

ISBN 3-88314-887-3

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Forschungsbericht 156

Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen

von Dr.-Ing. Günter Klamrowski
Dipl.-Ing. Paul Neustupny
Prof. Dr. habil. Hans-Joachim Deppe
Ing. Klaus Schmidt
Dr.-Ing. Jürgen Hundt

April 1989

182 Seiten, 159 Abbildungen, 18 Tabellen

Gliederung des Berichtes

I Vorbemerkung, Seite 5

**II Beurteilung der Dauerhaftigkeit des Faserzement-Scherbens;
Entwicklung eines Prüfverfahrens**, Seite 7

Dr.-Ing. Günter Klamrowski Dipl.-Ing. Paul Neustupny

**III Das Verhalten von Faserzement unter der Beanspruchung des
BAM-XENOTEST 1200-Kurzzeitbewitterungsverfahrens**, Seite
113

Prof. Dr. habil. Hans-Joachim Deppe Ing. Klaus Schmidt

IV Zusammenfassung, Seite 175

Dr.-Ing. Jürgen Hundt

Projektleitung: Dr.-Ing. Jürgen Hundt

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde im Auftrage des Verbandes der Faserzement-Industrie e.V. durchgeführt und mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 01 VD 133/7 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Berichtsteile liegt bei den Autoren.

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1 Telex 183 261 bamb d
Telefax (030) 8 112 029 Teletex 2 627-308 372=bamb

Copyright © 1989 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1
Telefon (0471) 46093-95

Kurzfassung

Wegen des von Asbestfasern ausgehenden Gesundheitsrisikos sind mit Kunststoff- bzw. Zellulosefasern armierte Faserzement-Baustoffe entwickelt worden, zu deren Beurteilung nur zum Teil auf bestehende Prüfverfahren zurückgegriffen werden kann. Um den Fragen des Widerstandes gegen Witterungseinflüsse nachzugehen, ist

- unter Berücksichtigung des räumlichen Verformungsverhaltens von vollständig wassergesättigtem Material eine Methode entwickelt worden, die als Beurteilungskriterium den Festigkeitsverlust infolge der Beanspruchung verwendet (siehe Teil II),
- das in der BAM für Holzwerkstoffe entwickelte Kurzzeitbewitterungsverfahren (XENOTEST 1200) auf Faserzemente angewendet worden, um zu klären, ob es für die Einschätzung des Langzeitverhaltens von Faserzement geeignet ist (siehe Teil III).

Die Untersuchungen lassen erkennen, daß Faserzemente ein sehr differenziertes Verhalten aufweisen, wobei sie hinsichtlich der Dauerhaftigkeit den Asbestzementen nicht nachstehen müssen. Während die erstgenannte Methode zur Abklärung sicherheitsrelevanter Aspekte des Verwendungsbereiches eingesetzt werden kann, dienen die im Teil III dargestellten Resultate zur Beurteilung der Beschichtungen und der Alterung der organischen Fasern im Oberflächenbereich sowie im Verbund mit der Zementsteinmatrix.

Anhand der im Vorhaben erarbeiteten Ergebnisse kann für Faserzemente, für die bezüglich des Langzeitverhaltens des Fasermaterials sowie des Widerstandes gegen Witterungseinflüsse keine Erfahrungen vorliegen, eine Prüfphilosophie vorgeschlagen werden (siehe Teil IV).

Abstract

Due to the health hazards existing with asbestos fibres new fibre-cement products reinforced with synthetic or cellulose fibres, respectively, have been developed, for the assessment of which only part of the already existing test methods can be used. In order to investigate their weathering resistance

- a method has been established under consideration of the threedimensional deformation behaviour of the completely water saturated material which uses as criterion of assessment the loss of strength caused by exposure (see part II),
- the shorttime-weathering/test (XENOTEST 1200) developed for wood-based panels at the BAM has been used in order to find out whether this test is suitable for the assessment of the long-term behaviour of fibre-cement products (see part III).

The tests have shown that fibre-cement products present a very distinctive behaviour which does not mean that their durability is less high than that of asbestos-cements. While the test method mentioned under part II is used to assess the aspects of safety in connexion with the fitness for use of these products, the results presented in part III give some information about the assessment of the coatings as well as about the ageing of organic fibres in the surface area and in the cement matrix bond.

On the basis of the results obtained by this research work it is possible to propose a test philosophy for fibre reinforced cement products for which - as far as their longterm behaviour and their resistance to climatic influences are concerned - no experience is available yet (see part IV).

Die Autoren danken dem Verband der Faserzement-Industrie e.V. sowie dem Bundesminister für Forschung und Technologie für die Mittelbereitstellung und die verständnisvolle Betreuung des Projektes.

Allen beteiligten Firmen des Verbandes sei gedankt für die kollegiale Unterstützung bei der Probenbeschaffung und Bearbeitung technischer Details.

Den Herren J. Götze, J. Kindler, T. Nagel und H. Hansen gebührt Dank für die Vorbereitung und Durchführung der Versuchsarbeiten, Herrn Graßmel für die Anfertigung von Zeichnungen und Diagrammen, den Damen L. Borieo, E. Tessmann und H. Brockhaus für das sorgfältige Schreiben der Manuskripte.

I Vorbemerkung

Über viele Jahrzehnte ist der Verbundwerkstoff Asbestzement plattenförmig oder profiliert erfolgreich als Bedachungs- und Bekleidungsmaterial für Fassaden hergestellt und verwendet worden. Auch Rohre aus Asbestzement für Entwässerungs- bzw. Druckleitungen der Trinkwasserversorgung haben sich bewährt. Ursache für die gute Eignung ist der innige Verbund, den die gut aufschließbare, silikatische Asbestfaser mit dem der chemischen Zusammensetzung nach artverwandten Zementstein eingeht. Dabei spielt aber auch das Herstellungsverfahren eine wichtige Rolle. In Deutschland werden Asbestzementprodukte vorwiegend nach dem sogenannten Hatschek-Verfahren gefertigt, einer Methode, bei der in Analogie zur Papierherstellung auf großen Rundsieb-Pappenmaschinen eine vorgemischte dünnflüssige Aufschlämmung aus Asbest und Zement lagenweise gewickelt wird.

Das von feinsten Asbestfasern, die in die Atemluft gelangen können, ausgehende Gesundheitsrisiko brachte auch den Asbestzement ins Zwielficht. Im Gegensatz zu den sogenannten schwach gebundenen Asbesten - z.B. dem früher für Brandschutzzwecke verwendeten Spritzasbest - kann bei diesem die Asbestfaser aus der "harten" Bindung im Zementstein jedoch nur durch massive mechanische Einwirkung oder in Zusammenhang mit langzeitigen Errosionsvorgängen herausgelöst werden. Wie auch in anderen Ländern sah sich die deutsche Asbestzementindustrie veranlaßt, Ersatzprodukte zu entwickeln. Dabei wurde das Herstellungsverfahren, nämlich das Wickelverfahren auf Hatschek-Maschinen, beibehalten und der für die Stabilisierung der Aufschlämmung und vor allem für die Bewehrung im fertigen Produkt notwendige Asbest durch andere Faserstoffe ersetzt. Die von Asbest in idealer Weise sowohl beim Herstellungsprozeß als auch im fertigen Produkt übernommenen Aufgaben müssen bei den Faserzementen jedoch von einem Fasergemisch, bestehend aus Prozeß- und Bewehrungsfasern, getragen werden.

Es liegt auf der Hand, daß bei der Entwicklung solcher Faserzemente sowohl den Bedingungen des Herstellungsprozesses als auch den miteinander in mannigfaltiger Weise verknüpften Eigenschaften wie der mechanischen Festigkeit, der Dimensionsstabilität, dem elastischen Verhalten und dem Widerstand gegenüber Witterungseinflüssen besondere Beachtung zu schenken ist.

Mit der industriellen Fertigung von Faserzementprodukten, die den bisherigen Asbestzement-Erzeugnissen entsprechen sollen, werden demzufolge auch Untersu-

chungen zur Erarbeitung von Prüfverfahren notwendig, mit deren Hilfe das Langzeitverhalten unter praktischen Expositionsbedingungen eingeschätzt werden kann. Dabei sind in dieser Arbeit zwei Wege beschrrieben worden:

- einerseits sollte ein auf physikalischen Grundlagen basierendes Prüfverfahren zur Beurteilung des Widerstandes gegenüber Witterungseinflüssen erarbeitet werden, das vor allem auch zur Beurteilung von Faserzementen im bauaufsichtlich relevanten Verwendungsbereich herangezogen werden kann
- andererseits war in Verbindung mit Prüfungen bei natürlicher Außenbewitterung ein für Holzwerkstoffe in der Bundesanstalt entwickeltes Kurzzeitbewitterungsverfahren "BAM-XENOTEST 1200" (s. Abschnitt III) zur Einschätzung des Verhaltens von Faserzementen anzuwenden.

Um den Aufwand in Grenzen zu halten, wird im ersten Falle versucht, anhand des Dilatationsvorhaltens und der Entwicklung der Eigenschaften des Faserzement-Scherbens die maßgeblichen Intensitätsparameter der Beanspruchung sowie die Versagensumstände herauszufinden. Im zweiten Komplex steht die Beurteilung der Beschichtungen und der Alterung der organischen Fasern in der Zementsteinmatrix bei künstlicher Bewitterung im Mittelpunkt. Hierbei wird untersucht, ob sich die unter XENOTEST-Bedingungen ergebenden Materialveränderungen mit jenen korrelieren lassen, die an Proben ermittelt werden, welche einer bestimmten natürlichen Witterung ausgesetzt waren. Bei der Erarbeitung des Vorhabenplanes im Verlauf des Jahres 1983 sind bewußt beide Wege eingeschlagen worden, obwohl diese hinsichtlich der Prüfphilosophie von gegensätzlichen Betrachtungsweisen ausgehen.

Die beiden Vorhabenteile sind von zwei selbständigen Gruppen innerhalb der Bundesanstalt bearbeitet worden. Die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Abschnitten II und III unabhängig voneinander dargestellt, wobei die grundsätzlichen Ausführungen des Abschnittes II bezüglich der technischen Eigenschaften der Faserzemente für beide Vorhabenteile gelten. In Abschnitt IV wird versucht, eine Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse beider Vorhabenteile zu geben.

II **Beurteilung der Dauerhaftigkeit des Faserzement-Scherbens; Entwicklung eines Prüfverfahrens**

Dr.-Ing. Günter Klamrowski
Dipl.-Ing. Paul Neustupny

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einführung	9
2 Technische Eigenschaften der Faserzemente	11
2.1 Versuchsmaterial	11
2.1.1 Auswahlkriterien und Zusammensetzung	11
2.1.2 Probenherstellung und Einteilung in Versuchsserien	14
2.1.3 Behandlungsbedingungen und -ablauf	17
2.1.4 Allgemeine Angaben zu den Eigenschaften im Ausgangszustand	22
2.2 Mechanische Eigenschaften und Untersuchungsmethodik	24
2.2.1 Biegezugfestigkeit	24
2.2.2 Querkzugfestigkeit	28
2.2.3 Dynamischer Elastizitätsmodul	31
2.3 Porenraumbezogene Eigenschaften und Untersuchungsmethodik	32
2.3.1 Sättigungsgrad, Porosität und Rohdichte	33
2.3.2 Kapillare Wasseraufnahme	37
2.3.3 Quecksilberporosimetrie	42
2.3.4 Luftdurchlässigkeit	45
2.4 Eigenschaften nach künstlicher Hydratisierung und Carbonatisierung	47
3 Zur Wechselbeziehung zwischen dem Porensystem, der Feuchtigkeit, Temperatur und Gefügebeanspruchung sowie zu deren Erfassung	53
4 Ergebnisse der Beständigkeitsuntersuchungen	58
4.1 Beanspruchung durch das Entleeren und Befüllen des Porenraumes; Grundlagen und Methodik	58
4.1.1 Ergebnisse der Trocken-Naß-Wechsel	59
4.1.2 Folgerungen	72
4.2 Beanspruchung durch Frost; Grundlagen und Methodik	73
4.2.1 Ergebnisse der Dilatationsmessung	76
4.2.2 Materialveränderung infolge vieler Frost-Tau-Wechsel	78
4.2.3 Materialveränderung infolge Einfrierens im Wasser	87
4.2.4 Zusammenhang zwischen der Verformung orthogonal zur Plattenebene und der Querkzugfestigkeit	90
4.2.5 Folgerungen	92
5 Verfahren zur Ermittlung des Widerstandes gegenüber Witterungseinflüssen	95
5.1 Allgemeines	95
5.2 Probenvorbereitung	97
5.3 Beanspruchung und Festigkeitsprüfungen	100

5.3.1	Frost-Tau-Wechsel	100
5.3.2	Trocken-Naß-Wechsel	101
5.3.3	Festigkeitsprüfungen	102
5.4	Beurteilung	103
5.5	Untersuchungsbericht	104
5.6	Schlußbemerkung	104
6	Literatur	105

1 Einführung

Bei der Zulassung neuer Baustoffe spielen heutzutage nicht nur deren technischen Eigenschaften eine wichtige Rolle, sondern auch deren Umweltverträglichkeit [1]. Auf den zuletzt genannten Aspekt geht auch die Entwicklung asbestfreier Faserzemente zurück, mit deren Dauerhaftigkeit sich die vorliegende Arbeit befaßt. Obgleich der Asbestzement als eine Variante des Faserzementes aufgefaßt werden kann, darf er hinsichtlich des Langzeitverhaltens nicht als identisch angesehen werden.

Zur Frage der Beständigkeit von Asbestzementen, insbesondere des Widerstandes gegenüber Witterungsbeanspruchungen, sind im Laufe der Jahrzehnte umfangreiche Erfahrungen zusammengetragen worden, die in erster Linie auf dem praktischen Verhalten der Produkte unter verschiedenen Expositionsbedingungen, weniger auf systematischen Forschungen beruhen. Die für Asbestzement gesammelten Erfahrungen [2], [3] können nur bedingt auf die neu entwickelten Faserzemente übertragen werden, weil die durch die Fasermischungen verursachten Gefüge- und Porenraumeigenschaften sich offenbar von denen der Asbestzemente unterscheiden. Ferner ist die Wechselbeziehung zwischen der Zementsteinmatrix und den Kunststoff- bzw. Zellulosefasern eine andere als bei Asbest.

Aus der vorliegenden internationalen Literatur ist bislang nur wenig zur Frage der Beständigkeit der hier zu behandelnden Faserzemente zu entnehmen, vielmehr sind die verfügbaren Arbeiten vor allem den Grundlagen der Faserbewehrung in Betonen und Mörteln gewidmet [4], [5], [6]. Erst in allerjüngster Zeit sind weiterführende Arbeiten erschienen, z.B. zur Frage des Verbundes von Faser und Zementsteinmatrix sowie zur Eignung verschiedener Polymerarmierungen [7], [8].

Dessenungeachtet ist die Entwicklung der Faserzemente in den einschlägigen Industriezweigen energisch vorangetrieben worden, weil dem allgemeinen Wunsch nach asbestfreien Produkten Rechnung zu tragen war. Inzwischen wird auf dem Markt eine Reihe von Faserzement-Erzeugnissen angeboten, deren Qualität durch weitere Optimierungen des Herstellungsprozesses und der Nachbehandlungsverfahren ständig verbessert wird.

Innerhalb der vom Begriff "Materialqualität" erfaßten Eigenschaften bildet die Dauerhaftigkeit aus verständlichen Gründen einen Schwerpunkt [9]. Die Beantwortung der Frage nach dem Langzeitverhalten eines neuen Werkstoffs ist keine leichte Aufgabe. Sie erfordert umfangreiches Wissen hinsichtlich des strukturellen Aufbaus des Materials, denn hiervon ist sein Verhalten unter thermisch-

hygrischen Zustandsänderungen abhängig. Da zuverlässige Daten zu den mechanischen und porenraumbezogenen Eigenschaften des neuen Materials fehlten, mußten diese zuerst erarbeitet werden. Nur so waren Materialveränderungen als Folge verschiedener Beanspruchungsarten überhaupt erfaßbar.

Hierbei war zu berücksichtigen, daß die Faserzementplatten nicht an jeder Stelle identische Eigenschaften aufweisen. Dieses Problem, das bei Routineprüfungen durch die Bereitstellung einer entsprechend großen Anzahl von Proben in den Griff zu bekommen wäre, hätte im Rahmen dieses Vorhabens zu einer nicht mehr überschaubaren Menge von Proben geführt. Da jedoch die Beurteilung des Witterungswiderstandes der einzelnen zur Verfügung gestellten Materialien selbst ohnehin nicht Gegenstand der Untersuchung war, konnte - wenn auch in einigen Fällen auf Kosten der Aussageexaktheit - die Probenanzahl auf etwa 1500 begrenzt werden. Natürlich waren hiermit oft nur Verhaltenstendenzen aufzuzeigen. Diese und begleitende dilatometrische Messungen reichten jedoch für eine zielsichere Erarbeitung eines Prüfverfahrens aus.

Die zum Schluß dieses Berichtsteiles angegebene Methode zur Ermittlung des Widerstandes gegenüber physikalischen Witterungseinflüssen basiert im wesentlichen auf dem Kriterium der "Querzugfestigkeit", das sich von dem Verformungsverhalten vollständig wassergesättigter Proben ableiten läßt. Mit dem Verfahren läßt sich die Dauerhaftigkeit des Faserzement-Scherbens - auch unter Berücksichtigung der Expositionsbedingungen - einschätzen.

2 Technische Eigenschaften der Faserzemente

2.1 Versuchsmaterial

2.1.1 Auswahlkriterien und Zusammensetzung

Eine Übersicht über die untersuchten Materialien bringt Tabelle 1. Die Hauptserien bilden 5 asbestfreie Faserzemente und 1 Asbestzement, die von 4 verschiedenen Herstellern stammen und unter natürlichen Bedingungen erhärten konnten. Von den Faserzementen sind zwei ungepreßt (L002F und S004F) und die restlichen sowie der Asbestzement (MG03A) gepreßt. Es handelt sich in einem Fall um ebenes Wellplattenmaterial (S004F), sonst um Tafeln. Die Dicke reicht von 4 bis 10 mm.

Die Materialien der Hauptuntersuchungen wurden anhand der Firmenangebote von der Bundesanstalt ausgewählt und angefordert. Die Herstellung erfolgte in einem Zeitraum von 3 Monaten (Mitte Dezember 1983 bis Mitte März 1984) nach den üblichen Verfahren, ohne Streuschicht und ohne sonstige Beschichtung. Nach 4 bis 7 Tagen wurden die Platten bzw. Plattenteile im Werk zum Schutz gegen Carbonatisierung in Kunststofffolien eingeschrumpft und nach ausreichender Erhärtung frostfrei der Bundesanstalt geliefert.

Aus 7 weiteren Materialien setzen sich die Sonderserien zusammen, an denen im Vergleich zu den Hauptserien der Untersuchungsumfang kleiner ist. Es gehören hierzu 3 dampfgehärtete Faserzemente (MD08F, MD09F, KD03F), 2 Asbestzemente (ungepreßt: M006A, gepreßt: MG06A) sowie die Materialien AZAW und M007M.

AZAW ist eine etwa 30 Jahre alte Wellplatte aus Asbestzement, die als Dacheindeckung diente. Bei M007M handelt es sich um einen handgeformten Abgasschornstein unbekanntes Alters mit außerordentlich hoher Porosität. Es wird angenommen, daß ein Gemisch aus Asbest- und Kunststoffasern hier als Armierung dient. Die Dicke dieser Materialien (Sonderserien) liegt zwischen 6 und 9,5 mm; auch sie sind alle unbeschichtet.

Die am vorliegenden Forschungsvorhaben beteiligten Firmen gehören dem Verband der Faserzementindustrie an. Die verschlüsselten Materialbezeichnungen beinhalten neben den Firmennamen u.a. auf der letzten Position die Angabe über die Art des Werkstoffs (Faserzement ohne Asbestanteil = F; Asbestzement = A; Mischfaserzement = M) sowie auf der zweiten Position Angaben zur Herstellungstechnologie (ungepreßt = O; gepreßt = G; dampfgehärtet = D).

Die Zusammensetzung der Materialien kann hier zahlenmäßig nicht angegeben

werden, obgleich sie der Bundesanstalt bekannt ist (vgl. Dreiecksymbole in Tabelle 1). Nachfolgend soll jedoch eine globale Besprechung vorgenommen werden.

Die untersuchten Materialien setzen sich zusammen aus:

1) Zement

Neben Portlandzement (PZ) findet in einem Fall (KG03F) auch Hochofenzement (HOZ) Verwendung. Der Masseanteil des Zements beträgt rund 90 %, bei Verwendung von Füllstoffen (vgl. 2) entsprechend weniger (75 % bis nur 50 % bei dampfgehärtetem Material).

2) Füllstoffen

Sie sollten porenfüllend wirken und den Zementgehalt herabsetzen. Vorwiegend - wenn verwendet - handelt es sich um feinpulverisiertes SiO_2 (Silica, Quarzmehl, gefällte Kieselsäure). Unter "Sonstige Stoffe" kommt neben SiO_2 auch Flugasche als Füllstoff in Frage. Der Masseanteil von Silica kann 5 %, 25 % oder sogar 40 % (dampfgehärtet) betragen.

3) Fasern

(a) Zellulosefasern (bzw. Zellstofffasern)

Masseanteil ca. 4 %, bei dampfgehärtetem Material mehr (etwa 10 %).

(b) Polymerisatfasern (Kunststofffasern)

Einzelbezeichnungen vgl. Tabelle 1. Der Masseanteil beträgt etwa 2 %. Bei dampfgehärtetem Material werden keine Polymerisatfasern angewendet, da sie der thermischen Einwirkung (Beispiel: 15 h bei 180 °C) nicht widerstehen.

(c) Anorganischen Fasern

Neben dem Asbest der Asbestzemente gehört in diese Gruppe noch Wollastonit (MD08F oder MD09F).

Schließlich sind noch Zusatzstoffe wie z.B. Prozeßhilfs- und Haftmittel zu erwähnen. Dazu liegen jedoch keine Angaben vor. Die in der Tabelle 1 bei Asbestzementen angegebenen Anteile von 12 Masse-% für die Asbestfaser und 88 Masse-% für den Zement basieren auf dem vorherrschenden Mischungsverhältnis von Asbest zu Zement = 1 : 7 [10].

Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsberichtes beziehen sich nur auf die untersuchten, in Tabelle 1 angegebenen Materialien. Es ist davon auszugehen, daß

Tabelle 1

Art und Zusammensetzung der untersuchten Materialien

	Material													
	Hauptuntersuchungen							Sonderuntersuchungen						
	MG03A	LO02F	SO04F	KG03F	MG03F	SG02F	AZAW	MO07M	MO06A	MG06A	MD08F	MD09F	KD03F	
Faserzement (FZ) Asbestzement (AZ) Mischfaserzement (FZ+AZ)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
ungepreßt gepreßt dampfgehärtet, gepreßt	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
unbeschichtet beschichtet	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
ebene Tafel Wellplatte, ungewellt Wellplatte, gewellt Abgasschornstein	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
Dicke (ca.)	10	6,5	6,5	9	9,5	4	6	8	6,5	6	8,5	8,5	9,5	
Zement PZ Zement HOZ	(88)	(▲)	▲	▲	(▲)	▲	(88)		(88)	(88)	(▲)	(▲)	▲	
Quarzmehl Silica, SiO ₂ Sonstige Stoffe	-	▲	▲	▲	-	▲					(▲)	(▲)	▲	
Zusammensetzung		▲	▲ +	▲	▲	▲ +					(▲)	(▲)	▲	
Zellulose-, Zellstoff- Polyvinylalk./-acrylnitril- Polyäthylen-, Polypropylen- Kunststoff- Wollastonit- Asbest-		▲	▲ +	▲	▲	▲ +					(▲)	(▲)	▲	
Hersteldatum	15.3.84	27.1.84	1.2.84	12.12.83	6.2.84	1.2.84	-1959	?	5.9.83	5.9.83	~1985	~1985	3.12.84	
Luftlagerung vor Einschrumpfen	4	7	6	7	4	6	(12)		(12)	(12)	*	*		

▲ = Zahlenangaben liegen vor

Zahlenangaben in Klammern = hochgerechnete oder allgemeine Angaben
 + = Prozeßfaser aus Cellulose und Synthetikpulpfibrillen
 * = eine Materialart mit, die andere ohne Wollastonit

Anmerkung

In Abschnitt IV sind die in den beiden Vorhabenteilen (II und III) verwendeten Bezeichnungen der untersuchten Materialien einander gegenübergestellt.

der schnelle technische Fortschritt bei den Herstellern mittlerweile zu Produkten mit abweichenden Zusammensetzungen geführt hat. Es war aber das Ziel des Projektes, ein Verfahren zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Faserzemente schlechthin zu erarbeiten, und nicht etwa bestimmte Faserzemente zu begutachten. So gesehen hat die Frage der Zusammensetzung der zur Zeit hergestellten Faserzemente nur eine sekundäre Bedeutung.

2.1.2 Probenherstellung und Einteilung in Versuchsserien

Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die Einteilung der Proben in verschiedene Serien, die Bezeichnung und Zielsetzung der Untersuchungen, über das Alter der Proben und über deren Abmessungen.

Bei der Konzipierung der Porositätsserie (vgl. Abschnitt 2.3.1) spielte die Frage einer möglichen Gefügeänderung des Faserzements durch Temperatur- und Feuchteeinwirkung eine Rolle. Es ist bekannt, daß beim Zementstein bereits die erste Trocknung gefügeverändernd ist. In ihren Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand [11] wiesen die Autoren eindeutige Gefügebeeinträchtigungen nach einer 105 °C-Trocknung bzw. nach einem einzigen Trocknungs- und Sättigungswechsel nach. Weil die Gegensätze im elastischen Verhalten der einzelnen Bestandteile im Beton erheblich größer als beim Faserzement sind, blieben hinsichtlich des letzteren noch etliche Fragen offen, die nicht ohne weiteres anhand der Literatur beantwortet werden konnten. Einen Schwerpunkt in diesem Fragenkomplex bildete zweifellos die Suche nach einer sinnvollen Vorbehandlung der Proben im Zuge der jeweiligen Untersuchung, ferner die Probleme der Ermittlung des "wahren Porenvolumens", das insbesondere im Zusammenhang mit den Frost-Tau-Wechseln eine wichtige Rolle spielt. Nicht zuletzt sollten die Auswirkungen von Gefügeveränderungen auf die Gebrauchseigenschaften des Werkstoffs deutlich gemacht werden.

Das eigentliche Ziel der Serie Biegezugfestigkeit lag darin, den Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes auf diesen Festigkeitsparameter herauszustellen. Dies erschien nicht nur im Hinblick auf eine sichere Deutung der Ergebnisse dieses Vorhabens wichtig, sondern auch, um häufig anzutreffenden Fehlinterpretationen von Festigkeiten abzuwehren. Welche hygrysch bedingten Unterschiede sich beim Beton ergeben können, wird in [12] gezeigt, wo sich auch umfangreiche Literaturangaben zum feuchtigkeitsabhängigen Verhalten von Zementstein und Beton finden.

Insgesamt 4 Serien wenden Frost-Tau-Wechsel an (vgl. Abschnitt 4.2). Die Reihe FB weist bis zu 7 verschiedene Sättigungsgrade auf. Um Feuchtigkeitsverluste zu vermeiden, sind die Proben versiegelt worden. Eine solche Behandlung erfuhren auch die Proben der Serien FD, deren Dilatationsverhalten parallel und quer zur

Tabelle 2
Einteilung in Serien und deren Zielsetzung

Nr.	Serienbezeichnung	abgekürzte Bezeichnung Hauptunters.				Bezeichnung Sonderunters.				Alter zu Beginn der Hauptunters.		Probenabmessung in mm	Zielsetzung der Serie
		Jung	card natl stl	hyd dra- stl	PH	Jung	card natl stl	hyd dra- stl	PH	Jung	card natl stl		
1	Porosität	P	PC	PH	P*	-	-	-	4	21	16	203 x 60	Poros. + S-Grade bei versch. Vorbeh.; TNW 105°C/VAK
2	Biegezugfestigkeit	B	BC	BH	B	-	-	-	3	21	16	203 x 60	Biegezugfest. nach versch. Vorbehandlungen
3	Biegezugfest./Sätt.Grad	BS*	-	-	-	-	-	-	32	-	-	203 x 60	Biegezugfest. in Abh. vom Sättigungsgrad
4	Frost-Tau-Wechsel	FB	FBC	FBH*	FB	-	-	-	8	20	20	203 x 60	0-200 FTW, def. Porenfüllung, versiegelt; Festigkeit
5	Eistest	ET	-	-	-	-	-	-	12	-	-	203 x 60	50 FTW, Proben im Wasser liegend; Festigkeit
6	Dilatometrie	FD	FDC	FDPH*	FD*	-	-	-	8	19	19	203 x 40, ZP	1 FTW mit Verformungsmessung, versiegelt (vgl.Nr.4)
7	Dilatomet. quer zur Probe	DQ	-	-	DQ*	-	-	-	27/32	-	-	Ø 25/Ø 50	1 bzw.7. FTW mit Verformungsmessung; β_{LZ} bei Ø 50
8	Trocken-Naß-Wechsel	TN	TNC*	-	-	-	-	-	11	18	-	a) 203 x 60 b) 160 x 40, ZP	TNW 50°C/NAT bzw. 105°C/97% r.F. a) S-Grade, Festigkeit; b) Verformungsmessung
9	Gefügeuntersuchungen	GE	GEC	GEH	GE	-	-	-	7a)	29a)	16a)	50 x 20	Gefügekenndaten von Proben: a) ohne Beanspruchung (Nullproben)
9a	kapillare Wasseraufnahme	Ka	Ka	Ka	Ka	-	-	-	-	-	-	Tabletten Ø 10	b) nach Beanspruchung (Nr. 4, 5, 8, z.T. 1)
9b	Quecksilberporosimetrie	Hg	Hg	Hg	Hg	-	-	-	-	-	-	Ø 50	
9c	Luftpermeabilität	Pe	Pe	Pe	Pe	-	-	-	-	-	-		
10	Nullserie	OS	OS	OS	OS	-	-	-	-	-	-	203 x 60 o.ä.	verschiedene Zusatzversuche

* nur einige Materialien

• Probenalter in Monaten
ZP = mit Zapfen

Herstellrichtung im 1. Zyklus zu erfassen war. Der sogenannte Eistest wird mit den Buchstaben ET gekennzeichnet. Er stellt eine schroffe Frost-Tau-Wechsel-Behandlung von unter Wasser liegenden Proben dar. Unter der Bezeichnung DQ sind Untersuchungen des Verformungsverhaltens senkrecht zur Plattenebene zu verstehen.

Im Abschnitt 4.1 wird unter der Kurzbezeichnung TN der Einfluß von Trocken-Naß-Wechseln auf die Materialeigenschaften untersucht. Praxisnahe Bedingungen lagen bei den Wechseln zwischen der Lagerung in Luft mit 50 °C und unter Wasser bei 20 °C vor. Dagegen kommen Wechselbeanspruchungen, wie sie sich aus der Lagerung in Luft bei 105 °C und anschließend in sehr feuchter Atmosphäre bei 20 °C ergeben, nur in Ausnahmefällen vor. Im Rahmen des Vorhabens sollten diese Aufschluß über eventuelle Veränderungen beim vollständigen Entleeren bzw. partiellem Befüllen von Kleinstporen geben. An den Proben der Größe 160 x 40 mm waren Metallzapfen zur Messung der Längenänderung angebracht. Dabei kam ein in der Bundesanstalt gebautes Gerät zum Einsatz. Die größeren Proben ohne Meßzapfen dienten zur Ermittlung der Sättigungsgrade während der Zyklen sowie für Festigkeits- und Gefügeuntersuchungen nach den Wechseln. Schließlich stellt die 3. Art der Trocken-Naß-Behandlung die härteste Beanspruchung dar, nämlich den Wechsel zwischen vollständiger Entleerung (105 °C-Trocknung) und totaler Füllung (Vakuum- bzw. Vakuum/Druck-Sättigung) des Porenraumes. Hierbei sollten weitere Auskünfte zu den Schädigungsmechanismen anfallen.

In der Serie Gefügeuntersuchungen werden Gefügekenndaten von jungen Proben im Ausgangszustand sowie von carbonatisierten und hydratisierten Proben ohne Zusatzbehandlungen ermittelt. Diese "Nullwerte" charakterisieren die Materialien und ermöglichen ihren Vergleich untereinander; gleichzeitig bilden sie die Basis bei Vergleichen mit den Gefügekennwerten der durch FTW und TNW beanspruchten Proben.

Zur Anwendung kam die Quecksilberporosimetrie (Hg), die Messung der Luftpermeabilität (Pe), die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme (Ka), des Gesamtporenvolumens und der Rohdichte. Weitere Auskünfte zum Zustand des Gefüges lieferten Festigkeitsuntersuchungen oder das Verfahren der Resonanzfrequenzmessung.

Nach der Anlieferung der Platten bzw. Plattenteile in der Bundesanstalt wurden diese in Folien bei 20 °C gelagert. Der größte Teil der Proben wurde dann, nachdem die Serien konzipiert und der Schnittplan festgelegt waren, aus den Platten trocken gesägt, wobei eine Bandsäge und eine langsam spanende Kreissäge Verwendung fanden. Die Abmessungen der Proben waren 203 x 60, 203 x 40 und

160 x 40 mm (Tabelle 2). Die Scheiben für Ka, Hg, Pe und β_{LZ} (Querzugfestigkeit) wurden meist nicht direkt aus den Platten, sondern aus den Proben 203 x 60 mm gesägt bzw. gebohrt.

Die vorbereiteten und beschrifteten Proben wurden nach Bedarf in Folien verpackt, im Klimaraum zwischengelagert und dann der Serienbehandlung zugeführt. Ein Teil der Proben wurde für 8 bis 12 Monate in Wasser gelagert ("Hydratisierung"), ein weiterer Teil zur künstlichen Carbonatisierung für 10 Monate in eine Bewitterungskammer gestellt (vgl. Abschnitt 2.4).

2.1.3 Behandlungsbedingungen und -ablauf

In Tabelle 3 finden sich Einzelheiten zu den angewandten Behandlungen. Bei der "Luftlagerung" (Zeile 5) werden die zugeschnittenen, bis dahin in Folien eingepackten Proben im Normalklima 23/50 nach DIN 50 014 [13] für 1 bis max. 2 Wochen ausgelegt. Es handelt sich eigentlich um eine Manipulationszeit zur Ermittlung der Anfangsdaten (Masse, Abmessung, event. Resonanzfrequenz usw.) und nicht um eine langdauernde Luftlagerung.

Die Konstantklimate wurden in der Regel über wässrigen Lösungen bzw. über Wasser in Exsikkatoren eingestellt. In zwei Fällen kamen auch übliche Trockenmittel zur Anwendung. Die Bedingungen der Vakuum- bzw. Vakuum/Drucksättigung sind im Abschnitt 2.3.1, die der Hydratisierung und Carbonatisierung im Abschnitt 2.4 beschrieben.

Die Abb. 1 bis 4 zeigen den jeweiligen Behandlungsablauf der einzelnen Serien: Abb. 1 Biegezugfestigkeit, Abb. 2 Porosität, Abb. 3 Frost-Tau-Wechsel und Abb. 4 Trocken-Naß-Wechsel (vgl. auch Tabelle 2). Die mit 2 senkrechten Randstrichen gekennzeichneten Behandlungsarten 105 °C-Tr./VAK bzw. VD stellen den Bezug für die Berechnung der Sättigungsgrade dar, d.h. S=0 bzw. S=1 (vgl. Abschnitt 2.3.1). In Abb. 4 kennzeichnen die doppelten horizontalen Randstriche die eigentlichen Wechsel; der Kasten BIEGEZUG hat hier einen gestrichelten Rahmen, da nur die größere Probe ohne Zapfen (203 x 60 mm) auf Biegezugfestigkeit geprüft wird (vgl. Abschnitte 2.1.2 und 4.1).

Tabelle 3
Behandlungsbedingungen

Nr.	Behandlung	Abkürzung	Behandlungsgerät und -bedingungen	Behandlungsdauer in Tagen normal min/max	Angewandt bei Serien •
1	105°C-Trocknung	105°C	Trockenofen mit Luftumwälzung	4	alle
2	P ₂ O ₅ -Trocknung	P ₂ O ₅	Exsikkator mit Phosphorpentoxid-Pulver	-	nur BS
3	50°C-Trocknung	50°C	Trockenofen mit Luftumwälzung	7	alle außer ET
4	Blaugel-Trocknung	Blaugel	Exsikkator mit Silicagel, mit Luftumwälzung	14	nur P und B (MGO3A)
5	Luftlagerung	Luft	Klimaraum mit Normalklima	7	alle außer ET und Hydr.-Serien
6	43% r.F.-Behandlung	43% r.F.	Exsikkator mit gesätt. K ₂ CO ₂ ·2H ₂ O-Lsg., Magnetrührer	21	nur FB Hauptuntersuchungen
7	75% r.F.-Behandlung	75% r.F.	Exsikkator mit gesättigter NaCl-Lösung, Magnetrührer	21	wie Nr. 6; vgl. auch Nr. 13
8	97% r.F.-Sättigung	97% r.F.	Exsikkator mit Wasser, Magnetrührer, Proben darüber	14*	alle außer ET, PC, B, BH, BC
9	Natursättigung	NAT	Proben liegen im Wasser	7*	alle
10	Vakuumsättigung	VAK	Vakuumschrank; 3 h Evakuierung (2 mbar Restdruck); 1 h Evak. + Wassereinlaß; Wasserlagerung (atm. Druck)	7	alle außer ET, FBH, FBC, BH, BC
11	Vakuumsättigung	V/D	Vakuumschrank; 3 h Evakuierung (2 mbar Restdruck); 1 h Evak. + Wassereinlaß; Wasserlagerung (atm. Druck) dann 24 h Überdruck 150 bar	2	alle außer B
12	Hydratisierung	H	Proben liegen mehrere Monate im Wasser	8 bzw. 12 Mon.	PH, BH, FBH, FDH, GEH
13	Carbonatisierung	C	Bewitterungskammer, 75% r.F., CO ₂ -Gehalt ca. 8 Vol.-%	10 Monate	PC, BC, FBC, FDC, TNC, GEC
•	Bei Materialien der Sonderuntersuchungen können einige Behandlungen entfallen (FB, P) oder hinzukommen (vgl. Behandlungsabläufe)				
*	Bei Serie B wurden wahlweise auch längere, bei Serie BS zur gezielten S-Grad-Einstellung auch kürzere Behandlungszeiten angewandt				

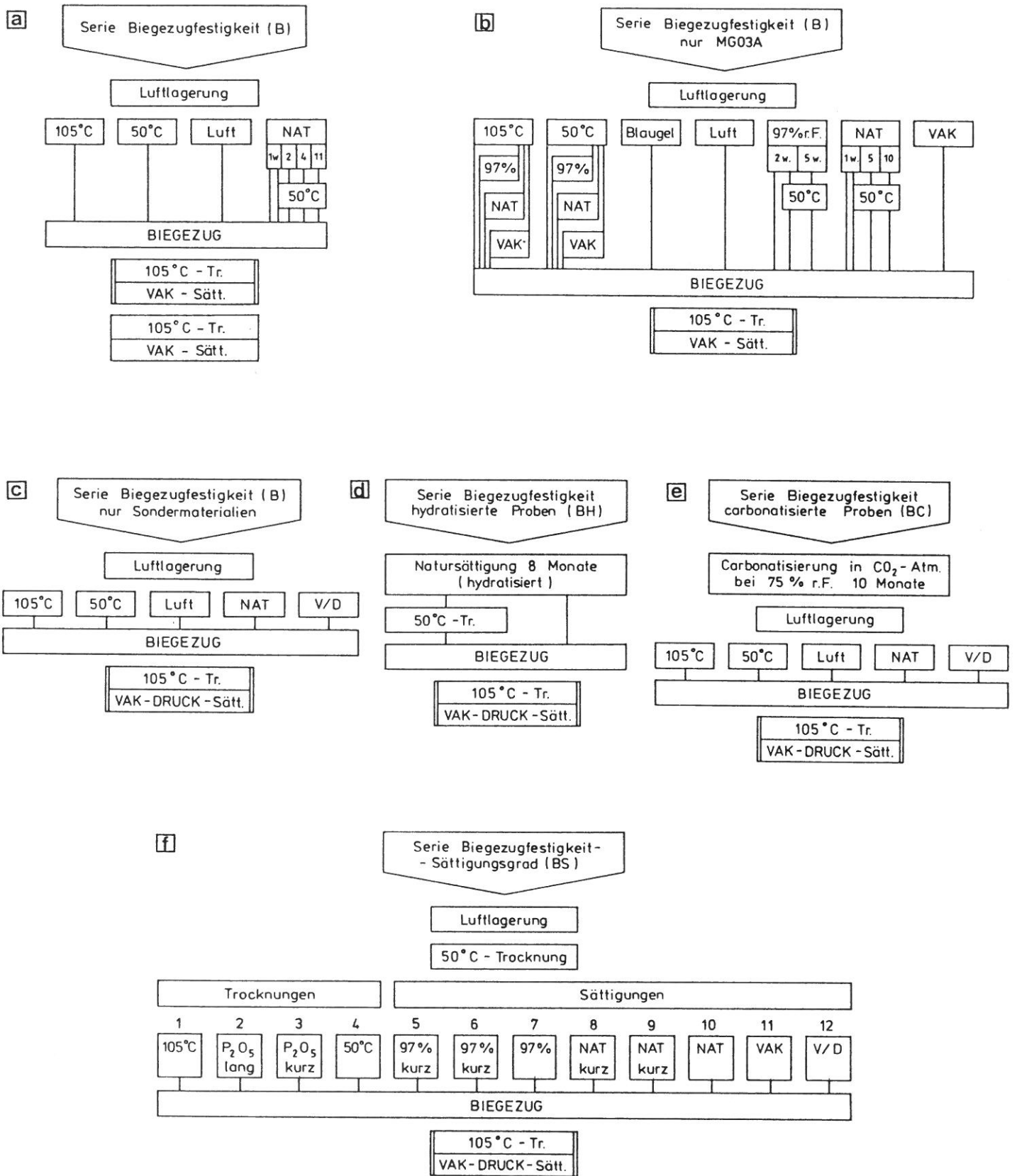


Abb. 1 a,b,c,d,e,f
Behandlungsablauf der Serien Biegezugfestigkeit

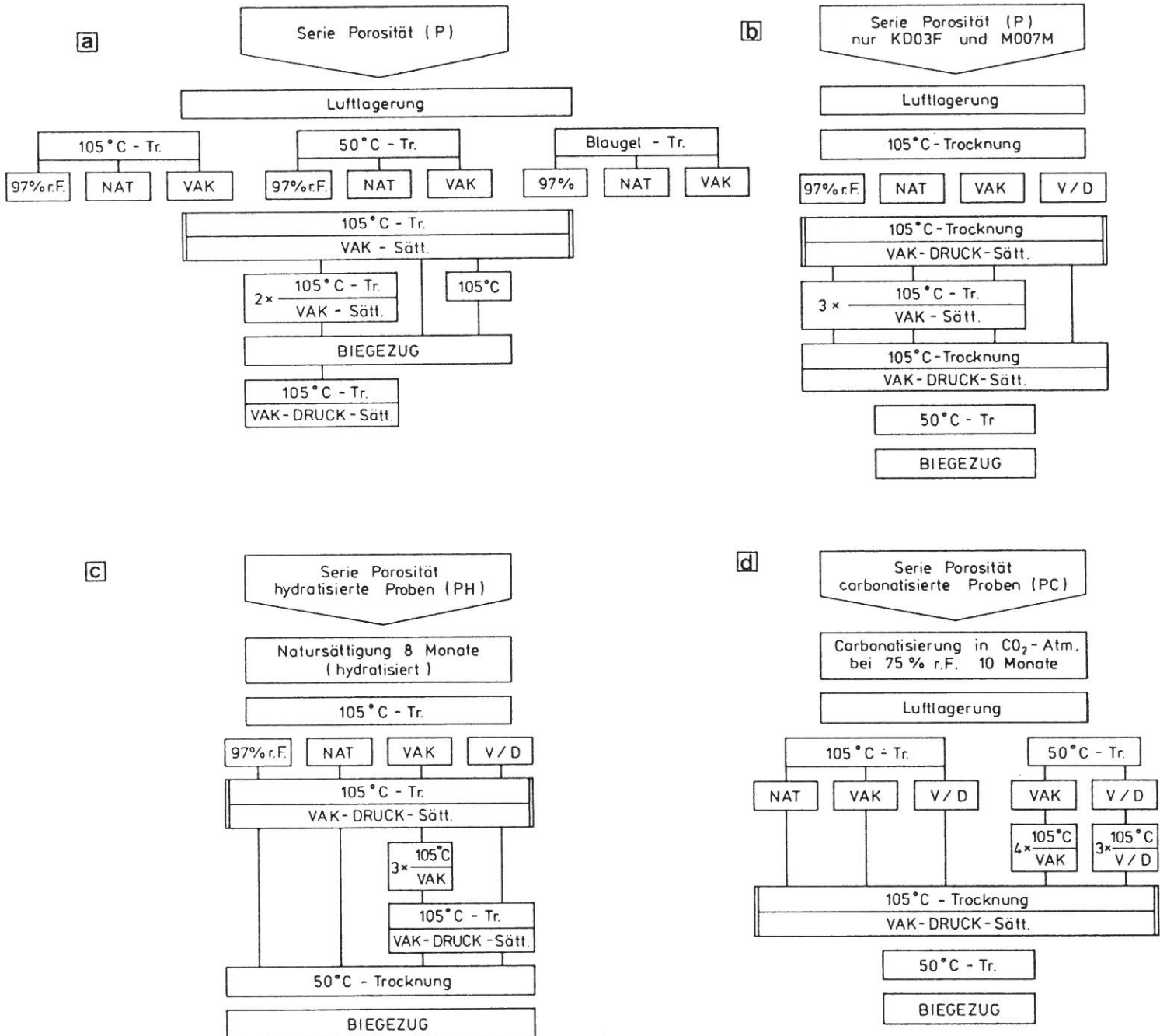


Abb. 2 a,b,c,d
Behandlungsablauf der Serien Porosität

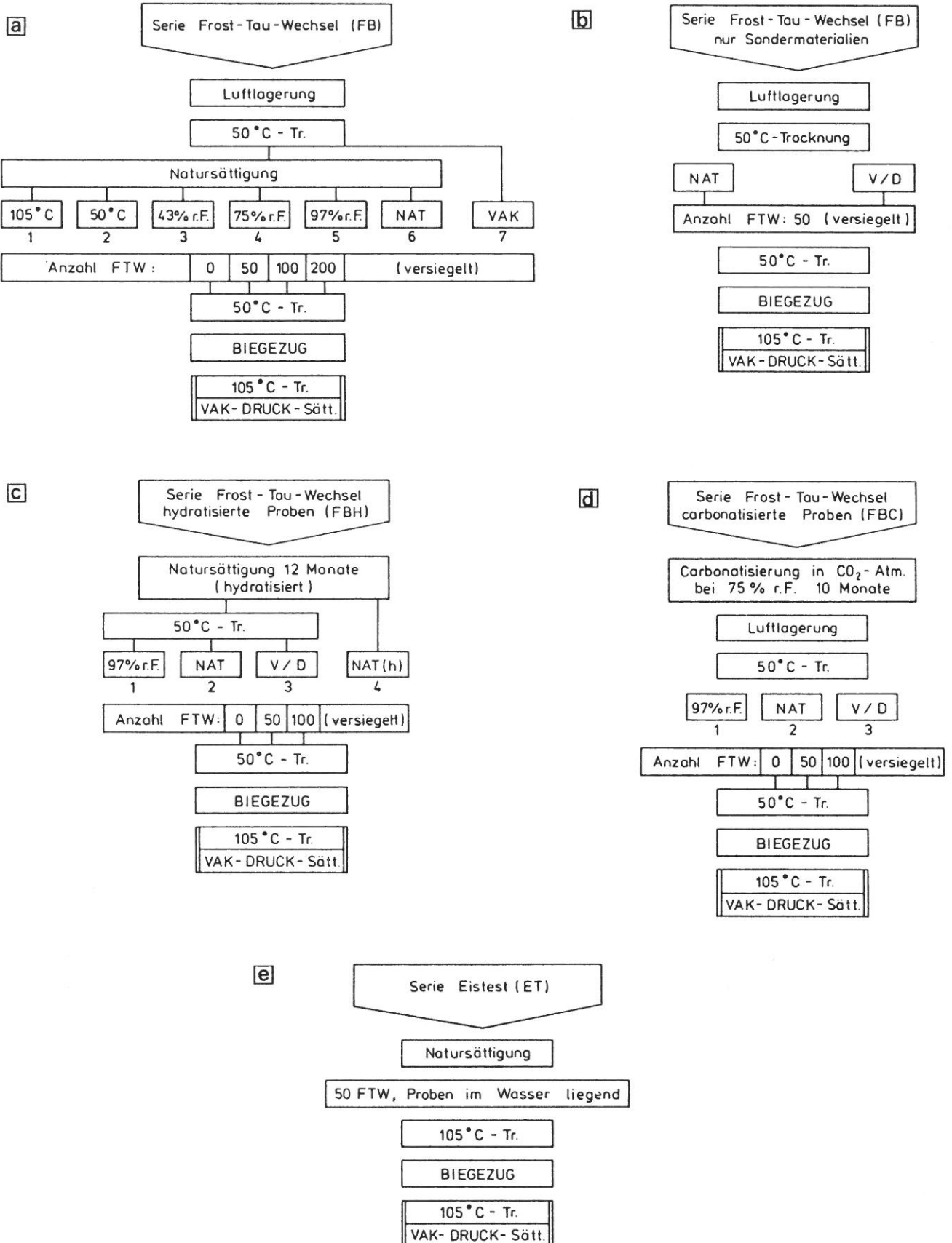


Abb. 3 a,b,c,d,e
Behandlungsablauf der Serien Frost-Tau-Wechsel

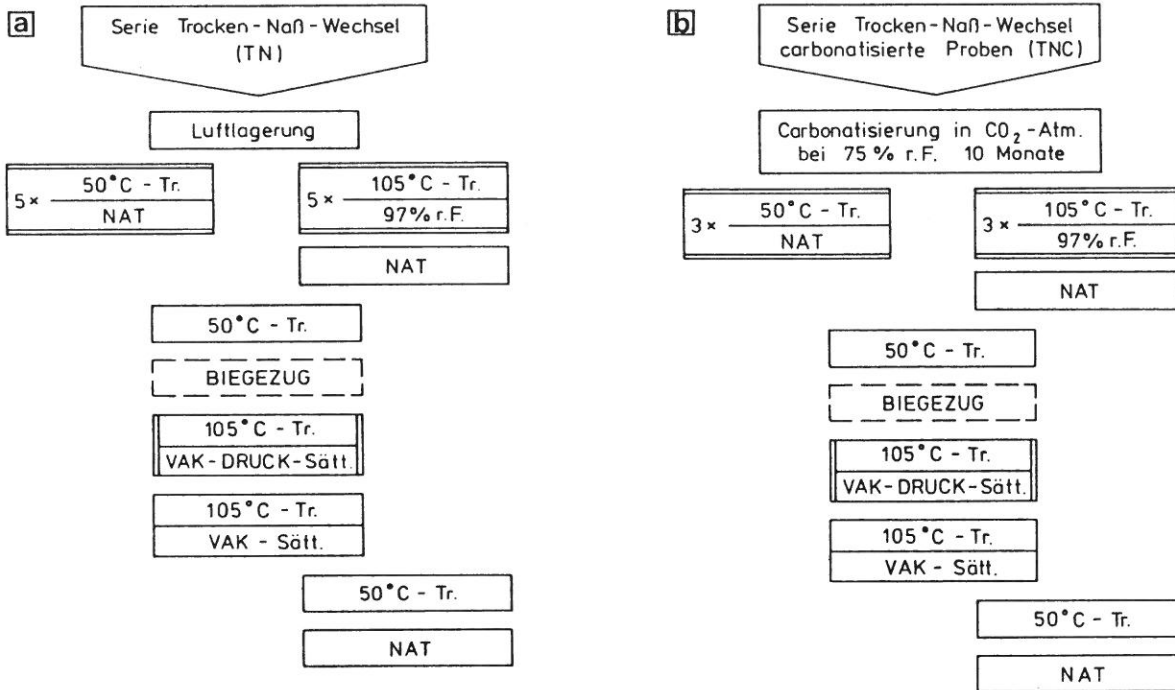


Abb. 4 a,b
 Behandlungsablauf der Serien Trocken-Naß-Wechsel

2.1.4 Allgemeine Angaben zu den Eigenschaften im Ausgangszustand

Die Eigenschaften zementgebundener Werkstoffe verändern sich im Verlaufe der Zeit in unterschiedlichem Maße. Zu den Ursachen hierfür gehören im wesentlichen chemische Umsetzungen der Zementsteinmatrix, die unter anderem von der Gefügedichte und von dem Umgebungsmedium abhängig sind.

Geringen Veränderungen unterliegen Erzeugnisse, die in gespanntem Wasserdampf bei Temperaturen von etwa 180 °C aushärten. Dabei reagiert der als Zuschlag zugegebene feine Quarzsand mit den Zementbestandteilen zu silicatischen Verbindungen, die den Hydratationsprodukten des reinen Zementes ähnlich sind [14]. Der Erhärtungsvorgang ist beim Verlassen des Autoklaven abgeschlossen.

Dagegen brauchen Produkte, die unter natürlichen Bedingungen erhärten (Luftlagerung), erheblich mehr Zeit, um die jeweiligen Gebrauchseigenschaften zu erreichen. Eine vollständige Hydratation der Zementbestandteile ist in den meisten Fällen erst während der Produktnutzung zu erwarten (s. auch Abschn. 2.4).

Mit fortschreitendem Alter verändern sich der Mineralbestand sowie das Gefüge auch infolge der Reaktion der Zementsteinbestandteile mit dem Kohlendioxid der

Tabelle 4

Eigenschaften der Materialien im Ausgangszustand

Nr.	Eigenschaft/Kennwert		Material													
	Bezeichnung Einheit Zusatzhinweis	Wert Angabe Serie	Hauptuntersuchungen						Sonderuntersuchungen							
			MG03A	LO02F	SO04F	KG03F	MG03F	SG02F	AZAW	MO07M	MO06A	MG06A	MD08F	MDO9F	KDO3F	
1	Biegezugfestigkeit β_{BZ} in N/mm ² (203 x 60 mm, nur II)	\bar{x} s n S-Grad Serie	44,4 2,2 3 0,154 B	26,6 1,8 3 0,201 B	21,2 1,2 3 0,105 B	29,6 0,8 3 0,222 B	32,5 1,3 3 0,216 B	30,8 4,8 3 0,211 B	41,9 2,9 4 0,222 OS 2)	21,9 - 1 B(105°)	34,2 1,4 3 0,145 B	38,1 2,0 3 0,127 B	34,6 - * 0,084 B	33,5 * 0,079 B	39,1 0,1 2 0,235 B	
2	Lagezugfestigkeit β_{LZ} in N/mm ² (ϕ 50 mm)	\bar{x} s n	8,70 0,38 8	4,27 0,20 9	2,74 0,53 9	3,52 0,20 9	4,34 0,55 8	5,74 0,93 8	2,12 0,24 7	2,12 0,24 7	4,41 0,48 9	4,42 1,18 9	3,24 0,36 9	2,96 0,27 9	5,36 0,34 9	
3	Dyn. E-Modul E _{dyn} in 10 ⁵ N/mm ² (203 x 60 mm, II + I)	\bar{x} s n S-Grad Serie	26,20 0,42 22 0,445 2,040 B	18,25 0,69 26 0,580 1,802 B	16,68 0,70 24 0,315 1,662 B	20,21 0,81 26 0,571 1,884 B	20,21 1,14 23 0,526 1,988 B	24,28 0,54 3 0,346 1,855 OS	14,98 0,30 2 0,098 1,351 OS	19,92 0,50 3 0,304 1,833 OS	21,64 0,48 3 0,218 1,920 OS	- - - - -	- - - - -	- - - - -	20,86 0,65 2 0,424 1,821 OS	
4	Log. Dekrement der Dämpfung $\Lambda \cdot 10^2$	\bar{x} s n	3,23 0,21 22	4,81 0,55 26	8,52 1,00 24	4,14 0,69 26	4,03 0,82 26	6,57 1,94 24	2,24 0,30 3	6,36 2,32 2	5,32 0,57 3	5,15 0,34 3	- - -	- - -	- - -	4,25 1,13 2
5	Porosität P in Vol.-% (203 x 60 mm, II + I)	\bar{x} s n Serie Sätt.	30,0 1,6 6 P VAK	39,1 1,4 9 P VAK	41,8 2,2 6 P VAK	34,4 0,7 10 P VAK	32,6 1,4 10 P VAK	34,0 3,4 6 P VAK	35,8 0,1 3 OS V/D	52,8 0,6 2 P+B V/D	37,5 0,5 10 B V/D	36,0 2,1 10 B V/D	40,2 1,0 4 B V/D	40,5 0,3 4 B V/D	37,4 0,2 7 B V/D	
6	Trocken-Rohdichte ρ_D in g/cm ³	\bar{x} s n	1,891 0,040 6	1,594 0,040 9	1,530 0,064 6	1,684 0,010 10	1,734 0,021 10	1,762 0,115 6	1,694 0,008 3	1,328 0,010 2	1,714 0,032 10	1,819 0,050 10	1,561 0,022 4	1,556 0,013 4	1,658 0,006 7	
7	Wasseraufn.-Koeff. A in kg/(m ² ·h·0,5) (50 x 20 mm, II + I)	\bar{x} s n	1,76 0,13 6	1,38 0,11 6	1,76 0,19 6	1,22 0,40 6	1,10 0,28 5	1,10 0,28 5	2,35 0,37 4	12,32 2,38 4	5,01 0,56 4	5,59 0,09 4	1,71 0,16 4	1,95 0,37 4	0,50 0,08 6	
8	Spez. Porenvolumen V _{S,Hg} in cm ³ /g (ϕ 10 mm)	\bar{x} s n	0,094 0,003 4	0,148 0,010 3	0,180 0,023 4	0,092 0,002 4	0,096 0,005 4	0,158 0,002 2	0,158 0,002 2	0,388 0,030 2	0,201 - 1	0,197 - 1	0,338 - 1	0,247 - 1	0,109 0,007 3	
9	Spez. Luftpermeabi- lität D _S in pPm (ϕ 50 mm)	\bar{x} s n Tr.	0,32 0,04 3 105° C	2,75 0,50 3 105° C	5,46 1,18 2 105° C	0,65 0,04 3 105° C	1,88 0,09 2 105° C	1,88 0,09 2 105° C	<0,10 0 3 50° C	14,76 - 4 105° C	2,76 0,20 3 50° C	2,81 0,11 3 50° C	4,49 - 1 50° C	1,92 - 1 50° C	0,10 0 4 50° C	

1) Rohdichte im luftgetrockneten Zustand in g/cm³
 2) Vorbehandlung 105°C/VD-Sätt.; 50°C vor Biegezug
 * β_{BZ} -Werte geschätzt anhand des Biegezugs quer zur Herstellungsrichtung
 • siehe einzelne Serien-Angaben

\bar{x} = Mittelwert
 s = Standardabweichung
 n = Probenanzahl
 II, I = Probenlängskante in bzw. quer zur Herstellungsrichtung

Luft. Dieser "Carbonatisierung" genannte Prozeß beeinflußt die Beschaffenheit des Porensystems sowie die äußeren Dimensionen und führt zur Versprödung des Materials (s. Abschn. 2.4).

Tabelle 4 enthält einige von den nachfolgend häufig zu Vergleichszwecken verwendeten Werkstoffeigenschaften, die am jungen Material ermittelt worden sind. Sie dienen nicht nur der allgemeinen Charakterisierung im Ausgangszustand, sondern sollen dem Leser auch einige Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern sowie eine Vorstellung von den quantitativen Aspekten liefern. In diesem Sinne ist die Tabelle bewußt vor den Ergebnisteil dieses Abschnitts gesetzt worden. Einzelheiten zur Verfahrensweise bei der Ermittlung der Ergebnisse finden sich im anschließenden Text.

2.2 Mechanische Eigenschaften und Untersuchungsmethodik

2.2.1 Biegezugfestigkeit

Zu der am häufigsten angewendeten Prüfmethode dieser Arbeit gehört die Bestimmung der Biegezugfestigkeit β_{BZ} . Wie es die Behandlungsabläufe der Abb. 1 bis 4 zeigen, wurde die Biegezugfestigkeit stets ermittelt, auch wenn sie, wie z.B. bei der Porositätsserie, nicht das Hauptziel der Untersuchung war. Die Kraft wurde in die Proben der Größe 203 x 60 mm mittig eingeleitet, wobei die Stützweite 180 mm betrug. Während der Prüfung nahm die Spannung im Probenquerschnitt maximal um 1 N/mm^2 in der Sekunde zu. Zur Berechnung der Bruchspannung wurde die im Abschnitt 5.3.3 angegebene Formel (17) verwendet.

Um die ermittelten Biegezugfestigkeiten richtig beurteilen zu können, war deren Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt der Probe zur Zeit der Prüfung zu klären. Dazu konnten zunächst die Ergebnisse der Serie B verwendet werden. Die Sättigungsgrade (vgl. Abschnitt 2.3.1) wurden hier ohne sonstige Vorbehandlung direkt eingestellt.

Der Abb. 5 ist zu entnehmen, daß die Biegezugfestigkeiten (Mittelwerte aus mindestens 3 Einzelergebnissen) über weite Feuchtigkeitsbereiche eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Sättigungsgrad aufweisen. So beträgt z.B. beim autoklavierten Material KD03F der Unterschied zwischen Proben des Zustandes "trocken" und "naß" etwa 35 %. Obgleich die Materialien ein individuelles Verhalten zeigen, ist deutlich erkennbar, daß die Biegezugfestigkeit in jenem Feuchtigkeitsbereich, der von praktischer Bedeutung ist ($S \geq 0,4$), mit zunehmendem Sättigungsgrad durchweg abnimmt. Da dies auch beim Asbestzement (MG03A) feststellbar ist, sind die Ursachen offenbar in der zementsteinhaltigen Matrix zu suchen.

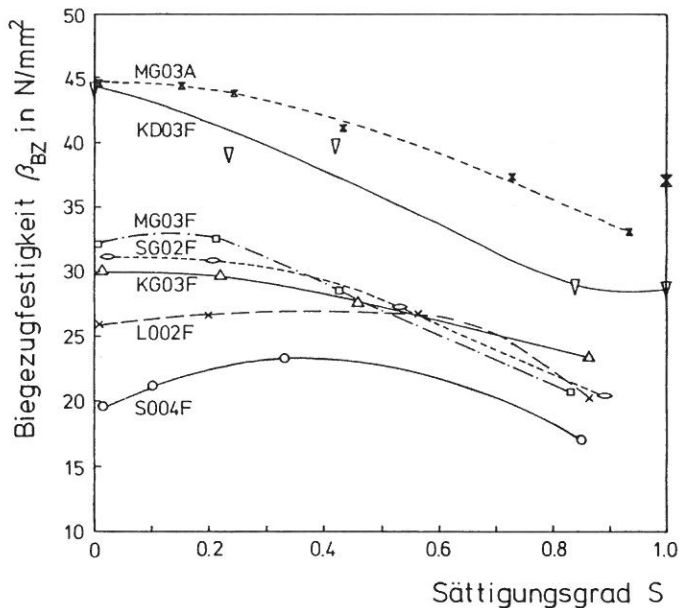


Abb. 5

Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad (Mittelwerte)

Die S-Grade wurden ohne sonstige Vorbehandlung direkt eingestellt (Serie B)

Desweiteren fällt auf, daß der Kurvenanstieg zu niedrigen Sättigungsgraden hin geringer wird. Bei den ungepreßten Faserzementen sind gegenüber den Maximalwerten sogar Festigkeitsabnahmen zu verzeichnen. Da die vollständige Entleerung des Porenraumes hier durch eine 105 °C-Trocknung vorgenommen worden ist, kann eine Beeinträchtigung der Kunststoffasern infolge der thermischen Behandlung angenommen werden. Diese Annahme wird durch den Kurvenverlauf des autoklavierten Faserzementes und auch des Asbestzementes (beide ohne Kunststoffasern) bekräftigt.

Um die an einer verhältnismäßig kleinen Anzahl von Proben ermittelten Ergebnisse der Abb. 5 zu stützen, ist eine weitere Serie (BS) konzipiert worden, deren 12 verschiedene Sättigungsgruppen (Abb. 1f) aus je 6 Proben bestanden (bei S004F nur je 3). Im Unterschied zur Serie B wurden hier alle Proben zuerst bei 50 °C getrocknet und dann der jeweiligen Lagerung unterzogen. Die dabei erzielten Sättigungsgrade und Festigkeiten sind als Einzelwerte in Abb. 6 und als Mittelwerte der jeweiligen Sättigungsgruppen in Abb. 7 dargestellt.

Der Kurvenverlauf dieser Diagramme ist gut mit Ergebnissen belegt und unterscheidet sich von jenem der Abb. 5. Insbesondere ist dies bei den ungepreßten Faserzementen im Bereich niedriger Sättigungsgrade der Fall. Hier nimmt die Biegezugfestigkeit für das Material S004F mit steigendem Sättigungsgrad zunächst zu und dann wieder ab, während sie in Abb. 7 bis zum Sättigungsgrad $S \approx 0,8$ stetig fällt. Ferner wird deutlich, daß die Vakuum/Druck-Sättigung zu keinen niedrigeren Festigkeiten führt als die Unterwasserlagerung bei Atmosphärendruck.

Insgesamt zeigen die besprochenen Diagramme, daß die Biegezugfestigkeit vor allem im mittleren Bereich des Sättigungsgrades stark vom Feuchtigkeitsgehalt zur Zeit der Prüfung abhängt. Deswegen ist eine Angabe von Festigkeitsergebnissen

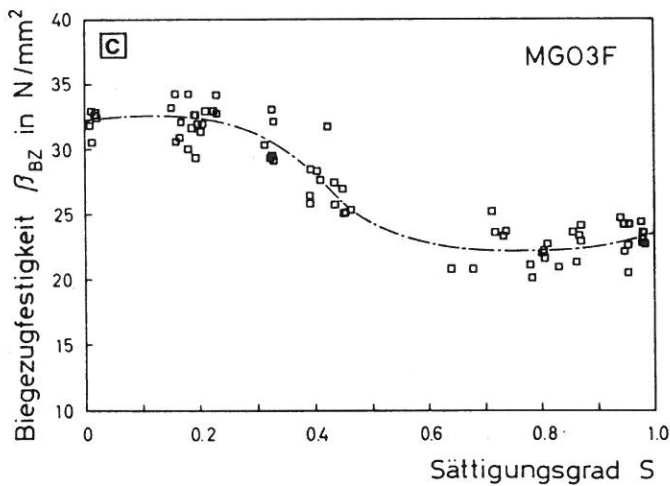
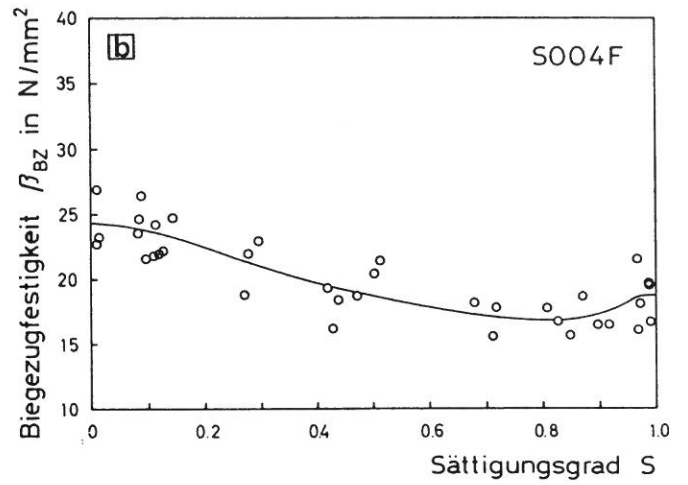
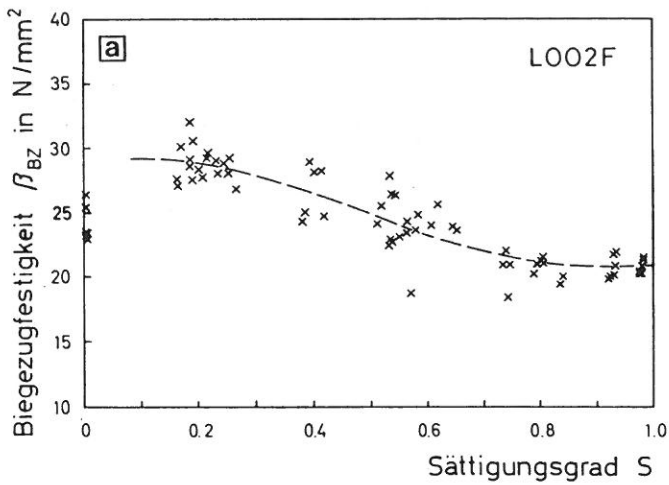


Abb. 6 a,b,c

Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad (Einzelwerte)

Die S-Grade wurden nach einer Trocknung bei 50°C eingestellt (Serie BS)

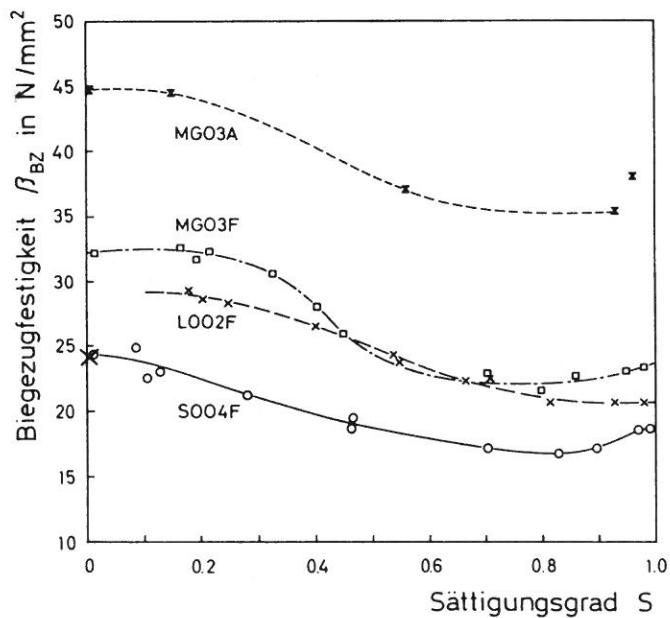


Abb. 7

Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad (Mittelwerte)

MGO3F, L002F und S004F vgl. Abb. oben (Serie BS)
MGO3A (Serie B, Vorbeh. entspr. der Serie BS)

ohne Hinweis auf den hygrischen Zustand unvollständig oder gar irreführend. Schließlich muß bei vergleichenden Betrachtungsweisen, z.B. beim Vergleich zwischen Ergebnissen beanspruchter und unbeanspruchter Proben, die Voraussetzung desselben Wassergehaltes immer erfüllt sein.

Bekanntlich hängt die Biegezugfestigkeit stark von der Faserorientierung im Biegeversuch ab. Obwohl die Anordnung der Fasern innerhalb einer Tafel nicht an jeder Stelle die gleiche ist, ist es üblich, als Hauptkoordinaten die Richtung im Drehsinne der Formwalze (Herstellrichtung) und jene quer dazu zu unterscheiden. Dementsprechend gibt es die Prüfanordnungen "Last- und Auflagerschneiden senkrecht oder parallel zur Herstellrichtung", die mit den Symbolen \parallel bzw. \perp gekennzeichnet werden. Dies ist gleichbedeutend mit der Bezeichnung "Probenlängskante in bzw. quer zur Herstellrichtung".

Die bisher besprochenen Ergebnisse kamen in der Prüfanordnung "Probenlängskante in Herstellrichtung" (\parallel) zustande. Bei solchen Verhältnissen werden die höchsten Werte ermittelt, weil die Fasern hier vornehmlich senkrecht zum beanspruchten Querschnitt ausgerichtet sind. Für die andere Anordnung (\perp) ist im Rahmen dieser Arbeit die Biegezugfestigkeit an etlichen Proben der Serien OS, B und P ermittelt worden. Als Verhältniswerte beider Richtungen (\perp/\parallel) ergaben sich für das Material L002F 0,62, für S004F 0,66, für KG03F 0,73, für MG03A 0,74, für MG03F 0,75 und für SG02F 0,82.

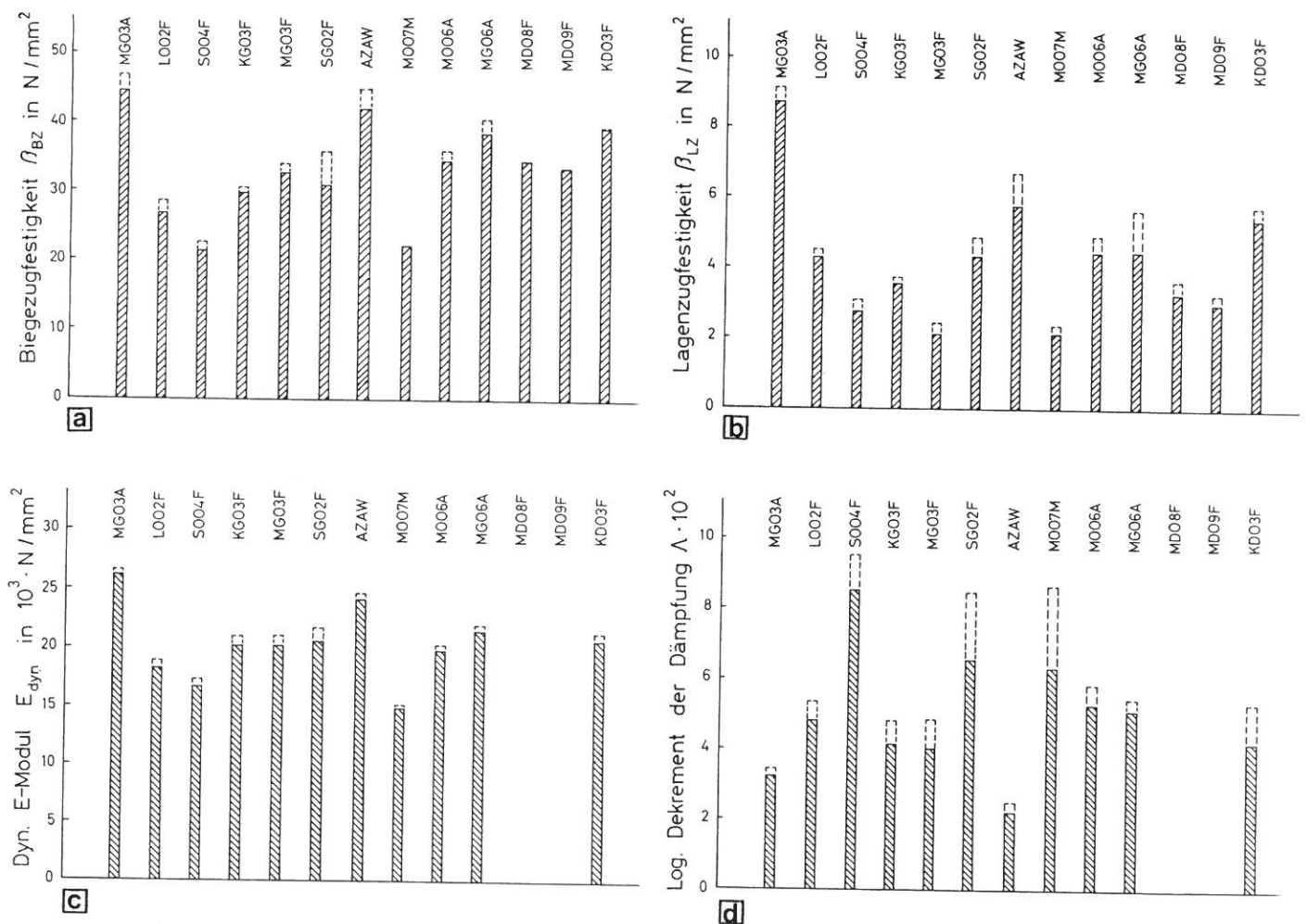


Abb. 8 a,b,c,d
Mechanische Eigenschaften der Materialien im Vergleich

Bei der Serie B (Abb. 1a) wurde auch der Zusammenhang zwischen der Biegezugfestigkeit und dem Sättigungsgrad für den Fall der "Probelängskante quer zur Herstellrichtung" ermittelt. Hierbei ergaben sich Kurven (hier nicht dargestellt), die die gleiche Gestalt aufwiesen wie jene, die für das gleiche Material in Abb. 5 für die andere Richtung dargestellt ist, jedoch waren diese insgesamt auf einem niedrigeren Festigkeitsniveau angesiedelt.

Eine solche Abhängigkeit von der Faserrichtung wurde weder bei den porenraumbezogenen Parametern noch beim dyn. E-Modul gefunden. Deswegen sind in der Tabelle 4 in einigen Fällen die Einzelergebnisse aus beiden Richtungen zu Mittelwerten zusammengefaßt worden. Für die autoklavierten Materialien MD08F und MD09F sind die Werte der Biegezugfestigkeit geschätzt worden, weil aufgrund falscher Faserrichtungsangabe nur Proben der Anordnung \perp vorlagen. Im Bild 8a sind die Biegezugfestigkeiten der Tabelle 4 graphisch dargestellt worden. Die gestrichelten Balkenteile stellen die positiven Standardabweichungen der Mittelwerte dar. Die höchsten Werte finden sich beim Asbestzement. Den zweiten Rang nimmt die alte, ungepreßte Wellplatte aus Asbestzement ein (AZAW). Danach folgen der autoklavierte Faserzement KDO3F sowie zwei weitere Asbestzemente. Die natürlich erhärteten, gepreßten und die übrigen autoklavierten Faserzemente liegen in etwa auf dem gleichen Niveau. Die niedrigsten Werte zeigen die ungepreßten Faserzemente und der sehr poröse Mischfaserzement M007M. Sie liegen etwa 50 % unterhalb des höchsten Ergebnisses.

2.2.2 Querzugfestigkeit

Die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene wird üblicherweise Querzugfestigkeit genannt. Innerhalb dieser Arbeit wird aber auch der Begriff der Lagenzugfestigkeit verwendet. Er soll verdeutlichen, daß bei dieser Art der Prüfung der Haftverbund der Lagen unter Zug gerät. Mit dieser Beanspruchung läßt sich die Festigkeit der nicht armierten dritten Koordinatenrichtung erfassen, die als die empfindlichste angesehen wird.

Bei der Prüfung auf Querzugfestigkeit spielen zahlreiche Einflußfaktoren eine Rolle. Sie lassen sich in jene einteilen, die mit der Krafteinleitung in die Probe zusammenhängen, und in jene, die von der Herstellung der Probe und vom Verbund mit den Stahlplatten herkommen.

Im Sinne der Festigkeitstheorie soll die Spannung im Querschnitt während des Zugversuches gleichmäßig verteilt sein. Dies läßt sich annähernd realisieren, wenn die von der Maschine erzeugte Kraft über starre Platten längs der Schwer-

achse des Verbundkörpers in die Probe eingeleitet wird. Diese Vorstellung kann relativ sicher mit rotationssymmetrischen Stahlscheiben und Proben verwirklicht werden (Abb. 9). Dabei wird die Kraft von der Maschine über Zugstäbe, die von Gelenken unterbrochen werden, in die kreisrunden Stahlplatten symmetrisch geführt. In den ausreichend dicken Stahlplatten (mind. 30 mm) wird sie gleichmäßig über den Querschnitt verteilt und an die Probe weitergegeben.

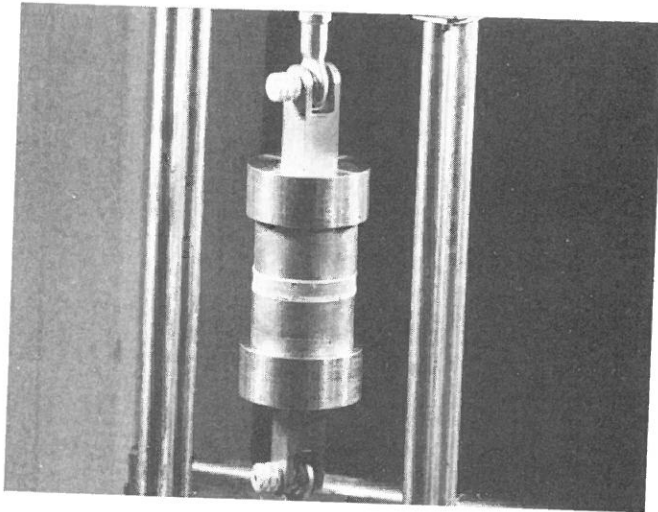


Abb. 9
Prüfanordnung zur Ermittlung der
Querzugfestigkeit (Lagenzugfestigkeit)

Bei der Herstellung der Proben muß sichergestellt werden, daß die Schnittflanken keine Delamination oder Anrisse aufweisen. In ihrem Bereich könnten sich während der Prüfung Spannungsspitzen ausbilden, die zur spontanen Rißausbreitung und zur Verfälschung des Festigkeitsergebnisses führen würden. Ebenso wichtig ist die Herstellung einer vollflächigen Klebeverbindung zwischen Probe und Stahlplatte. Die Haftfestigkeit dieser Verbindung muß größer sein als die Querzugfestigkeit des zu prüfenden Materials. Daß bei der Prüfung der Querzugfestigkeit - wie bei der Biegezugfestigkeit auch - der Wassergehalt eine wesentliche Rolle spielt, liegt auf der Hand.

Der Einfluß, der von der Probenbearbeitung her stammt, ist erst im Verlaufe der hier durchgeführten Untersuchungen evident geworden. Deswegen wurden einige Ergebnisse an Proben ermittelt, die trocken mit einem spanenden Werkzeug und andere, die naß mit einer diamantbesetzten Bohrkronen herausgearbeitet waren.

Welche Unterschiede die Art der Probenbearbeitung ergeben kann, zeigt Abb. 10: Während die Querzugfestigkeit der trocken gewonnenen Proben erheblich niedriger als bei den naß gebohrten ausfällt, ist bei der Biegezugfestigkeit (Teilbild a) ein Einfluß der Bearbeitungsart nicht erkennbar. Die für diesen Vergleichstest verwendeten Materialien waren intensiven Trocken-Naß-Wechseln ausgesetzt, die zu einer erheblichen Steigerung der Querzugfestigkeiten gegenüber jenen des jungen Materials der Abb. 8b geführt haben.

Nach dem Bekanntwerden der obigen Zusammenhänge erfolgte die Bearbeitung der Proben zwar ausschließlich mit dem "Naßbohren", die bereits vorliegenden Ergebnisse der trocken gebohrten Scheiben bereiteten aber in einigen Fällen dort Probleme bei der Auswertung, wo die Entwicklung der Querkzugfestigkeit anhand von Vergleichen verfolgt worden ist. Dies ist im Text vermerkt.

Bei der Ermittlung der in der Tabelle 4 aufgeführten Ergebnisse - dargestellt auch in der Abb. 8b - ist in Anlehnung an die im Abschnitt 5.3.3 beschriebene Verfahrensweise vorgegangen worden. Die Proben sind naß gebohrt und vor dem Verkleben bei 50 °C getrocknet worden.

