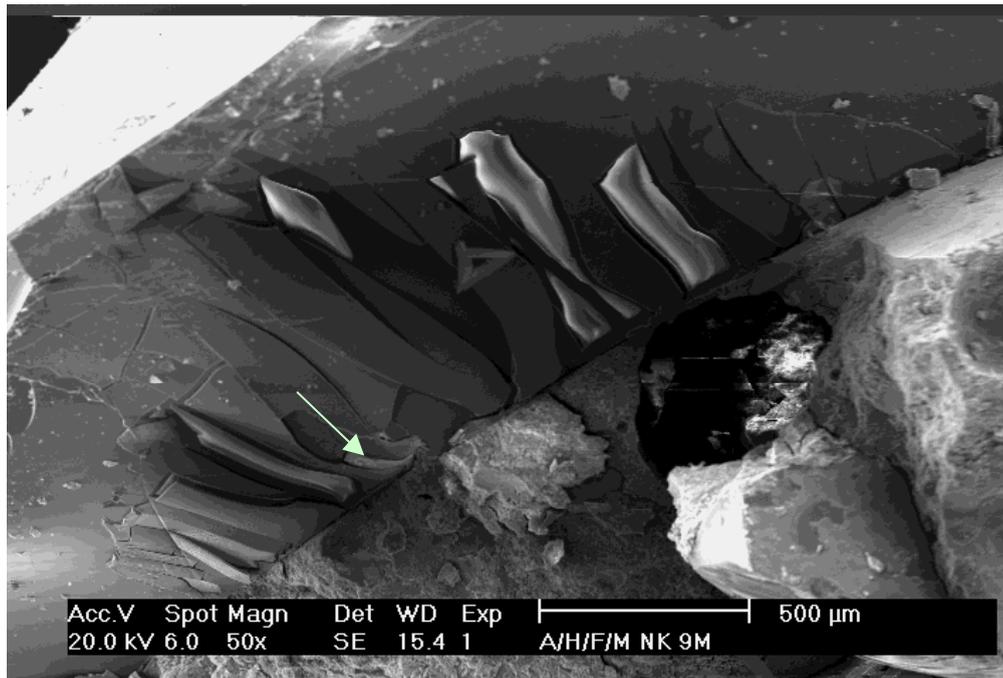


Abbildung 23: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einiger Risse in der Zementsteinmatrix um ein Glaskorn, die in der Probe A/H/F/14 bereits nach 9 monatigen Lagerung in der Nebelkammer, zu beobachten sind.

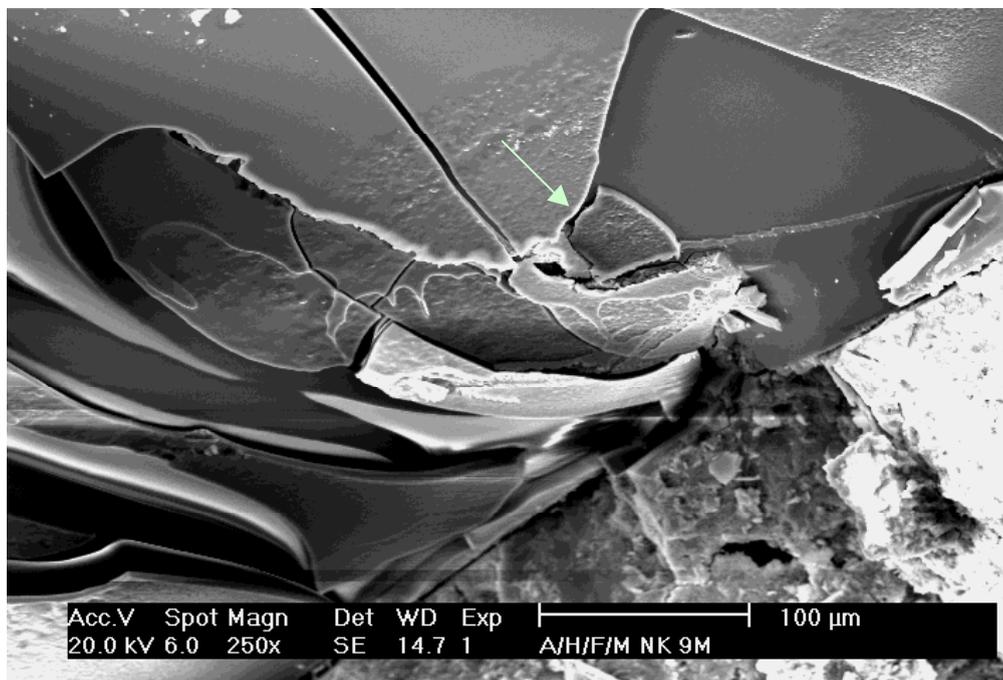
Nach 9 Monaten sind im Inneren der Quarzglas-Körner Bereiche zu beobachten, die als Grund der Risse in den Glaskörnern zu interpretieren sind. Sie besitzen eine andere Struktur und größeres Volumen als das sie umgebende Glas. Diese Beobachtung bestätigt den von SPRUNG 1998 beschriebenen Reaktionsmechanismus (s. S. 20). Hierbei führen erst bestimmte Konzentrationen an Alkalien zu einer Treibreaktion. Da die Alkalikonzentrationen im Quarzglas niedriger sind als im Buntglas, reichern sich die Alkalien - nachdem sie von der Porenlösung mobilisiert wurden - langsam immer tiefer im Glas an.

In Abbildung 24 ist in einer Bildfolge - bei immer weiter steigenden Vergrößerung - die Ursache für den Schaden im Inneren der Glaskörner zu beobachten. Im letzten Bild der Folge ist Gelbildung und darauffolgende Rißentstehung zu sehen.

Die Abbildungen 25 und 26 zeigen weitere Beispiele für die Gelbildung in den Glasstücken. Solche Beobachtungen konnten nur in den Proben gemacht werden, bei denen bereits makroskopische Schäden zu sehen waren.

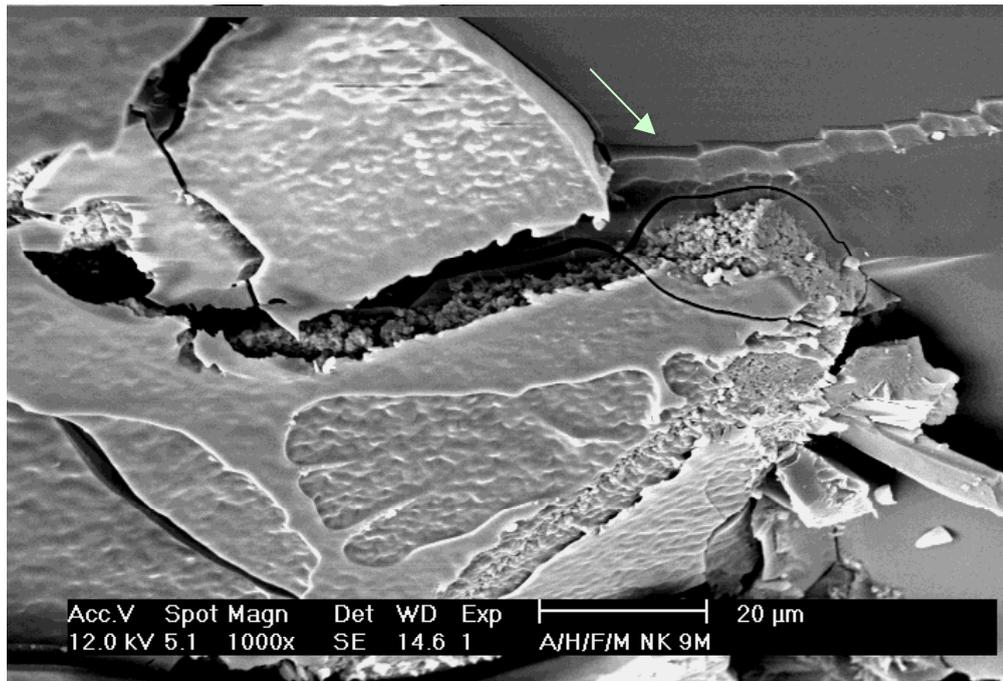


a)

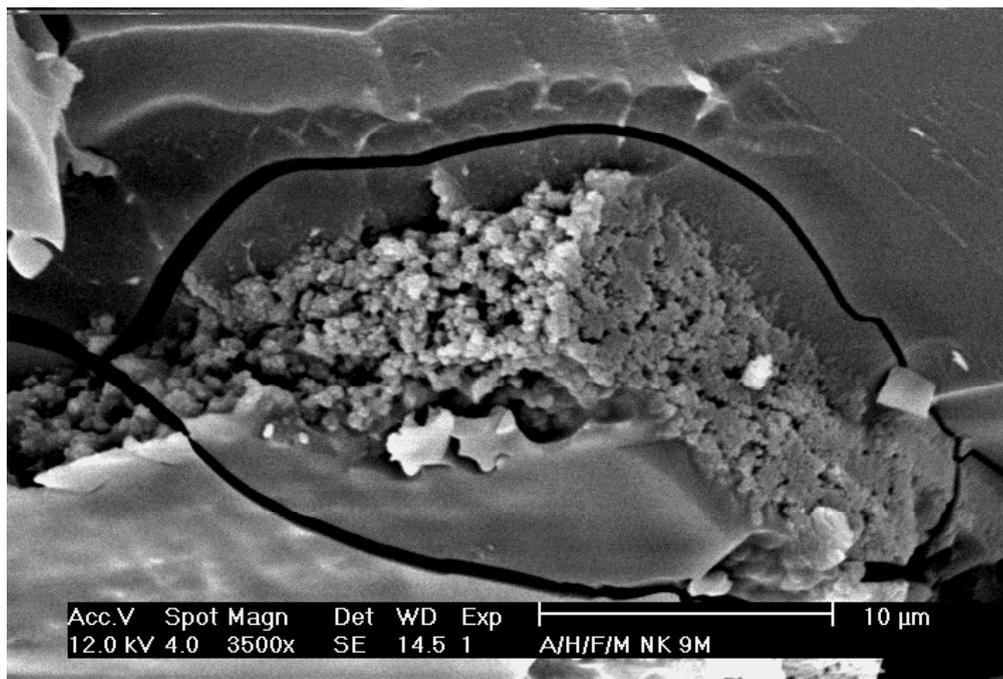


b)

Abbildung 24 a bis d: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: Gelbildung im Inneren (Anschnitt durch die Präparation) der Glaskörner der Probe A/H/FM als Ursache für Schäden.



c)



d)

Abbildung 24 a bis d: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: Gelbildung im Inneren der Glaskörner (Anschnitt durch die Präparation) der Probe A/H/F/G als Ursache für Schäden.

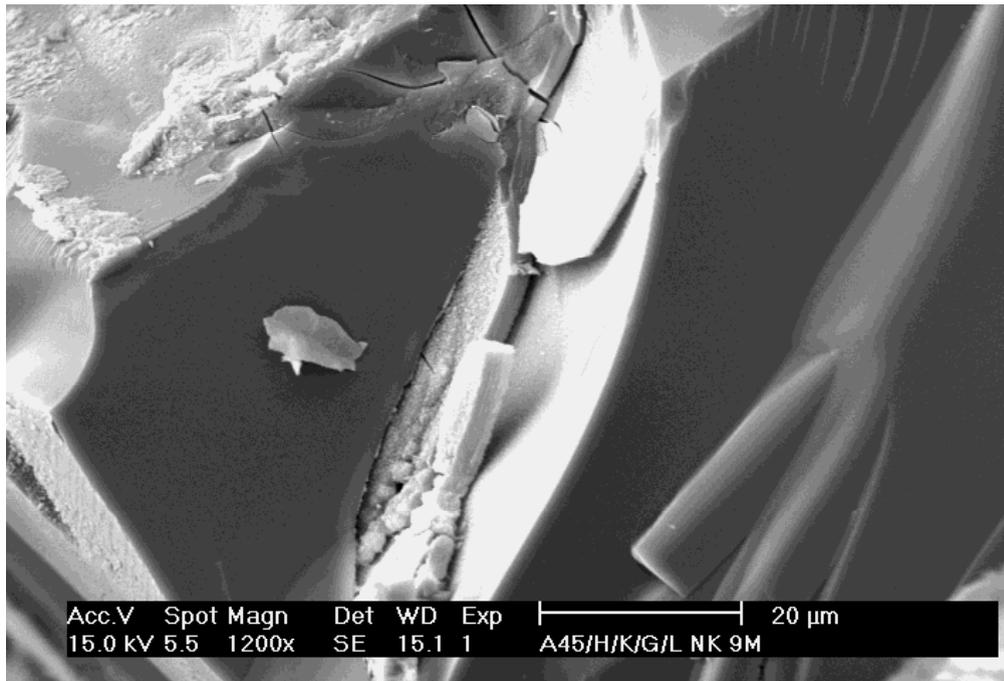


Abbildung 25: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: Gelbildung im Inneren der Glaskörner (Anschnitt durch die Präparation) der Probe A45/H/K/G/L

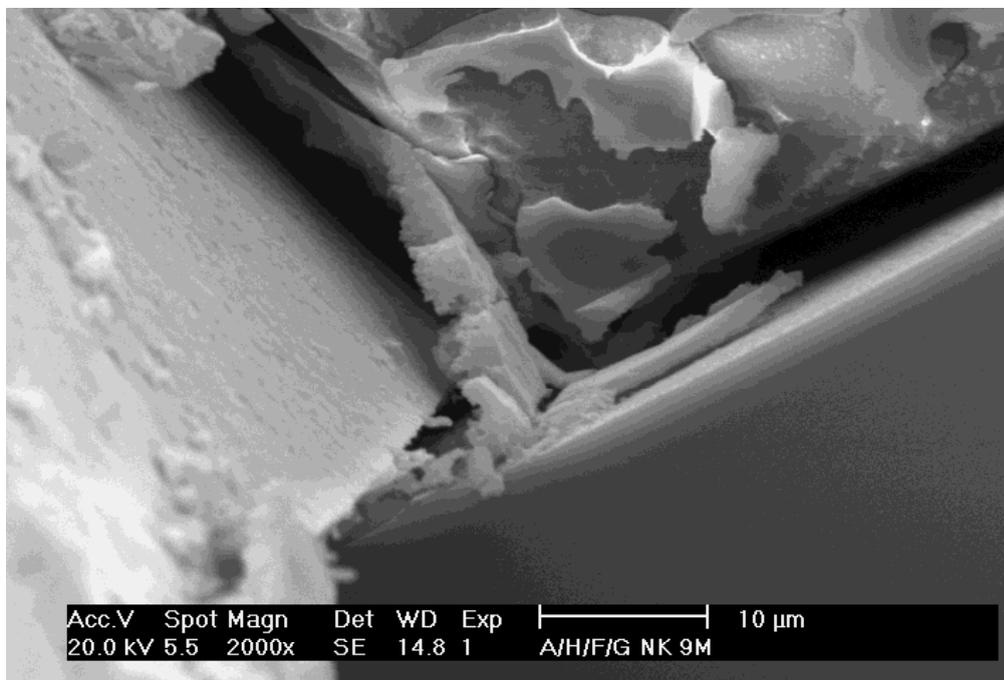


Abbildung 26: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: Gelbildung an der Grenze zwischen Glas und Zementstein in der Probe A/H/F/G

Zusätzlich ist in den Proben mit Quarzglas eine Ablösung von Schichten an der Glasoberfläche zu erkennen (Abb. 27). Diese Schichten sehen ähnlich aus wie die quellenden Bereiche im Inneren der Glaskörner. Deswegen kann vermutet werden, daß es sich hierbei um Glas, welches zu Gel umgewandelt wurde, handelt.

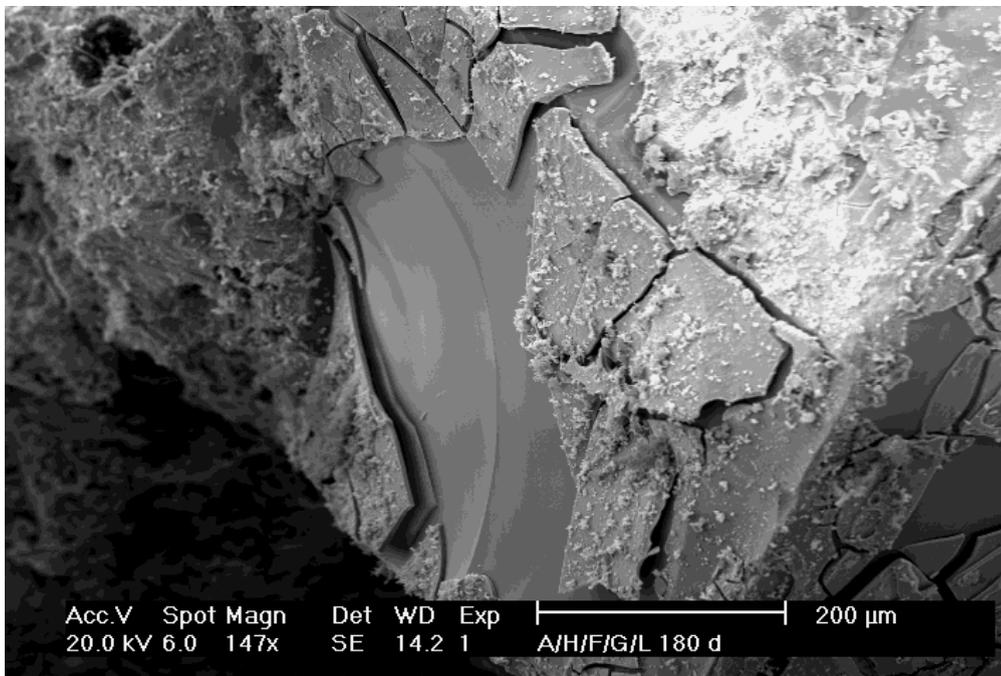
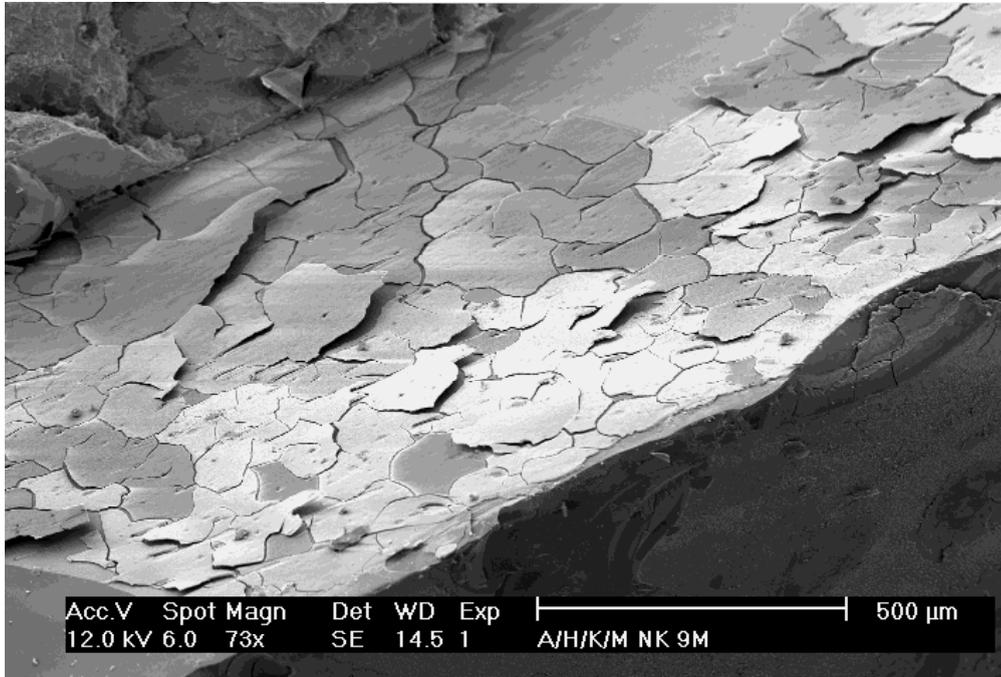


Abbildung 27: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme: Ablösung von Schichten an der Glasoberfläche an zwei Beispielen 1. Probe A/H/K/M nach 9 Monaten in der Nebelkammer, 2. Probe A/H/F/G/L bereits nach 6 Monaten in der Nebelkammer

Bei den Proben mit Buntglas konnten an den Glasoberflächen Ätzstrukturen (Abb.28) beobachtet werden, die bei Quarzglas nicht zu finden waren. Bei dieser Glasart waren auch zu Gel umgewandelte Glasoberflächen (Abb. 29) zu sehen, sie waren jedoch im Verbund mit der Glasunterlage und zeigten keine Ablösung vom Glas. Dies bestätigt die bereits unter den Durchlichtmikroskop beobachteten Unterschiede zwischen den zwei Glasarten und die dort festgestellten Auswirkungen der Alkali-Kieselsäure-Reaktion.

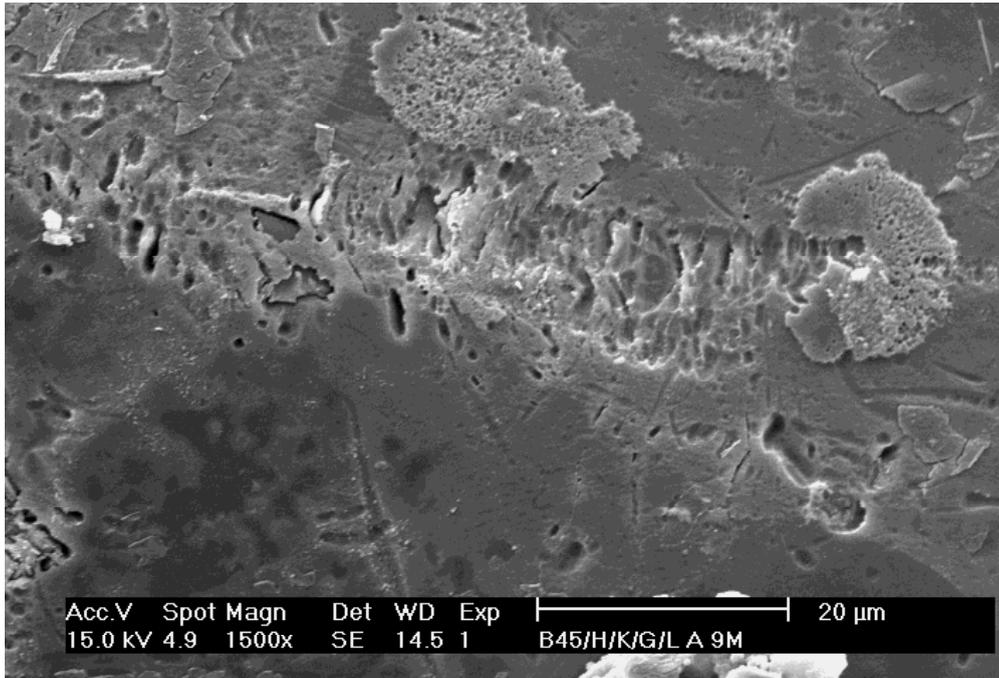


Abbildung 28: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Ätzstrukturen an der Oberfläche der Buntglaszuschläge der Probe B45/H/K/G/L nach 9 monatigen Lagerung in der Nebelkammer

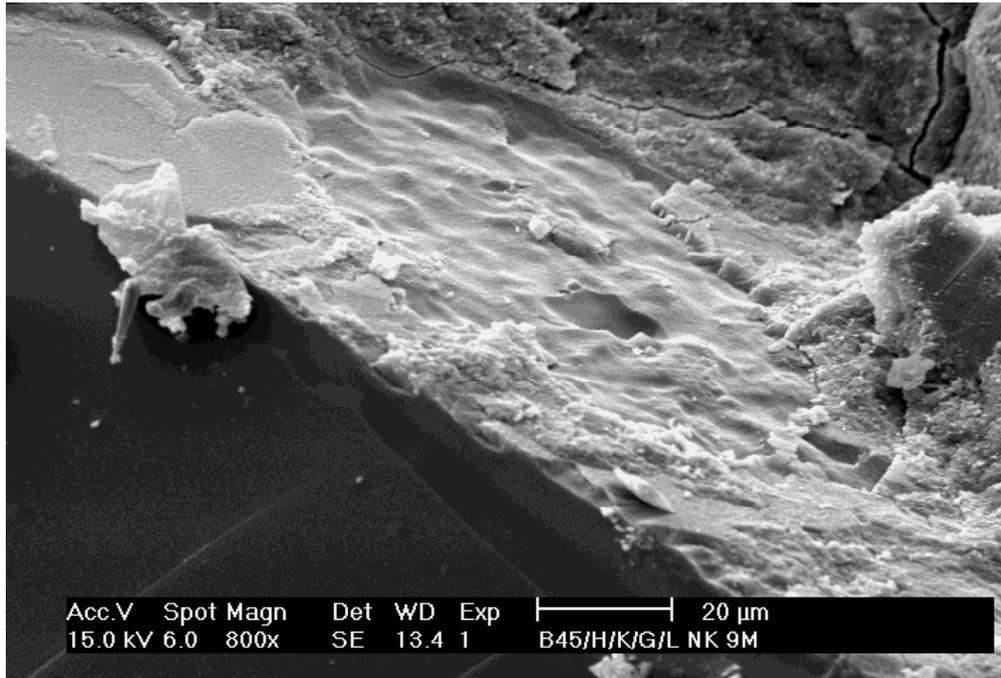


Abbildung 29: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Oberfläche eines Buntglaskorns mit einer Gelschicht in der Probe B45/H/K/G/L, nach 9 monatigen Lagerung in der Nebelkammer

### 5.5.3 Technologische Kennwerte

#### 5.5.3.1 Luftporengehalte im Frischmörtel

Nach STARK 1996 liegen die Luftporengehalte im Frischbeton im Bereich von 0,5 bis 6,0 %. Demzufolge liegen die hier vorgestellten Proben im oberen Bereich der Porengehalte. Dies erlaubt uns Vergleiche zwischen den untersuchten Mörtelproben Proben und Beton zu ziehen.

Der Luftporenbildner erhöht erwartungsgemäß die Luftporengehalte der Mischungen mit Fließmittel (siehe Tabelle 10) unabhängig von der Glasart. Dagegen führte der Luftporenbildner bei den Mischungen mit Kunststoffdispersion zur keiner eindeutigen Änderung des Luftporengehaltes gegenüber anderen Mischungen.

Nach STARK1996 zeigen Untersuchungen, daß das Gesamtporenvolumen von Mörtel nicht unbedingt durch die Zugabe von Microsilica verringert wird. Vielmehr ist eine Verschiebung

der Porenradienverteilung zu kleineren Porendurchmessern zu beobachten. Durch das Auffüllen der Zwickel zwischen den Zementpartikeln sinkt einerseits der Wasserverbrauch, andererseits bindet 1 kg Microsilica aufgrund der hohen Oberfläche ca. 1 Liter Wasser und erhöht damit den Wasserbedarf. Deshalb werden bei Verwendung von Microsilica im Beton und Mörtel in der Regel auch Fließmittel zugesetzt (STARK 1996).

Bei den untersuchten Proben weisen jedoch die Mischungen mit Microsilica und Kunststoffdispersion höhere Luftporengehalte auf als die Mischungen mit Fließmittel.

Tabelle 10: Luftporengehalte im Frischbeton mit Glaszuschlag

Probebezeichnung	Luftporengehalt [ Vol% ]	Probebezeichnung	Luftporengehalt [ Vol% ]
NH/F	3,6	A/H/F/G/L	6,1
A15/NH/F	3,7	A45/H/K/G/L	4,3
A/NH/F	3,4	B15/NH/F	4,0
A/H/F	4,0	B/NH/F	4,1
A/H/F/14	4,6	B/H/F	4,1
A/H/K	1,9	B/H/F/14	4,2
A/H/F/M	3,2	B/H/K	3,2
A/H/K/M	6,0	B/H/F/G/L	6,8
A/H/F/G	4,3	B45/H/K/G/L	4,7
A/H/K/G	2,9	C1,5/NH/F	5,6
A/H/K/M/G	6,5	C1,5/H/F	7,9

Erklärungen: NH nicht hydrophobiert, H Hydrophobierer, F Fließmittel, K Kunststoffdispersion, M Microsilica, G Glasmehl, L Luftporenbildner, Zahlen: 14 Ausbreitmaß von 14 cm, sonst 17 cm; 15, 45 Glasanteil des Zuschlags in M.-%, sonst 30 M.-%.

Die Gegenüberstellung der gleichen Mischungen mit unterschiedlichen Gläsern (A bzw.B) zeigt, daß die Proben mit Glas B (Ausnahme: die Probe mit Ausbreitmaß von 14 cm) einen höheren Luftporengehalt aufweisen.

### 5.5.3.2 Längenänderung

Das Schwindmaß  $\epsilon_S$  (in mm/m oder ‰) strebt mit abnehmender Geschwindigkeit einem Endwert  $\epsilon_{S\infty}$  zu. Dieser wird erst nach mehreren Jahren erreicht. Je trockener die Umgebungsluft ist, desto größer ist das Schwinden. Nach SCHIESSL können als Orientierungswerte für das Schwinden von Zementstein und Beton gelten:

- reiner Zementstein 7,0 mm/m

- Zementmörtel 2,5 mm/m
- Normalbeton 0,5 mm/m

In der Versuchsreihe wurde die Längenzunahme bzw. das Quellen der Proben aufgrund der Alkali-Kieselsäure-Reaktion untersucht. Da das Glas reaktives und amorphes  $\text{SiO}_2$  enthält, das bei Anwesenheit von Feuchtigkeit durch Volumenvergrößerung zu Schäden führen kann, wurden die Proben nach dem Ausschalen mit Meßplättchen beklebt und die Längenänderung laufend gemessen.

In der Abbildung 30 sind die über die Zeit gemessenen Längenänderungen der Proben in mm/m aufgetragen. Nur einige Beispiel wurden ausgewählt, weitere befinden sich im Anhang.

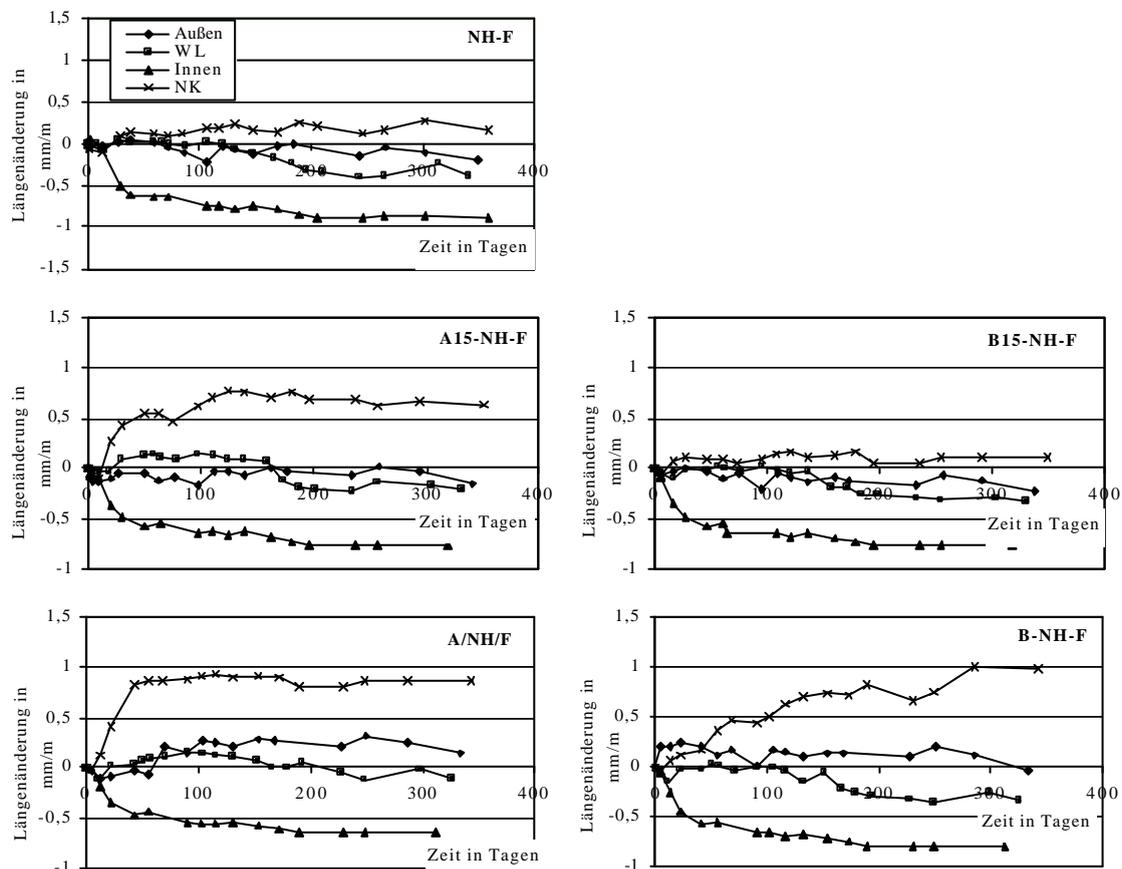


Abbildung 30: Längenänderung einiger Proben während unterschiedlicher Lagerungsbedingungen über die Zeit

Bei dem Langzeitversuch wurde in der Nebelkammer die stärkste Längenzunahme der Proben festgestellt. Dies beruht unter anderen auf der Tatsache, daß unter den dort herrschenden Bedingungen Feuchtedehnung auftritt. Die im Innenraum gelagerten Proben zeigen ein stetiges Schwinden, was auf dem Austrocknen basiert. Im Freien gelagerte Proben verändern ihre Länge abhängig von der Wetterlage. An den Kurvenverläufen sind feuchte und trockene Zeiten zu erkennen.

Gleichzeitig ist bei allen Lagerungsarten eine Abhängigkeit der Längenzunahme von den Zusatzstoffen und dem Glasanteil im Zuschlag zu beobachten.

Beim weiteren Vergleich der Kurvenverläufe ist zu sehen, daß die nicht hydrophobierten Proben mit beiden Glasarten A (Quarzglas) und B (Buntglas) draußen unabhängig von der Wetterlage an Länge zunehmen.

Bei allen anderen Proben mit Quarzglas, die im Freien gelagert wurden, bewegen sich die Werte um den Nullpunkt. Die Kurven der Wechsel- und der Außenlagerung dieser Proben sind nahezu deckungsgleich. Die Proben mit Buntglas hingegen schwinden sowohl draußen als auch in der Wechsellagerung. Das Schwinden dieser Proben ist jedoch in der Wechsellagerung größer als im Freien.

Auffällig ist auch die vergleichbare Längenänderungsentwicklung der beiden Mischungen mit der Glasart C (Glasfasern) (Abb. 31).

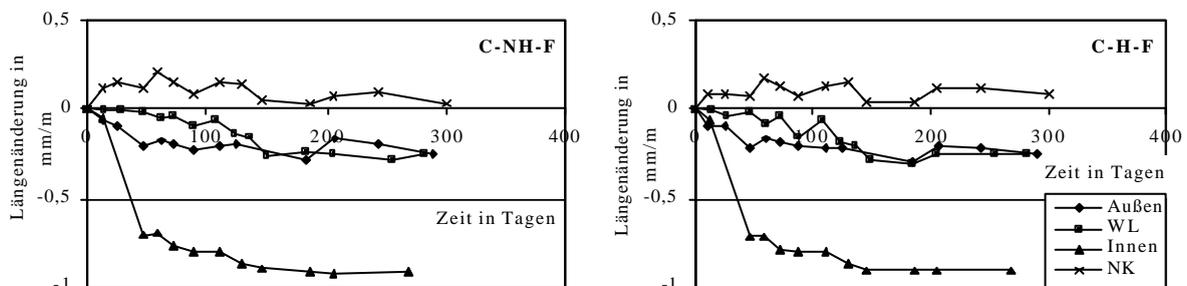


Abbildung 31: Längenänderung der Proben mit Glasfasern in verschiedenen Lagerungsräumen in Laufe der Lagerung

Vergleicht man die Dehnungs-, „Endwerte“ (Abbildung 32), so ist bei den in der Nebelkammer gelagerten Proben deutlich die Abhängigkeit der Längenänderung von der Glasart, der Glasmenge und der Zusatzmitteln erkennbar.

Proben ohne Glas quellen um 0,16 mm/m.

Bei Quarzglas bewirkt die Glaszugabe von 15 Gew.-% vom Zuschlag eine Erhöhung des Wertes auf 0,67 mm/m. Eine weitere Glaszugabe (30 Gew.-% vom Zuschlag) bei gleich Zusammensetzung der Mischung erhöht den Wert auf 0,86 mm/m. Die Proben mit den höchsten Glasanteilen (45 Gew.-%) weisen trotz der Anwendung des Luftporenbildners Quellwerte von 1,72 mm/m auf. Die Proben mit dem Zusatz von Glasmehl quellen in der Nebelkammer stärker als die ohne diesen Zusatz.

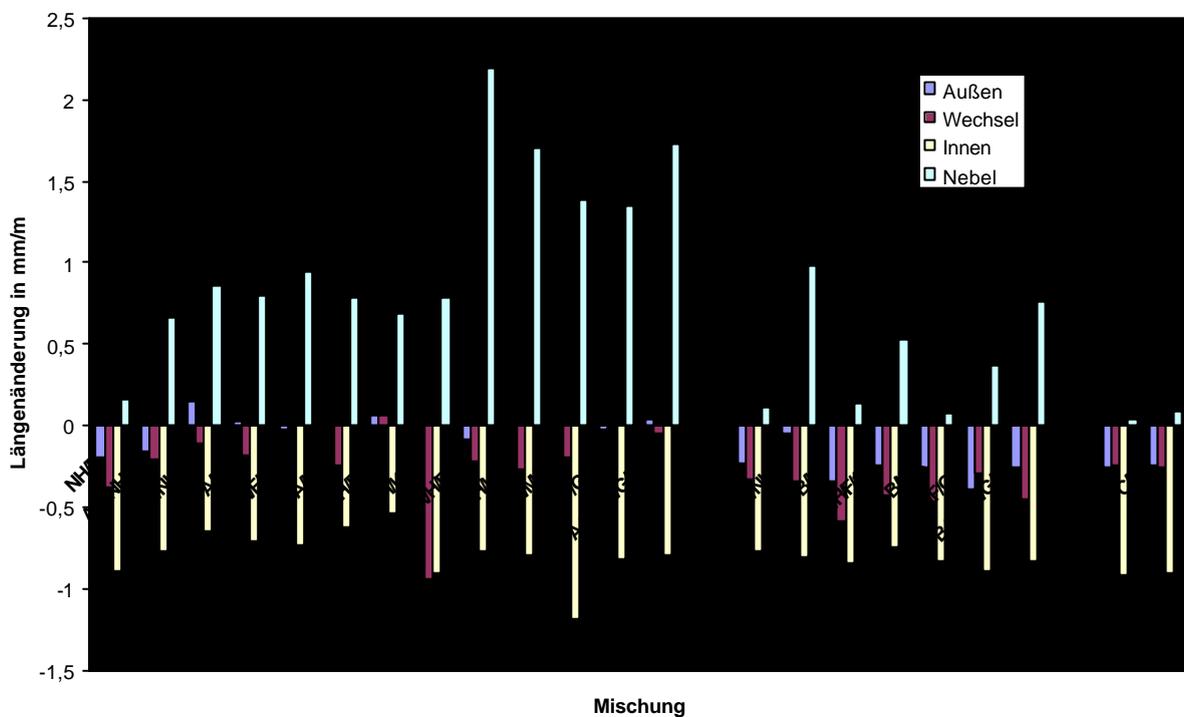


Abbildung 32: Längenänderungen aller Proben nach einer 9-monatigen Lagerungsdauer bei sämtlichen Lagerungsarten

Den größten Quellwert zeigt die hydrophobierte Probe mit Quarzglas (Abb. 32), die mit Fließmittel und Glasmehl modifiziert wurde. Bei Proben mit dieser Zusammensetzung wurde auch ein Festigkeitsverlust nach der Lagerung in der Nebelkammer festgestellt. Weiterhin zeigten sie mikroskopisch wie makroskopisch die frühesten und die stärksten Schäden.

Alle anderen Mischungen mit Quarzglas und ohne den Zusatz von Glasmehl, quellen nur im Bereich zwischen 0,5 und 1,0 mm/m.

Wie in der Abb. 32 und Tab 11 zu sehen ist, quellen Proben mit Buntglas weniger stark als die mit Quarzglas. Hier zeigt die nicht hydrophobierte Probe mit 30 Gew.-% Buntglas und Fließmittel den höchsten Quellwert auf.

Glasfaserhaltige Proben reagieren auf die Nebelkammerbedingungen nur mit einer sehr geringen Längenzunahme.

Tabelle 11: Längenänderungen aller Proben nach einer 9-monatigen Lagerungsdauer bei sämtlichen Lagerungsarten

Mischung/Lagerung	Außen	Wechsel	Innen	Nebel
NH/F	-0,19	-0,38	-0,90	0,16
A15/NH/F	-0,16	-0,20	-0,77	0,67
A/NH/F	0,15	-0,10	-0,65	0,86
A/H/F	0,03	-0,18	-0,71	0,79
A/H/F/14	-0,02	0,02	-0,74	0,94
A/H/K	0,01	-0,24	-0,63	0,78
A/H/F/M	0,07	0,06	-0,54	0,69
A/H/K/M	-0,02	-0,94	-0,90	0,79
A/H/F/G	-0,08	-0,22	-0,77	2,20
A/H/K/G	-0,01	-0,27	-0,80	1,71
A/H/K/M/G	0,01	-0,20	-1,19	1,38
A/H/F/G/L	-0,02	0,01	-0,83	1,35
A45/H/K/G/L	0,04	-0,05	-0,80	1,72
B15/NH/F	-0,23	-0,33	-0,77	0,12
B/NH/F	-0,05	-0,34	-0,81	0,98
B/H/F	-0,35	-0,58	-0,85	0,14
B/H/F/14	-0,24	-0,43	-0,75	0,53
B/H/K	-0,26	-0,46	-0,83	0,07
B/H/F/G/L	-0,39	-0,29	-0,89	0,37
B45/H/K/G/L	-0,25	-0,45	-0,84	0,77
C15/NH/F	-0,25	-0,25	-0,92	0,04
C/H/F	-0,25	-0,25	-0,90	0,09

### 5.5.3.3 Festigkeiten und E-Moduli

Gefügestörungen können zu einer wesentlichen Abnahme der E-Moduli führen. Es ist andererseits auch verständlich, daß aufgrund der in den Proben entstehenden Risse auch die Festigkeiten beeinflusst werden.