Beim Vergleich der Werte der Biegezugfestigkeit mit jenen der Querkzugfestigkeit (Abb. 8a und 8b) ergeben sich der Tendenz nach zum Teil Übereinstimmungen, zum Teil aber auch bemerkenswerte Unterschiede. Beide Festigkeitsarten liefern die höchsten Werte für den gepreßten Asbestzement MG03A. Dann folgen die "alte Wellplatte", der autoklavierte Faserzement KD03F und zwei weitere Asbestzemente. Die niedrigsten Werte sind bei dem sehr porigen Mischfaserzement M007M und dem ungepreßten Faserzement S004F feststellbar.

Die sehr niedrige Querkzugfestigkeit des gepreßten Faserzementes MG03F geht auf sein "junges Alter" zurück. Dieses Material war zur Zeit der Anlieferung in einem viel höherem Maße "unfertig" als alle anderen. Im Verlauf der Zeit profitierte von der "Alterung" vor allem die Querkzugfestigkeit. Welche Steigerungen hierbei möglich sind, zeigt der Vergleich zwischen den Abb. 8b (nach der Anlieferung) und 10b (zu einem späteren Zeitpunkt).

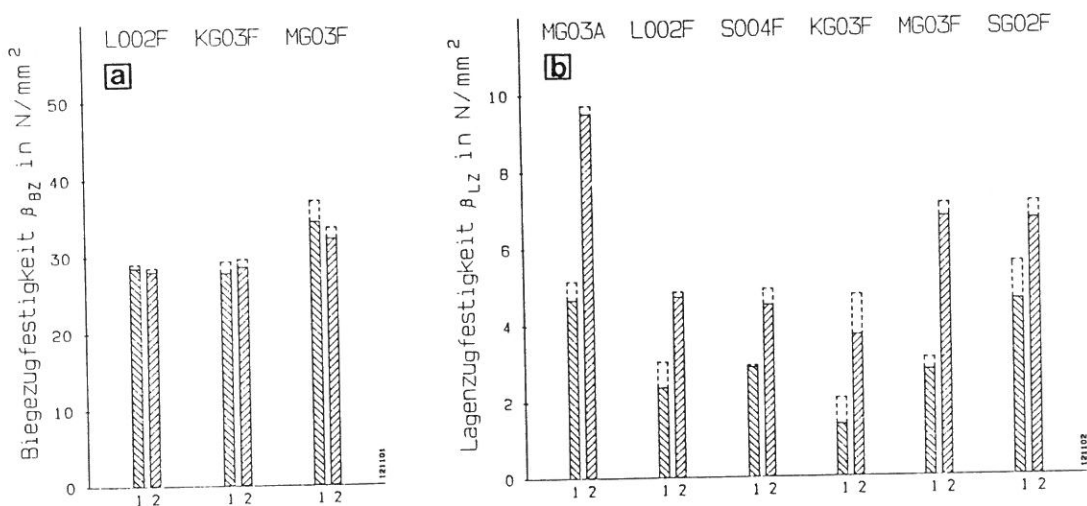


Abb. 10 a,b

Vergleich der Biegezug- und Lagenzugfestigkeit ((a) bzw. (b)) von trocken-gesägten bzw. -gebohrten Proben (Balken 1) gegenüber denen der naßgesägten bzw. -gebohrten Proben (Balken 2)

2.2.3. Dynamischer Elastizitätsmodul

Nach der Methode des kritischen Sättigungsgrades von Fagerlund [15] dient die Ermittlung der Änderung des dynamischen E-Moduls durch Frost-Tau-Wechsel neben der Messung der Längenänderung der Bewertung des Frostwiderstandes von Beton. Sie ist daher auch in das vorliegende Vorhaben einbezogen worden, obwohl keine Erfahrung vorlag, ob anhand des dyn. E-Moduls bei Anwendung auf Faserzemente auswertbare Ergebnisse erzielt werden können.

Der dyn. E-Modul wurde aus den zerstörungsfrei ermittelten Resonanzfrequenzen errechnet. Die physikalischen Grundlagen und Anwendungen auf zementgebundene Werkstoffe sind in [16], [17], [18], [19], [20], [21] und [11] behandelt.

Die Messungen wurden mit dem Elastomat 1.024 der Fa. Förster durchgeführt. Der vollelektronisch steuerbare Generator mit dem Frequenzbereich von 500 Hz bis 100 kHz versetzt die Probe über ein piezoelektrisches Erregungssystem in mechanische Schwingungen. Diese werden im ebenfalls piezoelektrischen Empfänger-system in elektrische Schwingungen verwandelt, verstärkt und digital angezeigt (Abb. 11).

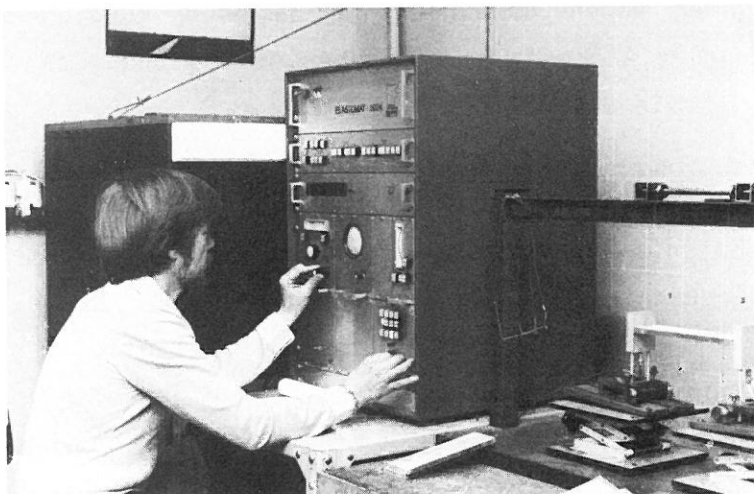


Abb. 11
Gerät zur Ermittlung der Resonanzfrequenz und der Dämpfung (ELASTOMAT der Fa. Förster)

Verwendet wurde die Longitudinalschwingung. Wenn die erregte Frequenz gleich der Eigenfrequenz des Probekörpers wird, treten "stehende Wellen" auf und die Schwingungsamplitude bildet ein Maximum. Diese Frequenz ist die Resonanzfrequenz f . Der dyn. E-Modul wird berechnet nach

$$E_{\text{dyn}} = \frac{4 \cdot l^2 \cdot \rho \cdot f^2}{p^2}, \quad (1)$$

wo l die Länge der Probe, ρ die Rohdichte und p die Ordnungszahl der Schwingung (meist 1 entspr. der Grundwelle) sind. Wird die Entwicklung des dyn. E-Moduls z.B. infolge der Trocken-Naß-Wechsel (Abb. 33) oder der Frost-Tau-Wechsel (Abb. 50) verfolgt, ergibt sich der relative dyn. E-Modul direkt als

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{f}{f_0} \right)^2, \quad (2)$$

da die Konstanten in Gl. (1) eliminiert sind. f_0 ist die Bezugsfrequenz im Zustand ohne Wechsel (vgl. Abschnitte 4.1 und 4.2).

Während die Resonanzfrequenz die elastischen Eigenschaften des Materials kennzeichnet, ist die Dämpfung ein Maß für den Betrag der Schwingungsenergie, die der Stab beim freien Ausschlagen je Zyklus verliert. Mit dem Elastomaten kann die Dämpfung als logarithmisches Dekrement gemessen werden. Sie wird mit der inneren Reibung des Gefüges in Zusammenhang gebracht, weshalb sie zur Erfassung der Materialermüdung besonders geeignet erscheint. Sowohl die Resonanzfrequenz wie auch insbesondere das log. Dekrement sind bei zementgebundenen Werkstoffen vom Wassergehalt der Probe abhängig [12].

In Tabelle 4 sind unter Nr. 3 der dyn. E-Modul und unter Nr. 4 das log. Dekrement der Materialien in lufttrockenem Ausgangszustand zahlenmäßig angegeben (Serien B, Abb. 1a,b, bzw. Serie OS). Darüber hinaus sind diese Werte in der Abb. 8c,d graphisch dargestellt. Die zugehörigen S-Grade, die sich nach der Luftlagerung (Tab. 3, Nr. 5) ergeben haben, und die entsprechende Rohdichte (vgl. auch Gl. (1)) sind in der Tabelle 4 ebenfalls angegeben. Die Probenanzahl betrug ca. 25 bei Serie B und 3 bei Serie OS.

Werden die Werte des dyn. E-Moduls mit jenen der Biegezugfestigkeit (Abb. 8) verglichen, dann fällt auf, daß Materialien mit hohen oder niedrigen Festigkeiten entsprechend hohe bzw. niedrige Elastizitätsmoduln aufweisen. Demgegenüber verhält sich die Dämpfung der Tendenz nach umgekehrt. Auffällig ist das sehr niedrige log. Dekrement der Asbestzement-Wellplatte AZAW; nach jahrelanger Exposition auf dem Dach ist dieses Material infolge Carbonatisierung spröde geworden.

2.3 Porenraumbezogene Eigenschaften und Untersuchungsmethodik

Nahezu alle technischen Eigenschaften mineralischer Baustoffe werden von ihrer Porosität beeinflusst. Die Beziehungen zwischen den Festigkeits-, Verformungs- und Porositätsparametern sind von sehr komplexer Art. Die Ursachen sind im wesentlichen in der Beschaffenheit des Hohlraumsystems begründet, denn hiervon hängen die Modifikation, die Menge und die Wirkungsweise des Porenwassers ab. Die nachfolgend in aller Kürze dargestellten Methoden zur Erfassung der Eigenschaften des Porenraumes dienen nicht nur der Charakterisierung der untersuchten Materialien, sondern sie werden in den folgenden Kapiteln auch zur Beschreibung

der Werkstoffveränderung infolge unterschiedlicher Beanspruchungsarten verwendet.

2.3.1 Sättigungsgrad, Porosität und Rohdichte

Zur Kennzeichnung jenes Anteils des Gesamtporenvolumens, der mit Wasser gefüllt ist, eignet sich nach [15] der Sättigungsgrad S . Er berechnet sich nach der Formel

$$S = \frac{V_w}{V_p} = \frac{m_s - m_{d;105}}{m_{s;a} - m_{d;105}} \quad (3)$$

Hierbei bedeuten V_w das jeweils vorhandene Wasservolumen, das aus der Differenz der Massen der feuchten (m_s) und der bei 105 °C getrockneten ($m_{d;105}$) Probe folgt, und V_p das Gesamtporenvolumen, das sich ergibt, wenn von der Masse der Probe mit einem vollständig wassergefüllten Porenraum ($m_{s;a}$) diejenige der bei 105 °C getrockneten subtrahiert wird.

Bei der Ermittlung von V_p wird die Probe in der Regel im Vakuum gesättigt, in besonderen Fällen, wenn z.B. das Material nur sehr unwillig Wasser aufnimmt, kann sich der Vakuumsättigung noch eine Überdruckbehandlung anschließen. Die benutzte Anlage zeigt Abb. 12. Im einzelnen wird folgendermaßen verfahren:

Die bei 105 °C getrockneten Proben werden in einen Vakuumbehälter gebracht und hier 3 Stunden einem Restdruck von etwa 1 mbar ausgesetzt. Dann wird in den

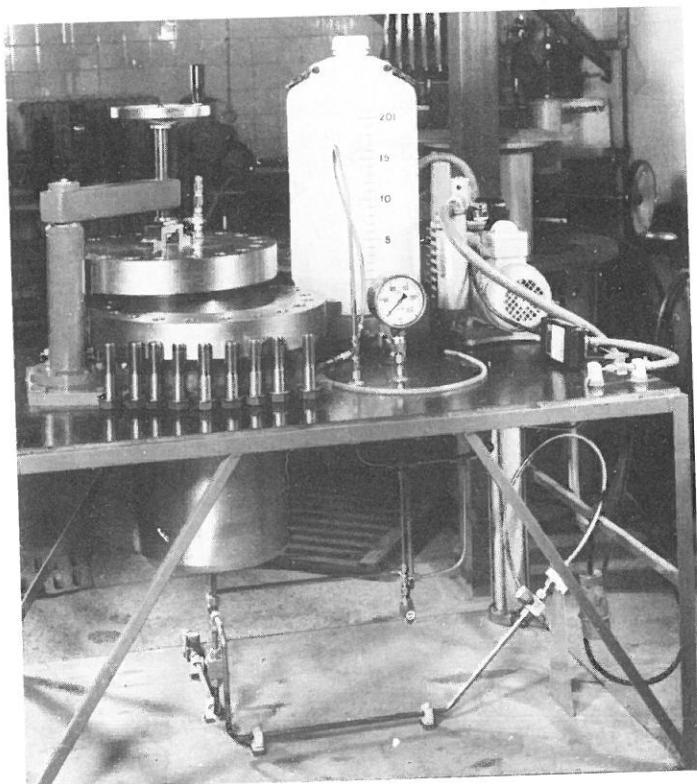


Abb. 12
Apparatur zur Vakuum-Druck-Sättigung
(BAM-Konstruktion)

Behälter langsam Wasser eingelassen, wobei die Vakuumpumpe weiter in Betrieb bleibt, bis die Proben vollständig mit Wasser bedeckt sind. Der sich nun einstellende Restdruck ist bei laufender Pumpe eine Stunde lang zu halten. Danach wird im Behälter atmosphärischer Druck hergestellt. Nach dem vollständigen Auffüllen des Behälters mit Wasser wird das System sodann unter einen Druck von 150 bar gesetzt, der 24 Stunden lang andauert. Anschließend wird der Überdruck allmählich abgebaut. Die Proben der Vakuumsättigung verbleiben mindestens 1 Woche und die der Vakuum/Druck-Sättigung mindestens 1 Tag unter Wasser.

Da die 105 °C-Trocknung und die anschließende Wassersättigung bereits Materialveränderungen nach sich ziehen, wird diese Bezugsbehandlung (S ist dabei 0 bzw. 1,0; in den Abb. 1 bis 4 durch senkrechte Doppelstriche gekennzeichnet) in der Regel erst am Ende der jeweiligen Untersuchung, d.h. meist erst nach dem Biegezugversuch durchgeführt.

Demnach lagen zwei Hälften der ursprünglichen Probe vor, von denen an einer in den meisten Fällen Gefügeuntersuchungen vorzunehmen waren, während die andere Hälfte für die Bezugsbehandlung zur Verfügung stand. Um den Sättigungsgrad der ursprünglichen Probe zu erhalten, mußten die Massen der ganzen trockenen ($m_{d;105}$) und der im Vakuum/Druck gesättigten ganzen Probe mit den folgenden Formeln berechnet werden:

$$m_{d;105} = \frac{m_s \cdot m_{d;105;H}}{m_{s;H}}, \quad (4)$$

$$m_{s;a} = \frac{m_s \cdot m_{s;a;H}}{m_{s;H}}. \quad (5)$$

Hierbei weist der Index H auf die jeweilige Masse der Probenhälfte hin. Mit diesen so berechneten Größen konnte gemäß Formel (3) auch der Sättigungsgrad der ganzen Probe angegeben werden.

Die volumenbezogene Gesamtporosität P ergibt sich nach der Formel

$$P = V_p/V, \quad (6)$$

wobei das Probenvolumen V durch eine Über- und Unterwasserwägung der nassen Probe zu bestimmen ist.

Zur Berechnung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes wurde die Gleichung

$$w = \frac{m_s - m_{d;105}}{m_{d;105}} \quad (7)$$

herangezogen. Unter der Trockenrohddichte wird der Quotient aus der Masse nach der 105 °C-Trocknung und dem Probenvolumen verstanden

$$\rho_{d;105} = m_{d;105}/V \quad (8)$$

Die anfangs durchgeführten Untersuchungen zur Bestimmung des Gesamtporenraumes ergaben bei wiederholten 105 °C-Trocknungen und Vakuumsättigungen erhebliche Abnahmen der Porosität. Nach 3 solchen Wechseln fiel der Wert in einigen Fällen auf etwa 50 % des ursprünglichen Wertes (Abb. 13). Da die Porosität jedoch nach einer zusätzlichen einmonatigen Unterwasserlagerung wieder anstieg (Balken 4), lag der Verdacht nahe, daß die Abnahme nur eine scheinbare wäre. Die Bestätigung dieser Annahme lieferte die im 4. Wechsel durchgeführte Vakuum/Druck-Sättigung, bei der sich im wesentlichen die Anfangswerte wieder einstellten. Dies macht deutlich, daß eine zuverlässige Bestimmung des Gesamtporenraumes nur über die Vakuum/Druck-Sättigung erreicht werden kann. Dies gilt insbesondere für Materialien, deren Vorgeschichte unbekannt ist.

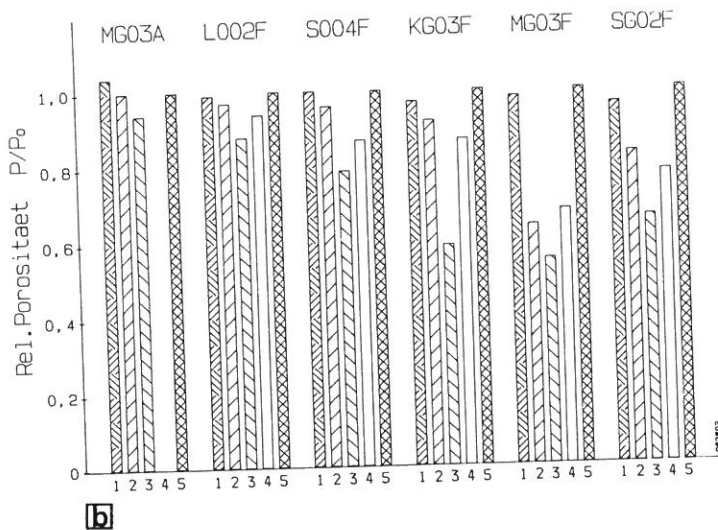
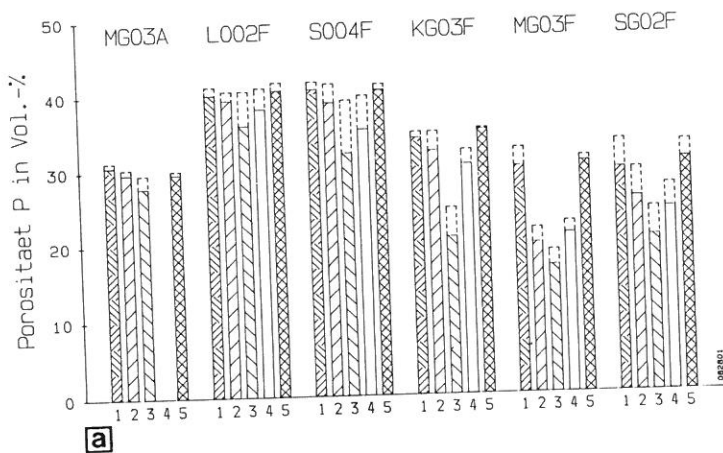


Abb. 13 a,b
Porosität P (a) und rel. Porosität P/P₀ (b) während der Trocken-Naß-Wechsel (105°C/VAK)

- 1 = nach 1.TNW (105°C/VAK)
- 2 = nach 2.TNW (105°C/VAK)
- 3 = nach 3.TNW (105°C/VAK)
- 4 = nach 3.TNW + 1 Monat NAT
- 5 = nach 4.TNW (105°C/VD) = P₀

In den Diagrammen a und b der Abb. 14 werden die der Tabelle 4 entnommenen zahlenmäßigen Angaben zur Porosität und Rohdichte graphisch dargestellt. Von den Asbestzementen weist MG03A die höchste und M007M die niedrigste Rohdichte auf. Die Werte des autoklavierten Faserzementes KD03F und der gepreßten Faserzemente liegen in etwa auf dem Niveau der übrigen Asbestzemente, wohingegen bei den anderen autoklavierten Materialien Werte wie bei den ungepreßten Faserzementen

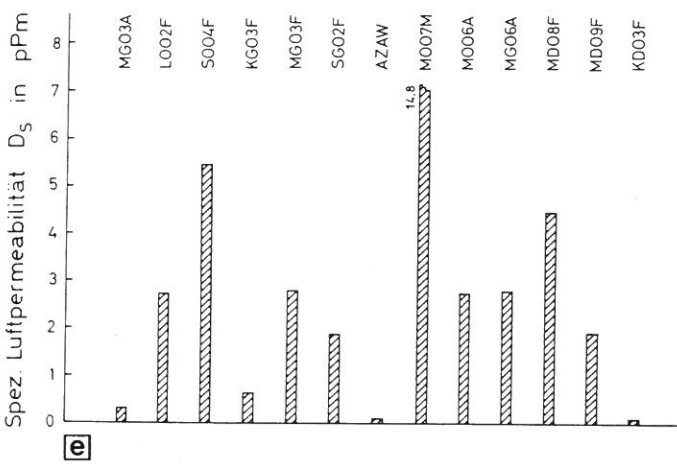
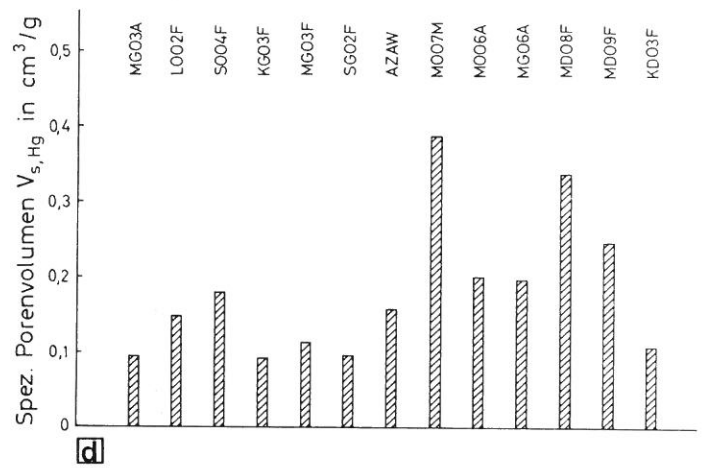
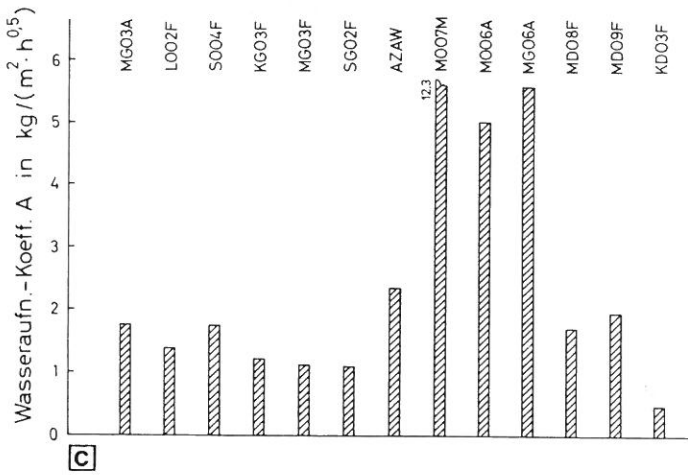
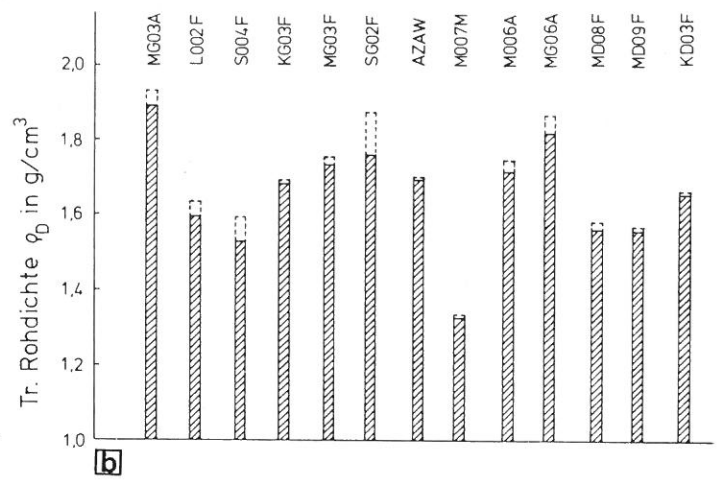
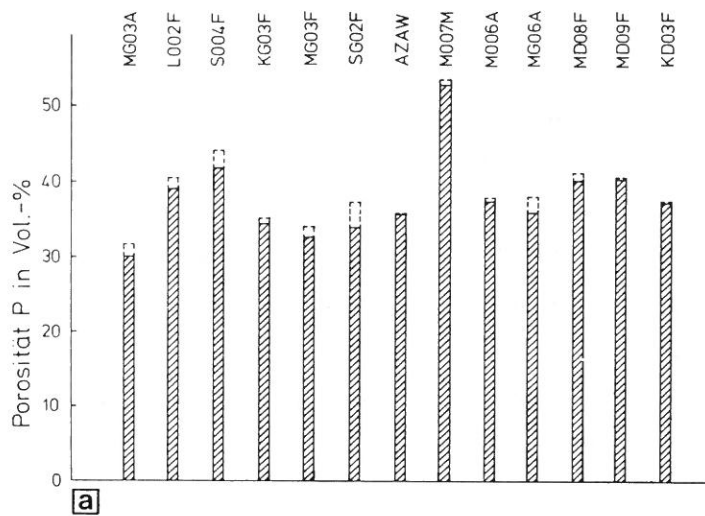


Abb. 14 a,b,c,d,e
Porenraumbezogene Parameter der
Materialien im Vergleich

feststellbar sind. Die Porosität verhält sich der Tendenz nach umgekehrt. Dort, wo niedrige Rohdichten vorliegen, finden sich hohe Porositäten. Einen direkten Zusammenhang zwischen beiden Parametern lassen die Teilbilder aber nicht erkennen. Obgleich die Größen des Porenvolumens von Einfluß auf die im Kapillarversuch erreichten Feuchtigkeitsgehalte oder Sättigungsgrade sind, hängen die Eigenschaften der Wasseraufnahme auch noch von anderen Faktoren ab, wie im folgenden Kapitel gezeigt wird.

2.3.2 Kapillare Wasseraufnahme

Die kapillare Wasseraufnahme poröser Stoffe unterliegt komplizierten Gesetzen. Die Problematik sowie Untersuchungsmethoden werden in den Veröffentlichungen [22], [23] und [24] geschildert; weiter sei hier auf die Dissertation von Kießl [25] und das Buch von Schubert [26] hingewiesen.

In der vorliegenden Arbeit sind zur Beschreibung der kapillaren Wasseraufnahme im wesentlichen die von Schwarz [23] angegebenen Kennwerte verwendet worden, und zwar der Wasseraufnahme-Koeffizient

$$A = \frac{m_w}{\sqrt{t}} \quad , \quad (9)$$

der Wassereindring-Koeffizient

$$B = \frac{A}{\psi_k \cdot \rho_w} \quad (10)$$

und die Wasserkapazität

$$\psi_k = \frac{m_{wk}}{h \cdot \rho_w} \quad , \quad (11)$$

wobei t die Zeit, ρ_w die Dichte des Wassers, h die Probenhöhe und m_w die Wasseraufnahme (Masse bezogen auf die Saugfläche) bedeuten. Der Index k kennzeichnet in den Formeln den jeweiligen Wert am Knickpunkt.

Bei der graphischen Darstellung von m_w in Abhängigkeit von \sqrt{t} ist A die Steigung der Anfangsgeraden und damit ein Materialkennwert, der den zeitlichen Verlauf der Wasseraufnahme vom trockenen Zustand bis zur Durchfeuchtung beschreibt. ψ_k gibt den Feuchtigkeitsgehalt am Knickpunkt in Vol.-% an und B charakterisiert die Wanderungsgeschwindigkeit der Wasserfront vor dem Erreichen der Probenoberfläche. In DIN 52 617 [27] wird ein Verfahren zur Bestimmung des Wasseraufnahme-Koeffizienten von Baustoffen angegeben. Der Versuch beschränkt sich auf die Ermittlung der Steigung der Anfangsgeraden. In der vorliegenden Arbeit werden neben A , B und ψ_k auch weitere Kennwerte berechnet, die den massebezogenen Feuchtigkeitsgehalt oder den Sättigungsgrad am Knickpunkt und nach 10 Tagen Versuchsdauer angeben.

Dazu war eine Behandlung der Proben nach dem Saugversuch gemäß Abschnitt 2.3.1 erforderlich, was zusätzliche Daten zur Porosität und Rohdichte lieferte. Die Kennwerte sämtlicher Materialien sind im oberen Teil der Tabelle 5 zusammengestellt.

Die Messungen wurden an bei 105 °C getrockneten Proben der Größe 50 x 20 mm durchgeführt, wobei die Wasseraufnahme über die Fläche 50 mm x Dicke erfolgte. Die Prismen tauchten nur geringfügig in das Wasserbad ein, dessen Spiegel

Tabelle 5
 Porenraumbezogene Parameter der Materialien im Ausgangszustand, ermittelt im Versuch zur kapillaren Wasseraufnahme (oben)
 bzw. durch Hg-Porosimetrie (unten)

Nr.	Kennwert	Einheit	Material												
			MG03A	LO02F	S004F	KG03F	MG03F	SG02F	AZAW	MO07M	MO06A	MG06A	MD08F	MD09F	KD03F
1	Wasseraufnahme- Koeffizient A	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	1,76	1,38	1,76	1,22	1,12	1,10	2,35	12,32	5,01	5,59	1,71	1,95	0,50
2	Wassereindring- Koeffizient $B \cdot 10^3$	$\text{m}/\text{h}^{0,5}$	7,0	4,9	5,6	3,9	4,7	4,9	8,3	26,1	18,1	18,5	5,1	5,6	2,2
3	Wasserkapazität Ψ_K	Vol-%	25,1	28,3	31,7	30,6	23,8	22,2	28,3	47,0	27,6	30,2	33,2	35,0	22,6
4	Feuchtigkeitsgehalt am Knickpunkt w_K	M.-%	12,6	17,2	19,9	18,2	12,6	11,4	18,3	35,3	16,6	15,2	21,9	23,0	12,6
5	Feuchtigkeitsgehalt nach Vak-(Druck)-Sätt. $w_{s,d}$	M.-%	15,4	24,0	25,8	22,2	18,0	17,3	21,7	41,0	21,2	18,2	27,2	27,6	21,5
6	Sättigungsgrad am Knickpunkt S_K	1	0,822	0,719	0,772	0,816	0,698	0,657	0,841	0,860	0,786	0,836	0,795	0,835	0,592
7	Sättigungsgrad nach 10 Tagen S_{10d}	1	0,865	0,766	0,828	0,881	0,786	0,712	0,895	1,012	0,949	0,959	0,812	0,851	0,636
8	Trocken - Rohdichte $\rho_{d,105}$	g/cm^3	1,909	1,617	1,569	1,656	1,758	1,820	1,692	1,311	1,738	1,849	1,526	1,518	1,682
9	Porosität P	Vol-%	29,4	38,8	40,5	36,8	31,6	31,5	36,7	53,6	36,8	33,6	41,5	42,0	36,1
1	Spez. Porenvolumen $V_{s,Hg}$	cm^3/g	0,094	0,148	0,180	0,092	0,114	0,096	0,158	0,388	0,201	0,197	0,338	0,247	0,109
2	10 nm	%	13,1	4,1	11,9	7,1	4,2	11,0	6,9	8,0	13,3	16,3	22,0	20,3	34,6
3	30 nm	%	41,0	30,0	31,8	13,8	17,6	24,3	24,2	18,7	24,3	31,1	35,7	37,6	51,0
4	100 nm	%	71,0	40,2	47,2	26,6	42,5	32,3	51,8	39,0	46,9	64,2	39,3	45,7	60,9
5	2500 nm	%	94,7	85,6	81,8	92,3	93,8	91,7	93,1	92,5	93,5	95,1	62,3	93,2	91,8
6	min-10 nm	%	13,1	4,1	11,9	7,1	4,2	11,0	6,9	8,0	13,3	16,3	22,0	20,3	34,6
7	10-100 nm	%	58,0	36,1	35,4	19,6	38,3	21,3	44,8	31,0	33,6	47,9	17,3	25,4	26,3
8	100-2500 nm	%	23,6	45,4	35,4	65,7	51,4	59,4	41,3	53,7	46,6	30,9	23,0	47,5	30,7
9	2500-max	%	5,3	14,4	17,3	7,6	6,1	8,3	7,0	7,4	6,5	4,9	37,7	6,8	8,3

konstant gehalten wurde, so daß die Saughöhe etwa 20 mm betrug. Bei der Erfassung der zeitabhängigen Wasseraufnahme kam eine Waage zum Einsatz, die das Ergebnis mit zwei Stellen hinter dem Komma ausgegeben hat. Die Versuchsanordnung ist in Abb. 15 dargestellt.

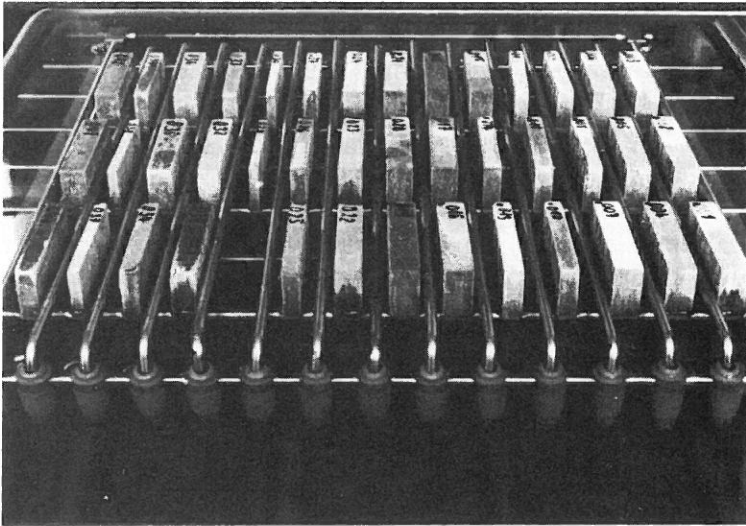


Abb. 15
Probenanordnung im Versuch
zur kapillaren Wasseraufnahme

In Vorversuchen konnte geklärt werden, daß zwischen der Wasseraufnahme in Herstellrichtung und jener quer dazu ein signifikanter Unterschied nicht bestand. Entsprechende Ergebnisse lieferte auch eine Serie von Proben, deren Saugrichtung senkrecht zur Plattenebene verlief. Die benetzte Fläche betrug dabei 50 x 50 mm.

Die oben erwähnten Zusammenhänge führten dazu, daß die Charakterisierung der kapillaren Eigenschaften überwiegend mit der Versuchsanordnung Saugrichtung gleich Herstellrichtung vorgenommen worden ist.

Der Frage nach einer zweckmäßigen Höhe der Proben ist ebenfalls in Vorversuchen nachgegangen worden. Es stellte sich heraus, daß Höhen von mehr als 20 mm zu Ende des Versuches oft zu nicht akzeptablen Inhomogenitäten in der Wasserverteilung führten: Die oberen Probenbereiche wiesen deutlich niedrigere Feuchtigkeitsgehalte als die unteren auf.

Die Versuche sind bei einer Temperatur von etwa 22 °C durchgeführt worden. Bei der geringen Höhe der Proben sorgte das Wasserbad für eine in etwa gleichbleibende rel. Luftfeuchtigkeit in der unmittelbaren Probenumgebung. Da die Messungen in der Regel Vergleichszwecken dienten und die Versuchsbedingungen reproduzierbar waren, ist - auch in Anbetracht der Prismenhöhe von nur 20 mm - auf eine Versiegelung der Seitenflächen verzichtet worden.

Abb. 16 zeigt den Verlauf der flächenbezogenen zeitabhängigen Wasseraufnahme der "alten Wellplatte". Weil die aufsteigende Wasserfront oft nicht ganz eben ist, geht der lineare Zusammenhang zwischen m_w und \sqrt{t} beim Durchdringen der oberen Begrenzungsfläche für eine Zeit lang verloren. Dann liegen die Punkte wieder auf einer Geraden, die jedoch eine sehr geringe Steigung aufweist. Die Werte am Knickpunkt (w_k und S_k) werden von dem Schnittpunkt beider Geraden fixiert und weichen mehr oder weniger von den tatsächlichen Verhältnissen ab.

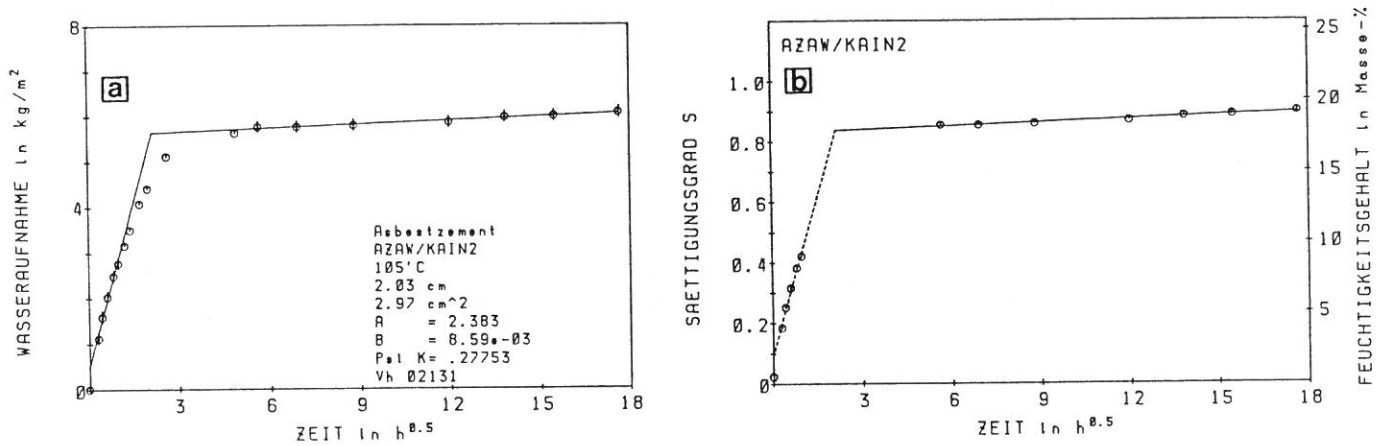


Abb. 16 a,b

Auswertungsbeispiel der kapillaren Wasseraufnahme (alte Wellplatte aus Asbestzement)

a Wasseraufnahme in Abh. von der Wurzel aus der Zeit

b Sättigungsgrad bzw. Feuchtigkeitsgehalt in Abh. von der Wurzel aus der Zeit

Die Gerade hinter dem Knickpunkt kennzeichnet jenen Porenraumanteil, der wahrscheinlich durch Diffusionsvorgänge gefüllt wird. Vor allem im rechten Teilbild läßt sich an ihrem Verlauf erkennen, daß nach etwa 324 Stunden Versuchsdauer weniger als 90 % des tatsächlich vorhandenen Porenraumes gefüllt worden ist, was einem massebezogenen Feuchtigkeitsgehalt von etwa 19 % entspricht. Hiermit sind zugleich die wesentlichen Aspekte der Darstellungsart des Teilbildes 16b erklärt.

Wie unterschiedlich die zeitabhängige Wasseraufnahme bei den verschiedenen Materialien verläuft, zeigt Abb. 17. Während beim Material M007M die Meßpunkte auch im Bereich des Knickpunktes auf der Geraden liegen, läßt sich dieser bei dem dampfgehärteten Faserzement KD03F auch nach sehr langer Versuchsdauer kaum erkennen. Dagegen zeigt der ebenfalls autoklavierte Faserzement MD08F eher ein ideales Verhalten.

Die höchste Wasseraufnahme am Knickpunkt erreicht das sehr porige Material M007M, an zweiter Stelle liegt der autoklavierte Faserzement MD08F, gefolgt von dem ungepreßten Faserzement S004F, dargestellt in Abb. 18. Die anderen in den

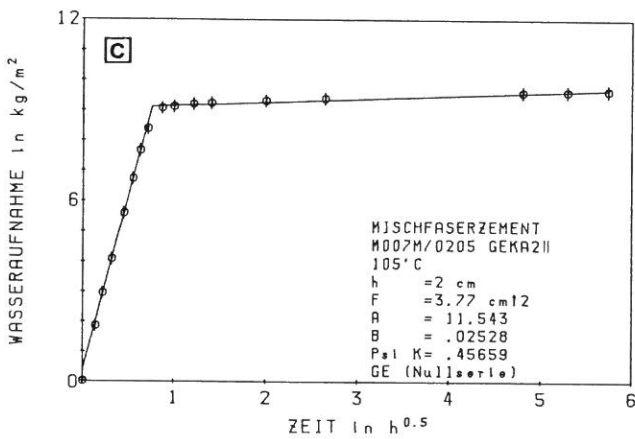
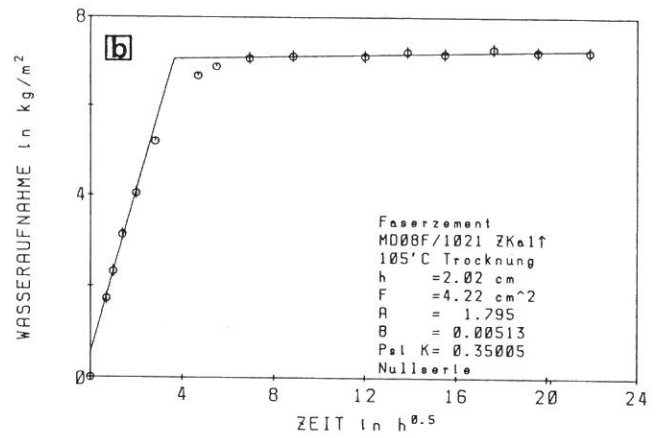
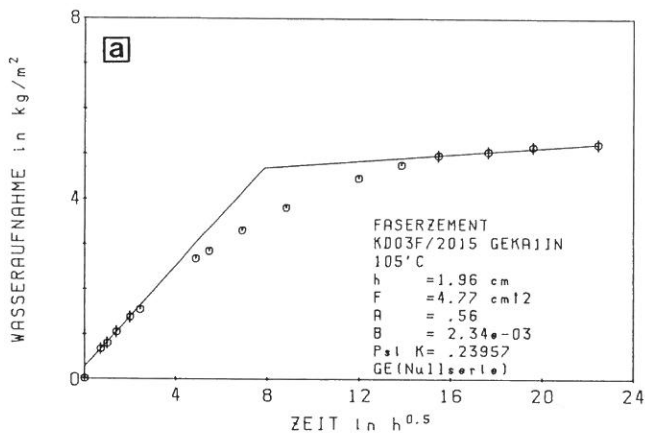


Abb. 17 a,b,c
Kapillare Wasseraufnahme von 3 Materialien der Sonderuntersuchungen (KD03F (a), MD08F (b) und M007M (c)) im Ausgangszustand

Abb. 17 und 18 dargestellten Materialien erreichen im Ausgangszustand am Knickpunkt in etwa die gleichen Wasseraufnahmen.

In welchem Maße sich die kapillare Wasseraufnahme durch eine 10-monatige Carbonatisierung verändert, zeigen die rechten Teilbilder der Abb. 18. Die Werte fallen hier deutlich niedriger aus, und der Verlauf der Meßpunkte ist, vor allem beim Asbestzement MG03A, ein anderer.

Da die Porenfüllung durch den kapillaren Wassertransport häufig für den sich unter praktischen Bedingungen einstellenden Feuchtigkeitsgehalt verantwortlich ist und dieser einen der Intensitätsfaktoren bei der Beanspruchung im Frost darstellt, spielen die Parameter zur kapillaren Wasseraufnahme, insbesondere wenn sie wie in der Tabelle 5 als Sättigungsgrade ausgedrückt sind, eine wichtige Rolle bei der Einschätzung der Frostwiderstandsfähigkeit. In diesem Sinne müssen die Gefügeveränderungen der Faserzemente infolge natürlicher Alterung als günstig angesehen werden.

Andererseits darf nicht übersehen werden, daß eines der autoklavierten Materialien (KD03F) schon von vornherein sehr vorteilhafte Eigenschaften aufweist. Durch geeignete Maßnahmen bei der Herstellung gelang es, den sich nach 10 Tagen

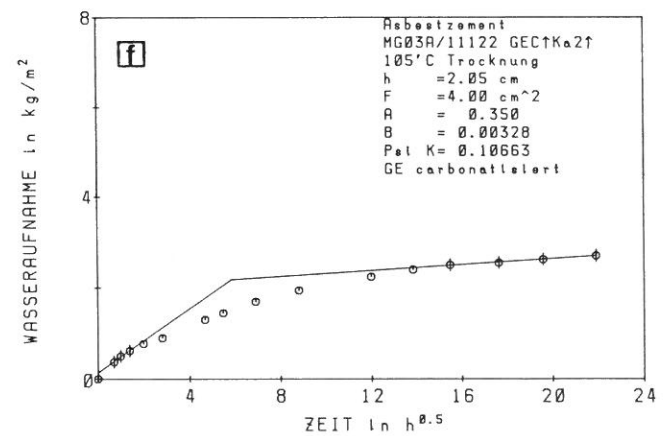
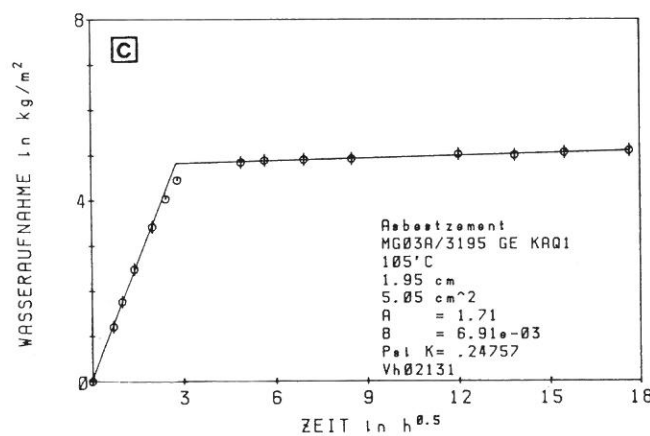
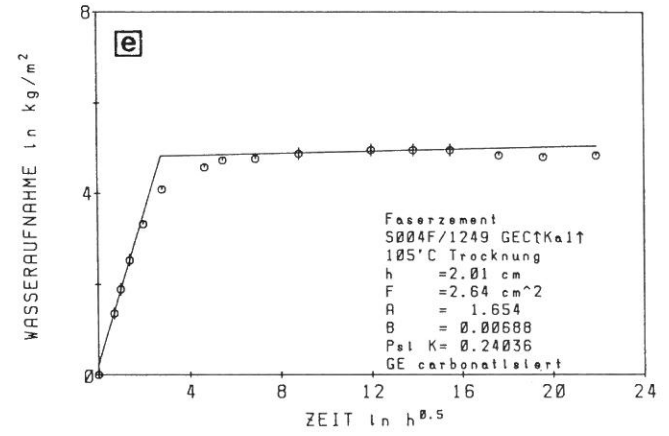
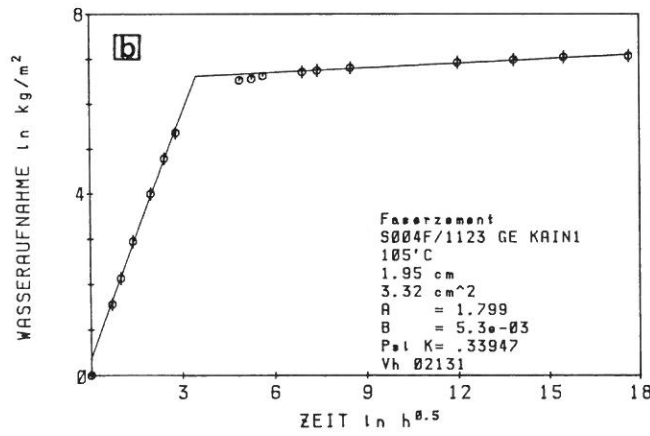
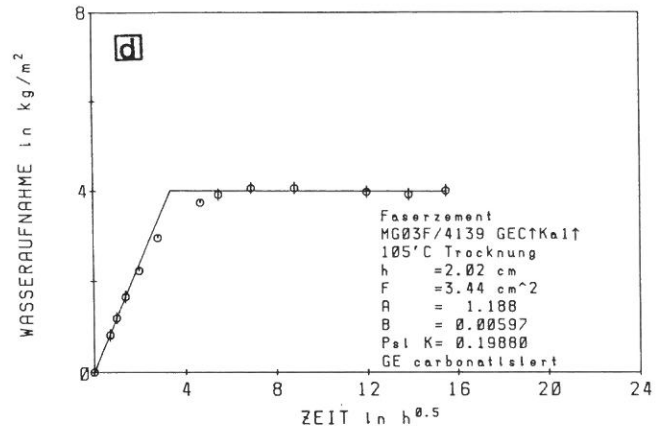
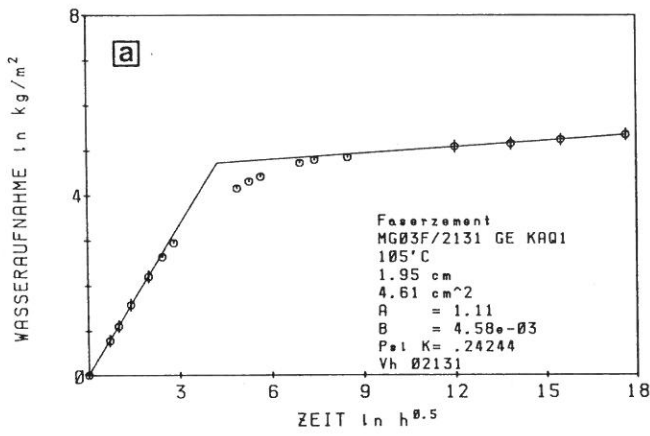


Abb. 18 a,b,c,d,e,f

Kapillare Wasseraufnahme von 3 Materialien der Hauptuntersuchungen (MG03F (a,d), S004F (b,e) und MG03A (c,f)) im Ausgangszustand (a,b,c) und nach 10-monatiger Carbonatisierung (d,e,f)

Versuchsdauer ergebenden Sättigungsgrad S_{10d} auf ein Minimum zu bringen (Tabelle 5 Zeile 7).

2.3.3 Quecksilberporosimetrie

Die Bestimmung der Porengrößenverteilung mit dem Quecksilber-Druckporosimeter basiert auf der von Washburn [28] abgeleiteten Beziehung

$$r = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{p} \quad (12)$$

Demnach ist der Radius r direkt von jenem Druck p abhängig, mit dem das nichtbenetzende Quecksilber mit der Oberflächenspannung $\sigma = 0,48 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ in die Poren hineingepreßt wird. Mit dem Randwinkel θ von Quecksilber auf nichtmetallischen Werkstoffen von $141,3^\circ$ folgt der Zusammenhang

$$r = -7492/p \quad (13)$$

Zu den physikalischen Grundlagen der Methode ist zahlreiches Schrifttum erschienen. Eine gute Übersicht geben [29], [30] und [31].

Neben der Porengrößenverteilung fallen bei der Messung das spezifische Porenvolumen und die Rohdichte an. Ferner lassen sich die Untersuchungsergebnisse nach bestimmten Gesichtspunkten analysieren, indem z.B. die Porenanteile ausgewählter Radiengruppen entsprechenden Radien zugeordnet werden. Weitere charakteristische Größen werden von dem Maximum der Häufigkeit des Porenvolumens und dem zugehörigen Radius gebildet.

Als Probematerial dienten bei 105°C getrocknete Plättchen von 10 mm Durchmesser.

Schon ein oberflächliches Betrachten der in der Abb. 19 dargestellten Häufigkeit des Porenvolumens vermittelt einen Eindruck von der Vielfalt der anzutreffenden Porensysteme. Zum Vergleich der Teilbilder untereinander ist es nützlich zu wissen, daß die Porenradienverteilung reiner Zementsteine in etwa dem Linienzug des Asbestzementes (Teilbild a) im Bereich der Radien kleiner als 10^2 nm entspricht. Die sich oberhalb von diesem Radius befindenden Anteile des Porenvolumens gehen somit auf die eingelagerten Fasern oder die speziellen Bedingungen der Herstellung zurück.

Sehr auffallend sind die sich in allen Teilbildern wiederfindenden Maxima der Häufigkeit des Porenvolumens beim Radius 10^3 nm . Ferner die Tatsache, daß beide Maxima beim autoklavierten Faserzement KD03F gegenüber den anderen Materialien deutlich zu den kleineren Radien hin verschoben sind. Auch der Vergleich zwischen den beiden gepreßten Faserzementen weist darauf hin, daß verschiedene Herstellungstechnologien zu unterschiedlichen Porensystemen führen können.

Nach der Radius-Gefrierpunktbeziehung der Kelvin-Gleichung [32] sollte das Wasser bei Temperaturen von -20°C in all jenen Poren gefrieren, deren Radien größer sind als etwa 10 nm. Welche Anteile des spez. Porenvolumens davon betroffen sein können, zeigt Abb. 20a. Es wird deutlich, daß zwischen dem Asbestzement M006A bzw. M007M und den ungepreßten Faserzementen (L002F, S004F) gewisse Ähnlichkeiten bestehen, wohingegen zwischen den Asbestzementen und den Faserzemen-

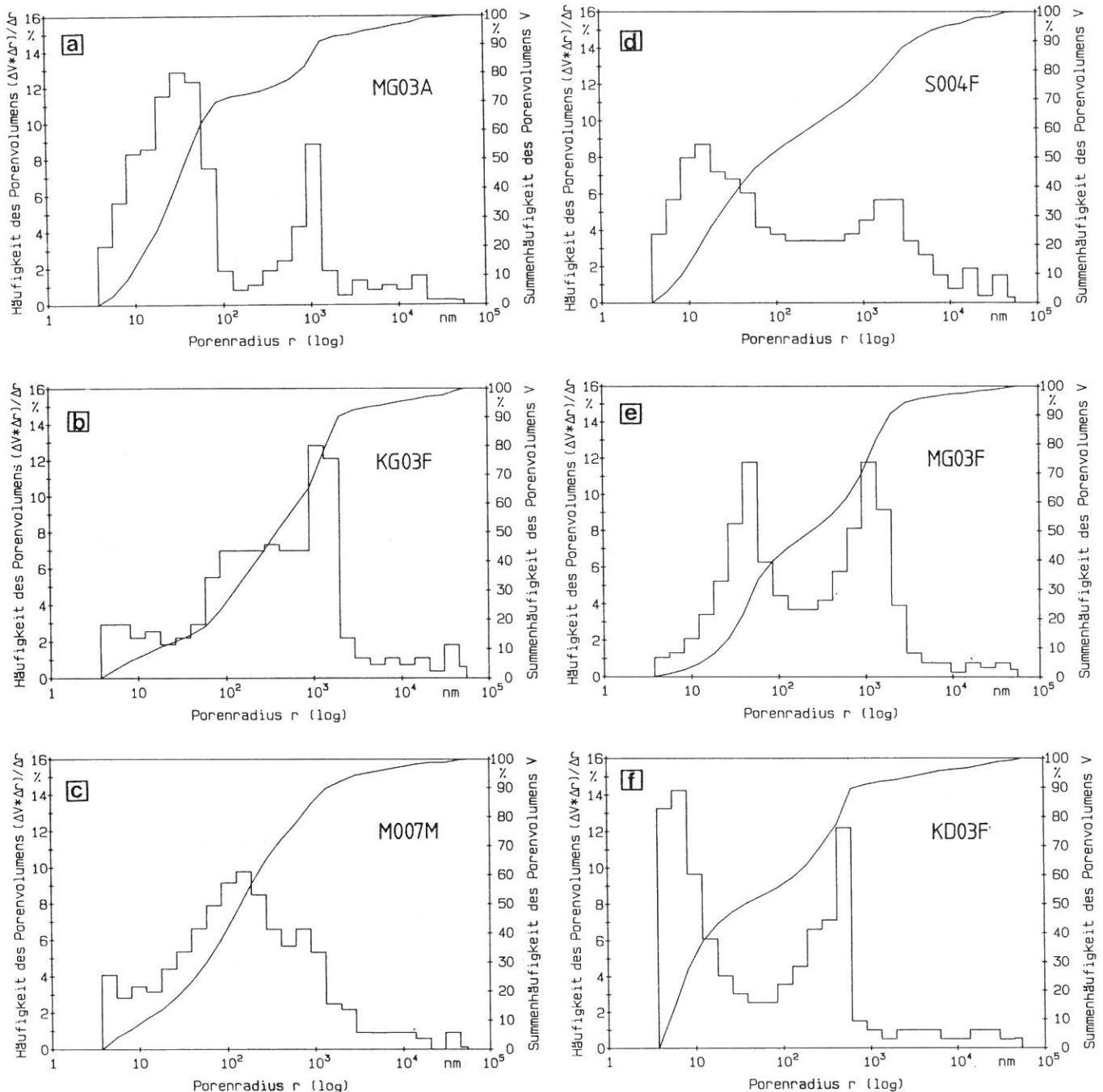


Abb. 19 a,b,c,d,e,f
 Porengrößenverteilung von 6 Materialien im Ausgangszustand (ermittelt durch Hg-Pososimetrie)

ten der gepreßten Art erhebliche Unterschiede vorzufinden sind. Unter den autoklavierten Faserzementen fällt die recht gleichmäßige Verteilung des spez. Porenvolumens beim Material KD03F auf, wobei der Balken 4 hiervon auszunehmen ist.

In der Tabelle 5 finden sich zahlenmäßige Angaben zum spez. Porenvolumen (s. auch Tab. 4 u. Abb. 14d) sowie dessen Zuordnung zu bestimmten Radiengruppen. Das niedrigste spez. Porenvolumen weist der gepreßte Faserzement KG03F auf, gefolgt vom Asbestzement MG03A und dem autoklavierten Faserzement KD03F. Das höchste spez. Porenvolumen findet sich beim Schornsteinmaterial M007M sowie bei den übrigen autoklavierten Faserzementen.

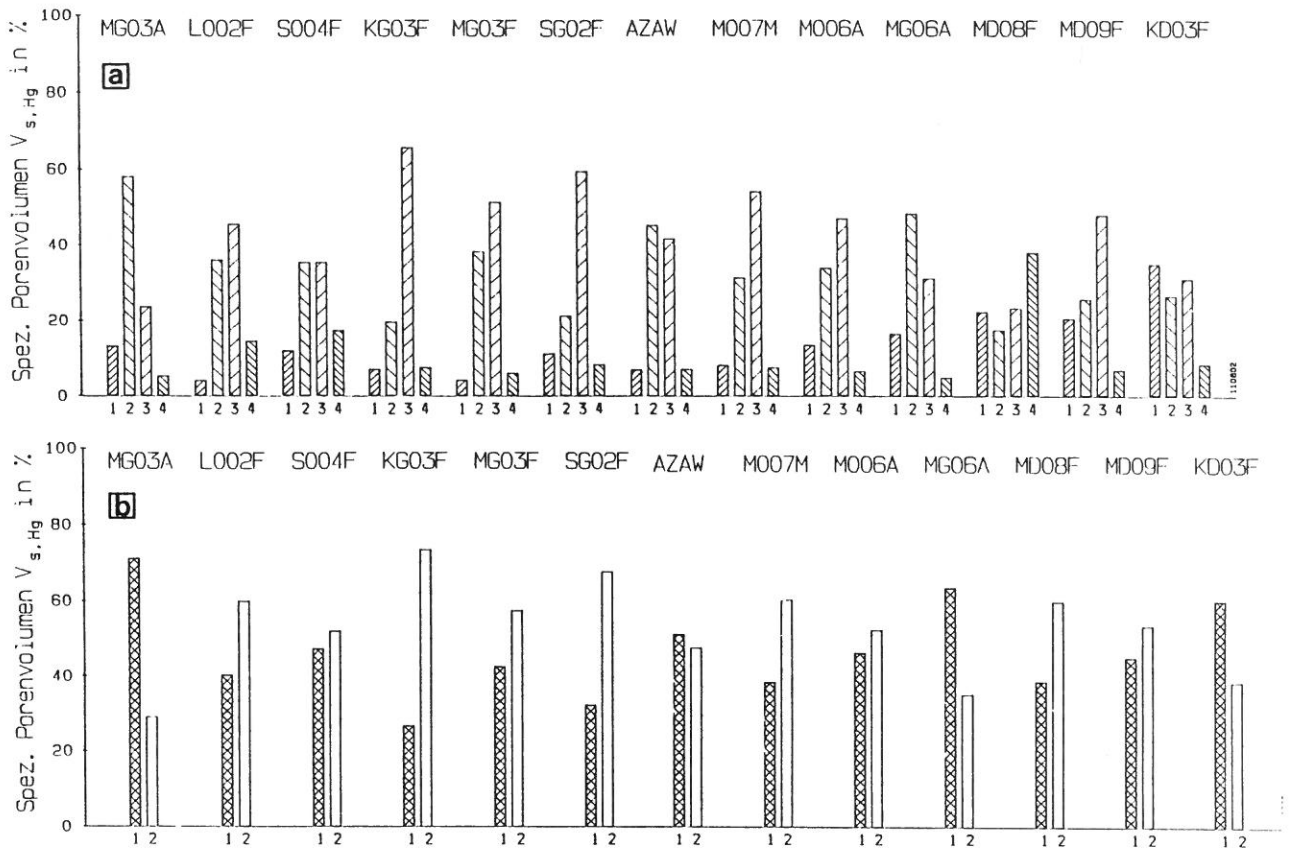


Abb. 20 a,b

Anteile des spez. Porenvolumens der Materialien im Ausgangszustand bei Einteilung in verschiedene Porenradienklassen (ermittelt durch Hg-Pososimetrie)

- a 1 = min. - 10 nm
 2 = 10 - 100 nm
 3 = 100 - 2500 nm
 4 = 2500 nm - max.

- b 1 = min. - 100 nm
 2 = 100 nm - max.

2.3.4 Luftdurchlässigkeit

Grundlage der Meßmethode ist die nach D'Arcy aus dem Hagen-Poiseuille'schen Gesetz abgeleitete Beziehung für die spez. Gasdurchlässigkeit D_s bei laminarer Strömung:

$$D_s = \eta \cdot \frac{h}{A \cdot \Delta p} \cdot \frac{V}{t} \quad , \quad (14)$$

wobei η die dynamische Viskosität, h die Probenhöhe, V das durchgeströmte Gasvolumen, A die Querschnittsfläche, t die Meßzeit und Δp die Druckdifferenz bedeuten. Angaben zu den physikalischen Grundlagen und zur Verfahrensweise finden sich z.B. in [33], [34], [35] und [36]. Die Untersuchungen sind an bei 105 °C getrockneten Proben durchgeführt worden, deren Durchmesser 50 mm und deren Höhe der Tafeldicke entsprachen. Die Luft durchströmte die Probe demnach senkrecht zur Plattenebene. Die Messungen fanden bei einer Druckdifferenz von etwa 0,5 bar statt, wobei die Temperatur der Luft 22 °C betrug. Durch Kontrollen wurde nachgewiesen, daß eine laminare Strömung auch tatsächlich vorlag.

Das Ergebnis wird in der Einheit Perm (Pm) angegeben. Ein poriger Körper hat die spez. Gasdurchlässigkeit von 1 Pm, wenn in 1 Sekunde 1 cm^3 eines Gases mit der dynamischen Viskosität von $0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ bei einem Druckunterschied von $0,1 \text{ N/m}^2$ durch einen Querschnitt von 1 cm^2 in senkrechter Richtung auf einer Länge von 1 cm hindurchströmt. In Tabelle 4 wird das Ergebnis als Billionstel (Piko, Kurzzeichen p) angegeben.

In Abb. 14 werden die der Tabelle 4 entnommenen Werte der spez. Luftdurchlässigkeit mit anderen porenraumbezogenen Parametern verglichen. Übereinstimmungen sind nur in wenigen Fällen feststellbar. Die Ursache ist darin zu sehen, daß mit der laminaren Strömung nur jene Poren erfaßt werden, deren Ausdehnung mindestens die mittlere freie Weglänge der Gasmolekeln ausmacht, was bei Verwendung von Luft als Gas Porenradien größer als 100 nm entspricht. Da aber ein beträchtlicher Teil des Gesamtporenvolumens der Zementsteinmatrix von Hohlräumen gebildet wird, deren Radien kleiner als 100 nm sind, dieser jedoch dem Wasser zugänglich ist, kann ein Zusammenhang zwischen der spez. Luftdurchlässigkeit einerseits und der Porosität sowie dem Wasseraufnahme-Koeffizienten andererseits nicht erwartet werden. Dies gilt sinngemäß für die Rohdichte und dem vom Hg-Druckporosimeter ermittelten spez. Porenvolumen.

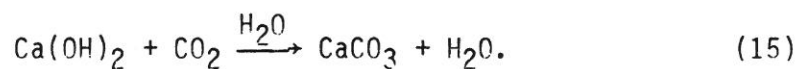
In Abb. 14e ist die sehr niedrige spez. Luftpermeabilität des autoklavierten Materials KD03F auffallend, die sogar niedriger ist als die des Asbestzementes MG03A. Ferner der etwa gleiche Wert des ungepreßten Faserzementes L002F und des gepreßten Faserzementes MG03F, der in etwa den Werten der übrigen beiden autoklavierten Faserzemente entspricht. Die niedrigste spez. Luftdurchlässigkeit liegt jedoch bei der ungepreßten "Alten Wellplatte" vor. Dies ist ein Hinweis darauf, daß im Laufe der Zeit die von der Luft durchströmbare Porosität nahezu vollständig abgebaut wird.

Gefügezerrüttungen, die hauptsächlich von Ribbildungen oder massiven Vergrößerungen der Porosität gekennzeichnet sind, werden im allgemeinen durch eine Erhöhung der spez. Luftdurchlässigkeit gegenüber den Ausgangswerten angezeigt. Eine solche Entwicklung ist jedoch auch an nachweislich durch Trocken-Naß-Wechsel oder Frost-Tau-Wechsel zerstörten Proben nicht festgestellt worden. Eine Erklärung findet sich in den speziellen Versagensumständen der Asbest- und Faserzemente, die in Abschnitt 4 erläutert sind. Demnach sind die Gefügeschäden, auch eventuelle Beeinträchtigungen des Verbundes zwischen den Fasern und der Matrix, flächenhaft parallel zur Plattenebene angeordnet. Solche Veränderungen lassen sich von der senkrecht dazu verlaufenden Luftströmung nicht erfassen. Daher wurde im weiteren Verlauf auf die Kennzeichnung von Gefügeveränderungen mittels der spez. Luftdurchlässigkeit verzichtet.

2.4 Eigenschaften nach künstlicher Hydratisierung und Carbonatisierung

Bei der Reaktion des Zementes mit Wasser entstehen durch Hydratation und Gelbildung Produkte, die allmählich ineinander wachsen und das Feststoffgerüst bilden. Dieser Prozeß ist unter anderem von der Zeit und dem jeweiligen Wasserangebot abhängig. Nach und nach werden die ursprünglichen Hohlräume des Feststoffgerüsts von neu entstehenden Produkten gefüllt, wobei die Durchlässigkeit des Zementsteingefüges gegenüber Gasen und Flüssigkeiten geringer und seine Festigkeit gesteigert wird. Um diesen Prozeß bei den zu untersuchenden Materialien zu beschleunigen, sind die Proben 8 bzw. 12 Monate lang unter Wasser bei etwa 20 °C gelagert worden. Das Ziel dieser Behandlung bestand darin, in etwa den Rahmen abzustecken, in dem sich die Materialeigenschaften infolge der Hydratation verändern können.

Eine weitere Veränderung der Gefügeeigenschaften durch chemische Umwandlungen erfahren zementgebundene Werkstoffe bei einem Vorgang, der Carbonatisierung genannt wird. Hierbei reagiert im wesentlichen das bei der Hydratation der Zementklinkerphasen gebildete Calciumhydroxid mit dem Kohlendioxid der Luft zu Calciumcarbonat nach der Formel [39]



Dieser Prozeß läuft unter normalen atmosphärischen Bedingungen nur sehr langsam ab (der CO₂-Gehalt der Luft beträgt nur ca. 0,03 Vol.-%). Eine Beschleunigung des Vorganges kann über eine höhere Kohlendioxid-Konzentration und eine geeignete Luftfeuchtigkeit erreicht werden. Im vorliegenden Falle sind die Proben 10 Monate lang in einer Bewitterungskammer [55] nach Kesternich (Abb. 21) in Luft mit einem CO₂-Gehalt von ca. 8 Vol.-% und einer rel. Luftfeuchtigkeit von 75 % bei 22 °C gelagert worden. Bei welchen Proben diese beiden künstlichen Behandlungsarten angewendet worden sind, geht aus den Tabellen 2, 3 und den Abb. 1 bis 4 hervor; vgl. auch Abschnitt 2.1.4.

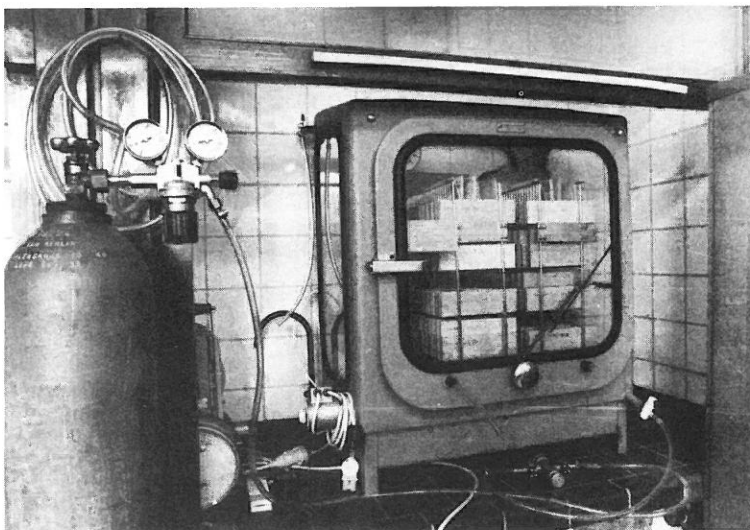


Abb. 21
Bewitterungskammer zur künstlichen Carbonatisierung
(Gerät nach Kesternich)

Es liegt eine Reihe von Veröffentlichungen vor, die sich mit der Carbonatisierung zementgebundener Baustoffe befassen, z.B. [37], [38], [39], [40], [41], [42] und [43]. Die mit diesem chemischen Vorgang einhergehenden Gefügeveränderungen und die dabei gebildeten Produkte werden in [44], [45], [46], [47] und [48] behandelt. Viele Angaben insbesondere zur künstlichen Carbonatisierung finden sich in [49]. Eine sehr eingehende Behandlung des Carbonatisierungsprozesses bieten die Dissertationen [50] und [51] sowie [52] und [53]. Über die Carbonatisierung von Faserzement liegen kaum Veröffentlichungen vor. Lediglich die ISO-Studie [54] geht auf die Dimensionsänderung bei Cellulose-Asbestzementen als Folge der chemischen Reaktion ein.

Wird die Aufhebung des Korrosionsschutzes im Stahlbeton aufgrund des sinkenden pH-Wertes hier außer Betracht gelassen, dann ergibt die Auswertung der Literatur folgende Schlüsse im Hinblick auf die Eigenschaftsveränderung der Zementsteinmatrix durch die Carbonatisierung:

- die Festigkeit und ebenso der Elastizitätsmodul steigen an,
- das Material verkürzt sich,
- das Porenvolumen wird reduziert und der Feststoffanteil erhöht sich,
- die Porengrößenverteilung verändert sich, was im allgemeinen eine Herabsetzung der spezifischen Oberfläche nach sich zieht, so daß eine Vergröberung des Gefüges anzunehmen ist,
- Transportvorgänge im Porensystem werden behindert. Nach den Ergebnissen von Kropp [52] ist diese Behinderung weniger auf eine Reduktion der Gesamtporosität zurückzuführen als auf eine selektive Ablagerung von Carbonaten in Poren unterschiedlicher Größe, die von den Feuchtigkeitsverhältnissen in der Matrix abhängig ist.

Bei der durchgeführten künstlichen Carbonatisierung wurde der Fortschritt der chemischen Umwandlung qualitativ mit dem Besprühen von Bruchflächen mit einer Phenolphthalein-Lösung und quantitativ mittels der "Coulometrischen Titration" zur CO_2 -Bestimmung verfolgt. Diese Bestimmung konnte sinnvollerweise nur am Asbestzement durchgeführt werden, weil die organischen Fasern der Faserzemente das Ergebnis verfälschen würden. Nach der 10-monatigen künstlichen Carbonatisierung wurde für den Asbestzement MG03A ein CO_2 -Gehalt von ca. 12,5 Masse-% und dementsprechend ein CaCO_3 -Gehalt von ca. 5,5 Masse-% gemessen.

Die thermogravimetrische Untersuchung (TG) von 4 Materialien nach beendeter Carbonatisierung ergab 3,5 M.-% CaCO_3 für MG03A; dieses Material schien über-

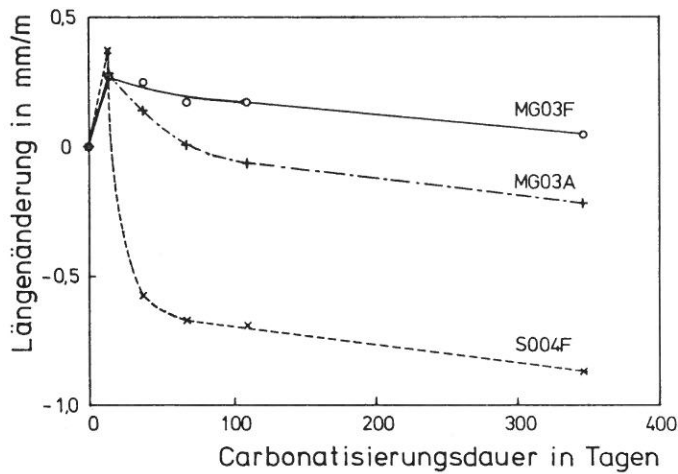


Abb. 22
Längenänderung bei der künstlichen Carbonatisierung

hauptsächlich am meisten durchcarbonatisiert zu sein, gefolgt von S004F und MG03F. Die geringste Zunahme zeigte L002F.

Insgesamt war die Carbonatisierung nach 10 Monaten sicherlich nicht beendet, jedoch soweit fortgeschritten, daß ein verändertes Zementsteingefüge vorlag und die sich daraus ergebenden veränderten Materialeigenschaften studiert werden konnten, wie die nun folgende Besprechung und jene in den Abschnitten 4.1.1 und 4.2.1 zeigen werden.

Abb. 22 zeigt die Längenänderung von 3 Materialien in Abhängigkeit von der Carbonatisierungsdauer. Der Zeitpunkt 0 entspricht dem luftgelagerten Ausgangszustand; die anfängliche Dehnung der Proben geht auf die Feuchtigkeitsaufnahme in der Bewitterungskammer zurück. Die sich anschließende Verkürzung der Proben ist eine Folge der Carbonatisierung, da in der Kammer eine konstante Feuchte herrscht. Die maximale Verkürzung beträgt bei ungepreßtem S004F etwa 1,2 ‰, bei Asbestzement MG03A etwa 0,5 ‰ und ist bei MG03F am geringsten. Die Verkürzungen sind also relativ gering - ein positives Ergebnis für die Materialien.

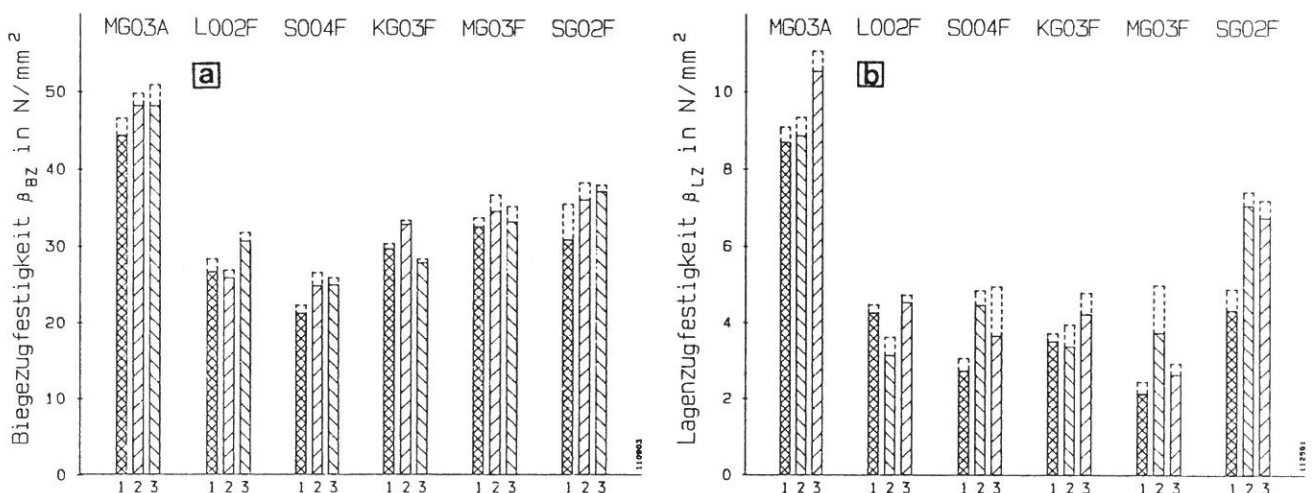


Abb. 23 a,b
Biegezug- (a) und Lagenzugfestigkeit (b) bei jungem (Balken 1), hydratisiertem (Balken 2) und carbonatisiertem (Balken 3) Material
Vor dem Versuch bei 50°C getrocknet

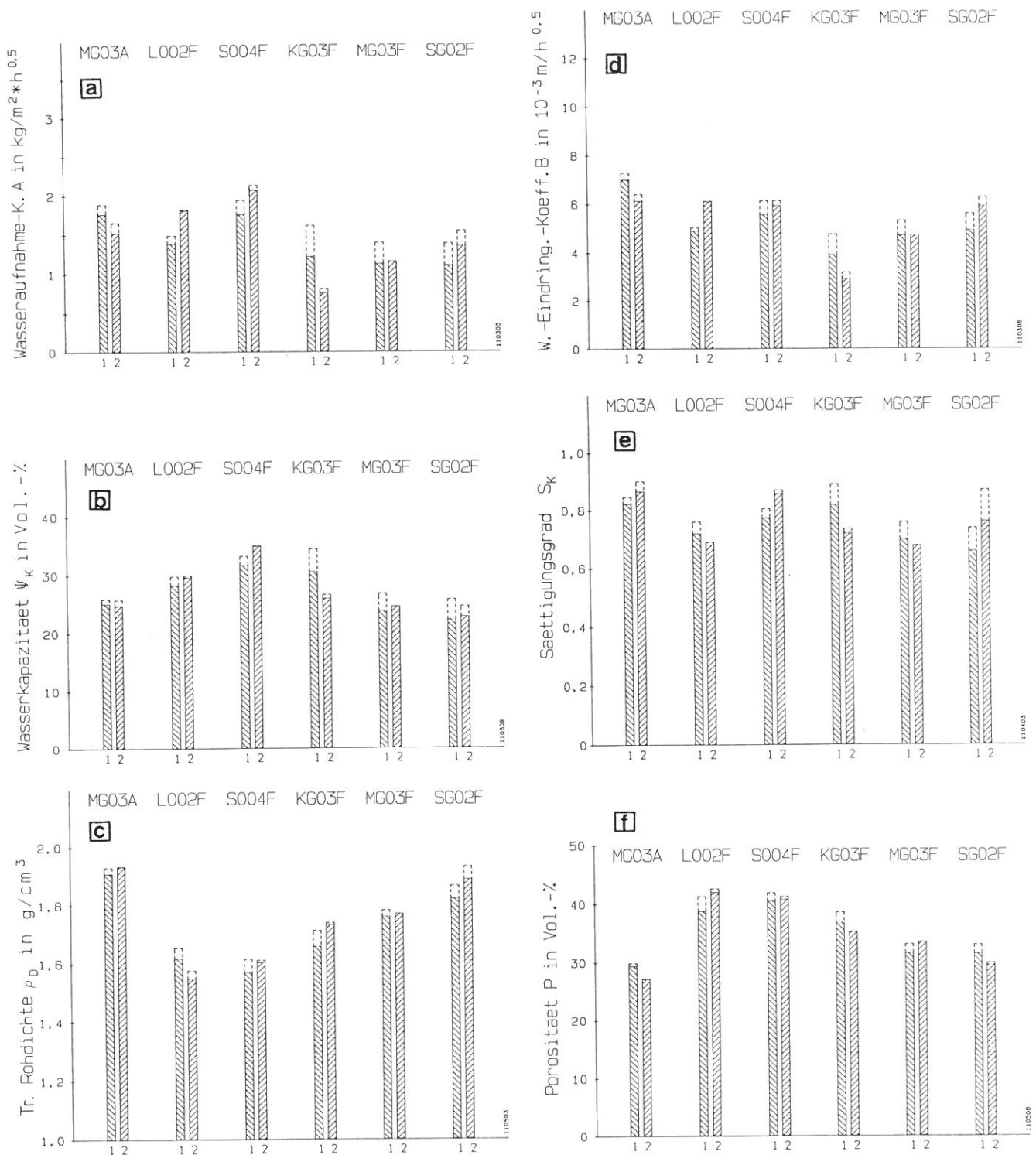


Abb. 24 a,b,c,d,e,f

Änderung der Kennwerte der kapillaren Wasseraufnahme, der Porosität und der Trocken-Rohdichte nach Hydratisierung der Materialien (Serie GEH, Balken 2) im Vergleich zum Material ohne Behandlung (Serie GE, Balken 1)

Abb. 23 zeigt die Biegezug- und Lagenzugfestigkeit von jungem, hydratisiertem und carbonatisiertem Material im Vergleich. Es überrascht nicht, daß die Werte nach der Hydratisierung und Carbonatisierung im allgemeinen ansteigen, wenn auch im unterschiedlichen Maße. Eine Ausnahme machen die Materialien KG03F und L002F, die auch geringfügige Abnahmen aufweisen. Eine Bestätigung dieses Trends könnte aber nur eine größere Anzahl von Proben liefern.

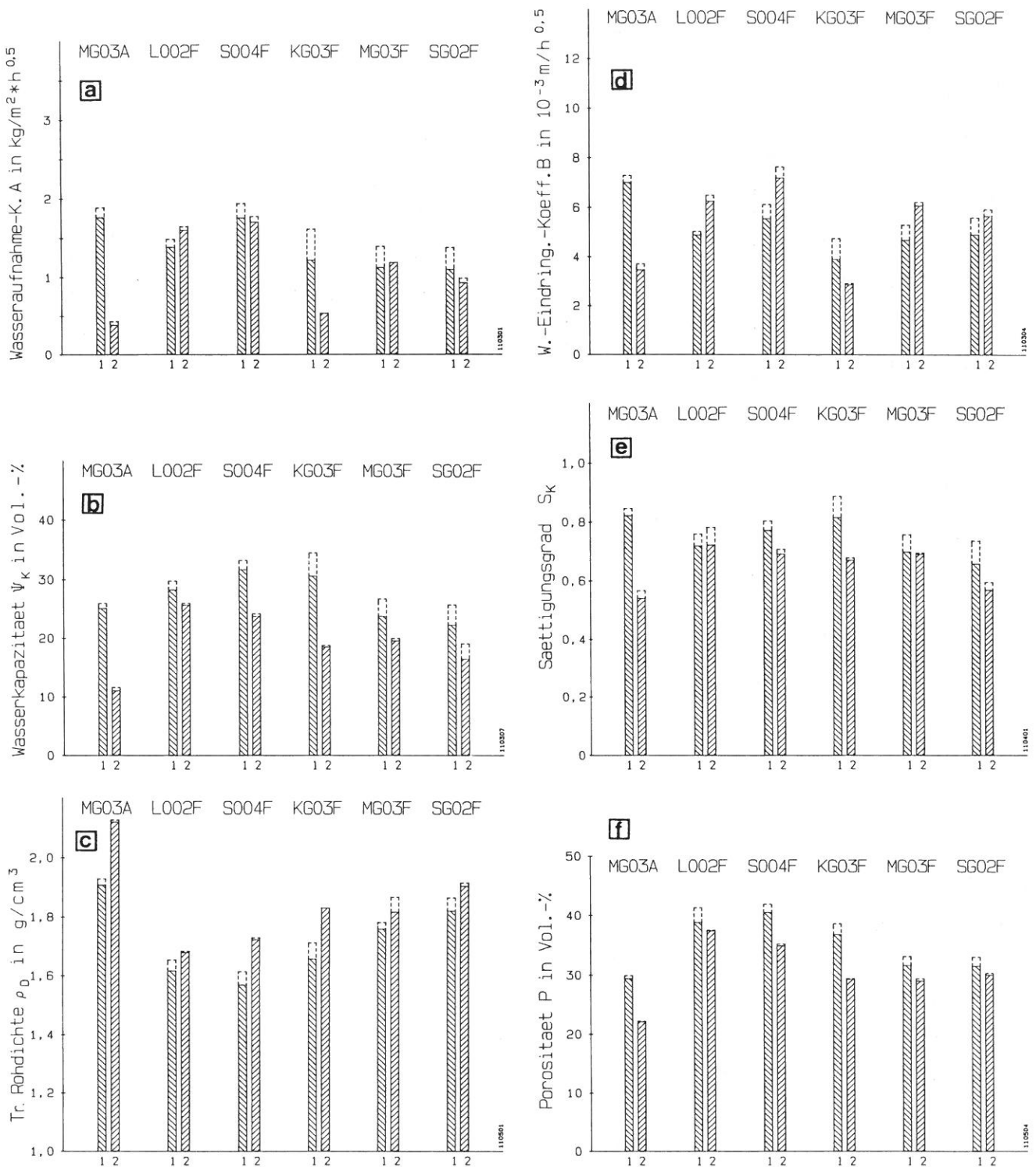


Abb. 25 a,b,c,d,e,f

Änderung der Kennwerte der kapillaren Wasseraufnahme, der Porosität und der Trocken-Rohdichte nach Carbonatisierung der Materialien (Serie GEC, Balken 2) im Vergleich zum Material ohne Behandlung (Serie GE, Balken 1)

Die Ergebnisse der Versuche zur kapillaren Wasseraufnahme liefern für nur "hydratisiertes" Material kein einheitliches Bild (Abb. 24). Dies gilt auch für die Rohdichte und Porosität. Insgesamt sind die Unterschiede zwischen jungen und künstlich hydratisierten Proben nicht groß. Anders jedoch in Abb. 25: Die Carbonatisierung bewirkt bei allen 6 Materialien eine Reduzierung der Porosität und einen Anstieg der Trockenrohichte, am meisten bei MG03A und KG03F. Das Saug-

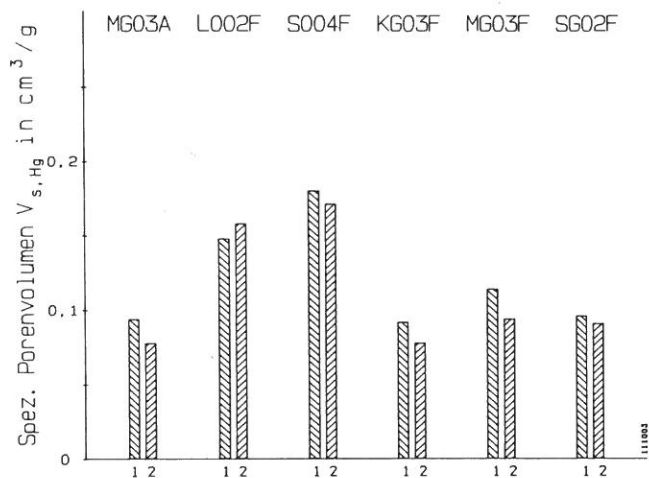


Abb. 26
 Änderung des spez. Porenvolumens (ermittelt durch Hg- porosimetrie) nach Hydratisierung der Materialien (Serie GEH, Balken 2) im Vergleich zum Material ohne Behandlung (Serie GE, Balken 1)

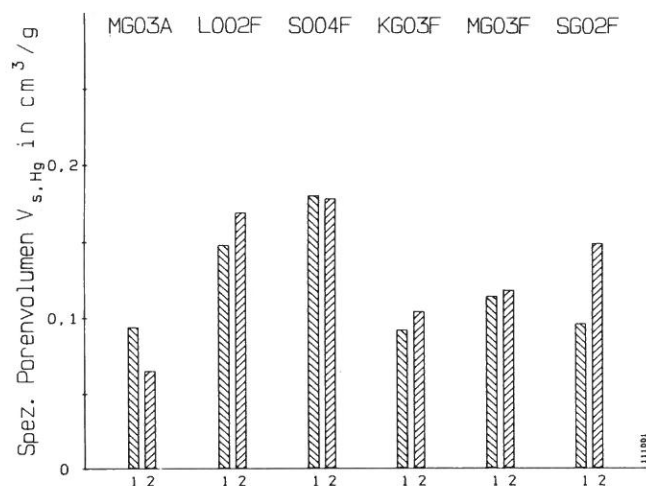


Abb. 27
 Änderung des spez. Porenvolumens (ermittelt durch Hg- porosimetrie) nach Carbonatisierung der Materialien (Serie GEC, Balken 2) im Vergleich zum Material ohne Behandlung (Serie GE, Balken 1)

vermögen wird zum Teil erheblich behindert, was sich vor allem den Werten für die Wasserkapazität und für den Sättigungsgrad S_K entnehmen läßt. Bei den übrigen Parametern finden sich sowohl Zunahmen als auch Abnahmen. Diese Ergebnisse decken sich in etwa mit jenen, die in der Literatur vorgefunden worden sind. Die Messungen mit dem Hg-Druckporosimeter, deren Ergebnisse in den Abb. 26 und 27 dargestellt sind, ergeben nach der Hydratation in einem Falle und nach der Carbonatisierung in vier Fällen einen Anstieg des spezifischen Porenvolumens. Dies ist nicht ganz verständlich. Es ist anzunehmen, daß diese Einzelwerte innerhalb der allgemeinen Streuung der Ergebnisse bei einer größeren Anzahl von Proben gelegen hätten.

3 Zur Wechselbeziehung zwischen dem Porensystem, der Feuchtigkeit, Temperatur und Gefügebeanspruchung sowie zu deren Erfassung

Bei der Beschreibung der für die Beständigkeit maßgebenden Eigenschaften des Faserzements spielt ebenso wie beim Asbestzement seine Anisotropie eine wichtige Rolle. Bedingt durch das Fertigungsverfahren [10], [56] lagert sich der überwiegende Teil der in der Wickelschicht vorhandenen Fasern gemäß dem Drehsinn der Formwalze ab. Der Rest findet sich in der Schichtebene anders ausgerichtet. Eine Anordnung parallel zum Radius der Formwalze läßt sich im Herstellungsprozeß nicht verwirklichen. Damit ist die Richtung senkrecht zur Plattenebene festigkeitsmäßig benachteiligt, denn der bewehrende Einfluß der Fasern fehlt hier. Ferner muß eine nicht spezifische Struktur der Verbundzone der Wickelschichten unterstellt werden.

Desweiteren sind, wie bei allen Mehrstoffsystemen, auch die aus der Inhomogenität resultierenden Besonderheiten zu berücksichtigen. Die Eigenschaften solcher Systeme ergeben sich aus dem Zusammenwirken und den stofflichen Merkmalen der beteiligten Komponenten. Insbesondere leiten sich hiervon die materialspezifischen Einflußgrößen beim Versagen ab. Bei Faserzement kommen als Ursachen demnach Beeinträchtigungen der Matrix, der Fasern, des Verbundes der Wickelschichten untereinander oder zwischen Fasern und Matrix sowie deren beliebige Kombination in Frage.

Wird eine Wertung der genannten Komplexe vorgenommen und dabei unterstellt, daß die verwendeten Fasern im Medium Zementstein ausreichend beständig sind, dann sind massive Festigkeitseinbußen vor allem von der Matrix selbst aber auch von ihrem Faser- bzw. Lagenverbund zu erwarten.

Obwohl es bei der Nutzung von Faserzement-Tafeln in erster Linie auf die Biegezugfestigkeit ankommt, spielt der Lagenverbund, gekennzeichnet durch die Querszugfestigkeit, für den Schadensmechanismus eine wichtige Rolle. Erweisen sich Materialien dieser Art gegenüber Witterungseinflüssen als nicht ausreichend widerstandsfähig, dann können häufig im Kantenbereich Aufblätterungen der Lagen beobachtet werden. Fließt an solchen Kanten Wasser ab, dann wird es durch die kapillare Saugkraft der Spalte rasch in den inneren Bereich der Tafel transportiert, wo es eine Steigerung der Werkstoffbeanspruchung vor allem bei Frost bewirkt. Darüber hinaus lassen Lagentrennungen an den Schnittflächen häufige und intensive Wechsel zwischen den Zuständen "trocken" und "feucht" zu, was zur bevorzugten Ablagerung von Verunreinigungen im Kantenbereich der Tafeln führt. Die Biegefestigkeit selbst kann durch eine Minderung der Querszugfestigkeit je-

doch erst dann beeinträchtigt werden, wenn die Schubspannungen im Plattenquerschnitt nicht mehr aufgenommen werden können. Die Tragfähigkeit der Tafel wird im Extremfall um den Faktor $\frac{1}{n}$ reduziert, wenn der Verbund der n Schichten aufgehoben ist.

Einen weiteren Schwerpunkt im Problemkreis "Verbund" bildet bei Mehrstoffsystemen der Kraftschluß zwischen der Matrix und jenen Komponenten, die zur Verbesserung ihrer Eigenschaften eingelagert sind. Im Falle der Faserzemente sind es Beeinträchtigungen des Verbundes infolge physikalischer Beanspruchung oder chemischer Veränderung. Wird davon ausgegangen, daß die Fasern vor einem direkten Angriff von Gasen, Flüssigkeiten und Strahlung durch die Matrix geschützt sind, dann bleibt in diesem Komplex als wichtigster Parameter das unterschiedliche Verformungsverhalten der Bestandteile infolge Temperatur- und Feuchtigkeitsänderung übrig.

Am schwerwiegendsten werden Mehrstoffsysteme in ihrem Festigkeitsverhalten beeinträchtigt, wenn ihre Matrix einem Zerrüttungsprozeß unterliegt. Hierbei kann es sich um einen chemischen Angriff auf das Bindemittel, um dynamische Wechsel infolge äußerer Kraft oder aber um innere, thermisch-hygrisch bedingte Beanspruchungen handeln. Die Beantwortung der mit dem zuletzt genannten Komplex verbundenen Fragen ist das vorrangige Ziel dieser Untersuchungen.

Die Matrix besteht bei normal erhärtetem Material hauptsächlich aus Zementstein, der im wesentlichen von den bei der Reaktion des Zementes mit Wasser entstehenden Hydratationsprodukten gebildet wird [57], [58]. Aus diesen Teilchen kolloidaler Größe entsteht ein hochporöses Xerogel, das mehr oder weniger von Kapillaren durchsetzt ist. Die Hohlräume des Gels werden mit einem mittleren Radius von 1,5 nm angegeben. Sie bilden eine innere Oberfläche, die, mit der Wasserdampfsorption bestimmt, Werte von mehr als 150 m²/g Substanz annimmt [59], [60].

Eine direkte Beobachtung der Gelpartikel ist nicht möglich bzw. außerordentlich schwierig, so daß es zweckmäßig erscheint, jene Vorgänge, die beim Befüllen und Entleeren des Porensystems oder bei der Unterkühlung und Aggregatzustandsänderung der Porenflüssigkeit zur Beanspruchung des Feststoffgerüsts führen, anhand eines Modells verständlich zu machen.

Unter den zahlreichen Zementsteinmodellen ist das von Setzer [61] und Wittmann [62] entwickelte sogenannte "Münchner Modell" besonders geeignet, weil es auf Annahmen über den strukturellen Aufbau der Gelpartikel verzichtet. Die Eigenschaften des Zementsteines werden hier durch thermodynamische Ansätze erklärt

und quantifiziert. Demnach sind die einzelnen Gelpartikel im trockenen Zementstein [52]

"großen Oberflächenkräften ausgesetzt, die zu einer hydrostatischen Druckbeanspruchung führen; die Partikel werden entsprechend ihrer elastischen Eigenschaften komprimiert.

Durch die Adsorption von Wasserfilmen auf der Oberfläche der Partikel wird der hydrostatische Druck auf die Gelpartikel reduziert, was eine Volumenvergrößerung bewirkt. Gleichzeitig führen adsorbierte Wasserfilme zu einer Abminderung der zwischen den Gelteilchen wirkenden Van der Waals-Kräfte. Dadurch wird die sekundäre Bindung der Teilchen geschwächt. Dieser Mechanismus beeinflusst die Eigenschaften der Zementsteinmatrix im Bereich 0 - 40 % rel. Luftfeuchte.

Bei höherem Feuchtegehalt (> 60 % rel. Luftfeuchte) kann der Spaltdruck von adsorbierten Wasserfilmen größer werden, als die Van der Waals-Kräfte. Dadurch werden die Gelpartikel, die nicht durch chemische Bindungen miteinander verkittet sind, auseinander getrieben."

Diesen Vorstellungen folgend, muß davon ausgegangen werden, daß jene Kräfte, die das Feststoffgerüst zusammenhalten und damit für die Gefügefestigkeit verantwortlich sind, im trockenen Zustand am größten sind [12]. In realen Systemen werden sie in unterschiedlichem Maße abgebaut, denn das in den Poren vorhandene Wasser hat wie ein innerer Druck das Bestreben, die Partikel auseinander zu treiben. Bei gleichbleibenden thermisch-hygrischen Verhältnissen stellt sich zwischen den Bindungskräften und dem inneren Druck ein Gleichgewicht ein. Wird dieses durch äußere Kräfte oder thermodynamische Vorgänge im Porensystem gestört, dann werden die Partikel des Feststoffgerüsts gezwungen, sich hinsichtlich ihrer Gestalt und Lage den neuen energetischen Verhältnissen anzupassen, was im makroskopischen Bereich Verformungen zur Folge hat [62]. Auf diesem Hintergrund muß sowohl die Verformung infolge äußerer als auch innerer Kraft als ein Zeichen der Werkstoffbeanspruchung angesehen werden. Da die von der inneren Kraftentfaltung infolge Temperaturänderungen verursachten, sich der normalgerichteten thermischen Dilatation trockenen Materials überlagernden Expansionen den schon ohnehin vorhandenen, vom Porenwasser bewirkten destruktiven Spannungszustand des Gefüges intensivieren, werden sie allgemein negativ bewertet [15]. Dagegen deuten Kontraktionen auf den Abbau der destruktiven Kräfte hin. Da es wahrscheinlich ist, daß die Verformungen und Verschiebungen der Partikel auch bei Kontraktionen nicht maßstäblich sind, gehen auch mit ihnen Beanspruchungen des Feststoffgerüsts einher, jedoch zeigt die Erfahrung, daß

diese dem Werkstoff bei weitem nicht einen solchen Schaden zufügen können wie Expansionen.

Die im Xerogel dispergierte Flüssigkeit weist verschiedene Anomalien [32] auf. Insbesondere läßt sie sich wegen der strukturierenden Wirkung der oft nur wenige Molekülgrößen voneinander entfernten Partikeloberflächen und den daraus resultierenden starken Bindungskräften auf sehr tiefe Temperaturen unterkühlen. Liegen in den größeren Poren bereits Eiskristalite vor, dann streben die auf engstem Raum vorliegenden unterschiedlichen Wassermodifikationen energetische Verhältnisse an, unter denen ihre Existenz möglich ist. Hierbei kommt es zum Aufbau beachtlicher innerer Kraftfelder [61].

Gegenüber diesen Mechanismen stellt sich das Verhalten der Flüssigkeit in den größeren Poren eher trivial dar. Die Wechselwirkung mit der inneren Oberfläche liefert hier keine nennenswerten Beiträge, so daß die Werkstoffbeanspruchung im wesentlichen von Volumeneffekten des gefrierenden Wassers ausgeht.

Im Hintergrund all dieser Überlegungen steht immer die Geometrie des Porensystems, denn von dieser hängen im wesentlichen die Eigenschaften der Wasseraufnahme und -abgabe sowie das Gefrierverhalten der Porenflüssigkeit ab. Dies im Blickfeld, können unter Berücksichtigung des Umstandes, daß die Beanspruchung im Temperaturbereich oberhalb des Gefrierpunktes von der Änderung der Quantität der flüssigen Phase in den Kleinstporen und im Frost von Volumeneffekten bei der Änderung des Aggregatzustandes sowie den Existenzbedingungen der vorhandenen Wassermodifikationen getragen wird, die auf das Feststoffgerüst wirkenden inneren Kräfte in zwei Gruppen eingeteilt werden: Zum einen in jene, bei der sich die Beanspruchung aus dem Entleeren und Befüllen des Porensystems oberhalb von 0 °C ergibt, und zum anderen in jene, in der sie von der Temperatur im Frost und dem Feuchtigkeitszustand geprägt wird.

Die sich aus den geschilderten Beanspruchungen physikalischer Art ergebende Gefügeveränderung zu erfassen, ist keine leichte Aufgabe, denn es fehlt hier an direkten Nachweismethoden. Die zur Verfügung stehenden indirekten Verfahren wie die Messung der Sorption, der Permeabilität, der kapillaren Wasseraufnahme sowie die Bestimmung des Gesamtporenraumes oder gar der Porenradienverteilung mit dem Hg-Druckporosimeter liefern nur bedingt verwertbare Ergebnisse. Dies gilt auch für Verfahren wie z.B. die Bestimmung der Resonanzfrequenz oder der Schallaufzeit. Dennoch liefert die Anwendung aller dieser Methoden Mosaiksteine, mit denen das Bild des Gefügestandes sicherer zusammengesetzt werden kann.

Angesichts dieser doch insgesamt unbefriedigenden Lage hinsichtlich der verfahrensmäßigen Möglichkeiten zur Erfassung der Veränderungen der Matrix bleibt nur

übrig, die wesentlichen Fragen zur Beständigkeit anhand der äußerlich meßbaren Wirkung der thermodynamischen Tätigkeit im Porensystem zu beantworten [63]. Hierbei ist als das effektivste Mittel die Dilatometrie anzusehen. Die kontinuierliche Erfassung der Temperatur und Verformung bei definierten Feuchtigkeitszuständen des Materials liefert nicht nur ein breites Spektrum von Informationen zum Verhalten des Wassers in dispersen Systemen, sondern auch zur realen Beanspruchung des Feststoffgerüsts.

Bei der Verwertung der Ergebnisse der Längenänderungsmessung muß die Anisotropie des Faserzementes Berücksichtigung finden. Aus bereits erwähnten Gründen werden Messungen in Herstellrichtung bzw. senkrecht dazu im wesentlichen die Kraftwirkung entlang der Fasern der zweidimensional bewehrten Wickelschicht beschreiben. Dagegen sind von der Erfassung der Längenänderung orthogonal zur Plattenebene Beiträge zum Verhalten der nicht bewehrten Richtung und der nicht spezifischen Kontaktzone der Wickelschichten zu erwarten.

So wünschenswert die Erfassung des Dilatationsverhaltens infolge innerer Beanspruchung senkrecht zur Plattenebene ist, so schwierig ist auch die versuchstechnische Gestaltung. Die geringe Dicke der Faserzement-Tafeln erfordert eine hohe Meßgenauigkeit und das geringe Volumen der Proben große Sorgfalt bei der Einstellung definierter Feuchtigkeitszustände, deren Kenntnis für die Herstellung des Zusammenhanges zwischen der Beanspruchung im Versuch und jener unter baupraktischen Bedingungen erforderlich ist.

Dennoch sind solche Versuche notwendig, denn nur über eine die 3 Koordinatenrichtungen erfassende Verformungsmessung kann ein vollständiges Bild von der Kraftentfaltung im Gefüge der Faserzemente erhalten werden. Auf dieser Grundlage sollte es dann aber auch möglich sein, zielgerichtet ein Verfahren zur Ermittlung des Widerstandes gegenüber physikalischen Witterungseinflüssen zu erarbeiten.

4 Ergebnisse der Beständigkeitsuntersuchungen

4.1 Beanspruchung durch das Entleeren und Befüllen des Porenraumes; Grundlagen und Methodik

Die Entleerung des Porenraumes beginnt in den größeren Kapillaren und erfaßt allmählich auch die kleineren, so daß sich die Menisken nach und nach zu diesen zurückziehen, bis sie in den Hohlräumen des Gels Krümmungsradien kleinster Dimensionen gebildet haben. Der hiermit einhergehenden Steigerung des kapillaren Unterdrucks überlagert sich die von den immer dünner werdenden adsorbierten Wasserfilmen aktivierte und rasch zunehmende Oberflächenkraft des Feststoffgerüsts. Die Folge dieser Kraftwirkungen sind Gefügekонтaktionen, deren Beträge dort überproportional ansteigen, wo die Oberflächenenergie im Endstadium des Trocknungsvorganges ihren Maximalwert erreicht. Obwohl in diesem Zustand jene Kräfte, die das Gefüge zusammenhalten, wohl am größten sind, darf nicht übersehen werden, daß dieser die Partikel im einzelnen und das Feststoffgerüst als ganzes komprimierender Druck zugleich eine Beanspruchung darstellt.

Beim Füllen des Hohlraumsystems kehren sich die Verhältnisse um. Mit fortschreitender Befeuchtung werden die "Zusammenhangs"-Kräfte abgebaut und allmählich nehmen im Innern die Spaltkräfte zu, was insgesamt eine Expansion des Gefüges nach sich zieht. Die destruktive Wirkung des Wassers führt in nahezu vollständig gefüllten Systemen zum deutlichen Abfall der Gefügefestigkeit gegenüber dem trockenen Zustand. Dieser Umstand stellt zwar die Integrität des Werkstoffs noch nicht in Frage, jedoch wird die Belastbarkeit durch äußere, gleichgerichtete Kräfte erheblich reduziert.

Die hier durchgeführten Trocken-Naß-Wechsel sollten zeigen, ob der sich infolge Wasseraufnahme aufbauende Spaltdruck [64] bzw. ob die beim Entleeren des Porensystems nach und nach aktivierte und das Feststoffgerüst komprimierende Oberflächenkraft [65] zu Gefügeveränderungen oder bedeutenden Festigkeitsminderungen führen. Ferner sollte ermittelt werden, welche Verformungen infolge solcher Wechsel zu erwarten sind, bzw. wie sich die Wasseraufnahmewilligkeit der Materialien verändert.

Um die Wirkungen beider Beanspruchungsarten getrennt zu erfassen, wurden zwei unterschiedliche Wechsellagerungen durchgeführt (siehe Behandlungsablauf der Abb. 4a, b). In einem Fall verweilten die Proben jeweils etwa eine Woche lang in Luft bei 50 °C und anschließend mindestens 3 Wochen lang unter Wasser bei atm. Druck und 20 °C. Hierbei sollte einerseits das Wasser aus den Feinstporen nicht vollständig entfernt werden, andererseits sollte sich das Material während der

Wasserlagerung weitgehend sättigen (Serie 50°C-Tr./NAT). Im anderen Fall kam es darauf an, das adsorptiv stark gebundene Wasser des Gelporenraumes restlos zu entfernen bzw. anschließend das Hohlraumssystem nur teilweise mit Wasser zu füllen. Dies wurde durch eine dreitägige Trocknung bei 105 °C und eine mindestens dreiwöchige Lagerung in gesättigtem Wasserdampf bei 20 °C erreicht (Serie 105°C-Tr./97%r.F.).

Die Wechsellagerungen erfolgten an jungem und an carbonatisiertem Material. Die Längen- und Massenänderungen wurden an denselben Proben der Größe 160 x 40 mm erfaßt, an deren Enden Meßzapfen angebracht waren. Die Ermittlung der anderen Parameter erfolgte an Proben der Größe 200 x 60 mm bzw. an hieraus entnommenen Teilen.

4.1.1 Ergebnisse der Trocken-Naß-Wechsel

Wie die unteren Teilbilder der Abb. 28 zeigen, ergeben sich im Verlaufe der Trocken-Naß-Wechsel keine nennenswerten Veränderungen der Eckwerte für die Sättigungsgrade der Serie "105°C-Tr./97%r.F.". Nach der ersten scharfen Trocknung werden im gesättigten Wasserdampf Sättigungsgrade erreicht, die den Wert 0,6 kaum überschreiten. Beim carbonatisierten Material sind diese eher noch niedriger.

Anders verhält sich die Serie "50°C-Tr./NAT" (obere Teilbilder). Hier werden zum Schluß der Wasserlagerung in den ersten Zyklen in manchen Fällen sogar deutlich über 0,9 liegende Sättigungsgrade erreicht, wohingegen sie nach der Trocknung bei 50 °C in der Mehrzahl um den Wert 0,2 pendeln. Mit dem Fortschreiten der Anzahl der Wechsel werden die oberen Werte kleiner und die unteren größer. Dies ist ein Zeichen dafür, daß solche Wechsel die Fähigkeit des Materials, Wasser auf- bzw. abzugeben, herabsetzen.

Diese Aussage wird von Abb. 29 untermauert. Hier ist über der Zeitachse die Masseänderung der Proben infolge Wasseraufnahme bzw. -abgabe zur Zeit der Dilatationsmessung aufgetragen. Während die Gestalt der unteren Kurve im Verlauf der Wechsel weitgehend erhalten bleibt, verändert sie sich bei der Serie "50°C-Tr./NAT" in dem Sinne, daß die Linienzüge spitzer und der Abstand der Extremwerte kleiner werden. Auch dies weist auf das veränderte Verhalten beim Befüllen und Entleeren des Porenraumes hin.

Die Veränderungen beziehen sich insbesondere auf den kapillaren Wassertransport. Sie betreffen somit in erster Linie die Geometrie des Porensystems. Dies wird durch die Tatsache gestützt, daß das Sorptionsverhalten mit dem Anstieg der

Zyklenzahl im wesentlichen erhalten bleibt, was auf annähernd gleichbleibende Oberflächeneigenschaften des Sorbens hindeutet.

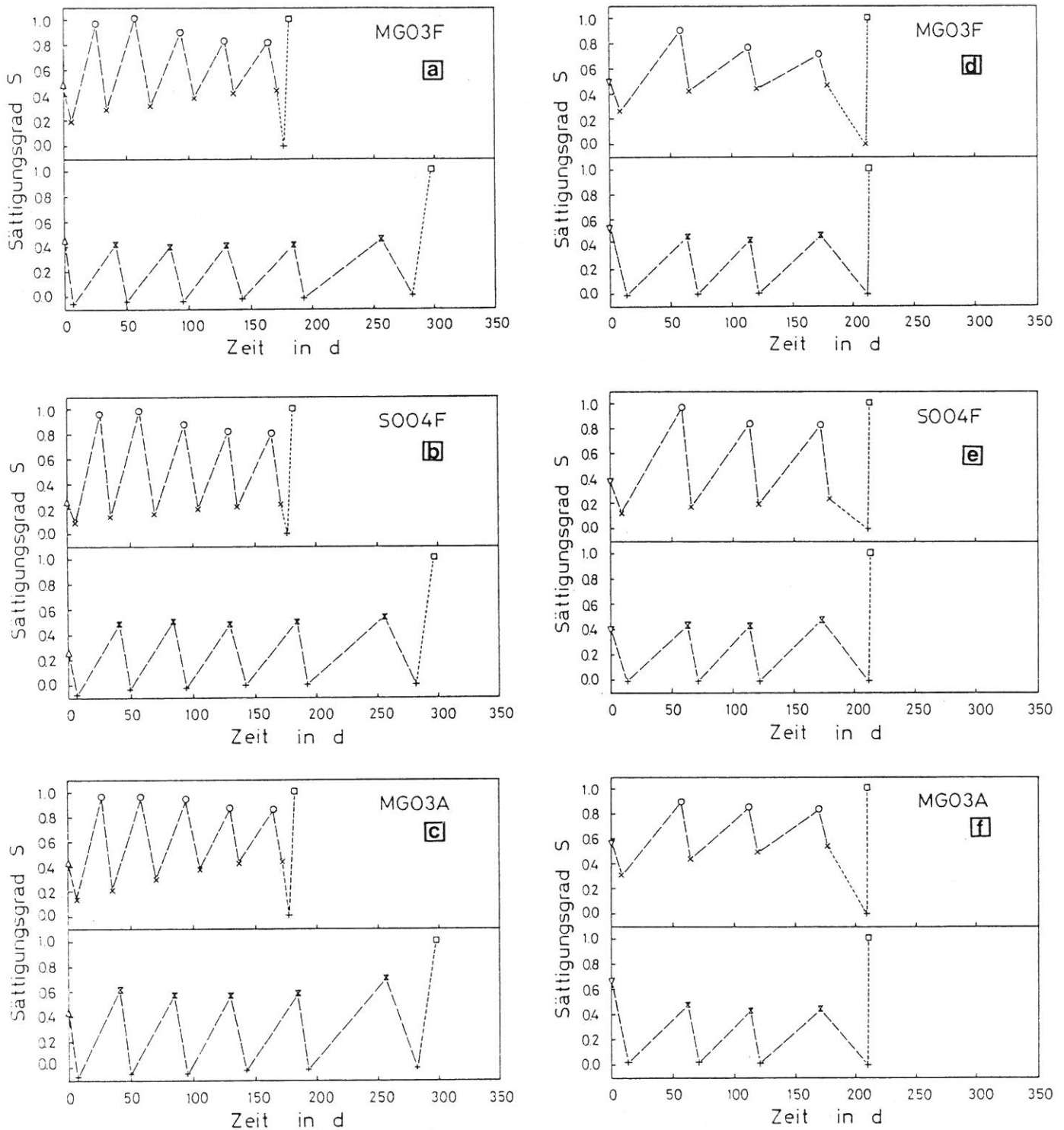


Abb. 28 a,b,c,d,e,f

Eckwerte der Sättigungsgrade während der Trocken-Naß-Wechsel in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer (50°C/NAT, Teilbild oben bzw. 105°C/97%r.F., Teilbild unten)

a,b,c junges Material

d,e,f carbonatisiertes Material

Δ Ausgangszustand luftgelagert

▽ Ausgangszustand carbonatisiert

x Nach 50°C-Trocknung

o Nach Natursättigung

+ Nach 105°C-Trocknung

⊗ Nach 97%r.F.-Sättigung

□ Nach V/D-Sättigung

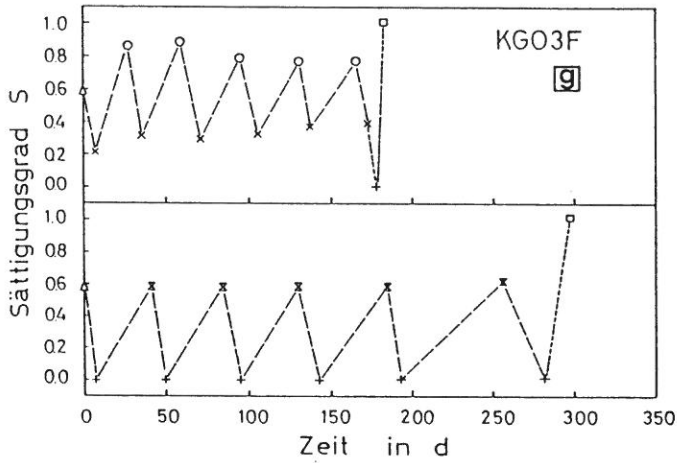
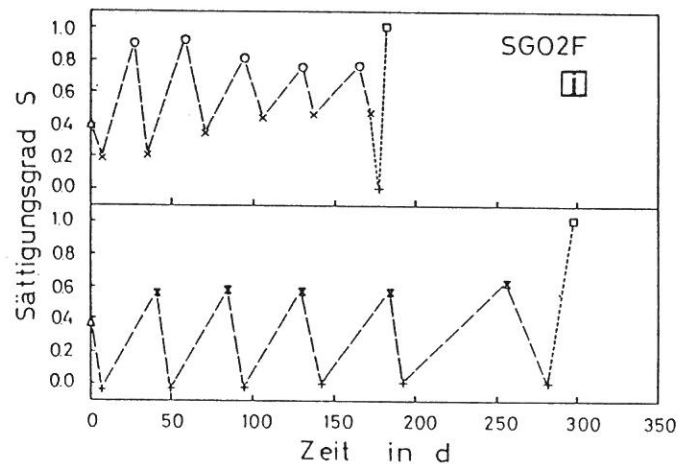
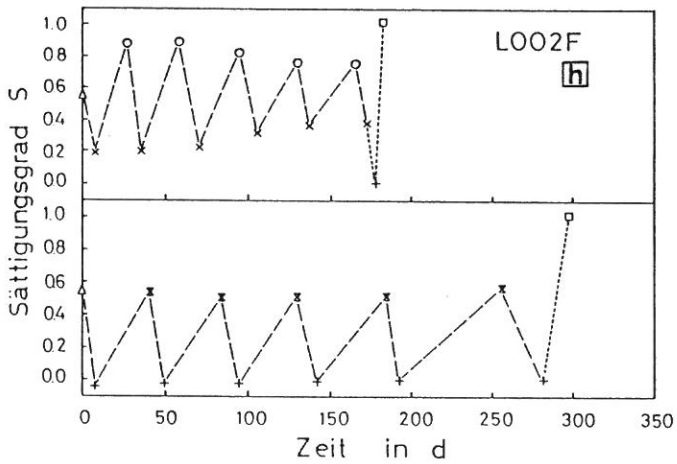


Abb. 28 g,h,j (Fortsetzung)
 Eckwerte der Sättigungsgrade während
 der Trocken-Naß-Wechsel in Abhängig-
 keit von der Behandlungsdauer
 Junges Material



Die Bilder machen ferner deutlich, daß zum Erreichen stationärer Zustände wesentlich längere Zeiträume der Lagerung benötigt worden wären. Dies ist besonders der Fall bei den jeweils letzten Zyklen. Jedoch ist nicht anzunehmen, daß die Maximalwerte der letzten Zyklen jene der ersten übertreffen würden, wenn ausreichend Zeit zur Verfügung stände.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß die Höchstwerte der Wasseraufnahme des carbonatisierten Materials deutlich niedriger liegen als jene des jungen.

Die mit diesen Masseänderungen infolge Wasseraufnahme in Zusammenhang stehenden Verformungen werden in Abb. 30 dargestellt. Auf den ersten Blick scheint zwischen beiden Parametern ein hohes Maß an Konformität zu bestehen, doch finden sich beim genaueren Hinsehen nicht nur materialspezifische Abweichungen sondern auch solche, die auf die Art der Behandlung zurückgehen.

So nehmen z.B. die maximalen und die minimalen Werte der Längenänderung bei der Serie "105°C/97%r.F." mit fortschreitender Zyklenzahl deutlich ab, obgleich eine äquivalente Abnahme der Eckwerte der Masseänderung infolge Wasseraufnahme bzw. -abgabe nicht feststellbar ist. Am stärksten ist dieser Trend bei den ungepreßten Materialien S004F und L002F sowie bei dem gepreßten Faserzement

SG02F ausgeprägt und am wenigsten beim Asbestzement. Analoges Verhalten ist auch beim carbonatisierten Material zu finden.

Überraschend ist auch die Tatsache, daß die Proben der eben erwähnten Serie jene maximalen Werte der Längenänderung, die sie im ersten Zyklus bei der Wasserauf-

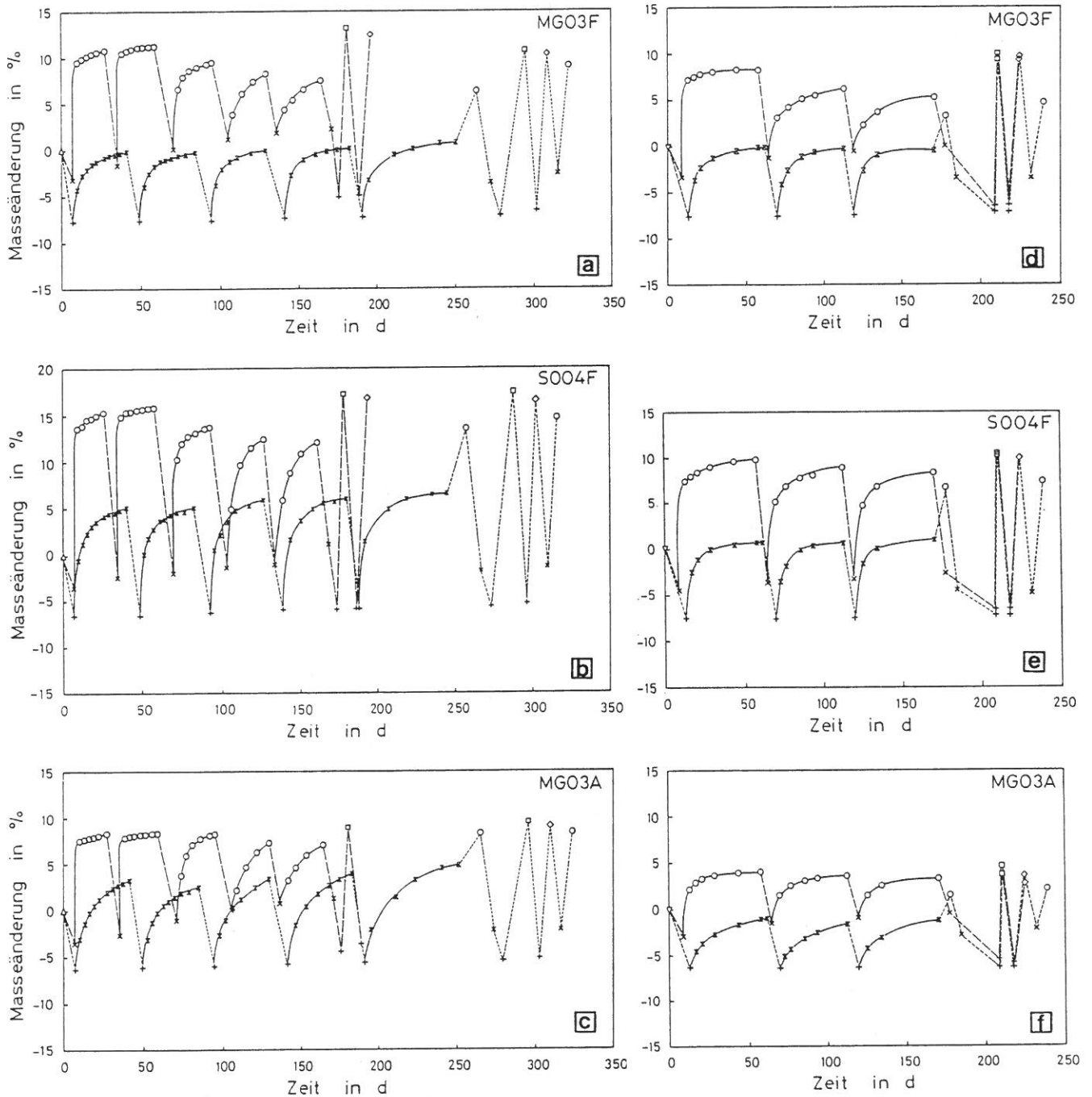


Abb. 29 a,b,c,d,e,f

Masseänderung während der Trocken-Naß-Wechsel in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer (50°C/NAT, oberer Kurvenverlauf bzw. 105°C/97%r.F., unterer Kurvenverlauf)

a,b,c junges Material

d,e,f carbonatisiertes Material

- Δ Ausgangszustand luftgelagert
- ∇ Ausgangszustand carbonatisiert
- x Nach 50°C-Trocknung
- o Nach Natursättigung

- + Nach 105°C-Trocknung
- ⋈ Nach 97%r.F.-Sättigung
- ◇ Nach VAK-Sättigung
- Nach V/D-Sättigung

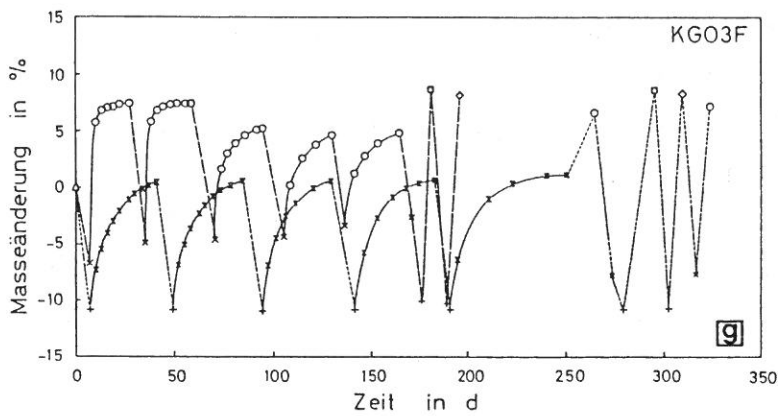
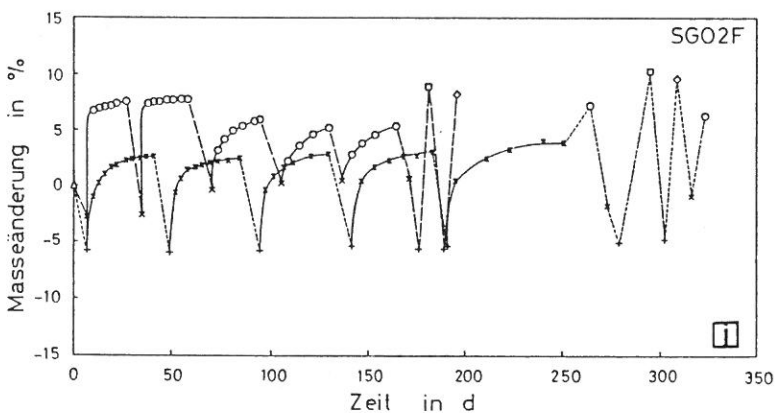
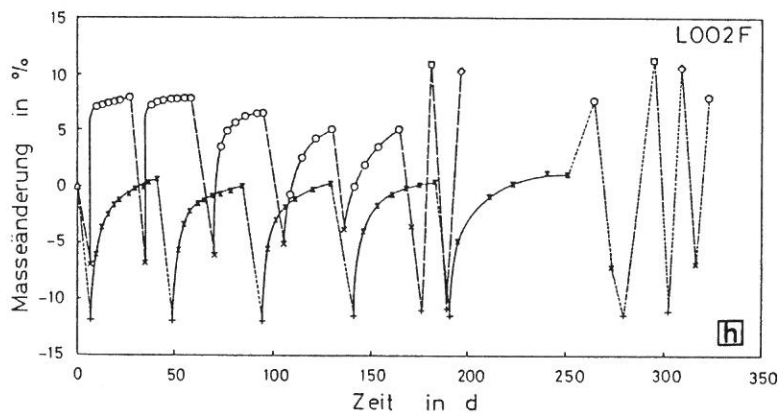


Abb. 29 g,h,j (Fortsetzung)
Masseänderung während der Trocken-
Naß-Wechsel in Abhängigkeit von
der Behandlungsdauer

Junges Material



nahme aus der Dampfphase angenommen hatten, im Zuge der Schlußbehandlung auch bei vollständig gefülltem Porenraum bei weitem nicht erreichten.

Ein dem Verlauf der Masseänderung in Abb. 29 entsprechendes Verformungsverhalten ist noch am ehesten bei der Serie "50°C/NAT" anzutreffen. Doch findet sich auch hier in der Schlußphase kein direkter Zusammenhang zwischen der aufgenommenen Wassermenge und dem Betrag der Längenänderung.

Einen Hinweis auf die Ursachen dieses Verhaltens geben die Kurven der eben erwähnten Serie für die carbonatisierten Proben in der Schlußbehandlung. Im Gegensatz zum jungen Material dieser Serie nähert sich hier die Längenänderung nach der Vakuum/Druck-Sättigung jenem Wert, den carbonatisierte und junge Proben der Serie "105°C/97%r.F." nach der gleichen Sättigungsart erreichen. Dieses Verhalten dürfte in erster Linie auf chemische Umsetzungen in der Zementsteinmatrix zurückgehen.

Ogleich der Inhalt der besprochenen Bilder mehr Anlaß zu Diskussionen bietet, soll hier die Behandlung mit der Feststellung - eine ähnliche ist übrigens auch für Asbestzement in [66] getroffen worden - abgeschlossen werden, daß unter praktischen Bedingungen im Verlaufe der Nutzung der Einfluß der Parameter der Wasseraufnahme bzw. -abgabe und der Verformung günstiger werden. Dabei spielt das Quellen (Dehnung) eine geringere Rolle als das Schwinden (Verkürzung), wobei jedoch jene Werte, die durch Trocknen bei 105 °C erreicht worden sind, unter natürlichen Verhältnissen nicht zu erwarten sind.

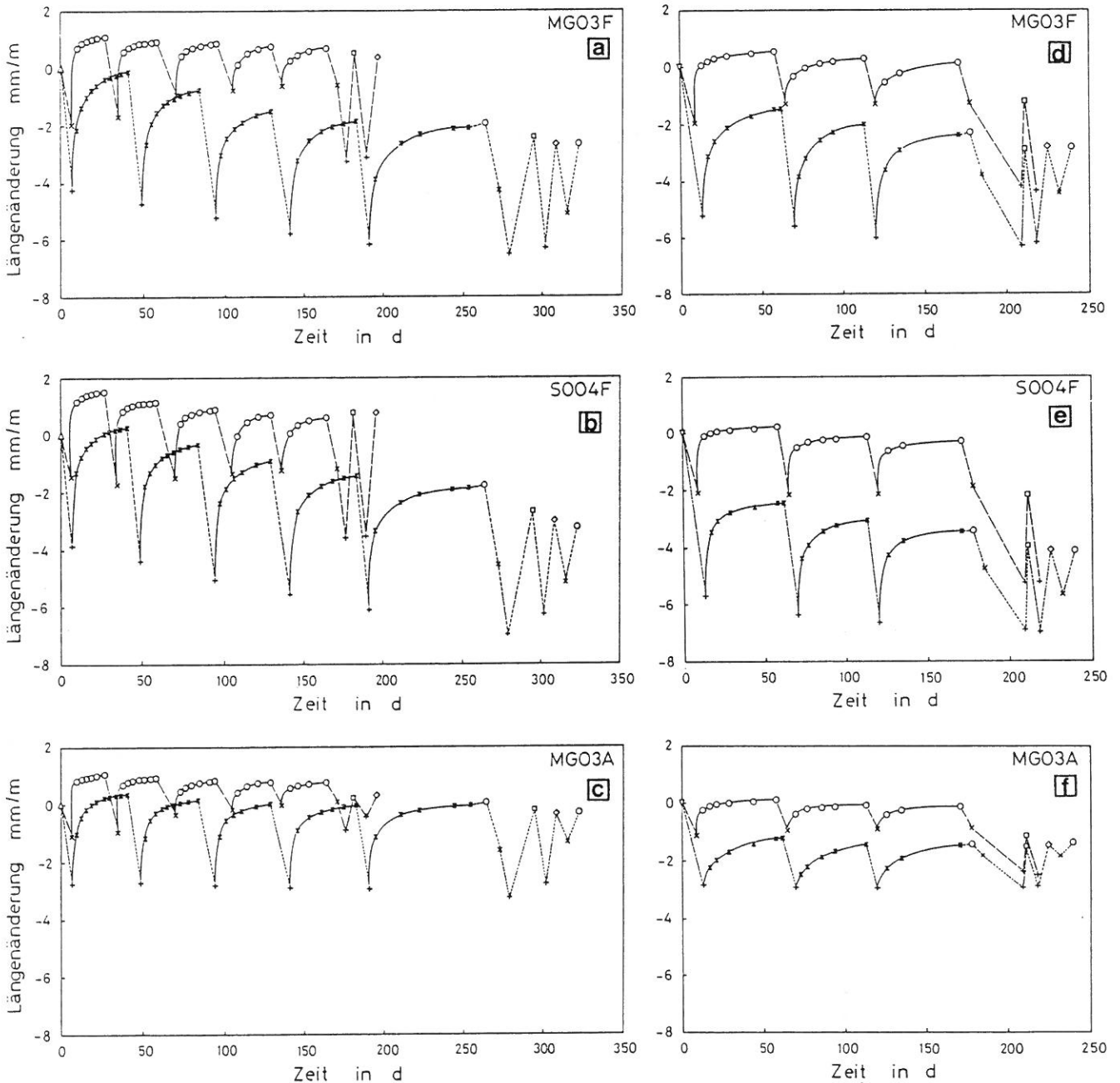


Abb. 30 a,b,c,d,e,f

Längenänderung während der Trocken-Naß-Wechsel in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer (50°C/NAT, oberer Kurvenverlauf bzw. 105°C/97%r.F., unterer Kurvenverlauf).
Legende s. vorherige Abb.

a,b,c junges Material
d,e,f carbonatisiertes Material

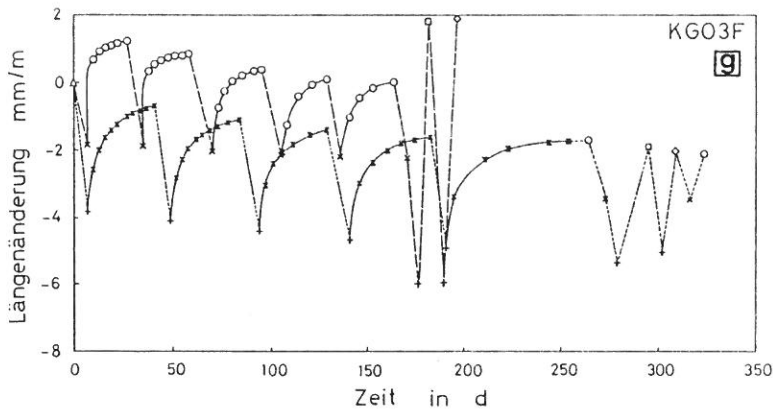
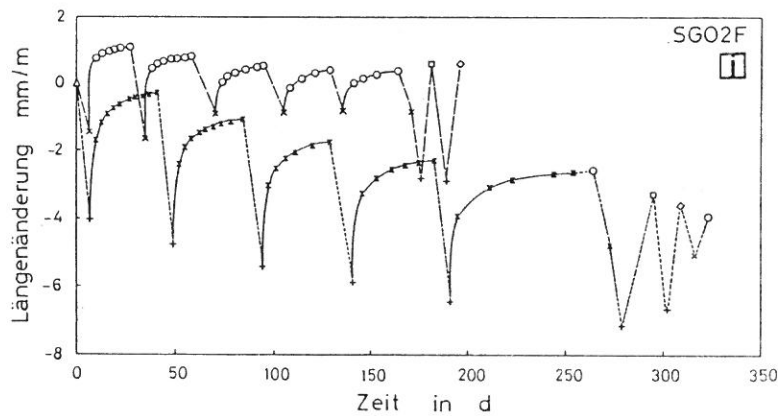
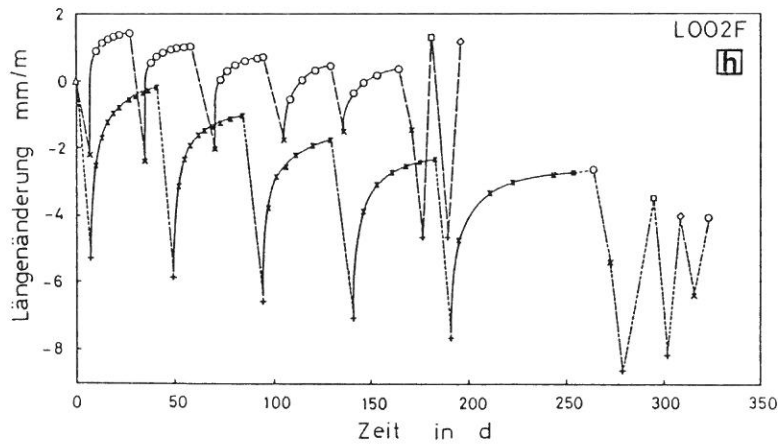


Abb. 30 g,h,j (Fortsetzung)
Längenänderung während der Trocken-
Naß-Wechsel in Abhängigkeit von
der Behandlungsdauer

Junges Material



Desweiteren soll der Frage nachgegangen werden, inwieweit die sich von den Deformationen ableitenden Beanspruchungen zu Veränderungen der mechanischen Eigenschaften oder der porenraumbezogenen Parameter geführt haben.

Die Teilbilder der Abb. 31 stellen die Biegezugfestigkeit jener Proben dar, die an den Trocken-Naß-Wechseln teilgenommen haben. Sie wird verglichen mit den Werten unbeanspruchten Materials, das z.Z. der Prüfung dasselbe Alter und die gleichen hygrischen Bedingungen aufwies. Während der Asbestzement infolge beider Beanspruchungsarten Steigerungen der Festigkeit erfährt, ist dies bei den Faserzementen nur bei der Serie "50°C/NAT" der Fall, wobei das Material L002F eine Ausnahme macht. Die Serie "105°C/97%r.F." weist unterschiedliche Festigkeitsverluste auf. Am schlechtesten schneidet hier das Material L002F ab. Bei den

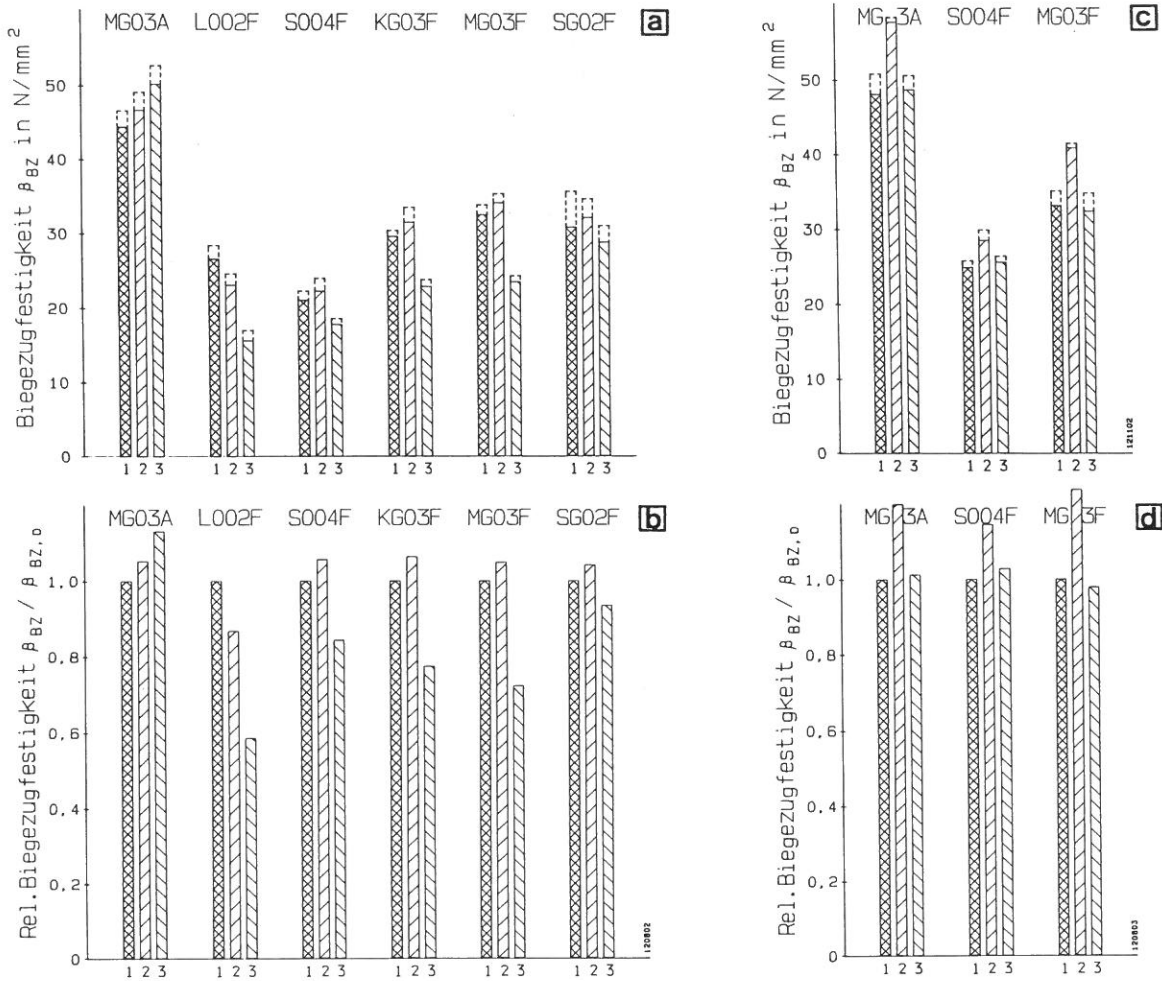


Abb. 31 a,b,c,d

Biegezugfestigkeit nach Trocken-Naß-Wechseln (50°C/NAT, Balken 2 bzw. 105°C/97%r.F., Balken 3) im Vergleich zur Biegezugfestigkeit ohne TNW (Balken 1)

a,b junges Material
a,c Biegezugfestigkeit

c,d carbonatisiertes Material
b,d Rel. Biegezugfestigkeit

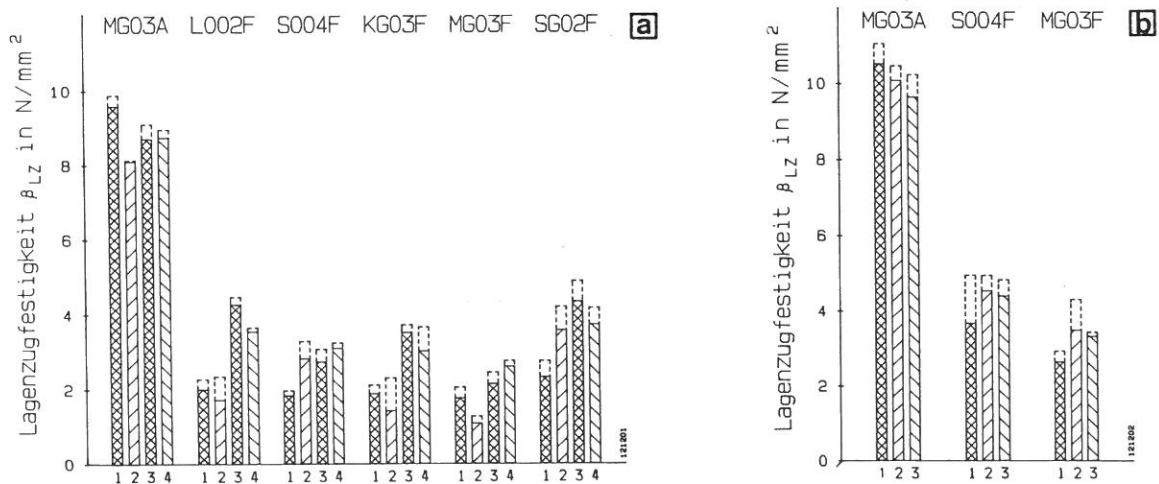


Abb. 32 a,b

Lagenzugfestigkeit nach Trocken-Naß-Wechseln (50°C/NAT bzw. 105°C/97%r.F.) im Vergleich zur Lagenzugfestigkeit ohne TNW

a junges Material
1 = ohne TNW, Bezug für Balken 2
2 = nach 5 TNW (50°C/NAT)
3 = ohne TNW, Bezug für Balken 4
4 = nach 5 TNW (105°C/97%r.F.)

b carbonatisiertes Material
1 = ohne TNW
2 = nach 3 TNW (50°C/NAT)
3 = nach 3 TNW (105°C/97%r.F.)

carbonatisierten Proben zeigt die erstgenannte Serie deutliche Zunahmen der Biegezugfestigkeit, sonst ergeben sich kaum Veränderungen. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, daß diese Proben nur 3 Trocken-Naß-Wechseln ausgesetzt waren.

Die in Abb. 32 dargestellte Entwicklung der Querkzugfestigkeit ergibt ein weniger eindeutiges Verhalten. Zum Teil liegt es an der unterschiedlichen Bearbeitung der Proben durch die Trocken- bzw. Naßbohrung, was für die Wertung der Ergebnisse des Teilbildes a zu zwei Bezügen führte (Balken 1 und 3). Auch wenn die dargestellten Werte nicht ganz frei von Unsicherheiten sind, kann unter Hinzuziehung des Teilbildes b davon ausgegangen werden, daß die Entwicklung der Querkzugfestigkeit während der Trocken-Naß-Wechsel eher günstiger verläuft als die der Biegezugfestigkeit.

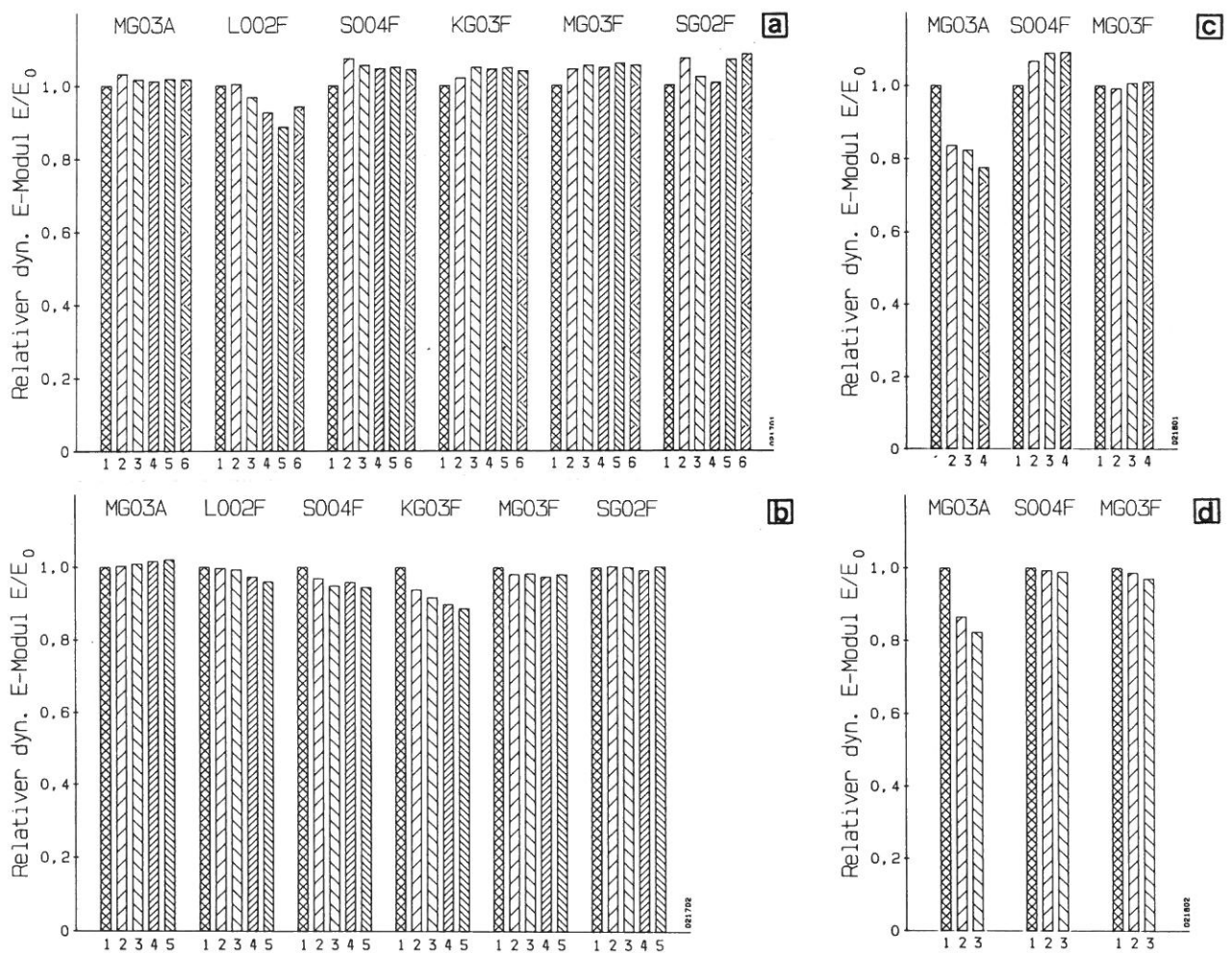


Abb. 33 a,b,c,d

Entwicklung des dyn. E-Moduls während der Trocken-Naß-Wechsel (50°C/NAT bzw. 105°C/97%r.F.)

a,b junges Material

b,c carbonatisiertes Material

Balken 1 = ohne TNW (1.Trocknung bei 50°C bzw. 105°C)

a Balken 2 bis 6 = nach 1. bis 5.TNW (NAT/50°C)

b Balken 2 bis 5 = nach 1. bis 4.TNW (97%r.F./105°C)

c Balken 2 bis 4 = nach 1. bis 3.TNW (NAT/50°C)

d Balken 2 bis 3 = nach 1. bis 2.TNW (97%r.F./105°C)

Die Entwicklung des dyn. E-Moduls wird im allgemeinen im Zusammenhang mit der Festigkeitsentwicklung gesehen. Beide Parameter sollten eventuelle Gefügeschäden als Folge einer Beanspruchung aufzeigen. Die in Abb. 33 dargestellten Ergebnisse lassen sich jedoch kaum mit den Werten der Biegezugfestigkeit der Abb. 31 korrelieren. Am stärksten tritt der Widerspruch zwischen den beiden Parametern beim Asbestzement auf. Bei den anderen Materialien ergeben sich sehr geringe Veränderungen, so daß die Methode sich hier als wenig empfindlich erweist.

Das größte Maß der inneren Beanspruchung ergeben Wechsel, bei denen das Feuchtigkeitsspektrum den gesamten Bereich zwischen dem vollständig entleerten und gefüllten Porenraum durchläuft. Solche Wechsel können realisiert werden, indem bei 105 °C getrocknete Proben wiederholt im Vakuum bzw. mit Vakuum und anschließendem Überdruck gesättigt werden. Einige der nachfolgenden Bilder enthalten auch Ergebnisse von Proben, die solchen Wechseln ausgesetzt waren.

In Abb. 34 wird das Festigkeitsverhalten von jungem Material bei solchen "harten Wechseln" dargestellt. Ohne Beeinträchtigungen übersteht solche Behandlungen nur der Asbestzement. Die Faserzemente - ob ungepreßt, gepreßt oder autoklaviert - weisen deutliche Einbußen an Biege- bzw. Querzugfestigkeit auf, wobei das Material SG02F bei der letztgenannten Festigkeitsart eine Ausnahme macht.

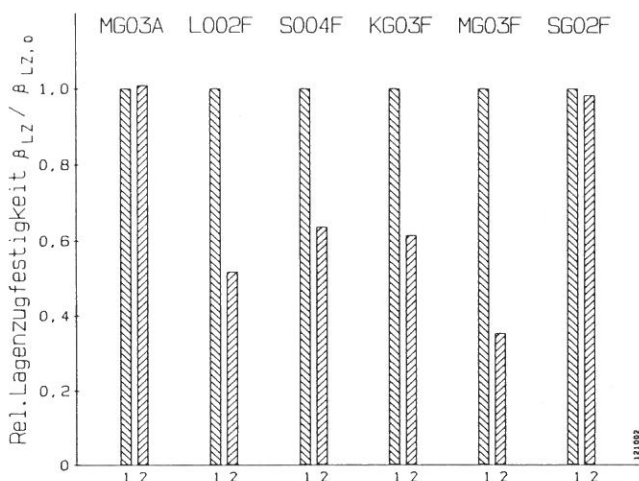
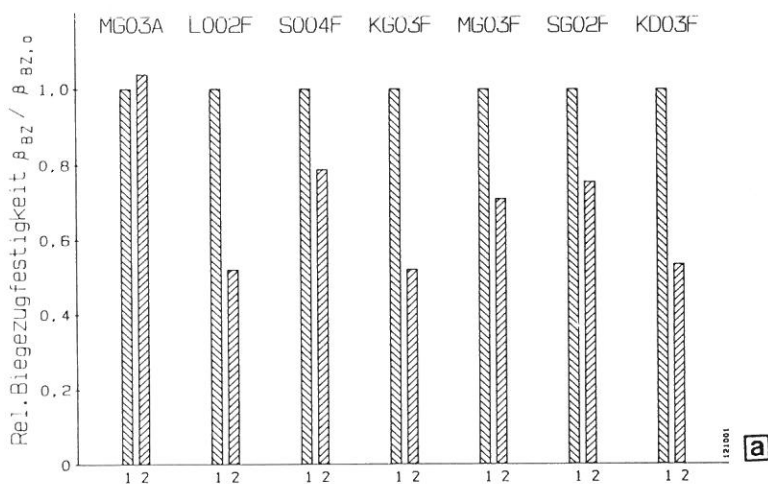


Abb. 34 a,b
Relative Biegezug- (a) und Lagenzugfestigkeit (b) nach Trocken-Naß-Wechseln (105°C/VAK bzw. in wenigen Fällen VD)

- 1 = Bezugswerte ohne TNW
- 2 = Nach 6x TNW
- a: bei MG03A und L002F nur 4x TNW

Als weiteres wird in Abb. 35 die Entwicklung der Biegezugfestigkeit von hydratisierten und in Abb. 36 von carbonatisierten Proben in Abhängigkeit von der Zyklenzahl dargestellt. Die Werte lassen erkennen, daß in einigen Fällen die Abnahmen geringer ausfallen als in den zuvor behandelten Bildern. Dennoch ist auch hier nicht zu übersehen, daß harte Trocken-Naß-Wechsel die Festigkeit von einigen Faserzementen deutlich beeinträchtigen.

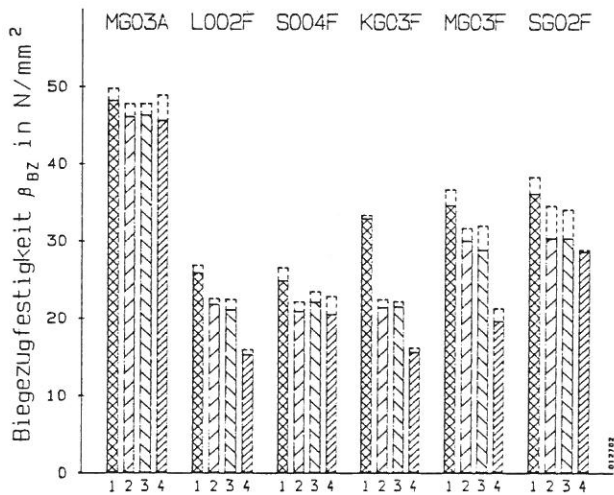


Abb. 35

Biegezugfestigkeit von hydratisierten Proben nach Trocken-Naß-Wechseln ($105^\circ C/VAK$ bzw. VD)

- 1 = nur hydratisiert
- 2 = ($105^\circ C + NAT$ bzw. $97\%r.F.$) + 1 x ($105^\circ C/VD$)
- 3 = 3 x ($105^\circ C/VD$)
- 4 = 6 x ($105^\circ C/VAK$ bzw. VD)

Vor Biegezug bei $50^\circ C$ getrocknet.

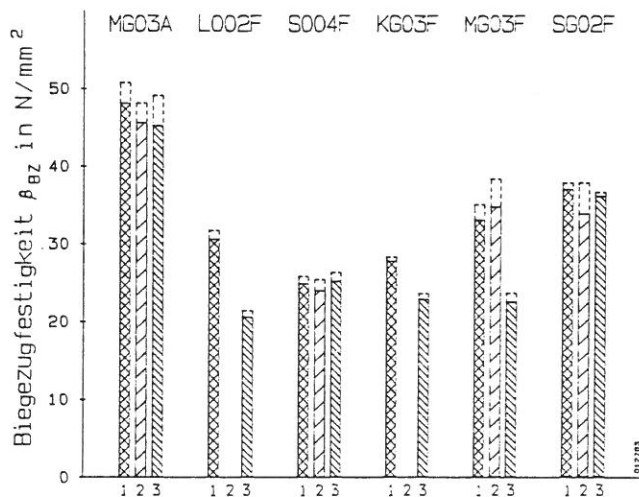


Abb. 36

Biegezugfestigkeit von carbonatisierten Proben nach Trocken-Naß-Wechseln ($105^\circ C/VAK$ bzw. VD)

- 1 = nur carbonatisiert
- 2 = (versch. Tr. + versch. Sätt.) + 1 x ($105^\circ C/VD$)
- 3 = 6 x ($105^\circ C/VAK$ bzw. VD)

Vor Biegezug bei $50^\circ C$ getrocknet.

Veränderungen des Werkstoffgefüges signalisieren auch die porenraumbezogenen Parameter der Abb. 37. Diese treten besonders zum Vorschein beim Wasseraufnahme- und Wassereindringkoeffizienten der Teilbilder a und b. Eine zuverlässige Deutung der Ergebnisse wird von den in Abschnitt 1 geschilderten Problemen erschwert. Dennoch wird hier offenbar, daß die von der Geschwindigkeit der vordringenden Wasserfront getragenen Parameter A und B Veränderungen infolge der Trocken-Naß-Wechsel deutlicher anzeigen als die Wasserkapazität ψ_K , der Sättigungsgrad am Knickpunkt S_K oder gar die Rohdichte ρ sowie die Porosität P.

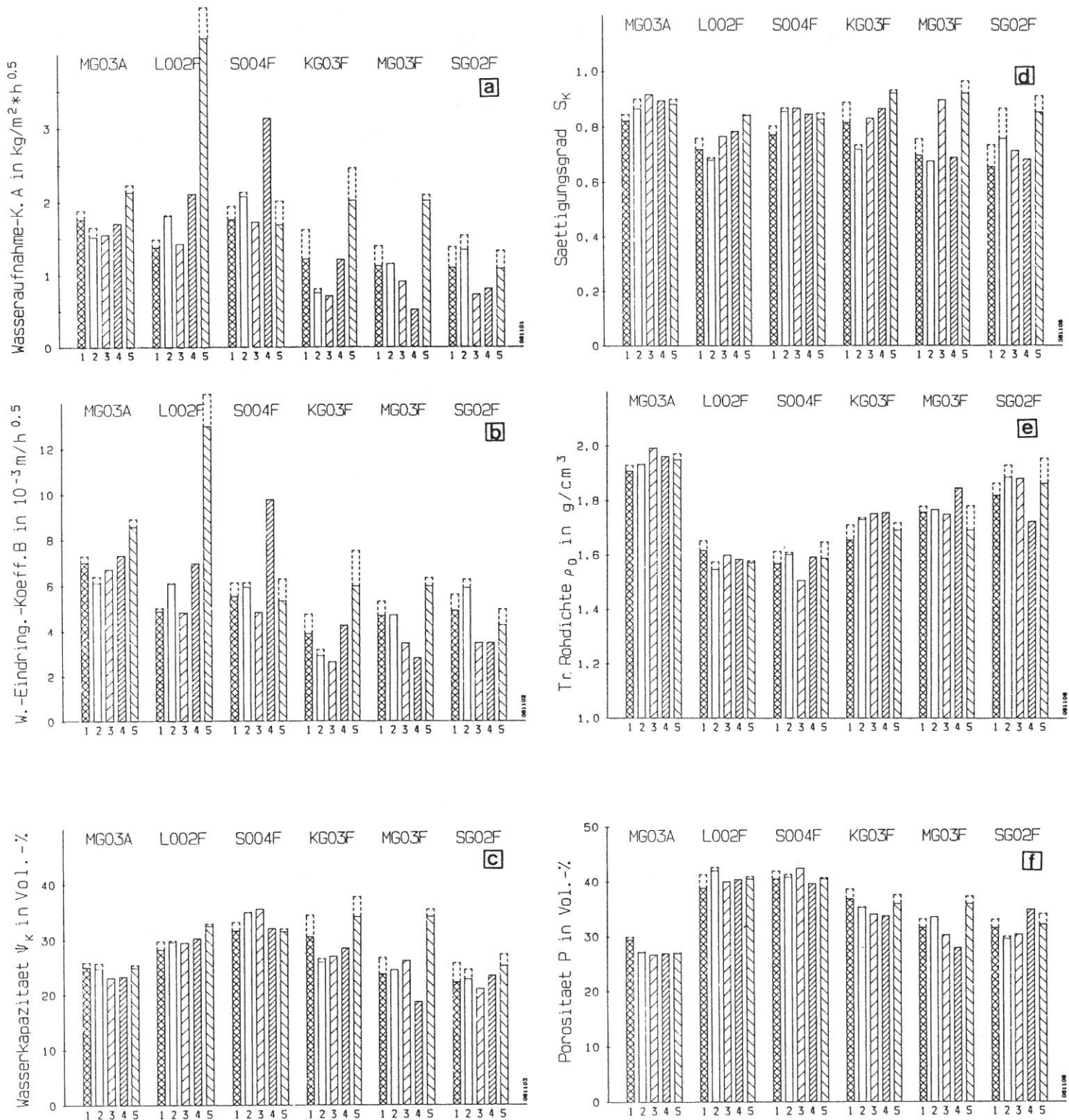


Abb. 37 a,b,c,d,e,f

Änderung der Kennwerte der kapillaren Wasseraufnahme, der Porosität und der Trocken-Rohdichte nach verschiedenen Trocken-Naß-Wechseln

- | | |
|---|--|
| 1 = ohne Behandlung (Serie GE) | 4 = nach 5x TNW ($105^\circ\text{C}/97\% \text{r.F.}$, Serie TN) |
| 2 = nach Hydratisierung (Serie GEH) | |
| 3 = nach 5x TNW ($50^\circ\text{C}/\text{NAT}$, Serie TN) | 5 = nach 6x TNW ($105^\circ\text{C}/\text{VAK}$); bei MG03A ($105^\circ\text{C}/\text{VD}$, Serie P) |

Werden die genannten Parameter des jungen Materials der eben besprochenen Bilder mit jenen der Abb. 38 verglichen (Balken 1), dann wird der Einfluß der Carbonatisierung auf die Eigenschaften des Porensystems sichtbar. Insbesondere fallen

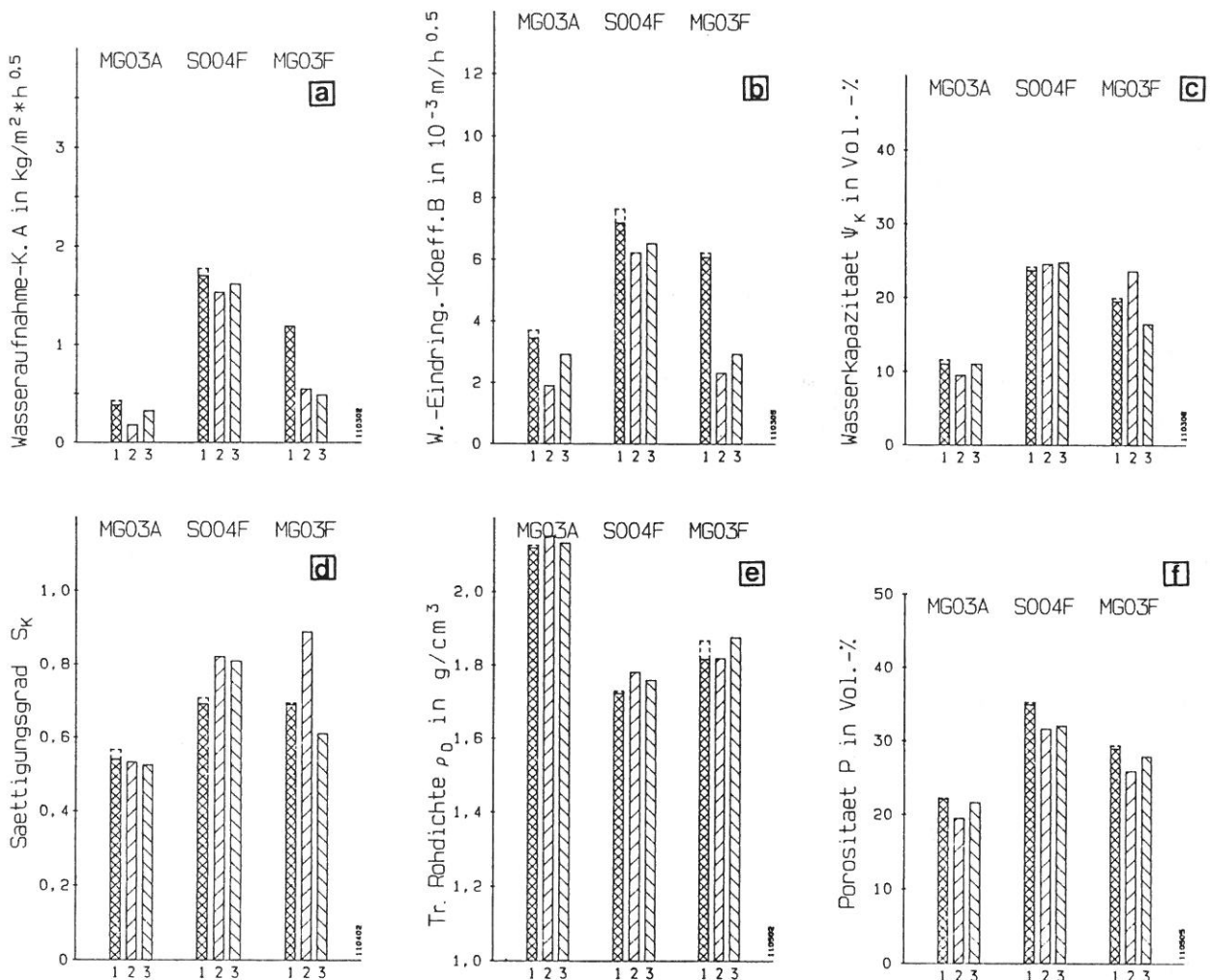


Abb. 38 a,b,c,d,e,f

Änderung der Kennwerte der kapillaren Wasseraufnahme, der Porosität und der Trocken-Rohdichte von carbonatisierten Proben nach 3 Trocken-Naß-Wechseln ($50^\circ\text{C}/\text{NAT}$, Balken 2 bzw. $105^\circ\text{C}/97\% \text{r.F.}$, Balken 3) im Vergleich zu den Werten der carbonatisierten Proben ohne TNW (Balken 1)

die starken Veränderungen der Rohdichte und Porosität auf. Eben solche ergeben sich auch bei den Kennwerten der kapillaren Wasseraufnahme des Asbestzementes. Insgesamt verhalten sich die einzelnen Materialien jedoch individuell verschieden, wobei die Auswirkungen der Trocken-Naß-Wechsel auf die Eigenschaften des carbonatisierten Materials eher geringer sind. Dies mag mit dem weitgehend abgeschlossenen Prozeß der chemischen Umwandlungen einhergehen. Schließlich darf nicht übersehen werden, daß die natürliche Alterung des Materials günstigere Bedingungen hinsichtlich der für den Witterungswiderstand maßgeblichen Eigenschaften mit sich bringt.