Bei den mikroskopischen Untersuchungen wurde bereits festgestellt, daß bei den mit Quarzglas hergestellten Proben die Risse sich vorwiegend auf die Glaskörner beschränken. Nur einige Risse setzen sich in der Zementsteinmatrix fort. Bei den Proben mit Buntglas wurden Anlösungen von Glasstücken und darauf folgende Verwachsungen zwischen Glas und Zementstein beobachtet. Aus diesen Gründen können die Ergebnisse der E-Modul und Festigkeitsuntersuchung keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion geben. Weiterhin wurden bei den Proben einzelne, millimeterbreite Risse, die längst der Prismen verliefen beobachtet. Da diese Risse inhomogen auf die Prismenseiten verteilt waren, hatten sie nur bedingt Einfluß auf die Festigkeitsverluste.

Trotz der bereits beschriebenen Probleme konnte eine deutliche Festigkeitsänderung (Abb. 33) sowohl bei den Druck- wie auch bei der Biegezugfestigkeit der in der Nebelkammer gelagerten Probe mit Quarzglas, Fließmittel und Glasmehl Zusatz festgestellt werden, die auch die höchste Dehnung aufwies.

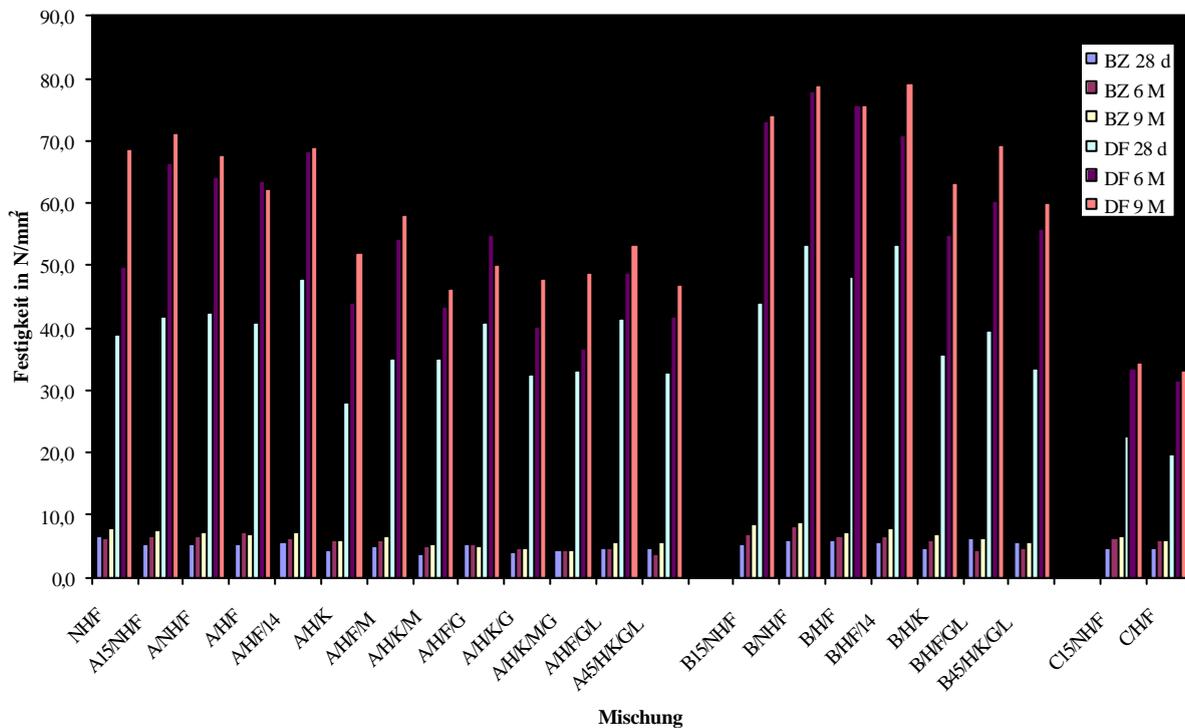


Abbildung 33: Druck- und Biegezugfestigkeitsentwicklung der Proben in der Nebelkammer

Zu den Festigkeitsentwicklungen im Laufe der Lagerung ist zu sagen, daß nur Proben aus der Nebelkammer und der Innenlagerung an Festigkeit verloren. In der Feucht/Trocken-Wechselagerung und der Lagerung im Freien stiegen die Festigkeiten während der Lagerung, was mit einer fortschreitenden Hydratation erklärt werden kann.

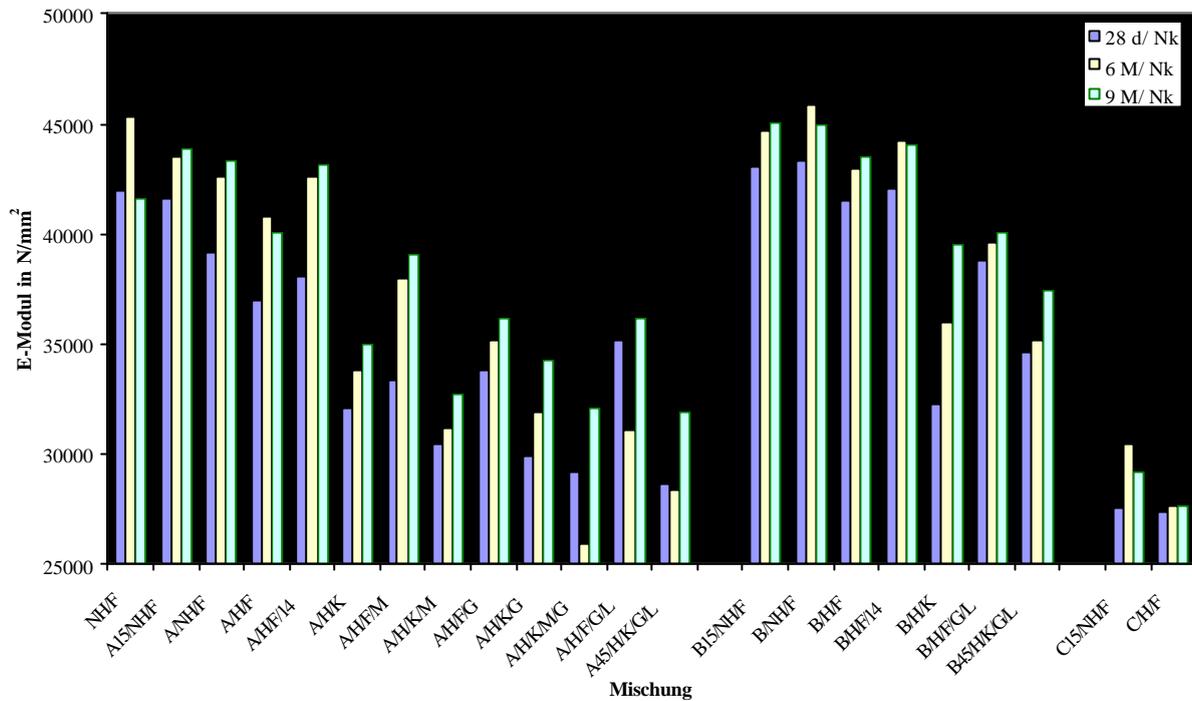


Abbildung 34: Entwicklung der E-Moduli in der Nebelkammer

Die E-Modulientwicklung über die Zeit zeigt andere Tendenzen. In der Nebelkammer und im Freien steigen die Werte mit der Lagerungsdauer, während sie im Innenraum und durch die Wechselagerung mit einigen wenigen Ausnahmen fallen. Bei den Ausnahmen handelt es sich um Mischungen die Kunststoffdispersion enthalten, die möglicherweise über eine Filmbildung die entstehenden Mikrorisse heilen.

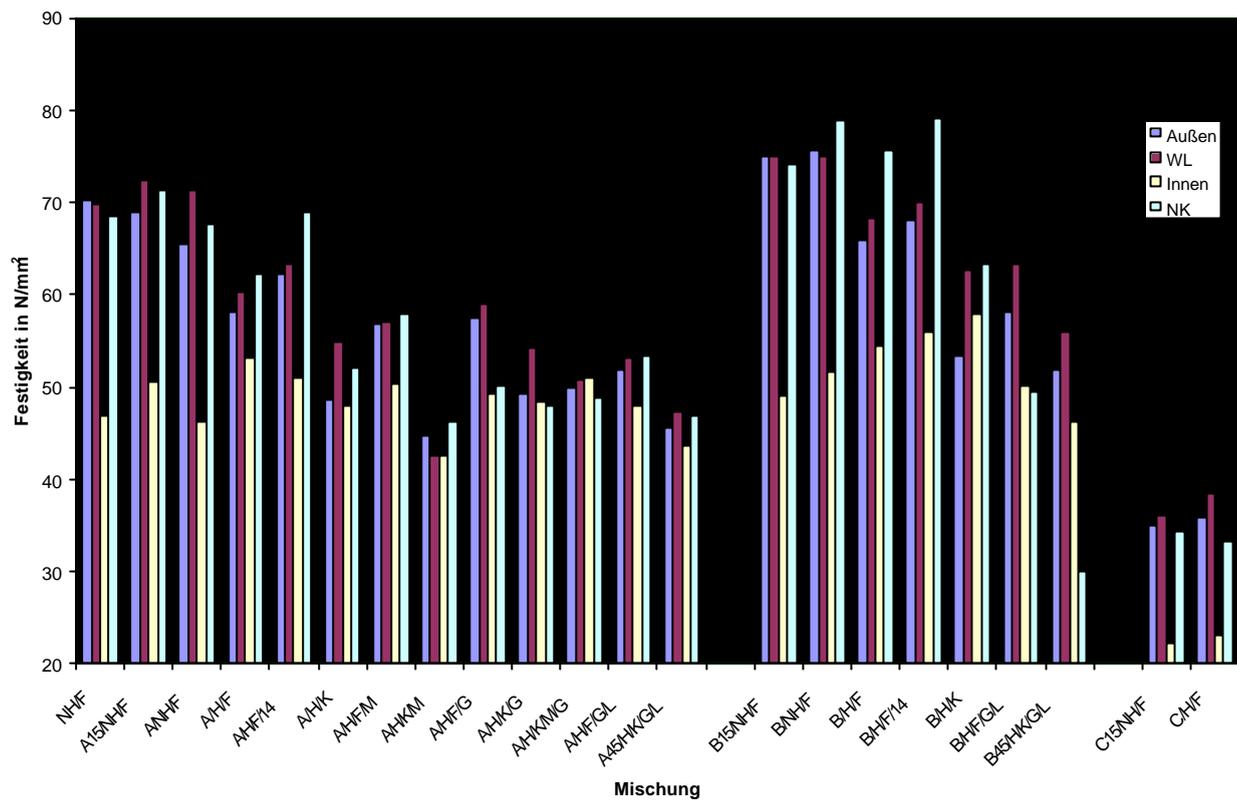


Abbildung 35: Druckfestigkeiten der Proben am Ende der 9-monatigen Lagerung

Beim Vergleich der nach verschiedenen Lagerungsarten erreichten Festigkeiten und E-Moduli (Abb. 35, 36, 37) sind bei den Druckfestigkeiten die Werte der Proben aus der Innenlagerung auffallend. Sie sind bei der vorwiegenden Zahl der Mischungen die niedrigsten der vier Werte. Dies kann als Hinweis auf die mangelhafte Hydratation aufgrund des Feuchtigkeitsentzugs also der Trocknung sein. Die Druckfestigkeiten der Proben in den anderen Lagerungsräumen liegen nach 9 Monaten in ähnlichen Bereichen.

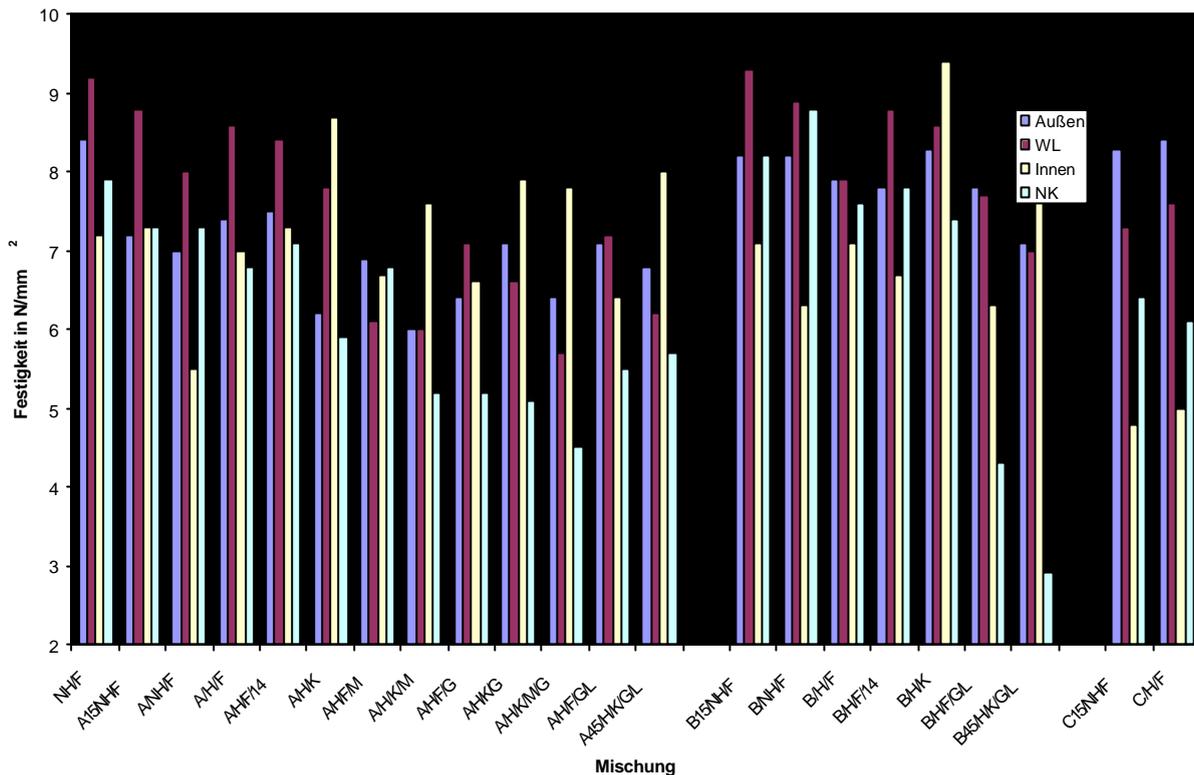


Abbildung 36: Biegezugfestigkeiten der Proben am Ende der 9-monatigen Lagerung

Auffallend sind die Festigkeits- und E-Modul-Unterschiede zwischen den drei Glasarten. Die Mischungen mit Buntglas weisen bei allen drei Untersuchungen höhere Werte als die Mischungen mit Quarzglas auf. Dies ist darauf zurückzuführen, daß Buntglas eine rauhere Oberfläche und unregelmäßiger gebrochene Körnungen besaß als Quarzglas. Ein besserer Verbund zwischen Glaszuschlag und Zementstein führt zu höheren Festigkeiten der Proben.

Die Proben mit Glasfaseranteilen zeigen aufgrund des deutlich höheren Wasserbedarfs (Tab. A11 im Anhang) und der damit verbundenen höheren Porositäten, aber auch aufgrund der verschiedenen Auswirkungen der Alkalikieselsäurereaktion auf den Glaszuschlag, niedrigere Druckfestigkeiten und E-Moduli. Die Biegezugfestigkeiten dieser Proben werden hingegen durch die Verwendung der Fasern, die durch ihre homogene Verteilung die Zugkräfte gut aufnehmen können und wie Mattenbewehrung im Beton funktionieren, erhöht

Bei den Biegezugfestigkeiten der anderen Mischungen sind Festigkeitsverluste der Proben mit Glasmehl und Microsilica in der Nebelkammer zu beobachten. Diese Beobachtung kann mit den mikroskopisch festgestellten Schäden in Beziehung gesetzt werden.

Es ist ein Einfluß der regelmäßigen Feucht/Trocken Lagerung der mit Fließmittel hergestellten Proben auf die Biegezugfestigkeit festzustellen (Abb. 36).

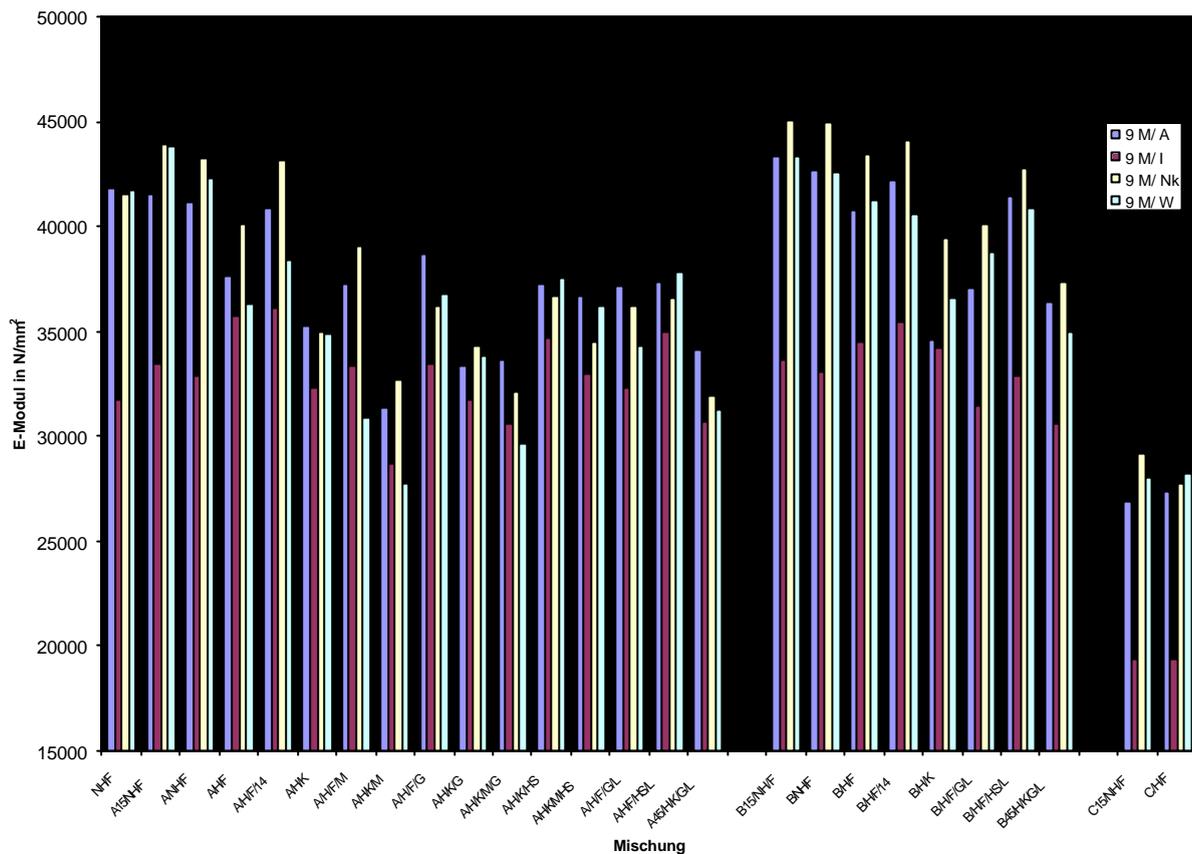


Abbildung 37: E-Moduli der Proben am Ende der 9-monatigen Lagerung

Nach STARK 1996 können wassergesättigte Gelporen kurzzeitig einen Teil der aufgebrauchten Spannung aufnehmen. Deshalb besitzt Zementstein nach einer Feuchtlagerung einen höheren E-Modul als trockener Zementstein. Dies ist in der Abb. 37 zu erkennen. Die im Innenraum und somit trocken gelagerten Prismen zeigen niedrigere E-Modulwerte als Prismen nach den anderen Lagerungsarten, die unter deutlichem Einfluß von Feuchtigkeit standen und bessere Bedingungen zu Hydratation hatten.

Im Hinblick auf die Zusatzmittel ist die Abnahme der Druckfestigkeiten mit der Verwendung von Kunststoffdispersion im Vergleich zu gleichen Mischungen mit Fließmittel zu bemerken. Die Verwendung des Glasmehls oder der Microsilica brachte hier keine Steigerung der Druckfestigkeit.

### 5.5.3.4 Frost-Tauwechsel-Widerstand

Die Prüfung des Frost-Tauwechsel-Widerstands wird an wassergesättigten Proben durchgeführt. Bereits vorhandene Risse können verstärkt und sichtbar werden. Aus diesem Grund wurde die Proben nach 3 und 9 Monaten entsprechend geprüft.

Nach der ersten Untersuchung waren an keiner der Proben Veränderungen zu beobachten, die zweite hingegen ergab nach 50 Frost-Tau-Wechsel-Zyklen z. T. deutliche Schäden und Festigkeitsverluste. Die geschädigten Proben sind in der Tabelle 11 zusammengestellt.