Am Ende dieses Abschnittes werden die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Quecksilber-Druckporosimeter dargestellt. Abb. 39 zeigt die Änderung des spezifischen Porenvolumens von jungem und Abb. 40 von carbonatisiertem Material. Der Tendenz nach wird für das junge Material ein höheres spez. Porenvolumen dort angezeigt, wo die Beanspruchung durch die Trocken-Naß-Wechsel besonders

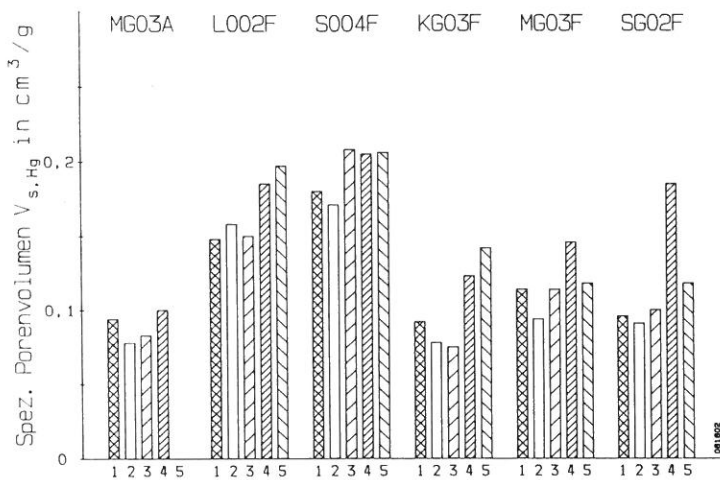


Abb. 39

Änderung des spez. Porenvolumens nach verschiedenen Trocken-Naß-Wechseln (ermittelt durch Hg- porosimetrie)

- 1 = ohne Behandlung (Serie GE)
- 2 = nach Hydratisierung (Serie GEH)
- 3 = nach 5x TNW (50°C/NAT, Serie TN)
- 4 = nach 5x TNW (105°C/97%r.F., Serie TN)
- 5 = nach 6x TNW (105°C/VAK); bei MG03A (105°C/VD, Serie P)

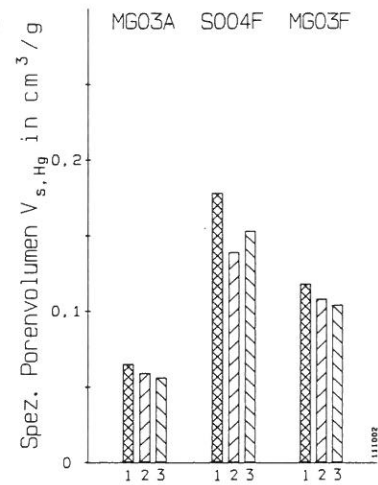


Abb. 40

Änderung des spez. Porenvolumens (ermittelt durch Hg- porosimetrie) von carbonatisierten Proben nach 3 TNW (50°C/NAT, Balken 2 bzw. 105°C/97%r.F., Balken 3) im Vergleich zu den Werten der carbonatisierten Proben ohne TNW (Balken 1)

intensiv war. Im Gegensatz hierzu ergeben sich für die carbonatisierten Proben der Serie "105°C/97%r.F." Abnahmen des spez. Porenvolumens. Hier wäre eine Erhärtung des Ergebnisses durch eine größere Anzahl von Messungen erforderlich gewesen. Eine solche Forderung scheint aufgrund des geringen Probenvolumens für Untersuchungen mit dem Hg- Porosimeter schlechthin sinnvoll zu sein.

4.1.2 Folgerungen

Das Entleeren und Füllen des Porenraumes führt nicht nur zu Gefügeveränderungen, sondern in einigen Fällen auch zu Festigkeitsminderungen. Da die sich bei Trocken-Naß-Wechseln entfaltenden Kräfte unmittelbar auf die Partikel des Feststoffgerüsts wirken, beeinflussen sie sowohl die Biegezugfestigkeit als auch die Querzugfestigkeit. Das Maß der Beeinträchtigung ist von den stofflichen Gegebenheiten und der Strenge der Beanspruchung abhängig. Extremwerte der Beanspruchungsintensität stellen sich bei den Wechseln zwischen völliger Entleerung und vollständiger Füllung des Porenraumes ein. Bedingt durch die "sehr trägen" Transportmechanismen der Werkstoffmatrix, muß dem System zum Erreichen des jeweiligen Zustandes genügend Zeit gelassen werden, wenn der Bezug zu den Vorgängen unter natürlichen Verhältnissen nicht verloren gehen soll. Bei der Festlegung eines Prüfverfahrens sollten sich die Eckwerte der Beanspruchung an den

Bauwerksbedingungen orientieren. So sind z.B. für eine angemessene Auslegung der Befestigungskonstruktionen die im Verlaufe der Trocken-Naß-Wechsel auftretenden Verkürzungen, verursacht durch die Austrocknung des Porenraumes bzw. chemische Umsetzungen der Matrix, von größerer Bedeutung als jene Dehnungen, die sich aus der Wasseraufnahme ergeben.

4.2 Beanspruchung durch Frost; Grundlagen und Methodik

Faserzemente weisen ein heterogenes offenes Porensystem auf. Das Spektrum der Porengrößen reicht von Hohlräumen, die von Kapillaren gebildet werden, bis hin zu jenen des Xerogels, dessen Radien im Nanometerbereich liegen. Dies hat zur Folge, daß bei Frosttemperaturen, wie sie in unseren Regionen vorkommen, nur ein Teil der Porenflüssigkeit gefriert [67]. Aus der Wechselbeziehung zwischen dem in den Aggregatzuständen flüssig, fest und gasförmig vorliegendem Wasser mit der Oberfläche des Porenraumes und der Eiskristallite ergibt sich ein sehr komplexes Beanspruchungsfeld, dessen wesentliche Merkmale durch die von ihm verursachte Verformung charakterisiert werden. Für die Kennzeichnung der im Hinblick auf eine lange Lebensdauer ungeeigneten Werkstoffe reicht die kontinuierliche Erfassung des Verformungsverhaltens in nur einem Temperaturzyklus aus, denn die Dynamik der Beanspruchung, von der sich das künftige Materialverhalten ableiten läßt, tritt für den gegebenen Feuchtigkeitszustand schon hier deutlich zu Tage [15]. Wiederholungen von Frost-Tau-Vorgängen können der Beschreibung des Zerstörungsprozesses dienen, insbesondere auch der dabei häufig auftretenden Effekte von chemischen Umwandlungen der Matrix: Je nach der Intensität der Beanspruchung können Frost-Tau-Wechsel einerseits das Feststoffgerüst allmählich zerrütten, andererseits dabei Bereiche von nicht hydratisierten Klinkerresten freilegen und aktivieren, so daß neue Hydratationsprodukte gebildet und die Festigkeit möglicherweise gesteigert wird. Der Einfluß beider Wirkungen ist gegenläufig. Erreichen die destruktiven Kräfte einen kritischen Schwellenwert, dann gehen jedoch die positiven Effekte der "Selbstheilung" des Zementsteines in der allgemeinen Festigkeitsabnahme unter.

Die das Verhalten kennzeichnenden Parameter gelten selbstverständlich jeweils für den bei der Untersuchung vorliegenden Gefüge- und Feuchtigkeitszustand. Deswegen sind auch natürliche Veränderungen des Mineralbestandes des Zementsteines zu berücksichtigen. Insbesondere läßt das Einsatzgebiet der Faserzemente erwarten, daß wesentliche Anteile der Hydratationsprodukte der Matrix im Verlaufe der Jahre durch die CO_2 -Aufnahme carbonatisieren [49]. Nach solchen Umwandlungen sind Effekte der "Selbstheilung", wie sie bei verhältnismäßig jungem Material möglich sind, kaum zu erwarten. Dies gilt sinngemäß auch für

Faserzemente, die im gespannten Wasserdampf und bei Temperaturen von über 170 °C ausgehärtet werden (autoklaviertes Material).

Der in Abschnitt 3 herausgestellte destruktive Charakter der Gefügeexpansion wird von der Methode des "kritischen Sättigungsgrades" [15], die seinerzeit für Beton entwickelt worden ist, als Kriterium bei der Beurteilung der Frostwiderstandsfähigkeit verwendet. Dabei werden versiegelte Proben mit unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt in ein Dilatometer gebracht, dort einer definierten Temperaturbeanspruchung ausgesetzt und die in Abb. 41a angegebenen Parameter bestimmt. Mit dem zwischen etwa 20 °C und 0 °C ermittelten Temperaturexpansionskoeffizienten α_0 und der Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta_1$ wird für den Frostbereich eine ideale bezogene Längenänderung ϵ_{01} berechnet. Ist die im Frostabschnitt tatsächlich gemessene Verformung ϵ_1 betragsmäßig größer als ϵ_{01} , dann liegt ein kontrahierendes System vor, ist sie kleiner, dann handelt es sich um ein expandierendes System, was mit einem negativen oder positiven Vorzeichen von $\Delta \epsilon_1$ ausgedrückt wird.

Werden die Werte $\Delta \epsilon_1$ in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad gemäß der Abb. 41b dargestellt, dann wird eine Gefügeexpansion von der Kurve dort angegeben, wo sie die Abszisse schneidet und anschließend im positiven Bereich der Ordinate verläuft. Der Schnittpunkt selbst wird der "kritische Sättigungsgrad" genannt. Dieser kennzeichnet jene Porenfüllung, bei deren Überschreitung das Werkstoffverhalten im Frost von der Gefügeexpansion geprägt wird. Damit wird offenbar, daß die Methode die Entscheidungskriterien an die Intensität der Beanspruchung koppelt, die hier durch den Grad der Porenfüllung vorgegeben ist.

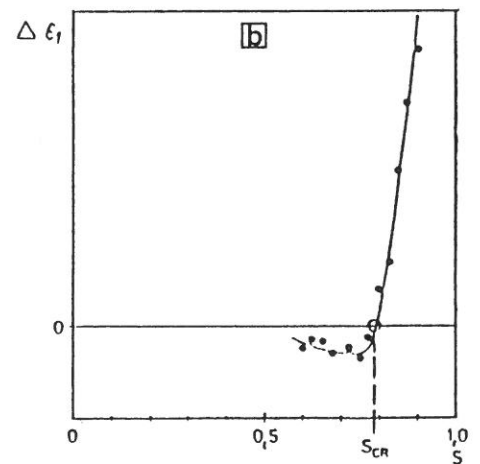
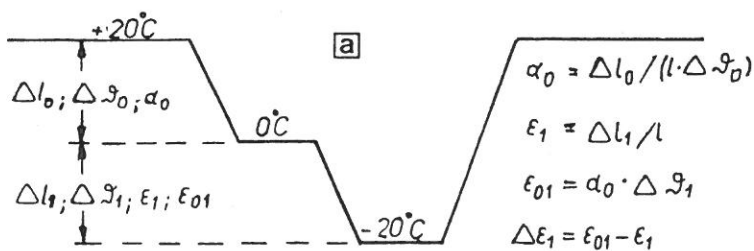


Abb. 41 a,b

Grundlagen der S_{CP} -Methode

- a Temperaturverlauf und Formeln
- b Darstellung der Ergebnisse [nach 15]:
Differenz der bez. Längenänderung
in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad

Für die Erstellung von Diagrammen, wie sie Abb. 41b als Beispiel zeigt, wird eine größere Anzahl von Proben mit unterschiedlichen Porenfüllungsgraden benötigt. Bei Materialien, von denen ein hoher Frostwiderstand erwartet werden kann, läßt sich der Aufwand reduzieren, wenn die Suche nach dem kritischen Sättigungsgrad mit der höchsten Porenfüllung begonnen wird. Nur bei positivem

Befund (Vorzeichen von $\Delta\varepsilon_1$) ist es erforderlich, das Dilatationsverhalten bei niedrigeren Sättigungsgraden zu untersuchen. Bei solchem Vorgehen ist es zweckmäßig, die Ergebnisse tabellarisch darzustellen.

Bei allen Dilatationsmessungen, aber auch dann, wenn eine hohe Anzahl von Frost-Tau-Wechseln ohne Erfassung der Verformung zu realisieren war, entsprach das Temperaturprofil Abb. 41a. Die Abkühl- bzw. Erwärmungsrate lag bei etwa 7 K/h. Die Proben wurden zuerst 3 Stunden lang bei 20 °C gehalten, dann auf etwa 0 °C gebracht und hier ebenfalls 3 Stunden lang belassen. Nach weiterem Abkühlen auf -20 °C und einer Verweildauer bei dieser Temperatur von 3 Stunden erfolgte anschließend ihre Erwärmung auf 20 °C.

Zur Messung der Längenänderung parallel und senkrecht zur Herstellrichtung kamen Proben nach Abb. 42b zur Anwendung. An ihren Enden waren kegelige Zapfen aus Ni 36 (Invarstahl) mittels Gewinde und Klebung befestigt. Ferner war im mittleren Bereich jeweils ein Thermoelement eingelassen. Die Versiegelung bestand aus transparenter Schrumpffolie. Ebenso versiegelt waren die Proben für die Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung ohne Verformungsmessung. Jedoch entsprach ihre Größe dem üblichen Maß von 205 x 60 mm.

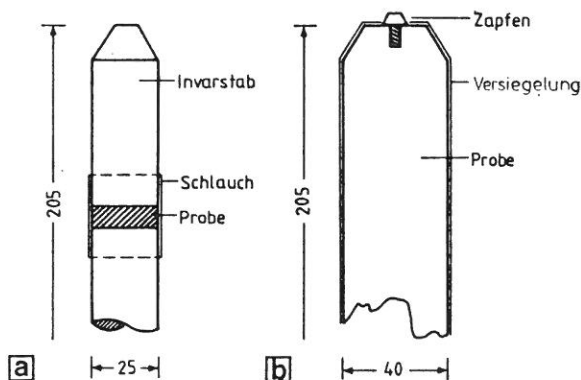


Abb. 42 a,b

Proben zur kontinuierlichen Erfassung der Dilatation

a orthogonal zur Plattenebene

b parallel und senkrecht zur Herstellrichtung

Die Erfassung der Dilatation senkrecht zur Plattenebene erfolgte an kreisförmigen Proben, deren Durchmesser 25 mm betrug. Nach der Einstellung des gewünschten Feuchtigkeitsgehaltes wurden sie zwischen 2 Stäben aus Ni 36 geklebt und an der Mantelfläche mit einem Schlauch gedichtet. Bei den besonderen Bedingungen der S_{CR} -Methode wird die Eigendehnung der Invarstäbe durch die Differenzbildung zur Ermittlung der Größe $\Delta\varepsilon_1$ eliminiert. Damit kennzeichnen die ermittelten Werte das tatsächliche Verformungsverhalten des Materials orthogonal zu seinen Lagen.

Das Prinzip der zur kontinuierlichen Erfassung des Verformungsverhaltens verwendeten Dilatometer ist in [69] beschrieben.

Der Porenraum der Proben wurde in der Regel nach einer 50 °C-Trocknung in einer Vakuum/Druck-Anlage oder durch Lagerung unter Wasser bzw. in Luft mit 97 % rel. Luftfeuchtigkeit gefüllt (s. Tabellen 2. 3 und Abschn. 2.3.1).

Für den sogenannten "Eistest" kamen Proben üblichen Formats zur Anwendung. Sie wurden, ohne davor bei 50 °C getrocknet zu werden, für 2 Tage in Schalen mit Wasser gelegt. Diese wurden dann in einen Kälteschrank gebracht, wo die Temperatur der Luft in 2 Stunden von +20 °C auf -20 °C abgesenkt worden ist. Nach einer Haltedauer von 4 Stunden wurde die Lufttemperatur innerhalb von 2 Stunden wieder auf +20 °C angehoben. Insgesamt nahm ein solcher Zyklus 12 Stunden in Anspruch.

4.2.1 Ergebnisse der Dilatationsmessung

In der Tabelle 6 sind für bestimmte Feuchtigkeitszustände und unterschiedliche Materialien die im 1. Frost-Tau-Wechsel ermittelten Werte für den Parameter $\Delta \epsilon_1$ aufgeführt. Die von verschiedenen Herstellerwerken stammenden Faser- und Asbestzemente wurden im Alter von nur wenigen Monaten (junges Material) oder

Tabelle 6

Ergebnisse der Dilatationsmessung

		Art der Sättigung	Differenz der bezogenen Längenänderung							$\Delta \epsilon_1$ in ‰		
			MG03A	LO02F	S004F	KG03F	MG03F	SG02F	MD08F	MD09F	KD03F	
M e s s u n g	in Herstellerlicht.	97% r.F.	-0,075	-0,301	-0,300	-0,237	-0,170	-0,115	-0,196	-0,233	-	
		Nat	-0,112	-0,368	-0,409	-0,276	-0,222	-0,247	-0,343	-0,343	-	
		Vak	-0,124	-0,307	-0,129	-0,177	-0,149	-0,245	-	-	-	
		V/D	-	-	-	-	-	-	-0,162	-0,162	-	
	quer zur Herstellerlicht.	97% r.F.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Nat	-0,117	-0,340	-	-	-0,223	-	-	-	-	
		Vak	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		V/D	+0,061	-0,181	-	-	+0,019	-	-	-	-	
	quer zur Plattenebene	97% r.F.	-0,135	-0,224	-0,294	-0,247	-0,419	-	+0,240	-0,173	+0,211	
		Nat	-0,063	-0,552	-0,579	-0,369	+0,320	-	-0,253	-0,553	-0,662	
		Vak	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		V/D	+1,251	+5,766	+9,224	+2,132	+5,418	-	+7,370	+8,190	+1,862	
	in Herstellerlichtung	carbonatisiert	97% r.F.	-0,026	-	-0,130	-	+0,030	-	-	-	-
			Nat	-0,079	-0,280	-0,249	-0,182	-0,149	-0,167	-	-	-
			Vak	-0,033	-	-0,178	-	-0,179	-	-	-	-
			V/D	-0,028	-0,178	+0,033	-0,068	-0,122	+0,060	-	-	-
		hydratisiert	97% r.F.	-0,093	-0,103	-	-	-0,039	-	-	-	-
			Nat	-0,072	-0,362	-	-	-0,155	-	-	-	-
			Vak	-0,097	-0,390	-	-	-0,130	-	-	-	-
			V/D	-	-	-	-	-	-	-	-	-

nach einer einjährigen Lagerung unter Wasser (hydratisiertes Material) bzw. nach 10 Monaten Lagerung in einer CO₂-haltigen Atmosphäre (carbonatisiertes Material) untersucht. Einzelheiten hierzu finden sich in den Abschnitten 2.1 und 2.4.

Die Feuchtigkeitszustände ergaben sich aus unterschiedlichen Lagerungsbedingungen (s. Abschn. 2.1.3). Die dabei erreichten Sättigungsgrade sind pauschal in der Tabelle 7 angegeben. Hierbei handelt es sich um Durchschnittswerte, die an anderen Proben unter gleichen Bedingungen ermittelt worden sind.

Tabelle 7
Äquivalente Sättigungsgrade der Dilatationsproben

	Art der Sättigung	S ä t t i g u n g s g r a d						S			
		MGO3A	LO02F	S004F	KG03F	MG03F	SG02F	MDO8F	MDO9F	KDO3F	
M a t e r i a l	Jung	97% r.F.	0,88	0,77	0,80	0,76	0,84	0,87	-	-	x 0,42
		Nat	0,90	0,87	0,88	0,79	0,89	0,93	0,85	0,85	0,84
		Vak	0,96	0,96	0,95	0,97	0,95	0,97	-	-	x 0,91
		V/D	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	carbonatisiert	97% r.F.	0,60	0,58	0,47	0,61	0,54	0,62	-	-	-
		Nat	0,86	0,84	0,88	0,90	0,87	0,90	-	-	-
		Vak	x 0,97	x 0,97	x 0,94	x 0,98	x 0,99	x 0,98	-	-	-
		V/D	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-	-
	hydratisiert	97% r.F.	* 0,74	x 0,48	* 0,64	x 0,34	* 0,71	x 0,53	-	-	-
		Nat	0,97	x 0,86	0,96	x 0,90	0,95	x 0,89	-	-	-
		Vak	x 1,00	x 0,98	x 1,00	x 0,96	x 0,99	x 0,98	-	-	-
		V/D	1,00	x 1,00	1,00	x 1,00	1,00	x 1,00	-	-	-
Sät-Grade meistens den Serien FB, FBC, FBH entnommen; x = Serien P, PC, PH;											
* Sät-Grade der Serie PH (mit 105 ° C - Vortrocknung): MGO3A = 0,50 ; S004F = 0,42 ; MG03F = 0,42											

Tabelle 6 weist die jungen Materialien bei der Messung in Herstellrichtung und quer dazu überwiegend als kontrahierende Systeme aus, auch dann, wenn die Sättigungsgrade deutlich über 0,9 liegen. Nur eine gepreßte Faserzementvariante und der Asbestzement vollziehen bei der höchsten Porenfüllung geringfügige Expansionen.

Bei der Meßrichtung orthogonal zur Plattenebene expandieren bereits zwei autoklavierte Proben, die ihren Feuchtigkeitsgehalt durch Lagerung in Luft mit 97 % r.F. erreicht haben, und eine natürlich erhärtete Faserzementart, die durch Unterwasserlagerung gesättigt worden ist. Die Proben mit dem höchsten Sättigungsgrad weisen durchweg Expansionen auf, deren Werte zwischen 1,25 ‰

(Asbestzement) und 9,22 ‰ (ungepreßter Faserzement) liegen. Die drei autoklavierten Materialien zeigen in zwei Fällen mit 8,19 ‰ bzw. 7,37 ‰ sehr hohe Werte der Expansion, während diese bei der dritten Art nur 1,87 ‰ beträgt. Bemerkenswert ist auch der Umstand, daß die zweite ungepreßte Faserzementvariante mit 5,76 ‰ in der Nähe jener Werte liegt, die das gepreßte Material bringt.

Die beim hydratisierten Material durchgeführten Messungen in Herstellrichtung ergaben ausschließlich Kontraktionen. Dagegen finden sich bei den carbonatisierten Proben, deren Sättigungsgrade durch Lagerung in Luft mit 97 % r.F. eingestellt waren, in einem Falle und bei jenen, die im Vakuum-Druck-Verfahren gesättigt worden waren, in zwei Fällen unbedeutende Expansionen.

Das an nahezu vollständig gesättigtem Material ermittelte Ergebnis der Messung orthogonal zur Plattenebene macht einerseits deutlich, wie unterschiedlich die Porensysteme der untersuchten Proben sind, denn der Betrag der Expansion steht hier offensichtlich für den Anteil des gefrierbaren Wassers. Andererseits wird aber auch offenbar, daß die Volumenzunahme des Wassers bei der Änderung des Aggregatzustandes nur senkrecht zu den Lagen Zugbeanspruchungen verursacht. Diese ergeben sich aus der Anisotropie des Materials, das dort dem Druck des Eises ausweicht (Abb. 43), wo der Widerstand am geringsten ist. Bei Faser- und Asbestzementen ist dies die unbewehrte Richtung des Werkstoffs. Daraus ergibt sich, daß der von Frost-Tau-Wechseln verursachte Gefügeschaden hauptsächlich mit jener Festigkeitsart charakterisiert werden kann, die diese Richtung erfaßt. Dies ist die Querkzugfestigkeit.

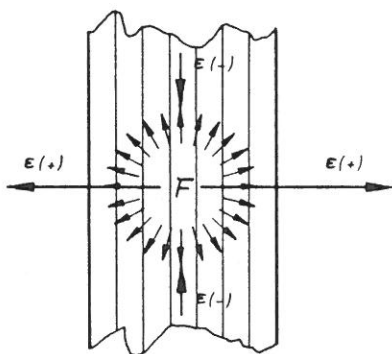


Abb. 43

Kraft- und Deformationsmodell nahezu vollständig wassergesättigter Asbest- und Faserzemente

4.2.2 Materialveränderung infolge vieler Frost-Tau-Wechsel

Die in den Abb. 44 und 45 dargestellten Werte der Biegezug- und Querkzugfestigkeit wurden an Proben ermittelt, die dem Behandlungsablauf der Teilbilder 3a, c und d unterzogen waren, wobei von den Lagerungsarten der Abb. 3a nur die Fälle 97 % r.F., NAT und VAK herangezogen werden. Die Proben der übrigen Lagerungs-

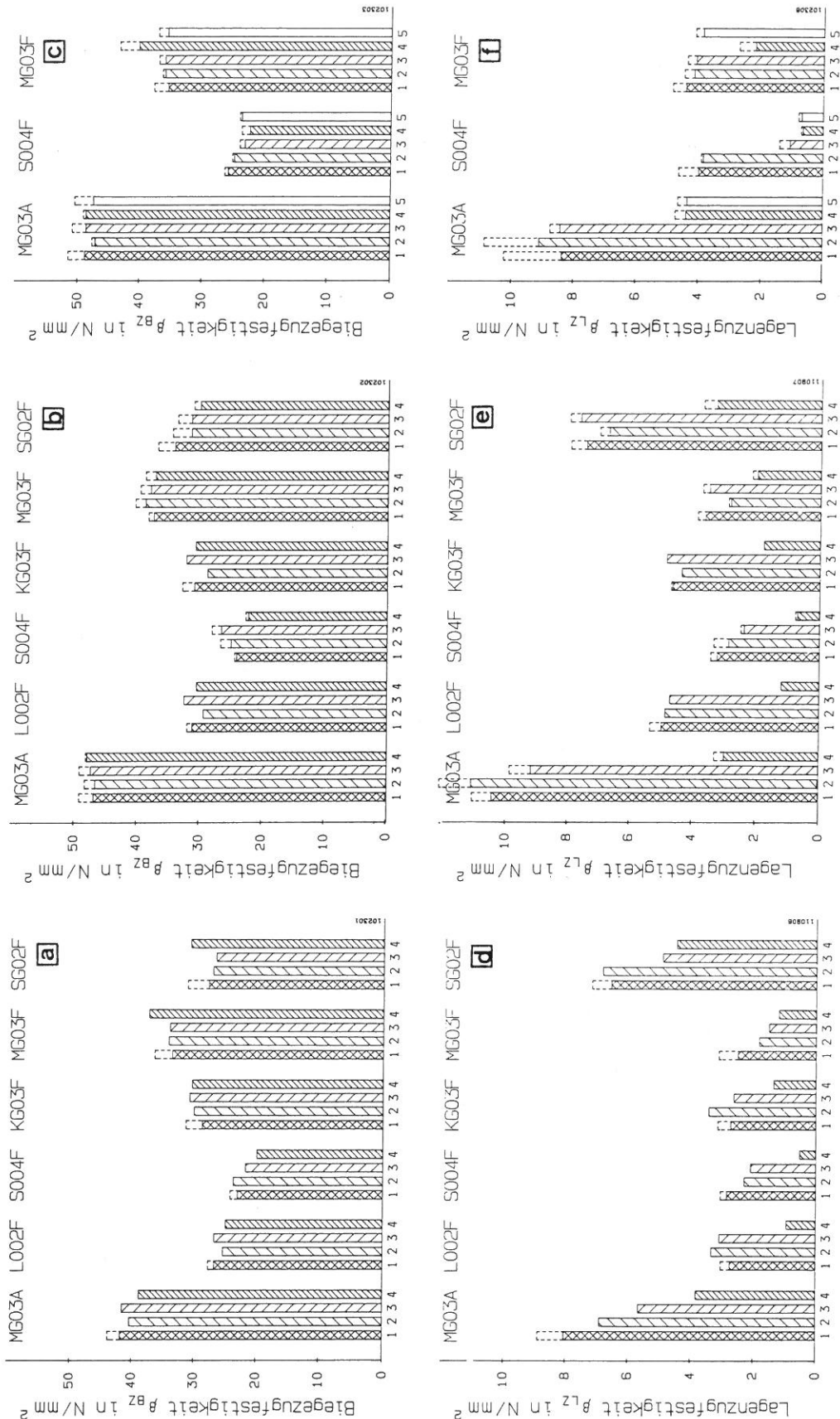


Abb. 44 a,b,c,d,e,f
 Biezug- (a,b,c) und Lagenzugfestigkeit (d,e,f) nach 200 (a,d) bzw. 100 (b,c,e,f) Frost-Tau-Wechseln (FTW)
 a, d = jung
 b, e = carbonatisiert
 c, f = hydratisiert
 1 = Bezugsproben ohne FTW
 2 = 97%-r.F.-gesättigt, FTW
 3 = naturgesättigt, FTW
 4 = VAK- (a,d) bzw. V/D-gesättigt, FTW
 5 = nur "hydratisiert", FTW

arten wiesen nach den Frost-Tau-Wechseln gegenüber den Bezugsproben keine Festigkeitsunterschiede auf, so daß aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Darstellung der Ergebnisse verzichtet wird.

Es ist auffallend, daß 200 bzw. 100 Frost-Tau-Wechsel auch bei nahezu vollständigen

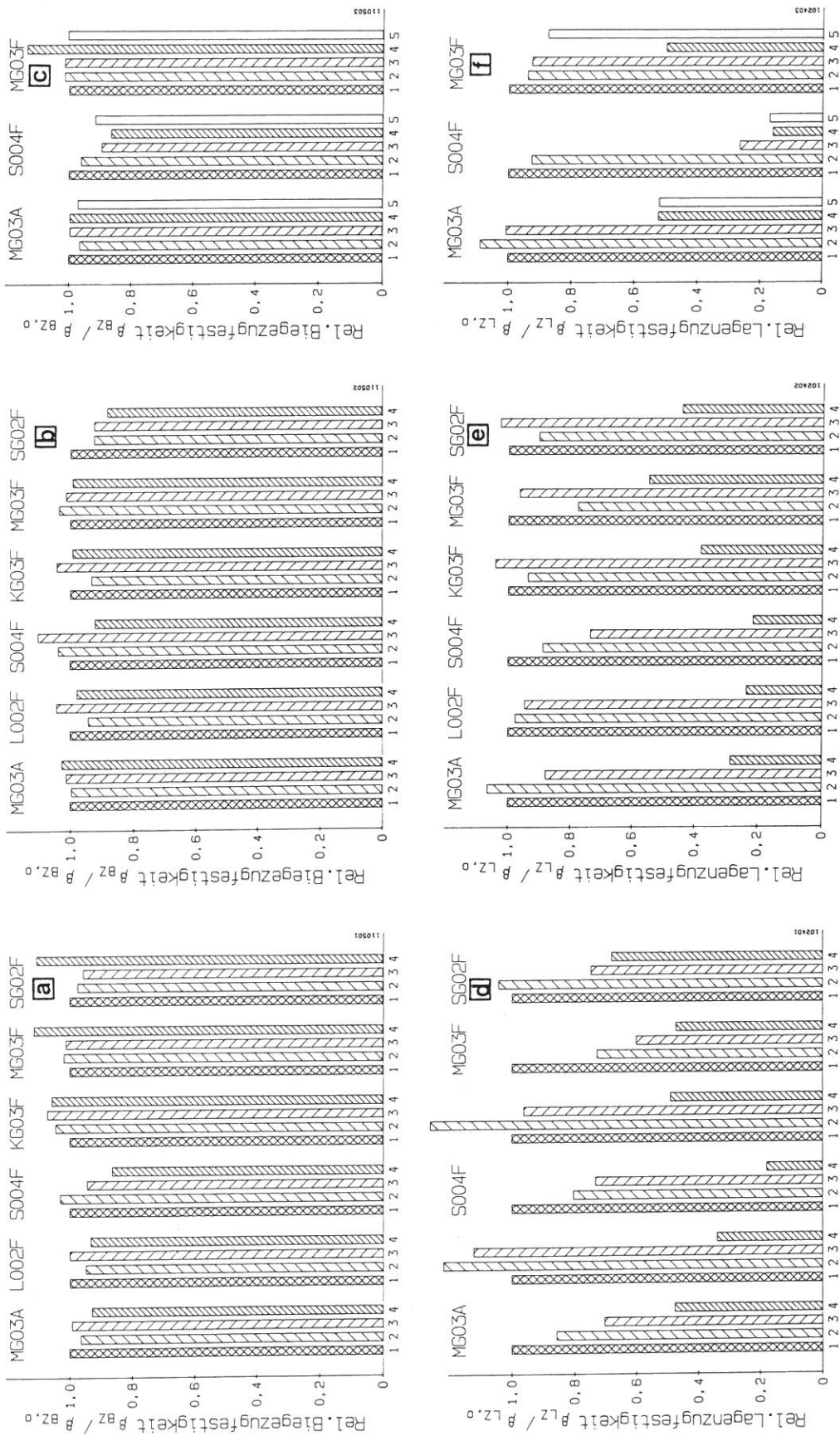


Abb. 45 a,b,c,d,e,f

Relative Biegezug- (a,b,c) und Lagenzugfestigkeit (d,e,f) nach 200 (a,d) bzw. 100 (b,c,e,f) Frost-Tau-Wechseln (FTW)

a, d = jung

b,e = carbonatisiert

c,f = hydratisiert

1 = Bezugsproben ohne FTW

4 = VAK- (a,d) bzw. V/D-gesättigt, FTW

2 = 97%-r.F.-gesättigt, FTW

5 = nur "hydratisiert", FTW

3 = naturgesättigt, FTW

dig gesättigtem Material zu keinen markanten Verlusten der Biegezugfestigkeit geführt haben. Dies gilt sowohl für junges, carbonatisiertes als auch hydratisiertes Material. Demgegenüber ergeben sich bei hoch gesättigten Proben bemerkenswerte Minderungen der Querszugfestigkeiten. Der höchste Verlust tritt bei

einer ungepreßten Faserzementvariante auf. Ein Vergleich zwischen dem Asbestzement und den gepreßten Faserzementen zeigt, daß die letzteren hinsichtlich der Minderung der Querkzugfestigkeit infolge der Befrostung dem Asbestzement nicht nachstehen. Dies stellt besonders Abb. 45 heraus, wo die Ergebnisse als Verhältniswerte dargestellt sind.

Abb. 46 stellt die Biegezug- und Querkzugfestigkeit von 3 autoklavierten Faserzementen (MD08F, MD09F und KD03F) sowie verschiedener Asbestzemente der Reihe "Sonderuntersuchungen" dar. Abgesehen von nur geringen Verlusten der Biegezugfestigkeit bei den Materialien M007M und M006A, wird auch hier bestätigt, daß die von der Frostbeanspruchung verursachten Gefügeschäden in erster Linie die Richtung senkrecht zur Plattenebene betreffen. Diese Aussage steht voll im Einklang mit den Ergebnissen der Dilatometrie.

Die Abb. 47, 48 und 49 stehen mit der Frage in Verbindung, inwieweit die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel die Entwicklung der Festigkeit beeinflusst. Bei Proben des

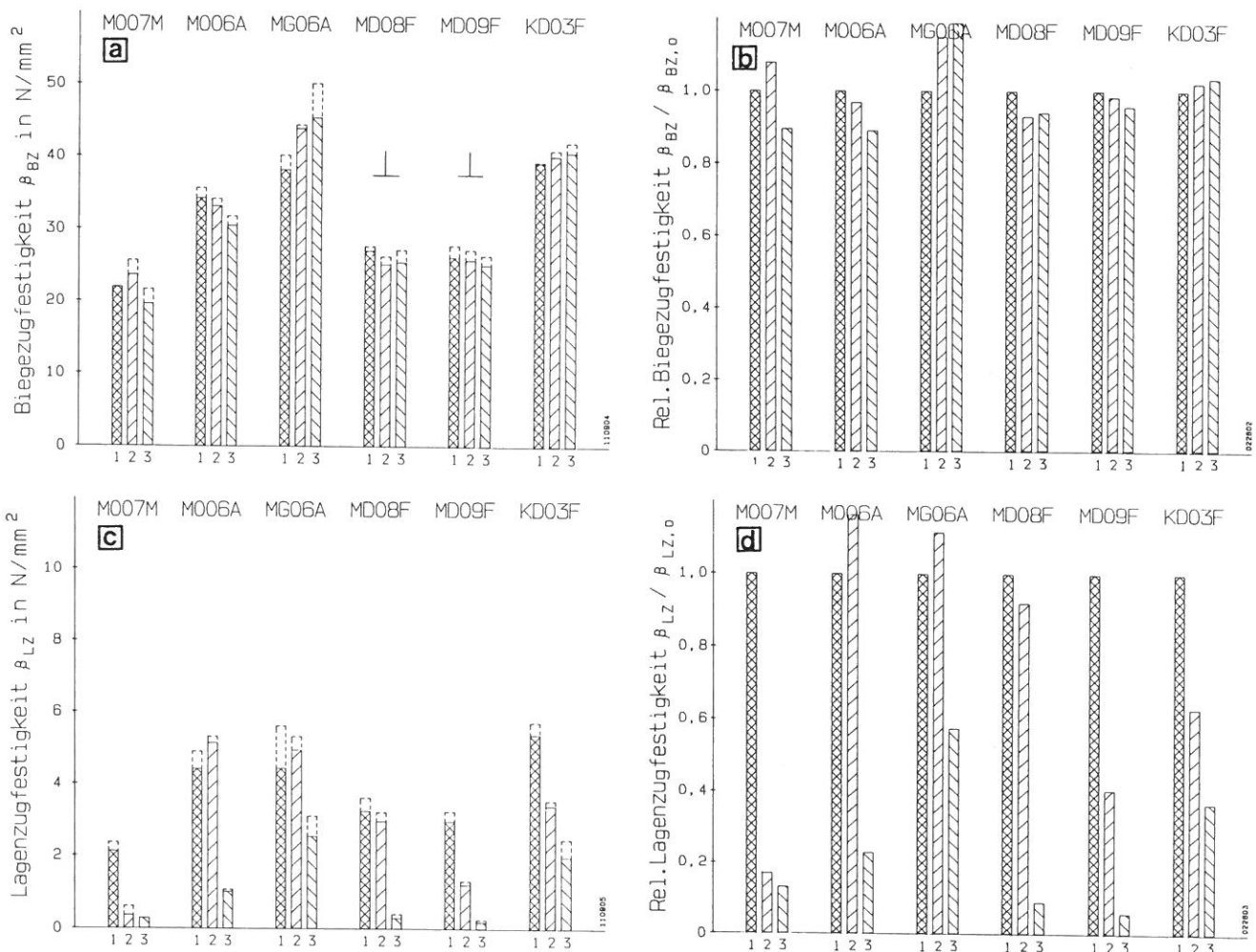


Abb. 46 a,b,c,d

Biegezug- (a,b) und Lagenzugfestigkeit (c,d) von Materialien der Sonderuntersuchungen nach 50 Frost-Tau-Wechseln (FTW)

a,c absolute Werte

b,d rel. Werte, bezogen auf Zustand ohne FTW

1 = Bezugsproben ohne FTW

2 = naturgesättigt, FTW

3 = V/D-gesättigt, FTW

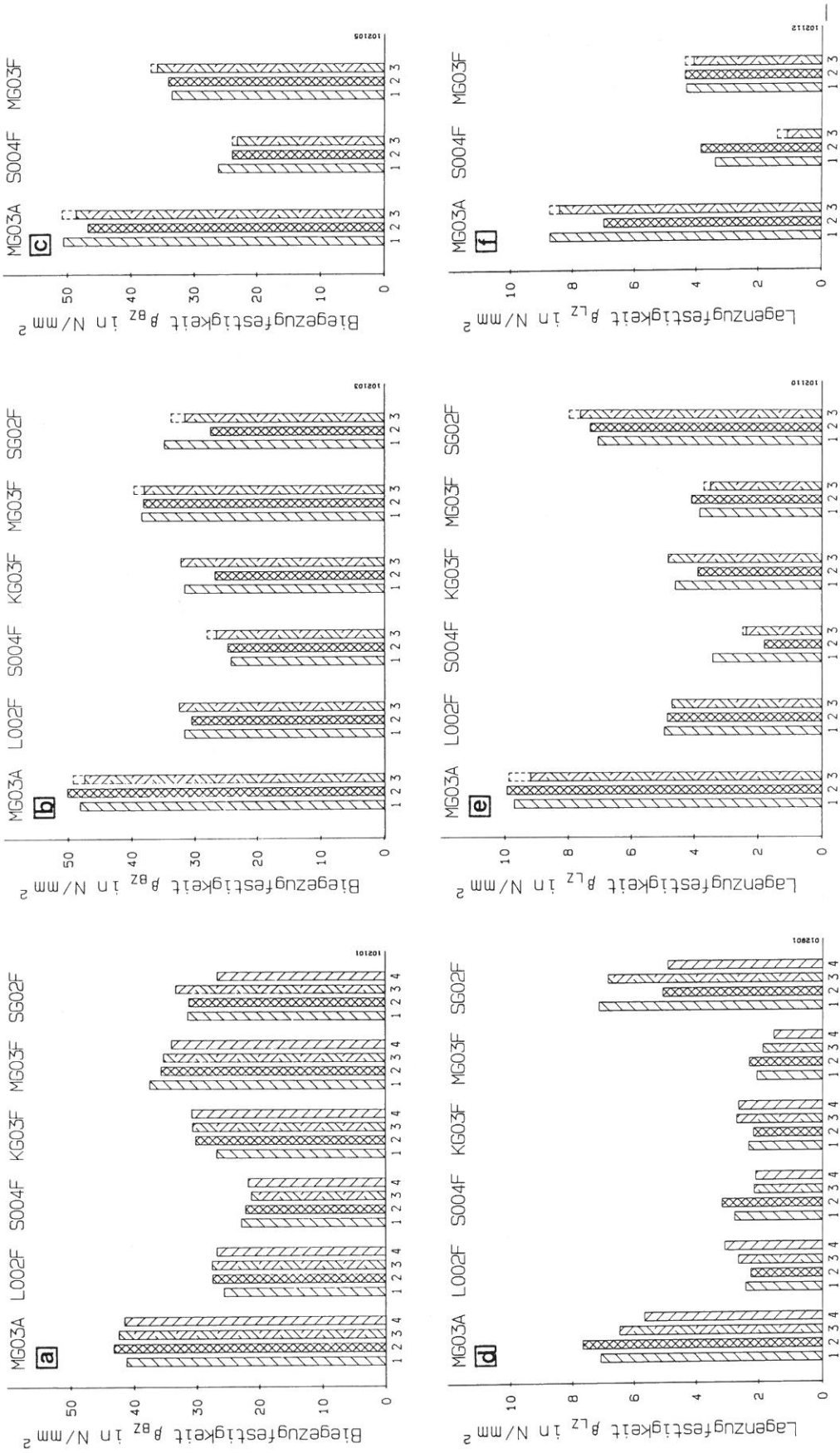


Abb. 47 a,b,c,d,e,f Biegezug- (a,b,c) und Lagenzugfestigkeit (d,e,f) des naturgesättigten Materials nach 0, 50, 100 und 200 Frost-Tau-Wechseln (FTW)

a, d = jung
 1 = 0 FTW
 b, e = carbonatisiert
 2 = 50 FTW
 c, f = hydratisiert
 3 = 100 FTW
 4 = 200 FTW (nur Jung)

Feuchtigkeitszustandes "naturgesättigt" lassen sich Tendenzen allenfalls für die Querzugfestigkeit des jungen Asbestzementes sowie des ungepreßten hydratisierten Faserzementes S004F erkennen. Diese Aussage gilt annähernd auch für jenes Material, das ein Jahr unter Wasser lagerte und in diesem Zustand befristet worden

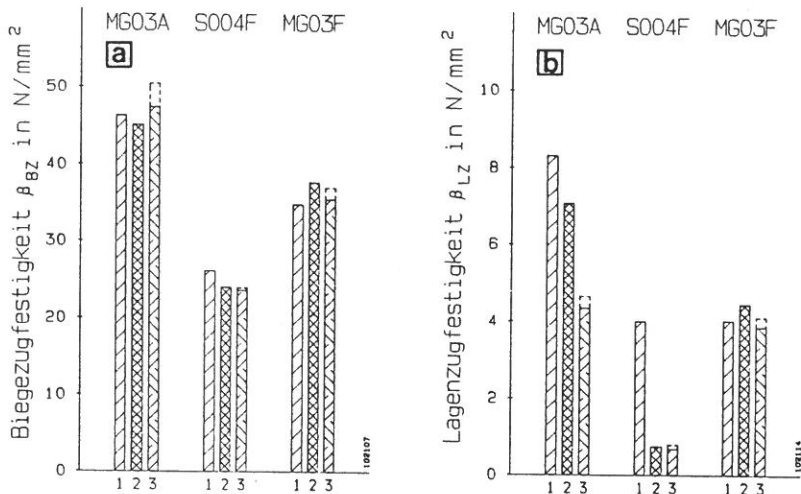


Abb. 48 a,b

Biegezug- (a) und Lagenzugfestigkeit (b) des 1 Jahr lang im Wasser gelagerten ("hydratisierten") Materials nach 0 (Balken 1), 50 (Balken 2) und 100 (Balken 3) Frost-Tau-Wechseln

ist (Abb. 48). Die nahezu vollständig gesättigten Materialien zeigen eher, daß der wesentliche Verlust an Querszugfestigkeit schon während der ersten 50 Zyklen eintritt. Weitere Befrostung führt nur noch zu geringen Veränderungen, wobei das Material SG02F hier eine Ausnahme zu machen scheint.

Insgesamt ergibt sich aber kein einheitliches Bild. Auch hier wäre es wünschenswert gewesen, den aufgezeigten Trend durch eine größere Anzahl von Einzelwerten zu erhärten. Dies wäre aber nur auf Kosten anderer Untersuchungsmethoden möglich gewesen. Trotzdem können die Ausführungen zu diesem Fragenkomplex mit der Feststellung abgeschlossen werden, daß dort, wo Volumeneffekte infolge Aggregatzustandsänderungen des Wassers auftreten, der maßgebliche Schaden schon nach wenigen Zyklen feststellbar ist.

Inwieweit sich die durch den dyn. E-Modul charakterisierten elastischen Eigenschaften während der Frost-Tau-Wechsel geändert haben, zeigt Abb. 50. Den Bildern ist zu entnehmen, daß auch bei nahezu vollständig gesättigten Proben die Abnahme der Werte für den dyn. E-Modul gering ist. Am deutlichsten sind Veränderungen beim carbonatisierten Material erkennbar. Aber auch in diesem Falle erweist sich das Verfahren als zu wenig empfindlich, um mit hinreichender Zuverlässigkeit Lagenverbundschäden anzuzeigen. Möglicherweise spielt hier der Umstand eine Rolle, daß der hohe Wassergehalt der Proben die elastischen Eigenschaften des Materials zugunsten der plastischen herabsetzt. An stark gedämpften Systemen lassen sich Gefügeveränderungen mit dynamischen Methoden nicht ohne weiteres erkennen.

Die Entwicklung der Gefügeverhältnisse als Folge der Frost-Tau-Wechsel läßt sich z.B. mit den Parametern der kapillaren Wasseraufnahme aber auch den Werten der

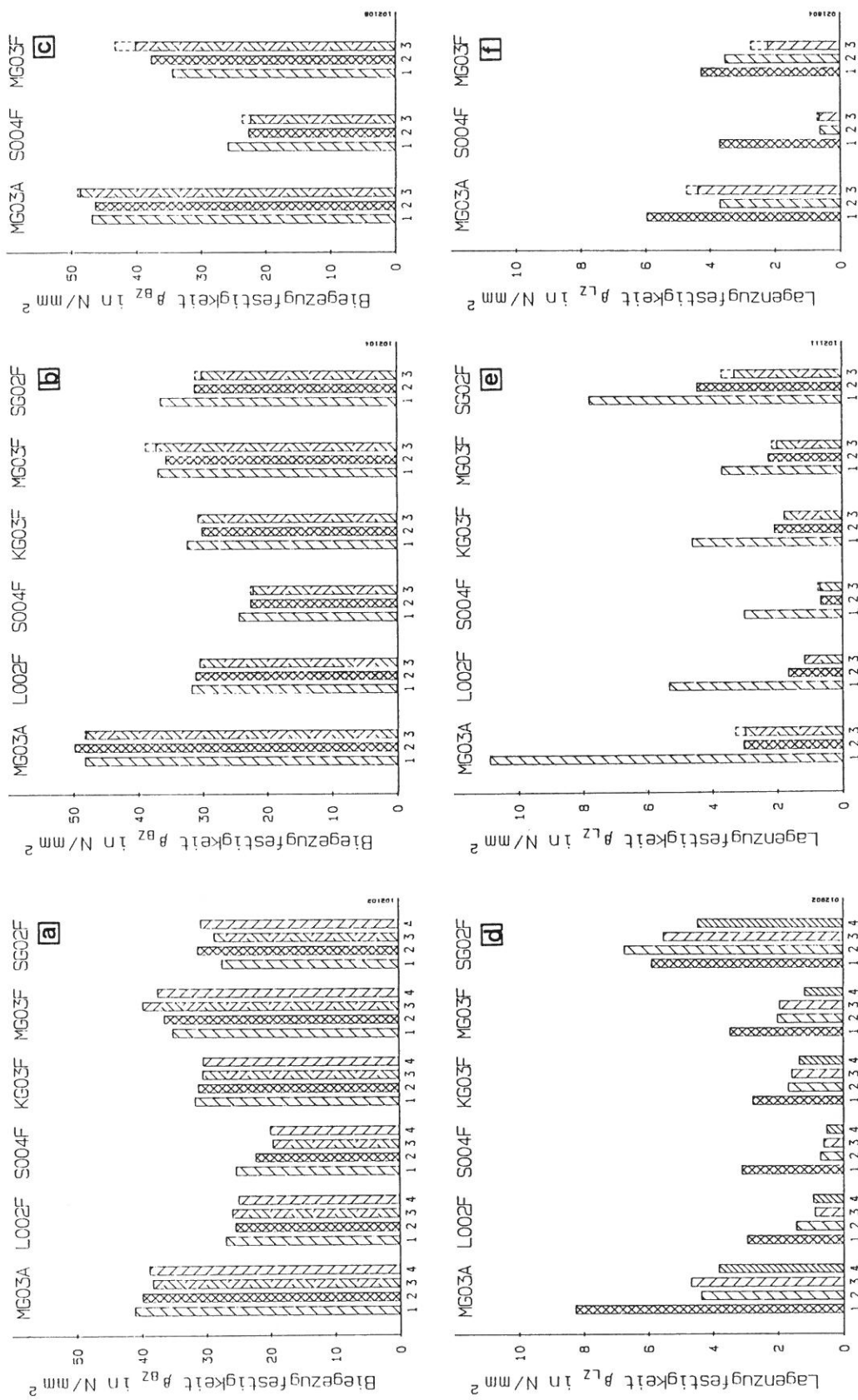


Abb. 49 a,b,c,d,e,f

Biegezug- (a,b,c) und Lagenzugfestigkeit (d,e,f) des Vakuum- (a,d) bzw. Vakuum-Druck-gesättigten (b,c,e,f) Materials nach 0, 50, 100 und 200 Frost-Tau-Wechseln (FTW)

a, d = jung

b,e = carbonatisiert

c,f = hydratisiert

1 = 0 FTW

2 = 50 FTW

3 = 100 FTW

4 = 200 FTW (nur jung)

Rohdichte oder Porosität beschreiben. Nachteilig ist, daß die Ergebnisse infolge von Materialunterschieden innerhalb der Tafeln mehr oder weniger streuen, so daß sich ein klares Bild im allgemeinen erst bei einer größeren Anzahl von Einzelwerten ergibt. Da die Ergebnisse der Proben zur Vorbehandlungsart 1 bis 6 nach

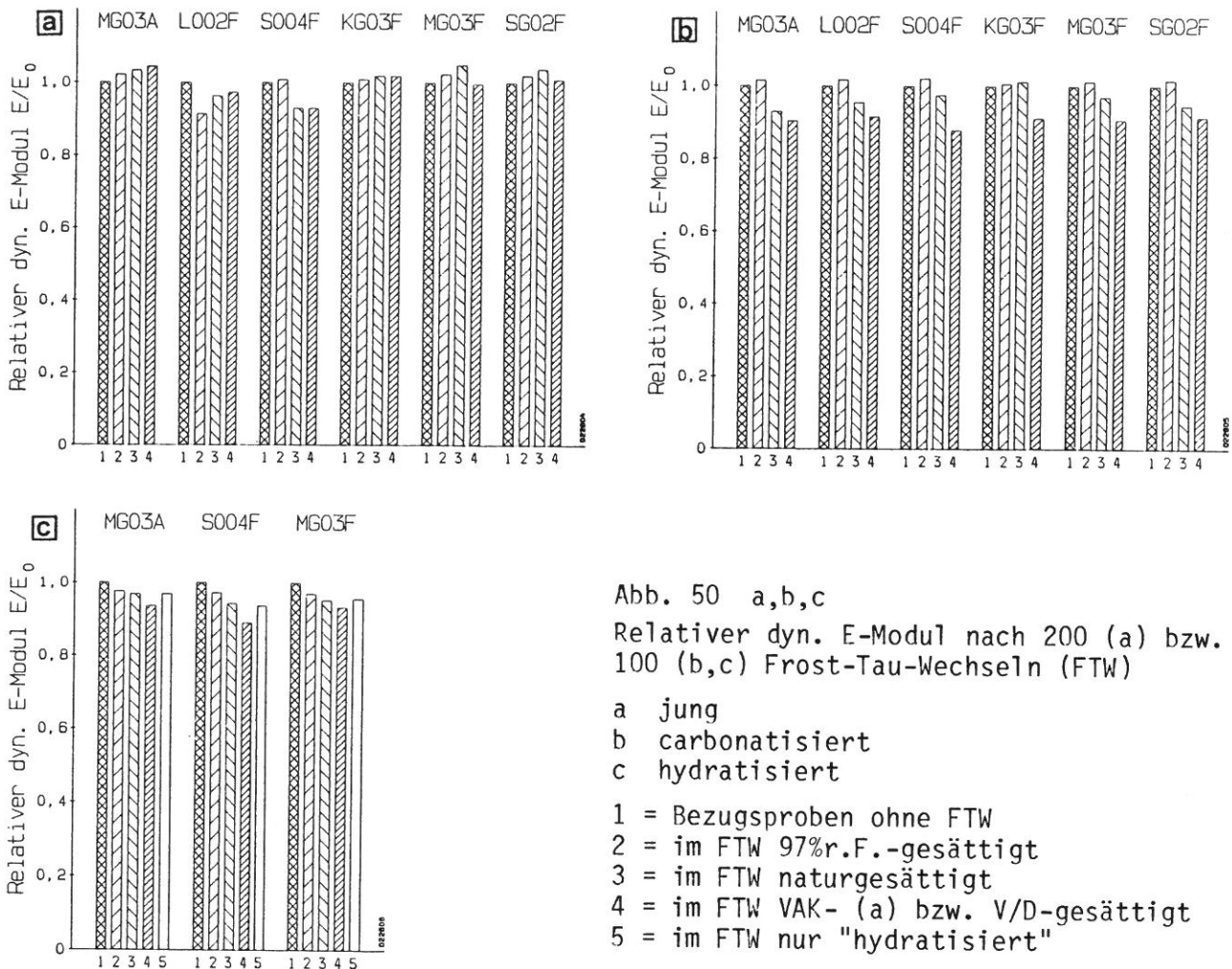


Abb. 3a keine markanten Unterschiede aufgewiesen haben, sind sie zusammengefaßt und als Mittelwerte in Abb. 51 dargestellt worden (Balken 2). Ein Vergleich dieser Mittelwerte mit den Bezugswerten oder den Ergebnissen der nahezu vollständig gesättigten Proben (Vorbehandlung 7) läßt Tendenzen im Verhalten der Materialien erkennen.

Deutlich werden diese beim Asbestzement sichtbar. Der Abb. 51 ist zu entnehmen, daß für diese Materialart die Parameter der kapillaren Wasseraufnahme bei der am intensivsten beanspruchten Probe nach 200 Frost-Tau-Wechseln ungünstiger, die Rohdichte niedriger und die Porosität höher geworden sind. Hier scheint ein Zusammenhang zwischen der Abnahme der Querkzugfestigkeit (Abb. 44) und den porenraumbezogenen Kennwerten zu bestehen. Bei den Faserzementen lassen sich ähnliche Hinweise finden, jedoch scheinen die Ergebnisse nicht immer ganz widerspruchsfrei zu sein. Dies hat sicherlich auch darin seinen Grund, daß es in der überwiegenden Anzahl der Fälle nicht möglich ist, die zu vergleichenden Parameter an derselben Materialprobe zu ermitteln.

Dieses Problem scheint auch bei den in Abb. 52 dargestellten Ergebnissen eine

Rolle gespielt zu haben. Die hier angegebenen Werte des spez. Porenvolumens stehen nicht im Einklang mit den Ergebnissen der Porosität der Abb. 51.

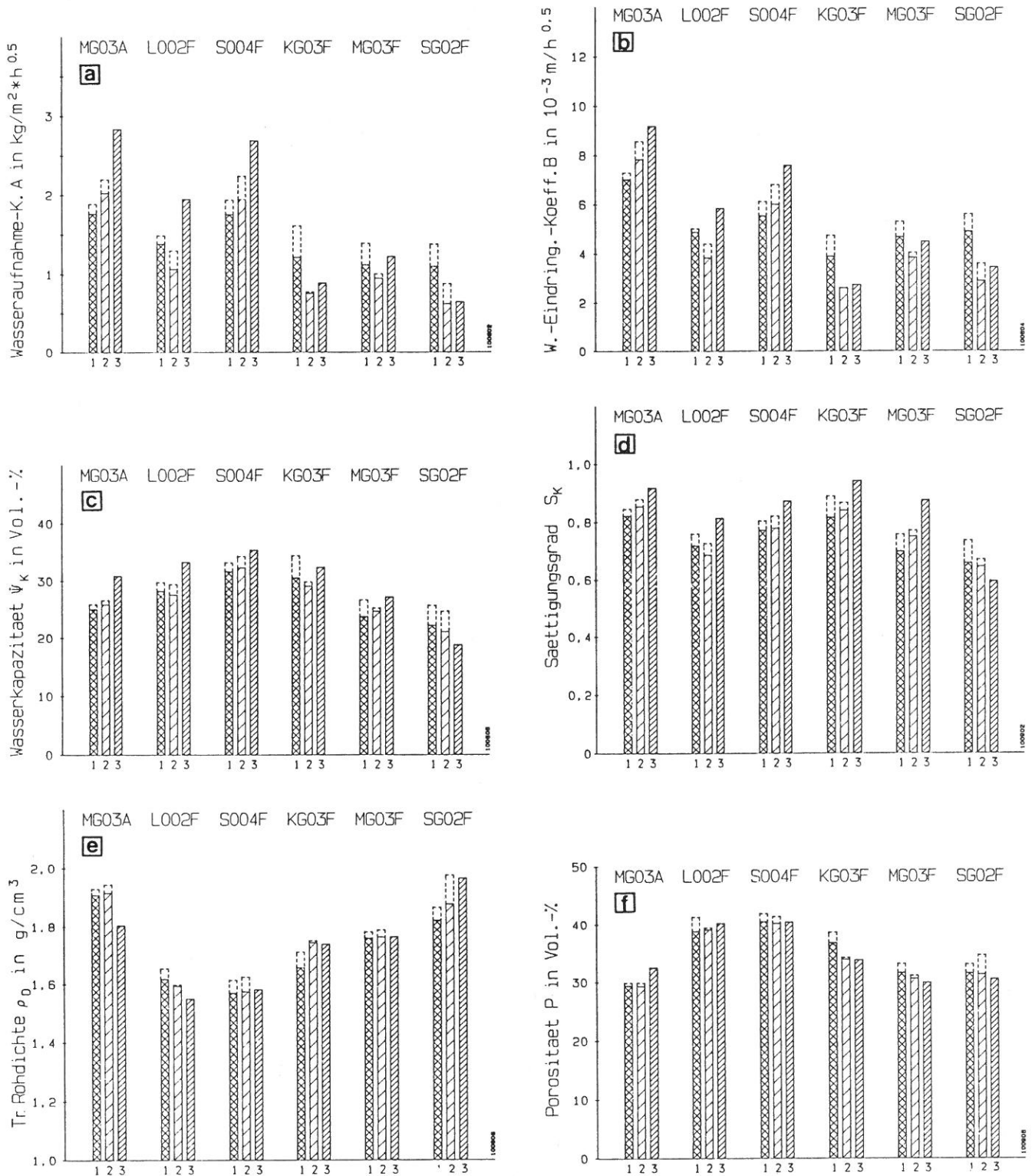


Abb. 51 a,b,c,d,e,f

Änderung der Kennwerte der kapillaren Wasseraufnahme, der Porosität und der Trocken-Rohdichte nach 200 Frost-Tau-Wechseln

- 1 = ohne Behandlung (Serie GE)
- 2 = nach 200 FTW, Vorbehandlung 1 bis 6 (Serie FB)
- 3 = nach 200 FTW, Vorbehandlung 7 (=VAK; Serie FB)

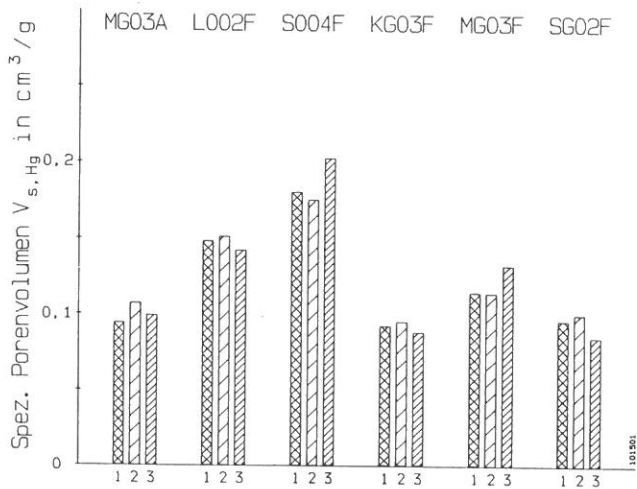


Abb. 52

Änderung des spez. Porenvolumens nach 200 Frost-Tau-Wechseln (ermittelt durch Hg-Porosimetrie)

- 1 = ohne Behandlung (Serie GE)
- 2 = nach 200 FTW, Vorbehandlung 1 bis 6 (Serie FB)
- 3 = nach 200 FTW, Vorbehandlung 7 (Serie FB)

Somit erweist sich von den hier angewendeten Untersuchungsverfahren die Prüfung auf Querzugfestigkeit als die mit Abstand empfindlichste Methode zur Erkennung von Gefügeschäden.

4.2.3 Materialveränderung infolge Einfrierens im Wasser

Das zyklische Einfrieren und Auftauen von porösem Material im Wasser stellt eine harte Beanspruchung dar. Wie Abb. 53 zeigt, kann es bei Asbest- oder Faserzemen-

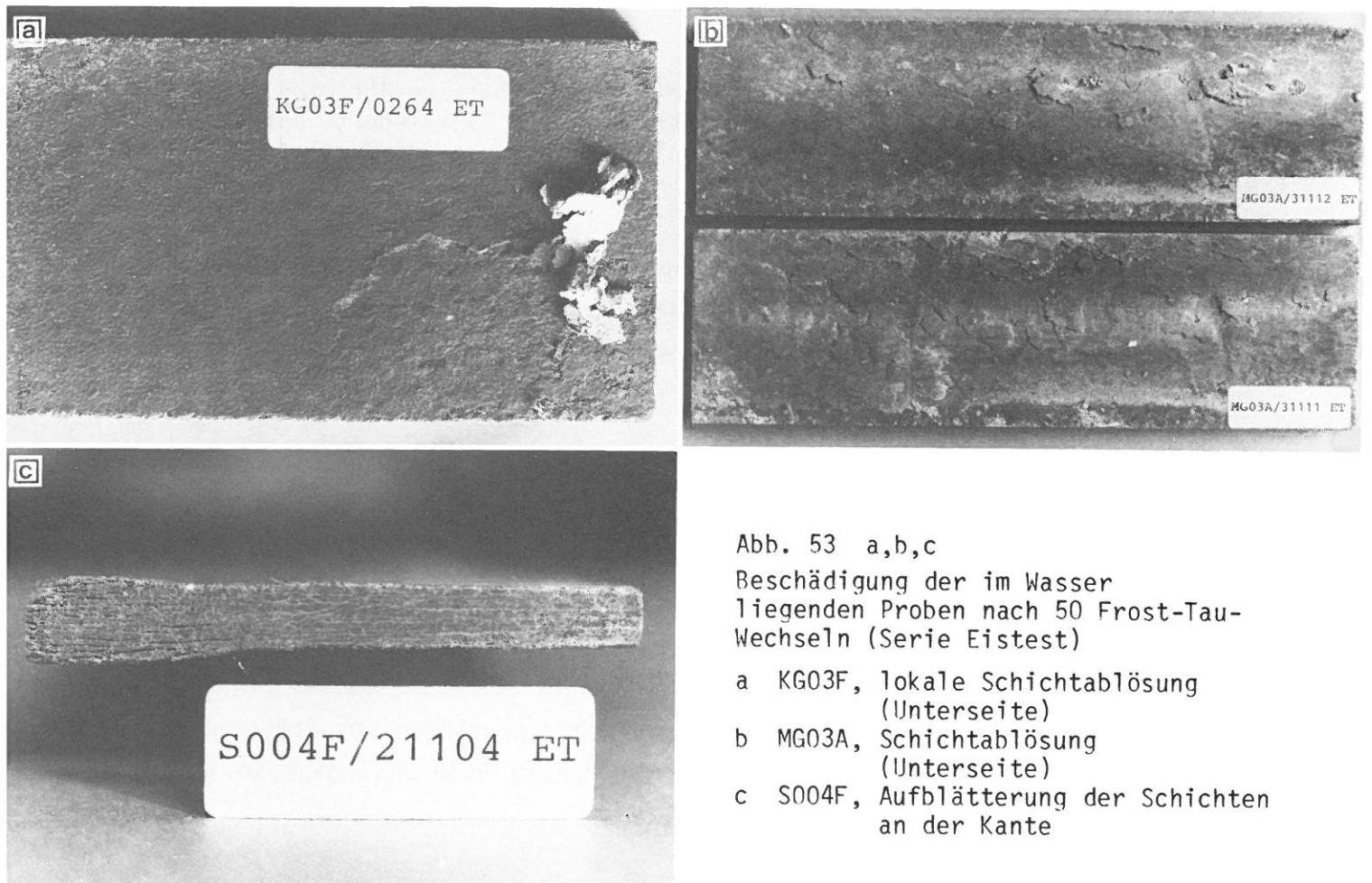


Abb. 53 a,b,c

Beschädigung der im Wasser liegenden Proben nach 50 Frost-Tau-Wechseln (Serie Eistest)

- a KG03F, lokale Schichtablösung (Unterseite)
- b MG03A, Schichtablösung (Unterseite)
- c S004F, Aufblätterung der Schichten an der Kante

ten zur Beschädigung des Oberflächenbereiches oder auch zu schwerwiegenden Lagentrennungen kommen. Bilder dieser Art lassen vermuten, daß auch die Festigkeitseigenschaften der solchen Beanspruchungen unterzogenen Proben in starkem Maße beeinträchtigt werden. Abb. 54 zeigt jedoch, daß die Biegezugfestigkeit nur in zwei Fällen unter das 0,9fache des Vergleichswertes gefallen ist. Bemerkenswert ist, daß die Probe mit den sichtbaren Lagenverbundschäden (S004F) nur geringfügige Einbußen aufweist. Demgegenüber sind die Abnahmen der Querkzugfestigkeit erheblich. Hier wird besonders deutlich, welche eine Rolle die Querkzugfestigkeit bei der Identifizierung von Gefügeschäden spielt.

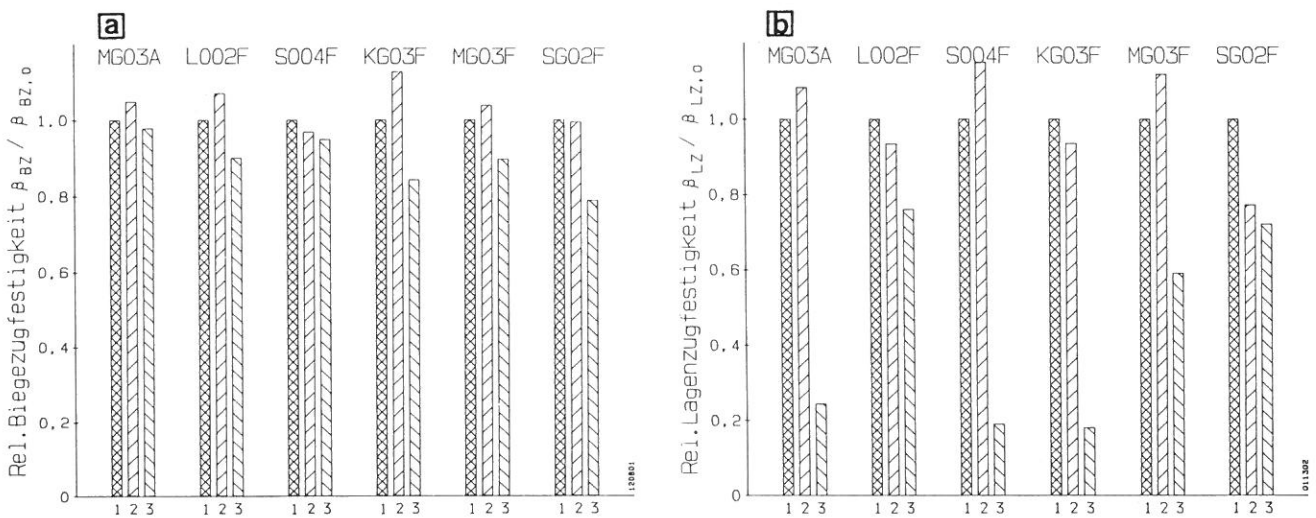


Abb. 54 a,b
Relative Biegezug- (a) und Lagenzugfestigkeit (b) des naturgesättigten Materials nach 50 Frost-Tau-Wechseln als Vergleich der Serien FB (versiegelt; Balken 2) und ET (unversiegelt, im Wasser liegend; Balken 3) bezogen auf Zustand ohne FTW (Balken 1)

Auch die Entwicklung der Kennwerte der kapillaren Wasseraufnahme, der Trocken-Rohdichte und der Porosität (Abb. 55) signalisiert Veränderungen des Werkstoffgefüges. Aus den bereits genannten Gründen ist aber das Verhalten auch hier nicht einheitlich.

Demgegenüber lassen sich anhand der Entwicklung des spez. Porenvolumens in Abb. 56 Zunahmen des Porenraumes ablesen, die auf eine Zerrüttung des Gefüges hindeuten. Auch hier können jedoch nur Tendenzen aufgezeigt werden, weil es sich um Einzelwerte handelt.

Schließlich soll noch erwähnt werden, daß die Ergebnisse des Eistests eindrucksvoll demonstrieren, daß die Biegezugfestigkeit zur Erkennung von Gefügeschäden an Asbest- oder Faserzement nur in untergeordnetem Maße herangezogen werden kann.

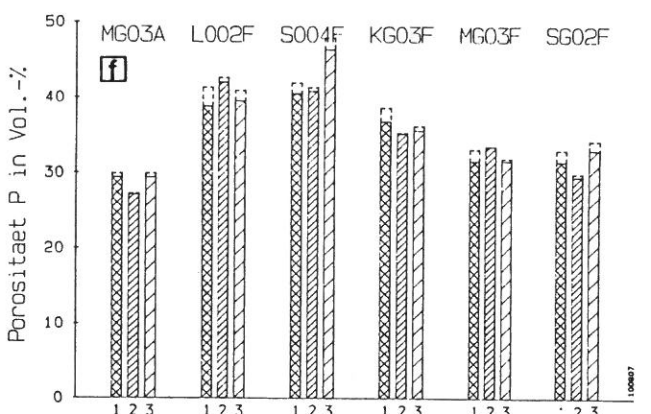
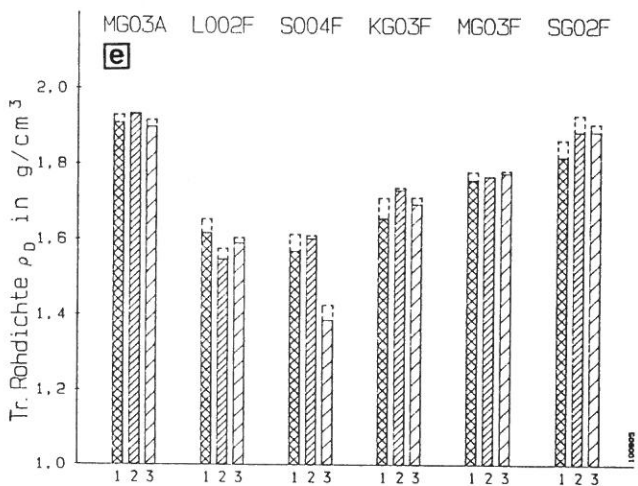
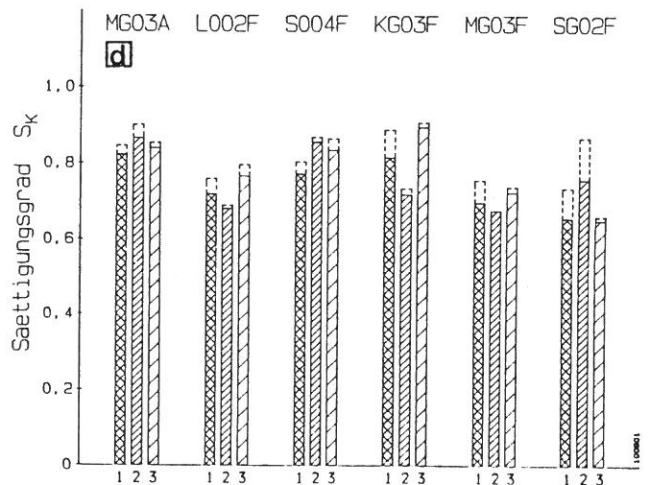
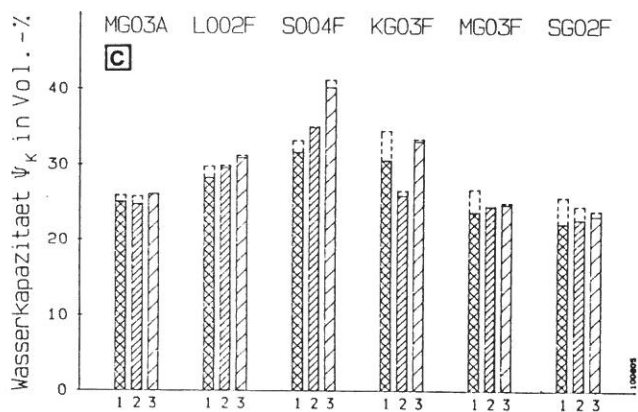
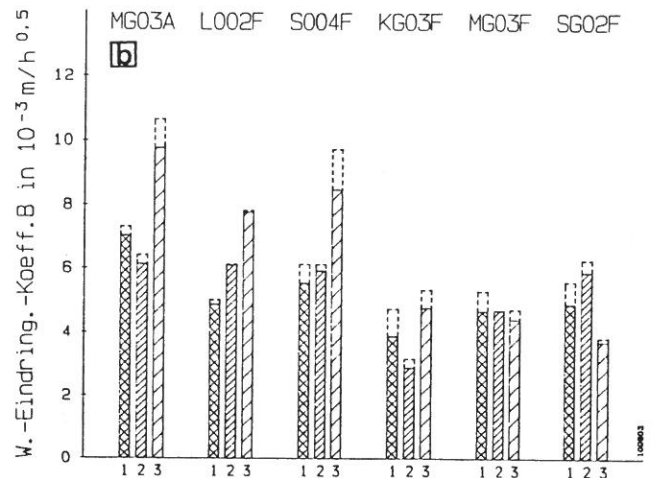
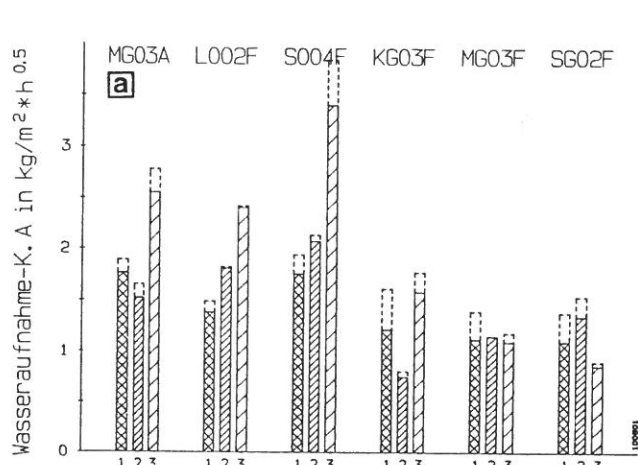


Abb. 55 a,b,c,d,e,f

Änderung der Kennwerte der kapillaren Wasseraufnahme, der Porosität und der Trocken-Rohdichte von unversiegelten, im Wasser liegenden Proben nach 50 FTW (Serie ET, Balken 3) im Vergleich zu Kennwerten der Proben ohne Behandlung (Serie GE, Balken 1) bzw. nach Hydratisierung ohne FTW (Serie GEH, Balken 2)

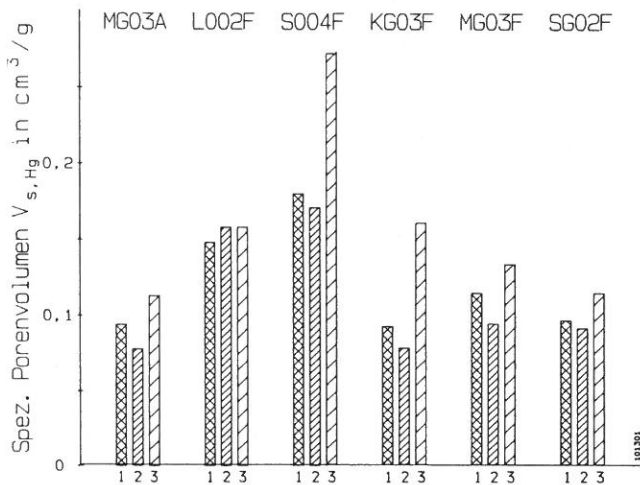


Abb. 56

Änderung des spez. Porenvolumens der im Wasser liegenden Proben nach 50 FTW (ermittelt durch Hg-Porosimetrie)

- 1 = ohne Behandlung (Serie GE)
- 2 = nach Hydratisierung (Serie GEH)
- 3 = nach 50 FTW, unversiegelt, im Wasser liegend (Serie ET)

4.2.4 Zusammenhang zwischen der Verformung orthogonal zur Plattenebene und der Querzugfestigkeit

Die in Abschnitt 3 beschriebenen Phänomene, namentlich die negativen Auswirkungen der Porenflüssigkeit, führen vor allem für die nichtbewehrte Richtung zu deutlichen Minderungen der Festigkeit gegenüber trockenem Material. Den Einfluß des Wassergehaltes auf die Querzugfestigkeit von unbefrostedem Material zeigt Tabelle 8. Die "feuchten" Proben weisen einen Sättigungsgrad von mindestens 0,9 auf, die "trockenen" einen solchen, wie er sich nach langer Lagerung im Normal-klima einstellt. Die Minderungen von etwa 40 bis 50 % machen deutlich, daß dem Feuchtigkeitsgehalt der Proben bei der Ermittlung der Abnahme der Querzugfestigkeit infolge Frostbeanspruchung Rechnung zu tragen ist. Nur so können Fehlinterpretationen der Ergebnisse vermieden werden.

Tabelle 8

Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes auf die Lagenzugfestigkeit

Materialart	Lagenzugfestigkeit (N/mm^2) im Zustand				Verhältniswert feucht/trocken
	n	feucht	n	trocken	
MGO3A	13	$5,25 \pm 0,54$	4	$9,09 \pm 0,42$	0,58
LO02F	16	$1,99 \pm 0,19$	6	$4,05 \pm 0,25$	0,49
S004F	15	$1,73 \pm 0,19$	6	$2,74 \pm 0,30$	0,63
MGO3F	15	$1,40 \pm 0,20$	6	$2,58 \pm 0,16$	0,54

Um den Zusammenhang zwischen der inneren Beanspruchung, gekennzeichnet durch die Verformung orthogonal zur Plattenebene, und der Querzugfestigkeit experimentell zu belegen, waren Versuchsbedingungen zu schaffen, die es erlaubten, an derselben Probe sowohl die Verformung als auch die Querzugfestigkeit zu ermitteln.

Die Lösung dieser Aufgabe stellt Abb. 57 dar: Demnach erfolgte die Dilatationsmessung an einem Verbundkörper aus Stahl und Probe, der einen Durchmesser von 50 mm und eine Höhe von etwa 80 mm aufwies. Auf diesen wurden nach der Befrostung Stahlkappen mit den Vorrichtungen zur Krafteinleitung mittels Gewinde aufgesetzt.

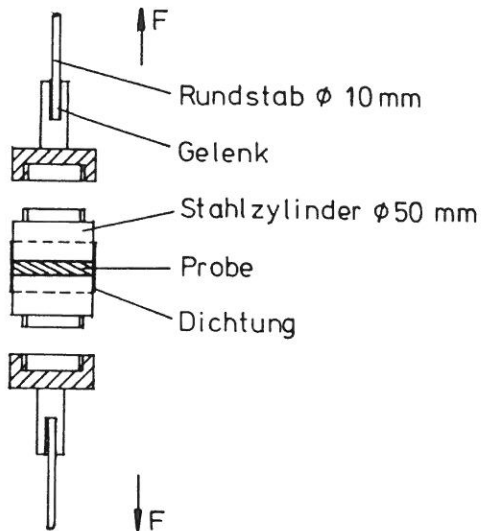


Abb. 57
Verbundkörper zur Erfassung der Dilatation senkrecht zur Plattenebene und der Lagenzugfestigkeit

Der Temperaturverlauf während der Frost-Tau-Wechsel entsprach der Kurve in Abb. 61a. Die Auswertung des Verformungsverhaltens ist im 1. Zyklus mit den Mitteln der S_{CR} -Methode (vgl. Abb. 41) vorgenommen worden. Darüber hinaus wurde die gesamte bezogene Längenänderung nach 7 Zyklen erfaßt, indem zur Bildung von Δl_1 der Wert für die Länge bei 0 °C des 1. Frost-Tau-Wechsels diente. Ansonsten erfolgte die Berechnung der Differenz der bezogenen Längenänderung ($\Delta \epsilon_1$) mit den Meßwerten des 7. Zyklus. Bei solchem Vorgehen wird vorausgesetzt, daß sich der Wert der Temperaturebene bei 0 °C hinreichend genau in allen Frost-Tau-Wechseln reproduzieren läßt.

Unmittelbar nach der Befrostung ist an den Proben die Querkzugfestigkeit festgestellt worden. Ein Vergleich der hier angefallenen Werte mit Festigkeiten, die Proben mit gleicher Vorbehandlung und gleichen Feuchtigkeitsgehalten, jedoch ohne Befrostung, geliefert haben, ergab die relative Minderung der Querkzugfestigkeit infolge der im Frost-Tau-Wechsel erfahrenen und durch die Verformung charakterisierten Beanspruchung.

Die Ergebnisse werden in Abb. 58 dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, daß mit wachsender Expansion in der Abkühlungsphase des Frost-Tau-Wechsels eine Abnahme der Querkzugfestigkeit einhergeht. Als eigentliche Ursache dieses Verhaltens steht im Hintergrund der jeweils vorliegende Feuchtigkeitsgehalt des Materials: Mit wachsenden Sättigungsgraden nimmt die Expansion zu und die Querkzugfestigkeit ab. Die hier untersuchten Proben wiesen Sättigungsgrade zwischen etwa 0,9 und 1,0 auf.

Beim Vergleich der Formänderungswerte beim 1. Zyklus mit jenen nach 7 Zyklen fällt auf, daß anfänglich kontrahierende Proben im Verlauf der Frost-Tau-Wechsel in den Bereich der Expansion geraten sind (positive Vorzeichen). Dieses Verhalten wird auf die hier aus Zeitgründen angewandte Präparation der Proben zurückgeführt. Diese sind nämlich aus dem vollgesättigten Zustand durch Trocknen bei 20 °C auf niedrigere Sättigungsgrade gebracht worden. Hierbei erfolgte die Wasserabgabe wahrscheinlich bevorzugt im oberflächennahen Bereich der Probe, was eine Inhomogenität der Feuchtigkeitsverteilung im 1. Frost-Tau-Wechsel nach sich zog. Im Verlaufe der weiteren Wechsel erfolgte dann ein Feuchtigkeitsausgleich, der zu geringfügig verändertem Verformungsverhalten gegenüber dem 1. Zyklus geführt hat. Der Umstand, daß in einigen Fällen der Verhältniswert der Querkzugfestigkeit größer als 1,0 ist, deutet darauf hin, daß der Feuchtigkeitsgehalt der nicht befestigten Bezugsproben nicht immer dem der befestigten gleich.

Diesen Problemen, die jedoch den eigentlichen Aussagewert der Versuchsergebnisse keinesfalls einschränken, kann begegnet werden, indem der Wassergehalt der zunächst trockenen Proben durch lange Lagerung in den betreffenden Medien eingestellt wird.

Die Bedeutung der in Abb. 58 dargestellten Ergebnisse liegt zweifelsfrei darin, daß sie den Zusammenhang zwischen dem vom Porenfüllungsgrad abhängigen Verformungsparameter und der Querkzugfestigkeit beweisen. Damit können die Modellvorstellungen der Abb. 43 als richtig angesehen werden. Ferner wird die Hypothese von der gleichgerichteten Wirkung des sich in den Poren entwickelnden Spaltdrucks und der Gefügeexpansion infolge thermodynamischer Effekte eindrucksvoll gestützt.

4.2.5 Folgerungen

Anisotropes, lagig aufgebautes Material, dessen Schichten nur in Herstellrichtung und quer dazu durch Fasern bewehrt sind, weicht innerem Druck aus, indem es in Richtung senkrecht zur Plattenebene expandiert (Abb. 43). Insbesondere verursachen Volumeneffekte der gefrierenden Porenflüssigkeit in der Abkühlungsphase des Frost-Tau-Wechsels Dehnungen, die sich jenen aus dem Spaltdruck resultierenden gleichgerichtet überlagern und zur Überwindung des Verbundes der Mineralpartikel im Bereich der Kontaktfläche der Wickelschichten führen. Bedingt durch die lagige Anordnung der beschädigten Gefügebereiche, wird der im Biegeversuch wirksame Querschnitt durch derartige Volumeneffekte nur wenig oder gar nicht betroffen. Die Folge davon ist, daß tatsächlich vorhandene Lagenverbundschäden eine Minderung der Biegezugfestigkeit nicht bewirken. Somit scheidet die Biegezug-

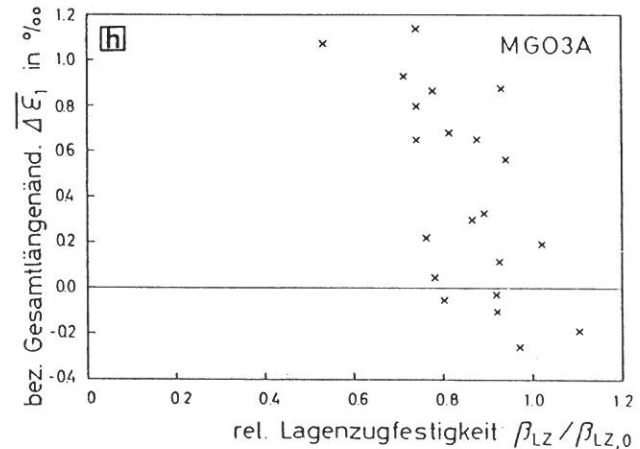
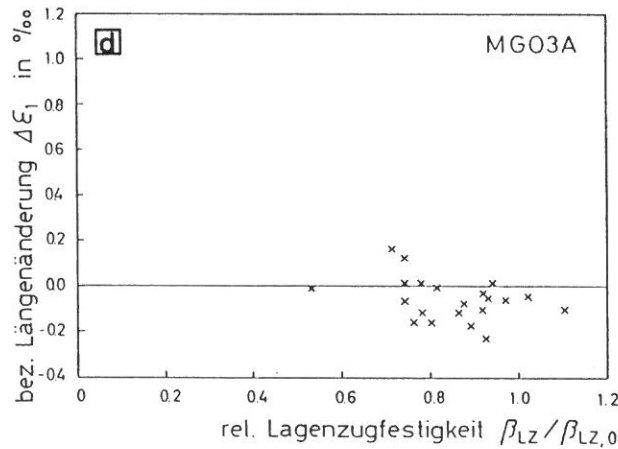
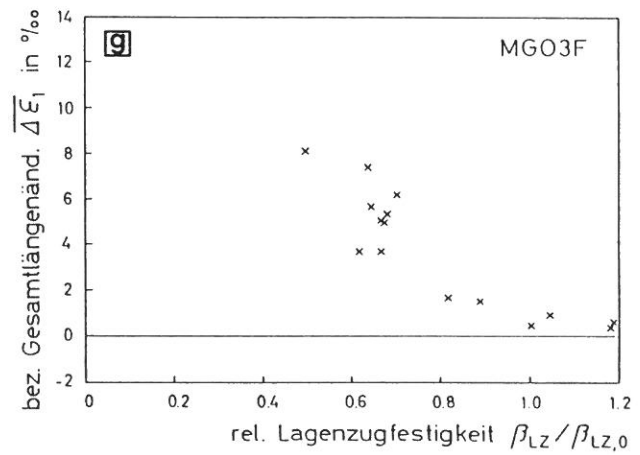
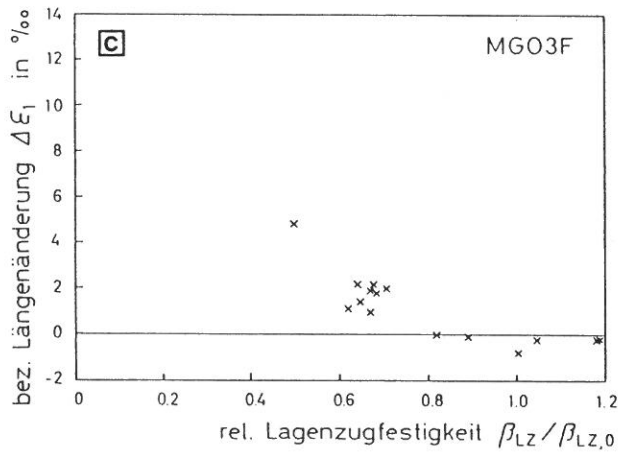
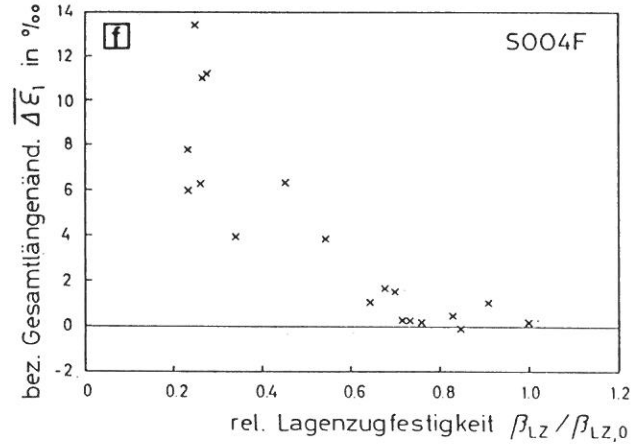
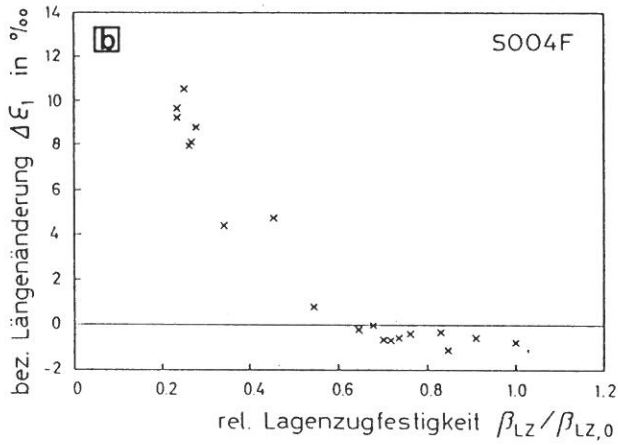
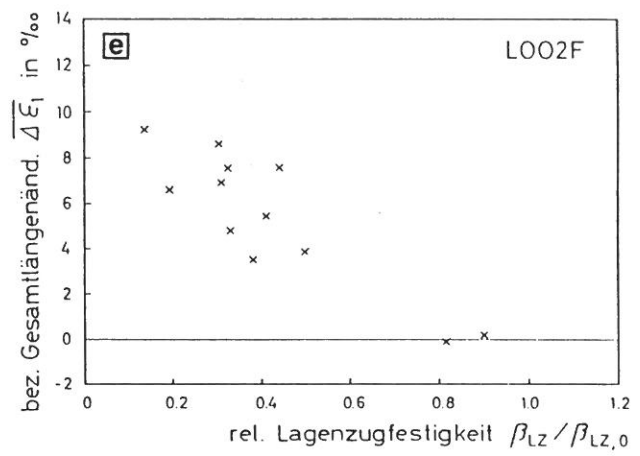
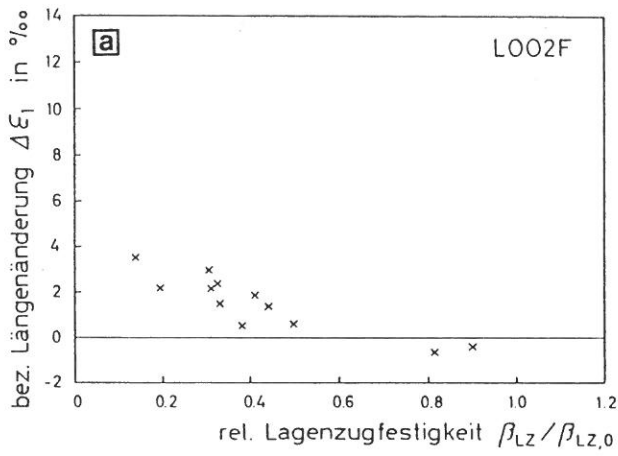


Abb. 58 a,b,c,d,e,f,g,h

Zusammenhang zwischen der Verformung im 1.FTW (Bilder links, a-d) bzw. der Gesamtverformung (Bilder rechts, e-h) und der Lagenzugfestigkeit nach 7 FTW für Sättigungsgrade zwischen 0,9 und 1,0

festigkeit als Nachweisverfahren zur Beurteilung von Gefügeschäden solcher Art aus. Dagegen ist die Querkzugfestigkeit in der Lage, die hier eintretende maßgebliche Strukturveränderung direkt zu erfassen und kann in einem Prüfverfahren zur Ermittlung der Frostwiderstandsfähigkeit von Plattenmaterial an Stelle der Dilatometrie zur Identifikation geeigneter Systeme verwendet werden.

5 Verfahren zur Ermittlung des Widerstandes gegenüber Witterungseinflüssen

5.1 Allgemeines

Die in Abschnitt 3 diskutierten Phänomene und die von den Untersuchungsergebnissen des Abschnittes 4 abgeleiteten Aussagen weisen bereits auf zwei Verfahrensteile zur Beurteilung des Witterungswiderstandes hin und gehen zum einen von der Beanspruchung durch zyklisches Entleeren und Befüllen des Porenraumes und zum anderen von der Beanspruchung durch Frost aus.

Die nachfolgend beschriebene Methode zur Prüfung der Frostwiderstandsfähigkeit von schichtweise aufgebautem und in der Plattenebene bewehrtem Material fußt auf der Gültigkeit des in der Abb. 43 skizzierten Modells, demzufolge jene kritische Porenfüllung, bei der die Matrix der untersuchten Probe in der Schichtebene zu versagen beginnt, mit Hilfe der Querkzugfestigkeit belegt werden kann. Eine hierauf basierende Aussage ist aber erst dann als hinreichend anzusehen, wenn im Test nachgewiesen wird, daß das wesentliche Element des Modells, nämlich die Expansion der vollständig wassergesättigten Probe senkrecht zur Plattenebene, in der Abkühlungsphase des Frost-Tau-Wechsels auch tatsächlich zutrifft. Dieser Nachweis muß demnach Bestandteil des Verfahrens werden.

Er kann auf dem direktesten Wege über die Anwendung der Dilatometrie geführt werden. Dabei sind Proben mit vollständig gesättigtem Porenraum in den drei Koordinatenrichtungen zu untersuchen. Steht eine Dilatometeranlage nicht zur Verfügung, dann kann neben der Querkzugfestigkeit die Biegezugfestigkeit solcher Proben die erforderlichen Auskünfte liefern, denn entspricht deren Verformungsverhalten nicht dem Denkmodell, dann müßten sich für die beiden bewehrten Richtungen schon nach wenigen Zyklen auch deutliche Einbußen der Biegezugfestigkeit einstellen.

Da für die Intensität der Beanspruchung in erster Linie die Porenfüllung maßgeblich ist, sollen die hygrischen Verhältnisse der dem Test auszusetzenden Proben jenen der Praxis entsprechen oder gar ungünstiger sein. Bei der Einstellung der Porenfüllung kann der sich aus Veränderungen des Gefüges infolge Trocken-Naß-Wechseln bzw. Temperaturbehandlungen ergebende Einfluß auf die Wasseraufnahmewilligkeit des Porensystems Berücksichtigung finden. Dies gilt auch für chemisch bedingte Vorgänge der Hydratisierung oder Carbonatisierung.

Das Maß der Porenfüllung leitet sich von den ungünstigsten Bedingungen am Bauwerk

her. Diese stellen sich in der Regel im Bereich der oft unbeschichteten Schnittkanten ein. Infolge der geometrischen Verhältnisse sind die Bedingungen der Wärmeübertragung und der Wasseraufnahme oder -abgabe an den Plattenkanten auf jeden Fall erheblich ungünstiger als im mittleren Bereich, so daß im Verlaufe der Zeit Abwitterungen der Eckenbereiche auch längs eventuell beschichteter Kanten nicht auszuschließen sind. Hier kann sowohl eine Wasseraufnahme aus der Dampfphase als auch aus der flüssigen Phase erfolgen. Bei Tafeln für Fassadenbekleidungen werden von den besonders gefährdeten Randzonen Kräfte auf die Befestigungsmittel übertragen. Hier sollte mit Rücksicht auf die im Bauwesen notwendigen Sicherheitsreserven auch von einem auf der "sicheren Seite liegenden", also hohen Porenfüllungsgrad ausgegangen werden. In Anbetracht dessen, daß von einer befriedigenden Haltbarkeit der Beschichtungen nicht in jedem Falle ausgegangen werden kann, erscheint es zweckdienlich, die für die Untersuchung vorgesehenen Proben von eventuell vorhandenen Beschichtungen freizuschleifen und durch eine Unterwasserlagerung zu sättigen. Damit macht sich die Methode die Vorstellung zu eigen, daß der Scherben selbst ausreichend widerstandsfähig sein muß.

Zum Nachweis, daß die Elemente des Modells zutreffen, werden vollständig gesättigte Proben benötigt. Eine totale Porenfüllung ist mit dem Verfahren der Vakuum/Druck-Sättigung sicher zu erreichen.

Die Intensität des Zerrüttungsprozesses wird von der erreichten Frosttemperatur, vor allem aber auch von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel beeinflusst. Bei versiegelten Proben, die eine höhere Porenfüllung als die kritische aufweisen, nehmen jedoch jene inneren Kräfte, die erstmals zur Überschreitung der Elastizitätsgrenze des Feststoffgerüsts geführt haben, rasch ab, weil der Volumenzunahme des Wassers beim Übergang in die feste Phase anschließend mehr Raum zur Verfügung steht. In solchen Fällen kann eine Beurteilung schon nach wenigen Zyklen vorgenommen werden.

Der zweite Verfahrensteil befaßt sich mit den Auswirkungen von Trocken-Naß-Wechseln auf die Festigkeitseigenschaften. Zum einen können sich Festigkeitsabnahmen als Folge einer Matrixzerrüttung ergeben, zum anderen können Temperatur- und Feuchtigkeitswechsel festigkeitsmindernd auf die Fasern selbst oder ihren Matrixverbund wirken. Die zuletzt genannten Veränderungen lassen sich vornehmlich mit der Biegezugfestigkeit erfassen, während eine Matrixzerrüttung auch die Querkzugfestigkeit beeinträchtigen kann. Somit ist sowohl die Entwicklung der Querkzugfestigkeit als auch die der Biegezugfestigkeit zur Grundlage einer umfassenden Beurteilung des Gefügestandes zu machen.

Die Härte der Beanspruchung wird von den Eckpunkten "trocken" und "feucht" vorgegeben. Auch hier sind die Bedingungen der Wasseraufnahme bzw. -abgabe an den Schnittkanten der Platten maßgeblich. Die Austrocknung des Porenraumes sollte sich an der Temperatur orientieren, die bei Fassadentafeln zu erwarten ist. Hierbei muß nicht der vorkommende Maximalwert genommen werden, weil dieser unter praktischen Bedingungen nur kurzfristig wirkt. Eine Temperatur von 70 °C dürfte hier angemessen sein. Ebenso scheint eine Befüllung des Porenraumes nach der Trockenperiode durch eine Unterwasserlagerung praxisgerecht zu sein.

Sollen sich bei den vorgegebenen Lagerungsbedingungen im Porenraum annähernd stationäre Zustände ausbilden, dann erfordern die Trocken-Naß-Wechsel angemessene Zeit. Aus praktischen Gründen ist es ratsam, die Anzahl der Zyklen und deren Zeitbedarf an jenem Zeitraum zu orientieren, der für die Bestimmung der Frostwiderstandsfähigkeit benötigt wird. Daraus folgt eine recht niedrige Zahl von Wechsellagen. Da aber die Eckpunkte der Beanspruchung vergleichsweise "streng" festgelegt sind, dürften so eventuelle Schwachstellen des Materials mit ausreichender Zuverlässigkeit feststellbar sein.

In Fällen, in denen das Verformungsverhalten für alle drei Richtungen bekannt ist, z.B. im Rahmen von Qualitätskontrollen, ist eine Reduzierung der Probenanzahl möglich. Es können alle im Vakuum/Druck-Verfahren gesättigten Proben weggelassen werden.

Die Haltbarkeit der Beschichtungen wird von diesem Test nicht erfaßt. Jedoch sind die hiermit verbundenen Fragen nicht sicherheitsrelevant. Sie sollten zweckmäßiger mit Verfahren beantwortet werden, die dem speziellen Problem Rechnung tragen.

Für die Beurteilung des Langzeitverhaltens könnten in der Prüfung Wassergehalte eingestellt werden, die den besonderen Gegebenheiten am Bauwerk angemessen sind, z.B. durch Lagerung in einer Atmosphäre mit 97 % rel. Luftfeuchtigkeit mit entsprechender niedriger Porenfüllung. Einem Material, daß nur einen solchen Test besteht, dürfte aber ein allgemein ausreichender Frostwiderstand nicht bestätigt werden.

5.2 Probenvorbereitung

Die Materialeigenschaften sind nicht an jeder Stelle einer Tafel identisch. Deswegen ist es erforderlich, jene Proben, deren Festigkeiten untereinander verglichen werden sollen, aus einem Bereich geringer räumlicher Ausdehnung zu

entnehmen. Demzufolge bezieht sich die nachstehend angegebene Anzahl der Proben auf die vollständige Prüfung einer Tafel bzw. Platte. Werden mehrere Tafeln derselben Materialart untersucht, dann ist nur an einer Tafel eine vollständige Prüfung durchzuführen. An den übrigen sind nur der Trocken-Naß-Wechsel-Test und die Untersuchung des Frostwiderstandes des durch eine Unterwasserlagerung gesättigten Materials vorzunehmen.

Mit einer wassergekühlten Diamantbohrkrone sind 38 kreisrunde Proben des Durchmessers 50 mm zu entnehmen und mit einer Topfscheibe eben zu schleifen. Dabei sind eventuelle Streu- und Farbschichten restlos zu entfernen. Die Proben dürfen an den Flanken keine Delaminationserscheinungen infolge der Bearbeitung aufweisen, was ggf. mit einer Lupe zu überprüfen ist.

19 weitere, jedoch rechteckige Proben der Größe 200 x 60 mm sind so zuzuschneiden, daß die längere Seite parallel zur Herstellrichtung liegt, und wie oben angegeben, eben zu schleifen. Auch bei diesen Proben darf der Lagenverbund im Bereich der Flanken durch den Zuschnitt nicht beeinträchtigt werden.

Für den Ergänzungstest (s. Abschnitt 5.4) sind eventuell 14 weitere rechteckige und 14 kreisförmige Proben bereitzustellen.

Eine sichere Ermittlung der Festigkeitsveränderung wird von einer größeren Anzahl von Einzelergebnissen begünstigt. Deswegen ist es vorteilhaft, die vorgenannte Mindestanzahl der Proben zu erhöhen.

Bei gewelltem Material sind sowohl die kreisrunden als auch die rechteckigen Proben aus dem Bereich des Wendepunktes des Wellenprofils zu entnehmen, wobei die Breite der rechteckigen Proben dann nur 40 mm betragen soll.

Nach der mechanischen Bearbeitung sind die Proben für die Dauer einer Woche bei 50 °C in einem Temperaturschrank mit Frischluftzufuhr zu trocknen. Anschließend werden sie im Exsikkator abgekühlt und gewogen.

Danach sind 19 kreisrunde Scheiben einer mindestens 8-wöchigen Lagerung im Wasser bei atmosphärischem Druck und bei 20 °C zu unterziehen. Die Proben sollen im Behälter aufrecht stehen, sich gegenseitig nicht berühren und etwa 10 mm mit Wasser bedeckt sein.

14 kreisrunde und 14 rechteckige Proben sind in einer Vakuum/Druck-Anlage zu sättigen. Sie lagern 3 Stunden lang bei einem Restdruck von etwa 1 mbar. Danach wird bei laufender Vakuumpumpe Wasser bis zur völligen Bedeckung eingelassen und

die Vakuumpumpe noch eine Stunde lang weiter betrieben. Nach dem Abbau des Vakuums wird der Behälter für 24 Stunden unter einen Druck von 150 bar gesetzt, der danach allmählich auf das Niveau des atmosphärischen Drucks abzubauen ist. Anschließend folgt bis zur weiteren Verwendung eine Unterwasserlagerung.

Für die 5 kreisrunden und 5 rechteckigen Proben der Trocken-Maß-Wechsel ist gleichzeitig die Prozedur nach Abschnitt 5.3.2 einzuleiten, wobei die Proben der entsprechenden Vergleichsserien für die Dauer der Wechsel in der bereits geschilderten Weise unter Wasser zu lagern sind.

Wenn die 8-wöchige Unterwasserlagerung beendet ist, sind aus den kreisförmigen Scheiben der Unterwasserlagerung 2 je 7 Proben enthaltende Zylinder gemäß der Abb. 59 zu bilden (Frost- und Vergleichsserie). Unter leichtem axialen Andruck ist der Probenzylinder mit einem wasserdichten Klebeband zu ummanteln. Schließlich wird zur weiteren Dichtung der Probenflanken gegen Feuchtigkeitsverluste über das Klebeband ein enganliegender Gummischlauch gestülpt, dessen Enden etwa 10 mm über die äußeren Flächen der Kunststoffscheiben zu ziehen sind. Ebenso sind die in der Vakuum/Druck-Anlage gesättigten 14 kreisförmigen Scheiben zu versiegeln.

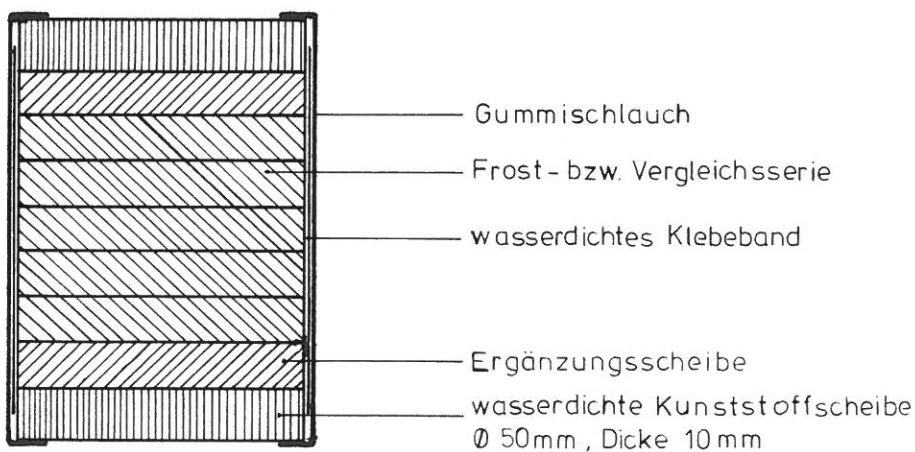


Abb. 59
Versiegelter Probenzylinder der Frost- und Vergleichsserien

Aus je 7 der insgesamt 14 in der Vakuum/Druck-Anlage behandelten rechteckigen Proben sind entsprechend der Abb. 60 2 Pakete herzustellen. Auch hier sind die Schnittflächen mit einem wasserdichten Klebeband unter leichtem Andruck senkrecht zu den Lagen zu dichten. Über das so entstandene Paket wird ein enganliegender Gummischlauch gestülpt, der an den Enden mit einer Klemmvorrichtung zu schließen ist.

Die restlichen 5 kreisrunden Scheiben (Porositätsserie) werden gewogen und dann 3 Tage lang bei 105 °C getrocknet. Anschließend sind sie abermals zu wiegen und

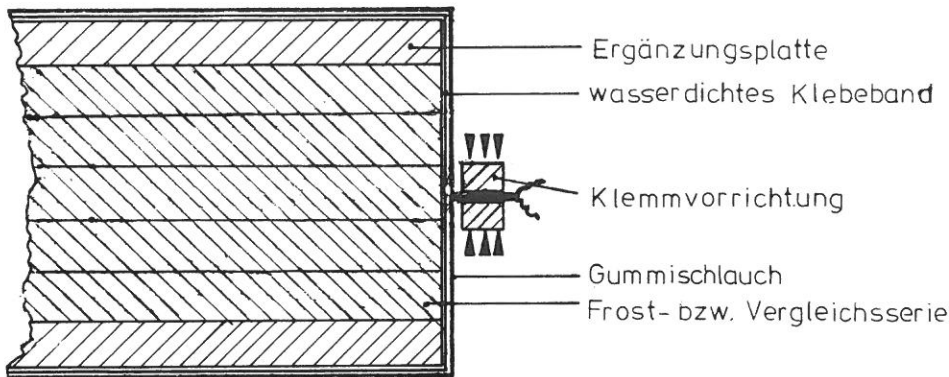


Abb. 60

Versiegeltes Probenpaket der Frost- und Vergleichsserien

in der Vakuum/Druck-Anlage zu sättigen. Danach sind durch Über- bzw. Unterwasserwägung Gewicht und Volumen festzustellen. Mit den ermittelten Daten werden der auf die Trockenmasse bezogene Feuchtigkeitsgehalt w , die volumenbezogene Gesamtporosität P und der Sättigungsgrad S in % berechnet. Dieser ergibt sich aus der Formel

$$S = \frac{V_w}{V_p} = \frac{m_s - m_{d;105}}{m_{s;a} - m_{d;105}} \cdot 100. \quad (3)$$

Hierbei bedeuten V_w das jeweils vorhandene Wasservolumen, das aus der Differenz der Massen der feuchten (m_s) und der bei 105 °C getrockneten ($m_{d;105}$) Probe folgt, und V_p das Gesamtporenvolumen, das sich ergibt, wenn von der Masse der Probe mit einem vollständig wassergefüllten Porenraum ($m_{s;a}$) diejenige der bei 105 °C getrockneten subtrahiert wird.

Die Gesamtporosität berechnet sich aus der Gleichung

$$P = V_p/V \cdot 100. \quad (6)$$

Schließlich wird zur Berechnung des Feuchtigkeitsgehaltes die folgende Gleichung herangezogen:

$$w = \frac{m_s - m_{d;105}}{m_{d;105}} \cdot 100. \quad (7)$$

5.3 Beanspruchung und Festigkeitsprüfungen

5.3.1 Frost-Tau-Wechsel

Der Verlauf der Temperatur im Frostraum entspricht jener Kurve, die bei dilatometrischen Untersuchungen notwendig wird (siehe Abschnitt 4.2) und in Abbildung 61a festgelegt ist. Die Vorgabe nur einer Temperaturkurve ist aus Gründen der Vergleichbarkeit sinnvoll.

Von dem in der Vakuum/Druck-Anlage wassergesättigten Material ist ein Probenzylinder (kreisförmige Scheiben) sowie ein Probenpaket (rechteckige Plättchen) und von dem unter Wasser gelagerten Material ein Probenzylinder der Befrostung zu unterziehen. Mit diesen Frostserien sind 10 Zyklen ohne Unterbrechung zu fahren. Die Zylinder bzw. Pakete der Vergleichsserien lagern in dieser Zeit in Luft bei 20 °C.

Nach der Befrostung werden die Versiegelungen - auch von den Vergleichsproben - abgenommen und die Ergänzungsscheiben bzw. -platten (s. Abb. 59 bzw. 60) ausgeschieden. Für die übrigen Proben schließt sich eine 1-wöchige Trocknung bei 50 °C an, wobei die senkrecht stehenden kreisrunden Scheiben bzw. rechteckigen Plättchen sich nicht berühren dürfen. Danach sind sie in einem Exsikkator abzukühlen.

Abschließend sind alle kreisrunden Proben zwischen zwei Stahlplatten zu kleben, deren Durchmesser 50 mm und Dicke mindestens 30 mm betragen muß (Abb. 61b). Hierbei werden die Proben mit dem Zweikomponenten-Epoxidharzkleber Super EP bestrichen und durch konzentrisches Drehen unter Druck auf die Stahlplatten vollflächig angesetzt. Die Zentrierung des Verbundkörpers erfolgt durch das Abrollen des Zylinders auf einem Klebestreifen, der mit dem Rücken auf einer ebenen Platte liegt. Zum Aushärten ist der Verbundkörper vorsichtig auf die Grundfläche zu stellen.

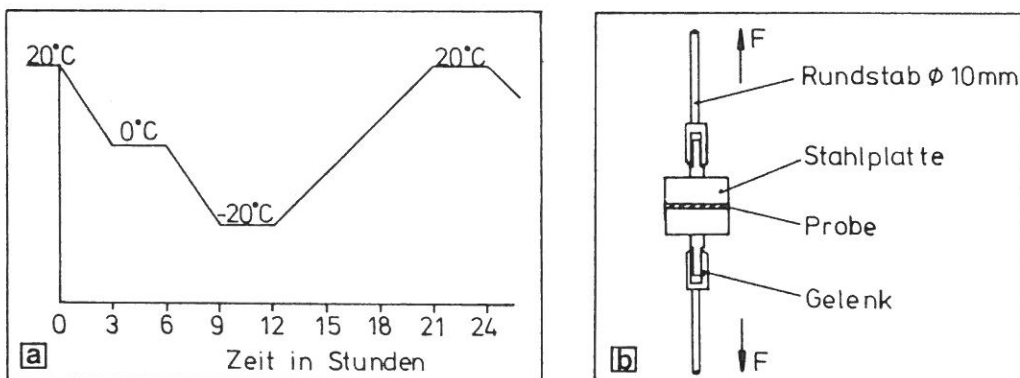


Abb. 61 a,b

Prüfung der Frostwiderstandsfähigkeit von Faserzement

- a Temperaturverlauf im Frost-Tau-Wechsel
- b Verbundkörper in der Vorrichtung zur Ermittlung der Lagenzugfestigkeit

5.3.2 Trocken-Naß-Wechsel

Nach der ersten 50 °C-Trocknung (siehe Abschnitt 5.2) werden die für die Trocken-Naß-Wechsel vorgesehenen 5 kreisrunden und 5 rechteckigen Proben in ein

Wasserbad gestellt, dessen Temperatur 20 °C beträgt. Nach einer Verweildauer von 9 Tagen werden sie dann in einen Trockenschrank mit Frischluftzufuhr gebracht, dessen Lufttemperatur bei 70 °C gehalten wird. Hier verbleiben sie 5 Tage lang. Anschließend werden die noch warmen Proben erneut in das Wasserbad gestellt usw.. Es sind insgesamt 5 solcher Zyklen zu absolvieren, wobei der letzte Wechsel mit einer 1-wöchigen Trocknung bei 50 °C endet. Einer solchen Trocknung (50 °C) sind auch die Vergleichsproben zu unterziehen.

Die kreisförmigen Scheiben werden anschließend zwischen zwei Stahlscheiben geklebt (s. Abschnitt 5.3.1) und die rechteckigen Proben bis zur Prüfung auf Biegezugfestigkeit im Exsikkator gelagert. Nach dem Biegezugversuch ist jeweils eine Probenhälfte zur Ermittlung des Feuchtigkeitsgehaltes bei 105 °C zu trocknen.

5.3.3 Festigkeitsprüfungen

Bei der Ermittlung der Querkzugfestigkeit ist die Kraft mittels allseitig beweglichen Gelenken und langen Zugstäben des Durchmessers 10 mm zentrisch über die Stahlplatten in die Proben einzutragen. Die Kraft ist so zu steigern, daß die Spannung im Probenquerschnitt um 0,075 N/mm² in der Sekunde zunimmt. Die Querkzugfestigkeit errechnet sich nach der Formel

$$\beta_{LZ} = \frac{F}{A} \quad , \quad (16)$$

wobei F die Bruchkraft in N und A die Probenfläche in mm² bedeuten. Die Formel gilt nur, wenn der Bruch innerhalb der Probe erfolgt, d.h. bei Brüchen in der Kontaktfläche Kleber/Probe bzw. Kleber/Stahlplatte muß das Ergebnis verworfen werden.

Für die Ermittlung der Biegezugfestigkeit ist die Probe auf zwei 180 mm voneinander entfernte Auflager zu legen und mittig mit einer Biegeschneide zu belasten. Ein Auflager und die Biegeschneide - ihre Krümmungsradien betragen etwa 10 mm - müssen in der zur Stützweite senkrechten Ebene kippbar gelagert sein. Die Kraft ist so zu steigern, daß die Spannung um 0,75 N/mm² in der Sekunde zunimmt. Die Biegezugfestigkeit berechnet sich nach der Formel

$$\beta_{BZ} = \frac{F \cdot 270}{b \cdot d^2} \quad , \quad (17)$$

wobei F die Bruchkraft in N und b bzw. d die Breite bzw. Dicke in mm bedeuten.

Die Ergebnisse der Prüfung auf Querkzug- und Biegezugfestigkeit der jeweiligen Frost-, Trocken/Naß- und Vergleichsserien sind vor der Mittelwertbildung auf

Ausreißer mit dem Malimov-Test [68] zu untersuchen. Hierbei sollen aus der Mittelwertbildung einer Serie jene Einzelwerte ausscheiden, die die Bedingung $r(99) \leq r^*$ erfüllen. r^* ist der den Ausreißer kennzeichnende Parameter und $r(99)$ der bei 99 % statistischer Sicherheit vom Freiheitsgrad f abhängige Vergleichswert. Damit werden aus der Meßreihe signifikante Ausreißer eliminiert.

5.4 Beurteilung

Für die Beurteilung der Empfindlichkeit gegen Witterungsbeanspruchung wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen: Die Einschätzung der Frostwiderstandsfähigkeit auf der Basis der Querkzugfestigkeit kann vorgenommen werden, wenn die Prüfungsergebnisse der vollständig wassergesättigten Proben die Übertragbarkeit des Verformungsmodells (Abb. 43) auf das untersuchte Material gestatten. Dies wird angenommen, wenn der Mittelwert der Biegezugfestigkeit der befestigten Proben höchstens 10,0 % niedriger als jener der zugehörigen Vergleichsserie ausfällt. Im allgemeinen ist dann ein Verlust der Querkzugfestigkeit von mehr als 30 % zu erwarten. Ist der Abfall der Querkzugfestigkeit geringer - eine Einbuße der Biegezugfestigkeit von weniger als 10,0 % aber vorhanden - dann darf das nachfolgend angegebene Beurteilungskriterium des Regeltestes ebenfalls angewendet werden.

Der Regeltest ist bestanden, wenn die Elemente des Verformungsmodells auf das untersuchte Material übertragbar sind und der Mittelwert der Querkzugfestigkeit der partiell wassergesättigten und befestigten Proben nicht unter das 0,90fache des Mittelwertes der betreffenden Vergleichsserie fällt.

Wenn die Anforderung an die Biegezugfestigkeit der vollständig wassergesättigten Proben nicht erfüllt ist und die Querkzugfestigkeit der partiell gesättigten, befestigten Proben das 0,90fache der Vergleichsserie übertrifft, dann kann eine Beurteilung der Frostwiderstandsfähigkeit nur anhand eines Ergänzungstestes vorgenommen werden. Dazu sind aus 14 kreisrunden und 14 rechteckigen Proben, die mindestens 8 Wochen unter Wasser gelagert worden sind, Frost- und Vergleichsserien zu bilden und in Analogie zu dem geschilderten Vorgehen zu untersuchen. Dabei ist jedoch die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel zu verdreifachen. Der Ergänzungstest ist bestanden, wenn die Festigkeitsergebnisse der befestigten Proben nicht unter das 0,90fache der betreffenden unbefestigten Proben fallen.

Zur Beurteilung der Ergebnisse der Trocken-Naß-Wechsel-Versuche werden dieselben Kriterien zugrundegelegt.

Wird im Hinblick auf ein bestimmtes Bauwerk eine Sättigung durch Lagerung über Wasser in einem geschlossenen Gefäß bei 20 °C vorgenommen, dann darf die Lagerungsdauer 12 Wochen nicht unterschreiten. Ansonsten gelten die Bedingungen des Ergänzungstestes. Material, das nur dieser verminderten Beanspruchungsintensität widersteht, muß als nur bedingt frostwiderstandsfähig gekennzeichnet werden.

5.5 Untersuchungsbericht

Neben den üblichen Angaben muß der Bericht unter Hinweis auf dieses Verfahren folgendes enthalten:

- a) Angaben zu den Werkstoffbestandteilen sowie zur Herstellung und Nachbehandlung
- b) Dauer der Probenlagerung in den betreffenden Medien und die dabei erzielten Feuchtigkeitsgehalte und Sättigungsgrade anhand der Porositätsserie sowie die Werte der Gesamtporosität; den Feuchtigkeitsgehalt der im Biegeversuch angefallenen Probenhälften der Trocken-Naß-Wechsel und der Vergleichsserie; Einzelwerte sind jeweils mit einer Stelle hinter dem Komma anzugeben
- c) Einzel- und Mittelwerte der Festigkeitsprüfungen; Aussagen zum Ausgang des Ausreißertestes; die Ergebnisse sind in N/mm^2 mit einer Stelle hinter dem Komma anzugeben
- d) Beurteilung

5.6 Schlußbemerkung

Mit dem beschriebenen Verfahren konnten bisher Erfahrungen nicht im ausreichenden Maße gesammelt werden. Es bleibt abzuwarten, ob im Verlaufe der weiteren Anwendung Modifizierungen erforderlich werden. Insbesondere ist hier an den Schwellenwert des Festigkeitsverlustes von 10 % und die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel für den Fall gedacht, daß das Kraft- und Deformationsmodell nicht anwendbar ist. Schließlich ist auch der Frage nachzugehen, ob die Festlegungen hinsichtlich der Feuchtigkeitszustände im Trocken-Naß-Wechsel sicher die in der Praxis vorkommenden Fälle abdecken.

6 Literatur

- [1] Gilson, J. C.:
Health hazards of asbestos.
Composites 3 (1972), März, S. 57-59.
- [2] Hünerberg, K.:
Das Asbestzement-Druckrohr.
Berlin: Springer-Verlag 1963, 558 S.
- [3] Klos, H.:
Asbestzement; Technologie und Projektierung.
Wien: Springer-Verlag 1967, 327 S.
- [4] Hannant, D. J.:
Fibre cements and fibre concretes.
Chichester: John Wiley + Sons 1978, 219 S.
- [5] Ramachandran, V. S.; Feldman, R. F.; Beaudoin, J. J.:
Fibre-reinforced cement systems.
in: Concrete science; Treatise on current research.
London: Heyden 1981, S. 169-223.
- [6] Cheikh Larbi, S.; Puccini, F.; Andreani, M.; Francois, D.:
Mechanical anchoring and hydrogen bonding between fibers
and cement.
Int. Conf. fracture mechanics of concrete, Lausanne 1985, 10 S.
- [7] Studinka, J.:
Asbestersatz in der Faserzementindustrie - Stand der Substitution,
bisherige Erfahrungen.
Internationale Chemiefasertagung, Sept. 1986,
Dornbirn, Österreich, 10 S.
- [8] Miko, H.-J.; Kirchmayr, K.:
Wirkungsweise verschiedener Fasertypen im zementgebundenen
Verbundwerkstoff.
Internationale Chemiefasertagung, Sept. 1986,
Dornbirn, Österreich, 56 S.
- [9] Bornemann, P.:
Vom Asbestzement zum Kunstfaserzement.
Beton 36 (1986), H. 11, S. 419-422.
- [10] Eick, H.:
Asbestzement - Herstellung und Eigenschaften.
Tiefbau (1975), H. 7, S. 456-462.

- [11] Klamrowski, G.; Neustupny, P.:
 Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand.
 Forschungsbericht 100, Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin.
 Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft,
 Januar 1984, 84 S.
- [12] Klamrowski, G.; Neustupny, P.; Zajc, A.:
 Degree of moisture saturation and mechanical properties of concrete.
 Third Int. Conference on the durability of building materials
 and components, Espoo, Finland, August 1984.
 Espoo: VTT Symposium 50, Vol. 3, S. 500-509.
- [13] DIN 50014:
 Klimate und ihre technische Anwendung; Normalklimate.
 Ausgabe Dezember 1975, 4 S.
- [14] Akaiwa, S.; Sudoh, G.:
 Strength and microstructures of hardened cement pastes cured
 by autoclaving.
 Symposium on structure of portland cement paste and concrete,
 Highway Research Board, Sp. Rep. 90, Washington D.C. 1966, S. 36-47.
- [15] Fagerlund, G.:
 The critical degree of saturation method of assessing the
 freeze/thaw resistance of concrete.
 Mater. Constr. 10 (1977), Nr. 58, S. 217-229.
- [16] ASTM C 215-60 (1976):
 Fundamental transverse, longitudinal, and torsional
 frequencies of concrete specimens.
 Ausgabe September 1960, Neuzulassung 1976, 5 S.
- [17] Brunarski, L.:
 Recommendations for the use of resonance methods for testing concrete.
 1. Resonance frequency measurements.
 Mater. Constr. 2 (1969), Nr. 10, S. 269-273.
- [18] Förster, F.:
 Ein Gerätesystem zur Messung und Registrierung elastischer und
 anelastischer Eigenschaften von Werkstoffen.
 Materialprüfung 15 (1973), H. 10, S. 342-344.
- [19] Koliass, S.; Williams, R. I. T.:
 Relationships between the static and the dynamic moduli of
 elasticity in cement stabilised materials.
 Mater. Constr. 13 (1980), Nr. 74, S. 99-107.
- [20] Leers, K.-J.:
 Die zerstörungsfreie Materialprüfung mit mechanischen Schwingungen
 und ihre Anwendung bei Werkstoffen der Steine und Erden-Industrie.
 Habilitationsschrift TU Clausthal 1969, 222 S.

- [21] Lühr, H.-P.:
Resonanzfrequenzmessungen an in Wasser und aggressiven Lösungen
gelagerten Mörtelprismen.
Dissertation Techn. Hochschule Aachen 1964.
- [22] Künzel, H.; Schwarz, B.:
Die Feuchtigkeitsaufnahme von Baustoffen bei Beregnung.
in: Wasserdampfdurchlässigkeit und Feuchtigkeitsverteilung
bei Baustoffen und Bauteilen, Berichte aus der Bauforschung,
Heft 51, Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn 1968, S. 99-113.
- [23] Schwarz, B.:
Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen.
Gesundheits-Ing. 93 (1972), H. 7, S. 206-211.
- [24] Cammerer, W. F.:
Die kapillare Flüssigkeitsbewegung in porösen Körpern.
VDI-Forschungsheft 500, Düsseldorf: VDI-Verlag 1963, 27 S.
- [25] Kießl, K.:
Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in
mehrschichtigen Bauteilen.
Dissertation Univ. Essen 1983, 181 S.
- [26] Schubert, H.:
Kapillarität in porösen Feststoffsystemen.
Berlin: Springer-Verlag 1982, 350 S.
- [27] DIN 52617:
Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen.
Ausgabe Mai 1987, 4 S.
- [28] Washburn, E. W.:
Proc. Natl. Acad. Sci. U.S. 7 (1921), S. 115 ff.
- [29] Guyer, A. jr.; Böhlen, B.; Guyer, A.:
Über die Bestimmung der Porengrößen.
Helvetica Chimica Acta 17 (1959), Fasc. VI, S. 2103-2110.
- [30] Hennicke, H. W.; Sturhahn, H. H.:
Porengrößenbestimmung mit dem Quecksilberporosimeter.
Keram. Z. 21 (1969), H. 2, S. 92-94.
- [31] Jüntgen, H.; Schwuger, M.:
Aussagekraft der Quecksilber-Porosimetrie bei der
Charakterisierung poröser Stoffe.
Chem.-Ing.-Tech. 38 (1966), H. 12, S. 1271-1278.

- [32] Stockhausen, N.:
Die Dilatation hochporöser Festkörper bei Wasseraufnahme
und Eisbildung.
Dissertation TU München 1981, 163 S.
- [33] DIN 51058 Blatt 1:
Prüfung keramischer Roh- und Werkstoffe;
Bestimmung der spezifischen Gasdurchlässigkeit
feuerfester Steine. Ausgabe Juni 1963, 3 S.
- [34] Hug, S.:
Beitrag zur Klärung der Permeationsvorgänge in Zementpasten
und hochverdichteten Zementkörpern.
Dissertation Techn. Hochschule Aachen 1971, 97 S.
- [35] Ludwig, U.; Schwiete, H. E.:
Porositätsmessungen an Zementpasten, Zementmörteln
und an Betonen.
25 Jahre Dokumentationsstelle f. Bautechnik 1941-1966.
München: Fraunhofer-Gesellschaft 1966, S. 153-170.
Engl. Originalfassung in: Proc. 8th Confer. on the Silicate
Industry SILICONF, Budapest 1965; ed. by F. Tamas, Budapest:
Akadémiai Kiadó 1966, S. 235-251.
- [36] Zagar, L.:
Die Grundlagen zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit
von feuerfesten Baustoffen.
Archiv f. d. Eisenhüttenwesen 26 (1955), H. 12, S. 777-782.
- [37] Frey, R.; Goerke, H.-J.:
Derzeitiger Stand der Kenntnis des Einflusses der Carbonatisierung
auf die Festigkeitseigenschaften von Betonen.
TIZ-Fachberichte 106 (1982), H. 3, S. 184-187.
- [38] Jungermann, B.:
Der Chemismus der Carbonatisierung von Beton.
Betonwerk + Fertigteil-Technik 48 (1982), H. 6, S. 358-362.
- [39] Weber, H.:
Berechnungsverfahren über den Carbonatisierungsfortschritt
und die damit verbundene Lebenserwartung von Stahlbetonteilen.
Betonwerk + Fertigteil-Technik 49 (1983), H. 8, S. 508-514.
- [40] Brieger, L. M.; Wittmann, F. H.:
Numerical simulation of carbonation of concrete.
in: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung/Materials science
and restoration.
Wittmann, F. H. (ed.), 2. Int. Kolloquium Sept. 1986, Esslingen.
Ostfildern: Techn. Akademie Esslingen 1986, S. 635-640.

- [41] Brianza, M. A.; Piguet, A.:
Praxisbezogenes Schnellverfahren zur Beurteilung der
Einwirkung von CO₂ auf zementgebundene Baustoffe.
in: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung/Materials science
and restoration.
Wittmann, F. H. (ed.), 2. Int. Kolloquium Sept. 1986, Esslingen.
Ostfildern: Techn. Akademie Esslingen 1986, S. 651-657.
- [42] Grube, H.; Krell, J.:
Zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe von Mörtel und Beton.
Beton 36 (1986), H. 3, S. 104-108.
- [43] RILEM
Draft recommendation CPC-18, Concrete permanent committee:
Measurement of hardened concrete carbonation depth.
Mater. Constr. 17 (1984), Nr. 102, S. 435-440.
- [44] Rozental, N. K.; Alekseev, S. N.:
Change in concrete porosity during carbonation.
RILEM Int. Symposium Carbonation of concrete,
April 1976, Paper 2.4, 6 S.
- [45] Pihlajavaara, S. E.:
Some results of the effect of carbonation on the porosity
and pore size distribution of cement paste.
Mater. Constr. 1 (1968), Nr. 6, S. 521-526.
- [46] Pihlajavaara, S. E.; Pihlman, E.:
Effect of carbonation on microstructural properties
of cement stone.
Cem. Concr. Res. 4 (1974), H. 2, S. 149-154.
- [47] Lach, V.; Sauman, Z.:
The determination of CaCO₃ modifications in the carbonated concrete.
RILEM Int. Symposium Carbonation of concrete, April 1976,
Paper 1.5, 5 S.
- [48] Suzuki, K.; Nishikawa, T.; Ito, S.:
Formation and carbonation of C-S-H in water.
Cem. Concr. Res. 15 (1985), H. 2, S. 213-224.
- [49] Alexejew, S. N.; Rosental, N.K.:
Korrosion von Stahlbeton in aggressiver Industrieluft.
Berlin: VEB Verlag Bauwesen 1980, 151 S.
- [50] Ilknur, B.:
Über die Carbonatisierung von Mörteln und Betonen nach
Literaturergebnissen und eigenen Untersuchungen.
Dissertation Techn. Hochschule Aachen 1980, 179 S.

- [51] Schießl, P.:
Zur Frage der zulässigen Rissbreite und der erforderlichen
Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung
der Karbonatisierung des Betons.
Dissertation Techn. Hochschule München 1976.
- [52] Kropp, J.:
Karbonatisierung und Transportvorgänge in Zementstein.
Dissertation Univ. Karlsruhe 1983, 210 S.
- [53] Kropp, J.; Hilsdorf, H. K.:
Beeinflussung der Zementsteinstruktur und des Wassertransportes
durch die Carbonatisierung.
in: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung/Materials science
and restoration.
Wittmann, F. H. (Hrsgb.), Int. Kolloquium Techn. Akad. Esslingen,
September 1983.
Filderstadt: Edition Lack und Chemie, E. Moeller GmbH 1983, S. 153-157.
- [54] ISO / TC77 / GE6N3E:
Dimensional variations of flat asbestos-cement sheets.
Studie 1981, 10 S.
- [55] DIN 50018:
Beanspruchung im Schwitzwasser-Wechselklima mit
schwefeldioxydhaltiger Atmosphäre (Gerät nach Kesternich).
Ausgabe Dez. 1963, 4 S.
- [56] Ryder, J. F.:
Applications of fibre cement.
in: Fibre reinforced cement and concrete, Neville, A. (ed.),
RILEM Symposium London 1975.
Lancaster: The Construction Press 1975.
Opening paper 2.1, S. 23-35.
- [57] Czernin, W.:
Die physikalische Beschaffenheit der Hydrationsprodukte.
Zement und Beton (1959), Nr. 16, S. 10-15.
- [58] Czernin, W.:
Zementchemie für Bauingenieure.
Berlin: Bauverlag Wiesbaden, 3. Aufl. 1977.
- [59] Brunauer, S.; Skalny, J.; Odler, I.:
Complete pore structure analysis.
in: Pore structure and properties of materials,
Proc. Int. Symposium RILEM/IIPAC, Prague 1973.
Prague: Academia, Vol. 1 (Prelim. Rep., Part 1), 1973; S. C3-C26.

- [60] Wittmann, F.:
Bestimmung physikalischer Eigenschaften des Zementsteins.
Kap. 3: Sorptionmessungen.
Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton,
Heft 232, Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn 1974, S. 1-63.
- [61] Setzer, M. J.:
Einfluss des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons.
Kap. 4: Frostbeständigkeit.
Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton,
Heft 280, Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn 1977, S. 80-103.
- [62] Wittmann, F. H.:
Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer
Eigenschaften des Betons.
Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton,
Heft 290, Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn 1977, S. 43-101.
- [63] Powers, T. C.:
The thermodynamics of volume change and creep.
Mater. Constr. 1 (1968), Nr. 6, S. 487-507.
- [64] Splittgerber, H.:
Spaltdruck zwischen Festkörpern und Auswirkungen auf Probleme
in der Technik.
Cem. Concr. Res. 6 (1976), H. 1, S. 29-35.
- [65] Setzer, M. J.:
Einfluß des Wassergehalts auf die Eigenschaften des
erhärteten Betons.
Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton,
Heft 280, Berlin: Verlag Wilhelm Ernst & Sohn 1977, S. 43-117.
- [66] Altmann, K.; Liersch, K. W.:
Eigenschaften von Asbestzement bei Wärme- und Feuchteeinwirkung.
Bauphysik 2 (1980), H. 4, S. 129-133.
- [67] Badmann, R.:
Das physikalisch gebundene Wasser des Zementsteins in der Nähe
des Gefrierpunktes.
Dissertation TU München 1981, 158 S.
- [68] Kaiser, R.; Gottschalk, G.:
Elementare Tests zur Beurteilung von Meßdaten. Soforthilfe für
statistische Tests mit wenigen Meßdaten.
Mannheim: Bibliographisches Institut, 1972.
- [69] Klamrowski, G.:
Die thermisch-hygrische Dilatation poröser Baustoffe.
Dissertation Technische Universität Berlin 1988.

III Das Verhalten von Faserzement unter der Beanspruchung des BAM-XENOTEST 1200-Kurzzeitbewitterungsverfahrens

Prof. Dr. habil. Hans-Joachim Deppe
Ing. Klaus Schmidt

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Aufgabenstellung	115
2 Durchführung der Prüfungen	117
3 Angaben zum Untersuchungsmaterial	119
4 Untersuchungsergebnisse	121
5 Schlußfolgerungen	127
6 Abbildungsverzeichnis	129
7 Tabellenverzeichnis	131
8 Literaturverzeichnis	132

1 Aufgabenstellung

Zu ermitteln waren Anhaltspunkte über das voraussichtliche Verhalten von Faserzementplatten, bei denen die bislang übliche Asbestfaser durch spezielles Fasergemisch ersetzt wird. Angaben über Erhalt der Funktionstüchtigkeit über längere Zeiträume lassen sich durch Kurzzeitverfahren nur schwer ermitteln und sind in jedem Falle mit Risiken behaftet. In der Regel fehlen bei Kurzzeitverfahren vergleichende Langzeitversuche, so daß mit Annahmen gearbeitet werden muß. Sodann bleibt immer die Frage, ob infolge Raffung die Prüfparameter bei Kurzzeitverfahren ausreichend bemessen werden. Sind sie zu schwach angesetzt, erhält man ein gegenüber praktischem Einsatz zu günstiges Ergebnis. Werden die Parameter zu scharf gewählt, so wird die technische und wirtschaftliche Entwicklung mit unverhältnismäßig hohen Anforderungen konfrontiert. Kurzprüfverfahren eignen sich in der Regel als Eignungstest. Sie vermitteln Hinweise über das Niveau eines Werkstoffes und ermöglichen darüber hinaus Relativ-Vergleiche zwischen verschiedenen Werkstoffen. Zweckmäßigerweise sollten sie jedoch mit Kurzzeitbewitterungsverfahren gekoppelt werden, die als Leistungsprüfung unter Einbeziehung des Zeitfaktors Aussagen zur Langzeitbeständigkeit und zum Alterungsverhalten erbringen.

Durch die nachfolgend gewählte Kombination mehrerer Prüfverfahren (BAM-XENOTEST-Verfahren, Dauerstandversuche im Wechselklima) konnte an langjährige Erfahrungen mit Bewitterungsversuchen an Holzwerkstoffen in der BAM angeknüpft werden (Deppe/Schmidt, 1986 und 1987). Beim BAM-XENOTEST-Verfahren liegen Ergebnisse aus vergleichenden Untersuchungen vor, bei denen zwischen den Resultaten nach 16 Jahren Freibewitterung und 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung hinreichend genaue Übereinstimmungen vorliegen. Dauerstandversuche im Wechselklima geben unter definierten Bedingungen Hinweise auf die Formbeständigkeit der Materialien. Aus versuchstechnischen Gründen können Dauerstandversuche im XENOTEST nicht durchgeführt werden.

Durch die Kombination der vorstehend beschriebenen Prüfverfahren sollten ermittelt werden:

- Aussagen zum langfristigen Erhalt der Funktionstüchtigkeit der Materialien, wobei der Maßstab die Belastung unter Freibewitterungsbedingungen ist
und
- orientierende Angaben zur Formbeständigkeit unter Belastung.

Entsprechend der Aufgabenstellung wurden 3 Gruppen gebildet:

- a) Freilandbewitterung (Freibewitterung)
- b) Kurzzeitbewitterung (XENOTEST-Verfahren)
- c) Dauerstandversuche bei Wechselklimalagerung

zu a) Die Proben wurden eingebaut auf einem Freibewitterungsstand Berlin-Grünwald bei 45° Neigung und gegen Süd-West gerichtet (vgl. Abbildung 80).

Probengrößen: 480 mm x 200 mm x Dicke
Untersuchungsbeginn: Juni 1984
Ausbau der Proben: Mai 1985 (1 Jahr)
Mai 1986 (2 Jahre)
Mai 1987 (3 Jahre)
Ende 1988 (<5 Jahre)

zu b) Die Untersuchungen wurden in einem XENOTEST-Gerät Typ 1200, Fabrikat ORIGINAL HANAU, unter Verwendung spezieller Probenträger vorgenommen, vgl. Abbildungen 74 und 75 sowie Abbildung 79, Programmablauf und Beanspruchung im XENOTEST-Gerät. Eine Verfahrensbeschreibung ist enthalten bei Deppe/Schmidt 1979.

Es wurden von 22 angelieferten Fabrikaten je 3 Proben für jeweils 24, 48 bzw. 72 Wochen in die XENOTEST-Geräte eingebaut, Gesamtanzahl: 198 Proben, Probengröße: 195 mm x 125 mm x Dicke.

Ausbau der 24-Wochen-Proben im Dezember 1984,
Ausbau der 48-Wochen-Proben im November 1985,
Ausbau der 72-Wochen-Proben im März 1987.

zu c) Der Einbau der Proben für die Dauerstandversuche in eine Wechselklimakammer unter definierter Klimabeanspruchung und Dauerlast erfolgte im August 1985.

Beanspruchung: 7 d 20 °C/85 % r.L. und 7 d 20 °C/30 % r. Luftfeuchte sowie 1/3 der durchschnittlichen Biegebruchlast als Dauerbelastung (vgl. Abbildung 76, Dauerstand-Prüfvorrichtung).

Als Vergleich wurden Proben unter Dauerlast einem konstanten Klima von 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte ausgesetzt.

Der Ausbau der Proben aus den Klimakammerversuchen und unter Konstantklimaeinfluß erfolgte nach einjähriger Versuchsdauer im September 1986.

Für die Auswertung wurden folgende Messungen laufend vorgenommen:

Dimensionsänderungen, Masseänderungen, Festigkeitsverlust (Biege-, Druck- und Querkzugfestigkeit sowie E-Modul), Oberflächenveränderungen und Durchbiegung ("Kriechen").

2 Durchführung der Prüfungen

Im einzelnen wurden folgende Messungen und Prüfungen vor und nach den jeweiligen Beanspruchungen vorgenommen:

- a) Ermittlung der Plattenrohddichte r_u in kg/m^3 , bezogen auf das bei $105\text{ }^\circ\text{C}$ getrocknete Material nach DIN 274;
- b) Ermittlung der Änderung der Plattenrohddichte r_u in kg/m^3 in % an je 3 Proben im Verlauf von 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung im Abstand von 4 Wochen, bezogen auf das lufttrockene Material bei Einbau in das XENOTEST-Gerät (etwa $17 - 20\text{ }^\circ\text{C}$ und $45 - 55\%$ rel. Luftfeuchte). Das Volumen wurde mit einem Meßwertgeber, Fabrikat Heidenhain, ermittelt;
- c) Ermittlung der Änderung der Dicke in % an je 3 Proben im Verlauf von 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung im Abstand von 4 Wochen, bezogen auf das lufttrockene Material beim Einbau in das XENOTEST-Gerät. Die Dicke wurde mittels Meßwertgeber gemessen (s. auch b);
- d) Ermittlung der Änderung der Wasseraufnahme bzw. Gewichtsänderung im Verlauf von 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung im Abstand von 4 Wochen, bezogen auf das lufttrockene Material beim Einbau in das XENOTEST-Gerät;
- e) Ermittlung der Plattenfeuchte u in % nach DIN 52 361;
- f) Ermittlung der Plattenfeuchte u in % direkt nach Ausbau aus dem XENOTEST-Gerät (Naßphase) bzw. aus der Freibewitterung. Die Ermittlung erfolgte durch Berechnung anhand der Ein- und Ausbaugewichte in Verbindung mit den Probenfeuchtwerten nach Klimatisierung ($20\text{ }^\circ\text{C}/65\%$ r.L.);
- g) Ermittlung der Biegefestigkeit in N/mm^2 rechtwinklig zur Plattenebene in Anlehnung an DIN 52 362, Blatt 1 (bewitterte Seite: Zugzone bei der Biegeprüfung), Probengröße $195\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times \text{Dicke}$, vgl. Abbildung 77, Stützweiten (l_s):

Proben-Nr. 1 - 13	50 mm,
Proben-Nr. 14 - 18	70 mm,
Proben-Nr. 19 - 22	80 mm;
- h) Ermittlung des Biege-Elastizitäts-Moduls in N/mm^2 rechtwinklig zur Plattenebene in Anlehnung an DIN 52 362, Blatt 1, sonstige Bedingungen wie bei der Biegeprüfung;

- i) Ermittlung der Druckfestigkeit in N/mm^2 parallel zur Plattenebene in Anlehnung an DIN 52 376, Probengröße: 50 mm x 50 mm x Dicke, vgl. Abbildung 77;
- j) Ermittlung der Querkzugfestigkeit in N/mm^2 in Anlehnung an DIN 52 365. Benutzt wurden zunächst 18 mm dicke Buchenfurnier-Joche als Krafteinleitungs- bzw. Verteilungsplatten, nachfolgend wurden Stahljoche verwendet. Die bewitterten und unbewitterten Flächen der Proben wurden vor Aufleimung der Joche geschliffen (Abschliff der Beschichtung bzw. verwitterten Lockerzonen in einer Tiefe von ca. 0,2 mm bis 0,5 mm, Körnung des Schleifpapiers 120), vgl. Abbildung 77;
- k) Visuelle und mikroskopische Beurteilung der bewitterten Oberflächen;
- l) Feststellung des Kreidungsgrades nach DIN 53 223 mittels Klebbandmethode, Fabr. ERICHSEN, Modell 466;
- m) Feststellung der Farbänderung nach DIN 54 001, Bewertung mittels Graumaßstab;
- n) Glanzgradmessung nach DIN 67 530 mit Hilfe eines "60°-pocket gloss-Reflektometers", Fabr. MALLINCKRODT;
- o) Vergleichende Biegefestigkeitsprüfungen mit unterschiedlich großen Probekörpern und Stützweiten (l_s) rechtwinklig zur Plattenebene in Anlehnung an DIN 52 362, Blatt 1; Sichtseite *): Zugzone bei der Biegeprüfung.
- Probengrößen: 195 mm x 50 mm x Dicke
- | | | | |
|------------|---------|---------|--------|
| Proben-Nr. | 1 - 13 | $l_s =$ | 50 mm, |
| Proben-Nr. | 14 - 18 | | 70 mm, |
| Proben-Nr. | 19 - 22 | | 80 mm, |
- Probengrößen: 300 mm x 50 mm x Dicke
- | | | | |
|------------|--------|---------|---------|
| Proben-Nr. | 1 - 22 | $l_s =$ | 200 mm, |
|------------|--------|---------|---------|
- Probengrößen: 300 mm x 100 mm x Dicke
- | | | | |
|------------|--------|---------|---------|
| Proben-Nr. | 1 - 22 | $l_s =$ | 200 mm; |
|------------|--------|---------|---------|
- p) Vergleichende Druckfestigkeitsprüfungen mit unterschiedlich ausgeformten Probekörpern parallel zur Plattenebene in Anlehnung an DIN 52 376, Probengrößen: 50 mm x 50 mm x Dicke, Prüfkörper: 1 Dicke bzw. jeweils 2 oder 3 Prüfkörper wurden miteinander verklebt und die Schmalflächen bündig geschliffen, so daß Prüfkörper mit 1 Plattendicke, mit 2 bzw. 3 Plattendicken entstanden, vgl. Abbildung 78;

*) Sichtseite = glatte bzw. dekorative Oberseite

3 Angaben zum Untersuchungsmaterial

Die Versuchsmaterialien wurden in 4 Gruppen eingeteilt:

1. Dachplatten

Lfd.-Nr.	1	AZ:	Asbestzementplatten, beschichtet
	2	FZ:	Faserzementplatten, beschichtet
	3	FZ	Faserzementplatten, beschichtet

2. Fassadenplatten

Lfd.-Nr.	4	AZ	Asbestzementplatten, unbeschichtet
	5	AZ	Asbestzementplatten, beschichtet
	6	FZ	Faserzementplatten, unbeschichtet
	7	FZ	Faserzementplatten, unbeschichtet
	8	FZ	Faserzementplatten, unbeschichtet
	9	FZ	Faserzementplatten, unbeschichtet
	10	FZ	Faserzementplatten, beschichtet
	11	FZ	Faserzementplatten, beschichtet
	12	FZ	Faserzementplatten, beschichtet
	13	FZ	Faserzementplatten, beschichtet

3. Wellplatten

Lfd.-Nr.	14	AZ	Asbestzementplatten, beschichtet
	15	FZ	Faserzementplatten, unbeschichtet
	16	FZ	Faserzementplatten, unbeschichtet
	17	FZ	Faserzementplatten, beschichtet
	18	FZ	Faserzementplatten, beschichtet

4. Tafeln

Lfd.-Nr.	19	AZ	Asbestzementtafeln, unbeschichtet
	20	AZ	Asbestzementtafeln, unbeschichtet
	21	FZ	Faserzementtafeln, unbeschichtet
	22	FZ	Faserzementtafeln, unbeschichtet.

Anmerkung

In Abschnitt IV sind die in den beiden Vorhabenteilen (II und III) verwendeten Bezeichnungen der untersuchten Materialien einander gegenübergestellt.

4 Untersuchungsergebnisse

Ermittelt wurden von allen 22 Versuchsmaterialien die Ausgangswerte (Materialeigenschaften nach Konditionierung), Werte nach 24, 48 und 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung, nach 1, 2, 3 und fast 5 Jahren Freibewitterung sowie Werte nach 24, 48 und 72 Wochen, 2 und 3 Jahren Lagerung im Normalklima (20 °C/65 % r.L.). Ferner wurden die bewitterten Oberflächen nach den oben angegebenen Zeiträumen visuell, mikroskopisch sowie hinsichtlich anderer Veränderungen gemessen bzw. beurteilt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 1 bis 7 und Abbildungen 1 bis 73 zusammenfassend dargestellt.

Die Festigkeits- und Verformungsuntersuchungen im Rahmen des Vorhabens sind mit dem Ziel durchgeführt worden, durch Alterung und Bewitterungseinflüsse hervorgerufene relative Veränderungen zu erfassen. Bei der Interpretation der ermittelten Werte sind die hier zum Beispiel mit Rücksicht auf die Größe der Bewitterungskammer gewählten Probenabmessungen, Stützweiten sowie auch die speziellen Krafteinleitungsbedingungen zu berücksichtigen.

Bei Betrachtung sämtlicher Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen aus der Frei- und XENOTEST-Bewitterung kann man zunächst feststellen, daß für die Biegefestigkeit sehr gute bis gute Übereinstimmung zwischen den Versuchsergebnissen nach XENOTEST-Bewitterung bis zu 72 Wochen einerseits und nach 3jähriger Freibewitterung andererseits nachgewiesen werden konnte. Im Falle des elastischen Verhaltens beim Biegeversuch (Elastizitätsmoduls) sowie bei der Druckfestigkeit ist diese Übereinstimmung zum Teil auch vorhanden, jedoch weniger ausgeprägt (siehe dazu die Bilder 1 bis 30). Dies schlägt sich auch in den Bestimmtheitsmaßen für die linearen Regressionen nieder, für die je drei Ergebnisse paarweise zum einen für die Festigkeitsprüfungen nach XENOTEST-Bewitterung bis zu 72 Wochen und Freibewitterung zwischen 1 und 3 Jahren und zum anderen auch für 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung und 3 Jahre Freibewitterung aufgestellt worden sind (vgl. Bilder 66 bis 73). Insbesondere für die Biegefestigkeit und den beim Biegeversuch ermittelten Elastizitätsmodul läßt sich demnach hier allgemein ableiten, daß innerhalb des untersuchten Zeitraumes von 3 Jahren Freibewitterung und in Extrapolation der XENOTEST-Versuche auch darüber hinaus unter der vorgegebenen speziellen Witterungsbeanspruchung die Werte zunehmen.

Aus den Bildern 1 bis 40 ist zu ersehen, daß bei fast allen Plattentypen - besonders bei den AZ-Typen - eine Festigkeitssteigerung nach 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung sowie nach 1 bis 2 Jahren und bei einigen Typen auch noch nach 3 Jahren Freibewitterung festzustellen war, was durch Nachhärtungs- und Carbonatisierungsvorgänge, verbunden mit dem Versprödungseffekt, hervorgerufen wird. Es kam dann nach weiteren 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung bei einigen Platten-

typen zu Festigkeitsminderungen, die sich aber - mit einigen Ausnahmen - nach weiteren 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung weitgehend stabilisiert hatten. Zu statistisch gesicherten Festigkeitsminderungen bzw. Nichtstabilisierungen in den letzten 12 Wochen XENOTEST-Bewitterung (60. bis 72. Woche) kam es bei der Biegefestigkeit bei der FZ-Fassadenplatte Nr. 7 und den FZ-Wellplatten Nr. 17 und 18. Beim Elastizitätsmodul zeigten einige der FZ-Fassadenplatten (z.B. Nr. 3, 7 und 8) nach XENOTEST-Bewitterung zunächst einen Anstieg und danach mit zunehmender Bewitterungsdauer wieder eine Abnahme, die der Tendenz nach nicht abgeschlossen zu sein scheint. Der Größenordnung nach unterschreiten die erreichten Endwerte (72 Wochen Bewitterung) die Ausgangspunkte nicht oder nur unwesentlich.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der 6 mitgeprüften Asbestzement-Plattentypen (AZ) fällt auf, daß in der Tendenz ein deutlich höheres Ausgangsniveau bei den Festigkeitseigenschaften festzustellen war im Vergleich zu den Faserzement-Plattentypen (FZ). Dieser Trend blieb auch im Verlauf der Bewitterungsbeanspruchungen erhalten.

Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung erlaubten weitergehende Untersuchungen. Bei Betrachtung der Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen während fast 5 Jahren Freibewitterung und 24 Wochen Kurzzeitbewitterung (XENOTEST-Bewitterung) ist bei einer jeweiligen Zusammenfassung aller Dach-, Fassaden- und Wellplatten sowie aller Tafeln festzustellen, daß eine gute Übereinstimmung beider Bewitterungsverfahren vorliegt (vgl. Bild 83 und 84).

Bei der Biegefestigkeit zeigt sich noch nach 5 Jahren Freibewitterung bei den 4 Asbestzement-Plattentypen (AZ-Platten) der Dach-, Fassaden- und Wellplatten sowie der Tafeln eine tendenzielle Festigkeitssteigerung. Diese Festigkeitssteigerung ist gleichfalls nach 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung festzustellen (s. Abb. 32 und 83). Das Verhalten der 4 Faserzement-Plattentypen (FZ-Platten) weist sowohl innerhalb der 5jährigen Freibewitterung als auch während der 24wöchigen XENOTEST-Bewitterung in der Tendenz gleiche Festigkeitsverläufe auf (vgl. Bild 83 und 84). In Abbildung 85 ist der Biegefestigkeitsverlauf bis 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung zusammenfassend dargestellt. Nach 72 Wochen ist eine deutliche Differenzierung zwischen den AZ- und FZ-Plattentypen erkennbar. Bis auf die AZ-Wellplatten hatten die anderen AZ-Platten ein höheres Ausgangsfestigkeitsniveau. Nach deutlich erkennbaren Festigkeitssteigerungen bei den 4 AZ-Plattentypen innerhalb der ersten 24 Wochen der Bewitterung erfolgte eine Stabilisierung der Biegefestigkeit in den letzten 36 Wochen der Kurzzeitbewitterung. Eine gleiche Tendenz mit weniger ausgeprägter Festigkeitszunahme in den ersten 24 Wochen ist auch bei den FZ-Plattentypen festzustellen. Nur bei den FZ-Wellplatten ist eine Festigkeitsminderung gegenüber den Ausgangswerten abzule-

sen. Zu den Wellplatten (AZ und FZ) ist anzumerken, daß aus technischen Gründen nichtondulierte Platten für die Untersuchungen hergestellt und eingesetzt wurden. Aus diesem Grund ist auch das niedrige Festigkeitsniveau bei allen AZ- und FZ-Wellplatten abzuleiten.

Die Berechnung der linearen Regression mit den Wertepaaren der Biegefestigkeit nach 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung (x-Achse) und 5 Jahren Freibewitterung (y-Achse) ergab ein hohes Bestimmtheitsmaß (r^2) von 0,78 (vgl. Bild 86).

Aus den Ergebnissen für die hier vorgenommenen Querkzugfestigkeitsprüfungen ließ sich eine solche Übereinstimmung zunächst nicht nachweisen, auch schien keine altersabhängige Zunahme der Festigkeitswerte belegbar (vgl. Bilder 31 bis 40, 69 und 73). Die Werte liegen hier mehr oder weniger ungeordnet innerhalb einer bestimmten Bandbreite. Daraus ist zu folgern, daß sich entweder die Materialeigenschaften nicht oder nur gerinfügig verändern, oder daß diese Veränderungen von anderen Einflüssen (z.B. aus den Versuchsbedingungen) überlagert werden. Auch beide Ursachen sind denkbar. Wie Vergleichsversuche ergeben haben, dürften die ursprünglich mit Hilfe der Sperrholzjoche "weich" ausgelegte Krafteinleitung egalierend gewirkt haben. Offenbar sind die mittels Sperrholz-Jochen ermittelten Werte der Querkzugfestigkeit für die Beurteilung des Lagenverbundes nicht geeignet. Zur Erklärung kann folgendes angeführt werden:

Zu Beginn des Forschungsvorhabens war die Querkzugfestigkeit (Lagenzugfestigkeit) als Prüfung im Rahmen des Vorhabens nicht vorgesehen. Diese Prüfung wurde erst in das Untersuchungsprogramm mit aufgenommen, als die ersten Prüfungen nach 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung durchgeführt wurden, bzw. die Ausgangswerte bestimmt wurden. Aus technischen Gründen und aufgrund der hohen Probenanzahl bei jeder anfallenden Prüfung (jeweils $N = 88$) sowie noch nicht eindeutig feststehender Stahljochausformung (z.B. runde oder quadratische Form, Dicke der Stahljoche, im Laboratorium 2.14 existierte eine runde Stahljochform) wurde im Referat 5.01 zunächst die Prüfung der Querkzugfestigkeit in Anlehnung an DIN 52 365 mit 18 mm dicken Buchenfurnierplatten-Jochen begonnen (vgl. Bild 87, rechtes Bild).

Im Verlaufe des Vorhabens wurden Ergebnisse vergleichender Untersuchungen der Querkzugfestigkeit mit verschiedenen Stahljochausformungen sowie mit runden und quadratischen Probekörpern bekannt. Dabei erwies sich ein quadratisches, 30 mm dickes Stahljoch mit ebenso quadratischen Proben von 50 mm x 50 mm als gut geeignet. Die quadratische Joch- und Probenform erzielte ebenso hohe Querkzugfestigkeitswerte wie die runden Formen (vgl. Bild 88). Für das Referat 5.01 kamen aus Zweckmäßigkeitsgründen die quadratischen Formen zur Anwendung, da das Zuschneiden der zahlreichen Proben wesentlich vereinfacht durchgeführt werden konnte. In der Zwischenzeit (1988) ist eine entsprechende Querkzugvorrichtung

angefertigt worden, die für alle weiteren Prüfungen eingesetzt wird (vgl. Bild 87, linke Abbildung).

Daraufhin wurde unbewittertes sowie kurzzeit- bzw. freibewittertes Rückstell-Probenmaterial jeweils mit 30 mm dicken Stahljochen (vgl. Bild 87, linkes Bild) verklebt und die Querkzugfestigkeit ermittelt. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind zusammenfassend für alle Dach-, Fassaden- und Wellplattentypen sowie Tafeln in den Abbildungen 89 bis 91 dargestellt.

Aus diesen Darstellungen sind nunmehr eindeutige Differenzierungen zu erkennen. Sowohl bei der Freibewitterung als auch bei der XENOTEST-Bewitterung weisen die AZ-Plattentypen ein deutlich höheres Festigkeitsniveau als die FZ-Plattentypen auf. Im Verlauf der 5jährigen Freibewitterung hatten sich alle eingesetzten Plattentypen - nach anfänglichen Festigkeitsminderungen (Bild 89) - in den letzten 2 Jahren der Bewitterung stabilisiert. Bei der XENOTEST-Bewitterung über 72 Wochen kam es in den ersten 4 bis 8 Wochen zu keinen Festigkeitsveränderungen. Nach 12 bis 24 Wochen der Kurzzeitbewitterung zeigten die FZ-Plattentypen - mit Ausnahme der FZ-Tafeln - leichte Festigkeitsminderungen. Dieser leichte Abfall der Festigkeit setzte sich auch in den folgenden 48 Wochen XENOTEST-Bewitterung fort - Ausnahme waren AZ-Fassadenplatten und FZ-Dachplatten - und die Festigkeit stabilisierte sich offensichtlich noch nicht ausreichend (vgl. Bild 90 und 91).

Das Bestimmtheitsmaß (r^2) der linearen Regression bei den Querkzugfestigkeitsprüfungen mit 18 mm dicken Buchenfurnierplatten-Jochen war nur 0,10 bzw. 0,04 (vgl. Bilder 69 und 73). Hier besteht keine Beziehung zwischen 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung und 3 Jahren Freibewitterung.

Die Korrelationsberechnung der Querkzugfestigkeit mit 30 mm dicken Stahljochen nach 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung und 5 Jahren Freibewitterung ergab jedoch ein hohes Bestimmtheitsmaß von 0,83 (s. Bild 92). Bei Verwendung der 30 mm dicken Stahljocher liegt somit eine gute Beziehung zwischen den beiden Bewitterungsbeanspruchungen vor.

Eine Vergleichbarkeit der 48-Wochen- und 72-Wochen-XENOTEST-Ergebnisse mit den Resultaten aus der dreijährigen Freibewitterung ist nicht gegeben. Nach unserer Erfahrung mit anderen Materialien entsprechen 48 Wochen XENOTEST-Bewitterung einem Freibewitterungszeitraum (Waldklima, 45° Schräglage gegen Süd-West gerichtet) von etwa 10 bis 12 Jahren, und 72 Wochen von etwa 15 bis 16 Jahren).

Je eine Probe der 22 Plattentypen wird weiterhin auf dem Stand der BAM freibewittert, um nach Ablauf von etwa 10 Jahren weitere Ergebnisse zu erhalten.

Die Ergebnisse der Dauerstandversuche sind in den Bildern 41 bis 50 dargestellt. Bei diesen Versuchen unter Last (1/3 der Biegebruchlast) im Wechselklima (7d 20 °C/85 % r.L. und 7d 20 °C/30 % r.L.) sowie im Normalklima (20 °C/65 % r.L.) nach einem Zeitraum von 360 Tagen, lag das Durchbiegungsverhältnis ($V = f_t : f_0$) bei den Versuchen im Normalklima bei allen 22 Plattentypen am Anfang der Belastungszeit (nach 5 Tagen) bei etwa 1. Nach 360 Tagen hatten die Dachplatten, die meisten Fassadenplatten und die Tafeln ein Durchbiegungsverhältnis um 2, einige Fassadenplatten und die Wellplatten einen Wert um etwa 3 erreicht (vgl. Bilder 42, 44, 46, 48 und 50).

Bei den Versuchen im Wechselklima lag das Durchbiegungsverhältnis am Anfang (nach 5 Tagen) im Durchschnitt bei etwa 2. Nach 360 Tagen waren die AZ-Dachplatten, AZ-Fassadenplatten und die 4 AZ- bzw. FZ-Tafeln am wenigsten durchgebogen; sie hatten einen Wert von etwa 3, hingegen die anderen Plattentypen Werte zwischen 4 und 5 und die der Wellplatten lagen zwischen 4, 5 und 8 (vgl. die Bilder 41, 43, 45, 47 und 49).

Eine zusammenfassende Darstellung weiterführender Ergebnisse aus Dauerstandversuchen ist in den Abbildungen 93 und 94 wiedergegeben. Bei diesen Versuchen unter Last (1/3 der Biegebruchlast) im Normalklima (20 °C/65 % r.L.) und Wechselklima (7 d 20 °C/85 % r.L. und 7 d 20 °C/30 % r.L.) nach einem Zeitraum von fast 400 Tagen wiesen die AZ-Plattentypen - mit Ausnahme der AZ-Wellplatten - die geringste Verformung auf.

Die Ergebnisse der korrespondierenden Veränderungen der Rohdichte, Wasseraufnahme (Gewichtsänderung) und Dickenquellung sind in den Bildern 51 bis 65 zusammengefaßt.

Aus der Veränderung der Rohdichte gleich nach Beginn der Bewitterung ist abzuleiten, daß die Anlagerung von Wasser, das durch Trocknung bei 105 °C nicht wieder ausgetrieben werden kann und daher zur Massezunahme führt, schon nach 3 Wochen Bewitterung abgeschlossen zu sein scheint. Dazu korrespondieren die Kurven der Wasseraufnahme. Sowohl an der Veränderung der Rohdichte als auch an der der Wasseraufnahme läßt sich im übrigen die große Streuung der Materialien selbst und untereinander gut erkennen, wobei sich auch die Herstellungsmethoden (ungepreßt, gepreßt usw.) widerspiegeln und die durch die Zementsteinmatrix bestimmte Ähnlichkeit zwischen Faserzement und Asbestzement deutlich wird. Qualitativ gilt dies auch für die Veränderung der Dickenquellung, die - von Ausreißern abgesehen - jeweils für Platten- und Tafelmaterial ähnliche Tendenz und Größenordnung aufweist und im allgemeinen geringfügig anzuwachsen scheint. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang das Verhalten des FZ-Plattenmaterials

Nr. 7, das nach 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung etwa den 3fachen Wert der vergleichbaren Materialien aufweist (vgl. dazu die Festigkeitsentwicklung).

Die visuelle Beurteilung der bewitterten Oberflächen nach 24, 48 und 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung ergab durchweg sichtbare farbliche Veränderungen (Aufhellung, Vergrauung). Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung waren bei den beschichteten Plattentypen zum Teil aufgeplatzte kleine Blasen und Schrumpfrisse sowie bei den unbeschichteten Plattentypen das Ab- bzw. Herauslösen von Zementstein und Fasern zu erkennen. Nach 3 Jahren Freibewitterung hingegen waren nur sehr geringe Oberflächenveränderungen festzustellen, vergleiche die Tabellen 1 bis 7 sowie einige Aufnahmen von Musterbeispielen der bewitterten und unbewitterten Oberflächen (Abbildungen 81 und 82).

Abkreidung, Farbänderungen und Glanzgradveränderungen sind in den Tabellen 8 und 9 zusammengefaßt dargestellt.