Tabelle 12: Schäden nach 50 FTW-Zyklen an 9-Monate gelagerten Proben

Mischung/ Lagerung	Schäden	Mischung/ Lagerung	Schäden
A15/NH/F WL	starke Risse	A15/NH/F A	Feine Risse
A/NH/F WL	Risse	A/NH/F A	Feine Risse
A/H/F WL	Risse	A/H/F A	Risse
A/H/F/14 WL	starke Risse	A/H/F/14 A	Feine Risse
A/H/K WL	starke Risse	A/H/F/M A	Risse
A/H/F/M WL	starke Risse	A/H/F/G A	Feine Risse
A/H/F/G WL	Risse	A/H/K/G A	Feine Risse
A/H/K/G WL	feine Risse	A/H/F/G/L A	Feine Risse
A/H/F/G/L WL	feine Risse	A45/H/K/G/L A	Feine Risse
A45/H/K/G/L WL	Risse	A/H/K/M NK	Starke Risse
A/H/F/G NK	starke Risse	A/H/K/M/G NK	Risse
A/H/K/G NK	Risse	A45/H/K/G/L NK	Risse

Erklärungen: NH nicht hydrophobiert, H Hydrophobierer, F Fließmittel, K Kunststoffdispersion, M Microsilica, G Glasmehl, L Luftporenbildner, Zahlen: 14 Ausbreitmaß von 14 cm, sonst 17 cm; 15, 45 Glasanteil des Zuschlags in M.-%, sonst 30 M.-%.

Auffällig ist, daß die im Innenraum gelagerten Proben keine makroskopische Rißbildung und die kleinsten Verluste der Druckfestigkeit (Abb. 40) aufweisen. Die Prismen, die im Freien dem Wetter ausgesetzt wurden, zeigen nach der FTW-Prüfung schwächere Schädigungen als die, die dem Feucht/Trocken-Wechsel ausgesetzt wurden. Die Rißbreiten sind kleiner und es gibt weniger Proben mit starker Rißbildung. Die Risse in den stark geschädigten Proben aus der Wechsellagerung verlaufen entlang der Prismenlängsseiten.

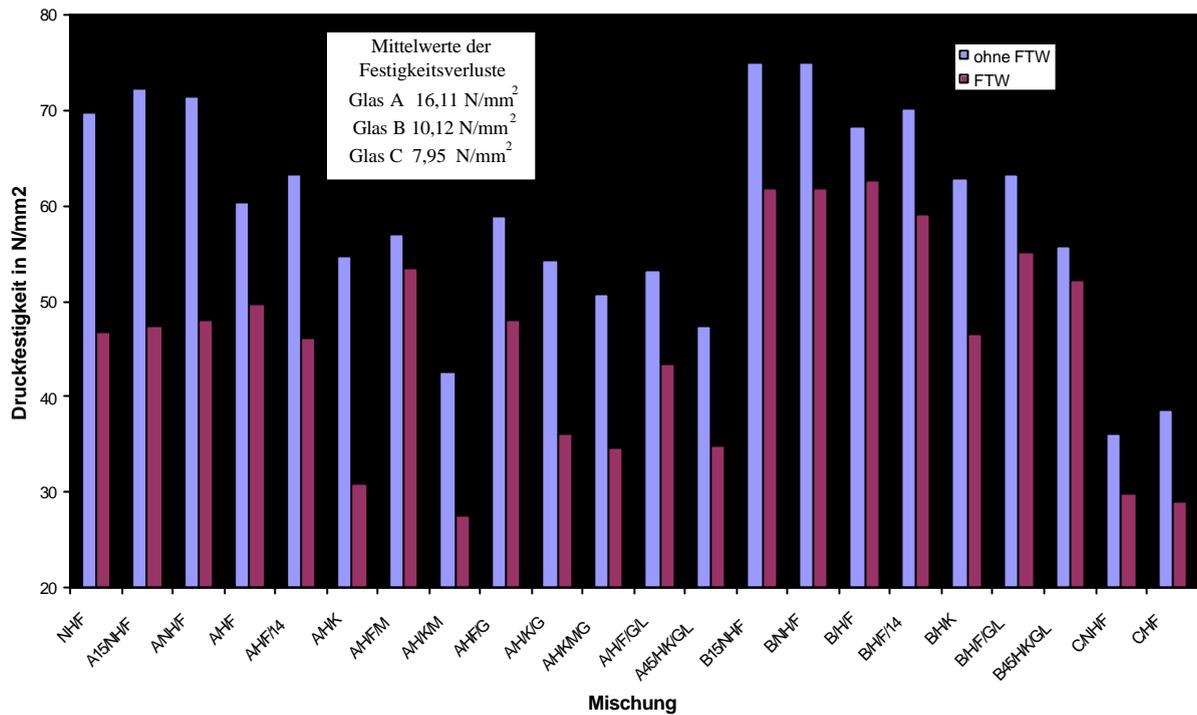


Abbildung 38: Druckfestigkeitsverluste der Nebelkammerproben nach FTW Prüfung

Zu erkennen ist auch, daß die Mischung A/HF/G, die in der Nebelkammer die stärkste Längenzunahme aufweist auch in der Tabelle 11 zu finden ist und nach drei Lagerungsarten Schäden nach der FTW-Prüfung zeigt.

Weiterhin ist auffällig, daß an den Proben die mit Buntglas hergestellt wurden keine Schäden beobachtet wurden. Diese Proben verlieren auch viel weniger an Druckfestigkeit (Abb. 38 bis 41) nach der FTW-Prüfung. Vor dem Hintergrund, daß - wie bereits bei den mikroskopischen Untersuchungen beschrieben - sich die Alkalikieselsäurereaktion verschieden auf die beiden Glasarten auswirkt:

- Risse und Ablösungen bei Glasart A (Quarzglas)
- Anätzungen an der Glasoberfläche bei Glasart B (Buntglas)

werden die Ergebnisse dieser Untersuchung verständlich.

Frost-Tauwechsel können bevorzugt die Risse und weniger anderen Schädigungen verstärken und deutlich machen.

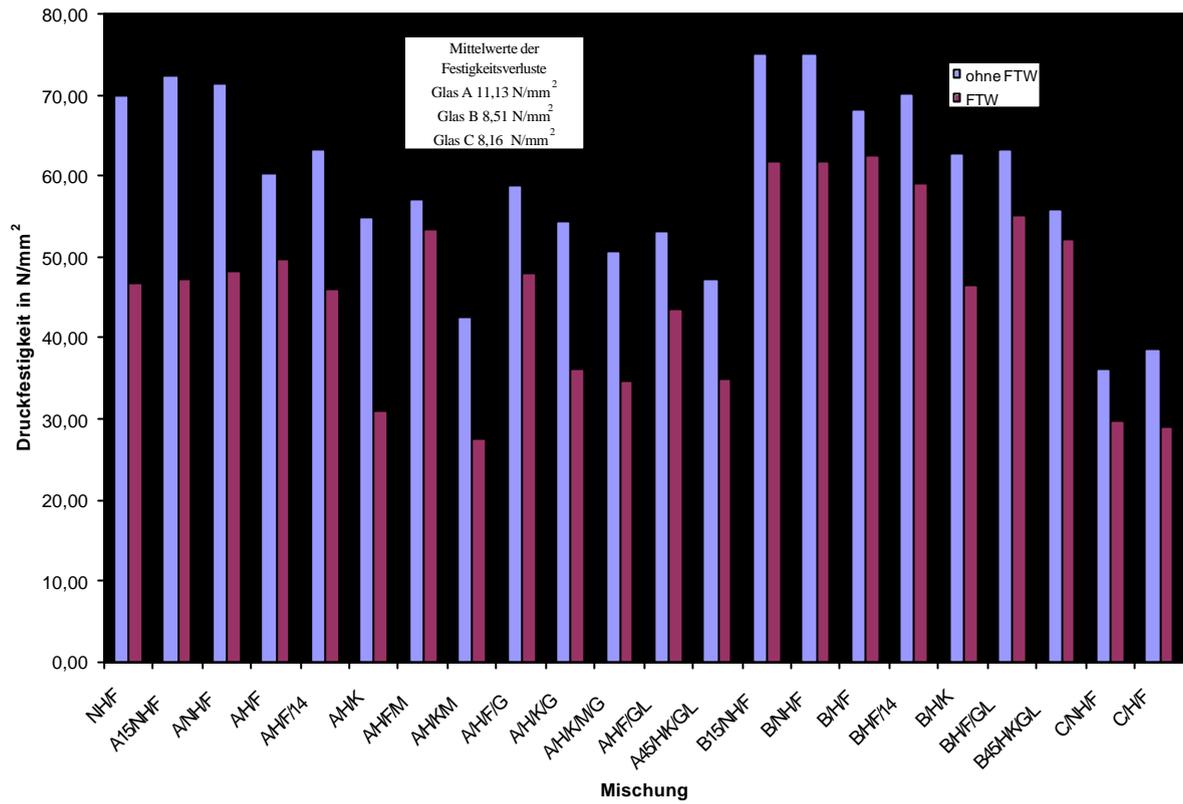


Abbildung 39: Druckfestigkeitsverluste der Wechselagerungsproben nach FTW Prüfung

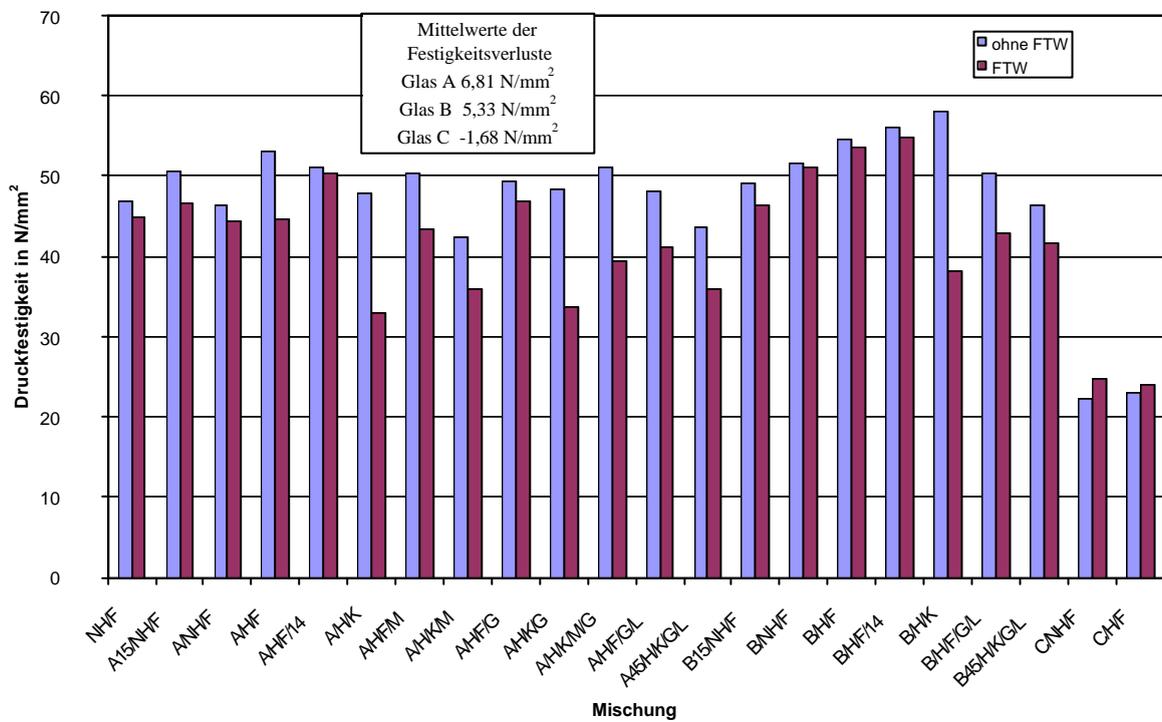


Abbildung 40: Druckfestigkeitsverluste der Innenraumproben nach FTW Prüfung

Vergleicht man die Druckfestigkeiten der Proben nach der FTW-Prüfung, so ist zu erkennen, daß die Mischungen mit Kunststoffdispersion unabhängig von der Lagerungsart anfälliger auf die FTW reagieren als vergleichbare Mischungen mit Fließmittel (Abb. 38 bis 41). Diese Zusatzmittel erzeugten vermutlich unterschiedliche Porenstrukturen.

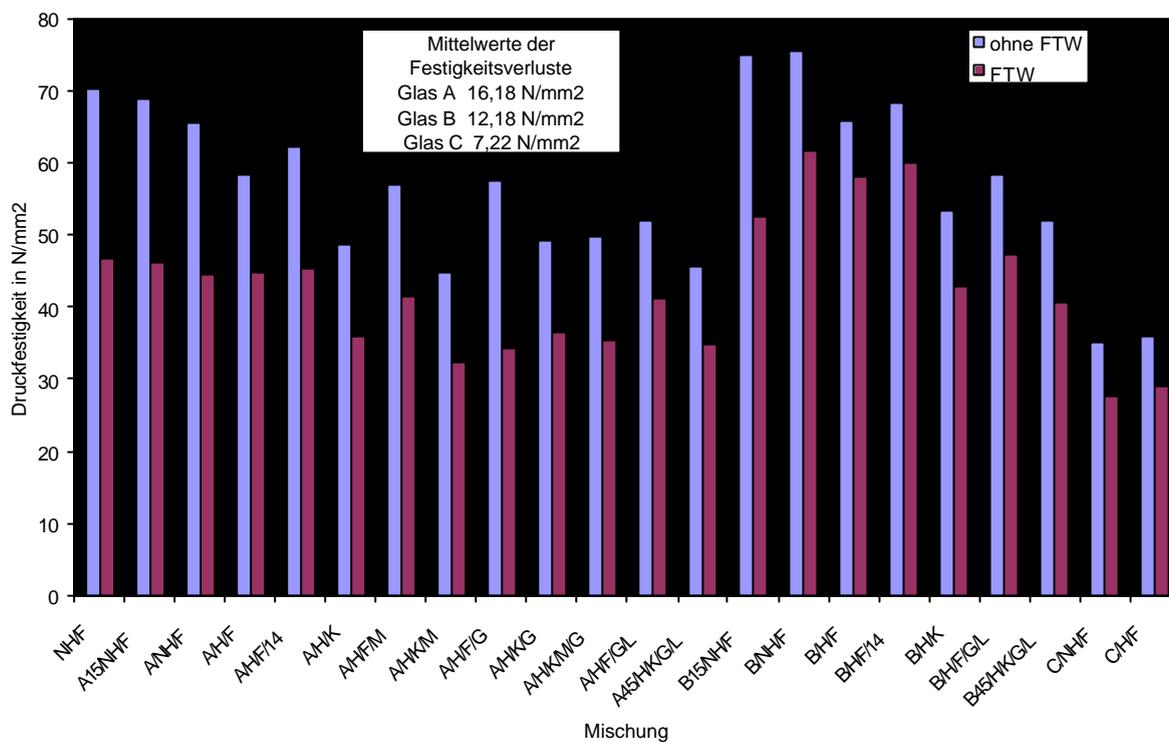


Abbildung 41: Druckfestigkeitsverluste der im Freien gelagerten Proben nach FTW-Prüfung

### 5.5.3.5 Porosität

Poren im Beton bzw. Zementstein werden nach ROMBERG 1978 in drei Klassen unterteilt:

- Luftporen, die durch unvollständiges Verdichten oder durch gezielte Zugabe von Luftporenbildner entstehen. ( $r > 10^4$  nm)
- Kapillarporen, die durch überschüssiges Wasser entstehen und ein Eindringen von Wasser und anderen angreifenden Stoffen in den Baustoff ermöglichen. Hierdurch sind die Voraussetzungen für eine Schädigung des Baustoffs geschaffen. ( $10^4 > r > 30$  nm)
- Gelporen, die während der Hydratation entstehen ( $30 > r > 1$  nm).

Die durch die Alkali-Kieselsäurereaktion entstehenden Risse liegen - wie in den Rasterelektronenaufnahmen zu sehen - vorwiegend in der Größenordnung der Kapillarporen. Demzufolge sollten nach der Lagerung in den verschiedenen Klimaten Änderungen in der Kapillarporengehalten zu erkennen sein.

Die Abbildungen 42 und 43 zeigen die Kapillarporengehalte ausgesuchter Proben nach drei Lagerungsarten.

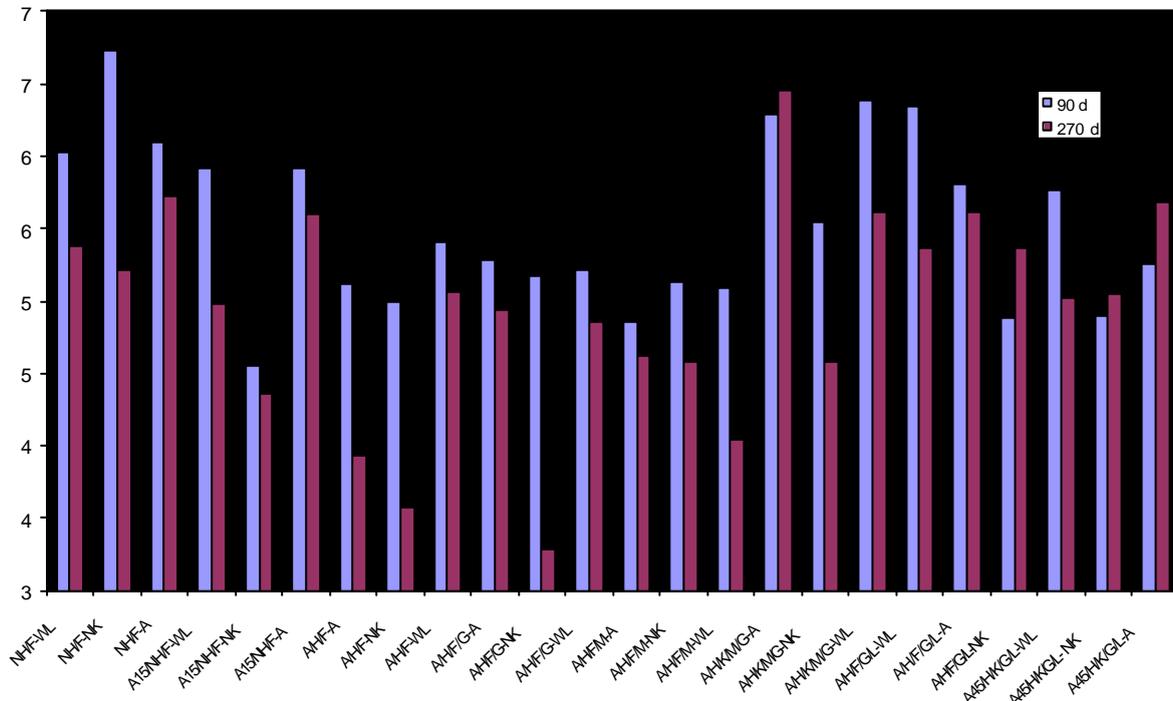


Abbildung 42: Änderung der Kapillarporengehalte im Laufe der Lagerung der Proben mit Quarzglas (A).

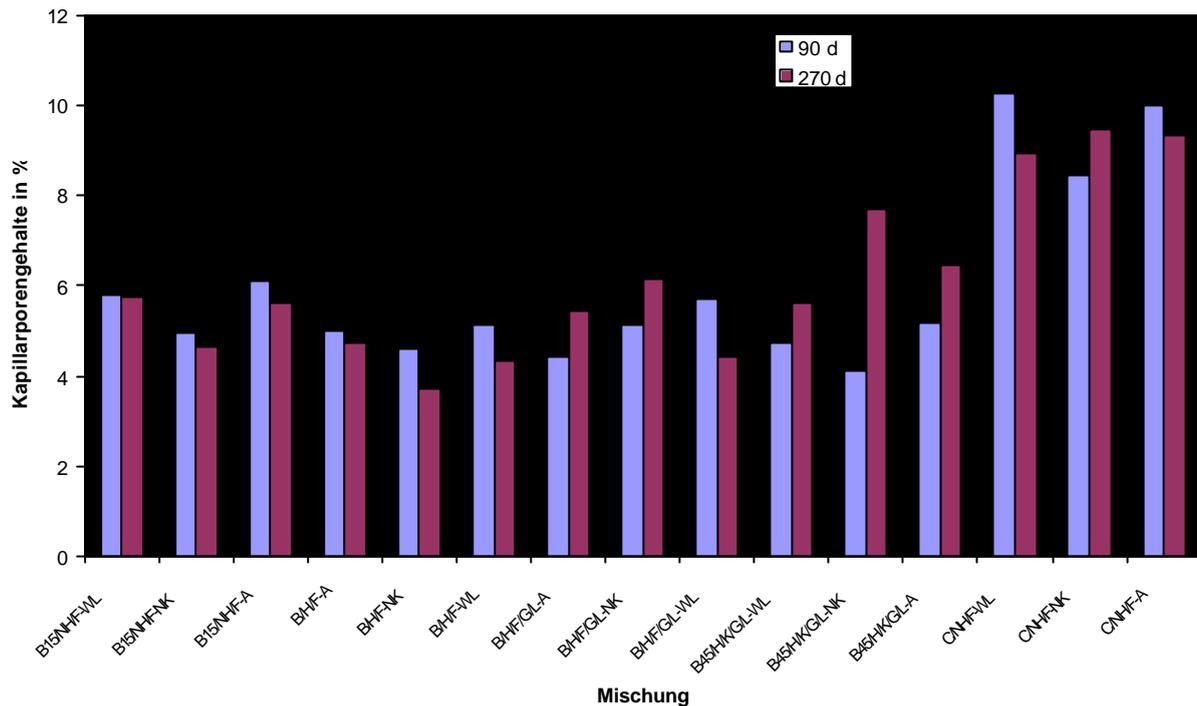


Abbildung 43 Änderung der Kapillarporengehalte im Laufe der Lagerung der Proben mit Buntglas (B) und Glasfasern (C)

In den Diagrammen ist deutlich eine Verschiebung der Kapillarporengehalte zu kleineren Werten hin in fast allen Proben in der Feucht/Trocken-Wechselagerung. Die Werte fallen auch bei den Proben mit Quarzglas nach der Nebelkammerlagerung und Außenlagerung.