Ergebnisse aus vergleichenden Biegefestigkeits- und Druckfestigkeitsprüfungen mit unterschiedlich großen Probekörpern und Stützweiten sowie unterschiedlich ausgeformten Probekörpern sind den Tabellen 10 und 11 zu entnehmen. Bei diesen vergleichenden Untersuchungen wurden beim Biegeversuch rechtwinklig zur Plattenebene 50 mm breite Proben eingesetzt und mit unterschiedlichen Stützweiten von $L_S = 50, 70$ und 80 mm (je nach Dicke der Proben) geprüft. Für die Stützweite $L_S = 200$ mm wurden jeweils 50 und 100 mm breite Proben verwendet. Die Versuchsergebnisse bei einer Stützweite von 200 mm lagen bei 50 mm sowie 100 mm breiten Proben mit nur 5 Ausnahmen höher als die Werte aus den Prüfungen mit 50 mm breiten Proben und Stützweiten, die in etwa nach der Dicke der Probe festgelegt wurden (50, 70 bzw. 80 mm Stützweite).

Bei den Druckfestigkeitsprüfungen parallel zur Plattenebene (Probengröße: 50 mm x 50 mm x Dicke) mit den Probekörpertypen: 1 Dicke 1/3 unten eingespannt, 2 Dicken sowie 3 Dicken miteinander verklebt, gab es durchweg - mit Ausnahme der Nr. 17 und 21 - höhere Druckfestigkeitswerte im Vergleich zu den Proben mit einer Dicke, die frei angelegt waren, vgl. Tabelle 11 und die Abbildungen 77 und 78.

5 Schlußfolgerungen

Die untersuchten Materialien wiesen ein sehr unterschiedliches Verhalten auf, was vermutlich in den Nacherhärtungsvorgängen möglicherweise auch in Carbonatisierungseinflüssen begründet ist (vgl. zum Beispiel die Bilder 11, 14, 22, 23). Die Veränderungen der Materialien werden zwangsläufig bei vergleichend vorgenommenen XENOTEST- und Freibewitterungen durch solche Einflüsse überlagert. Wünschenswert wäre es daher gewesen, Ergebnisse aus Freibewitterungen heranziehen zu können, die über einen längeren Zeitraum, z.B. von wenigstens 8 Jahren, gelaufen sind.

Bei den vergleichend vorgenommenen Dauerstandversuchen unter Last, sowohl im Wechsel- als auch im Normalklima, ergab sich erwartungsgemäß, daß bei Wechselklimabedingungen ein deutlicherer Differenzierungsprozeß vorliegt. Dabei ergab sich im Trend eine geringere Formbeständigkeit bei den FZ-Platten im Vergleich zu den AZ-Platten (Abb. 41 bis 50). Besonders augenfällig demonstriert wird dieser Umstand in den Abbildungen 47 und 48.

Bezüglich der Dickenquellung ist anzumerken, daß bei den meisten Materialien ein Teil der Quellung durch anschließendes Schwinden wieder ausgeglichen wird. Dieser Vorgang ist offenbar materialabhängig und wird über die Wasseraufnahme auch von der Porenstruktur beeinflusst.

Die zusammenfassende Auswertung von XENOTEST- und Freibewitterungsergebnissen (Bilder 66 bis 73) erbrachte für die entsprechenden Zuordnungen unterschiedlich gute Resultate. Während die zugeordneten Kollektive aller Ergebnisse aus XENOTEST- und Freibewitterungsprüfungen erwartungsgemäß ein relativ hohes Streuungsmaß aufweisen (Abb. 66 bis 69), ergaben sich bei den Zuordnungen nach 3 Jahren Freibewitterung und 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung - wie sie den vorliegenden Erfahrungen entsprechen - bessere Bestimmtheitsmaße. Dies gilt in erster Linie für die Biegefestigkeit ($B = 0,87$), den Elastizitätsmodul ($B = 0,76$) und die Druckfestigkeit ($B = 0,72$), nicht hingegen für die Querkzugfestigkeit, so daß auch anhand der XENOTEST-Ergebnisse bezüglich des Langzeitverhaltens unter Zugrundelegung der hier angewandten Witterungsbeanspruchung extrapoliert werden kann. Dabei zeigt sich auch, daß im Bewitterungsverhalten keine signifikanten Unterschiede zwischen AZ- und FZ-Platten bestehen. Anders beim Dauerstandverhalten. Hier weist das AZ-Material in der Tendenz günstigere Ergebnisse auf.

Die angeführten Resultate aus Kurzzeitbewitterungsprüfungen mußten aus versuchstechnischen Gründen ohne Säurebeanspruchung (Umwelt-Schadstoffbelastungssimulation) gefahren werden. Es kann nach dem gegenwärtigen Erfahrungsstand

nicht abgeschätzt werden, inwieweit dieser Umstand die Dauerhaftigkeit von Faserzementmaterialien beeinflusst. Die Zeit von fünf Jahren Freibewitterung ist für eine diesbezügliche Aussage aufgrund bereits vorliegender Erfahrungen mit Sicherheit zu kurz bemessen.

Untersuchungen an AZ-Platten (H. Marfels, K.R. Spurny: FhG-Ber. München 4/88, p 37-40) haben ergeben, daß durch Witterungs- und Erosionsvorgänge (Wasser, Sonne, Frost, Wind) sowie auch unter Einfluß von "saurem Regen" (H_2SO_4 , H_2CO_3 und anderen Faktoren) es zu physikalischen und chemischen Veränderungen der Oberflächenschicht kommt (UBA-Ber. 1068004, Batelle, Frkft. 1982).

SO_2 und CO_2 waren die wichtigsten Schadgase. Zwischen ihnen und dem Zement kam es mit Wasser zu Mineralneubildungen (Gips), wodurch das Zementgefüge in unterschiedlicher Weise verändert wurde. Die eigentliche Zerstörung erfolgte durch ein Ineinandergreifen von Lösungsvorgängen, mechanischen Sprengungen der Porenräume infolge Wachstumsdruckes der sich bildenden Mineralien sowie durch mechanische Erosion (Spurny, K., Weiß, G. und Opiela, H.: Staub 39, 1979, 422-427). Korrosionstiefe und Korrosionsgeschwindigkeit hängen von Art und Konzentration der Luftschadstoffe ab. Aus den vorstehend genannten Gründen leitet sich ab, daß für eine Beurteilung des Langzeitverhaltens eine Leistungsprüfung in Form eines Kurzzeitbewitterungsverfahrens neben einer Eignungsprüfung unerläßlich ist, besonders um die Einwirkung von Luftschadstoffen erfassen zu können.

Mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie konnte festgestellt werden, daß die Korrosionsgeschwindigkeit an unbeschichteten AZ-Platten (Expositionszeiten zwischen 4 und 36 Jahren) im Mittel etwa 0,024 mm/Jahr beträgt. Das entspricht ungefähr 6 ‰ der Plattendicke pro Jahr. Die Korrosion der beschichteten AZ-Platten verläuft langsamer (Marfels und Spurny 1988).

6 Abbildungsverzeichnis

- Bilder 1 bis 40: Verlauf der Festigkeitseigenschaften aus XENOTEST- und Freibewitterung (Biege-, Druck- und Querkzugfestigkeit sowie E-Modul).
- Bilder 41 bis 50: Verlauf der Durchbiegung beim Dauerstandversuch im Wechsel- und Normalklima unter Last.
- Bilder 51 bis 55: Rohdichteänderungsverlauf nach 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung.
- Bilder 56 bis 60: Gewichtsänderung (Wasseraufnahme bzw. -abgabe) im Verlauf von 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung.
- Bilder 61 bis 65: Dickenänderung im Verlauf von 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung.
- Bilder 66 bis 69: Lineare Regression nach 24, 48 und 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung und 1, 2 und 3 Jahren Freibewitterung (Biege-, Druck- und Querkzugfestigkeit sowie E-Modul).
- Bilder 70 bis 73: Lineare Regression nach 24 Wochen XENOTEST- und 3 Jahren Freibewitterung (Biege-, Druck- und Querkzugfestigkeit sowie E-Modul).
- Bild 74: Probenraum des XENOTEST-Geräts 1200 mit Probenträgern und Proben.
- Bild 75: XENOTEST-Gerät, Typ 1200, Fabrikat ORIGINAL HANAU.
- Bild 76: Dauerstand-Prüfvorrichtung mit Lastauflage und Meßschema (Meßuhr).
- Bild 77: Biege- und Elastizitäts-Modul-Prüfanordnung; Druck- und Querkzugprüfanordnung.
- Bild 78: Druckprüfanordnung mit Probe 1/3 von unten eingespannt; Druckprüfanordnung mit Probe 2- bzw. 3fach verklebt und die Schmalflächen bündig geschliffen.
- Bild 79: Beanspruchungsparameter und Zeitfolge der Wechselbeanspruchung im XENOTEST 1200.
- Bild 80: Freibewitterungsstand der BAM im Grunewald, Berlin.
- Bilder 81 bis 82: Beispielaufnahmen von einigen Bewitterungsproben etwa 1:1 sowie mikroskopische Aufnahmen der bewitterten Oberflächen.
- Bild 83: Verlauf der Biegefestigkeit im Freibewitterungsversuch mit AZ- und FZ-Platten.
- Bild 84: Verlauf der Biegefestigkeit über 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung mit AZ- und FZ-Platten.
- Bild 85: Verlauf der Biegefestigkeit über 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung mit AZ- und FZ-Platten.
- Bild 86: Lineare Regression der Biegefestigkeit zwischen 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung und 5 Jahren Freibewitterung.
- Bild 87: Darstellung der Querkzugfestigkeitsprüfanordnung links = 30 mm Stahljoche, rechts = 18 mm Sperrholzjoche.

- Bild 88: Vergleichende Untersuchungen mit verschieden ausgeformten Jochen und Probekörpern (Eternit-Berlin).
- Bild 89: Verlauf der Querkzugfestigkeit im Freibewitterungsversuch mit AZ- und FZ-Platten.
- Bild 90: Verlauf der Querkzugfestigkeit über 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung mit AZ- und FZ-Platten.
- Bild 91: Verlauf der Querkzugfestigkeit über 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung mit AZ- und FZ-Platten.
- Bild 92: Lineare Regression der Querkzugfestigkeit zwischen 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung und 5 Jahren Freibewitterung.
- Bild 93: Dauerstandversuche unter Last im Normalklima mit AZ- und FZ-Platten.
- Bild 94: Dauerstandversuche unter Last und Wechselklima mit AZ- und FZ-Platten.

7 Tabellenverzeichnis

- Tabellen 1 bis 7: Visuelle und mikroskopische Beurteilung der bewitterten Oberflächen
- Tabelle 8: Feststellung des Kreidungsgrades mittels Klebbandmethode und Feststellung der Farbänderung (Graumaßstab)
- Tabelle 9: Glanzgradmessung mit Hilfe eines "60°-pocket gloss-Reflektometers"
- Tabelle 10: Vergleichende Prüfungen mit unterschiedlich großen Prüfkörpern und Stützweiten
- Tabelle 11: Vergleichende Prüfungen mit unterschiedlich ausgeformten Probekörpern

8 Literaturverzeichnis

Deppe, H.-J., Schmidt, K. 1979:
Vergleichende Lang- und Kurzzeit-Bewitterungsprüfungen an Holzwerkstoffen.
Holz Roh- Werkstoff 37:287-294

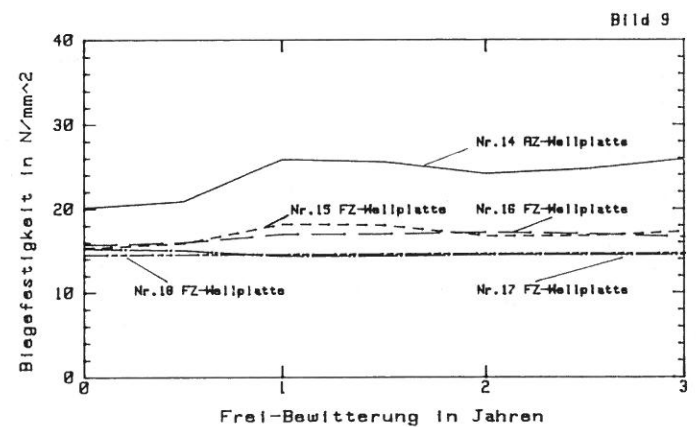
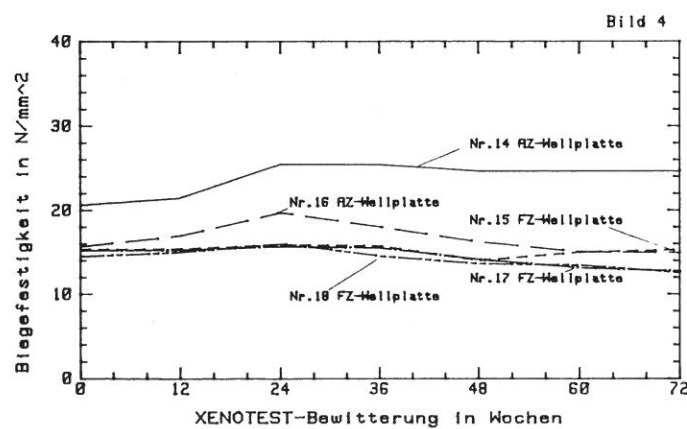
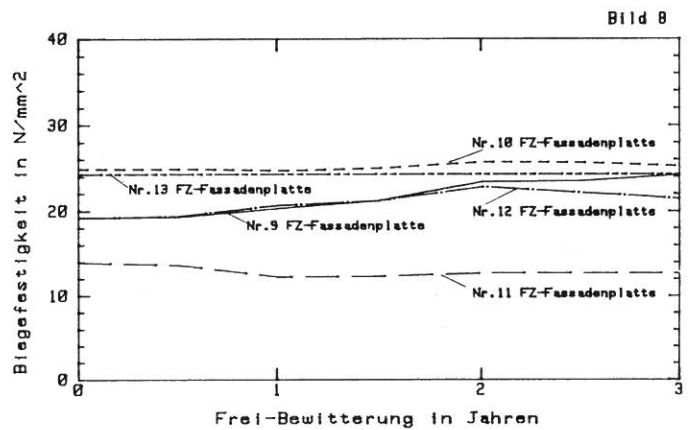
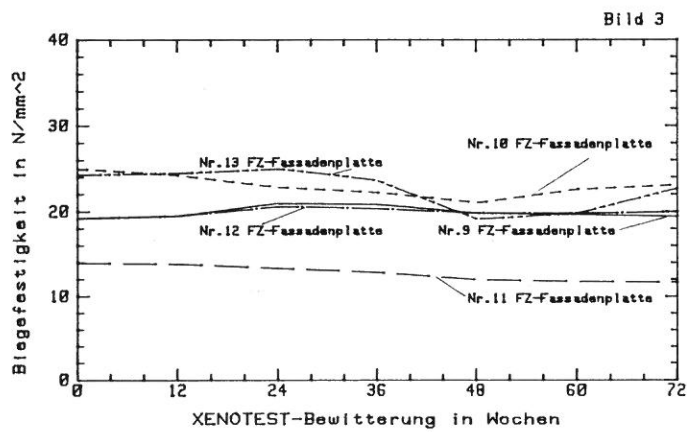
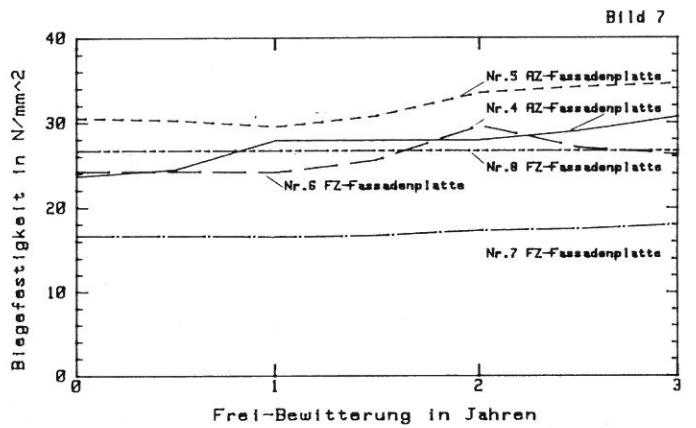
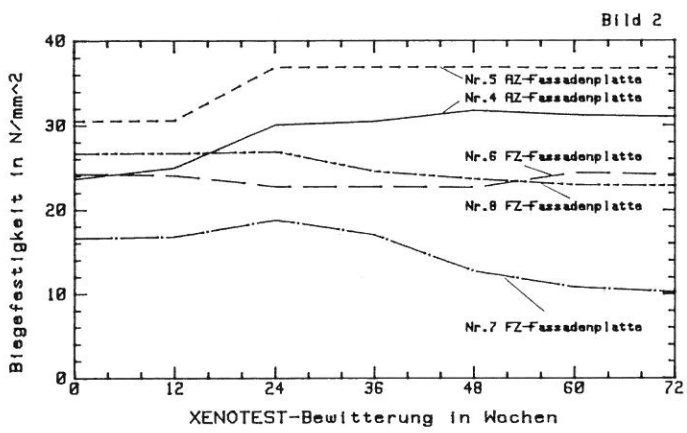
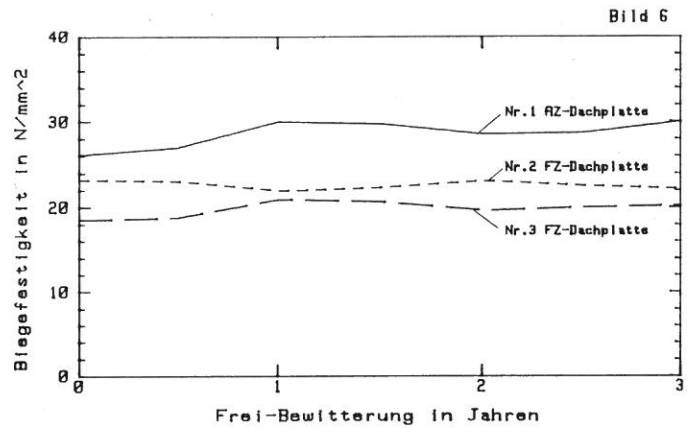
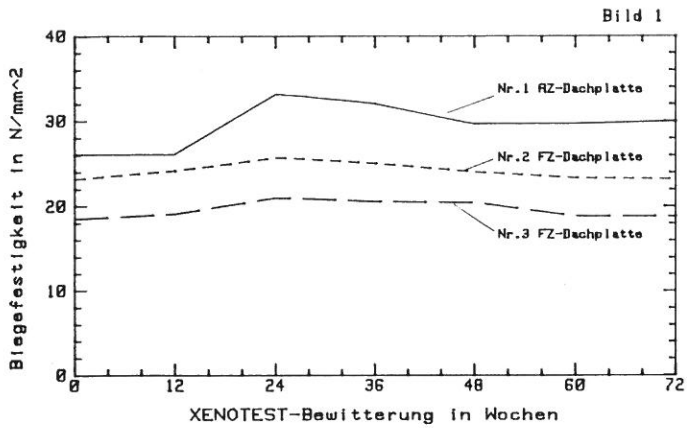
Deppe, H.-J., Schmidt, K. 1986:
Zur Prüfung der Witterungsbeständigkeit zementgebundener Holzspanplatten,
Holz Roh- Werkstoff 44:395-397

Deppe, H.-J., Schmidt, K. 1987:
Beurteilung geklebter Faltelemente aus zementgebundenen Holzspanplatten,
Holz- und Kunststoffverarbeitung (Stuttgart) 22:1180-1184

Marfels, H.; Spurny, K.R.:
Abwitterung von Asbestzementprodukten und ihre Beurteilung. FhG-Bericht 4-1988,
37-40

Spurny, K.; Weiß, G.; Opiela, H.:
Zur Emission von Asbestfasern aus Asbestzementplatten. Staub-Reinhalt. Luft 39,
422-427 (1979)

Abbildungen



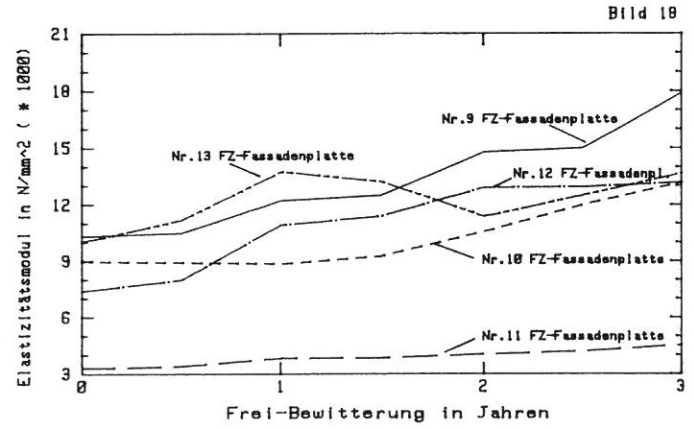
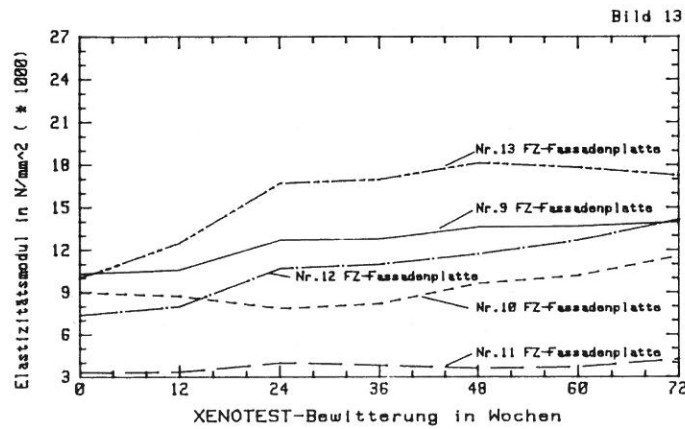
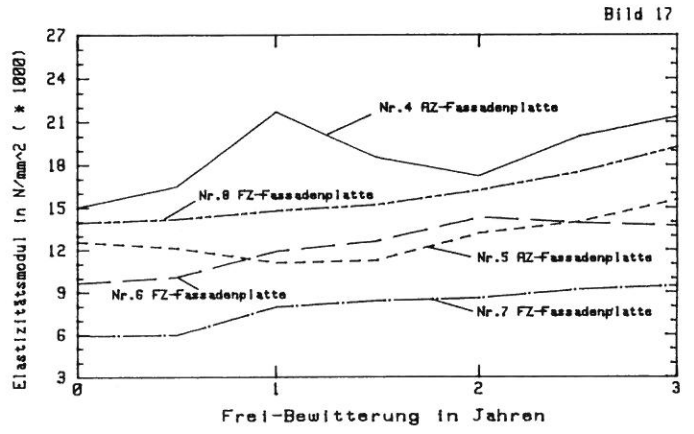
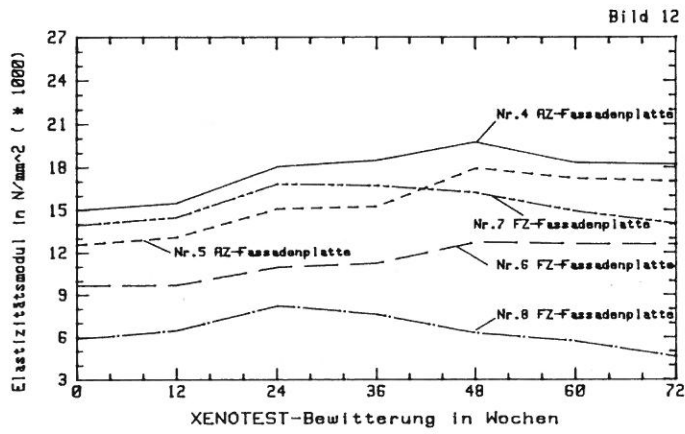
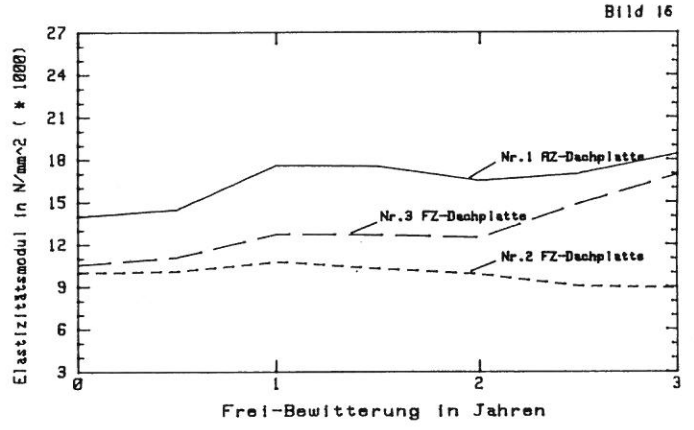
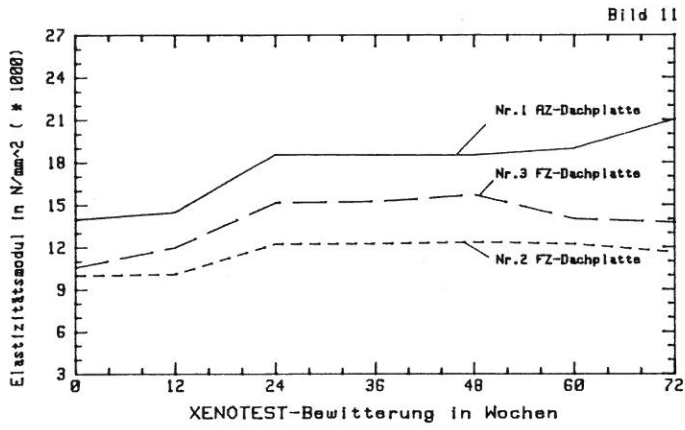
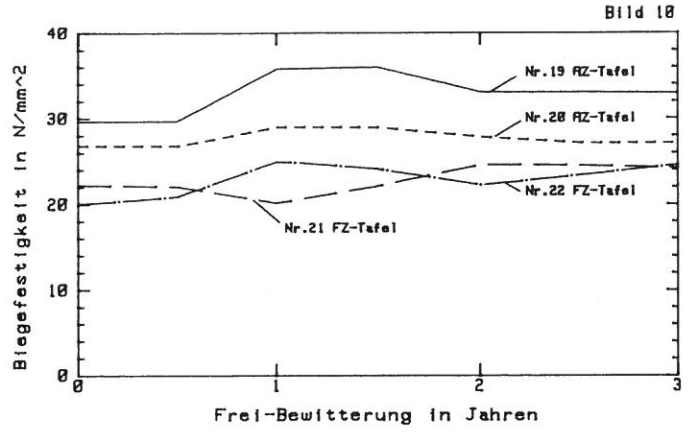
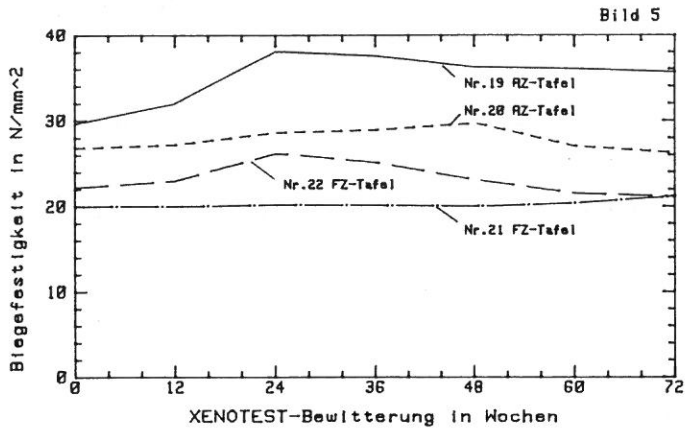


Bild 14

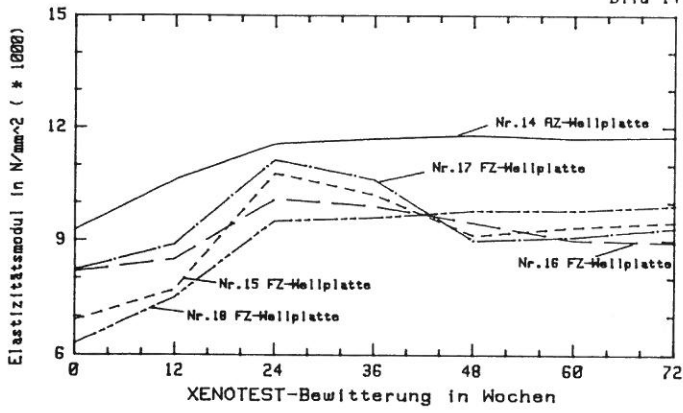


Bild 19

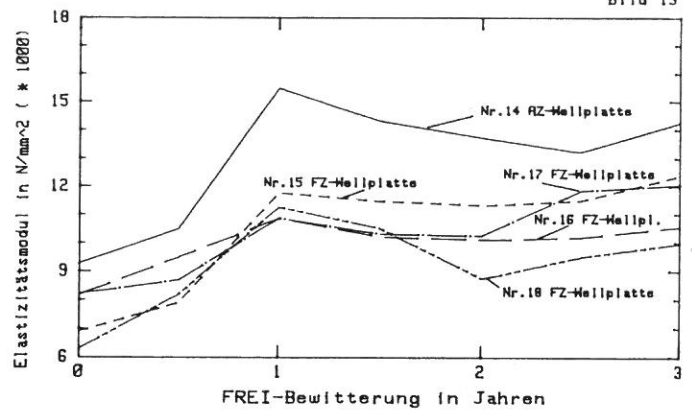


Bild 15

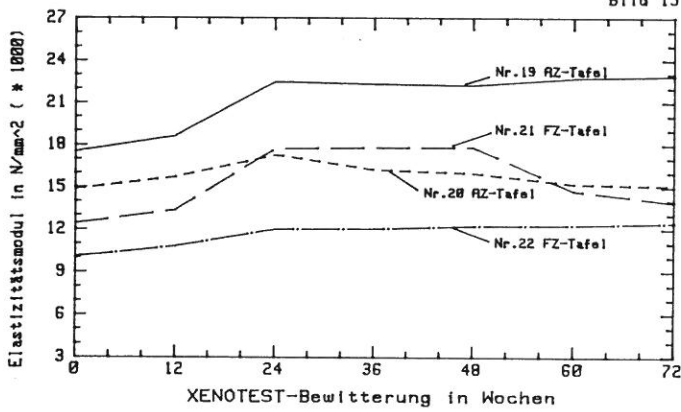


Bild 20

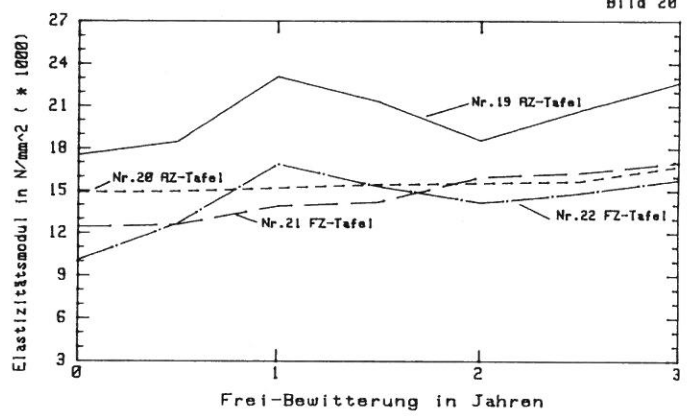


Bild 21

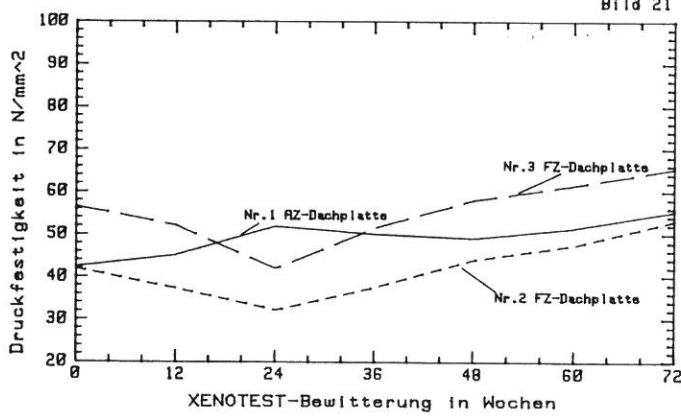


Bild 26

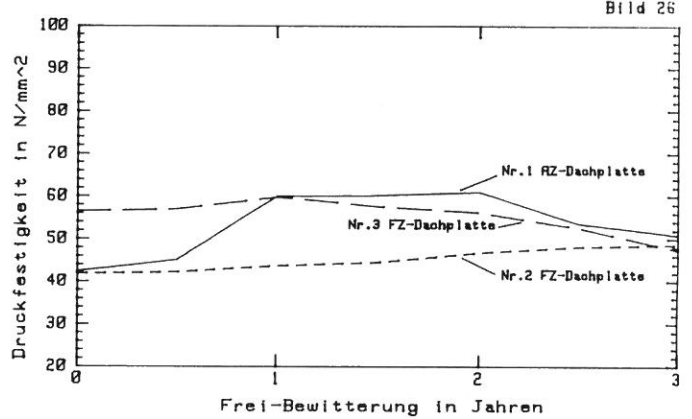


Bild 22

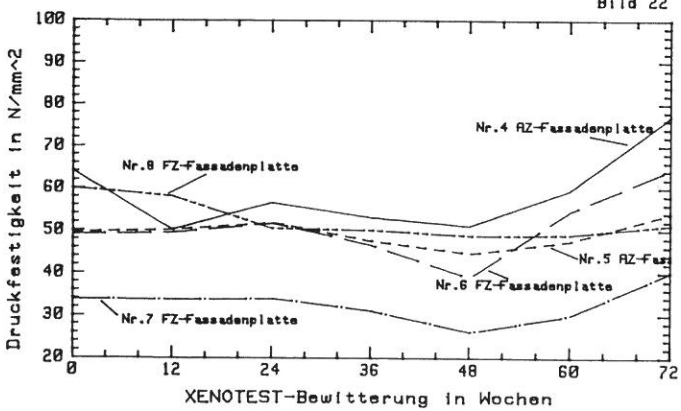
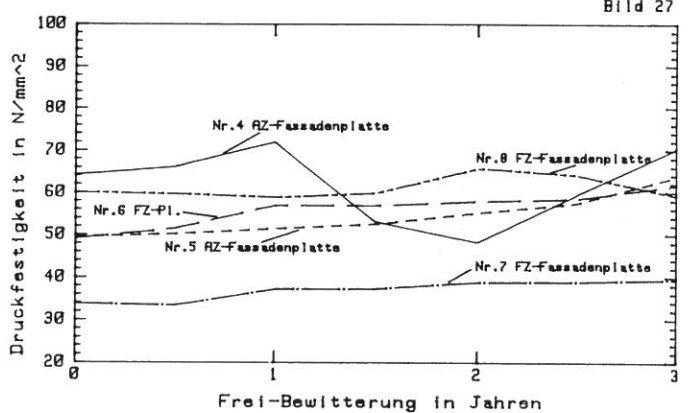


Bild 27



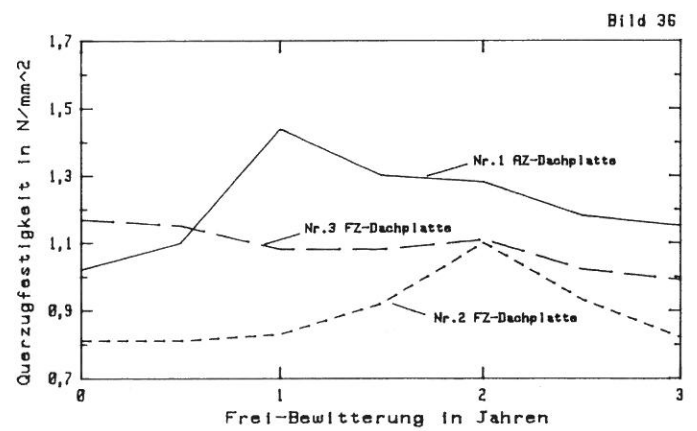
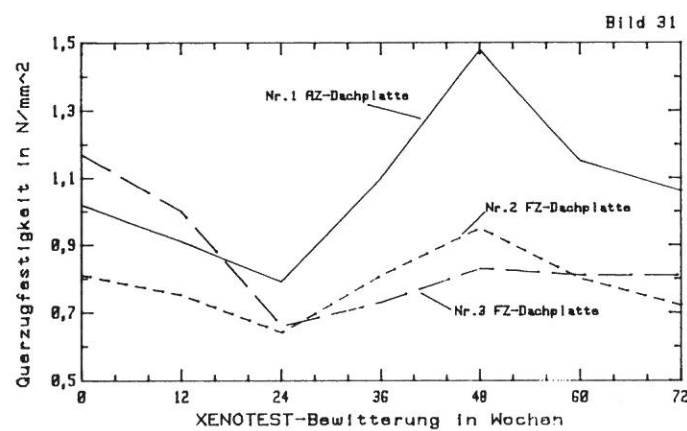
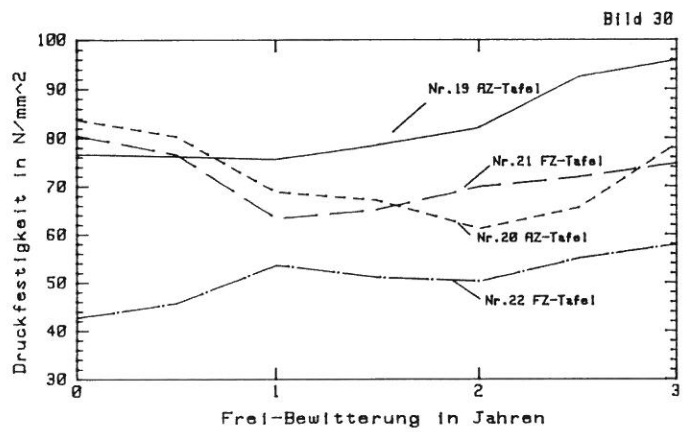
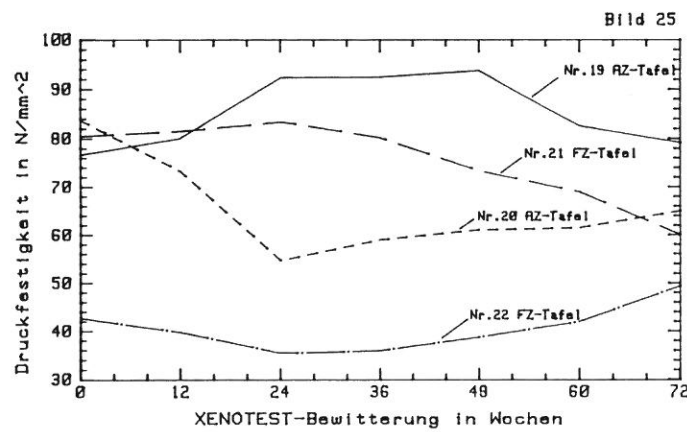
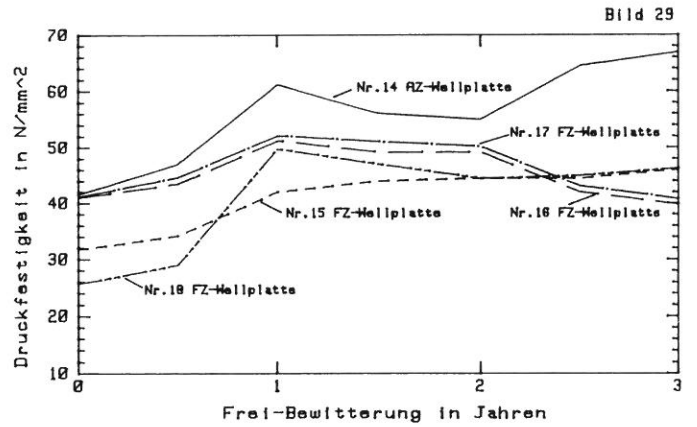
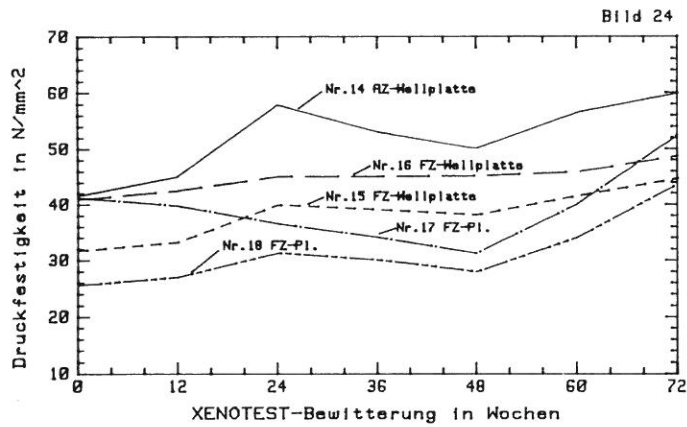
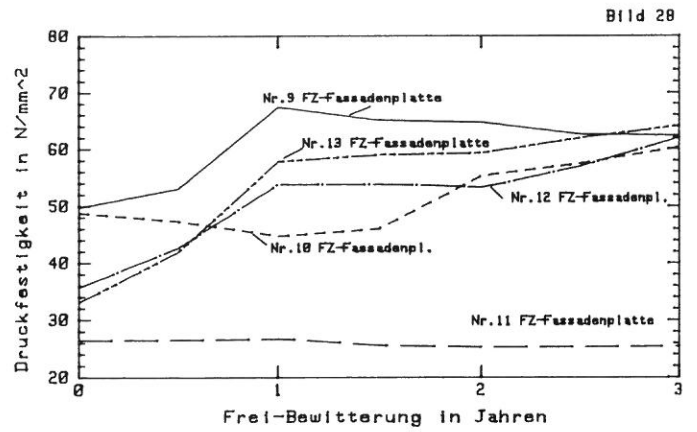
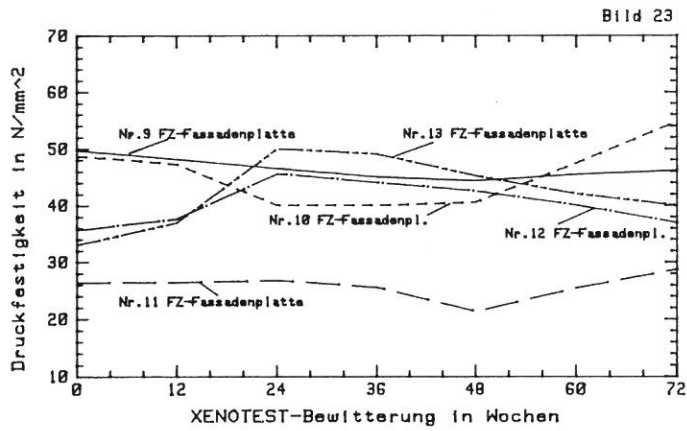


Bild 32

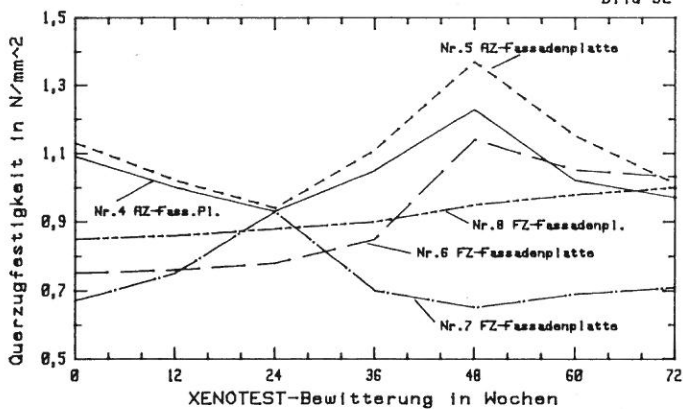


Bild 37

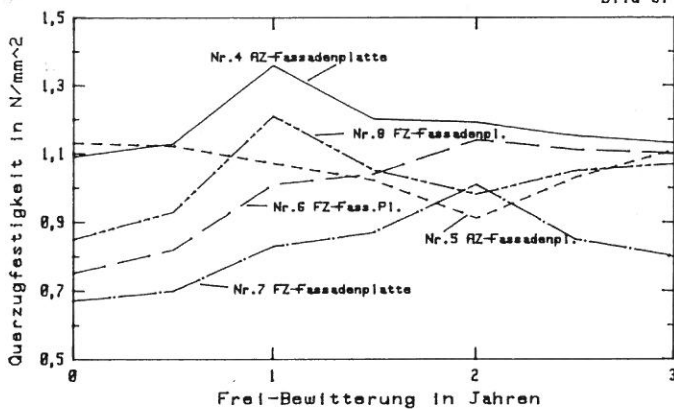


Bild 33

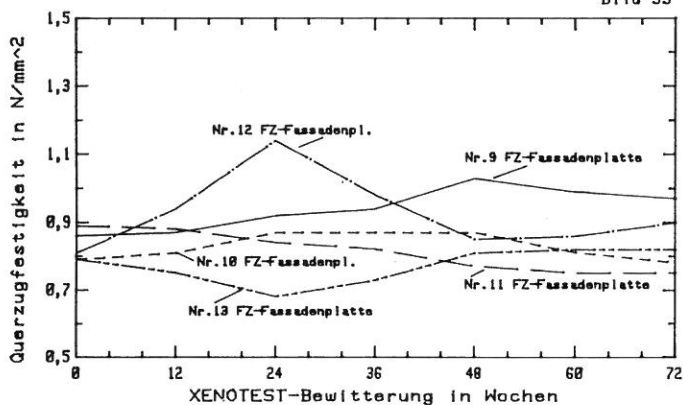


Bild 38

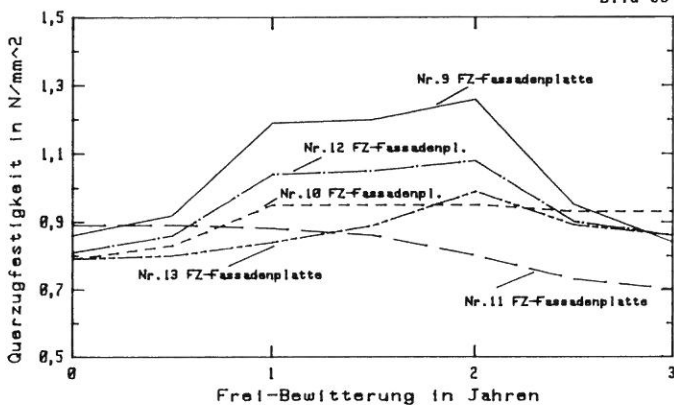


Bild 34

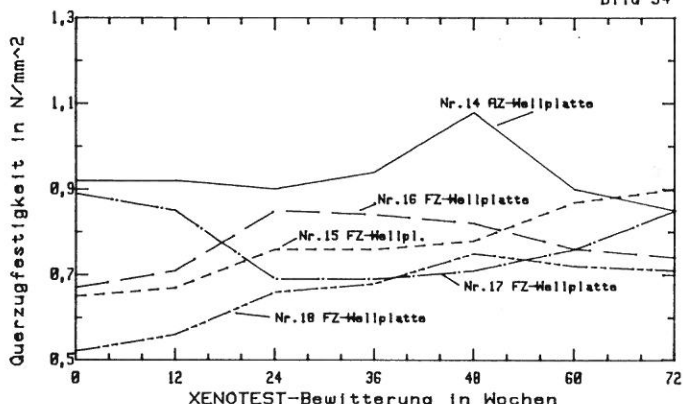


Bild 39

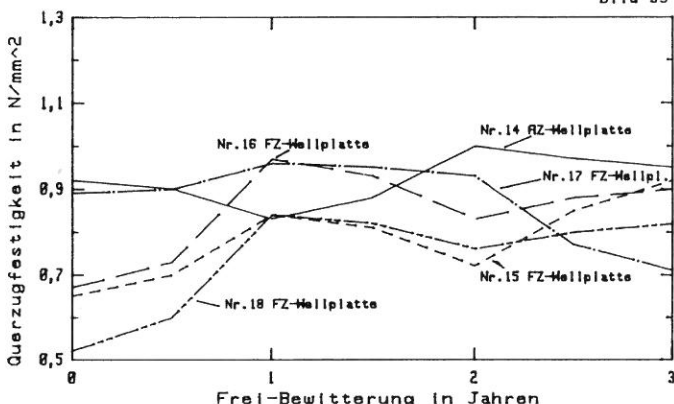


Bild 35

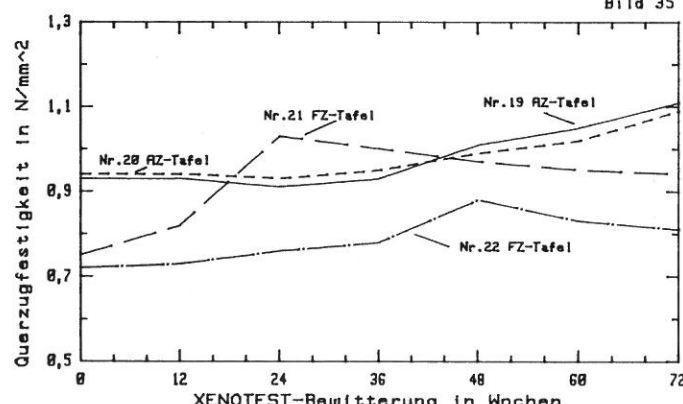
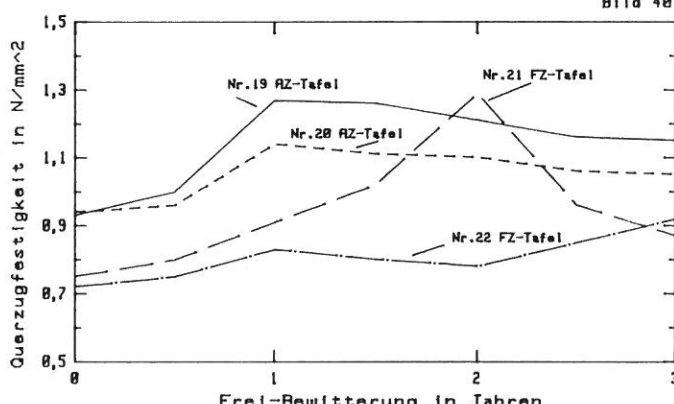
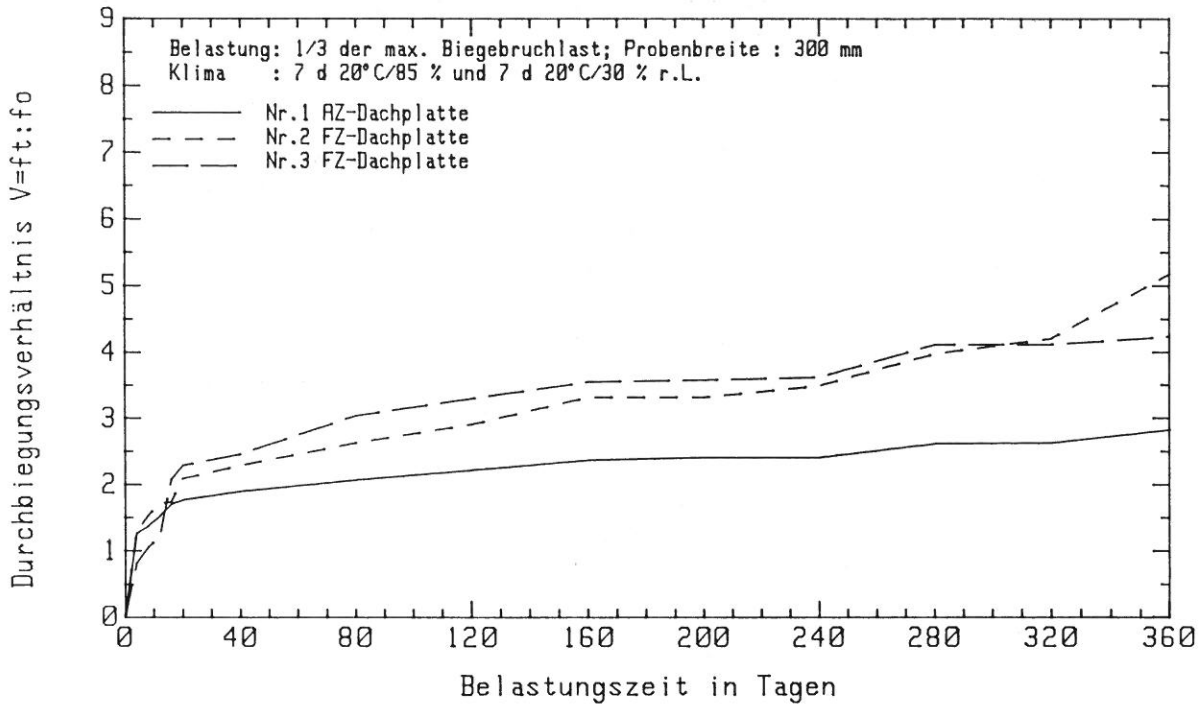


Bild 40



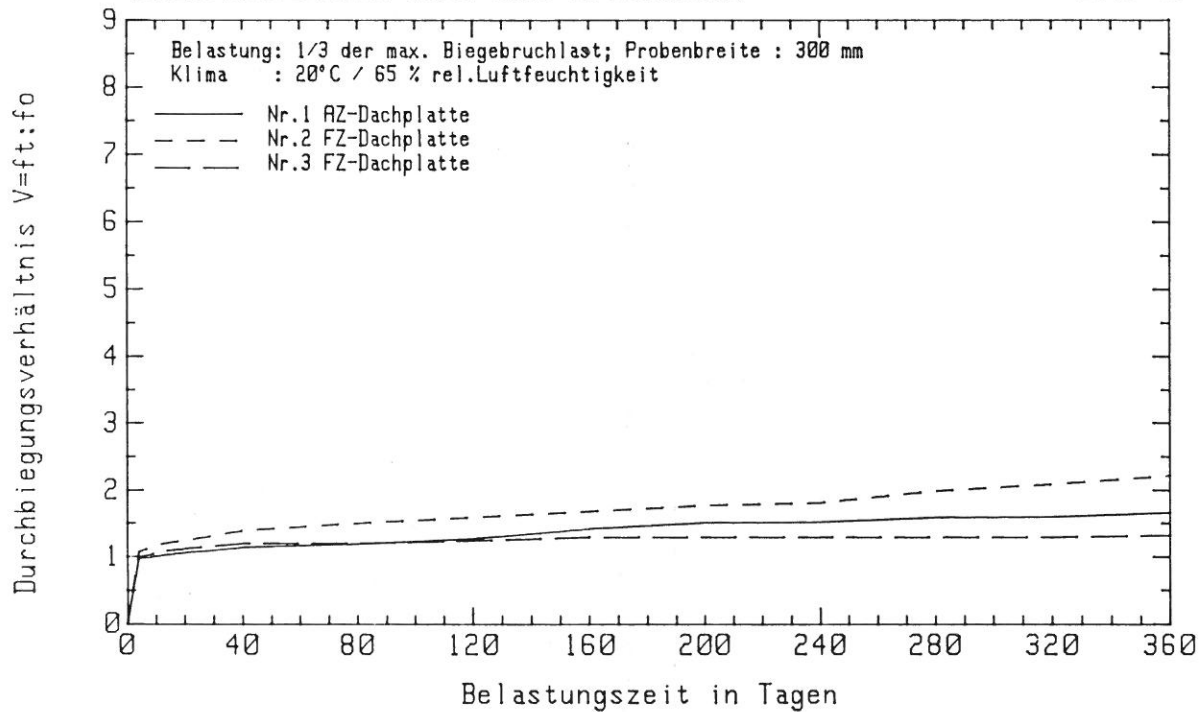
DAUERSTANDVERSUCHE unter Last und Wechselklima

Bild 41



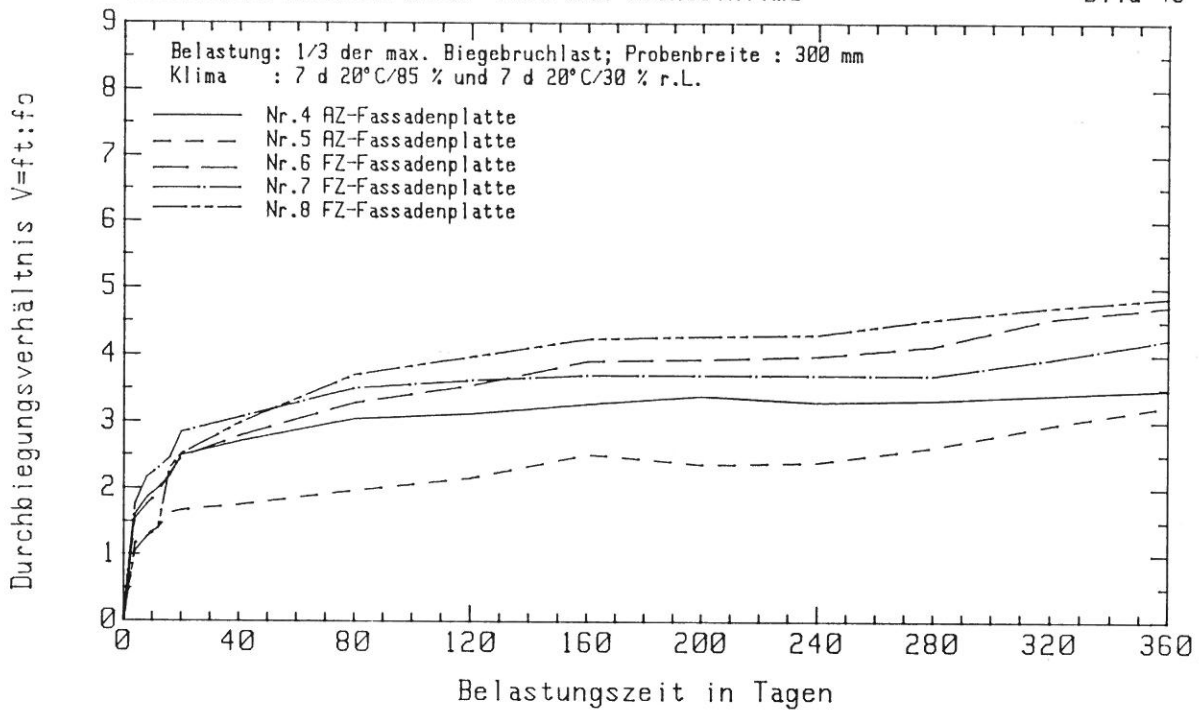
DAUERSTANDVERSUCHE unter Last im Normklima

Bild 42



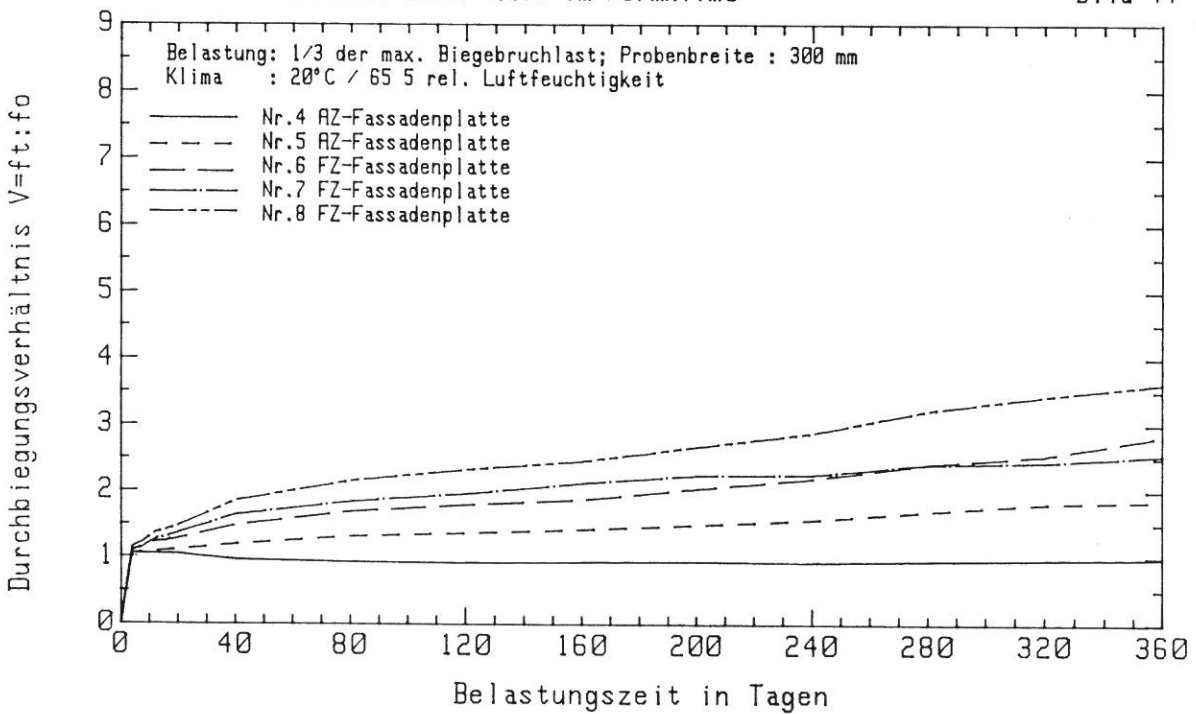
DAUERSTANDVERSUCHE unter Last und Wechselklima

Bild 43



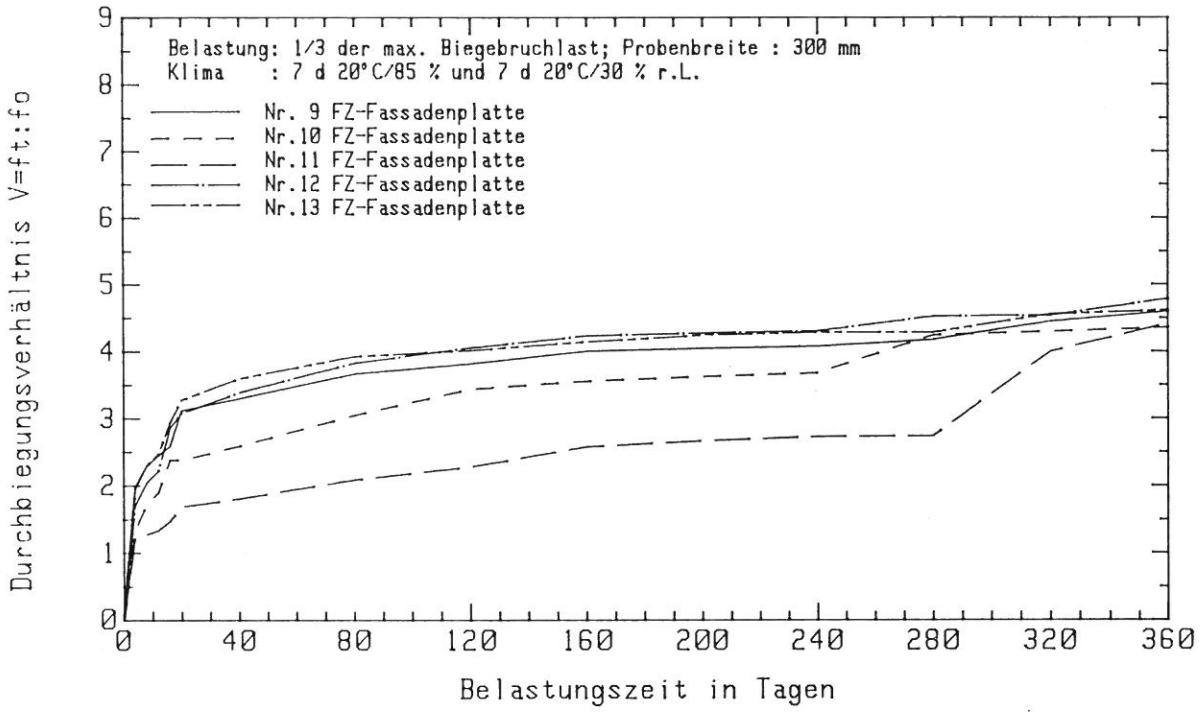
DAUERSTANDVERSUCHE unter Last im Normklima

Bild 44



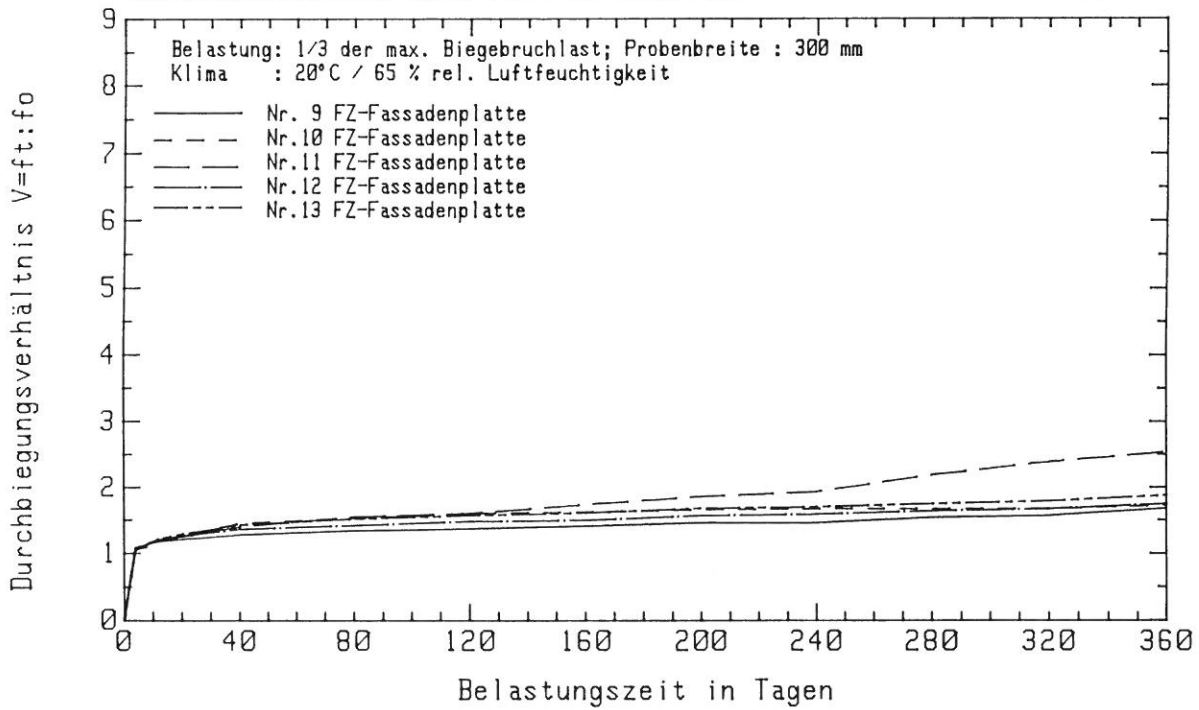
DAUERSTANDVERSUCHE unter Last und Wechselklima

Bild 45



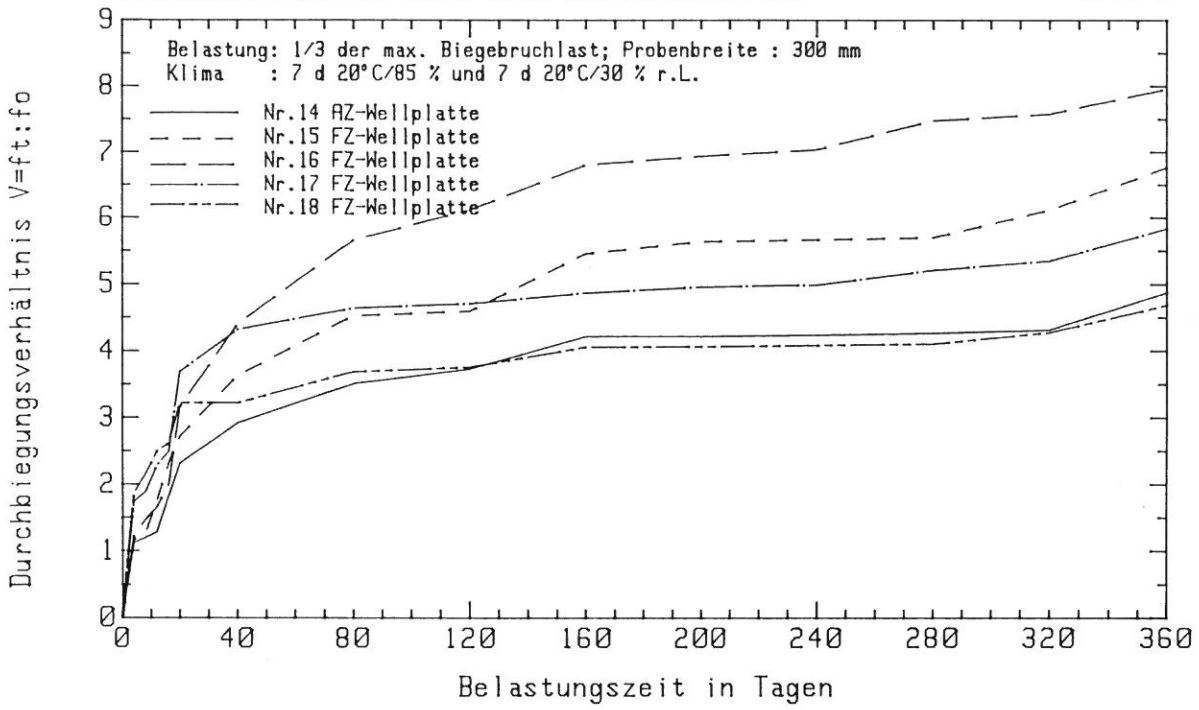
DAUERSTANDVERSUCHE unter Last im Normklima

Bild 46



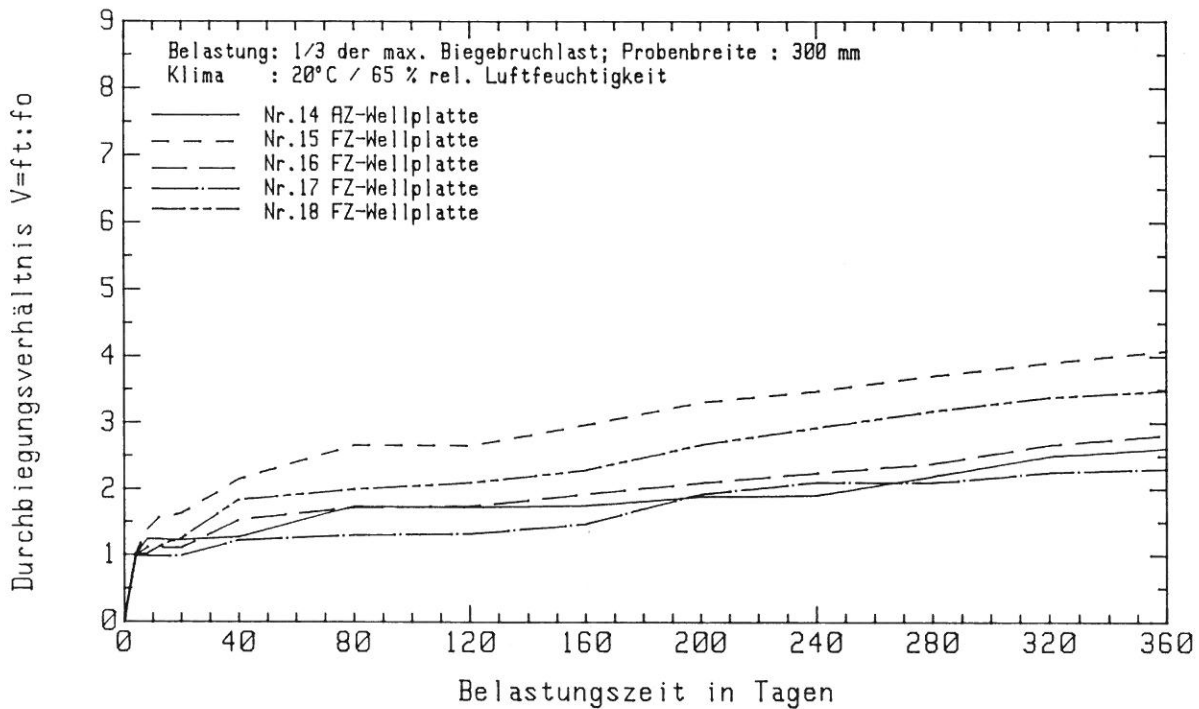
DAUERSTANDVERSUCHE unter Last und Wechselklima

Bild 47



DAUERSTANDVERSUCHE unter Last im Normklima

Bild 48



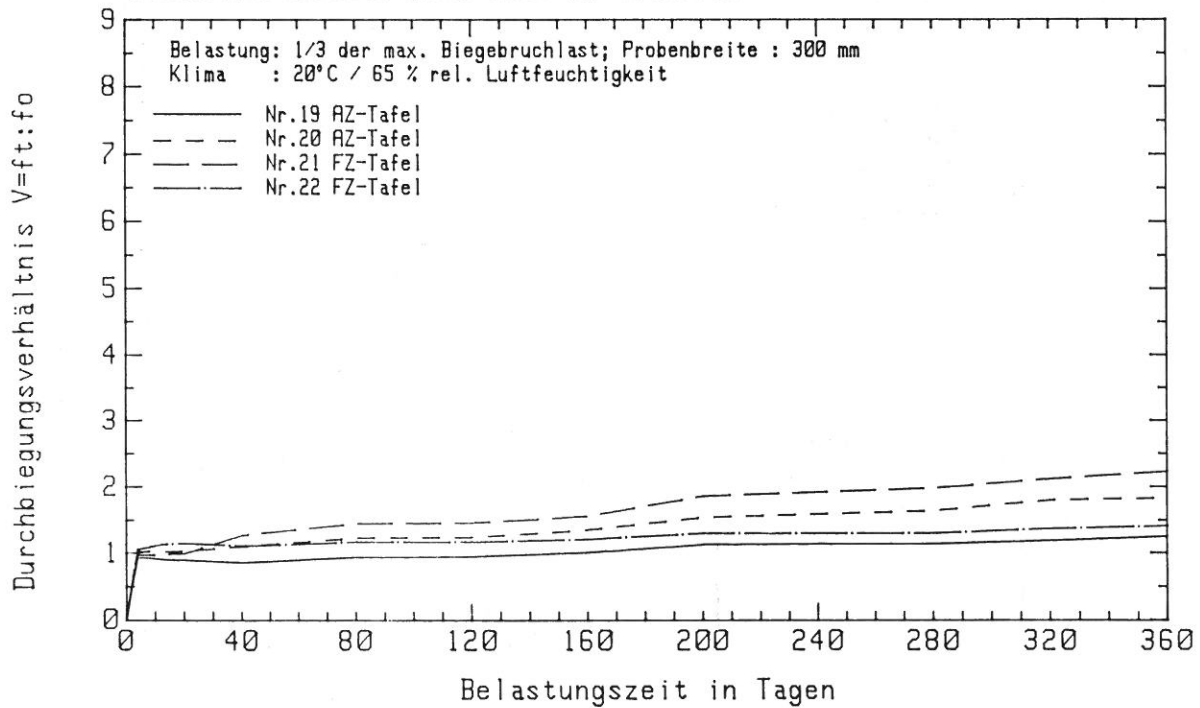
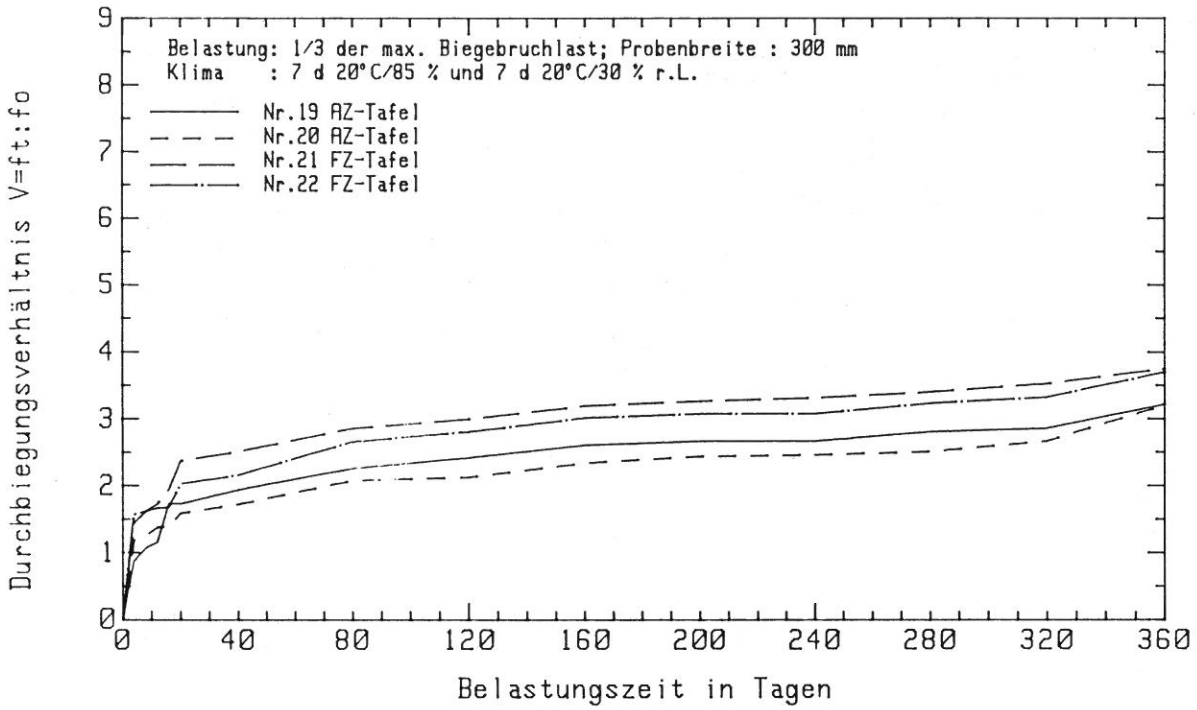


Bild 51

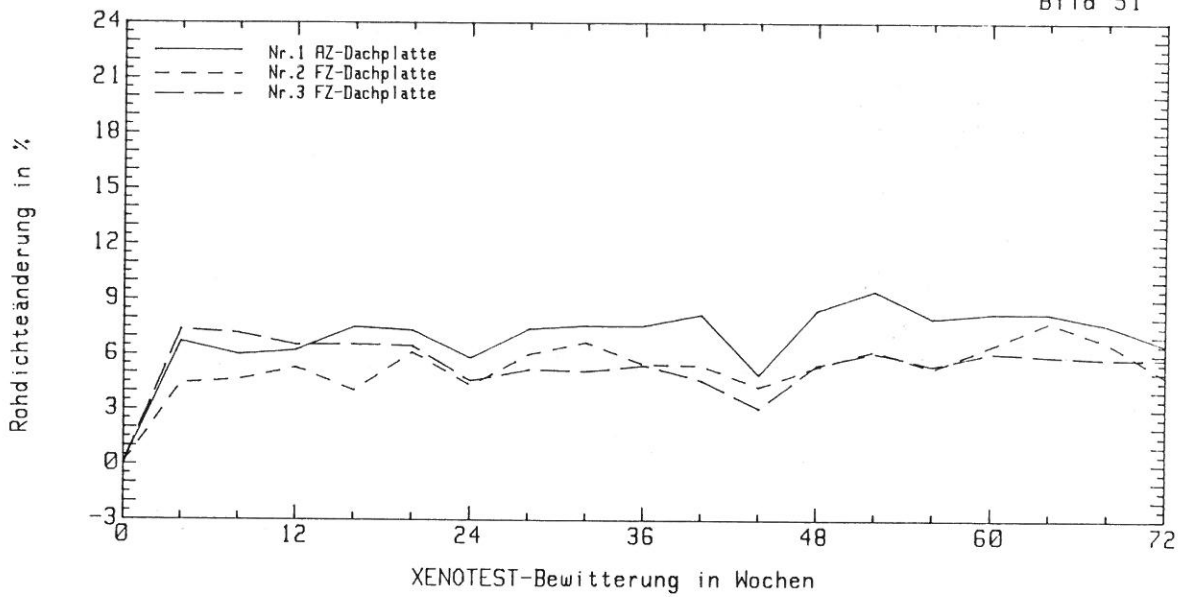


Bild 56

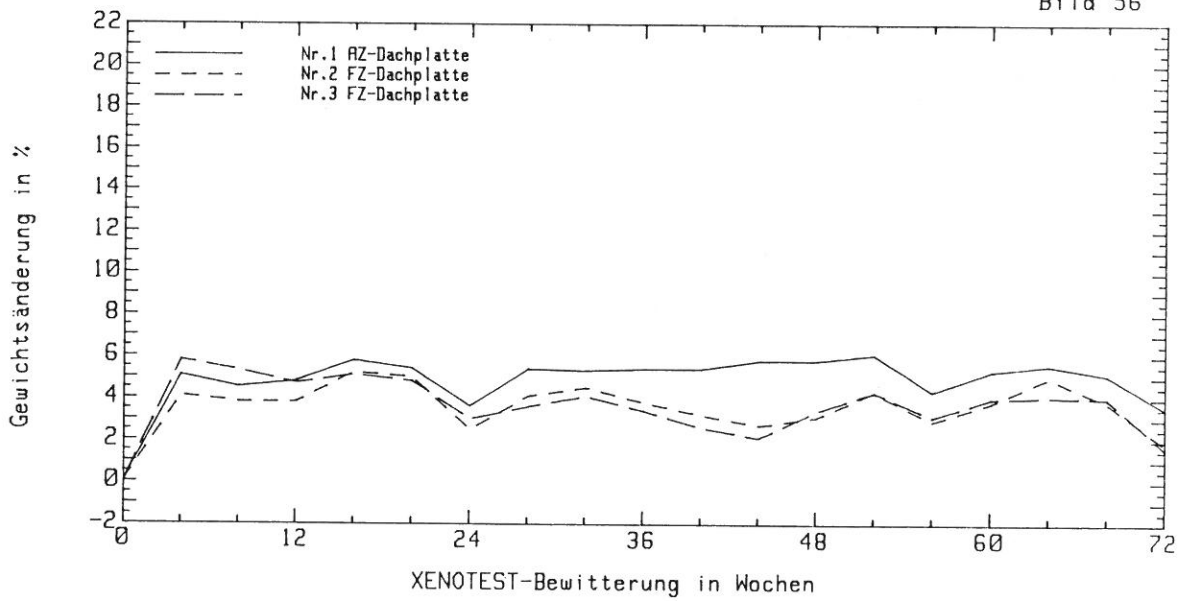


Bild 61

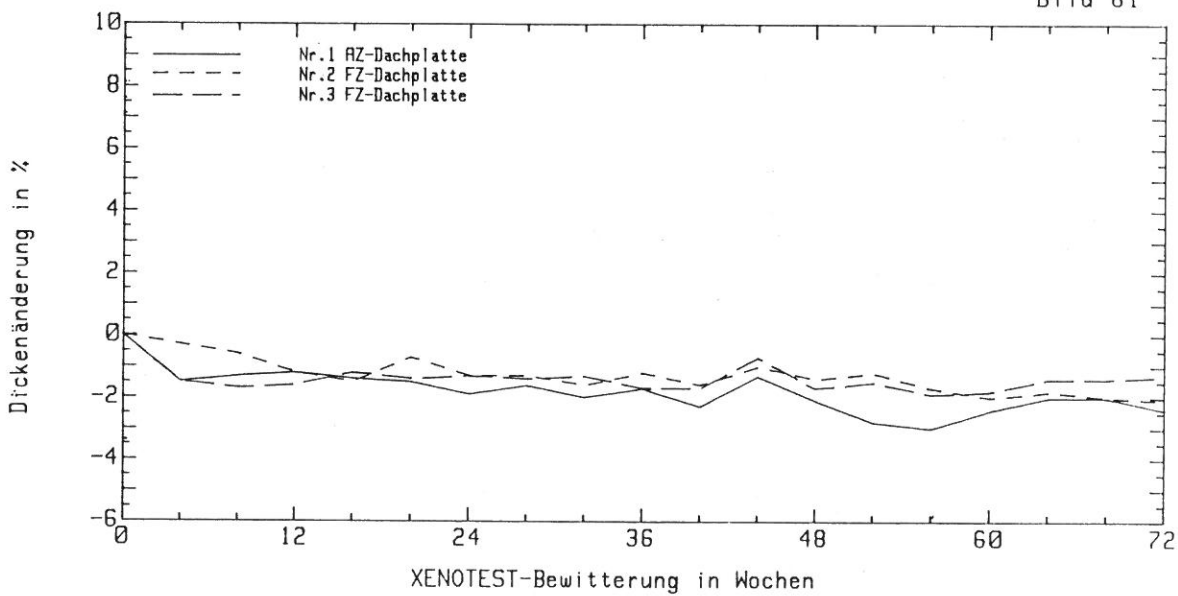


Bild 52

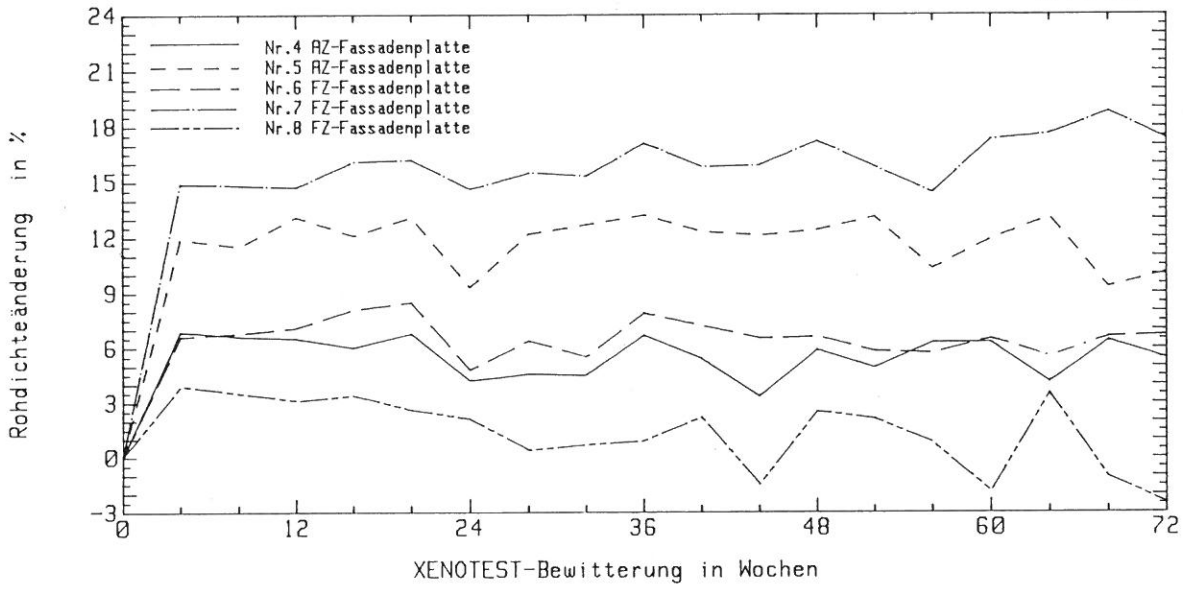


Bild 57

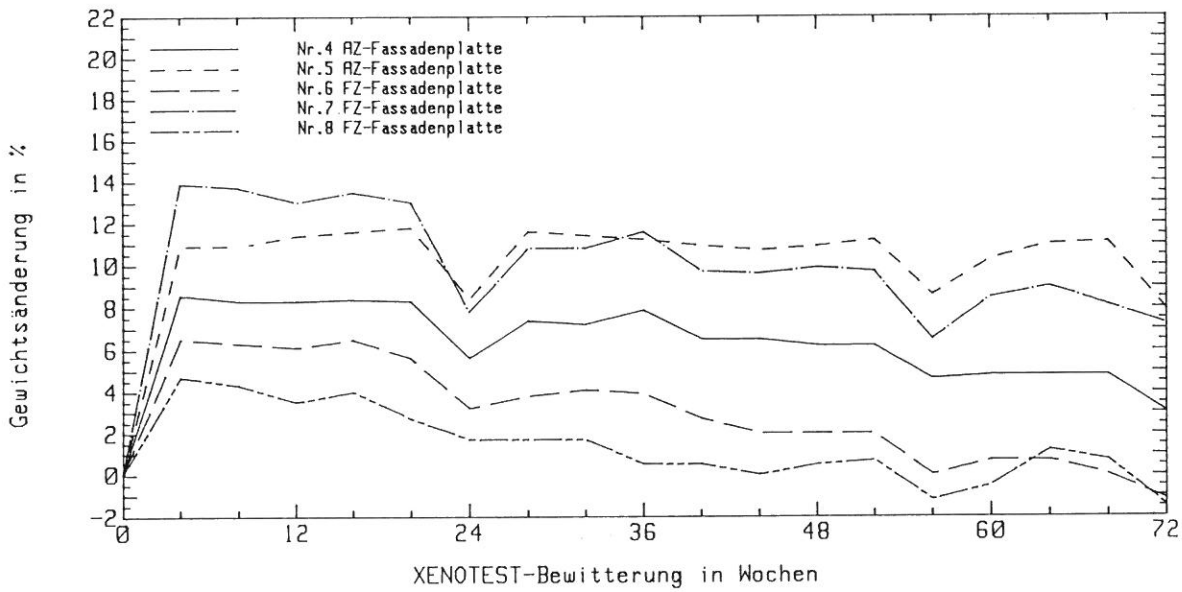


Bild 62

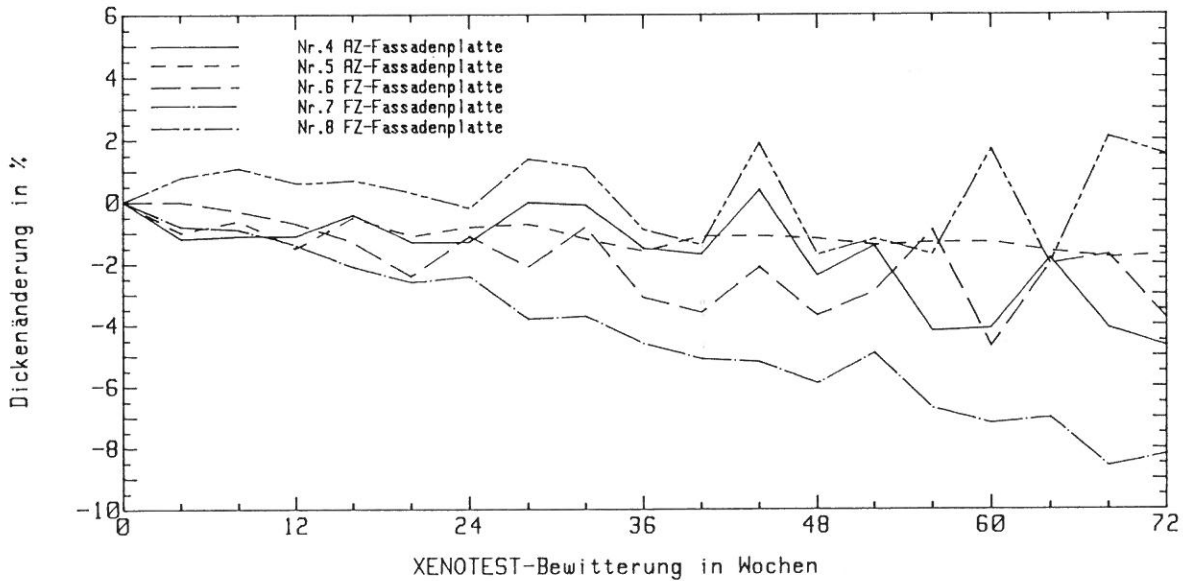


Bild 53

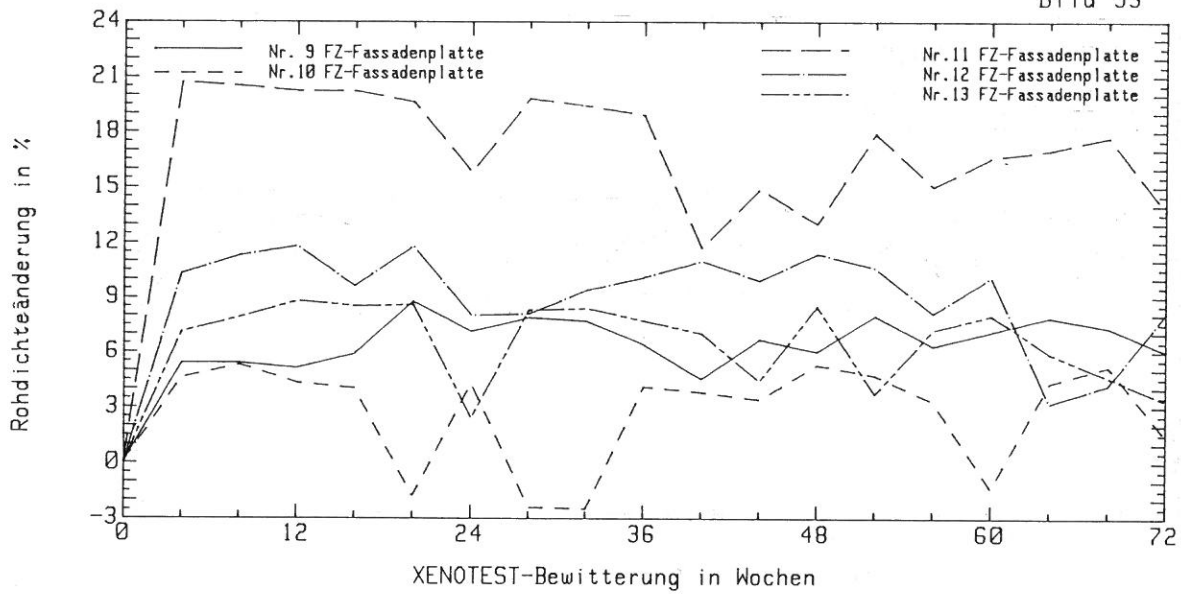


Bild 58

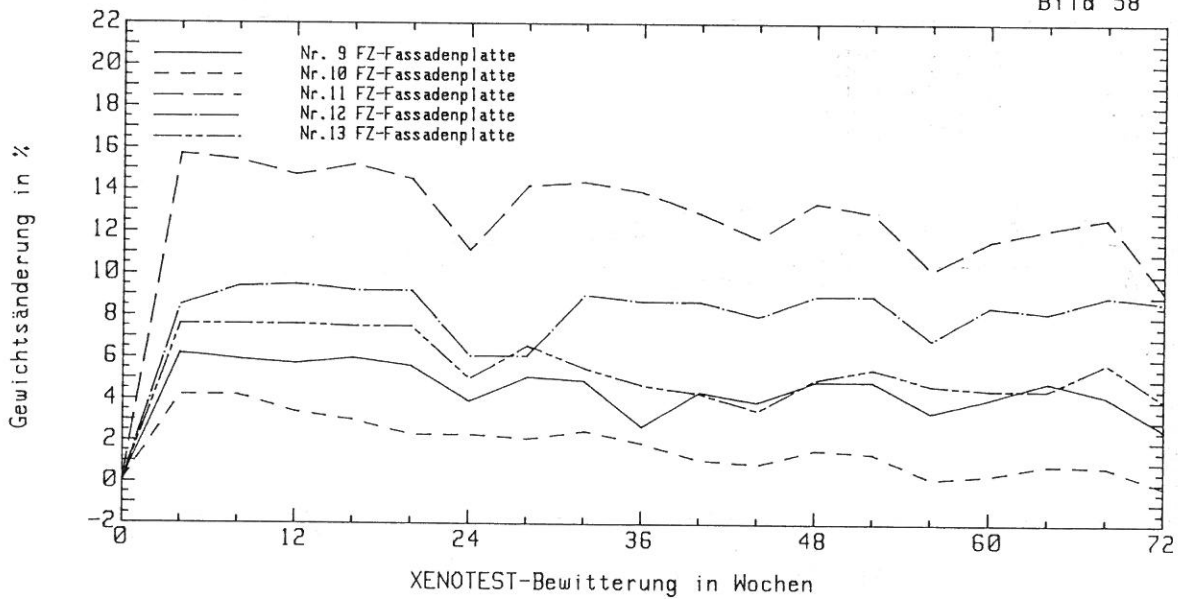


Bild 63

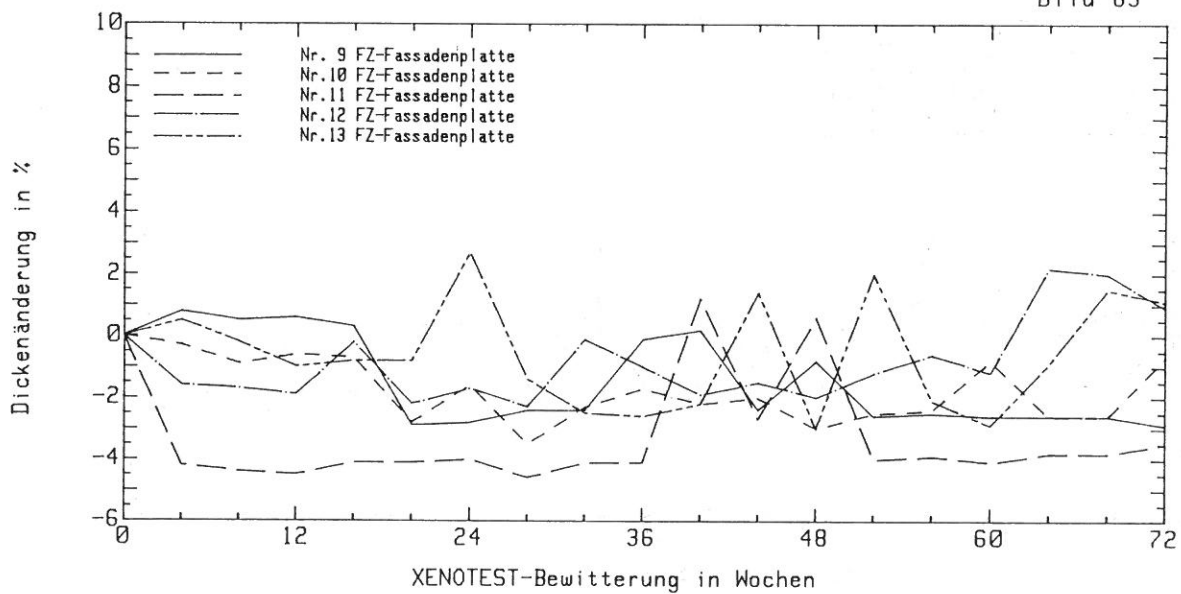


Bild 54

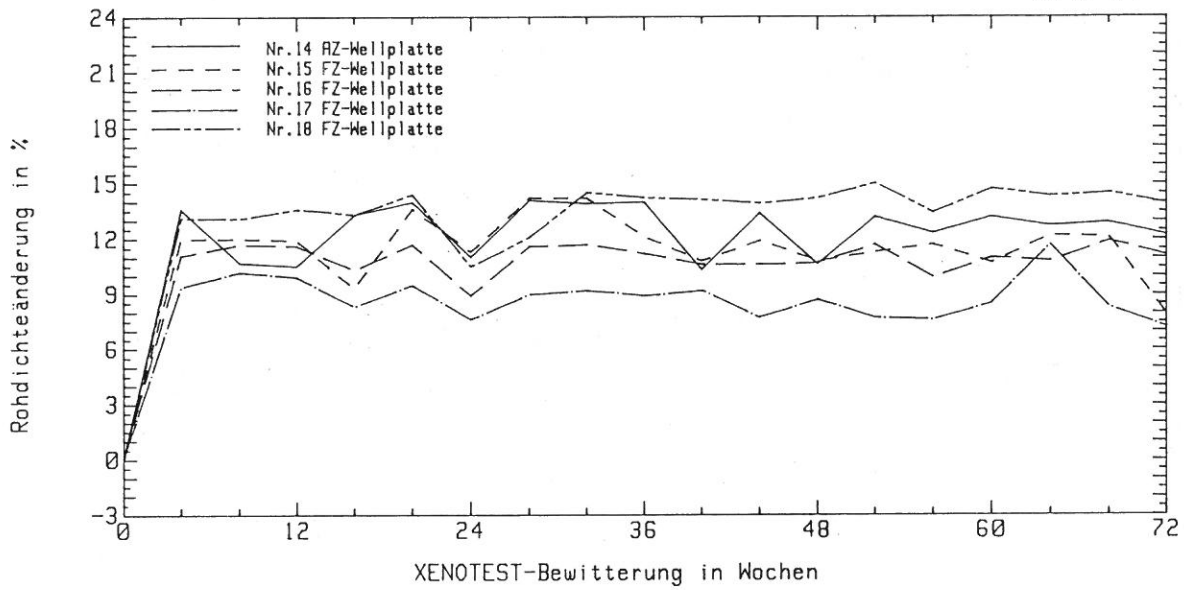


Bild 59

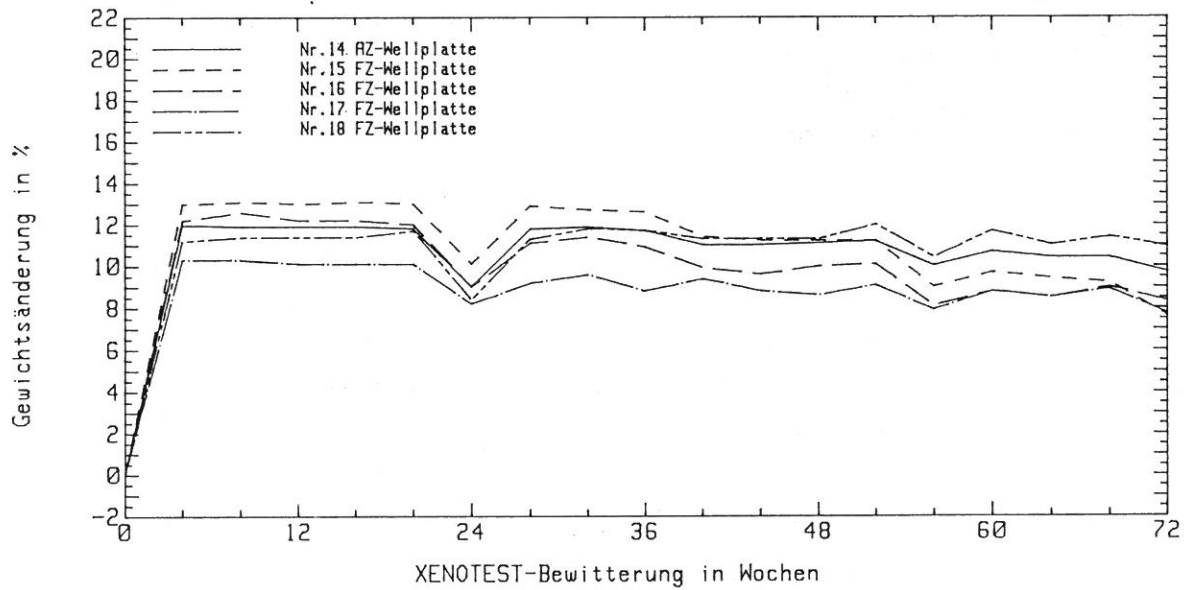


Bild 64

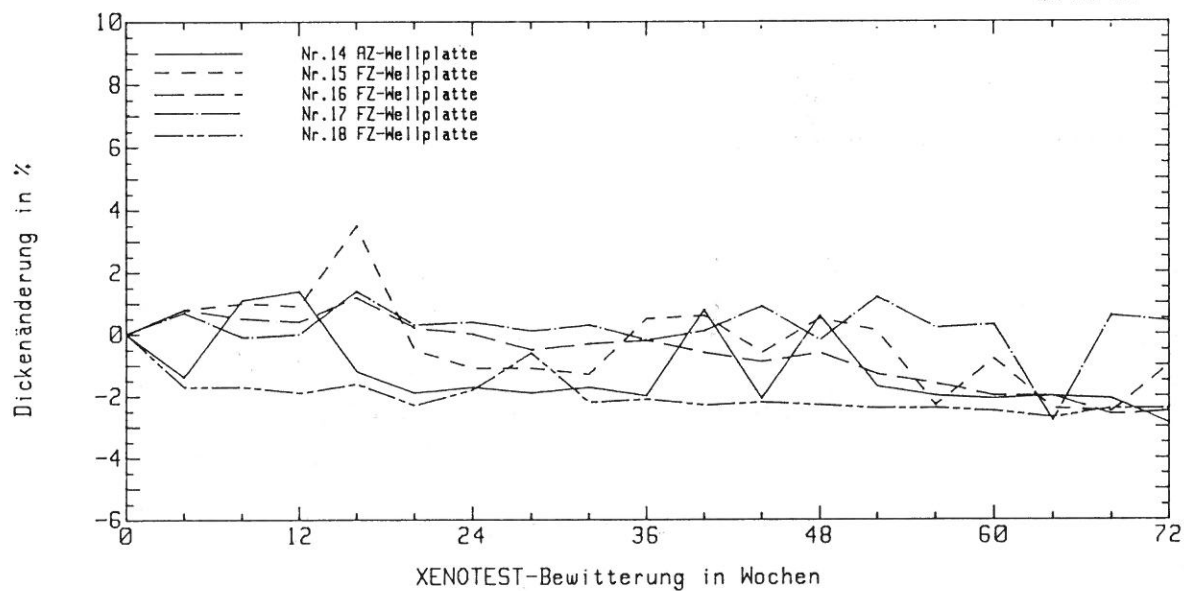


Bild 55

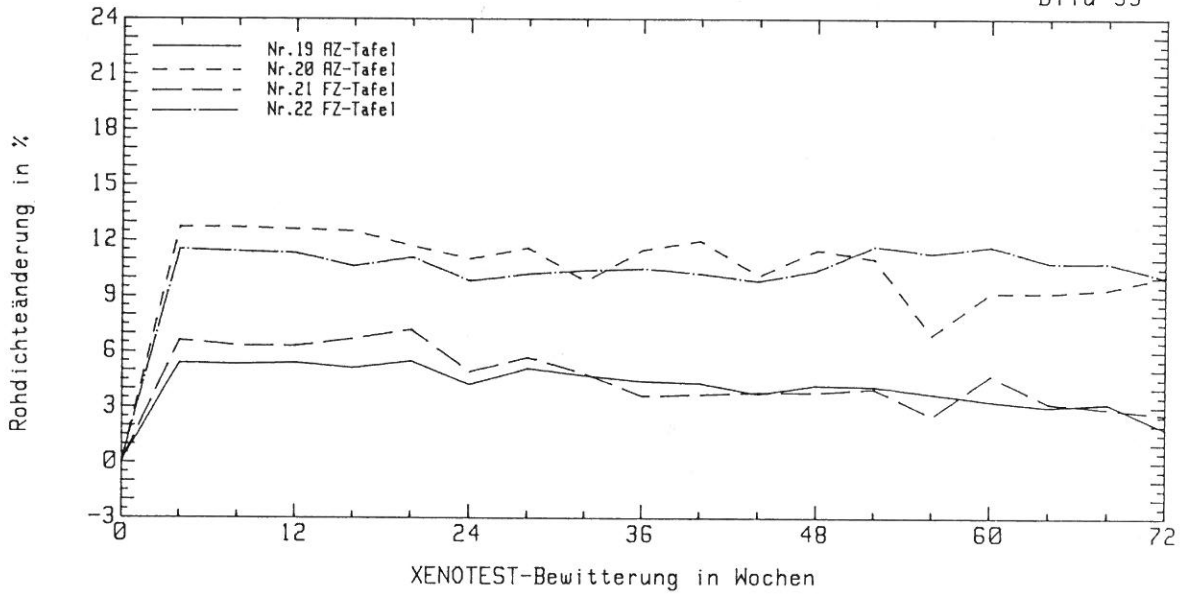


Bild 60

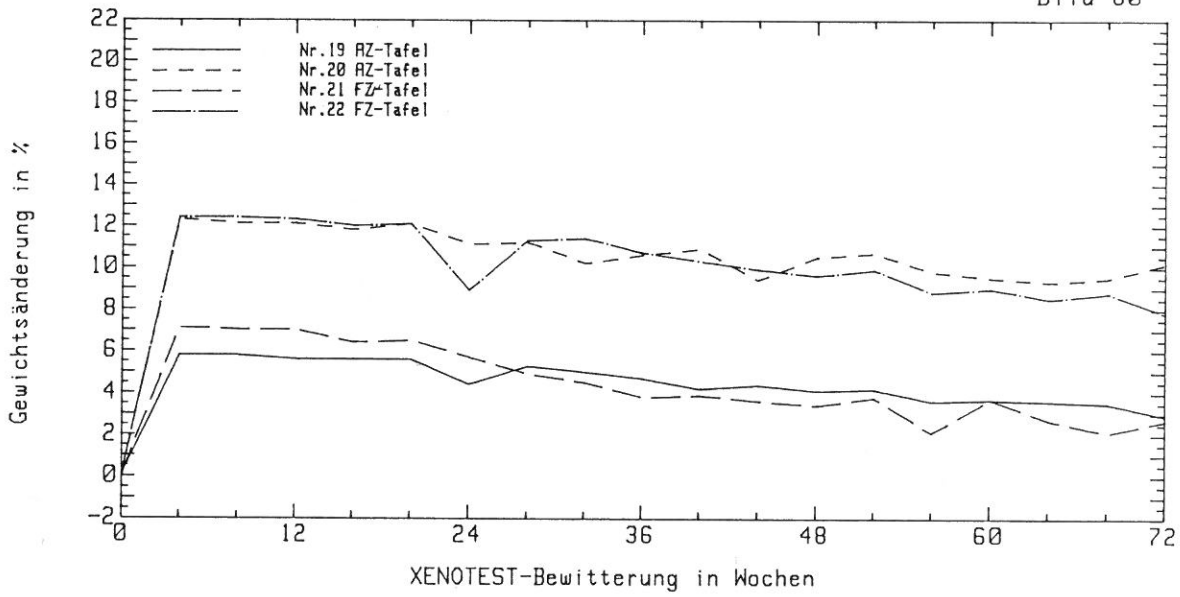
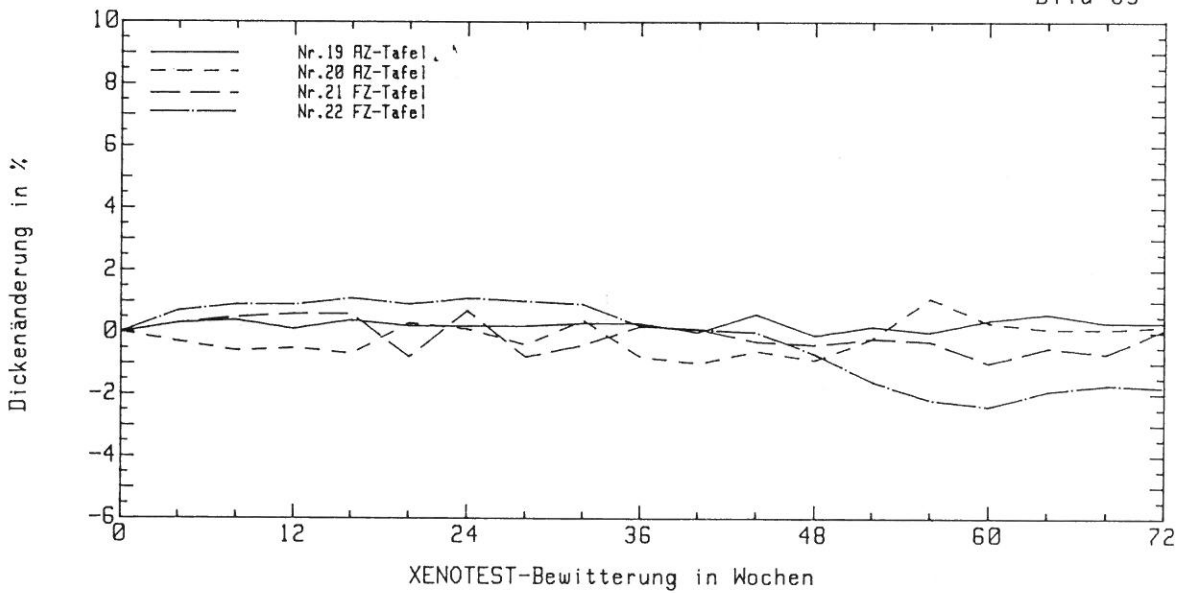
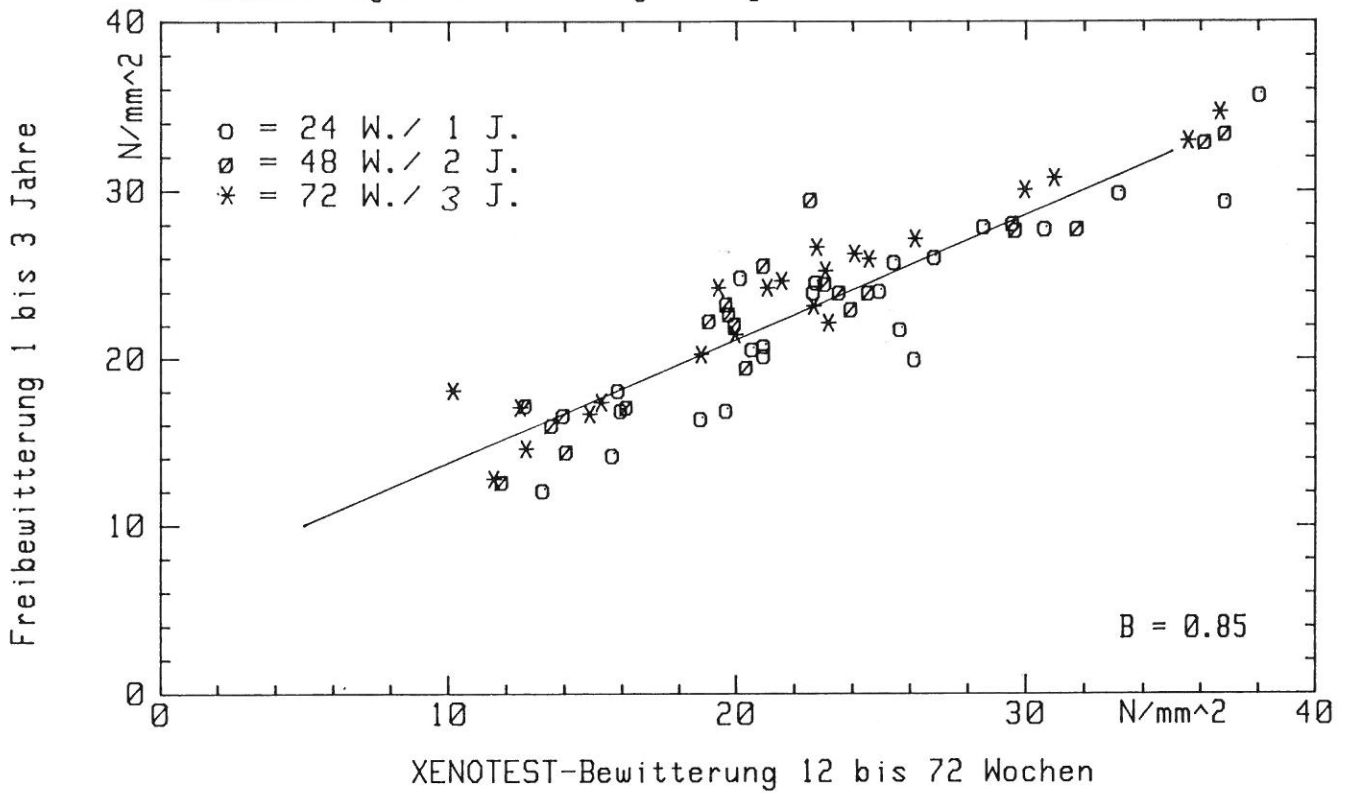


Bild 65



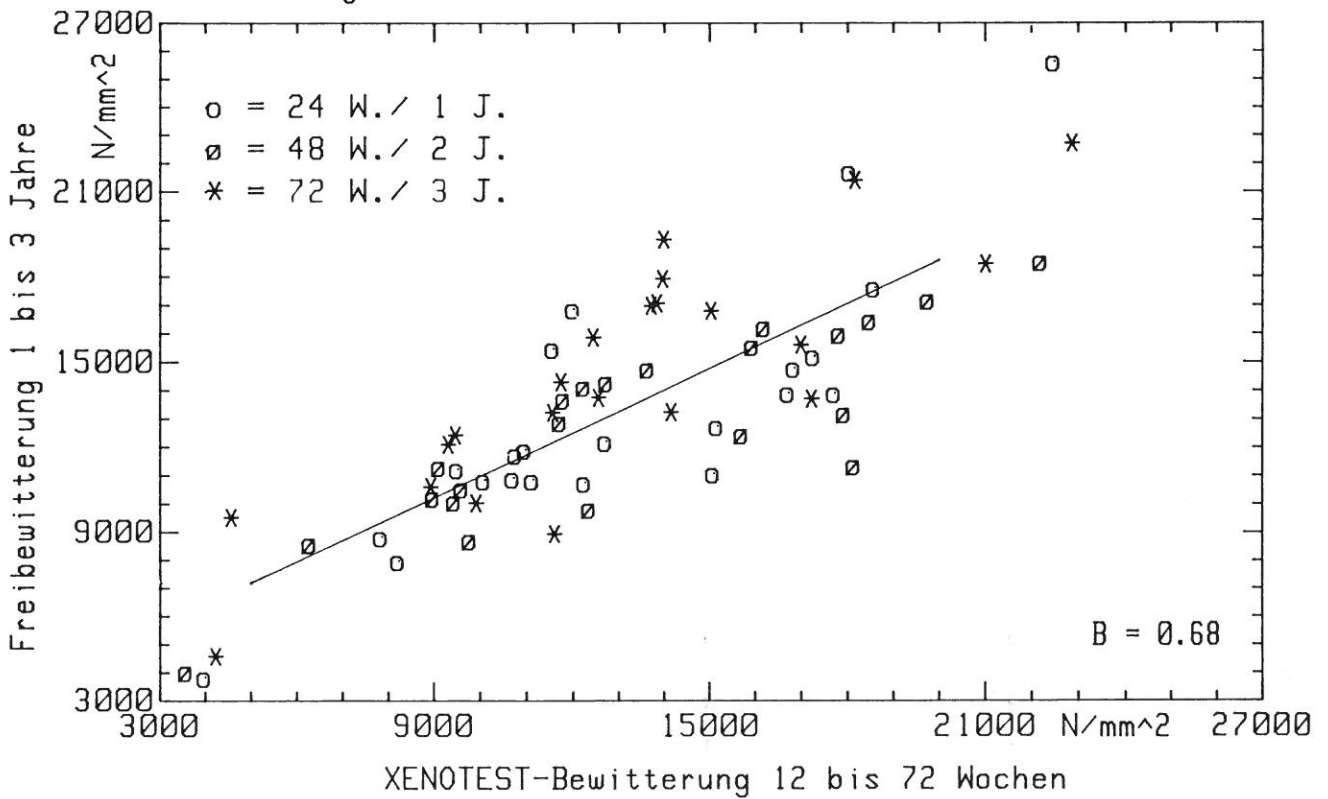
Lineare Regression der Biegefestigkeit

Bild 66



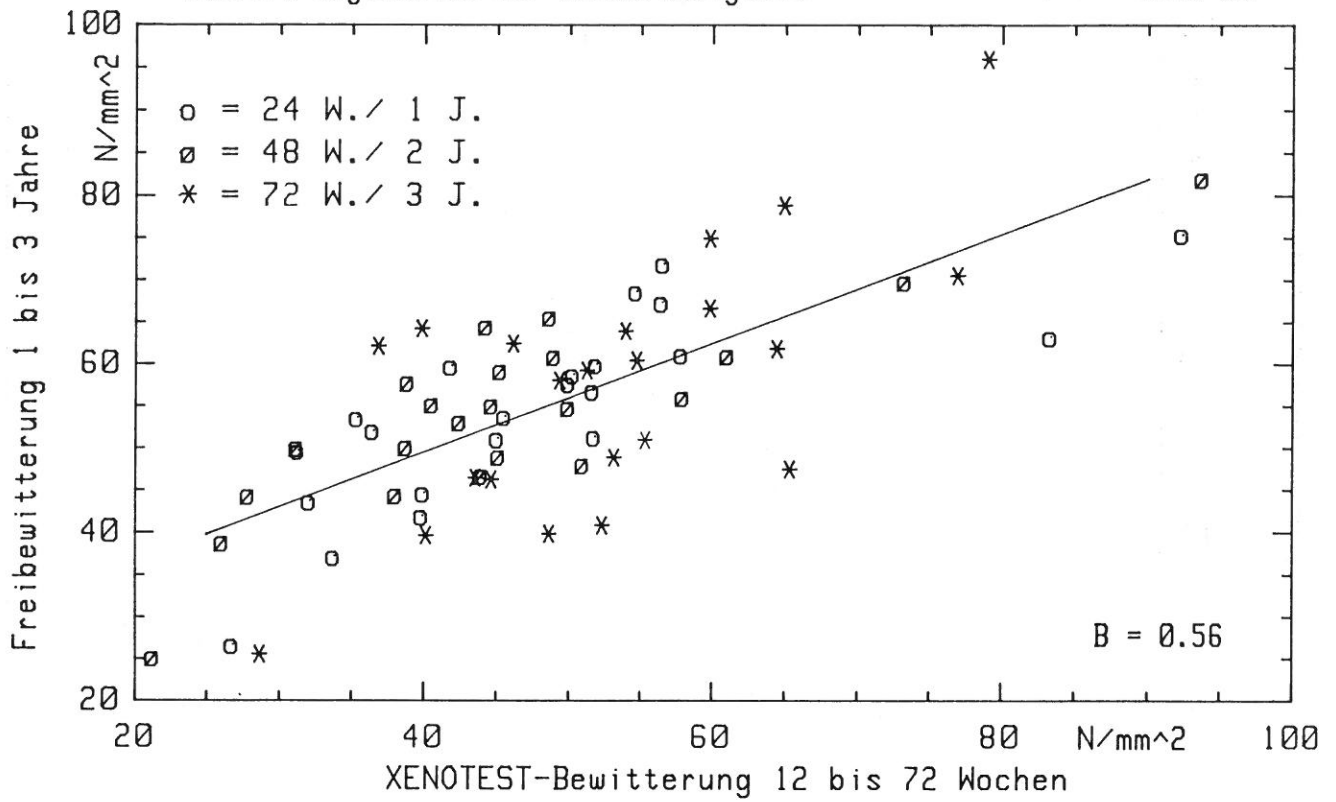
Lineare Regression des Elastizitäts-Moduls

Bild 67



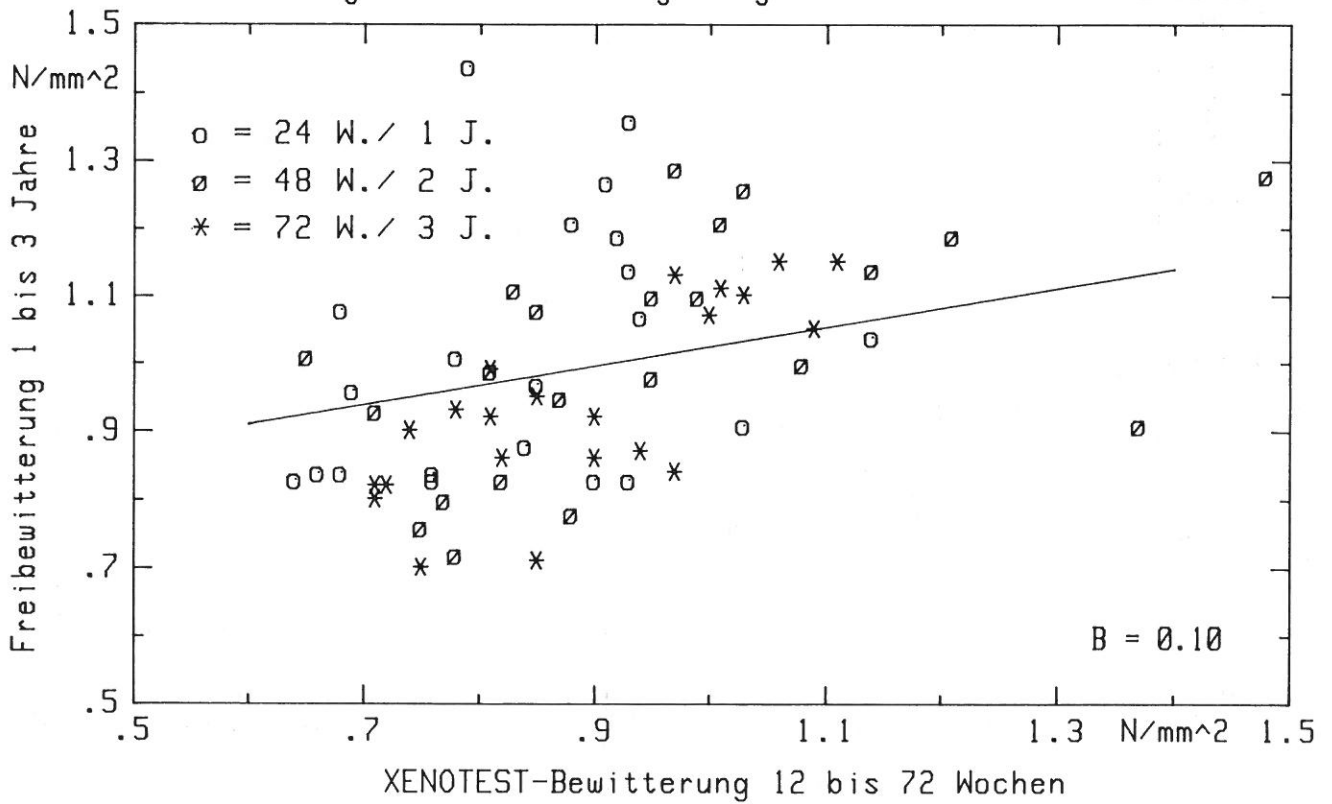
Lineare Regression der Druckfestigkeit

Bild 68



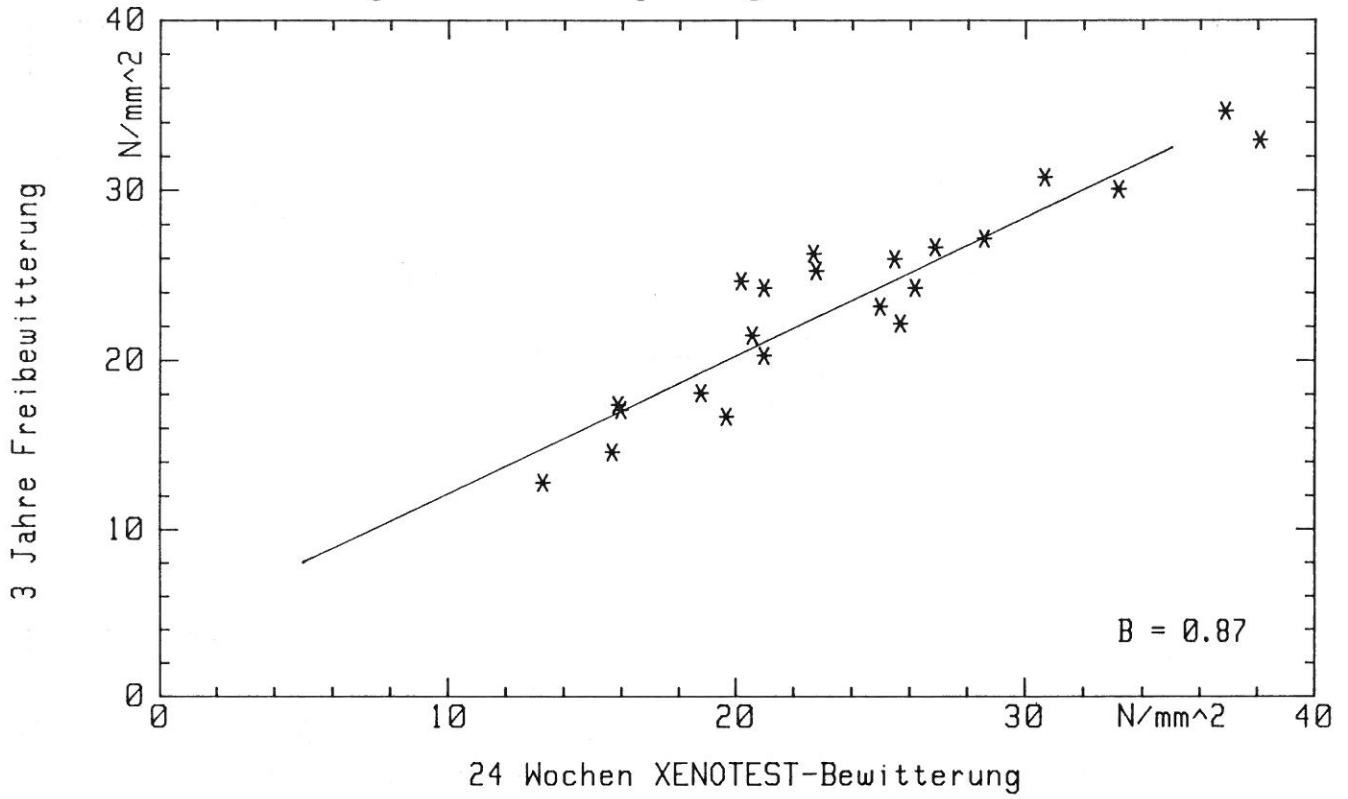
Lineare Regression der Querkzugfestigkeit

Bild 69



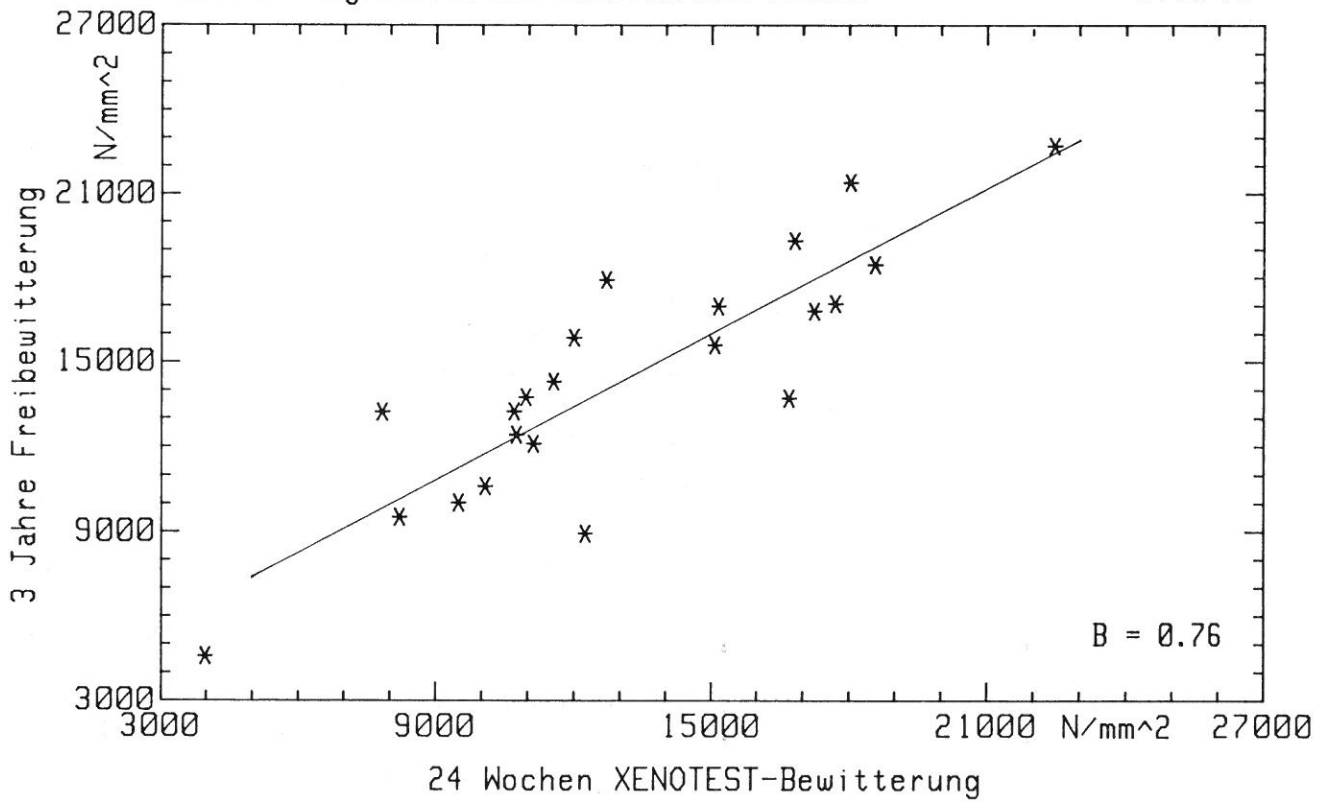
Lineare Regression der Biegefestigkeit

Bild 70



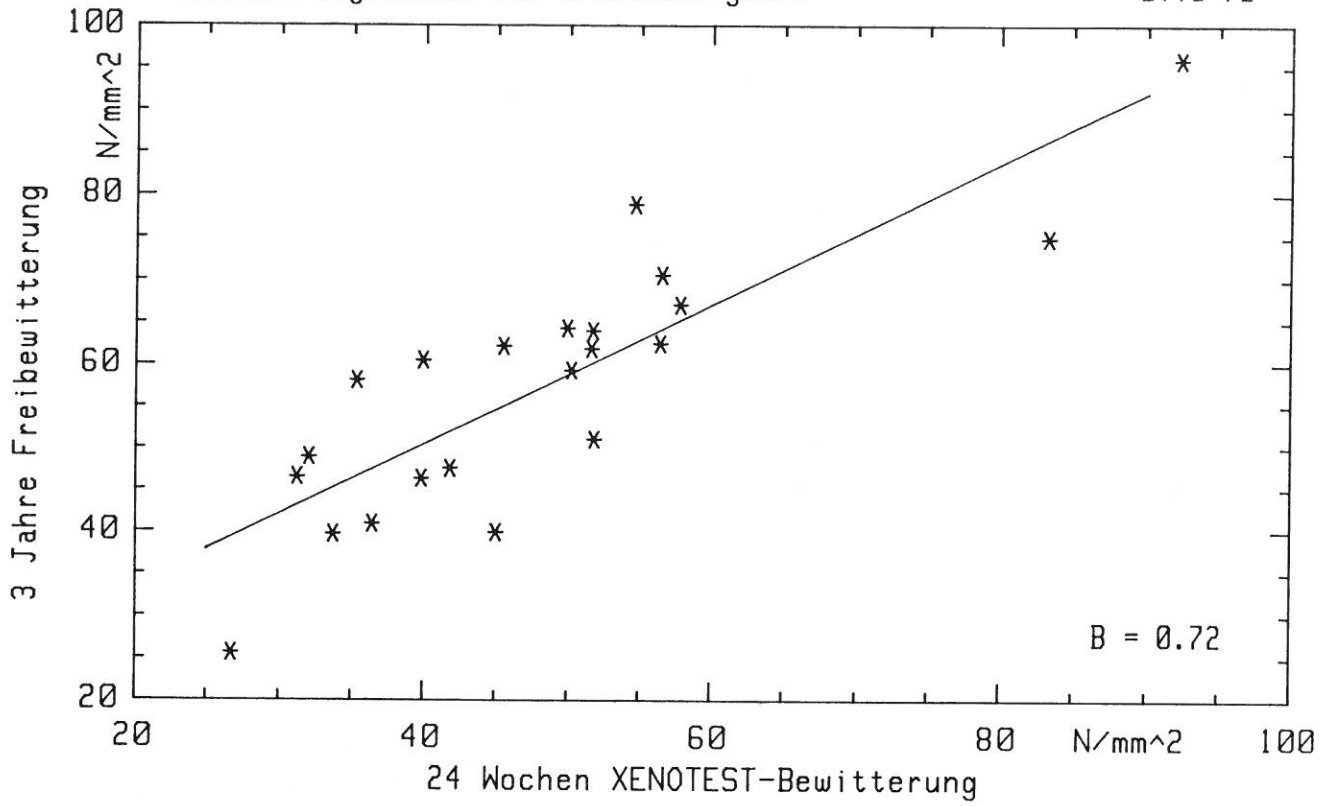
Lineare Regression des Elastizitäts-Moduls

Bild 71



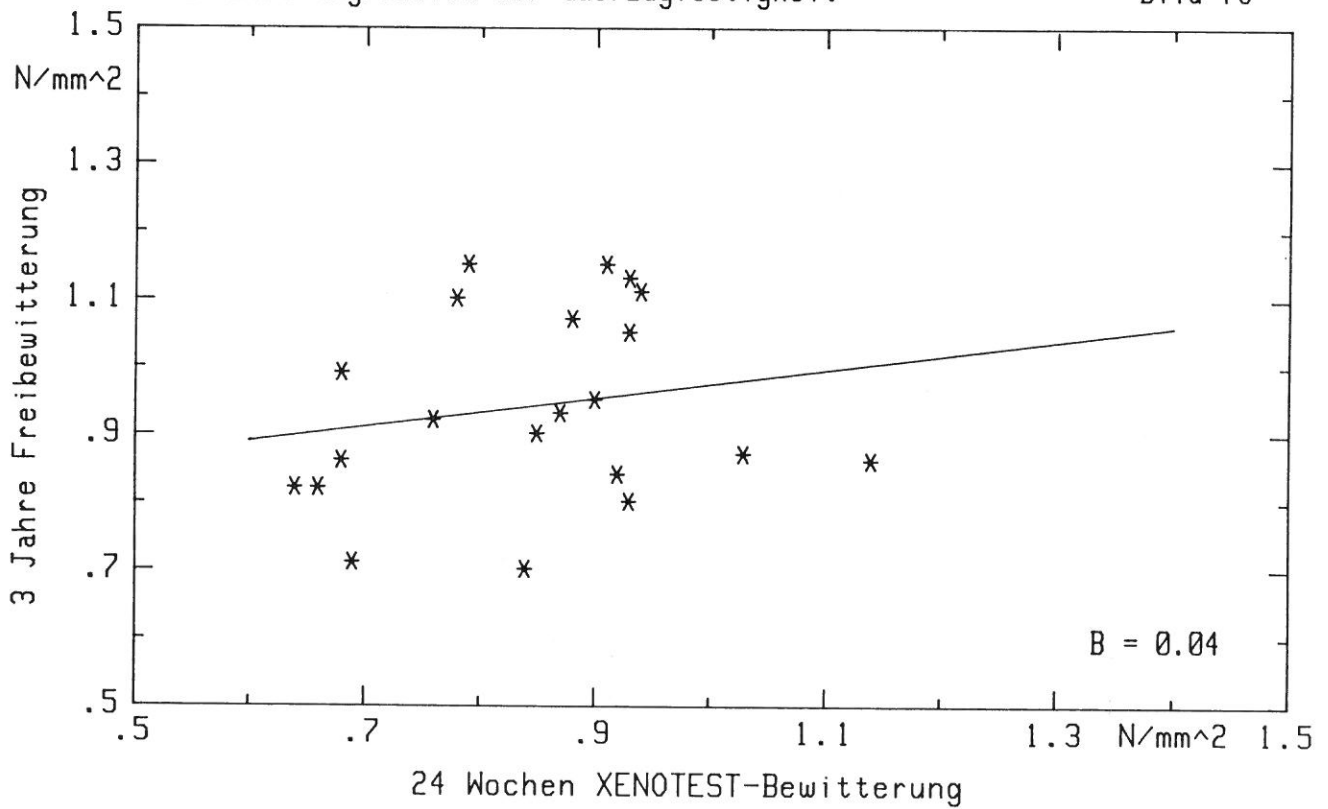
Lineare Regression der Druckfestigkeit

Bild 72



Lineare Regression der Querkzugfestigkeit

Bild 73



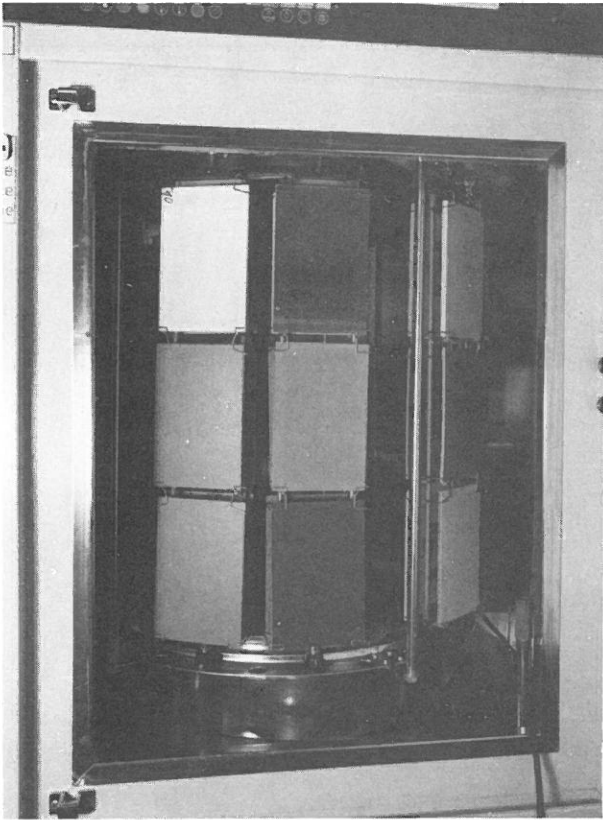


Bild 74
Probenraum des XENOTEST-Geräts 1200
mit Probenträgern und Proben

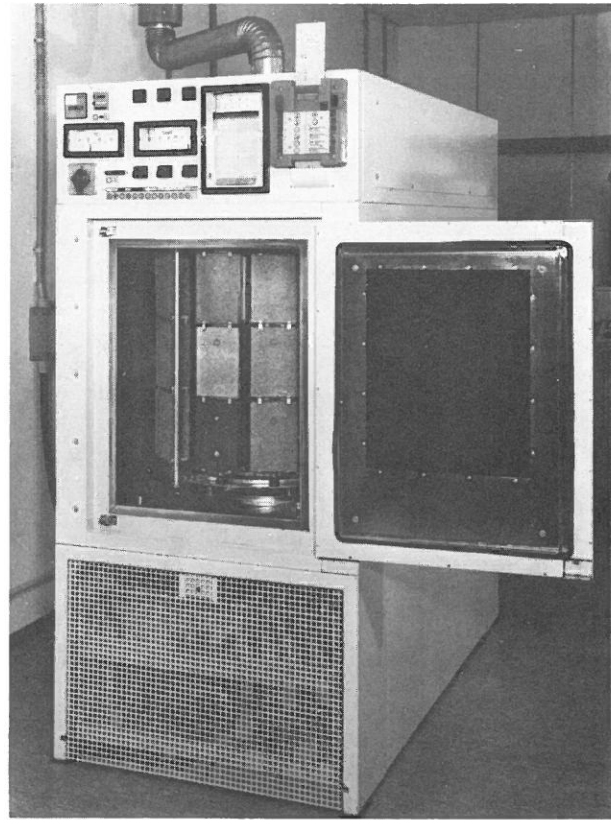


Bild 75
XENOTEST-Gerät, Typ 1200,
Fabrikat ORIGINAL HANAU

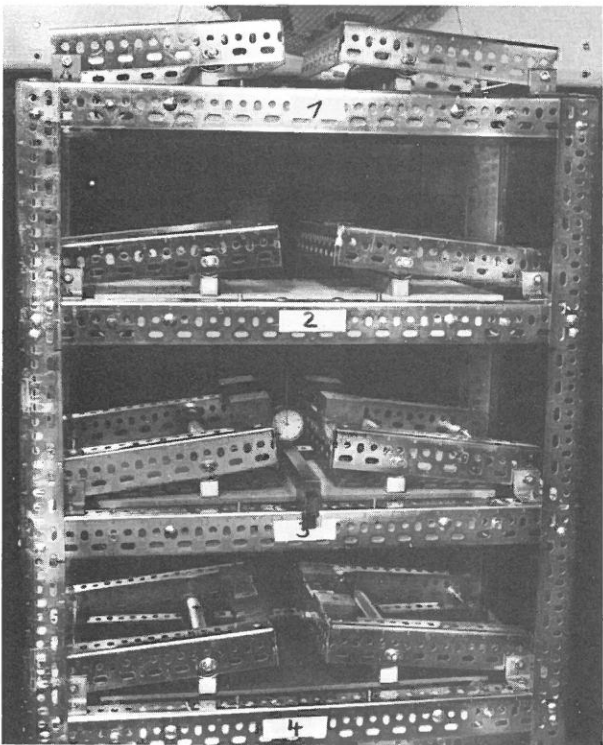


Bild 76
Dauerstand-Prüfvorrichtung mit Last
auflage und Meßschema (Meßuhr)

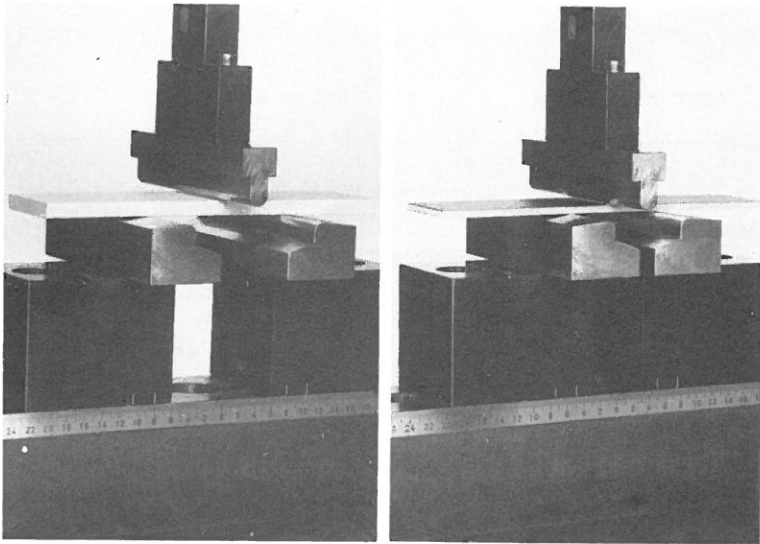


Bild 77a
Biege- und Elastizitäts-Modul-
Prüfanordnung

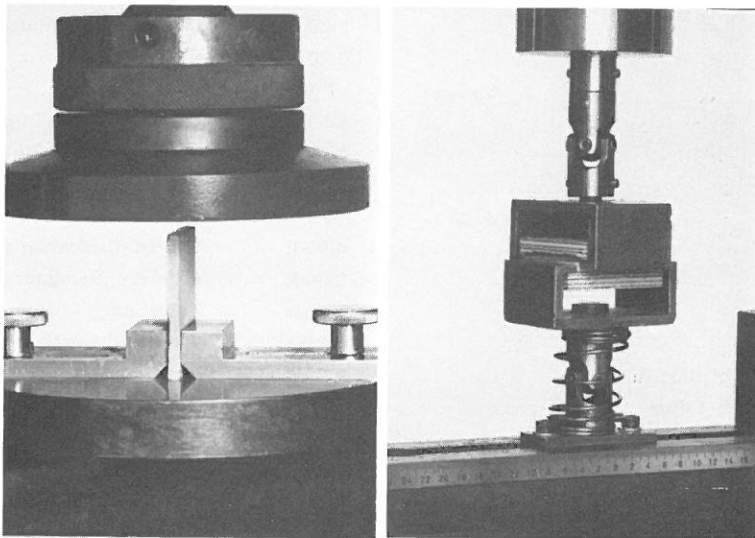


Bild 77b
Druck- und Querkzugprüfanordnung

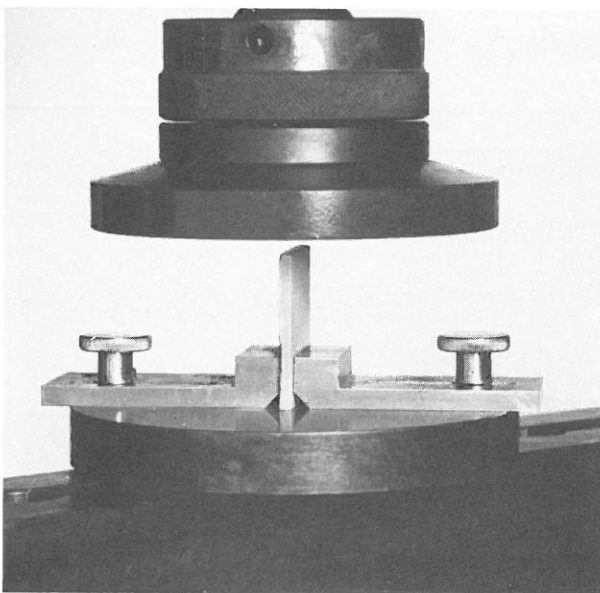


Bild 78a
Druckprüfanordnung, Probe 1/3 von unten
eingespannt

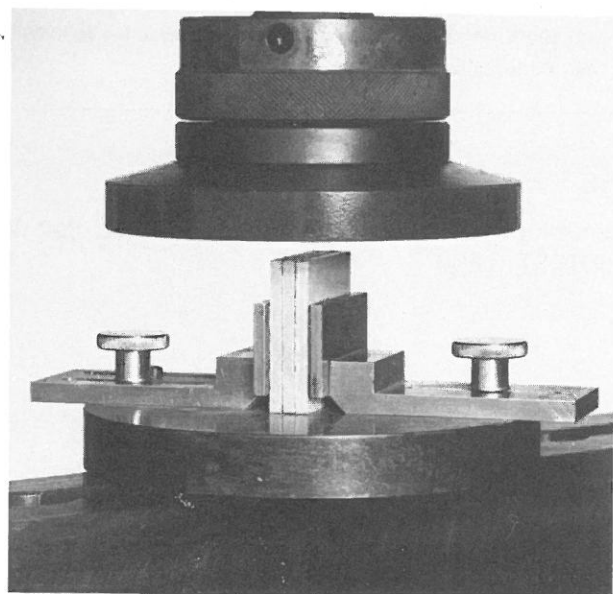


Bild 78b
Druckprüfanordnung, Proben 2-, bzw.
3fach verklebt und die Schmalflächen
bündig geschliffen

Beregnung:

Mit 24 l entsalztem Wasser von 18 ° C je h/m² Probenfläche.

UV-IR-Bestrahlung:

Mit 3 Xenon-Strahlern je 4500 Watt, Wellenbereich = 280 - 830 nm,
Bestrahlung H in 4 Wochen ca. 650 MWs/m²,
Probenraumtemperatur = 34 ° bis 36 ° C,
Schwarztafeltemperatur = 60 ° C,
relative Luftfeuchte ca. 18 %.

Kältelagerung:

In einer Tiefkühltruhe bei ca. - 20 ° C.

Beanspruchungsdauer:

3 Zyklen zu 4 Wochen = 12 Wochen = 2016 h
sowie 24, 36, 48, 60 und/oder 72 Wochen.

Probenabmessungen:

195 mm x 125 mm x 3 ... 22 mm, Holzwerkstoffe,
114 mm x 20 mm x 10 ... 20 mm, Montageverleimungen,
90 mm x 45 mm x 3 ... 10 mm, Bläuebrettchen,
50 mm x 25 mm x 15 mm, Normklötzchen.

Die zu untersuchenden Proben hängen in einem Karussell auf flachen Probenträgern und bewegen sich mit diesem um das Strahler-Filter-Beregnungssystem. Die Umlauffrequenz des Karussells beträgt 1,66 Umläufe/Minute = 1 Umlauf in 36 Sekunden. Nach jedem Umlauf werden die Probenträger um 180 ° gewendet. Da die Probenträger auf beiden flachen Seiten mit Proben bestückt sind, werden die Probenoberflächen nur bei jeder 2. Umdrehung des Kurussells bestrahlt bzw. beregnet. Das ergibt dann in 4 Wochen:

- ca. 200 h Beregnung (400 h mit hoher Feuchte);
- ca. 190 h UV-IR-Bestrahlung (312 h Wärme bei 34 - 36 ° C);
- ca. 60 h Kältelagerung bei etwa - 20 ° C.

Zeitfolge der Wechselbeanspruchung:

Beginn am Freitag 9:00 Uhr

Woche:

1., 5. ...	72:00 h	Beregnung
	4 Wechsel von:	
	14:20 h	UV-IR-Bestrahlung
	3:00 h	UV-IR + Beregnung
	6:40 h	Beregnung
2., 6. ...	7 Wechsel von:	
	15:20 h	UV-IR-Bestrahlung
	2:20 h	UV-IR + Beregnung
	6:20 h	Beregnung
3., 7. ...	7 Wechsel von:	
	6:50 h	UV-IR-Bestrahlung
	3:10 h	UV-IR + Beregnung
	14:00 h	Beregnung
4., 8. ...	3 Wechsel von:	
	4:00 h	UV-IR-Bestrahlung
	2:00 h	UV-IR + Beregnung
	18:00 h	Beregnung
	weiter im Wechsel, und zwar:	
	6:00 h	Beregnung
	16:30 h	Kältelagerung
	7:30 h	Beregnung
	16:30 h	Kältelagerung
	7:30 h	Beregnung
	16:30 h	Kältelagerung
	25:30 h	Beregnung

dann Beginn der 5., 9. ... Woche.

Bild 79

Beanspruchungsparameter und Zeitfolge der Wechselbeanspruchung
im XENOTEST 1200

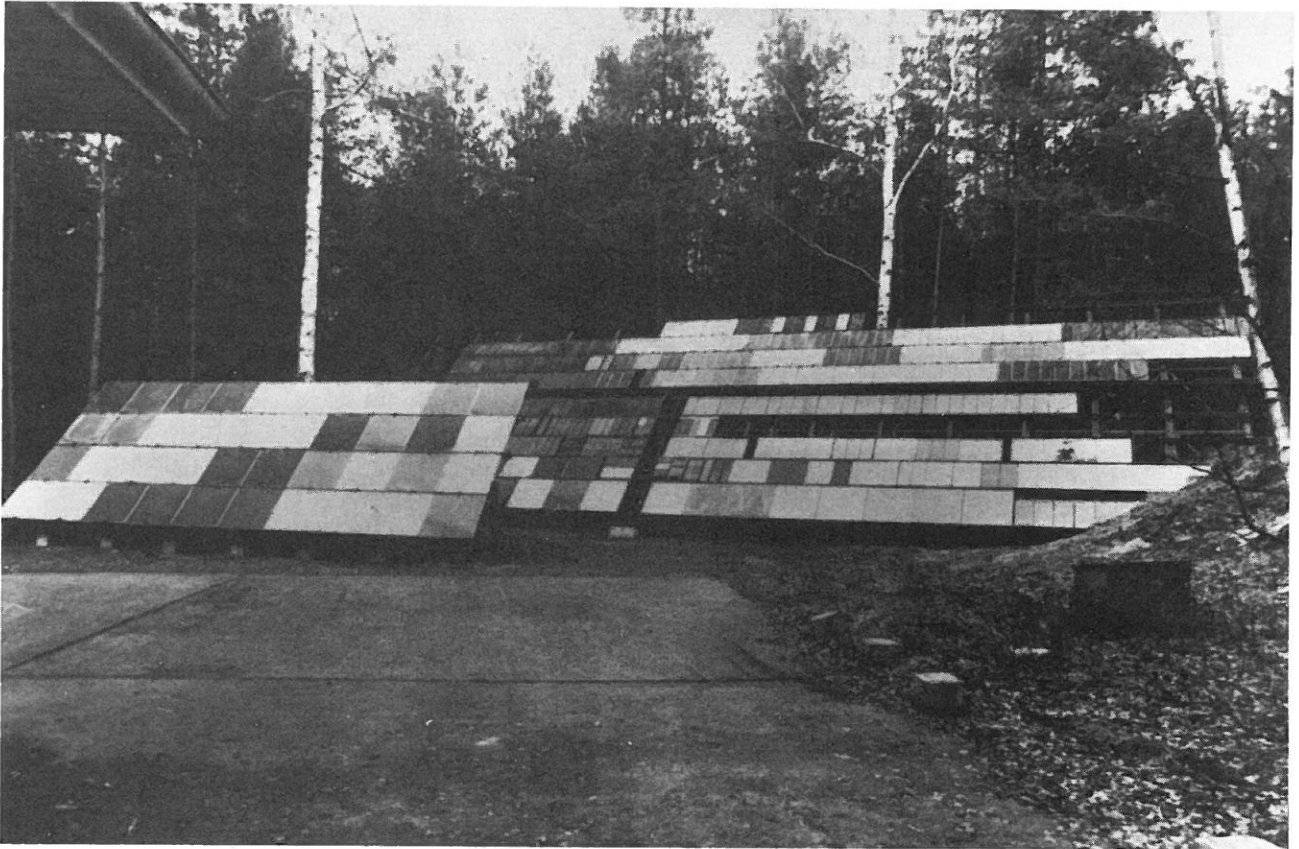
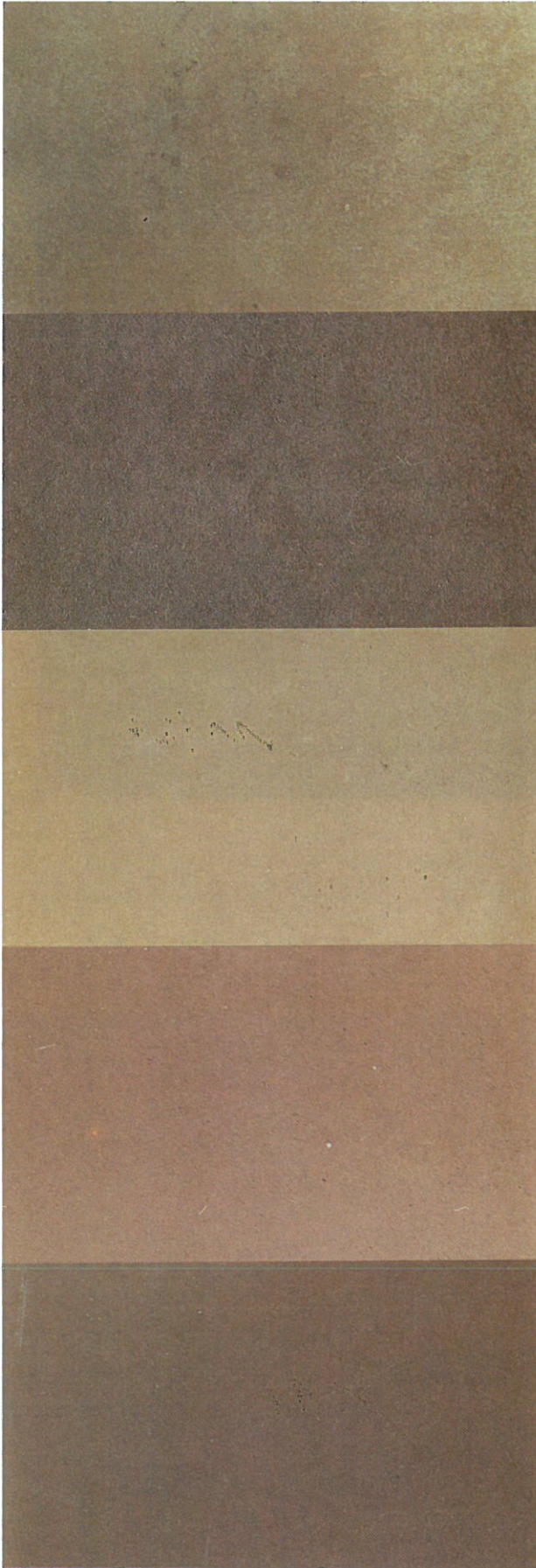


Bild 80
Freibewitterungsstand der BAM, Berlin-Grünwald



Aufnahmen der Bewitterungsproben (Probengröße: 195 mm x 125 mm)

0 - Probe 3 Jahre Freibewitterung 24 Wochen XENDITEST 48 Wochen XENDITEST 72 Wochen XENDITEST

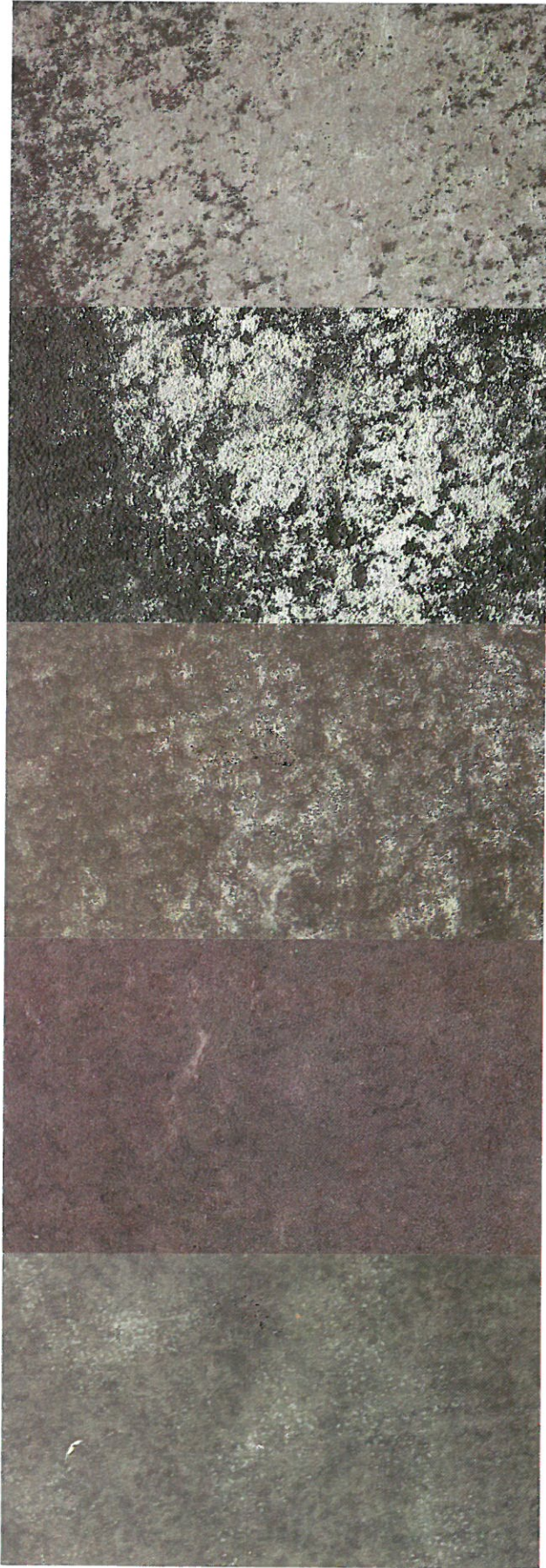
Mikroskopische Aufnahmen der bewitterten Oberflächen (32 fache Vergrößerung)

1 mm



Bild 81

Beispielaufnahmen von einigen Bewitterungsproben etwa 1 : 1 sowie mikroskopische Aufnahmen der bewitterten Oberflächen



Aufnahmen der Bewitterungsproben (Probengröße: 195 mm x 125 mm)

0 - Probe 3 Jahre Freibewitterung 24 Wochen XENOTEST 48 Wochen XENOTEST 72 Wochen XENOTEST

Mikroskopische Aufnahmen der bewitterten Oberflächen (32 fache Vergrößerung)

1 mm



Bild 82

Beispielaufnahmen von einigen Bewitterungsproben etwa 1 : 1 sowie mikroskopische Aufnahmen der bewitterten Oberflächen

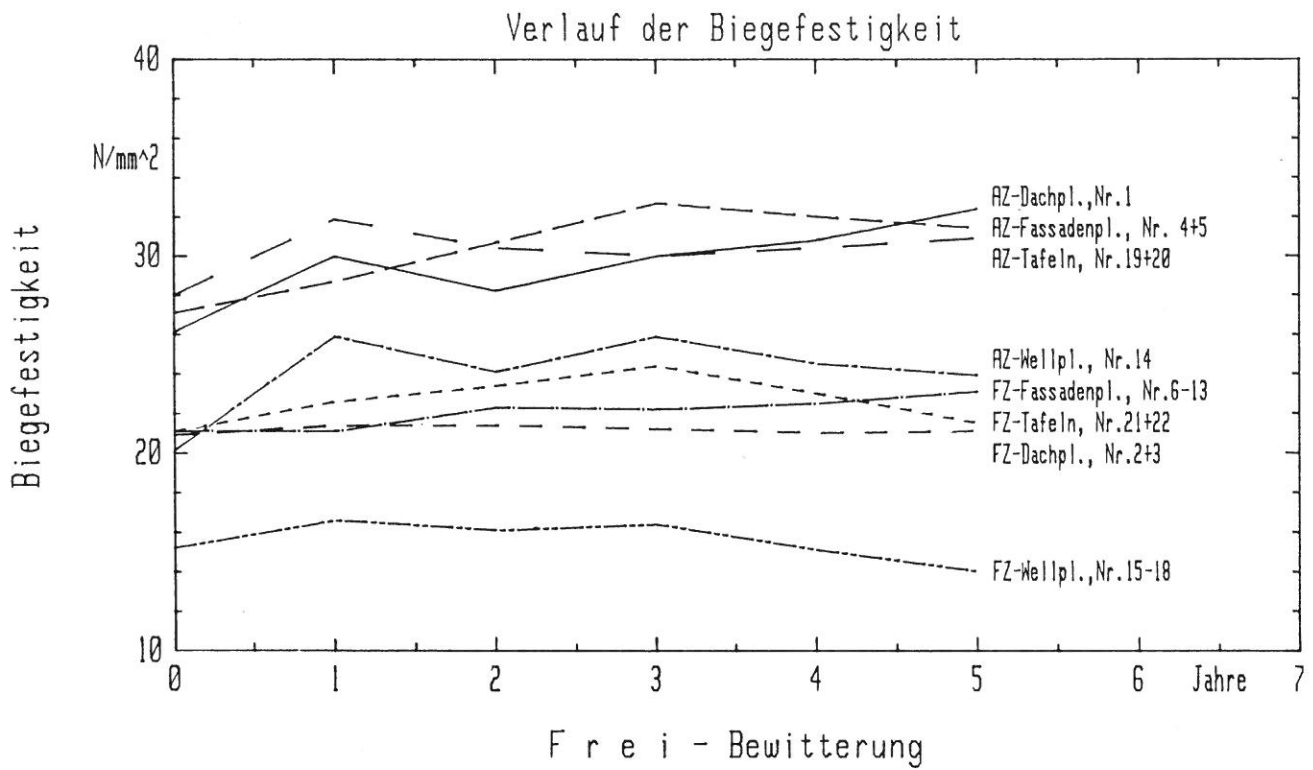


Bild 83
Verlauf der Biegefestigkeit im Freibewitterungsversuch mit AZ- und FZ-Platten