Die wenigen Ausnahmen dieser Trends stellen Proben, die in der folgenden Tabelle dargestellt sind. Bei Proben mit dieser Zusammensetzung steigen in den in der Tabelle genannten Lagerungsräumen die Kapillarporengehalte.

Auffällig ist hierbei, daß die Rezeptur B45/H/K/G/L in allen drei Lagerungsräumen einen Anstieg der Kapillarporengehalte aufweist. Des Weiteren sind es Proben, die bereits in den letzten Kapiteln beschriebene mikro- und makroskopische Schäden zeigen.

Aus den mikroskopischen Untersuchungen ging hervor, daß die Alkalikieselsäurereaktion bei Quarzglas eine Ablösung der Glaskörner bewirkt. Bei der Präparation lösen sich diese Körner zum Teil vollständig von der Zementsteinmatrix und so können diese Schäden bei der Messung gar nicht erfaßt werden.

Das Schadenbild in den Buntglasproben sieht anders aus. Die aus der Gelbildung

resultierenden Schäden sind in der Abbildung 43 in Form von steigenden Kapillarporengehalten zu erkennen.

Tabelle 13: Proben mit steigenden Kapillarporengehalten bei der Lagerung in den verschiedenen Lagerungsräumen

Lagerung	Mischung
Wechselagerung	A/H/K/G
	B45/H/K/G/L
Nebelkammer	A/H/F/M
	A/H/K/M
	B/H/F/14
	B45/H/K/G/L
Außenlagerung	A/H/K/M/G
	A45/H/K/G/L
	B/H/F
	B/H/F/14
	B45/H/K/G/L

Im Gegensatz zu den Kapillarporen steigen bei den in der Nebelkammer und im Feucht/Trocken-Wechsel gelagerten Proben die Gelporengehalte (Tabelle A 11 im Anhang). Hierfür können die Risse in den Quarzglaskörnern und die Anätzung der Buntglasstücke als die Erklärung sein.

## 5.6 Zusammenfassung zu Kapitel 5

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollten die Einflüsse von Glas als Zuschlag auf die Dauerhaftigkeit von Mörtel und Beton untersucht werden. Aus diesem Grunde wurden als Zuschlag neben Normsand drei Glasarten in unterschiedlichen Mengen zur Herstellung der Proben verwendet. Es wurden Quarzglas (Glas A), Buntglas (Glas B) und Glasfasern (Glas C) eingesetzt. Des Weiteren wurden betontypische Zusatzmittel wie Luftporenbildner, Fließmittel und Microsilica, aber auch Glasmehl, Kunststoffdispersion und Hydrophobierer verwendet.

Die Proben wurden in 4 verschiedenen Klimaten gelagert:

1. Innenraumlagerung (23°C/65 rel. LF)
2. Außenlagerung (den Witterungseinflüssen ausgesetzt im Freien)
3. Lagerung in einer Nebelkammer (40°C/100rel. LF)
4. Wechsellagerung: 1 Tag unter Wasser, 6 Tage im Klima (20°C/65 rel. LF)

An den Mörteln bzw. Betonen wurden eine Reihe von Frisch- und Festmörteluntersuchungen durchgeführt.

Dabei sollten verschiedene Meßmethoden zur Erfassung und Beurteilung der Alkalikieselsäurereaktion herangezogen werden. Aufgrund der Ergebnisse der Untersuchungen kann gesagt werden, daß die mikroskopische Untersuchung mit einem Polarisationsmikroskop die beste Möglichkeit für die qualitative Beschreibung und Beurteilung der Auswirkungen der Alkalikieselsäurereaktion in diesen Proben darstellt. Eine weitere Möglichkeit bietet die Messung der Längenänderung der Proben. Hierbei können aber erst nach einiger Zeit und nur bei Lagerung mit extremen Bedingungen Aussagen gemacht werden. Deswegen eignet sich diese Methode zur quantitativen Beurteilung der Einflüsse bei Langzeitversuchen.

Bei den mikroskopischen Untersuchungen konnten abhängig von der Glasart verschiedene Arten der Schäden an den Glaszuschlägen beobachtet werden. Die Buntglaszuschläge zeigen Anätzungen und Veränderungen an den Kornoberflächen. Bei den Quarzglaskörnern zeigt sich starke Rißbildung, verursacht durch den Druck, der nach SPRUNG 1998 (s. S. 20) im Inneren der Zuschläge entsteht.

Die beiden Glasarten unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung. Ausschlaggebend sind die unterschiedlichen Alkaligehalte der beiden Gläser. Aufgrund der höheren Alkaligehalte im Buntglas findet die Reaktion bereits an der Kontakzone, also an der Kornoberfläche statt. Bei

---

Quarzglas sind die Alkaligehalte entscheidend niedriger, demzufolge reichern sich Alkalien nach dem Prinzip von SPRUNG 1998 erst im Inneren der Körner und „zersprengen“ sie von Innen. Die beiden gerade beschriebenen Erscheinungen wirken sich erst nach einer längeren Lagerungsdauer auf die mechanischen Kennwerte aus. So könnten vor allem bei den Festigkeiten der Proben erst nach einer längeren Lagerung gravierende Veränderungen festzustellen sein.

Die Untersuchungsergebnisse - Messung der Längenänderungen als Maß für die treibende Alkalikieselsäure-Reaktion – lassen erwarten, daß eine Kombination aus den Zusatzmitteln Hydrophobierer und Kunststoffdispersion die günstigste Minderung des Treibens bewirkt.

Bei der Entwicklung von schadensfreien Beton mit Glaszuschlag muß die Alkalikieselsäurereaktion beachtet werden. Art und Menge der Zusatzmittel können die Treibreaktion mindern, jedoch sind diese auf die Art und die Zusammensetzung des Glases abzustimmen.

## 6 Zusammenfassung

In der heutigen Zeit werden Baustoffe neu entwickelt und neu konzipiert um verschiedene neue Anforderungen zu erfüllen. Mit der Vielzahl an Additiven und ihrer Kombination ist es möglich eine breite Reihe an Baustoffeigenschaften zu steuern.

Die Entwicklungen werden einerseits zur Erhaltung der bestehenden Bausubstanz – z.B. historischer Bauwerke – durchgeführt, andererseits führen sie zur Entstehung immer ergiebigerer, leistungsfähigerer Baustoffe und zu dauerhafteren Bauwerken. Dadurch geben sie auch den Architekten neue Möglichkeiten zur ihrer gestalterischen Entfaltung.

Die beiden hier bearbeiteten Beispiele zeigen die Vorgehensweise bei einer Mörtelentwicklung für ein historisches Bauwerk sowie bei einer Betonentwicklung mit speziellen Zuschlägen.

Jede Mörtel- bzw. Betonentwicklung kann in folgende Schritte gegliedert werden:

1. Erstellung eines Anforderungsprofils
2. Aufstellung der Rezepturen
3. Laboruntersuchungen
4. Praxisanwendung im kleinen Maßstab/Musterflächen und Beurteilung der Dauerhaftigkeit
5. Anwendung am Bauwerk

Bei der Putzentwicklung für die Parochialkirche basierte die Erstellung eines Anforderungsprofils auf der Untersuchung des Untergrundes, seiner Festigkeit, Saugfähigkeit und Salzbelastung sowie der historischen Mörtel. Diese Ergebnissen ergaben folgende grundsätzliche Anforderungen: Druckfestigkeit von 5-10 N/mm<sup>2</sup>, hohes Wasserrückhaltevermögen, viele Luftporen und einen niedrigen kapillaren Wassertransport innerhalb des Putzes. Des weiteren sollte der Putz eine helle Farbe haben, sich dünn auftragen lassen. Die Ausgangsstoffe sollten in Berlin oder näheren Umgebung vorhanden sein.

Die Basis für Anforderungen, die an den glashaltigen Beton gestellt wurden, war seine mögliche Verwendung zur Gestaltung von Fassadenelementen. Demzufolge sollte vor allem eine langfristige Dauerhaftigkeit und eine Schadensfreiheit im Freien gewährleistet sein.

Aufgrund des Anforderungsprofils wurden in beiden Fällen Rezepturen mit verschiedenen Binde- und Zusatzmitteln aufgestellt.

Bei der Putzentwicklung wurde aus Verträglichkeitsgründen ein Bindemittel aus hydraulischem Kalk bzw. Weißkalkhydrat mit Hochofenzement, der die Sulfatwiderstandsfähigkeit steigern sollte, im Labor untersucht. Als Zusatzmittel kamen Zinkstearat als Hydrophobierer, Methylcellulose zur Steigerung des Wasserrückhaltevermögens, Luftporenbildner, Kunststoffdispersion und Pangel als Verdicker und Verarbeitungsverbesserer zur Anwendung. Gleichzeitig wurden auch vier industriell hergestellten Sanierputze vergleichend untersucht.

Für den „Glasbeton“ wurde Weißzement und bunter Glaszuschlag verwendet. Parallel wurden auch Quarzglas und Spezialglasfasern getestet um die Einflüsse der Glaszusammensetzung auf die Dauerhaftigkeit des Baustoffs zu untersuchen. Bei den Laboruntersuchungen wurden nachstehende Zusatzmittel verwendet: Hydrophobierer, Fließmittel, Kunststoffdispersion, Glasmehl, Mikrosilica und Luftporenbildner. Bei der Herstellung der Proben wurde Normsand nach DIN EN 196-1 als Zuschlag verwendet. Die Korngrößen des Normsand sind keine betontypischen Korngrößen, doch die verwendeten Zusätze sind typisch für Betonherstellung. Aus diesem Grund können die Ergebnisse der Untersuchungen auf Beton übertragen werden.

Die Untersuchungen im Labor führten im Fall der Putzentwicklung zu einer Auswahl von einem handelsüblichen Sanierputz und drei Labormischungen, die im Herbst 1996 an der Kirche appliziert wurden.

Im Frühsommer 1997 wurden die Putze beurteilt und aufgrund der Erkenntnisse weiterentwickelt. Es wurde auch eine genaue Arbeitsanweisung erarbeitet. Damit sollen Probleme mit den Gegebenheiten (z. B.: unterschiedlich saugende Ziegel, tiefe Fugen, Unebenheiten im Mauerwerk und daraus resultierende Putzdicken) gelöst werden.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und für die 2. Applikation 1997 empfohlene Putz, wurde auch von der ZHD Potsdam zur Restaurierung der Kirche ausgewählt und wird im Jahre 2000 an der gesamten Fassade der Parochialkirche appliziert.

Beim „Glasbeton“ ergaben die Laboruntersuchungen, daß die Treibreaktion zwischen der Porenlösung des Zementsteins und dem Glaszuschlag nicht zu vermeiden ist und die Kombination aus einem Hydrophobierer mit einer Kunststoffdispersion oder einem Fließmittel einen positiven Einfluß auf die Eindämmung des Treibens hat.

---

Diese Ergebnisse können Grundlage sein für weitere Untersuchungen bzw. den Einsatz von „Glasbeton“ - zunächst nur für nicht tragende Bauteile.

---

## Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

**Abbildung 1:** Parochialkirche Berlin (Ansicht von der Klosterstraße)

**Abbildung 2:** Löslichkeit von amorphen  $\text{SiO}_2$  in Abhängigkeit vom pH-Wert der Lösung (STARK 1995).

**Abbildung 3:** Aufbau von Quelldruckspannung durch Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) (STARK 1995)

**Abbildung 4:** Geltungsbereich der Alkalirichtlinien seit 1990 (STARK 1995)

**Abbildung 5:** Schadensmechanismus der Alkali-Kieselsäure-Reaktion nach SPRUNG 1998

**Abbildung 6:** Parochialkirche nach dem Bau des Turms im Jahre 1715 (BERICHT PLANER IN DER PANKEMÜHLE)

**Abbildung 7:** Grundriß der Parochialkirche (BERICHT PLANER IN DER PANKEMÜHLE)

**Abbildung 8:** Sieblinien der Putzmörtelzuschläge der Parochialkirche im Vergleich mit der Sieblinie des zu Mörtelentwicklung verwendeten Grubensandes (BS 5) der Fa. Kluwe. Die Kornsummenkurven befinden sich im Anhang.

**Abbildung 9:** Musterflächen an der SO Wand der Parochialkirche in verschiedenen Höhen

**Abbildung 10:** Rißbildung parallel zu Fuge in einer Musterfläche an der Wand der Parochialkirche

**Abbildung 11:** Mikroskopische Aufnahme der Risse in der Probe A/H/F/G nach der halbjährigen Nebelkammerlagerung

**Abbildung 12:** Mikroskopische Aufnahme der um ein Glaskorn angeordneten Risse in der Probe B45/H/K/G/L die 9 Monate in der Nebelkammer gelagert wurde.

**Abbildung 13:** Mikroskopische Aufnahme der strahlenförmig vom Glas ausgehenden feinen Risse, die sich in der Zementmatrix der Probe A/H/K/M fortsetzen; nach 3-monatigen Lagerung in der Nebelkammer

---

**Abbildung 14:** Mikroskopische Aufnahme der Ablösungen eines Glaskorns von der Zementmatrix und erster Risse im Glaszuschlag der Probe A/H/K/M nach 3-monatigen Lagerung in der Nebelkammer

**Abbildung 15:** Lichtmikroskopische Aufnahme eines rißfreien Glaszuschlagkorns der Probe A45/H/K/G/L nach 9-monatigen Lagerung im Innenraum

**Abbildung 16:** Lichtmikroskopische Aufnahme eines Glaszuschlagkorns der Probe A/H/F/G nach der Lagerung in der Nebelkammer

**Abbildung 17:** Lichtmikroskopische Aufnahme einiger Risse in Glas, die sich in der Zementmatrix der Probe A/H/F/G fortsetzen nach der Nebelkammerlagerung

**Abbildung 18:** Lichtmikroskopische Aufnahme der Ablösung der Glaskörner von der Matrix in der Probe A/H/K/G nach der Nebelkammerlagerung

**Abbildung 19:** Lichtmikroskopische Aufnahme eines mit Gel gefüllten Risses im Glaskorn der Probe A45/H/K/K/G/L nach einer 9-monatigen Nebelkammerlagerung

**Abbildung 20:** Lichtmikroskopische Aufnahme der Schäden, die durch den Druck im Inneren der Glaskörner der Probe A/H/F/G nach einer Lagerung in der Nebelkammer entstehen

**Abbildung 21:** Lichtmikroskopische Aufnahme eines angelösten Buntglaskorns der Probe B45/H/K/G/L nach einer Nebelkammer-Lagerung von 9 Monaten

**Abbildung 22:** Lichtmikroskopische Aufnahme der Gelbildung an der Grenze zu einem Buntglaskorn der Probe B/NH/F nach einer 9-monatigen Nebelkammer-Lagerung

**Abbildung 23:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einiger Risse in der Zementmatrix um ein Glaskorn, die in der Probe A/H/F/14 bereits nach 9 monatigen Lagerung in der Nebelkammer, zu beobachten sind.

**Abbildung 24 a bis d:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Gelbildung im Inneren (Anschnitt durch die Präparation) der Glaskörner der Probe A/H/FM als Ursache für Schäden.

**Abbildung 25:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Gelbildung im Inneren der Glaskörner (Anschnitt durch die Präparation) der Probe A45/H/K/G/L

---

**Abbildung 26:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Gelbildung an der Grenze zwischen Glas und Zementstein in der Probe A/H/F/G

**Abbildung 27:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Ablösung der Schichten an der Glasoberfläche an zwei Beispielen 1. Probe A/H/K/M nach 9 Monaten in der Nebelkammer, 2. Probe A/H/F/G/L bereits nach 6 Monaten in der Nebelkammer

**Abbildung 28:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Ätzstrukturen an der Oberfläche der Buntglaszuschläge der Probe B45/H/K/G/L nach 9 monatigen Lagerung in der Nebelkammer

**Abbildung 29:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Oberfläche eines Buntglaskorns mit einer intakten Gelschicht in der Probe B45/H/K/G/L , die nach 9 monatigen Lagerung in der Nebelkammer zu beobachten ist

**Abbildung 30:** Längenänderung der Proben in verschiedenen Lagerungsräumen in Laufe der Lagerung

**Abbildung 31:** Längenänderung der Proben mit Glasfasern in verschiedenen Lagerungsräumen in Laufe der Lagerung

**Abbildung 32:** Längenänderung in allen Lagerungsräumen nach einer 9 Monatigen Lagerungszeit

**Abbildung 33:** Druck- und Biegezugfestigkeitsentwicklung der Proben in der Nebelkammer

**Abbildung 34:** Entwicklung der E-Moduli in der Nebelkammer während der Lagerung

**Abbildung 35:** Druckfestigkeiten der Proben am Ende der Lagerung

**Abbildung 36:** Biegezugfestigkeiten der Proben am Ende der Lagerung

**Abbildung 37:** E-Moduli der Proben am Ende der Lagerung

**Abbildung 38:** Druckfestigkeitsverluste der Nebelkammerproben nach FTW Prüfung

**Abbildung 39:** Druckfestigkeitsverluste der Wechsellagerungsproben nach FTW Prüfung

**Abbildung 40:** Druckfestigkeitsverluste der Innenraumproben nach FTW Prüfung

**Abbildung 41:** Druckfestigkeitsverluste der Außen gelagerten Proben nach FTW-Prüfung

---

**Abbildung 42:** Änderung der Kapillarporengehalte im Laufe der Lagerung der Proben.

**Abbildung A1:** Diffraktogramm der historischen Putzprobe PJ1 mit Röntgenreflexen der wichtigsten Phasen

**Abbildung A2:** Vergleich der Röntgendiffraktogramme der historischen Putzproben: PJ1-5

**Abbildung A3:** Sieblinien verschiedener Bausande Berliner Baumärkte

**Abbildung A4:** Summenkurven verschiedener Bausande Berliner Baumärkte und der Putzproben von der Parochialkirche

**Abbildung A5:** Längenänderung der Glasbetonproben in vier Lagerungen

**Abbildung A6:** Längenänderung der Glasbetonproben in vier Lagerungen

**Abbildung A7:** Festigkeiten der Außen gelagerten Glasbetonproben

**Abbildung A8:** Festigkeiten der feucht/trocken Wechsel gelagerten Glasbetonproben

**Abbildung A9:** Festigkeiten der Innen gelagerten Glasbetonproben

**Abbildung A10:** E-Modul der Innen gelagerten Glasbetonproben

**Abbildung A11:** E-Modul der Außen gelagerten Glasbetonproben

**Abbildung A12:** E-Modul der feucht/trocken Wechsel gelagerten Glasbetonproben

**Tabelle 1:** Qualitative Phasenzusammensetzung der Mörtelproben der Parochialkirche, Berlin, mittels Röntgenbeugungsanalyse bestimmt (s. auch Abb. 1 und 2 im Anhang).

**Tabelle 2:** Ergebnisse der naßchemischen Analyse zur Mörtelzusammensetzung der Parochialkirche, Berlin

**Tabelle 3:** Ergebnisse der Untersuchung der Ziegel der Parochialkirche, Berlin.

**Tabelle 4:** Salzbelastung der Ziegel des Kirchenschiffes abhängig von der Lage der Wände (Gutachten Firma Bayplan).

---

**Tabelle 5:** Zusammensetzung der für die Parochialkirche in Berlin untersuchten Putze, inklusive der 4 Industrie-Sanierputze.

**Tabelle 6:** Untersuchungsergebnisse aller Entwicklungsreihen für den Putz der Parochialkirche nach 56-Tagen

**Tabelle 7:** Wasserbedarf der zur Applikation an der Parochialkirche angewendeten Mörtel

**Tabelle 8:** Haftzugfestigkeiten gemessen an den Musterflächen der Parochialkirche gemessen ein Jahr nach der Applikation.

**Tabelle 9:** Zusammensetzung der untersuchten Mischungen

**Tabelle 10:** Luftporengehalte im Frischbeton mit Glaszuschlag

**Tabelle 11:** Längenänderungen aller Proben nach einer 9-monatigen Lagerungsdauer bei sämtlichen Lagerungsarten

**Tabelle 12:** Schäden nach 50 FTW-Zyklen

**Tabelle 13:** Proben mit steigenden Kapillarporengehalten bei der Lagerung in den verschiedenen Lagerungsräumen

**Tabelle A1:** Probenahmestellen an der Parochialkirche, Berlin

**Tabelle A2:** Salzbelastung der historischen Putze des Kirchenschiffes abhängig von der Lage der Wände (nach Gutachten der Firma Bayplan).

**Tabelle A3:** Kornverteilung der Mörtelzuschläge (in M.-%) der Parochialkirche Berlin

**Tabelle A4:** Zusammensetzung der im Laufe der Putzentwicklung für die Parochialkirche in Berlin untersuchten Mörtel (bezogen auf Trockenmörtel)

**Tabelle A5:** Ergebnisse der nach 28-, 56-, 90-Tagen untersuchten Putzrezepturen für die Parochialkirche in Berlin

**Tabelle A6:** Zusätze und ihre Konzentrationen in den an der Parochialkirche applizierten Putzen

**Tabelle A7:** Ergebnisse der Oberflächenbestimmung

**Tabelle A8:** RFA Analyse der verwendeten Glasarten

**Tabelle A9:** Zusammensetzung der Betone mit Glaszuschlag

**Tabelle A10:** Wasseranspruch und Wasser/Bindemittel- Werte der Mischungen

---

## 7 Literatur

- BALKOWSKI 1992** Balkowski, F. D.: Putzrisse auf alten Untergründen – Ursachen und Vermeidung, Bausanierung, Jg. 3, Nr. 2, 1992, S. 97-100.
- BAUERECKER 1996** Bauerecker, S., Cammenga, H., K.: "Nachleuchtendes Glas für die Bauindustrie", GDCH Arbeitsgemeinschaft Bauchemie, Workshop Bauchemie, 1996, Hünfeld b. Fulda
- BAYPLAN** Bayplan GmbH: Untersuchungsbericht zum Objekt, Parochialkirche Berlin, (Bearb.: Dr. H. Weber, L. Gollwitzer)
- BOENKENDORF 1995** Boenkendorf, U.: Putzmörtel auf Lehmausfachungen, Siegen, Universität-GH iegen, Dissertation, 1995.
- BOCK 1988** Bock, E., Krumbein, W. E: Aktivitäten von Mikroorganismen und mögliche Folgen für Gestein von Baudenkmalern, Bautenschutz und Bausanierung, Sonderheft Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege, 2. Statusseminar des Bundesministers für Forschung und Technologie (BMFT) „Untersuchung und Eindämmung der Gesteinsverwitterung an Baudenkmalern“, Wuppertal 14.-15.12. 1988, S. 34-37.
- BONZEL 1986** Bonzel, J., Krell, J., Siebel, E.: "Alkalireaktion im Beton", beton 36, Heft 9, S. 345-348, und Heft 10, S. 385-389, 1986
- CAMMENGA 1997** Cammenga, H., K., Bauerecker, S.: "Nachleuchtende Gläser", 6. Diskussionstagung "Anorganisch-technische Chemie", Darmstadt, 1997
- COHEN 1994** Cohen, M. D., Goldmann, A., Chen, W. F.: The role of silica fume in mortar, Cement and Concrete Research, 24, 1994, S. 95-98.
- DAHMS 1994** Dahms, J.: "Alkalireaktion im Beton - Vorbeugende Maßnahmen und neuere Versuchsergebnisse", beton 44, Heft 10, S. 588-593, 1994

- 
- DROLL 1996** Droll, K., Meier, H. G.: Querschnittshydrophobierung von Sanierputzen-Langzeiterfahrungen, B+B, 3/96 und 4/96
- FIGG 1981** Figg, J. W.: "Reaction between cement and artificial glass in concrete", Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town - South Africa, National Building Research Institute, Preoria March/April 1981
- FRANKE 1992** Franke, L., Bentrup, H., Schumann, I.: Ursachen der Steinschädigung an historischen Backsteinbauten in Norddeutschland, B+B 16, (1992)
- FREYBERG 1994** Freyberg, S.: Historisches Ziegelmaterial-Charakteristik, Schadensbilder und Schadensursachen, Wiss. Zeitschrift Hochsch. Archit. Bauwes.-Weimar 40 (1994), 5/6/7
- GEYMAYER 1979** Geymayer, H. G.: Einfluß des Putzuntergrundes auf den Putz, Das Stuckgewerbe 12 (1979), S.17-24.
- GRÜN 1989** Grün, I.: Außenputz und Sanierputz, Detail, 5, 1989, S. 487-490
- HILBERT 1975** Hilbert, G.: Der Einfluß von Bindemitteln auf die Eigenschaften von Opferputzen, B+B, 7/75, S. 71-75.
- HILBERT 1992** Hilbert, G., Müller-Rochholz, J., Zinsmeister, K.: Salzeinlagerung in Sanierputze, Bautenschutz + Bausanierung, 15, 1992, S. 69-71, 78-80.
- KNÖFEL 1993** Knöfel, D. u. Schubert, P. (Hrsg.): Handbuch Mörtel und Steinerfüllungsmittel in der Denkmalpflege, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1993.
- KOLLMANN 1981** Kollmann, H.: Untersuchungen über die Funktionsweise von Sanierputzen, B+B, 4. Jahrgang, Nr. 2, 1981
- KOLLMANN 1992** Kollmann, H.: Neues vom Sanierputz, Stuck Putz Trockenbau, 9/92, S. 21-28

- 
- KOTTAS 1964** Kottas , H.: Das Resonanzverfahren zur Messung mechanischer Schwingungen und Materialeigenschaften, Zeitschrift für Instrumentenkunde 72 (1964), S.65-70.
- KROLKIEWICZ 1991** Krolkiewicz, H. J.: So finden Sie den richtigen Putz, Pro Sanierung, Jg. 2, Nr. 3, 1991, S. 20-22.
- LOCHER 1973** Locher, F. W., Sprung, S.: "Ursache und Wirkungsweise der Alkalireaktion", beton 23, Heft 7, S. 303-306, 1973
- MANN 1979** Manns, W., Schönefelder, R: Der Einfluß von Mörtelzusatzmitteln auf die Festigkeit von Mauermörtel, Ziegelindustrie 32, 1979, S. 80-92.
- MARTINEZ-RAMIREZ 1995** Martinez-Ramirez, S., Puertas, F., Blanco Varela, M. T.: „Carbonation Process and Properties a New Lime Mortar with Added Sepiolite“, Cement and Concrete Research, Vol. 25, pp. 39-50, 1995
- MEHLMANN 1984** Mehlmann, M., Droll, K.: Einfluß von Zusatzmitteln auf den Haftverbund Mörtel/Stein durch die Veränderung des Gefüges in der Haftzone, Forschungsbericht Nr. 1/84, Forschungsgemeinschaft der deutschen Kalkindustrie, 1984.
- MEYER 1994** Meyer, H, Weidich, R, Wolf, A.: Sind historische Putz- und Mörtelzusätze noch Zeitgemäß ?, Naturstein, Nr. 7, 1994, S. 58-62.
- MING-SHU 1980** Ming-Shu, T., Su-Fen, H.: "Effect of Ca(OH)<sub>2</sub> on alkali-silica reaction", 7<sup>th</sup> Int. Congress on the Chemistry of Cement, Vol. II, Paris, 1980
- MING-SHU 1987** Ming-Shu, T., Zhong-Zi, X., Su-Fen, H.: "Alkali Reactivity of Glass Aggregeat", Durability of Building Materials 4, S. 377-385, 1987
- NÄGELE 1986** Nägele, E.: Polymerdispersionen-Eigenschaften und Anwendungen im Bautenschutz, Bautenschutz-Bausanierung, 9.Jahrgang, 1986, S. 121-129

- 
- PICKEL 1992** Pickel, U.: "Glaseinstreuungen in Betonwerkstein", Betonwerk- und Fertigteil-Technik 58, Nr. 5, S. 56-58, 1992
- ROMBERG 1978** Romberg, H.: „Zementsteinporen und Betoneigenschaften“, Beton-Informationen, 18, 1978, S. 50-55
- SARKAR 1996** Sarkar, S., L., Vogt, W., L.: "An incidence of Alkali Silica Reaction under highly unusual circumstances", Proceedings of the eighteenth international conference on cement microscopy, 1996, Huston, Trxas, International Cement Microscopy Association
- SCHULZE 1993** Schulze, J.: Bausanierung mit Dispersionspulvern SPCC, Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 2, Hrsg.: F. Wittmann, expert-Verlag, Ehningen, 1993, S. 1138-1153.
- SHAYAN 1992** Shayan, A., Quick, G., W.: "Sequenze of formation of deleterious AAR products and secondary Ettringitr in the same mortar and concrete specimens", Proceedings of the fourteenth international conference on cement microscopy, 1992, Costa Mesa, California, International Cement Microscopy Association
- SKALNY 1992** Skalny, J., Clark, B., A., Lee, R., J.: "Alkali-Silica reaction revisited", Proceedings of the fourteenth international conference on cement microscopy, 1992, Costa Mesa, California, International Cement Microscopy Association
- STARK 1995** Stark, J., Wicht, B.: "Dauerhaftigkeit von Beton", (9. Alkali-Kieselsäure-Reaktion), Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar- Universität-, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, S 241-264, Weimar November 1995
- STRÜBEL** Strübel, G., Kraus, K., Kuhl, O., Gödicke-Dettmering, T.: Hydraulische Kalke in der Denkmalpflege, Institut für Steinkonservierung, Endbericht.

- 
- SUGITA 1997** Sugita, S., Yu, Q., Shoya, M., Tsukinaga, Y., Isojima, Y.: "The effects of waste Glass powder on the properties and pore structure of ordinary portland cement hydrates", 10<sup>th</sup> Int. Congress on the Chemistry of Cement, Vol. III, Götteborg, 1997
- THOMSON 1994** Thomson, M., L., Grattan-Bellew, P., E., White, J., C.: Applocation of microscopic and XRD techniques to investigate alkali-silica reactivity potential of rocks and minerals", Proceedings of the sixteenth internationalconference on cement mikroskopy, 1994, Richmond, Virginia, International Cement Microscopy Association
- ULLRICH 1994** Ullrich, D.G.: Bericht zu Putz- und Mörteluntersuchungen ; Parochialkirche in Berlin Mitte, 1994
- VIVIAN 1950** Vivian, H. E.: The effect on motar expansion of amount of reactive component in the aggregate, Australia, CSIRO Bulletin 256, 1950, S. 13-20.
- VIVIAN 1981** Vivian, H., E.: "A working appraisal of alkali-aggregate reaction in concrete", Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town - South Africa, National Building Research Institute, Preoria March/April 1981
- WARIANKA 1997** Warianka, E.; Knöfel, D.: Entwicklung eines Putzmörtels auf Ziegelmauerwerk zur Restaurierung der Parochialkirche in Berlin. In: 13. Internationale Baustofftagung (bausil), Weimar, 24.-26.9. 1997, Hrsg.: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, Prof. Dr.-Ing. J. Stark, Band 2, S. 803-813
- WARIANKA 1999** Warianka, E.; Knöfel, D.: Mikroskopische Untersuchungen der Reaktion zwischen Zementstein und im Beton eingebetteten Glas, GDCh Monographie zur Tagung Bauchemie, März 1999, Siegen.

- 
- WINNEFELD 1999** Winnefeld, F., Warianka, E., Knöfel, D.: Dauerhaftigkeit von Recyclingglas als Zuschlag im Beton in Abhängigkeit von der Rezeptur, 5. Internat. Kolloquium: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung; Techn. Akademie Esslingen, Herbst 1999.
- WISSER 1987** **Wisser, S.; Knöfel, D.:** Untersuchungen an historischen Putz- und Mauermörteln, Teil 2: Untersuchungen und Ergebnisse, Bautenschutz und Bautensanierung 11 (1988), S. 163-171

## 8 Anhang

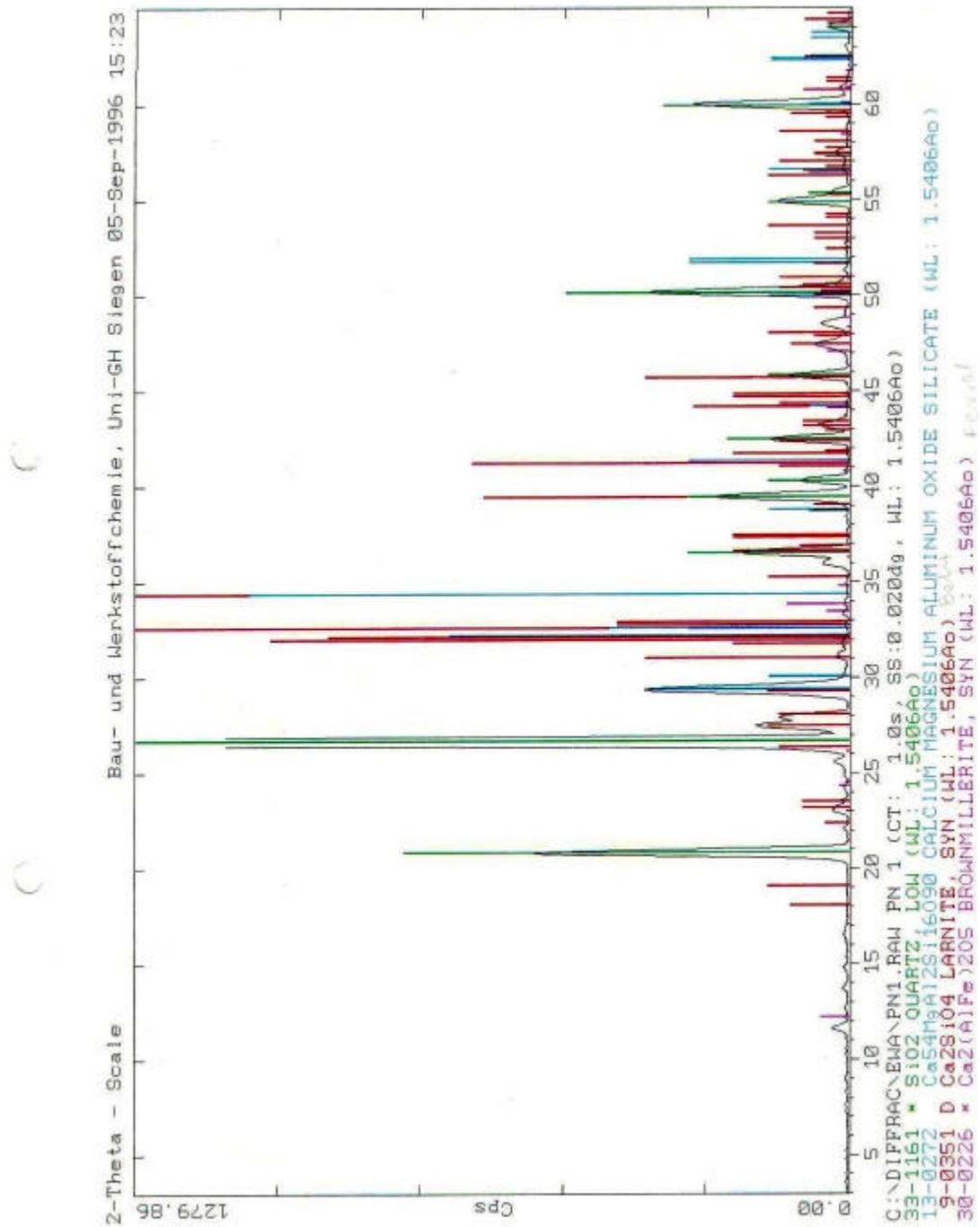
Tabelle A1: Probenahmestellen an der Parochialkirche, Berlin (Wand-Nr. siehe Abb. 7)

Probenname	Lage	Beschreibung
PJ 1	Wand Nr. 16, links von der Tür, 75 cm über dem Sockel	dicker, grauer Putz
PJ 2	Wand Nr. 15, linke Wandseite, 105 cm über dem Sockel	dicker, grauer Putz
PJ 3	Wand Nr. 11, linke Wandseite, 15 cm über dem Sockel	dicker, grauer Putz
PJ 4	Wand Nr. 21, rechte Wandseite, 10 cm über dem Absatz, in Höhe der runden Fenster	dicker, grauer Putz
PJ 5	Wand Nr. 21, rechte Wandseite, 20 cm über dem Absatz, in Höhe der runden Fenster	dicker, grauer Putz
PA 1	Wand Nr. 6, linke Wandseite, an der Tür	dünner, bräunlicher Putz
PN 1	Wand Nr. 2, rechte Wandseite, 245 cm über dem Sockel	bräunlicher Sanierputz

Tabelle A2: Salzbelastung der historischen Putze des Kirchenschiffes abhängig von der Lage der Wände (nach Gutachten der Firma Bayplan).

Richtung	Chlorid (M.-%)	Sulfat (M.-%)	Nitrat (M.-%)
S	0,03 - 0,1	1,3 - 2,8	0,1 - 0,3
SW	0,02 - 0,03	2,0 - 3,7	0,1 - 0,2
NW	0,03	2,76	0,1
W	0,06	1,45	0,1

Abbildung A1: Diffraktogramm der historischen Putzprobe PJ1 mit Röntgenreflexen der wichtigsten Phasen





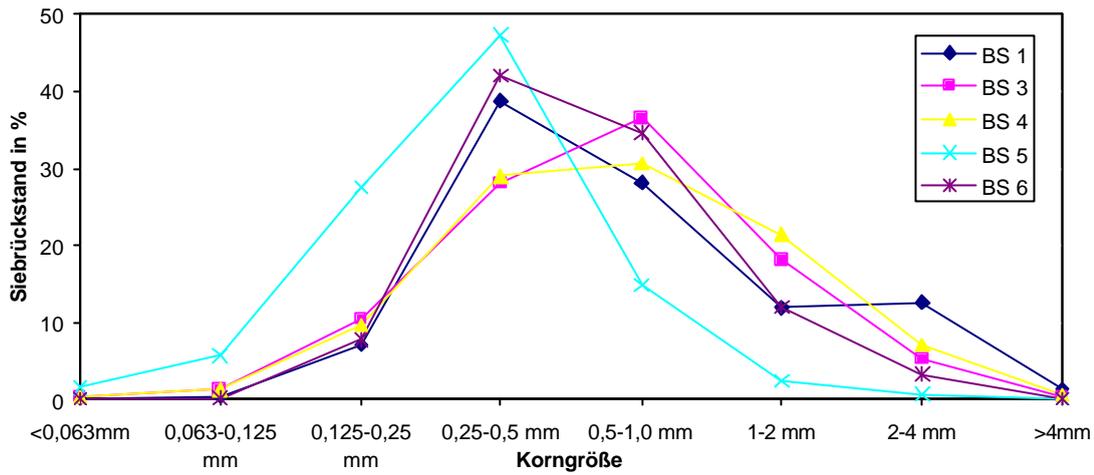


Abbildung A3: Sieblinien verschiedener Bausande Berliner Baumärkte

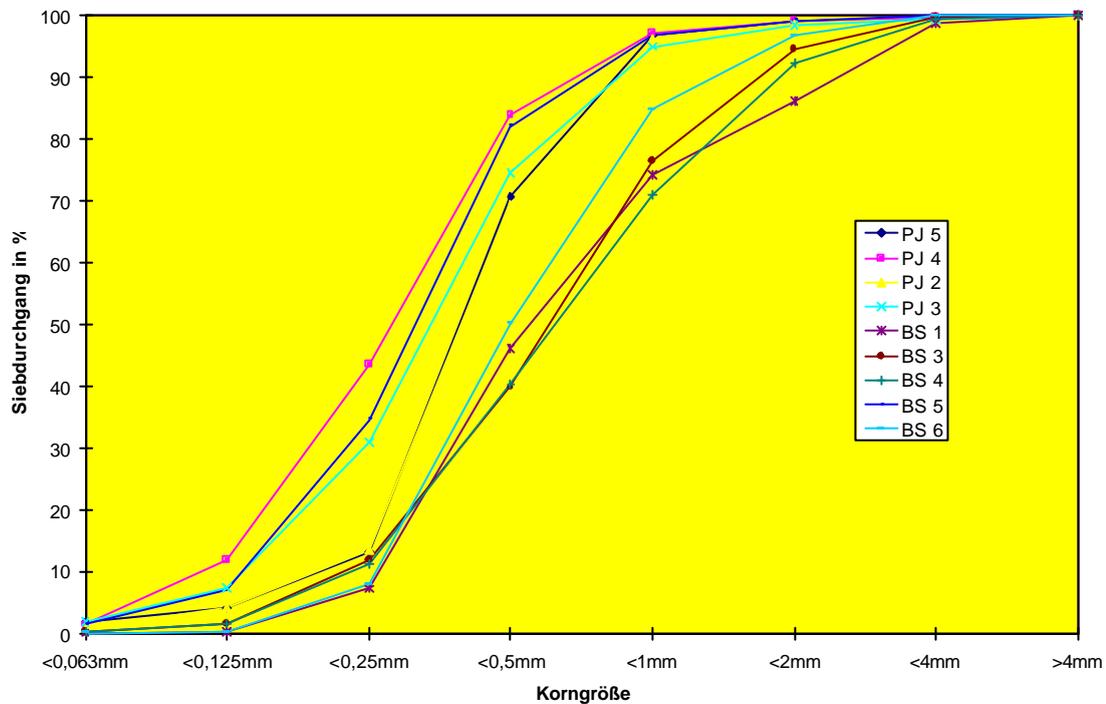


Abbildung A4: Summenkurven verschiedener Bausande Berliner Baumärkte und der Putzproben von der Parochialkirche

Tabelle A3: Kornverteilung der Mörtelzuschläge (in M.-%) der Parochialkirche Berlin

Probe	>4 mm	2-4 mm	1-2 mm	0,5-1 mm	0,25-0,5 mm	0,125-0,25 mm	0,063-0,125 mm	< 0,063 mm
PJ 2	0,7	0,5	2,6	26,9	55,8	9,3	3,2	1,0
PJ 3	0,6	1,0	3,4	20,5	43,6	23,4	5,5	1,9
PJ 4	0,2	0,7	1,9	13,2	40,4	31,7	10,4	1,5
PJ 5	0,5	0,7	2,6	26,2	57,8	9,4	2,9	2,1
BS 5	0,1	0,7	2,4	14,8	47,4	27,6	5,6	1,5

Tabelle A4: Zusammensetzung der im Laufe der Putzentwicklung für die Parochialkirche in Berlin untersuchten Mörtel (Angaben in M.-% bezogen auf Trockenmörtel, mögliche Abweichungen von 100% ergeben sich durch Runden der Nachkommastellen)

Rezeptur	Sand	HK	WKH	HOZ	P	H	K	L	M
HK/HOZ (80/20) 1:4	80	16	-	4	-	-	-	-	-
HK/HOZ 1:7	87	10	-	3	-	-	-	-	-
HK/HOZ 1:9	90	8	-	2	-	-	-	-	-
HK/HOZ/P 1:4	80	16	-	4	0,2	-	-	-	-
HK/HOZ/H/K	79	16	-	4	-	0,08	1,4	-	-
HK/HOZ/H/K/P	79	16	-	4	0,2	0,08	1,4	-	-
HK/HOZ/H/K/L	79	16	-	4	-	0,08	1,4	0,03	-
HK/HOZ/H/K/L/P	79	16	-	4	0,2	0,08	1,4	0,03	-
HK/HOZ/H/K/M 1:4	79	16	-	4	-	0,08	1,4	-	0,03
HK/HOZ/K/H/M 1:5	82	13	-	3	-	0,08	1,4	-	0,02
HK/HOZ/H/K/M 1:7	86	10	-	2	-	0,09	1,5	-	0,02
HK/HOZ/H/K/M 1:9	89	8	-	2	-	0,09	1,5	-	0,02
HK/HOZ/H/K/M/P 1:4	79	16	-	4	0,2	0,08	1,4	-	0,03
HK/HOZ/K/H/M/P 1:5	82	13	-	3	0,2	0,08	1,4	-	0,02
HK/HOZ/H/K/M/P 1:7	86	10	-	2	0,2	0,09	1,5	-	0,02
HK/HOZ/H/K/M/P 1:9	88	8	-	2	0,2	0,09	1,5	-	0,02
WKH/HOZ (70/30) 1:4	80	-	14	6	0,2	-	-	-	-
WKH/HOZ 1:7	87	-	9	4	-	-	-	-	-
WKH/HOZ 1:9	90	-	7	3	-	-	-	-	-
WKH/HOZ/P 1:4	80	-	14	6	0,2	-	-	-	-
WKH/HOZ/H/K	79	-	14	6	-	0,08	1,4	-	-
WKH/HOZ/H/K/P	79	-	14	6	0,2	0,08	1,4	-	-
WKH/HOZ/H/K/L	79	-	14	6	-	0,08	1,4	0,03	-
WKH/HOZ/H/K/L/P	79	-	14	6	0,2	0,08	1,4	0,03	-
WKH/HOZ/K/H/M 1:4	79	-	14	6	-	0,08	1,4	-	0,03
WKH/HOZ/K/H/M 1:5	82	-	11	5	-	0,08	1,4	-	0,02
WKH/HOZ/K/H/M 1:7	86	-	9	4	-	0,09	1,5	-	0,02
WKH/HOZ/K/H/M 1:9	89	-	7	3	-	0,09	1,5	-	0,02
WKH/HOZ/K/H/M/P	79	-	14	6	0,2	0,08	1,4	-	0,03

Erläuterungen: HK hydr. Kalk, HOZ Hochofenzement, WKH Weißkalkhydrat, K Kunststoffdispersion,

P Verdicker, H Hydrophobierer, M Methylcellulose, L Luftporenbildner; S Sanierputz

Tabelle A5: Ergebnisse der nach 28-, 56-, 90-Tagen untersuchten Putzrezepturen für die Parochialkirche in Berlin

Mischung	$E_{\text{dyn}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]			$\beta_{\text{BZ}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]			$\beta_{\text{D}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		
	28 d	56 d	90 d	28 d	56 d	90 d	28 d	56 d	90 d
HK/HOZ 1:4	10000	10900	9900	2,80	3,00	3,00	11,2	13,2	11,8
HK/HOZ 1:7	-	5500	6000	-	1,10	1,10	-	4,4	4,2
HK/HOZ 1:9	-	6000	5700	-	1,10	-	-	4,6	4,3
HK/HOZ/P	5600	5600	6100	1,30	1,40	1,50	10,15	10,40	10,22
HK/HOZ/H/K	6100	6200	6300	2,10	2,20	2,50	5,83	5,98	6,69
HK/HOZ/H/K/P	6200	6000	6500	2,40	2,40	2,60	5,99	5,91	6,51
HK/HOZ/H/K/L	2700	2700	3000	1,00	0,90	1,10	2,30	2,46	2,54
HK/HOZ/H/K/L/P	2500	2700	2900	0,90	1,10	1,30	2,44	2,69	2,75
HK/HOZ/H/K/M 1:4	6300	6600	6700	2,20	2,60	2,40	5,9	7,1	7,3
HK/HOZ/K/H/M 1:5	-	5200	5400	-	1,90	1,50	-	4,1	4,5
HK/HOZ/H/K/M 1:7	-	3400	3600	-	1,20	1,10	-	2,6	3,5
HK/HOZ/H/K/M 1:9	-	3100	2900	-	0,90	0,90	-	2,0	1,9
HK/HOZ/H/K/M/P 1:4	5700	5400	6000	2,00	2,30	2,40	5,5	5,7	5,5
HK/HOZ/K/H/M/P 1:5	-	5300	5200	-	2,00	1,90	-	4,4	4,2
HK/HOZ/H/K/M/P 1:7	-	3400	3500	-	1,10	1,20	-	2,6	2,5
HK/HOZ/H/K/M/P 1:9	-	3000	3200	-	1,00	0,90	-	2,0	2,0
WKH/HOZ 1:4	7400	7600	7900	1,30	1,10	2,20	7,7	7,8	9,3
WKH/HOZ 1:7	-	4600	4600	-	-	0,90	-	5,8	3,5
WKH/HOZ 1:9	-	2600	3400	-	-	-	-	3,7	1,9
WKH/HOZ/P	5600	6800	6800	1,70	1,70	2,20	6,46	6,88	7,40
WKH/HOZ/H/K	5200	5300	5100	1,80	1,80	2,20	5,09	5,11	5,77
WKH/HOZ/H/K/P	3700	4900	5000	1,40	1,80	2,00	4,28	5,17	5,69
WKH/HOZ/H/K/L	3500	3800	4100	1,30	1,40	1,70	3,72	3,72	4,14
WKH/HOZ/H/K/L/P	3700	3700	3800	1,30	1,40	1,50	3,65	3,85	4,24
WKH/HOZ/K/H/M 1:4	4800	5100	5100	2,30	2,00	2,20	5,3	5,4	5,2
WKH/HOZ/K/H/M 1:5	-	4200	4600	-	1,30	1,70	-	3,0	4,1
WKH/HOZ/K/H/M 1:7	-	3800	3300	-	1,10	1,10	-	2,5	2,5
WKH/HOZ/K/H/M 1:9	-	3100	3000	-	0,80	0,90	-	1,8	1,9
WKH/HOZ/K/H/M/P	4200	4600	4300	1,90	1,10	1,70	4,95	4,99	4,29
S 1	2800	2600	3300	0,50	0,80	1,00	3,2	2,4	3,1
S 2	3600	2900	3100	1,50	1,10	1,50	4,6	3,6	3,8
S 3	1400	1600	1500	0,70	0,90	0,80	1,5	1,8	1,7
S 4	1300	1300	1400	0,70	0,60	0,70	1,3	1,2	1,3

Erläuterungen: „-“ nicht bestimmt, HK hydr. Kalk, HOZ Hochofenzement, WKH Weißkalkhydrat, K Kunststoffdispersion, P Verbesserer, H Hydrophobierer, M Methylcellulose, L Luftporenbildner; S Sanierputz

Tabelle A6: Zusätze und ihre Konzentrationen in den an der Parochialkirche applizierten Putzen

Abkürzung	Name	Gehalt bezogen auf Trockenmörtel
P	Pangel	0,2 M.-%
M	Methylcellulose	0,03 M.-%
K	Kunststoffdispersion	1,4 M.-%
H	Hydrophobierer	0,02 M.-%

Erläuterungen: HK hydr. Kalk, HOZ Hochofenzement, WKH Weißkalkhydrat, K Kunststoffdispersion, P Verarbeitungsverbesserer, H Hydrophobierer, M Methylcellulose, L Luftporenbildner; S Sanierputz

Tabelle A7: Ergebnisse der Oberflächenbestimmung

Substanz	Mittl. Dichte in g/cm <sup>3</sup>	Lasergranulometrie [cm <sup>2</sup> /g]
Weißzement	3,15	3620
Glasmehl	2,53	2450

Tabelle A8: RFA Analyse der verwendeten Glasarten und Bindemittel (Angaben in M.-%)

Oxide/Elemente	Buntglas	Quarzglas	Weißzement	Glasmehl	HL 2	CL 90	CEM III/B
SiO <sub>2</sub>	65,72	99,39	99,39	71,39	11,10	0,59	28,90
TiO <sub>2</sub>	0,95	0,00	0,00			0,04	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,81	0,00	0,00	2,25	3,90	0,01	9,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,52	0,00	0,18	0,46	1,80	0,17	1,01
MgO	2,53	0,18	0,00	0,94	2,30	1,20	6,30
CaO	5,28	0,01	0,00	9,82	60,50	97,90	49,30
Na <sub>2</sub> O	10,59	0,00	0,19	13,88		0,04	
K <sub>2</sub> O	4,19	0,00	0,00	0,87		0,01	
C= CaO+MgO	7,81	0,19					
A= Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO+Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,33	0,000					
N= SiO <sub>2</sub> +Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	80,50	99,39					
K= (C+A)/N	0,13	0,002					

Tabelle A9: Zusammensetzung der Betone mit Glaszuschlag (mögliche Abweichungen von 100% ergeben sich durch Runden der Nachkommastellen, Angaben in M.-% bezogen auf Trockenmischung)

Rezeptur	Sand	A	B	C	CEM I	H	F	K	L	M	G
NH/F	80	-	-	-	20	-	0,2	-	-	-	-
A15/NH/F	69	10	-	-	20	-	0,2	-	-	-	-
A/NH/F	61	18	-	-	20	-	0,2	-	-	-	-
A/H/F	61	18	-	-	20	0,1	0,2	-	-	-	-
A/H/F/14	61	18	-	-	20	0,1	0,2	-	-	-	-
A/H/K	61	18	-	-	20	0,1	-	1,6	-	-	-
A/H/F/M	61	18	-	-	20	0,1	0,2	-	-	1,0	-
A/H/K/M	60	18	-	-	19	0,1	-	1,6	-	1,0	-
A/H/F/G	60	18	-	-	20	0,1	0,2	-	-	-	1,5
A/H/K/G	60	18	-	-	19	0,1	-	1,5	-	-	1,5
A/H/K/M/G	59	18	-	-	19	0,1	-	1,5	-	1,0	1,4
A/H/F/G/L	60	18	-	-	20	0,1	0,2	-	0,1	-	1,5
A45/H/K/G/L	53	24	-	-	19	0,1	-	1,5	0,1	-	1,5
B15/NH/F	69	-	10	-	20	-	0,2	-	-	-	-
B/NH/F	61	-	18	-	20	-	0,2	-	-	-	-
B/H/F	61	-	18	-	20	0,1	0,2	-	-	-	-
B/H/F/14	61	-	18	-	20	0,1	0,2	-	-	-	-
B/H/K	61	-	18	-	20	0,1	-	1,6	-	-	-
B/H/F/G/L	61	-	18	-	20	0,1	0,2	-	0,1	-	-
B45/H/K/G/L	53	-	24	-	19	0,1	-	1,5	0,1	-	1,5
C/NH/F	79	-	-	1	20	-	0,2	-	-	-	-
C/H/F	79	-	-	1	20	0,1	-	-	-	-	-

Erklärungen: NH nicht hydrophobiert, H Hydrophobierer, F Fließmittel, K Kunststoffdispersion, M Microsilica, G Glasmehl, L Luftporenbildner, Zahlen: 14 Ausbreitmaß von 14 cm, sonst 17 cm; 15, 45 Glasanteil des Zuschlags in M.-%, sonst 30 M.-%, A Quarzglas, B buntes Recyclingglas, C mineralische Fäden

Tabelle A10: Wasseranspruch und Wasser/Bindemittel- Werte der Mischungen

Nr.	Probebezeichnung	Wasseranspruch [ g/kg ]	W/B- Wert
1	NH/F	115,9	0,58
2	A15/NH/F	111,1	0,55
3	A/NH/F	110,1	0,55
4	A/H/F	109,1	0,55
5	A/H/F/14	102,3	0,51
6	A/H/K	112,1	0,57
7	A/H/F/M	111,1	0,56
8	A/H/K/M	107,9	0,55
9	A/H/F/G	111,5	0,57
10	A/H/K/G	113,5	0,59
11	A/H/K/M/G	105,9	0,55
12	A/H/F/G/L	111,4	0,57
13	A45/H/K/G/L	106,1	0,55
14	B15/NH/F	111,1	0,56
15	B/NH/F	106,9	0,53
16	B/H/F	106,8	0,53
17	B/H/F/14	102,3	0,51
18	B/H/K	104,0	0,53
19	B/H/F/G/L	108,7	0,55
20	B45/H/K/G/L	103,7	0,53
21	C1,5/NH/F	154,4	0,77
22	C1,5/H/F	160,1	0,80

Erklärungen: NH nicht hydrophobiert, H Hydrophobierer, F Fließmittel, K Kunststoffdispersion, M Microsilica, G Glasmehl, L Luftporenbildner, Zahlen: 14 Ausbreitmaß von 14 cm, sonst 17 cm; 15, 45 Glasanteil des Zuschlags in M.-%, sonst 30 M.-%, A Quarzglas, B buntes Recyclingglas, C mineralische Fäden

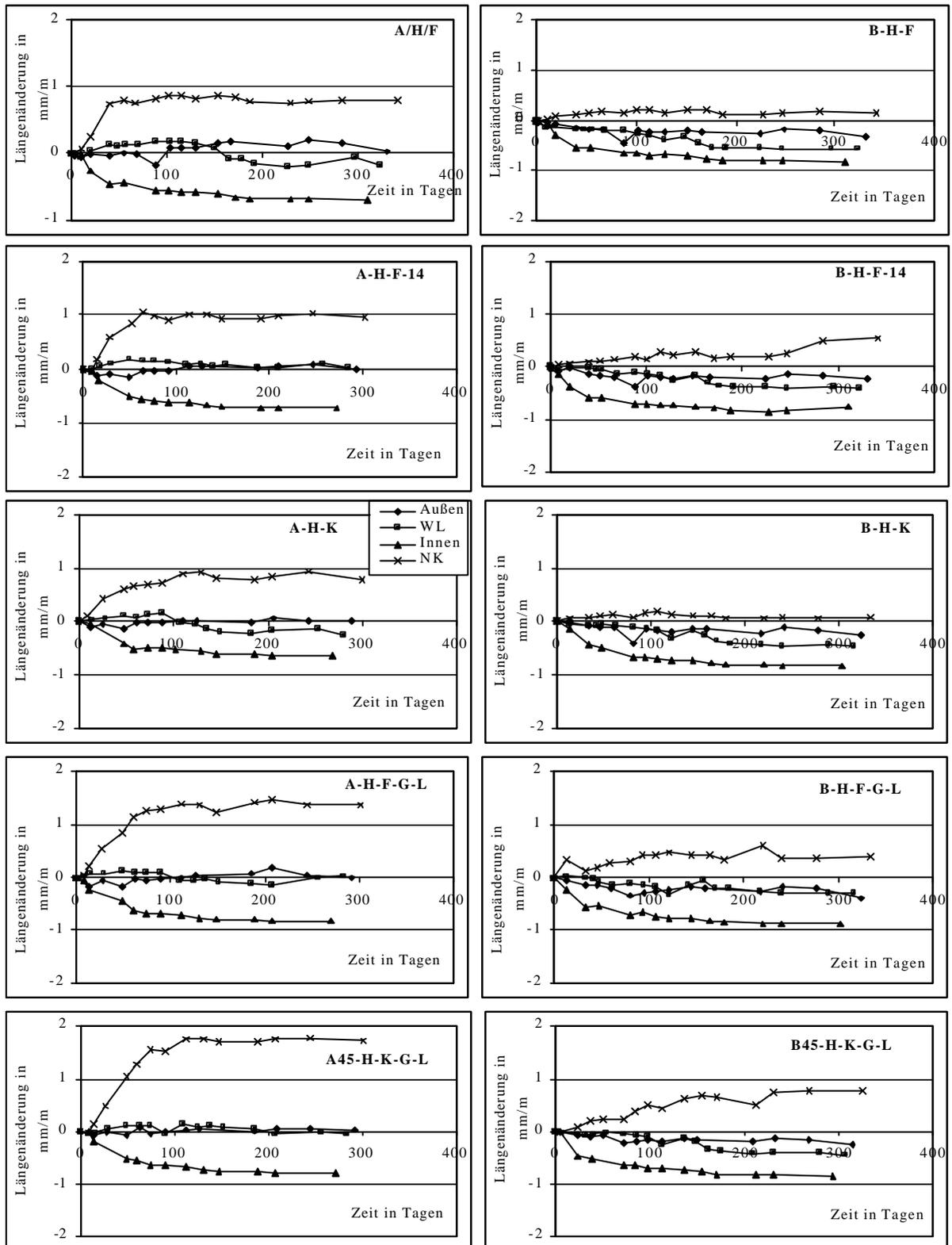


Abbildung A5: Längenänderung der Glasbetonproben in vier Lagerungen

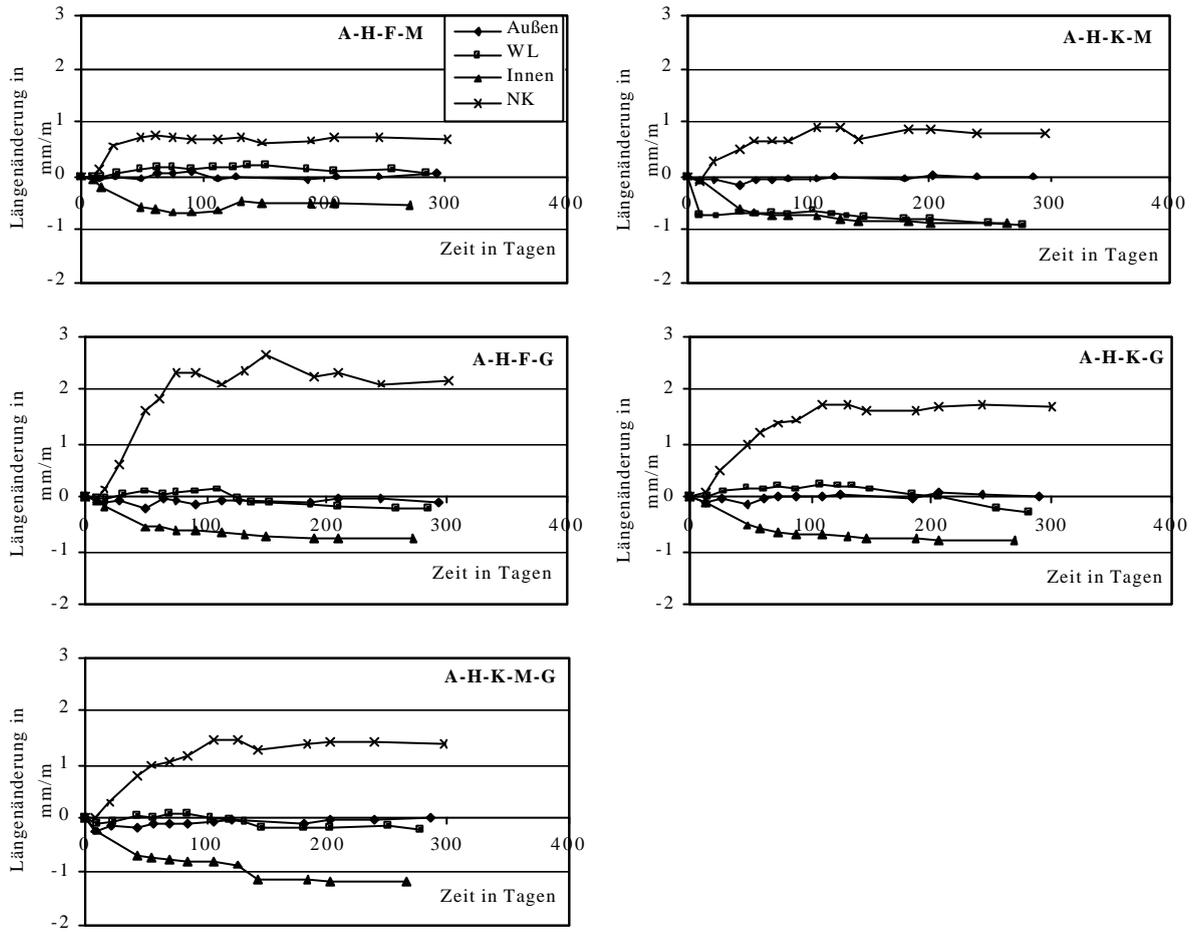


Abbildung A6: Längenänderung der Glasbetonproben in vier Lagerungen

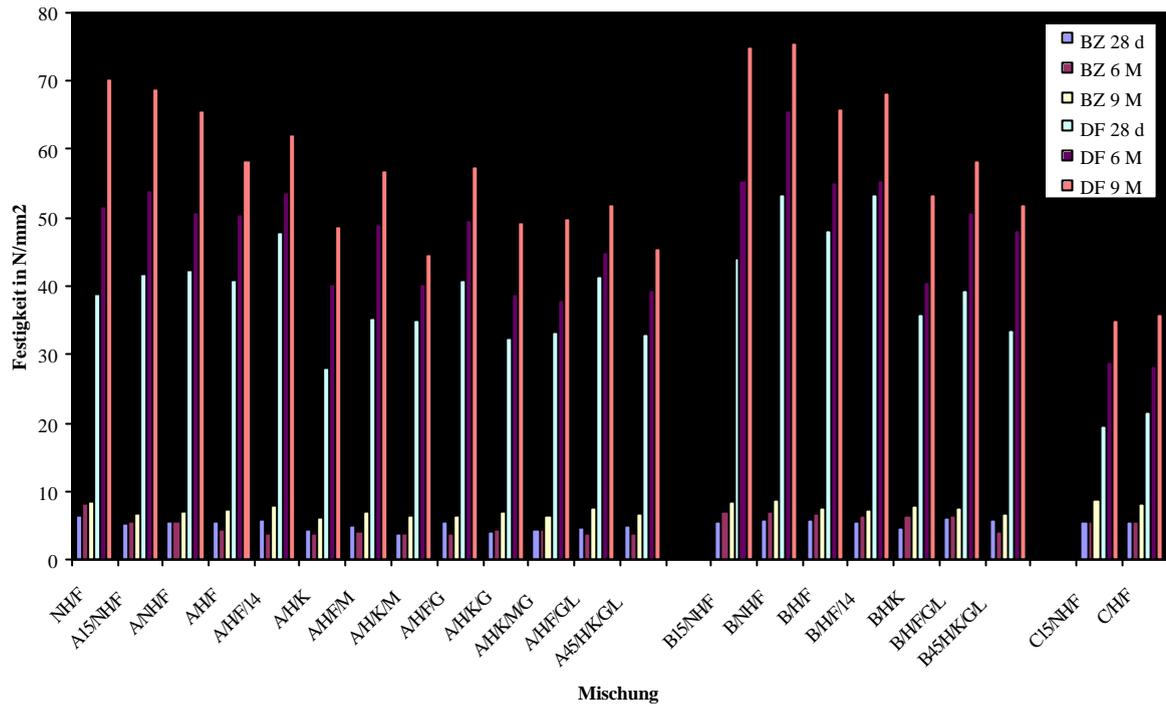


Abbildung A7: Festigkeiten der im Freien gelagerten Glasbetonproben

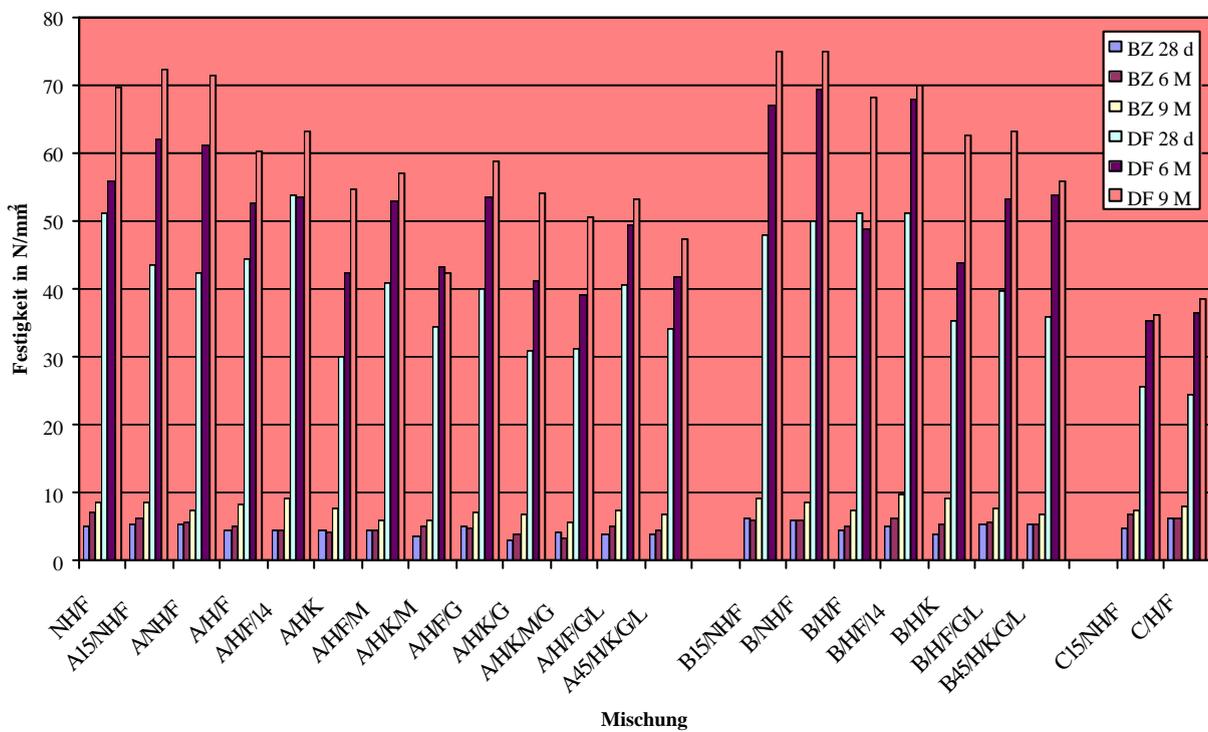


Abbildung A8: Festigkeiten der Feucht/Trocken Wechsel gelagerten Glasbetonproben

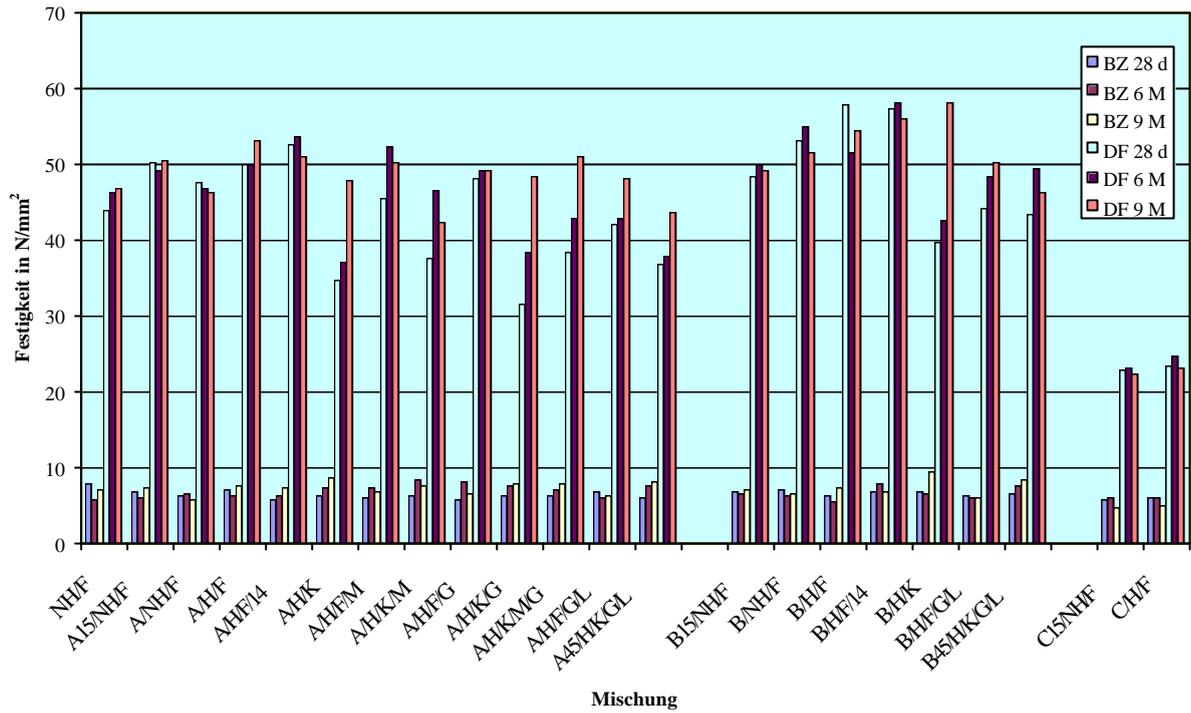


Abbildung A9: Festigkeiten der Innen gelagerten Glasbetonproben

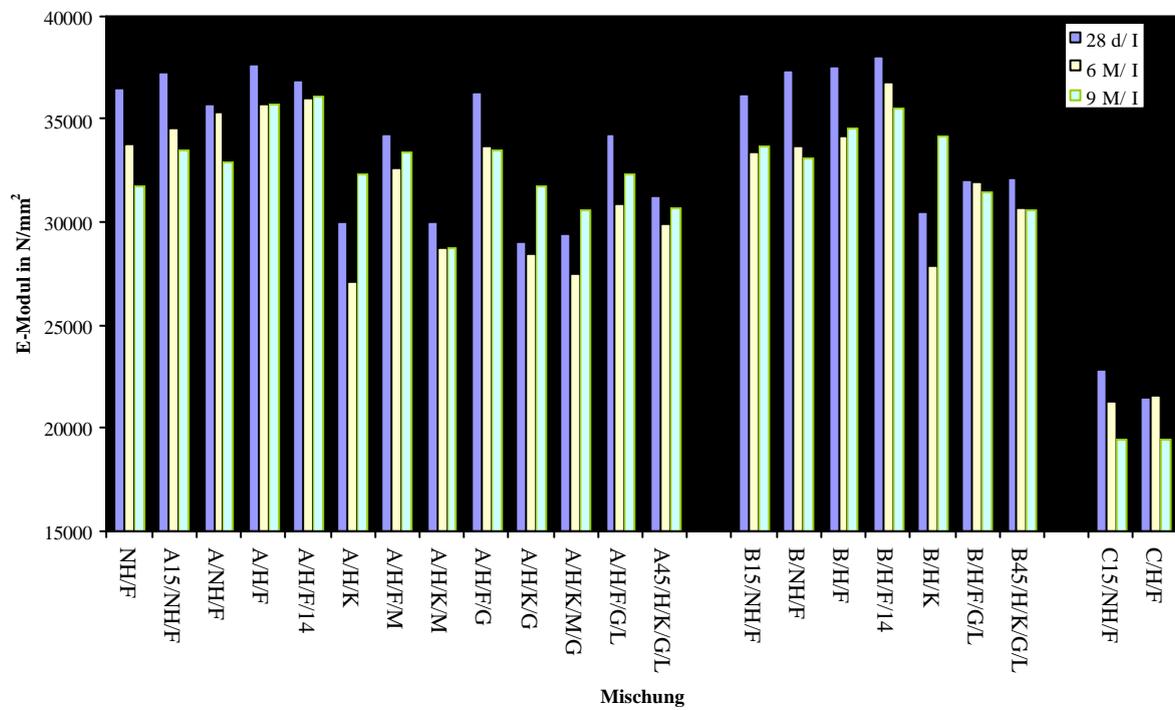


Abbildung A10: E-Modul der Innen gelagerten Glasbetonproben

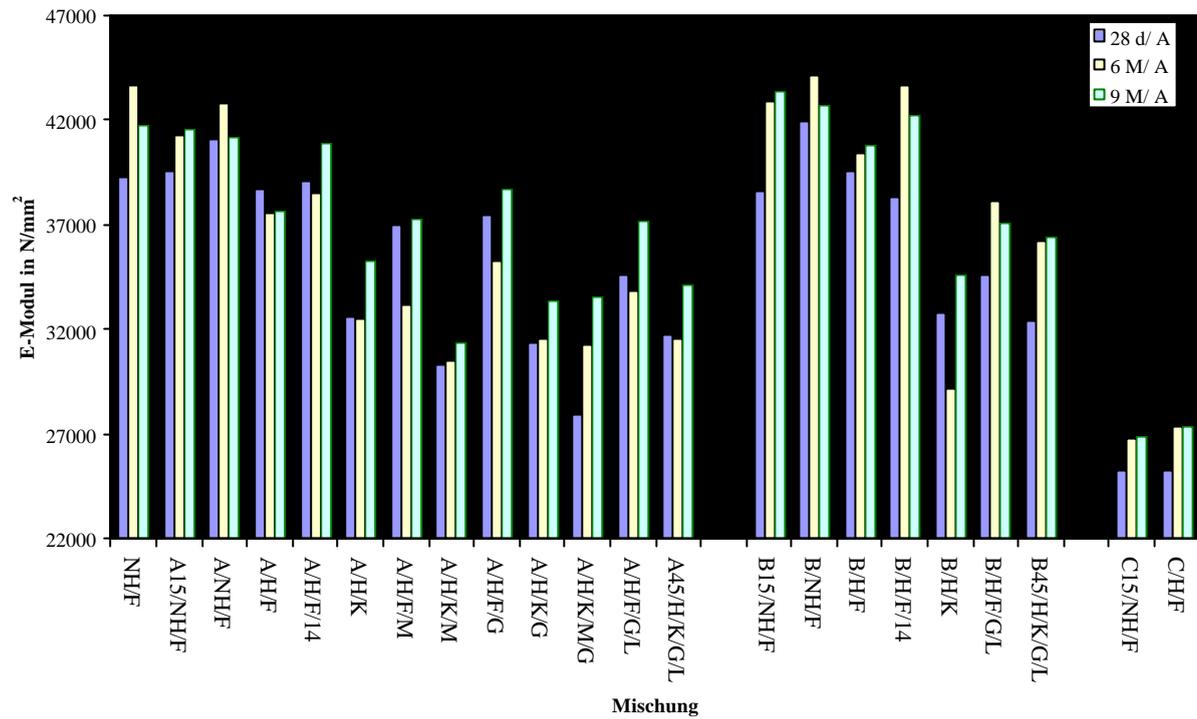


Abbildung A11: E-Modul der im Freien gelagerten Glasbetonproben

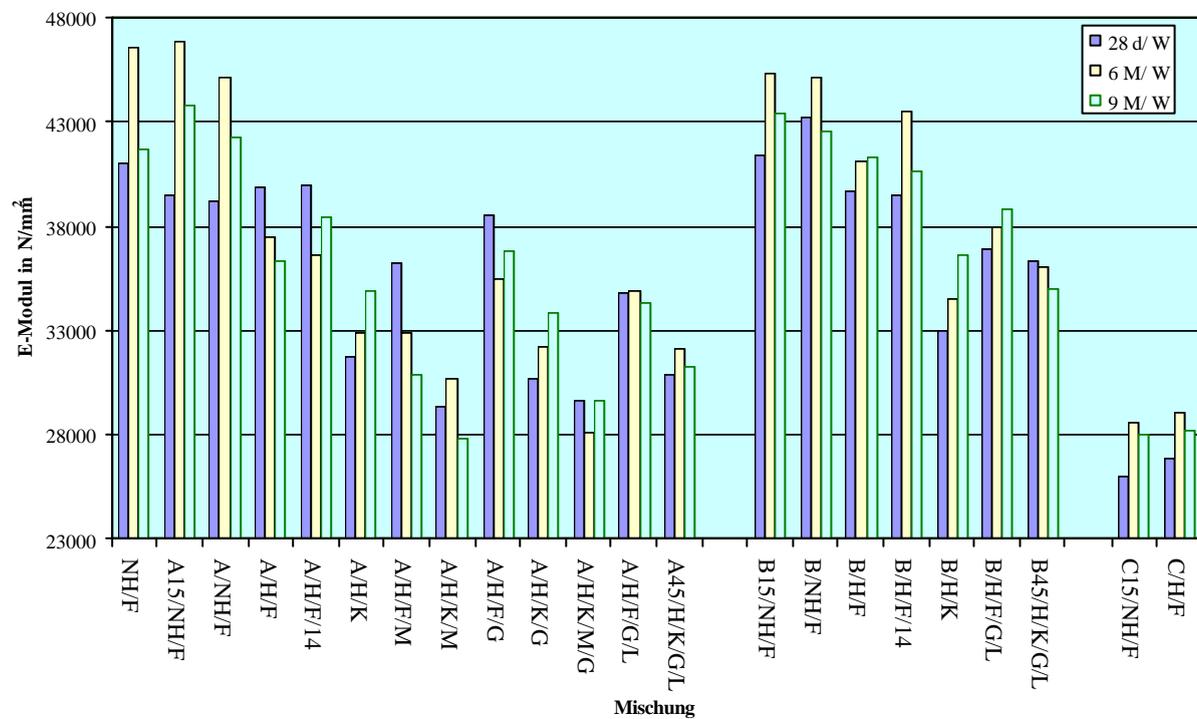


Abbildung A12: E-Modul der Feucht/Trocken Wechsel gelagerten Glasbetonproben

Tabelle A 11: Ergebnisse der Porosimetriemessungen

Probe	Luftporen		Kapillarporen		Gelporen	
	90 d	270 d	90 d	270 d	90 d	270 d
NH/F-WL	2,63	2,63	6,03	5,38	5,69	6,33
A15/NH/F-WL	3,31	2,74	5,91	4,98	5,48	5,61
A/H/F-WL	3,29	2,88	5,41	5,06	5,39	6,06
A/H/F/14-WL	3,13	2,64	4,03	3,93	5,09	5,87
A/H/K/G-WL	4,38	3,49	5,25	5,78	5,91	7,56
A/H/F/G-WL	3,18	2,87	5,21	4,86	6,01	6,32
A/H/F/M-WL	3,26	2,75	5,09	4,05	6,32	6,43
A/H/K/M/G-WL	5,00	4,43	6,39	5,61	6,72	7,77
A/H/F/G/L-WL	3,38	2,9	6,34	5,37	5,50	5,78
A45/H/K/G/L-WL	4,61	4,08	5,77	5,02	6,09	7,29
B15/NH/F-WL	3,39	2,89	5,78	5,74	5,69	6,13
B/H/F-WL	2,79	2,36	5,12	4,35	5,29	5,63
B/H/F/14-WL	3,20	2,89	4,43	3,88	5,44	6,22
B45/H/K/G/L-WL	4,23	3,54	4,75	5,62	6,17	6,19
C15/NH/F-WL	4,81	4,94	10,25	8,93	6,33	6,3
NH/F-NK	2,82	2,94	6,73	5,22	5,40	7,61
A15/NH/F-NK	2,73	2,71	4,56	4,36	5,28	6,31
A/H/F-NK	3,37	2,94	5,00	3,57	6,36	7,24
A/H/F/14-NK	3,37	3	4,57	3,53	6,31	6,69
A/H/F/G-NK	3,36	1,77	5,18	3,29	6,86	7,88
A/H/F/M-NK	3,63	2,9	5,13	4,58	6,82	7,88
A/H/K/M/G-NK	4,76	2,41	5,55	4,58	6,94	9,39
A/H/F/G/L-NK	3,97	2,06	4,88	5,36	5,97	7,2
A45/H/K/G/L- NK	3,83	4,1	4,90	5,05	7,74	7,86
B15/NH/F-NK	3,16	2,72	4,96	4,62	5,84	7
B/H/F-NK	2,75	2,69	4,59	3,72	6,19	6,92
B/H/F/14-NK	3,00	2,95	3,86	3,04	5,89	7,04
B/H/F/G/L-NK	3,76	3,54	5,12	6,15	5,33	5,71
B45/H/K/G/L-NK	3,70	4,09	4,10	7,71	7,55	5,3
C15/NH/F-NK	4,67	4,01	8,44	9,47	7,16	7,22
NH/F-A	2,43	2,82	6,10	5,73	6,20	6,03
A15/NH/F-A	2,85	2,49	5,91	5,6	5,52	5,45
A/H/F-A	2,93	2,63	5,12	3,94	5,61	5,73
A/H/F/14-A	2,65	2,93	4,96	4,36	5,85	4,97
A/H/K/G-A	3,60	3,53	6,74	6,62	7,28	6,82
A/H/F/G-A	3,93	2,98	5,29	4,94	6,34	6,19
A/H/F/M-A	3,68	2,97	4,85	4,62	6,11	6,83
A/H/K/M/G-A	4,87	4,41	6,29	6,45	6,47	6,78
A/H/F/G/L-A	3,98	3,05	5,80	5,62	5,74	5,88
A45/H/K/G/L-A	4,57	3,57	5,25	5,68	6,27	5,9
B15/NH/F-A	2,92	2,74	6,11	5,62	5,20	5,21
B/H/F-A	2,83	3,2	5,01	4,75	5,57	5,55
B/H/F/14-A	2,71	2,77	4,47	5,01	5,44	5,51
B/H/F/G/L-A	3,70	3,19	4,40	5,46	5,80	5,93
B45/H/K/G/L-A	4,36	3,62	5,16	6,48	6,09	5,93
C15/NH/F-A	5,65	4,99	9,98	9,33	5,81	5,21