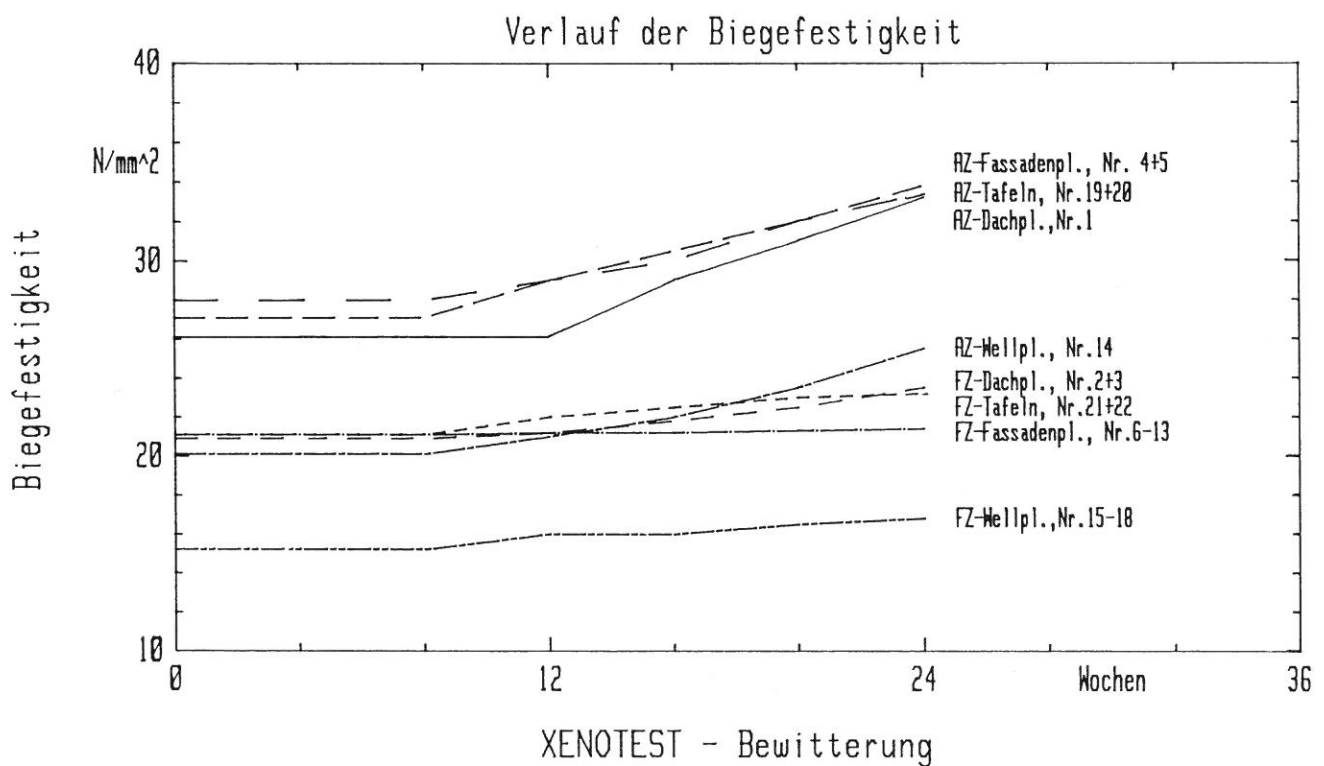


Bild 84
Verlauf der Biegefestigkeit über 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung mit AZ- und FZ-Platten

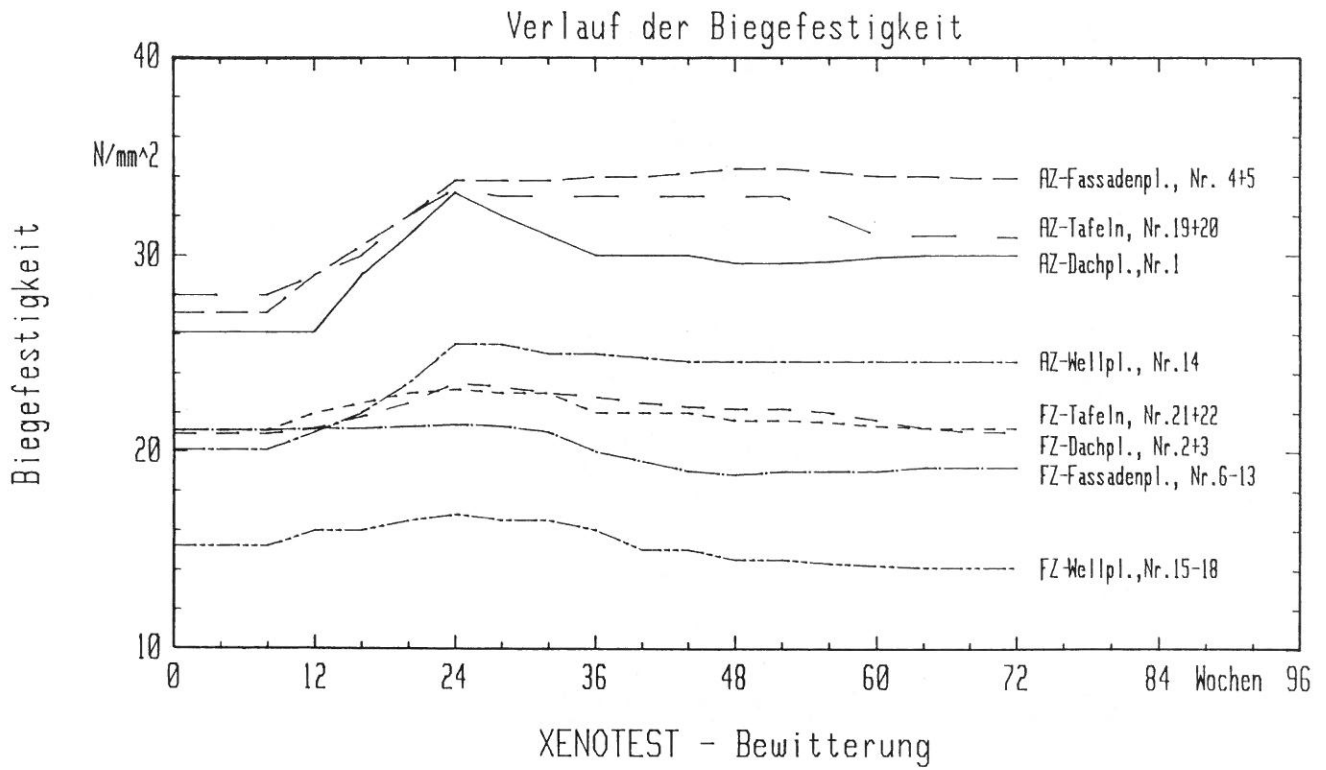


Bild 85
Verlauf der Biegefestigkeit über 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung mit AZ- und FZ-Platten

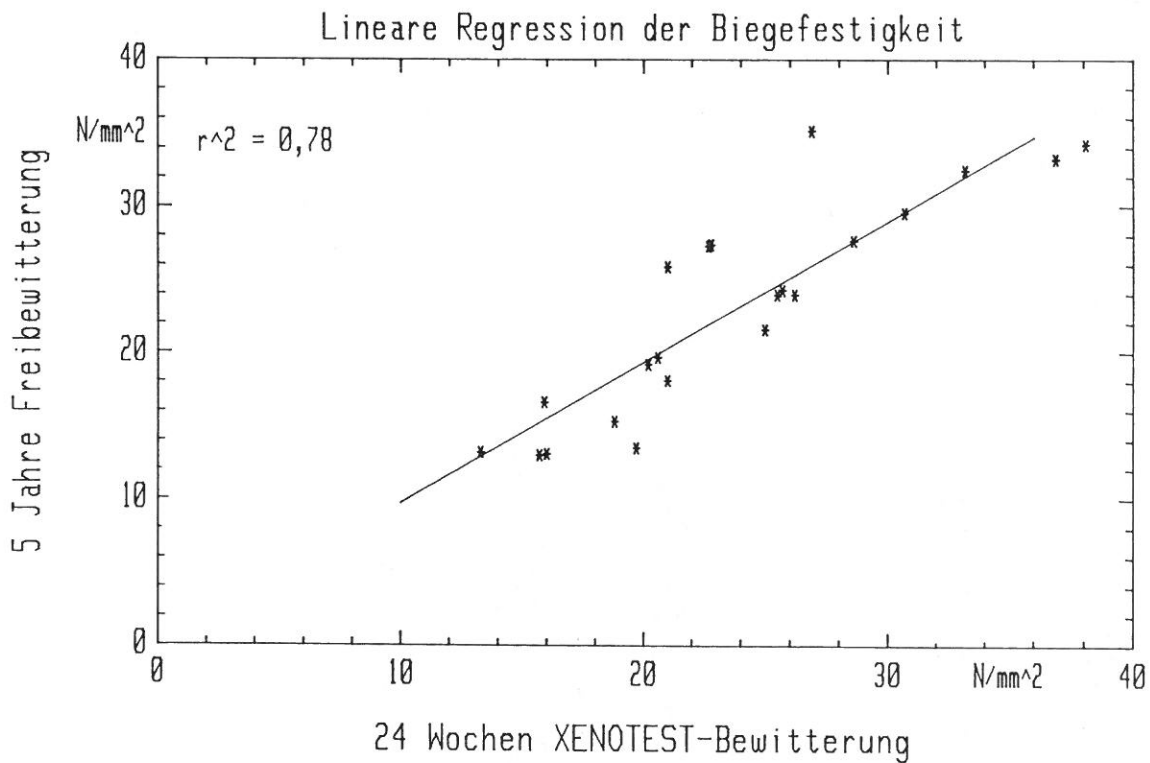


Bild 86
Lineare Regression der Biegefestigkeit zwischen 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung und 5 Jahren Freibewitterung

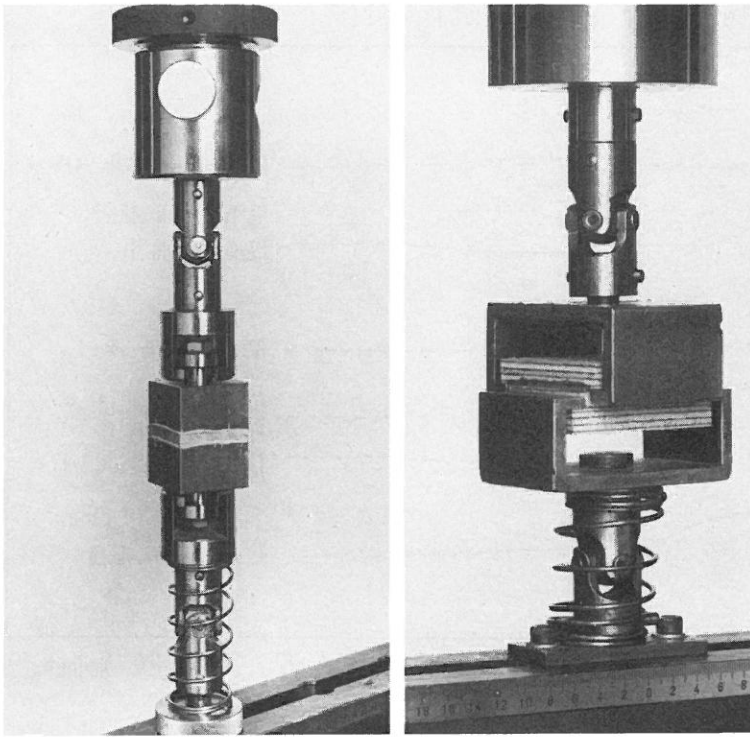


Bild 87
 Darstellung der Querkzugfestigkeitsprüfanordnung
 l. = 30 mm Stahljoche,
 r. = 18 mm Sperrholz-Joche

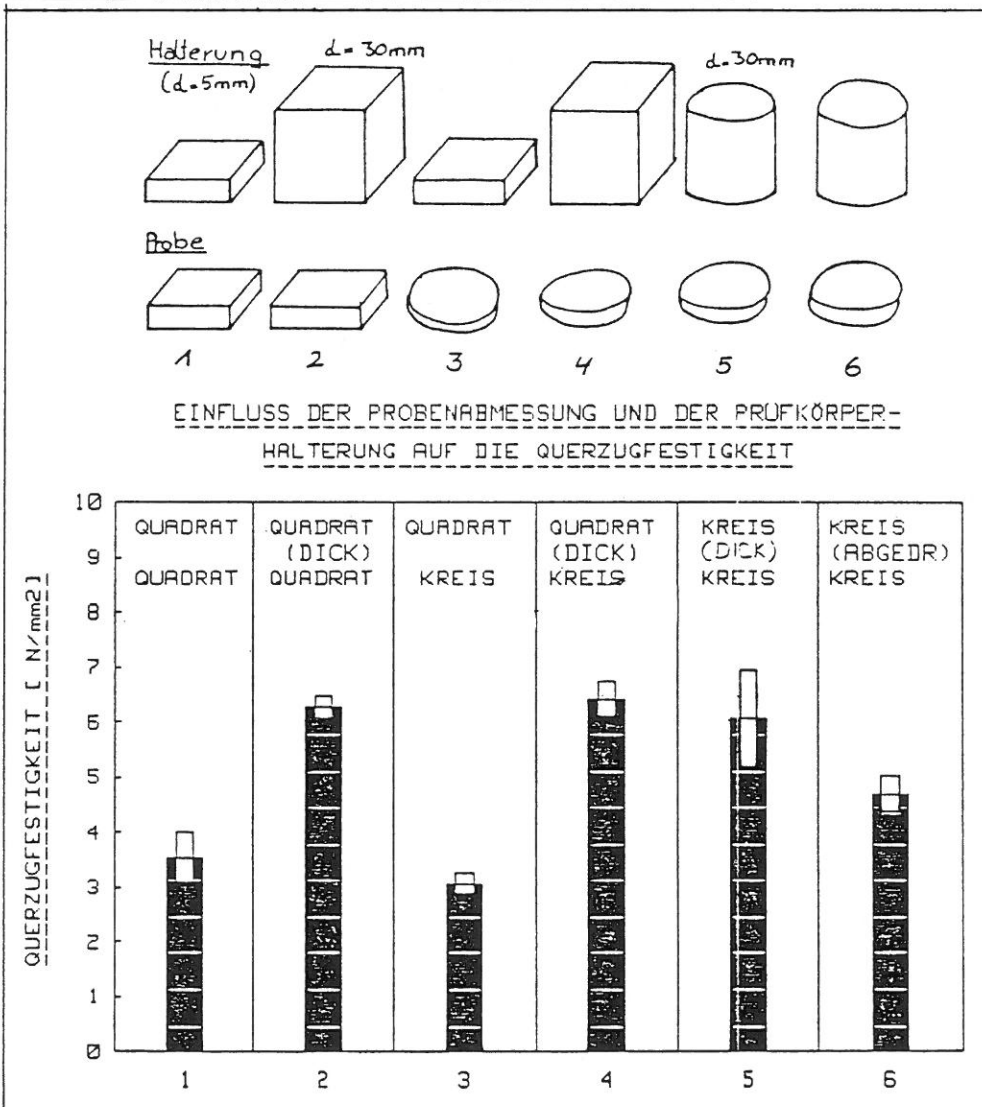


Bild 88
 Vergleichende Untersuchungen mit verschiedenen ausgeformten Jochen und Probekörpern (Eternit-Berlin)

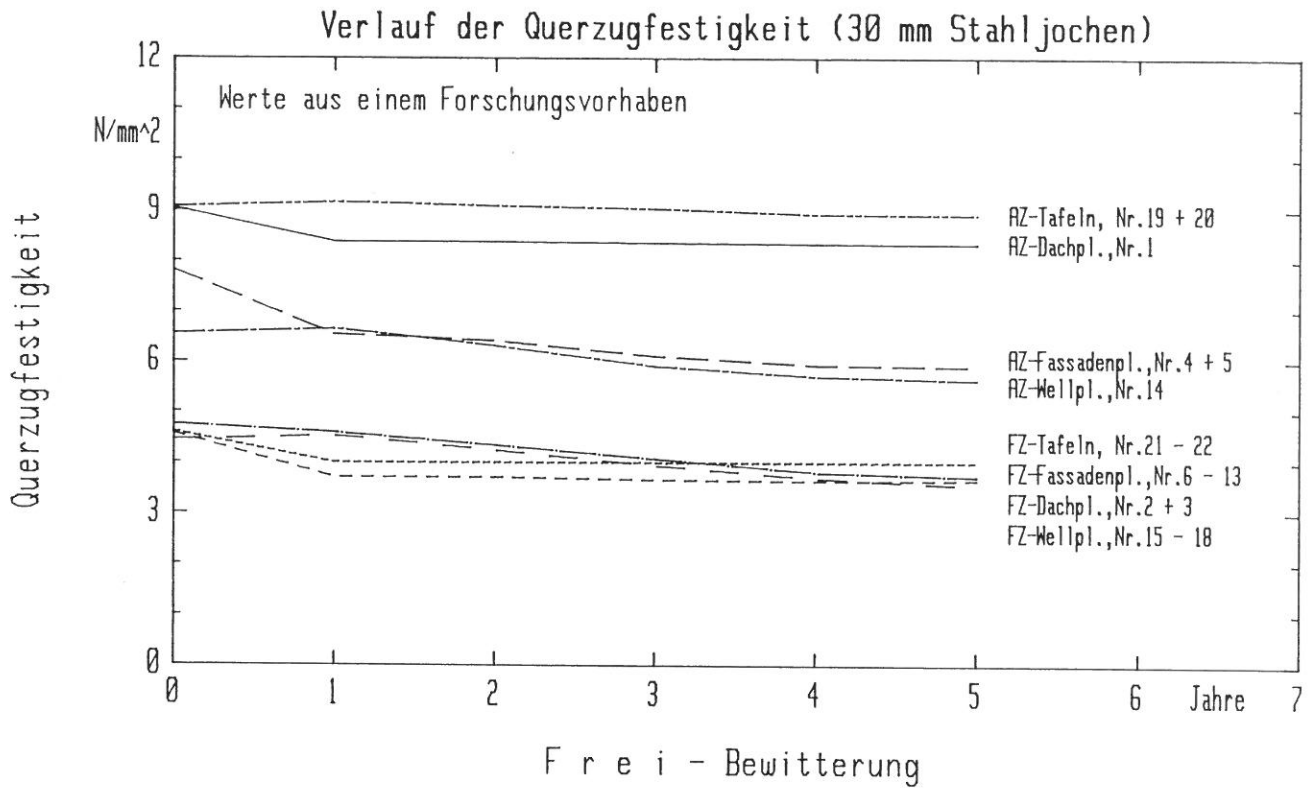


Bild 89
Verlauf der Querkzugfestigkeit im Freibewitterungsversuch
mit AZ- und FZ-Platten

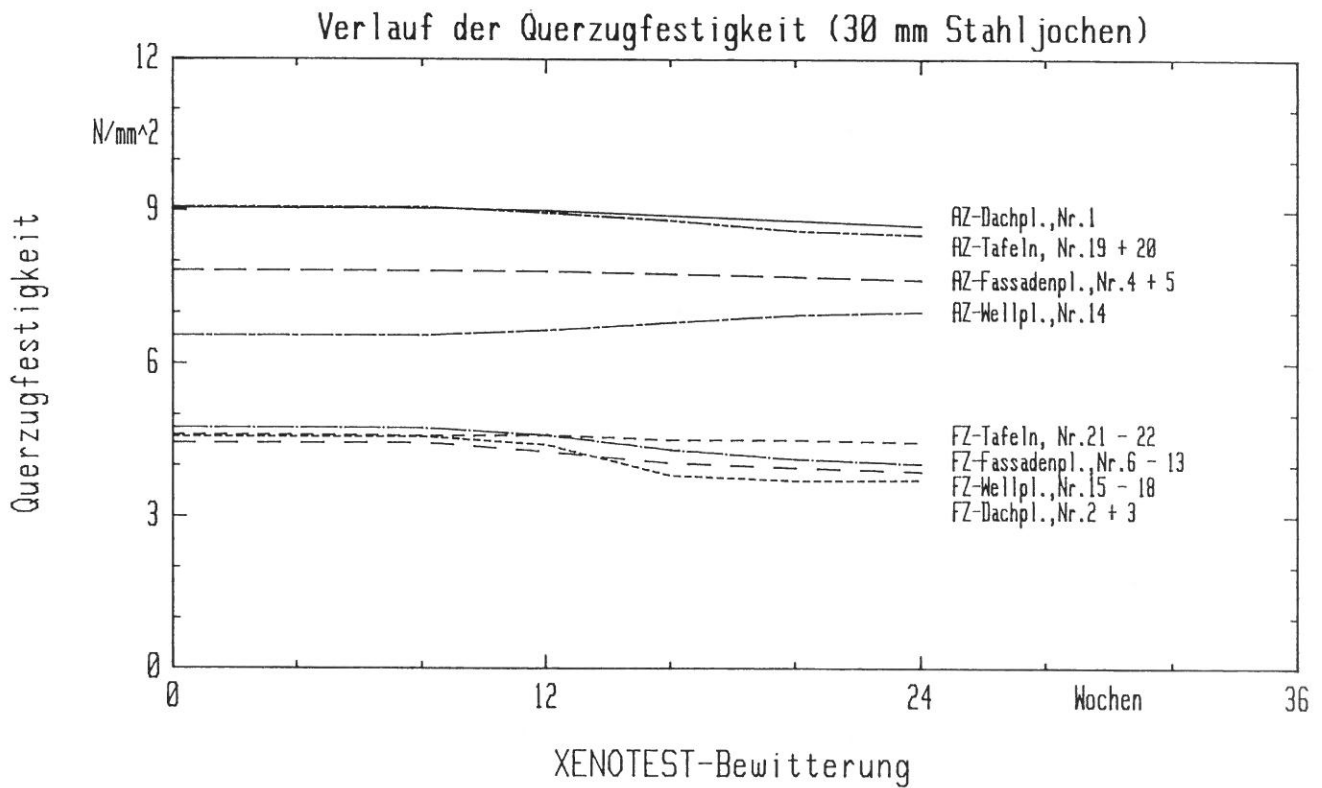


Bild 90
Verlauf der Querkzugfestigkeit über 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung
mit AZ- und FZ-Platten

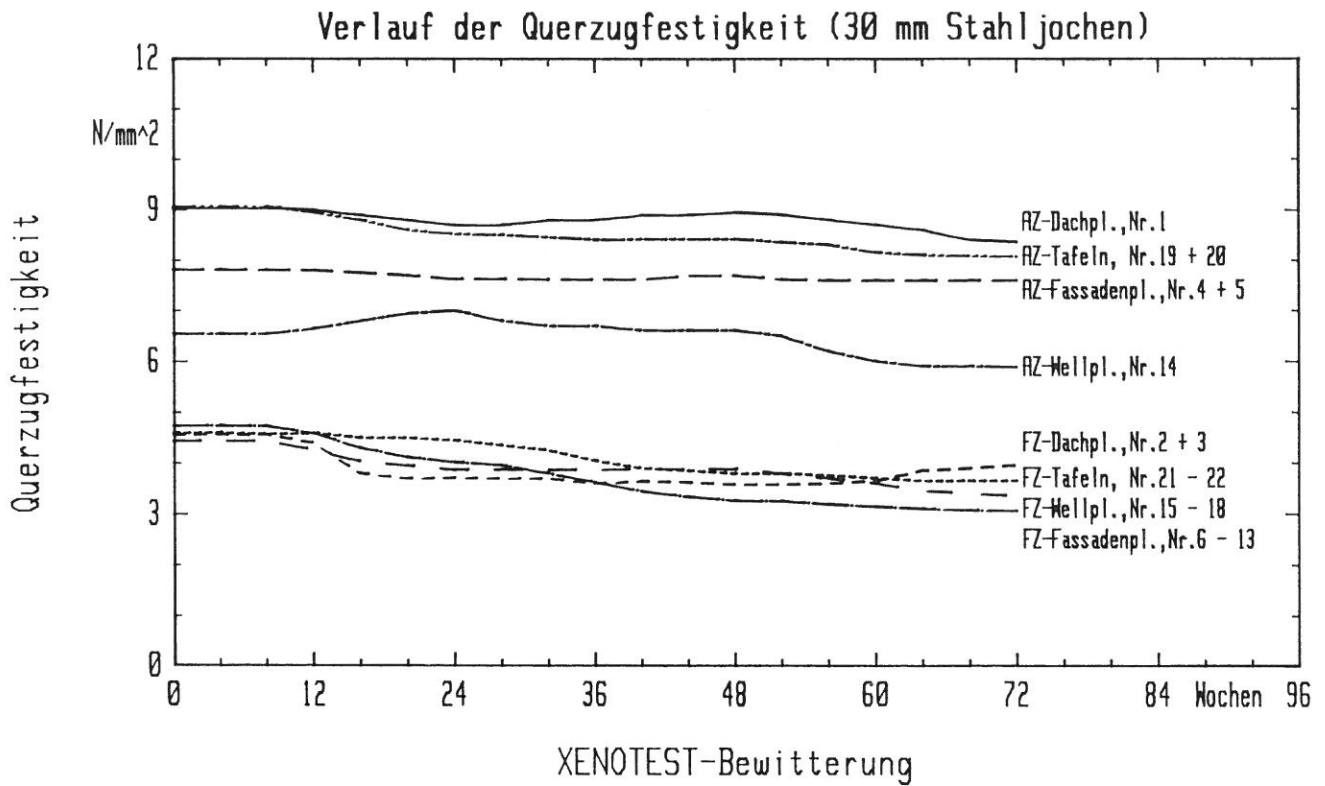


Bild 91
Verlauf der Querkzugfestigkeit über 72 Wochen XENOTEST-Bewitterung mit AZ- und FZ-Platten

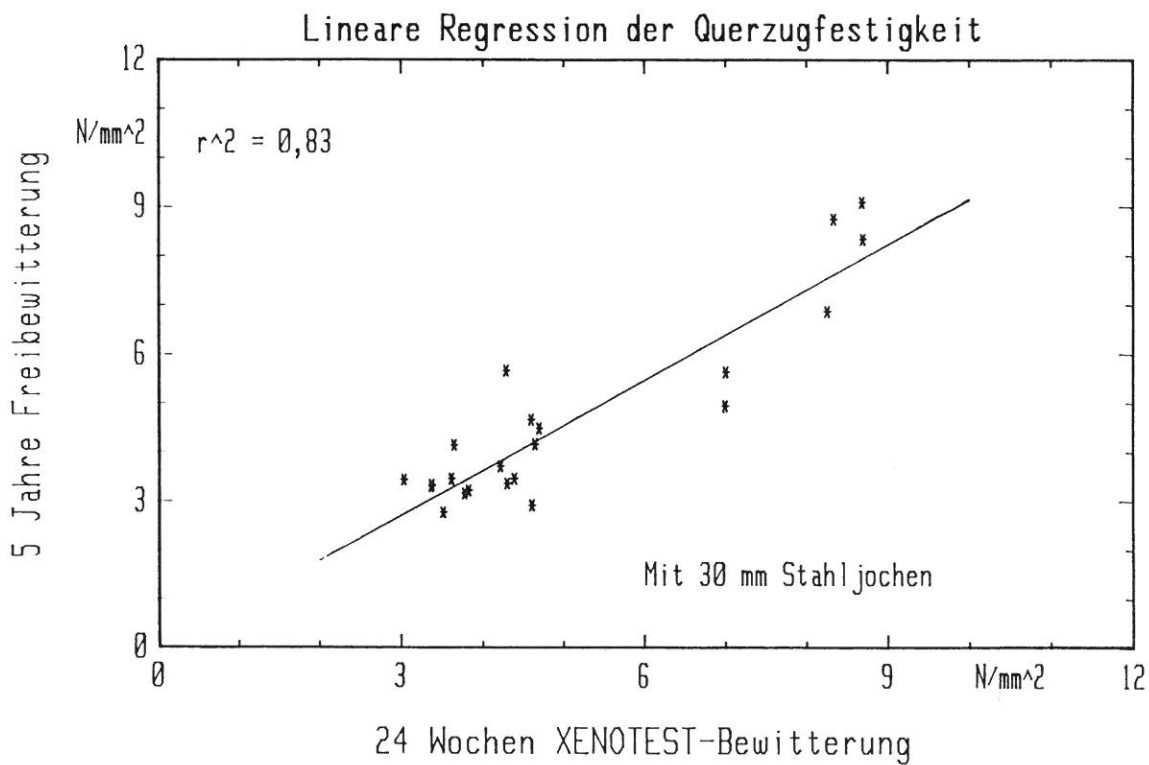


Bild 92
Lineare Regression der Querkzugfestigkeit zwischen 24 Wochen XENOTEST-Bewitterung und 5 Jahren Freibewitterung

Dauerstandversuche unter Last im Normalklima

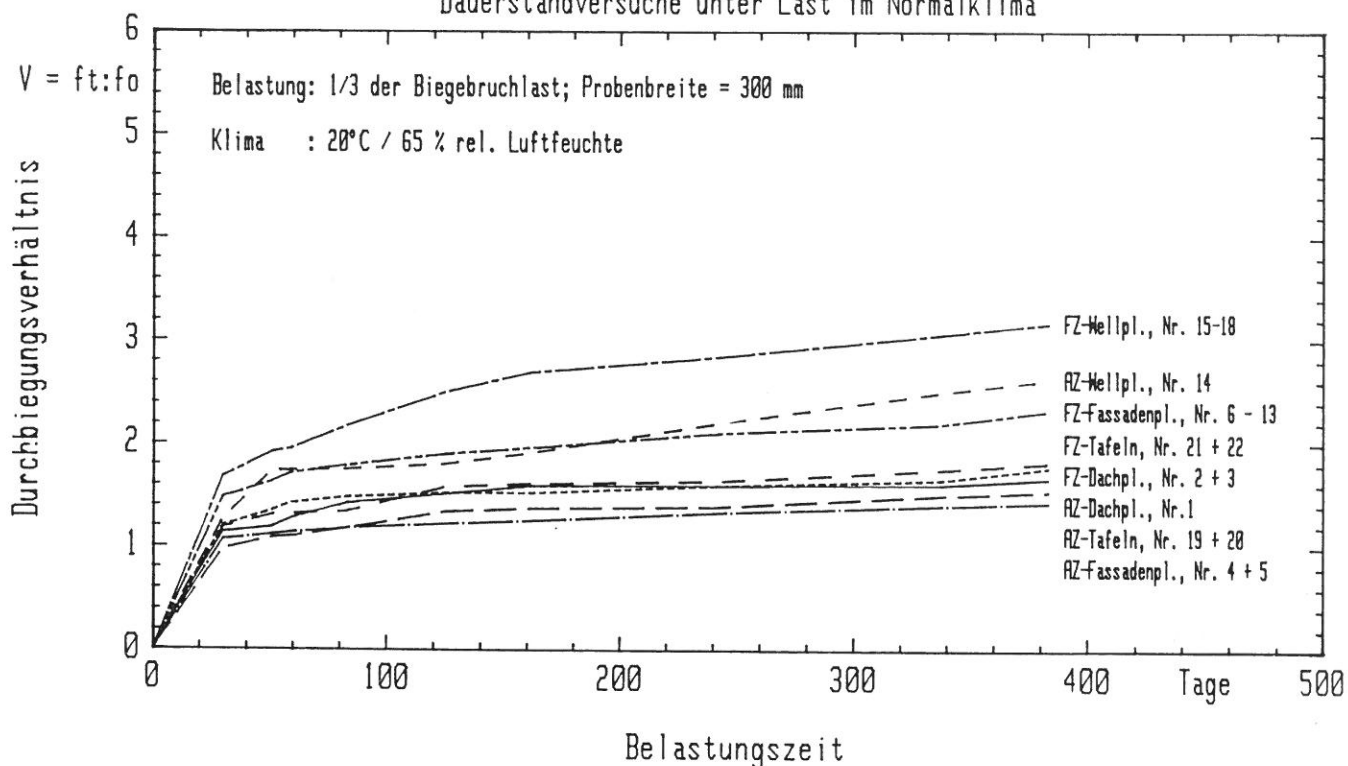


Bild 93

Dauerstandversuche unter Last im Normalklima mit AZ- und FZ-Platten

Dauerstandversuche unter Last und Wechselklima

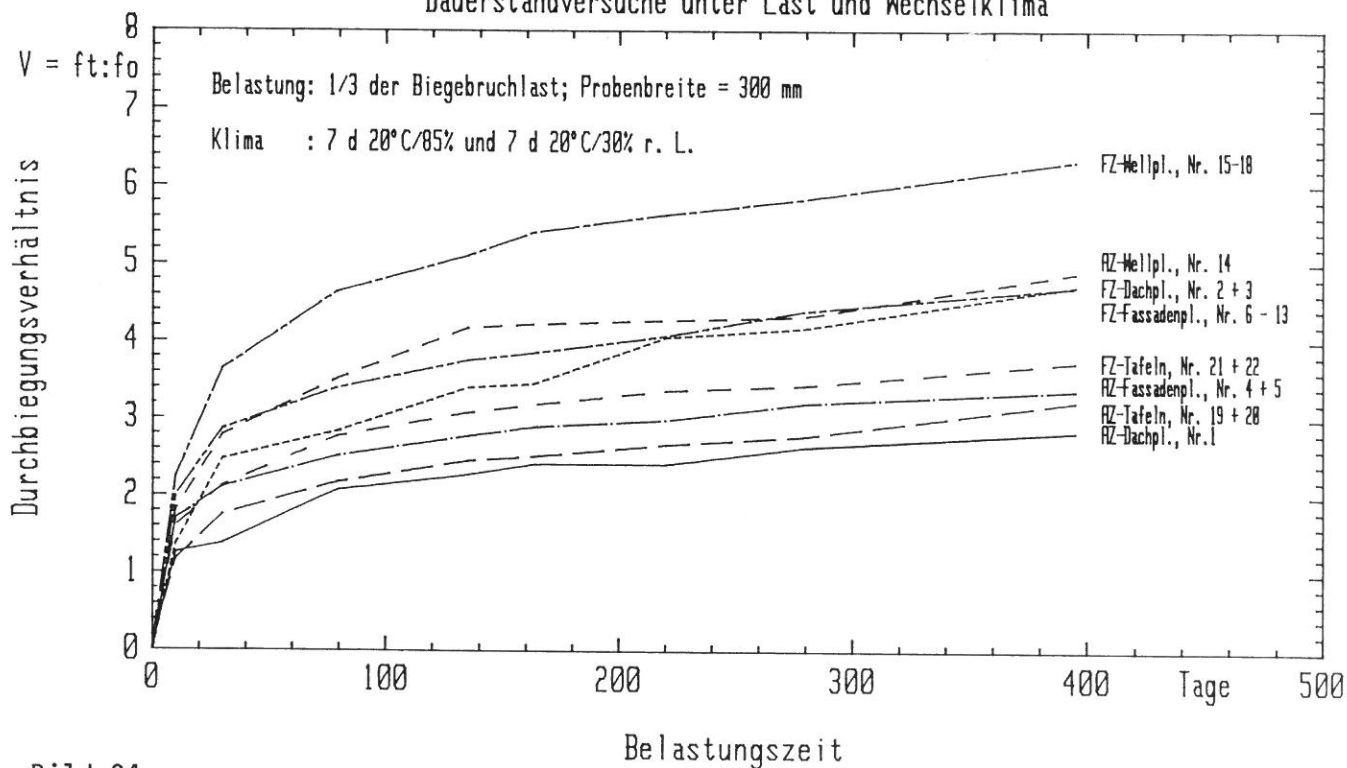


Bild 94

Dauerstandversuche unter Last und Wechselklima mit AZ- und FZ-Platten

Tabellen

Tabelle 1
Visuelle Beurteilung der bewitterten Oberflächen

Beanspruchung nach:	Lfd.-Nr. / Plattenbezeichnung		
	1 AZ-Dachplatte beschichtet, dunkelgrau, 4,2 mm	2 FZ-Dachplatte beschichtet, dunkelgrau, 4,3 mm	3 FZ-Dachplatte beschichtet, 4,7 mm
24 Wochen XENOTEST-Bewitterung	Matte sowie schwache Aufhellung der Oberflächen	Matte sowie sichtbare Aufhellung der Oberflächen	Sichtbare farbliche Veränderung der Oberflächen
	<p>Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:</p> <p>Vereinzelt auftretende kleine aufgeplatzte Blasen</p>		
			Über die ganzen Oberflächen verteilt, zahlreiche aufgeplatzte Blasen
48 Wochen XENOTEST-Bewitterung	Matte sowie sichtbare Aufhellung der Oberflächen		Sichtbare farbliche Veränderungen
	<p>Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:</p> <p>Vereinzelt auftretende kleine aufgeplatzte Blasen</p>		
			Über die ganzen Oberflächen verteilt, zahlreiche aufgeplatzte Blasen sowie einige kleine Schrumpfrisse
72 Wochen XENOTEST-Bewitterung	Matte sowie deutlich sichtbare Aufhellung der Oberflächen (Vergrauung)		Sichtbare farbliche Veränderungen
	<p>Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:</p> <p>Starke Vergrauung, besonders in den strukturbedingten Vertiefungen sowie zahlreiche aufgeplatzte Blasen und einige Abplatzungen der obersten Schicht an den strukturbedingten Erhöhungen</p>		
			Über die ganzen Oberflächen verteilt, zahlreiche aufgeplatzte Blasen sowie zahlreiche kleine Schrumpfrisse
3 Jahren Frei-Bewitterung	Schwache Aufhellung der Oberflächen		Schwache farbliche Veränderungen
	<p>Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:</p> <p>Vereinzelt auftretende kleine Blasen, sonst keine Veränderungen</p>		
			Keine Veränderungen erkennbar

Tabelle 2

Visuelle Beurteilung der bewitterten Oberflächen

Beanspruchung nach:	Lfd.-Nr. / Plattenbezeichnung		
	4 AZ - Fassadenplatte unbeschichtet, 3,9 mm	5 AZ - Fassadenplatte beschichtet, tundra, 4,0 mm	6 FZ - Fassadenplatte unbeschichtet, 4,2 mm
24 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Sichtbare farbliche Veränderungen (vergilbt)	Sichtbare farbliche Aufhellung erkennbar	Sichtbares Ablösen der obersten dunklen Beschichtung
Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
	Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, ist das Herauslösen von kleinen Zementsteinteilen festzu- stellen	Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, zahlreiche kleine aufge- platzte Blasen und Schrumpfris- se, die von den Blasen ausgehen	Vereinzelt Ablösen von Zement- stein und Fasern
48 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Sichtbare farbliche Veränderungen (vergilbt)	Sichtbare farbliche Aufhellung erkennbar	Deutlich sichtbares Ablösen von Zementstein und Fasern
Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
	Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, ist das Herauslösen von kleinen Zementsteinteilen festzu- stellen	Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, zahlreiche kleine aufge- platzte Blasen und Schrumpfris- se, die von den Blasen ausgehen	Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, Ab- bzw. Herauslösen von Zementstein und Fasern
72 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Sichtbare farbliche Veränderungen (vergilbt)	Sichtbare farbliche Aufhellung erkennbar	Großflächiges Ablösen der ober- sten dunklen Beschichtung
Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
	Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, vereinzelt großflächiges Ablösen von Zementsteinen	Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, zahlreiche aufgeplatzte Blasen und Schrumpfris- se, die von den Blasen ausgehen	Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, großflächiges Herauslösen von Zementstein und Fasern
3 Jahren Frei- Bewitterung	Sichtbare farbliche Veränderungen (etwas vergilbt)	Sichtbare farbliche Veränderungen (etwas dunkler geworden)	Schwache farbliche Aufhellung
Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
	Kein Veränderungen erkennbar		Vergrauungen in den strukturbe- dingten Vertiefungen, sonst keine Veränderungen erkennbar

Tabelle 3

Visuelle Beurteilung der bewitterten Oberflächen

Beanspruchung nach:	Lfd.-Nr. / Plattenbezeichnung		
	7 FZ - Fassadenplatte unbeschichtet, 4,8 mm	8 FZ - Fassadenplatte unbeschichtet, 4,1 mm	9 FZ - Fassadenplatte unbeschichtet, 4,2 mm
24 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Kaum sichtbare Veränderungen festzustellen	Sichtbare farbliche Veränderungen erkennbar	Sichtbare farbliche Veränderungen (Aufhellung) erkennbar
Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
	Vereinzelt Herauslösen von Zementstein und Fasern	Einige herausgelöste Zementsteine	Über die ganzen Oberflächen verteilt, Herauslösen von kleinen Zementsteinteilen
48 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Einige Zementsteinablösungen erkennbar	Sichtbare farbliche Veränderungen erkennbar	Sichtbare farbliche Veränderungen (Aufhellung) erkennbar
Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
	Über die ganzen Oberflächen verteilt, Herauslösen von Zementstein und Fasern	Über die ganzen Oberflächen verteilt, Herauslösen von kleinen Zementsteinteilen und Fasern	Über die ganzen Oberflächen verteilt, Herauslösen von kleinen Zementsteinteilen
72 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Einige Zementsteinablösungen erkennbar	Sichtbare farbliche Veränderungen erkennbar	Sichtbare farbliche Veränderungen (Aufhellung) und einige herausgelöste Zementsteinteile erkennbar
Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
	Über die ganzen Oberflächen verteilt, Herauslösen von Zementstein und Fasern	Über die ganzen Oberflächen verteilt, Herauslösen von kleinen Zementsteinteilen und Fasern sowie zahlreiche Schrumpfrisse erkennbar	Über die ganzen Oberflächen verteilt, Herauslösen von kleinen und zum Teil größeren Zementsteinteilen sowie einige Schrumpfrisse erkennbar
3 Jahren Frei- Bewitterung	Leichte Ablöseerscheinungen von Zementstein erkennbar	Schwache farbliche Veränderungen erkennbar	Farbliche Veränderungen (etwas dunkler) erkennbar
Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
	Vereinzelt Ablöseerscheinungen von Zementstein und Fasern	Keine Veränderungen feststellbar	Keine Veränderungen feststellbar

Tabelle 4

Visuelle Beurteilung der bewitterten Oberflächen

Beanspruchung nach:	Lfd. - Nr. / Plattenbezeichnung		
	10 F Z - Fassadenplatte beschichtet, achat 4,2 mm	11 F Z - Fassadenplatte beschichtet, tundra 5,4 mm	12 F Z - Fassadenplatte beschichtet, beige 4,5 mm
24 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Schwache farbliche Veränderung (Aufhellung) Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung: Angriff der Beschichtung in den strukturbedingten Vertiefungen	Schwache deutliche farbliche Veränderung Keine Veränderungen erkennbar	Schwache farbliche Veränderung (Aufhellung) erkennbar, matt Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, sehr viele kleine aufge- platzte Blasen in der Beschichtung
48 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Schwache farbliche Veränderung (Aufhellung) Angriff der Beschichtung in den strukturbedingten Vertiefungen	Schwache deutliche farbliche Veränderung Vereinzelt ist das Herauslösen von einigen Steinchen der Be- schichtung erkennbar	Schwache farbliche Veränderung (Aufhellung) erkennbar, matt Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, sehr viele kleine aufge- platzte Blasen in der Beschichtung
72 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Schwache farbliche Veränderung (Aufhellung) Angriff der Beschichtung in den strukturbedingten Vertiefungen und einige aufgeplatzte Blasen	Deutliche farbliche Veränderung erkennbar (etwas gelblich) sowie Ablösen einiger Beschichtungsteil- chen Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, sind das Herauslösen von zahlreichen Beschichtungsstein- chen sowie einige Schrumpfrisse feststellbar	Großflächige Farbveränderungen (Aufhellung, Abwitterung) erkenn- bar, matt Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, sehr viele kleine aufge- platzte Blasen, einige Schrumpf- risse und abgewitterte Stellen erkennbar
3 Jahren Frei- Bewitterung	Kaum feststellbare farbliche Veränderung Einige aufgeplatzte Blasen, sonst gut	Deutliche farbliche Veränderung (verschmutzte Oberfläche) Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, sind zahlreiche Schrumpf- risse erkennbar. In den Struk- turbedingten Vertiefungen sind Schmutzpartikel abgelagert	Farbliche Veränderung (ver- schmutzte Oberfläche), dunkel Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, sehr viele kleine aufge- platzte Blasen mit Schmutzparti- kelablagerungen sowie Schrumpf- risse erkennbar

Tabelle 5

Visuelle Beurteilung der bewitterten Oberflächen

Beanspruchung nach:	Lfd. - N r. / Plattenbezeichnung		
	13 F Z - Fassadenplatte beschichtet, 4,2 mm	14 A Z - Wellplatte beschichtet, 6,6 mm	15 F Z - Wellplatte unbeschichtet, 6,0 mm
24 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Sichtbare farbliche Veränderung (Aufhellung), matte Oberfläche Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung: Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, sehr kleine aufgeplatzte Blasen	Sehr schwache farbliche Veränderung Keine Veränderungen erkennbar	
48 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Sichtbare farbliche Veränderung (Aufhellung), matte Oberfläche Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung: Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, sehr kleine aufgeplatzte Blasen	Sehr schwache farbliche Ver- änderung Vereinzelt Herauslösen von klei- nen Beschichtungsteilen	Starke farbliche Veränderung, Abwitterungserscheinungen Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, Herauslösen von kleinen Zementsteinteilen und Fasern
72 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Sichtbare farbliche Veränderung (starke Aufhellung), matte Ober- fläche Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung: Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, sehr kleine aufgeplatzte Blasen und davon ausgehend zahl- reiche sehr kleine Schrumpfrisse sowie einige herausgelöste Be- schichtungsteilchen	Sehr schwache farbliche Ver- änderung, zum Teil flächiges Ablösen der obersten Beschich- tung Zum Teil großflächiges Ablösen der obersten Beschichtung	Starke farbliche Veränderung, Abwitterungserscheinungen Über die ganzen Oberflächen ver- teilt, großflächiges Herauslösen von Zementsteinteilen und Fasern
3 Jahren Frei- Bewitterung	Sichtbare farbliche Veränderung Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung: Keine Veränderungen	Sehr schwache farbliche Verände- rung	Schwache farbliche Veränderung Bis auf das Herauslösen einiger Fasern keine Veränderungen

Tabelle 6

Visuelle Beurteilung der bewitterten Oberflächen

Beanspruchung nach:	Lfd. - Nr. / Plattenbezeichnung		
	16 F Z - Wellplatte unbeschichtet, 6,7 mm	17 A Z - Wellplatte beschichtet, 7,0 mm	18 F Z - Wellplatte beschichtet, 6,3 mm
24 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Sichtbare farbliche Veränderung (etwas dunkler)	Sichtbare farbliche Veränderung	Deutliche farbliche Veränderungen
Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
	Über die ganzen Oberflächen verteilt, Herauslösen von sehr kleinen Zementsteinteilen	Vereinzelt Herauslösen von kleinen Zementsteinteilen der obersten Schicht sowie einige Schrumpfrisse	Über die ganzen Oberflächen verteilt, kleine aufgeplatzte Blasen in der Beschichtung
48 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Sichtbare farbliche Veränderung (etwas dunkler)	Sichtbare farbliche Veränderung	Deutliche farbliche Veränderungen
Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
	Über die ganzen Oberflächen verteilt, flächiges Herauslösen von Zementstein und Fasern	Zahlreiches Herauslösen von kleinen u. größeren Zementsteinteilen der obersten Schicht sowie einige Schrumpfrisse	Über die ganzen Oberflächen verteilt, kleine aufgeplatzte Blasen in der Beschichtung
72 Wochen XENOTEST- Bewitterung	Farbliche Veränderung, großflächige Abwitterungserscheinungen	Sichtbare farbliche Veränderungen, zum Teil flächiges Ablösen der Beschichtung	Deutliche farbliche Veränderungen sowie Abwitterungserscheinungen
Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
	Über die ganzen Oberflächen verteilt, großflächiges Herauslösen von Zementstein und Fasern	Zum Teil flächiges Herauslösen von Zementstein aus der obersten Schicht sowie einige Schrumpfrisse	Über die ganzen Oberflächen verteilt, kleine aufgeplatzte Blasen mit einigen Schrumpfrissen in der Beschichtung sowie Herauslösen einiger Beschichtungsteile
3 Jahren Frei- Bewitterung	Schwache farbliche Veränderung	Farbliche Veränderung	Farbliche Veränderung und Schrumpfrissbildung
Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
	Vereinzelt Herauslösen von sehr kleinen Zementsteinteilen und einigen Fasern	Nur wenige herausgelöste sehr kleine Zementsteinteile	Über die ganzen Oberflächen verteilt, kleine aufgeplatzte Blasen mit Schrumpfrissbildung

Tabelle 7

Visuelle Beurteilung der bewitterten Oberflächen

Beanspruchung nach:	Lfd.-Nr. / Plattenbezeichnung			
	19 AZ-Tafel unbeschichtet, 7,4 mm	20 AZ-Tafel unbeschichtet, 7,7 mm	21 FZ-Tafel unbeschichtet, 8,0 mm	22 FZ-Tafel unbeschichtet, 8,0 mm
24 Wochen XENDTEST- Bewitterung	Farbliche Veränderung Keine Veränderung	Schwache farbliche Veränderung Vereinzelt Herauslösen von kleinen Zementsteinteilen	Deutliche farbliche Veränderung Vereinzelt Herauslösen von kleinen Zementsteinteilen und Fasern	Schwache farbliche Veränderung Schwach abwittern von Zementstein
	Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
48 Wochen XENDTEST- Bewitterung	Farbliche Veränderung Vereinzelt Herauslösen von kleinen Zementsteinteilen	Deutliche farbliche Veränderung Zahlreiches Herauslösen von kleinen Zementsteinteilen	Deutliche farbliche Veränderung Zahlreiches Herauslösen von kleinen Zementsteinteilen und Fasern	Schwache farbliche Veränderung, Abwitterungserscheinungen Zum Teil starkes Abwittern dünner Zementsteinschichten
	Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
72 Wochen XENDTEST- Bewitterung	Farbliche Veränderung (etwas gelblich) Vereinzelt Herauslösen von kleinen Zementsteinteilen	Deutliche farbliche Veränderung, Abwitterungserscheinungen Großflächiges Ab- und Herauslösen von Zementstein	Deutliche farbliche Veränderung mit Abwitterungserscheinungen Zahlreiches und zum Teil großflächiges Ablösen von Zementstein und Fasern	Schwache farbliche Veränderung (etwas gelblich), Abwitterungserscheinungen Starkes und zum Teil großflächiges Abwittern von Zementsteinschichten
	Unter dem Mikroskop bei 20facher Vergrößerung:			
3 Jahre Frei- Bewitterung	Schwache farbliche Veränderung Keine Veränderung	Schwache farbliche Veränderung Keine Veränderung	Schwache farbliche Veränderung Vereinzelt Ablösen oberster Fasern, sonst gut	Schwache farbliche Veränderung Schwach abwittern von Zementstein

Tabelle 8

A = Feststellung des Kreidungsgrades nach DIN 53 223 mittels Klebband-
methode, Fabrikat E R I C H S E N , Modell 466, 1)
Beurteilung nach Abkreidungsskala "Kempf",

B = Feststellung der Farbänderung nach DIN 54 001, Bewertung mittels Graumeßstab 2)

Kreidungsgrad = A und Farbänderung = B nach:

Lfd.-Nr. Plattenbezeichnung	Ausgangswerte 0 - Proben		24 Wochen XENOTEST- Bewitterung		48 Wochen XENOTEST- Bewitterung		72 Wochen XENOTEST- Bewitterung		1 Jahr Freibewitterung		2 Jahre Freibewitterung		3 Jahre Freibewitterung	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1 4,2 mm A Z - Dachplatte	0	5	0	3	1	2	1-2	2	0	4	0	4	0	4
2 4,3 mm F Z - Dachplatte	0	5	0	3	1	3-2	1	2	0	4	0	3	1	3
3 4,7 mm F Z - Dachplatte	0	5	0	3	1	3	1-2	3-2	0	4	0-1	4	0-1	4
4 3,9 mm A Z - Fassadenplatte	0	5	2	3	3	3	3	3-2	0	4	1	3*)	1	3*)
5 4,0 mm A Z - Fassadenplatte	0	5	1	3	2	3	2	3	0	2	0	2*)	0	2*)
6 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	1	5	2-3	4-3	3	2	4	1	1	4	1-2	2	1-2	2
7 4,8 mm F Z - Fassadenplatte	0	5	2	4	2-3	3	3-4	3	0-1	3	2	3*)	2	3*)
8 4,1 mm F Z - Fassadenplatte	0	5	1-2	3	2	3	3	3-2	1	4-3	1	3*)	1	3*)
9 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	1	5	3	2	3	2	3	2	1	3	2	2*)	2	2*)
10 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	0	5	1	3	1	3	1-2	2	1	4	1	3-2	1	3-2
11 5,4 mm F Z - Fassadenplatte	0	5	0	4	0-1	4-3	0-1	3-2	0-1	2*)	0-1	1*)	0-1	1*)
12 4,5 mm F Z - Fassadenplatte	0-1	5	0-1	3	0-1	3	1-2	3	1	4-3	1	2*)	1	2*)
13 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	0	5	1	3	1	3	3	2	0-1	4	1	3	1	3
14 6,6 mm A Z - Wellplatte	4	5	4	4-3	4	4-3	5	3	3	3	3	3	3	3
15 6,0 mm F Z - Wellplatte	1	5	1-2	4	2-3	3	3	2	1-2	5-4	2	4-3	2	4-3
16 6,7 mm F Z - Wellplatte	1	5	2	4-3	2-3	3	3	3-2	1	4	1-2	3*)	1-2	3*)
17 7,0 mm F Z - Wellplatte	1	5	2	3-2	3	3-2	3-4	2	1	4	1-2	4-3	2	3
18 6,3 mm F Z - Wellplatte	0-1	5	2	3	3	3-2	3-4	3-2	0-1	4	1	4-3	1-2	3
19 7,4 mm A Z - Tafel	0	5	1-2	4-3	2	3	3	2	0-1	4-3	0-1	4	1	4-3
20 7,7 mm A Z - Tafel	0-1	5	1-2	4-3	2-3	3	4	3-2	0-1	4-3	1-2	4-3	1-2	3
21 8,0 mm F Z - Tafel	0-1	5	1-2	3-2	2-3	3-2	2-3	3-2	1	5-4	1	4-3*)	1-2	4-3*)
22 8,0 mm F Z - Tafel	1	5	1-2	3	3	3	4	3	1	4-3	2	4-3*)	2-3	4-3*)

1) Abkreidungsskala nach Kempf: 0 = keine Abkreidung (6 %)

2) Bewertungsstufen DIN 54 001 : 1 = sehr starke farbliche Veränderung

·
·
·
5 = sehr starke Abkreidung (74 %)

·
·
·
5 = keine Veränderung

*) Oberfläche verschmutzt

Tabelle 9

Glanzgradmessung nach DIN 67 530 mit Hilfe eines 60°-pocket gloss-Reflektometers, Fabrikat Mallinckrodt

Lfd.-Nr. Plattenbezeichnung	Glanzgrad nach:													
	Ausgangswerte 0 - Proben		24 Wochen XENOTEST- Bewitterung		48 Wochen XENOTEST- Bewitterung		72 Wochen XENOTEST- Bewitterung		1 Jahr Freibewitterung		2 Jahre Freibewitterung		3 Jahre Freibewitterung	
	Meßwert	Meßwert	Glanzänderung in %	Meßwert	Glanzänderung in %	Meßwert	Glanzänderung in %	Meßwert	Glanzänderung in %	Meßwert	Glanzänderung in %	Meßwert	Glanzänderung in %	
1 4,2 mm A Z - Dachplatte	3,0	0,8	-73,3	0,8	-73,3	0,7	-76,7	2,0	-33,3	1,7	-43,3	1,7	-43,3	
2 4,3 mm F Z - Dachplatte	2,9	0,8	-72,4	1,0	-65,5	0,8	-72,4	1,7	-41,4	1,6	-44,8	1,8	-37,9	
3 4,7 mm F Z - Dachplatte	3,5	0,4	-88,6	0,6	-82,9	0,7	-80,0	2,2	-37,1	1,4	-60,0	1,5	-57,1	
4 3,9 mm A Z - Fassadenplatte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5 4,0 mm A Z - Fassadenplatte	7,5	1,7	-77,3	1,8	-76,0	2,0	-73,3	4,3	-42,7	1,5	-80,0	1,5	-80,0	
6 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7 4,8 mm F Z - Fassadenplatte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8 4,1 mm F Z - Fassadenplatte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	1,3	1,0	-23,1	1,2	-7,7	1,0	-23,1	1,2	-7,7	1,1	-15,4	1,3	0,0	
10 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	2,9	2,5	-13,8	2,0	-31,0	1,2	-58,6	2,0	-31,0	1,0	-65,5	1,3	-55,2	
11 5,4 mm F Z - Fassadenplatte	1,1	0,9	-18,2	0,8	-27,3	0,7	-36,4	0,7	-36,4	0,3	-72,7	0,4	-63,6	
12 4,5 mm F Z - Fassadenplatte	6,1	2,2	-63,9	1,8	-70,5	1,6	-73,8	5,4	-11,5	4,0	-34,4	4,9	-19,7	
13 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	1,0	0,6	-40,0	0,6	-40,0	0,6	-40,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,9	-10,0	
14 6,6 mm A Z - Wellplatte	0,6	0,6	0,0	0,5	-16,7	0,5	-16,7	0,6	0,0	0,6	0,0	0,6	0,0	
15 6,0 mm F Z - Wellplatte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
16 6,7 mm F Z - Wellplatte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
17 7,0 mm F Z - Wellplatte	0,6	0,5	-16,7	0,5	-16,7	0,4	-33,3	0,6	0,0	0,5	-16,7	0,5	-16,7	
18 6,3 mm F Z - Wellplatte	2,1	0,7	-66,7	0,5	-76,2	0,5	-76,2	0,9	-57,1	0,7	-66,7	0,7	-66,7	
19 7,4 mm A Z - Tafel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
20 7,7 mm A Z - Tafel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
21 8,0 mm F Z - Tafel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
22 8,0 mm F Z - Tafel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabelle 10

Vergleichende Prüfungen mit unterschiedlich großen Probekörpern und Stützweiten ¹⁾

Biegefestigkeit σ_{bb} in N/mm² rechtwinklig zur Plattenebene in Anlehnung an DIN 52 362, Blatt 1,
Sichtseite = Zugzone bei der Biegeprüfung,
Probengrößen = 195 mm x 50 mm x Dicke, Stützweiten = (l_s) Proben-Nr. 1 - 13 = 50 mm, Nr. 14 - 18 = 70 mm
und Nr. 19 - 22 = 80 mm
Probengrößen = 300 mm x 50 mm x Dicke, Stützweiten = (l_s) Proben-Nr. 1 - 22 = 200 mm,
Probengrößen = 300 mm x 100 mm x Dicke, Stützweiten = (l_s) Proben-Nr. 1 - 22 = 200 mm.

Lfd.-Nr. Plattenbezeichnung	$l_s = 50, 70 \text{ und } 80 \text{ mm}$		$l_s = 200 \text{ mm, Breite} = 50 \text{ mm}$		$l_s = 200 \text{ mm, Breit} = 100 \text{ mm}$	
	\bar{x} ²⁾	$\pm s$	\bar{x}	$\pm s$	\bar{x}	$\pm s$
1 4,2 mm A Z - Dachplatte	26,1	2,0	33,6	3,2	31,6	3,1
2 4,3 mm F Z - Dachplatte	23,2	1,7	25,0	2,1	27,9	1,3
3 4,7 mm F Z - Dachplatte	18,5	1,2	23,8	1,1	21,2	0,9
4 3,9 mm A Z - Fassadenplatte	23,6	2,7	37,4	2,8	29,0	2,9
5 4,0 mm A Z - Fassadenplatte	30,5	2,0	40,6	2,6	38,2	1,9
6 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	24,2	1,9	29,1	2,5	31,2	2,0
7 4,8 mm F Z - Fassadenplatte	16,6	0,9	23,2	1,3	25,4	0,9
8 4,1 mm F Z - Fassadenplatte	26,7	1,4	30,6	2,3	30,7	2,2
9 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	19,2	1,7	23,0	2,1	24,6	2,5
10 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	24,9	1,1	29,3	2,6	31,8	1,9
11 5,4 mm F Z - Fassadenplatte	13,9	0,5	19,4	1,1	20,2	0,6
12 4,5 mm F Z - Fassadenplatte	19,2	2,5	22,2	1,7	23,0	1,2
13 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	24,3	1,5	20,3	1,0	20,7	1,3
14 6,6 mm A Z - Wellplatte	20,1	1,3	29,8	2,0	25,6	1,5
15 6,0 mm F Z - Wellplatte	15,3	0,7	18,3	1,1	19,8	0,8
16 6,7 mm F Z - Wellplatte	15,7	0,9	19,2	1,4	17,9	0,7
17 7,0 mm F Z - Wellplatte	15,2	0,9	17,4	0,7	18,5	0,7
18 6,3 mm F Z - Wellplatte	14,5	2,2	15,9	0,7	16,2	0,3
19 7,4 mm A Z - Tafel	29,6	2,0	36,0	3,1	34,8	4,8
20 7,7 mm A Z - Tafel	26,8	3,3	34,4	1,1	28,4	2,9
21 8,0 mm F Z - Tafel	22,2	1,0	24,4	1,5	29,0	1,4
22 8,0 mm F Z - Tafel	20,0	1,8	27,1	1,3	23,6	0,4

1) Nach Lagerung im Normklima (20°C/65% rel.Luftfeuchtigkeit)

2) Mathematisch-statistische Kenndaten nach DIN 52 360

Tabelle 11

Vergleichende Prüfungen mit unterschiedlich ausgeformten Probekörpern 1)

Druckfestigkeit σ_{DB} in N/mm² parallel zur Plattenebene
in Anlehnung an DIN 52 376,Probengrößen = 50 mm x 50 mm x Dicke (1 Dicke, 2 Dicken sowie 3 Dicken
miteinander verklebt und die Schmalflächen bündig geschliffen)

Lfd.-Nr. Plattenbezeichnung	1 Dicke frei angelegt		1 Dicke 1/3 eingespannt		2 Dicken verklebt		3 Dicken verklebt	
	\bar{x} 2)	$\pm s$	\bar{x}	$\pm s$	\bar{x}	$\pm s$	\bar{x}	$\pm s$
1 4,2 mm A Z - Dachplatte	42,3	13,0	101,3	27,2	99,8	11,5	106,5	7,4
2 4,3 mm F Z - Dachplatte	41,8	9,9	66,9	15,5	74,4	5,5	77,8	4,4
3 4,7 mm F Z - Dachplatte	56,5	11,6	85,7	9,0	73,0	8,5	86,4	7,1
4 3,9 mm A Z - Fassadenplatte	64,1	6,7	81,3	14,2	90,7	23,3	87,9	9,7
5 4,0 mm A Z - Fassadenplatte	49,5	5,9	94,2	4,5	77,0	13,8	96,3	4,5
6 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	49,0	8,1	67,5	21,7	78,3	8,9	82,4	6,4
7 4,8 mm F Z - Fassadenplatte	33,7	1,6	54,2	13,5	53,4	9,3	54,3	9,0
8 4,1 mm F Z - Fassadenplatte	59,9	8,4	85,7	12,4	64,3	11,6	69,3	7,4
9 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	49,7	10,4	53,4	9,3	50,8	15,5	59,6	8,7
10 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	48,7	5,3	55,7	14,1	64,4	15,3	69,0	4,6
11 5,4 mm F Z - Fassadenplatte	26,4	2,6	57,0	6,1	56,6	12,3	50,6	6,8
12 4,5 mm F Z - Fassadenplatte	35,7	5,4	53,6	15,1	54,0	4,9	44,2	5,0
13 4,2 mm F Z - Fassadenplatte	33,0	6,5	56,2	14,2	57,4	6,6	63,1	13,6
14 6,6 mm A Z - Wellplatte	41,5	7,0	70,5	9,9	71,9	4,0	59,2	12,9
15 6,0 mm F Z - Wellplatte	31,7	4,3	54,4	6,7	51,2	11,5	47,6	8,1
16 6,7 mm F Z - Wellplatte	40,9	6,4	47,2	8,5	42,3	6,1	55,6	5,1
17 7,0 mm F Z - Wellplatte	41,1	5,9	64,6	11,4	57,8	8,6	36,4	13,5
18 6,3 mm F Z - Wellplatte	25,6	6,7	48,4	11,5	51,1	6,6	42,9	8,8
19 7,4 mm A Z - Tafel	76,6	9,6	112,4	10,3	105,4	25,0	101,0	7,0
20 7,7 mm A Z - Tafel	83,7	7,7	108,6	6,3	109,5	8,1	103,9	6,7
21 8,0 mm F Z - Tafel	80,5	13,8	81,2	21,5	79,0	11,4	76,9	10,9
22 8,0 mm F Z - Tafel	42,7	8,0	72,8	3,9	58,9	6,1	62,1	5,1

1) Nach Lagerung im Normklima (20°C/65% rel. Luftfeuchtigkeit)

2) Mathematisch-statistische Kenndaten nach DIN 52 360

IV Zusammenfassung

Dr.-Ing. Jügen Hundt

Die in den beiden Berichtsteilen II und III dargestellten Ergebnisse sind innerhalb der Fachgruppe 2.1 "Mineralische Baustoffe" bzw. des Referats 5.01 "Technologie der Holzwerkstoffe" der Bundesanstalt erarbeitet worden. Trotz unterschiedlicher Betrachtungsweise und Zielvorgabe hat das Vorhaben zu Ergebnissen geführt, die eine gemeinsame Schlußfolgerung zulassen und es rechtfertigen, für die Prüfung von Faserzement-Produkten aus einem laufenden Produktionsprozeß, eine Philosophie vorzuschlagen. Ziel dieser Philosophie ist die Beurteilung der Dauerhaftigkeit, als deren bestimmende Parameter der Widerstand gegen Frost-Tau-Beanspruchung sowie die Langzeitbeständigkeit der Faserstoffe in der Zementsteinmatrix angesehen werden.

Nachzutragen ist, daß in beiden Vorhabenteilen zunächst dieselben Materialien zu den Untersuchungen herangezogen worden sind, daß jedoch aufgrund von Ergänzungen sowie zwischenzeitlich gewonnenen Erkenntnissen weitere Materialien in die Versuchsprogramme aufgenommen werden mußten (vgl. z. B. Teil II: "Sonderuntersuchungen"), für die es im entsprechenden anderen Vorhabenteil dann jeweils kein unmittelbar vergleichbares Gegenstück gibt. In der nachfolgenden Tabelle sind die jeweils übereinstimmenden Materialien sowie die zugehörige Benennung aufgeführt.

Material	Bezeichnung	
	Teil II (Fachgruppe 2.1)	Teil III (Referat 5.01)
Asbestzement, gepreßt	MG 03 A	1fd. Nr. 4 u. 5
Faserzement, ungepreßt	L0 02 F	Nr. 7 u. 11
	S0 04 F	Nr. 18
Faserzement, gepreßt	KG 03 F	Nr. 6 u. 10
	MG 03 F	Nr. 21
	SG 02 F	Nr. 13

Auch wenn in einigen Fällen das Verhalten bestimmter Materialien (z. B. der ungepreßten Faserzement-Platte L002 F in Vorhabenteil II) mit den übrigen nicht konform war, kann offenbar insgesamt von den Faserzementen bzw. den Asbestzementen-

ten gesprochen werden. Dies umso mehr, als negative Erfahrungen die betroffenen Firmen zur Weiterentwicklung bzw. Änderung der Technologie veranlaßt haben. Unabhängig davon sind zumindest herstellungstechnisch weitere, hier nicht erfaßte Fortschritte erzielt worden.

Hinsichtlich der für die Gebrauchstauglichkeit der Faserzement-Produkte maßgeblichen Eigenschaften kann folgendes zusammengefaßt werden:

Wie in Teil II dargestellt, galt das Hauptaugenmerk dem Einfluß von Be- und Entfeuchtungsvorgängen sowie der Frost-Tau-Beanspruchung auf die Eigenschaften der Faserzemente. Mit Hilfe des vorgeschlagenen Verfahrens, das als Prüfkriterium die Veränderung der Querkzugfestigkeit benutzt, kann die Sensibilität von Faserzementen gegenüber der Witterungsbeanspruchung anhand von Prüfwerten beurteilt werden. Demgegenüber wurden in dem anderen Vorhabenteil (vgl. Teil III) die Veränderungen im "zeitraffenden" Kurzzeitbewitterungsverfahren (XENOTEST 1200) denen unter Freilandbewitterung im Berliner Klima gegenübergestellt, um so auf die zu erwartende Oberflächenverwitterung und das Langzeitverhalten des Faserzementes schließen zu können. Hierbei stellen die zahlreichen Trocken/Naß-Wechsel (24 Wochen entsprechen insgesamt 126 Wechseln) in Verbindung mit der erreichten Temperatur (Schwarztafel-Temperatur bei UV-IR-Bestrahlung von 60 °C) vor allem auch eine Beanspruchung der Faserstoffe bezüglich möglicher Oxidations- und Hydrolysevorgänge dar. Veränderungen der Fasern sowie damit zusammenhängende Beeinträchtigungen des Verbundes mit der Zementsteinmatrix hätten sich insbesondere in einer Verminderung der Biegezugfestigkeit bei allen Materialien niederschlagen müssen. Dies läßt sich jedoch allgemein aus der Entwicklung der Festigkeitswerte nach Kurzzeitbewitterung nicht ableiten (Ausnahme Material Nr. 7 entsprechend L002 F). Die nach Kurzbewitterung nachgewiesenen Festigkeiten korrelieren mit denen der Freilandbewitterung. Das gilt nicht für das Abwitterungsverhalten der beschichteten und unbeschichteten Oberflächen, die nach 3 Jahren Freilandbewitterung offenbar (erfahrungsgemäß etwa 12 Wochen XENOTEST-Bewitterung entsprechen) weniger stark abgewittert sind als nach 72 Wochen Kurzbewitterung.

Unter natürlichen Alterungsbedingungen treten durch Nacherhärtungsvorgänge (nicht bei autoklavierten Materialien), durch Carbonatisierung sowie durch Stofftransport Gefüge- bzw. Porenraumveränderungen im Zementstein auf. Diese wirken sich der Tendenz nach insgesamt günstig aus, so daß auch nach langfristiger Witterungsbeanspruchung die Festigkeitseigenschaften im wesentlichen nicht beeinträchtigt werden. Dabei kann aber von "Nacherhärtungsgewinnen", wie sie z. B. beim Asbestzement für die Biegezugfestigkeit auftreten, nicht ausgegangen werden. Andererseits sind bei Faserzementen, die

gegenüber Witterungseinflüssen empfindlich sind, Festigkeitseinbußen auch nicht auszuschließen. Diese werden aber in erster Linie die Querkzugfestigkeit betreffen, die den Lagenverbund kennzeichnende Eigenschaft.

Die Carbonatisierung führt zur "Versprödung" der Zementsteinmatrix, so daß der Elastizitätsmodul des gealterten Materials - ähnlich dem Asbestzement - höher als der des jungen Materials liegt. Mit der Änderung der Porenstruktur sinkt die Bereitschaft des Materials, Wasser aufzunehmen, was wiederum von günstigem Einfluß auf den Widerstand gegen Witterungsbeanspruchung ist.

Auch die vergleichsweise großen Formänderungswerte werden durch Alterungsvorgänge vermindert. Die Ergebnisse der in Teil III beschriebenen Dauerstandsversuche entsprechen insoweit den Erwartungen.

Der Einfluß von Luftschadstoffen auf das Langzeitverhalten ist in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht worden. Bezüglich der hier in erster Linie maßgebenden Oberflächeneffekte kann zumindest qualitativ aus den langjährigen Erfahrungen mit Asbestzementen extrapoliert werden.

Insgesamt liegen demnach die für die Tragfähigkeit maßgebenden Eigenschaften der Faserzemente unterhalb der von Asbestzementen erreichbaren. Die für die Dauerhaftigkeit maßgebenden Kriterien, nämlich die Beständigkeit der Faserstoffe in der Zementsteinmatrix sowie der Widerstand gegenüber Witterungsbeanspruchung können aber auch erfüllt werden, soweit sich das mit dem zur Verfügung stehenden Wissen und anhand der hier vorliegenden Ergebnisse beurteilen läßt. Hinsichtlich des zukünftigen prüftechnischen Vorgehens wird vorgeschlagen, an "unbekannten" Faserzementen

- die Beständigkeit der Faserstoffe gegenüber möglichen Oxidations- und Hydrolysevorgängen durch Wärme- und Feuchtlagerung ggf. auch durch Trocken/Naß-Wechsel mit Trocknungstemperaturen zwischen 60 bis maximal 80 °C zu untersuchen
- die Widerstandsfähigkeit gegenüber Witterungseinflüssen mit Hilfe des in Teil II beschriebenen Verfahrens zu beurteilen, das als Prüfkriterium die Veränderung der Festigkeitseigenschaften, insbesondere der Querkzugfestigkeit, durch Be- und Entfeuchtungszyklen sowie durch Frost-Tau-Beanspruchung verwendet.

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

- Nr. 1/September 1968
Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft
- Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)
Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern
von Dr.-Ing. Götz Andraee
- Nr. 3/September 1970 (vergriffen)
Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungseilen als Beispiel für Verbundbauteile
von Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)
Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren
von Dr. rer. nat. Arno Burmester
- Nr. 5/März 1971
Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner
- Nr. 6/April 1971
Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider
- Nr. 7/Juli 1971
Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz
- Nr. 8/November 1971
Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Helmut Veith
- Nr. 9/November 1971
Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller
- Nr. 10/Januar 1972
Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin
- Nr. 11/Februar 1972
Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause
- Nr. 12/Mai 1972
Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg
- Nr. 13/Juni 1972
Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer
- Nr. 14/Juli 1972
Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz
von Eberhard Fischer
- Nr. 15/August 1972
Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl
- Nr. 16/August 1972
Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch
- Nr. 17/August 1972
Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen
von Dr.-Ing. Peter Reimers
- Nr. 18/Januar 1973
Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 19/Januar 1973
Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos
- Nr. 20/April 1973
Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi
- Nr. 21/Juli 1973
Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig
- Nr. 22/Juli 1973
Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch
- Nr. 23/November 1973
Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske
- Nr. 24/November 1973
Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung
von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi
- Nr. 25/Dezember 1973
Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen
von Dr.-Ing. E. Knublauch
- Nr. 26/August 1974
Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —
von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise
- Nr. 27/August 1974
Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg
- Nr. 28/August 1974
Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern
von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich
- Nr. 29/August 1974
Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall
von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider
- Nr. 30/September 1974 (vergriffen)
The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology
von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon
- Nr. 31/August 1975
Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung
von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann
- Nr. 32/September 1975
Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen
von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher
- Nr. 33/November 1975
Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens
von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)
Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen
von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe
- Nr. 35/Januar 1976
Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger
- Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)
Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt
- Nr. 37/Februar 1976
Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 38/Juni 1976
Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 39/Juni 1976
Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung
von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf
- Nr. 40/Juni 1976
Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren
von Dr. rer. nat. H. Hantsche
- Nr. 41/Oktober 1976
Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten
von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher
- Nr. 42/Oktober 1976
Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft
von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 43/Oktober 1976
Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 44/November 1976
Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“
von Dipl.-Ing. W. Matthees
- Nr. 45/Dezember 1976
Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
von Dr.-Ing. W. Paatsch
- Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)
Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler
- Nr. 47/Juni 1977
Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
von Dr.-Ing. Arno Plank
- Nr. 48/Oktober 1977
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
von Dr.-Ing. U. Holzöhner
- Nr. 49/Dezember 1977
Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
von Dr.-Ing. Günther Wittig
- Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)
Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andraee und Dipl.-Ing. Winfried Markowski
- Nr. 51/Juni 1978
Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld
- Nr. 52/August 1978
Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov
- Nr. 53/Oktober 1978
Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi

- Nr. 54/Okttober 1978
Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander
- Nr. 55/November 1978
Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke
- Nr. 56/Januar 1979
Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie
- Nr. 57/März 1979
Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus
- Nr. 58/März 1979
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 59/Juli 1979
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
von Dr.-Ing. Günther Plauk
- Nr. 60/August 1979
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs
- Nr. 61/Dezember 1979
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
von Dr. Klaus Richter
- Nr. 62/Dezember 1979
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker
- Nr. 63/Dezember 1979
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig
- Nr. 64/Februar 1980
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 65/Februar 1980
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 66/Mai 1980
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig
- Nr. 67/Mai 1980
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees
- Nr. 68/Mai 1980
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.
Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisionsgoniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn
- Nr. 69/Juni 1980
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitsbehältern (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl
- Nr. 70/August 1980 (vergriffen)
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
von Dr.-Ing. Gerald Schickert
- Nr. 71/August 1980
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 72/September 1980
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 73/November 1980
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
von Dipl.-Ing. Peter Wegener
- Nr. 74/November 1980
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dipl.-Inform. Renate Müller
- Nr. 75/November 1980
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich
- Nr. 76/November 1980
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig
- Nr. 77/April 1981
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch
- Nr. 78/September 1981
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Swellensystems mit dem Untergrund
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 79/Dezember 1981
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kaltbrüchigkeit höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
von Dr.-Ing. Volker Neumann
- Nr. 80/Dezember 1981
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch
- Nr. 81/Dezember 1981
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt
- Nr. 82/April 1982
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworuski
- Nr. 83/Juli 1982
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen — Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle
- Nr. 84/Juli 1982
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/Okttober 1982
Technische Materialforschung und -prüfung — Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ —
Materials Research and Testing — Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme „Basic Technological Research“ —
von Prof. Dr. Horst Czichos
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/November 1982
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügekernkmale
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/Dezember 1982
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/Februar 1983
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Anton Erhard
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/April 1983
Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/April 1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/April 1983
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/August 1983
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/August 1983
Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
von Dr. rer. nat. Peter Studt
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/August 1983
Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/August 1983
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
von Dr.-Ing. Manfred Römer
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/Okttober 1983
Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Heinz Eifler
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/November 1983
Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
von Dipl.-Ing. Gerhard Fuhrmann und Prof. Dr. rer. nat. Wolfram Schwarz
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/Dezember 1983
Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren — Stretch- und Erholungsvermögen —
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/Dezember 1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/Januar 1984
Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/Februar 1984
Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie
von Dr.-Ing. Peter Reimers, Dr. rer. nat. Jürgen Goebels, Dr.-Ing. Heinrich Heide, Dr.-Ing. Hans-Peter Weise und Dipl.-Phys. Kay Wilding
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/März 1984
Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton
von Dr.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/März 1984
Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
von Dr.-Ing. Dierk Schnitger
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/April 1984
Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
von Dr.-Ing. Michael Gierloff
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/Juni 1984
Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
von Dr.-Ing. Bernd Schulz-Forberg
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/Okttober 1984
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
von Dr.-Ing. Jan Lehnert

- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/Okttober 1984
Korrosion von Stahlradiatoren
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel und Jörg Ehreke
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/Okttober 1984
Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/Februar 1985
Zur Wirkung der Schruppbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Sprödbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N
von Dr.-Ing. Mohamed Omar
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/Februar 1985
Wasserstoff als Energieträger
von Dr. Hermann Walde (Mitglied des Kuratoriums der BAM i. R.) und Dr. Bernhard Kropp
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/Februar 1985
Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Anhydrid-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte
von Dr.-Ing. Kurt Ziegler
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/Juli 1985
Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen
von Dr.-Ing. Wolfgang Lütow
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/Juli 1985
Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen
von Rolf Helms, Horst Henke, Gerhard Oelrich (BAM, Berlin) und Tetsuya Saito (NRIM, Japan)
- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/Juli 1985
Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen
von Dipl.-Ing. Peter Rose, Dipl.-Ing. Peter Raabe, Dipl.-Ing. Werner Daum und Andreas Szameit
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/Juli 1985
Farbempfindungsmerkmal Elementaruntun und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld
von Privatdozent Dr. Klaus Richter
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/Okttober 1985
Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik
von Dr. rer. nat. Franz-Josef Kasper, Dipl.-Inform. Renate Müller, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Armin Wagner
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/Okttober 1985
Materials Technologies and Techno-Economic Development
A study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)
by Prof. Dr. H. Czichos in cooperation with Dr. G. Sievers, Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/Okttober 1985
Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung
Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Dipl.-Ing. Hilmar Andre, Dr. rer. nat. Eduard Blossfeld, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Ing. grad. Matthias-Michael Zindler
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/November 1985
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I
von Dipl.-Ing. Jürgen Herter, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Ernst Limberger
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/April 1986
Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung
von Dr.-Ing. Andreas Hecht
- Nr. 121/ISBN 3-88 314-530-0/Juni 1986
Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung
von Dr.-Ing. Paul Feinle und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 122/ISBN 3-88 314-521-1/Juli 1986
Entsorgung kerntechnischer Anlagen
von J. Mischke
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste
- Nr. 123/ISBN 3-88 314-531-9/Juli 1986
Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organischer Baustoffe entstehenden Brandgase
von Dr. rer. nat. Detlef Rennoch
- Nr. 124/ISBN 3-88 314-538-6/Juli 1986
Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung
von Dr.-Ing. Hans-Martin Thomas
- Nr. 125/ISBN 3-88 314-540-8/Juli 1986 (vergriffen)
Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks
von Dr.-Ing. Bernhard Droste und Dipl.-Ing. Ulrich Probst
- Nr. 126/ISBN 3-88 314-547-5/August 1986
Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 127/ISBN 3-88 314-564-5/November 1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 128/ISBN 3-88 314-568-8/November 1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 129/ISBN 3-88 314-569-6/November 1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates
von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 130/ISBN 3-88 314-570-X/November 1986
Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 131/ISBN 3-88 314-585-8/November 1986
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 132/ISBN 3-88 314-595-5/Januar 1987
Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen
von Dipl.-Ing. Christian Herold und Dipl.-Ing. Frank-Ulrich Vogdt
- Nr. 133/ISBN 3-88 314-609-9/Januar 1987 (vergriffen)
Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe
von Dipl.-Ing. Mathias Woydt und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 134/ISBN 3-88 314-615-3/Februar 1987
Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen
von Dr. Götze Andreae und Gottfried Niessen
- Nr. 135/ISBN 3-88 314-618-8/Februar 1987
Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen
von Dipl.-Ing. Jörg Ludwig, Dipl.-Ing. Wolf-Dietrich Mischke und Dipl.-Ing. Armin Ulrich
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/April 1987
Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau
von Prof. Dr. rer. silv. Hans-Joachim Deppe und Klaus Schmidt
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/Mai 1987
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der Komponentensicherheit
Projektleiter: Dr. Dietmar Aurich
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/Mai 1987
Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben.
von Dipl.-Geol. Michael Dogunke und Dr.-Ing. Frank Buchardt
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/Juni 1987
Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle.
von Dipl.-Ing. Jürgen Olschewski und Sven-Peter Scholz
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/Juni 1987
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/Okttober 1987
Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken
von Dr.-Ing. Frank Buchardt, Dr.-Ing. Wolfgang Matthees, Dr.-Ing. Götz Magiera und Dr.-Ing. Friedrich Mathiak
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/Okttober 1987
Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefährzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Ing. Günter Krüger, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Dr. rer. nat. Sigrid von Zahn-Ullmann
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/November 1987
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung
Experimental and numerical investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load
von/by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/November 1987
Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes
von Dr.-Ing. Frank Buchardt, Dr.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Wolfgang Matthees, Dr.-Ing. Michael Weber, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Dr.-Ing. Jürgen Altes,
Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/November 1987
Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden
von Dr.-Ing. Ulrich Holzlhöner
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/November 1987
Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks
von Dipl.-Ing. Wolfgang Schön und Dipl.-Ing. Michael Mallon
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/Dezember 1987
Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen
von Dipl.-Ing. Hans-Dieter Kleinschrodt
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/Mai 1988
Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand
von Dipl.-Ing. Wilfried Müller
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/Mai 1988
Bestimmung baugrunderdynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben
von Dr.-Ing. Ulrich Holzlhöner

- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/Mai 1988
VG3D Zeichenprogramm für die Vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen
 von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/Juni 1988
Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen
 von Dipl.-Ing. Lutz Auersch-Saworski
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/Juli 1988
Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn
 von Dr.-Ing. Günther Plauk, Dipl.-Ing. Günter Kretschmann, Dipl.-Ing. Rolf-G. Rohrman
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/Juli 1988
Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung
 von Dr.-Ing. Harro Sander, Professor Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/Okttober 1988
Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie
 von Dr. rer. nat. Konrad Breitreutz, Dr. rer. nat. Rüdiger Uttech, Dr.-Ing. Kurt Haedecke
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/Okttober 1988
Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrerschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental
 von Dr.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/April 1989
Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen
 von Dr.-Ing. Günter Klamrowski, Dipl.-Ing. Paul Neustupny, Prof. Dr. habil. Hans-Joachim Deppe, Ing. Klaus Schmidt und Dr.-Ing. Jürgen Hundt
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/April 1989
Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung
 von Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dr.-Ing. Klaus Brandes
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/April 1989
Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung — Literaturübersicht —
 von Dr.-Ing. Rolf Wäsche und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/Mai 1989
Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6
 von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi