

# Faserzement: Materialwissenschaftliche Problemstellungen

Autor(en): **Partl, Manfred**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **105 (1987)**

Heft 44

PDF erstellt am: **18.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-76740>

## Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Faserzement

## Materialwissenschaftliche Problemstellungen

Überarbeitete Fassung eines Referates des Verfassers anlässlich des ETH-Kolloquiums für Materialwissenschaften vom 21. Jan. 1987 (Prof. Dr. A. Rösl)

Von Manfred Partl, Niederurnen

Praxisbezogene Beispiele sollen im folgenden einen kurzen Überblick über materialwissenschaftliche Problemstellungen und Lösungsansätze an Eternitfaserzement vermitteln. Ausgehend vom Produktionsprozess und einigen typischen Unterschieden zwischen Asbestzement und asbestfreiem Faserzement nach neuer Technologie wird speziell die produktbegleitende Rolle der Werkstoffwissenschaften behandelt. Das Hauptgewicht liegt daher weniger auf der detaillierten theoretischen Diskussion der einzelnen Problemstellung als auf der phänomenologischen Darlegung der Vielschichtigkeit der Aufgaben, die mit dem Werkstoff Faserzement verbunden sind.

### Einleitung

Die systematische Erforschung und Beherrschung der Werkstoffeigenschaften der Produkte bildet für ein modernes Unternehmen der Baustoffindustrie eine selbstverständliche Voraussetzung, um auf die heutige technische, konjunkturelle und ökologische Dynamik im internationalen Umfeld mit zielbewusster Entschlossenheit und Flexibilität angemessen reagieren zu können. Sie liefert nicht nur Erkenntnisse für die stetige Optimierung der Produkte bei gleichzeitiger Realisierung von Neuentwicklungen, sondern auch Informationen für die sachkundige Beratung und Unterstützung des Anwenders sowie Grundlagen für den fachlichen, fruchtbaren Kontakt mit öffentlichen und privaten Institutionen und Prüfanstalten.

Allerdings stellt gerade bei Faserzement eine umfassende materialwissenschaftliche Analyse, Modellierung und Prognostizierung des Stoffverhaltens in theoretischer und experimenteller Hinsicht eine recht anspruchsvolle und umfangreiche Aufgabe dar, die geprägt ist durch das Auftreten von Geschichts- und Alterungseffekten, die Abhängigkeit von Klima- und Umwelteinflüssen,

den grossen strukturellen Variationspielraum des Materials sowie den häufig mit anisotropen Eigenschaften gekoppelten Kompositcharakter dieser Werkstoffgruppe.

Hinzu kommt, dass es sich bei Faserzement – abgesehen von dem wohl verbreitetsten Vertreter, dem klassischen Asbestzement – um einen noch recht jungen Baustoff handelt, dem vom materialwissenschaftlichen Standpunkt aus allgemein in der Grundlagenforschung von Hochschulen usw. im Vergleich zu anderen Baustoffen, wie Stahl, aber auch faserverstärkten Kunststoffen, noch relativ wenig Aufmerksamkeit beigemessen wird.

Die direkt involvierte Industrie sieht sich daher mit der Aufgabe konfrontiert, parallel zu ihren eigenen Produktentwicklungsanstrengungen unter dem Zeitdruck wirtschaftlicher und marktpolitischer Zwänge zumindest einen guten Teil des allgemeinen wissenschaftlichen Forschungsrückstandes durch eigene Grundlagenforschung aufzuarbeiten, um letztlich technische Anforderungen erfüllen zu können, die sich zwangsläufig am Stand anderer, möglicherweise besser bekannter Werkstoffe orientieren.

Dies trifft in besonderem Masse auch

für die traditionelle asbestverarbeitende Faserzementindustrie zu, die sich aber bekanntlich noch zusätzlich der Notwendigkeit gegenüberstellt, den technisch in vieler Hinsicht hervorragenden und praxisbewährten Baustoff Asbestzement aus gesundheits- und marktpolitischen Erfordernissen konzeptionell völlig zu überarbeiten und unter Beibehaltung oder Verbesserung seiner technischen Vorzüge in klar umrissenen Zeitlimiten eine neue, asbestfreie Faserzementlösung zu entwickeln [1]. Für die schweizerische Eternit-Gruppe wird die massgebende Zeitlimite im wesentlichen durch das sogenannte Branchenabkommen zwischen Regierung und Industrie in Deutschland gesetzt, welches bei Hochbauprodukten den vollständigen Asbestersatz bereits bis 1990 vorsieht. In der Schweiz ist die Umstellung in Absprache mit dem Bundesamt für Umweltschutz ebenfalls auf diesen Zeitpunkt geplant, jedoch auf freiwilliger Basis. Wichtige Schritte auf diesem Wege sind aber schon heute zurückgelegt.

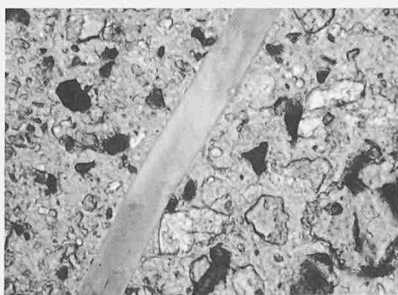
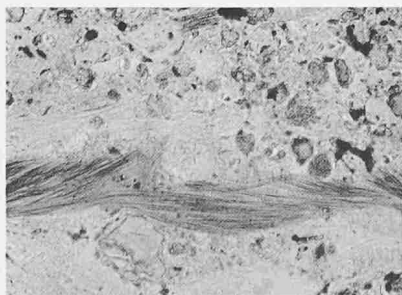
### Produktionsprozess

Der Produktionsprozess beruht im Prinzip auf einem vom Österreicher Ludwig Hatschek am 30.3.1900 zum Patent angemeldeten Verfahren, das die Herstellung von Platten aus einer dünnflüssigen Faserzementsuspension mittels einer Pappmaschine vorsah. Zunächst wird aus Zement, Wasser, Kurzfasern von einigen mm Länge und anderen Zusätzen eine dünnflüssige Aufschlämmung erzeugt, die nach verschiedenen Misch- und Rührvorgängen in drei hintereinander liegende sogenannte Stoffkästen eingeleitet wird. Darin befindet sich je ein Siebzylinder. Ein Transportfilz wird nun mittels sogenannter Gautschwalzen in stetem Kontakt über diese Siebzylinder hinweggeführt und nimmt dabei die dünne Faserzementschicht mit, welche sich während der Rotation durch die Potentialdifferenz zwischen Aussen- und Innenseite auf der auftauchenden Mantelfläche des Siebzylinders gebildet hat. Dabei findet im allgemeinen eine gewisse Orientierung der Fasern statt, die z.B. durch Variation der Strömungsverhältnisse, der Konsistenz und Rota-

Bild 1. Mikroschliffe von Faserzement (Bild diagonale etwa 200 µm);

a) Asbestzement,

b) Faserzement mit Kunststoffaserverstärkung



tionsgeschwindigkeit beeinflusst und gesteuert werden kann. Durch die Serrichtung der Siebzylinder entsteht auf diese Weise auf dem Transportfilz ein dreilagiges, mehrere Zehntelmillimeter dickes Vlies. Dieses wird nach Durchlaufen verschiedener weiterer Stufen, wie z.B. Vakuumsaugkästen zur Entwässerung, auf einer sogenannten Formatwalze aufgewickelt und leicht vorgepresst. Bei Erreichen der gewünschten Dicke wird im Falle der Plattenherstellung die so entstandene mehrlagige Faserzementschicht an der Formatwalze aufgeschnitten und über Transportbänder zur weiteren Bearbeitung, wie z.B. Pressen, weitergeleitet.

Im Gegensatz zum klassischen Herstellungsprozess von Asbestzement sind bei den Produkten der neuen asbestfreien Technologie für die Verarbeitung aus physikalischen und elektrochemischen Gründen zusätzlich noch Flockungsmittel erforderlich, welche die Affinität zwischen Fasern und Zement in der Suspension erhöhen und somit eine einwandfreie Vliesbildung im Hutschek-Prozess erst ermöglichen.

## Material und Struktur

Bei der Konzeptionierung neuer asbestfreier Faserzementkonfigurationen kam der Faserevaluation eine zentrale Rolle zu. Dabei wurden in mehrjähri-

| Fasern         | Beispiel                 | Durchm. [µm] | Länge [mm] | Dichte [kg/m³] | E-Modul [kN/mm²] | σ-Zug [N/mm²] | ε-Max [%] | spezielle Probleme                |
|----------------|--------------------------|--------------|------------|----------------|------------------|---------------|-----------|-----------------------------------|
| Natürlich      |                          |              |            |                |                  |               |           |                                   |
| - Anorganisch: | Chrysotil (Weiss-Asbest) | 0,02-30      | <40        | 2600           | 160              | 3600          | 2-3       | Gesundheitsrisiko                 |
| - Organisch:   | Zellstoff                | 7-500        | <1200      | 1500           | 15-30            | 300-800       | 3         | Alkalibeständigk., Quellverhalten |
| Synthetisch    |                          |              |            |                |                  |               |           |                                   |
| - Anorganisch: | Glas                     | 10-50        | belieb.    | 2500           | 70               | 1000-3500     | 2-5       | Alkalibeständigk., Sprödigkeit    |
|                | Stahl                    | 2-500        | belieb.    | 7900           | 200              | 500-3800      | 1-2       | Beständigkeit                     |
|                | Carbon                   | 8-15         | belieb.    | 1900           | <500             | 2000-3000     | <1        | Haftung, Sprödigkeit              |
| - Organisch:   | Polyvinyl-Alkohol (PVA)  | 14           | belieb.    | 1300           | 30               | 1600          | 6         |                                   |
|                | Polyacryl-Nitril (PAN)   | 19           | belieb.    | 1180           | 18               | 850           | 9         |                                   |

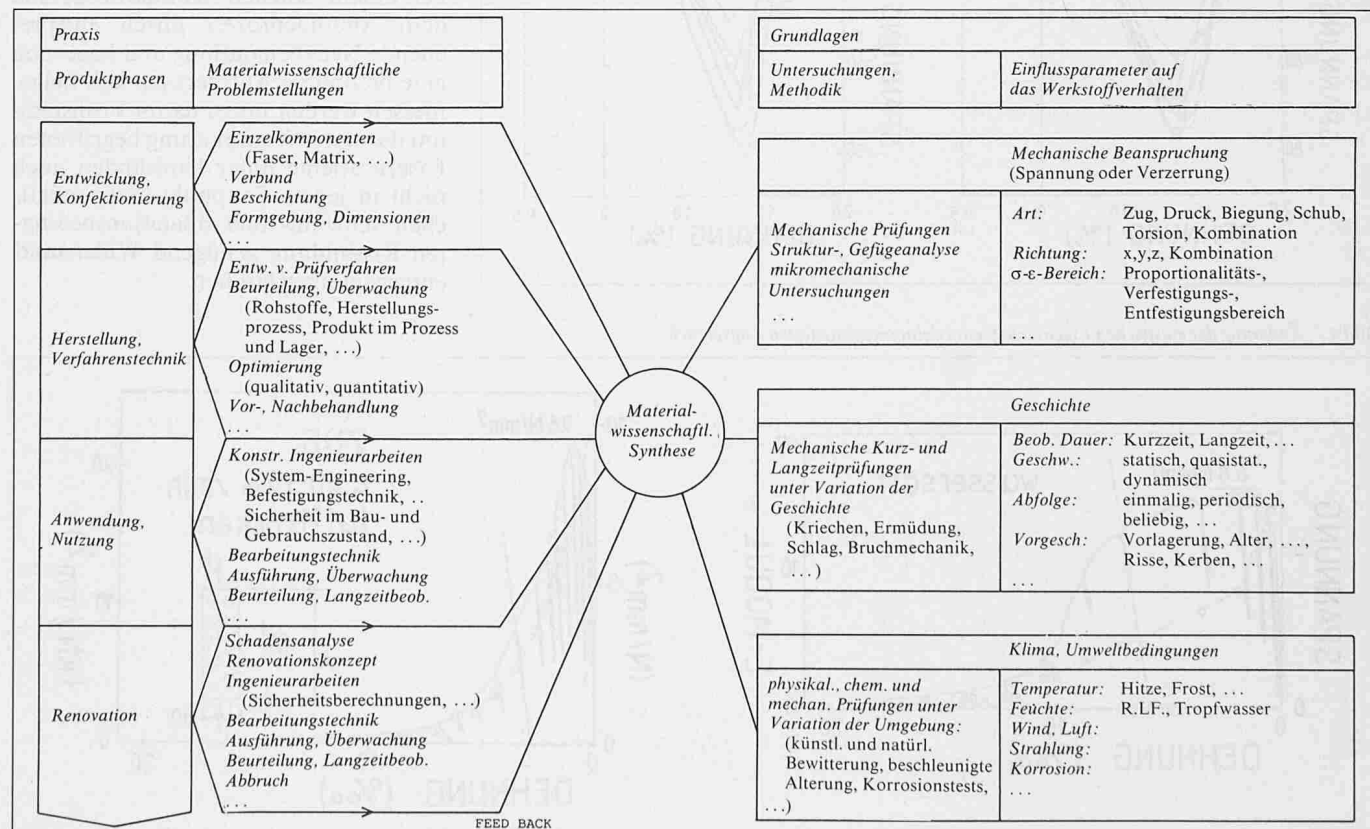
Tabelle 1. Beispiele anorganischer und organischer Natur- und Synthesefasern

gen Anstrengungen durch ein eigenes Team von Faserspezialisten wahrscheinlich sämtliche ausreichend verfügbaren und in wirtschaftlich-technischer Hinsicht möglicherweise geeigneten Varianten untersucht.

Wie eine kleine Auswahl charakteristischer anorganischer und organischer Natur- und Synthesefasern zeigt (Tabelle 1), sind heute auf den ersten Blick zwar verschiedene nicht lungengängige Alternativfasern zu Asbest mit zumindest teilweise durchaus vergleichbaren

mechanischen Eigenschaften verfügbar, doch liegt die Hauptproblematik in der produktionsspezifischen Anwendung und im dauerhaften Zusammenwirken zwischen Faser und Zement im Komposit. Probleme bilden in vielen Fällen namentlich die Haftung der Kurzfasern in der Zementmatrix, die Alkaliresistenz sowie die Beständigkeit der Fasern an der Produktoberfläche gegenüber anderen korrosiven Einwirkungen, die Sprödigkeit, das Quellverhalten usw. In den heutigen asbestfreien Produkten finden sich aus diesen

Tabelle 2. Beispiele der produktbegleitenden Rolle der Materialwissenschaften



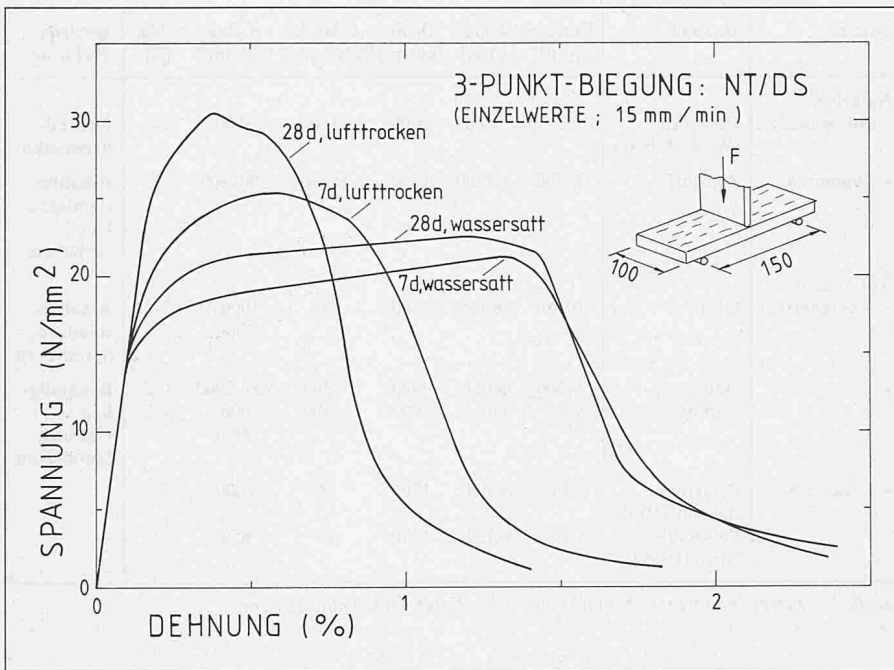


Bild 2. Spannungs-Dehnungs-Verhalten eines asbestfreien Faserzementes unter 3-Punkt-Biegung (wegge-steuert)

Bild 3. Spannungs-Dehnungs-Verhalten eines asbestfreien Faserzementes unter Zug und Druck (lastgesteuert, lufttrockener Zustand)

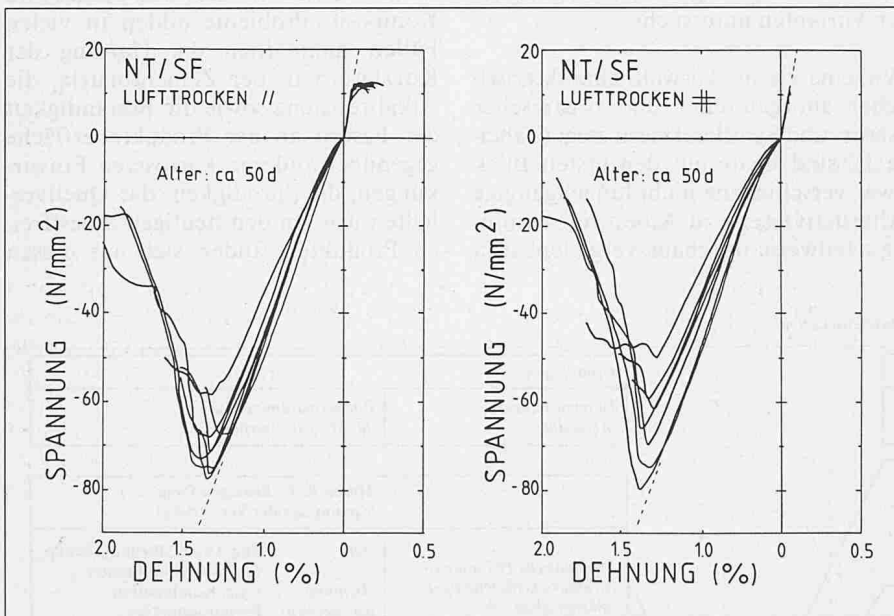
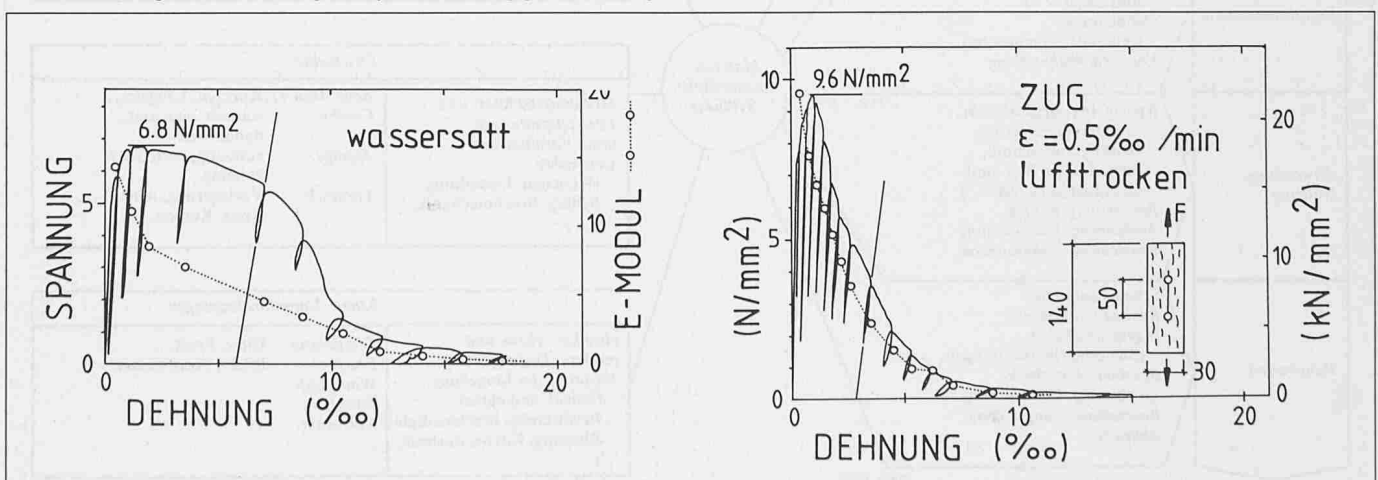


Bild 4. Änderung der elastischen Eigenschaften im dehnungsgesteuerten Zugversuch



Gründen ganz spezielle Polyvinylalkohol- und Polyacrylnitril-Hochmodulfasern, die in Zusammenarbeit mit der Faserindustrie für die konkrete Aufgabe entwickelt wurden [2].

Der Vergleich zwischen einem Dünnschliff einer Asbestzement- und einer asbestfreien Faserzementmatrix verdeutlicht die prinzipiellen Unterschiede zwischen konventioneller und neuer Technologie. Die Bild diagonale beträgt etwa 200  $\mu\text{m}$ . Während sich im Falle von Asbestzement (Bild 1a) ein nahezu idealer Feinstverbund zwischen den abgebildeten Chrysotilfaserbüscheln und der Matrix einstellt, kann bei den neuen Formulierungen (Bild 1b) kaum mehr von einer Mikroverzahnung zwischen den doch recht groben, oberflächlich nur wenig strukturierten Fasern und der Matrix gesprochen werden. Die Kraftübertragung muss hier vollständig über den chemisch-physikalischen Kontakt im Interface von Faser und Matrix erfolgen. Der Mechanismus dieser Kraftübertragung verleiht den heutigen asbestfreien Produkten trotz relativ hoher Steifigkeit der stengeligen Einzelfasern gerade im jungen Zustand eine erhöhte Plastizität, welche Formgebung und Verarbeitung begünstigt. Im Laufe des Abbindeprozesses und der Alterung führt die zunehmende Verankerung der Fasern dann zu einem asbestzementähnlichen steiferen und spröderen Verhalten des Komposits, bei welchem die Armierungswirkung der Fasern deutlich zum Tragen kommt. Es ist leicht einzusehen, dass bei einem solchen Komposit gerade dem Abbindeprozess durch entsprechende Nachbehandlung und Lagerung eine besondere Aufmerksamkeit beigegeben werden muss, da im Frühstadium die erst in Verankerung begriffenen Fasern alleine unter Umständen noch nicht in jedem Zeitpunkt einer möglichen schwind- und dilatationsbedingten Rissbildung genügend Widerstand entgegensetzen können.

## Produktbegleitende Rolle der Materialwissenschaften

Bei der gestellten Aufgabe eines Übergangs von konventionellen zu asbestfreien Faserzementen geht es also nicht nur um eine bloss Substitution der Fasern in der Zementmatrix. Vielmehr verbirgt sich dahinter eine interdisziplinär zu bewältigende Neukonzeptionierung des ganzen Systems unter Mitwirkung von Faser-, Zement- und Gefügespezialisten, Chemikern, Physikern, Ingenieuren, Verfahrens- und Anwendungstechnikern, die schliesslich auch zu Produkten führen kann, deren Eigenschaften nicht unbedingt identisch mit denjenigen von Asbestzement sein müssen. Den Materialwissenschaften kommt in diesem Rahmen auf beinahe allen Stufen eine wesentliche produktbegleitende Rolle zu, die den Bereich zwischen Entwicklung und Werkstoffkonfektionierung einerseits und ingenieurmässiger Umsetzung andererseits umfasst (Tabelle 2).

Zu den konkreten Aufgaben gehört die aus naheliegenden Gründen vornehmlich auf phänomenologischer Betrachtungsweise basierende *Grundlagenforschung*, bestehend aus Diskussion und Ausarbeitung geeigneter Materialmodelle zur Beschreibung, Bewertung und Prognostizierung des Verhaltens unter mechanischer Beanspruchung in Funktion der Geschichte und unter Berücksichtigung der Klima- und Umweltbedingungen sowie aus der Konzeptionierung und Verifizierung zweckmässiger material- und produktspezifischer Prüfverfahren und Untersuchungsmethodiken. Ziel ist die materialwissenschaftliche Synthese als Ausgangspunkt für Stoffentwicklung und -konfektionierung, Herstellungs- und Verfahrenstechnik, Anwendungstechnik und Nutzung sowie für Analyse und Behebung von Schäden, wie sie ja gerade auch im Frühstadium der kontrollierten praktischen Erprobung auftreten können.

Bei all diesen Arbeiten muss schliesslich als Voraussetzung für eine fruchtbare materialwissenschaftliche Tätigkeit ein intensives Feedback von der Praxis zurück zur Grundlagenforschung sichergestellt werden.

## Problemstellungen bei mechanischer Beanspruchung

### Einachsiges Spannungs-Dehnungs-Verhalten

Einen wichtigen Einstieg zur Beschreibung des Materialverhaltens und damit zu Verständnis und Lösung zahlreicher

materialwissenschaftlicher Problemstellungen liefert oft schon das einfache Spannungs-Dehnungs-Diagramm, das auch einen Teil der bereits erwähnten mikromechanischen Zusammenhänge qualitativ plausibel widerzuspiegeln vermag und erste quantitative Vorstellungen über das Komposit vermittelt.

In Bild 2 sind beispielhaft für die Hauptfaser- bzw. Produktionsrichtung einige einzelne nominelle Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus weggesteuerten Drei-Punkt-Biegeversuchen an asbestfreiem Dachschiefer dargestellt. Der Verlauf ist vor allem geprägt von den deutlichen Unterschieden im Bereich plastischer Verfestigung sowie im Wert der Höchstfestigkeit zwischen dem Verhalten im lufttrockenen Zustand und dem Verhalten im wassersatten Zustand nach 48 h Wasserlagerung bei Raumtemperatur. Unterschiede zeigen sich auch in Funktion des Alters. Besonders bei den lufttrockenen Proben zeichnet sich im konkreten Fall eine Tendenz zur Festigkeitserhöhung und zu grösserer asbestzementähnlicher Sprödigkeit ab.

Auch zwischen dem reinen Zug- und Druckverhalten in den beiden Hauptrichtungen der Plattenebene bestehen deutliche qualitative und quantitative Unterschiede. Beispiele dafür enthält das Bild 3.

Aufgetragen sind jeweils die Einzelwerte einer Serie dehnungsgesteuerter Zug- und Druckversuche an lufttrockenen Faserzementproben mit einem Alter von etwa 50 Tagen (d). Auffallend sind insbesondere die Unterschiede bei E-Modul und Höchstfestigkeit. Zwischen den beiden Hauptrichtungen sind zwar die Differenzen der maximalen Spannungen im vorliegenden Beispiel auch bei Zug eher gering, doch deutet immerhin die erhöhte Plastizität bei Zug II (parallel) auf den Einfluss der in Produktionsrichtung bevorzugten Faserorientierung hin.

Neben dem zügig durchgeführten einfachen Zug-Bruch-Versuch ist für die Modellbildung und das Verständnis des Werkstoffes auch das Verhalten bei einer kurzen Zwischenentlastung von Interesse, können doch dadurch gewisse zusätzliche Aufschlüsse über den Versagensmechanismus des Komposits gewonnen werden (Bild 4). Insbesondere sind Hinweise über die im Laufe der Zerstörung noch gespeicherte elastische Energie und den E-Modul möglich. Im konkreten Fall nimmt sowohl bei den lufttrockenen als auch bei den wassersatten Prüfkörpern der E-Modul bereits während der Verfestigungsphase sukzessive ab. Dabei erfolgt der Abfall in Funktion der Dehnung bei den lufttrockenen Proben nach Überschreiten der

Maximalspannung wesentlich rascher, eine Tatsache, die auf eine im Bereich der Höchstfestigkeit geringere Schädigung des wassersatten Komposits durch Rissbildung hindeutet. Beide Varianten weisen bei ungefähr 4 Promille Dehnung etwa den gleichen E-Modul, nicht aber dasselbe Festigkeitsniveau auf.

Mit dem sukzessive abnehmenden E-Modul reduziert sich im Entfestigungsbereich gleichzeitig auch die im Werkstoff gespeicherte effektive elastische Energie. Diese Reduktion ist jedoch geringer als bei Annahme eines im gesamten Entfestigungsbereich konstanten E-Moduls, weshalb gewisse auf dieser stark vereinfachenden Voraussetzung beruhende, für andere Werkstoffe entwickelte Modelle nicht a priori übernommen werden können. Hier, aber auch ganz allgemein im Zusammenhang mit dem einfachen Spannungs-Dehnungs-Verhalten, ist also noch einige materialwissenschaftliche Forschungsarbeit zu leisten.

### Anisotropie: Beispiele

Unter den Faserzementprodukten spielt die Wellplatte als typisches Ingenieurprodukt wegen ihrer vielseitigen Anwendbarkeit eine wichtige Rolle. Ihr Einsatz erstreckt sich vor allem auf den Dach- und Fassadenbereich, aber auch auf Sonderkonstruktionen, wie z.B. Lärmschutzwände und dergleichen. Eine bei Wellplatten auftretende extrem anwendungsorientierte Problematik im Zusammenhang mit dem anisotropen Materialverhalten stellt die Befestigung dar. Diese erfolgt im Falle des Daches über speziell entwickelte verlegungsfreundliche Schrauben mit Gummimanschette, die jeweils im Wellenberg appliziert werden. Hauptaufgabe der Schrauben ist vor allem die Sicherung gegen Windsog.

Um die Verhältnisse im Bereich der Befestigung besser studieren zu können, wurde mit der Entwicklung einer vereinfachten Prüfmethode begonnen, die insbesondere die ringförmige Krafteinleitung des Schraubenkopfes im Wellenberg an einem Wellenausschnitt möglichst losgelöst von den übrigen in der Praxis auftretenden Nebeneffekten näherungsweise simulieren sollte. Die Einrichtung wurde so konzipiert, dass sich für die experimentelle Analyse auch spezielle Methoden, wie z.B. holographische Untersuchungen, einsetzen liessen. Bild 5a zeigt als Beispiel eine holographische Aufsicht auf den Wellenberg. Gut erkennbar ist die Schraube im Zentrum sowie die beidseitige linienförmige Randeinspannung in Wellenlängsrichtung. Zum qualitativen Vergleich mit dem Experiment wurde anschliessend eine Finite-Element-Be-

## SCHRAUBENKOPFDURCHZUG : EINZELWELLE

(QUALITATIVER VERGLEICH DER NORMIERTEN VERTIKALEN DURCHBIEGUNGEN)

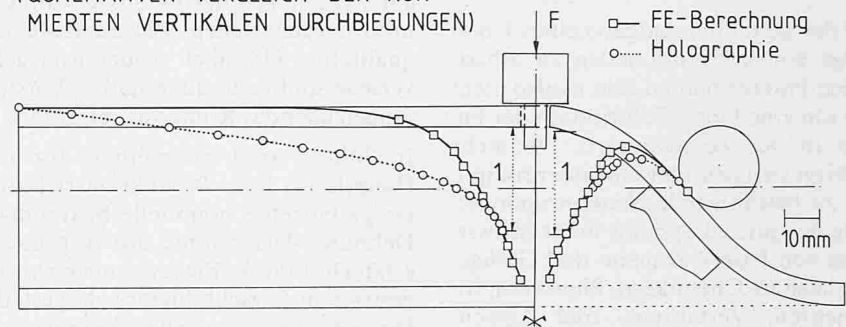
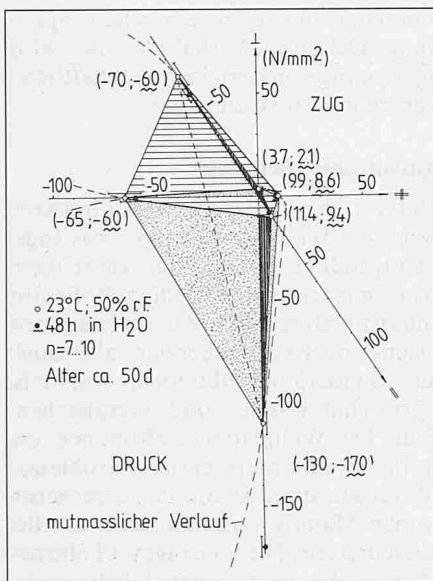


Bild 5. Längs- und Querverformung eines Wellplattenausschnittes infolge Lasteinleitung im Wellenberg mittels Befestigungsschraube; a) holographische Untersuchung; b) FE-Berechnung

*Bild 6. Vergleich der maximalen Zug- und Druckfestigkeiten in den drei Hauptrichtungen an einem Beispiel*

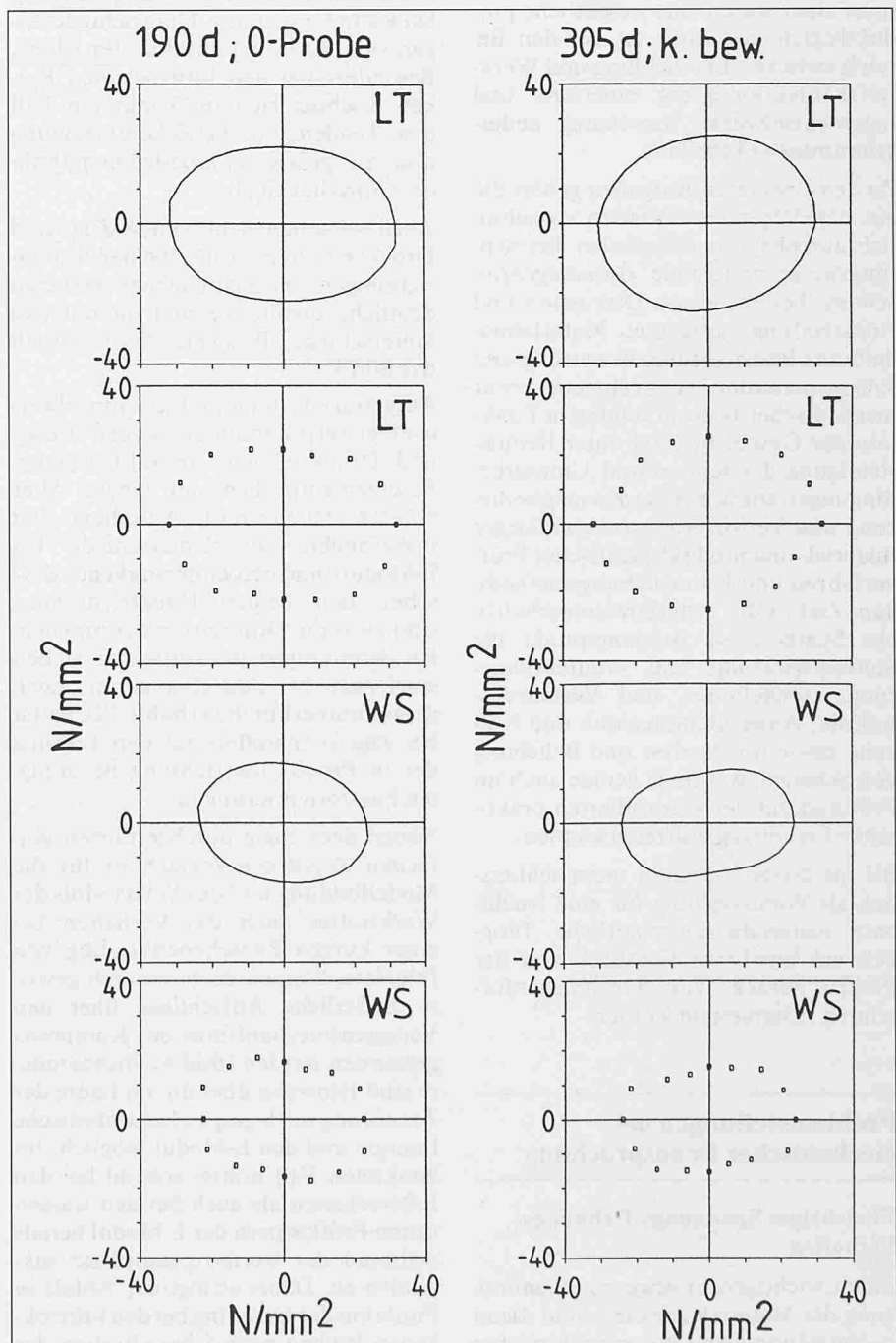


rechnung durchgeführt. Als Grundlage diente die stark vereinfachende Annahme eines linear-elastischen isotropen Materialverhaltens.

Wie aus dem qualitativen Vergleich zwischen holographischer Untersuchung und Berechnung in Bild 5b hervorgeht, konnte im vorliegenden Fall bei den Vertikalverformungen des Wellenquerschnittes eine befriedigende Übereinstimmung erzielt werden, während bei der Längsdurchbiegung im Wellenberg mit den getroffenen Annahmen der Einflussbereich der Schraube deutlich unterschätzt wurde. Ein Grund dafür dürfte wohl in der doch recht ausgeprägten Anisotropie des fabrikationsbedingt schichtförmig aufgebauten Werkstoffes und den damit verbundenen Unterschieden vor allem zwischen dem mechanischen Verhalten parallel und senkrecht zur Platenebene zu suchen sein.

Allerdings kann sich die vollständige Ermittlung der als Berechnungsgrund-

Bild 7. Polfiguren der maximalen Biegefestigkeit einer Faserzementvariante vor und nach künstlicher Bewitterung (LT: lufttrocken; WS: wassersatt)



lage benötigten anisotropen Materialeigenschaften in der Praxis bekanntlich als recht aufwendige und bisweilen auch mit bestimmten experimentellen Problemen verbundene materialwissenschaftliche Aufgabe erweisen. Immerhin lassen sich, wie das Bild 6 zeigt, schon aus relativ einfachen einachsigen Zug- und Druckversuchen in den drei Hauptrichtungen gewisse Hinweise in diesem Sinne gewinnen. Dargestellt sind für ein bestimmtes, etwa 50 d altes, gepresstes asbestfreies Faserzementprodukt jeweils die Zug- und Druckhöchstfestigkeiten in den drei Hauptrichtungen, und zwar im lufttrockenen Zustand und nach 48 h Wasserlagerung. Angedeutet ist ebenfalls der mutmassliche Verlauf der räumlichen kegelförmigen Bruchenvelope. Typischerweise ist senkrecht zur Plattenebene die maximale Zugfestigkeit, verglichen mit den anderen Richtungen, am geringsten, die maximale Druckfestigkeit dagegen am höchsten. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass gerade die Bestimmung der Eigenschaften in Plattenquerrichtung wegen der geringen Plattendicke von etwa 6 mm in experimenteller Hinsicht mit gewissen Schwierigkeiten und Unsicherheiten behaftet sein kann.

Weitere Hinweise über die Anisotropie der Werkstoffeigenschaften können sich auch aus der Ermittlung von Polfiguren ergeben, welche die Veränderung verschiedener charakteristischer Kenngrößen in Plattenebene als Funktion der Prüfrichtung wiedergeben (Bild 7). Im vorliegenden Beispiel werden die Höchstfestigkeiten aus Biegeversuchen im lufttrockenen und wassersatten Zustand im Alter von 190 d und nach 305 d bzw. 360 d verglichen; letztere nach vorgängiger 30-tägiger, im 1-Tages-Zyklus ablaufender Hitze-Wasser-Behandlung. Ebenfalls angegeben ist jeweils zur besseren Veranschaulichung allfälliger Tendenzen der Verlauf der entsprechenden Regressionskurven. Neben bestimmten vorwiegend quantitativen Unterschieden zwischen den Resultaten im lufttrockenen und wassersatten Zustand sind für die Beurteilung des Komposits auch gewisse Rotationserscheinungen im qualitativen Verlauf zwischen den Proben mit und ohne Hitze-Wasser-Behandlung von Interesse. Es ist darauf hinzuweisen, dass sich die hier gezeigten Phänomene ausdrücklich auf die konkreten Proben beziehen und dass in anderen Fällen in qualitativer und quantitativer Hinsicht durchaus andere Gewichtungen und Tendenzen auftreten können. Das Beispiel verdeutlicht aber, dass allfällige Veränderungen der Eigenschaften im Komposit nicht a priori in allen Richtungen in gleichem Masse mit gleicher

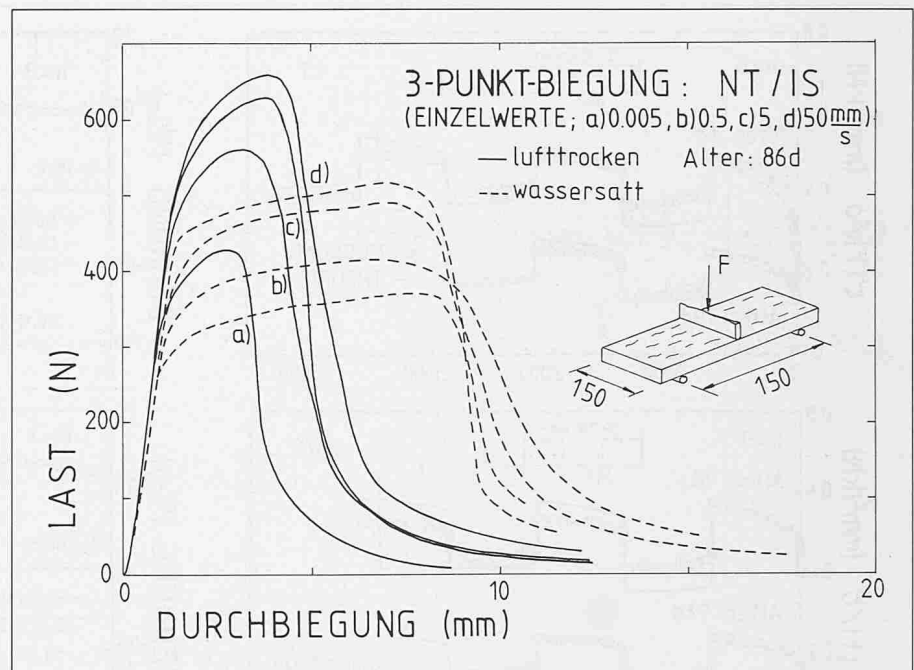


Bild 8. Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Last-Verformungsverhalten (Einzelwerte) bei quasistatischer Biegung

Geschwindigkeit und ohne Auftreten von Kopplungseffekten abzulaufen brauchen. Dies ist ein wichtiger Hinweis für die Lösung der entsprechenden materialwissenschaftlichen Problemstellungen.

## Geschichtsabhängigkeit des Materialverhaltens

### Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit

Die Erfassung der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Werkstoffverhaltens ist wesentlich in bezug auf Problemstellungen wie Begehrbarkeit und Durchbruchssicherheit, Hagelschlag, Transport und Bearbeitung. Es seien daher in diesem Zusammenhang einige Resultate erwähnt, die den Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Biegeigenschaften in Produktionsrichtung in einem relativ weiten Bereich zwischen 0,005 bis etwa 50 mm/s umfassen. Die Versuche erfolgten auf einer servohydraulischen «Instron»-Prüfmaschine.

Die im Bild 8 dargestellten einzelnen typischen Last-Durchbiegungsverläufe aus quasistatischer Biegung wurden an etwa 86 d alten lufttrockenen und wassersatten Proben ermittelt. Deutlich erkennbar ist der starke Einfluss grösserer Geschwindigkeiten auf die Höchstlast sowie der Abbau der im unteren Geschwindigkeitsbereich vorhandenen Differenzen zwischen lufttrockenem und wassersattem Zustand. Neben einem Anstieg der Bruchlasten ist zudem in beiden Fällen im untersuchten

Bereich bei quasistatischer Biegung ein Zuwachs der Deformationsenergie zu verzeichnen.

### Einfluss der Belastungsdauer

Eine weitere Problemstellung im Zusammenhang mit der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Stoffverhaltens ergibt sich aus der Anwendung von Faserzement, insbesondere aber von Wellplatten als Bedachungsmaterial. Hier sind infolge periodischer längerer Schneebelastung Kriecherscheinungen denkbar, die zu bleibenden Deformationen und unter extremen Bedingungen auch zu Kriechbrüchen führen könnten. Das Interesse gilt hier vorab dem Einfluss von Lastfolge, Temperatur und Feuchtigkeit, umfasst aber auch die Frage nach der Wirkungsweise und experimentellen Simulation des Schnees selbst, der je nach Zustand bekanntlich ein beachtliches eigenes Tragverhalten besitzt. Zur Untersuchung der unterschiedlichen Wirkung der Schneebelastung auf Wellplatten werden unter anderem Prüfungen mit einer schlaffen, mittels Wasser erzeugten Flächenlast in anwendungsnaher Zwei-Feld-Trägerkonfiguration mit einem Pfettenabstand von 1150 mm vorgenommen, die jedoch nur die Ermittlung des Langzeitverhaltens im lufttrockenen Zustand erlauben. Daneben wird aber auch das Kriechen von Wellplatten unter einfacher Vier-Punkt-Linienbelastung studiert.

Für das materialwissenschaftliche Verständnis der Kriechphänomene und für die Erarbeitung von Näherungsverfahren zur Abschätzung und Prognose der Kriechdeformationen unter beliebig

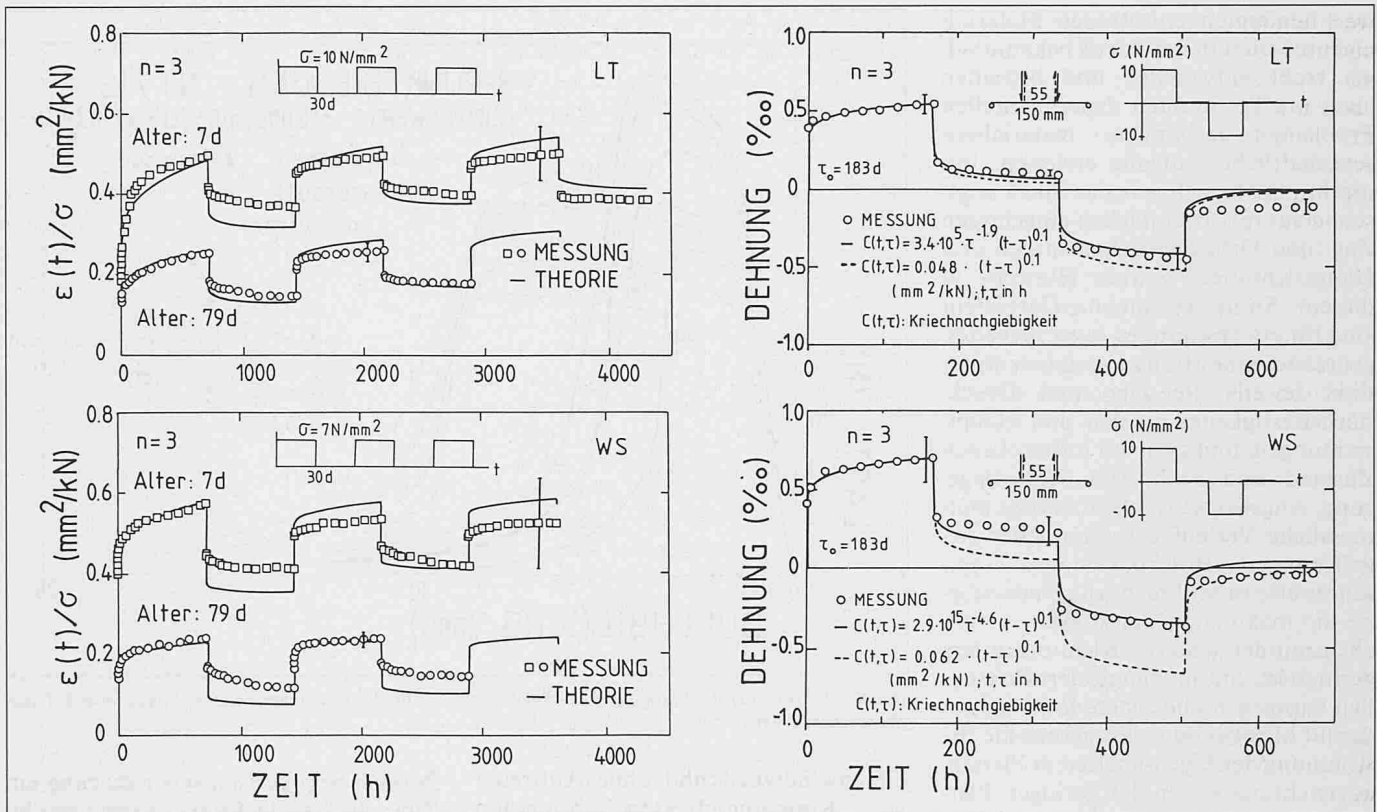
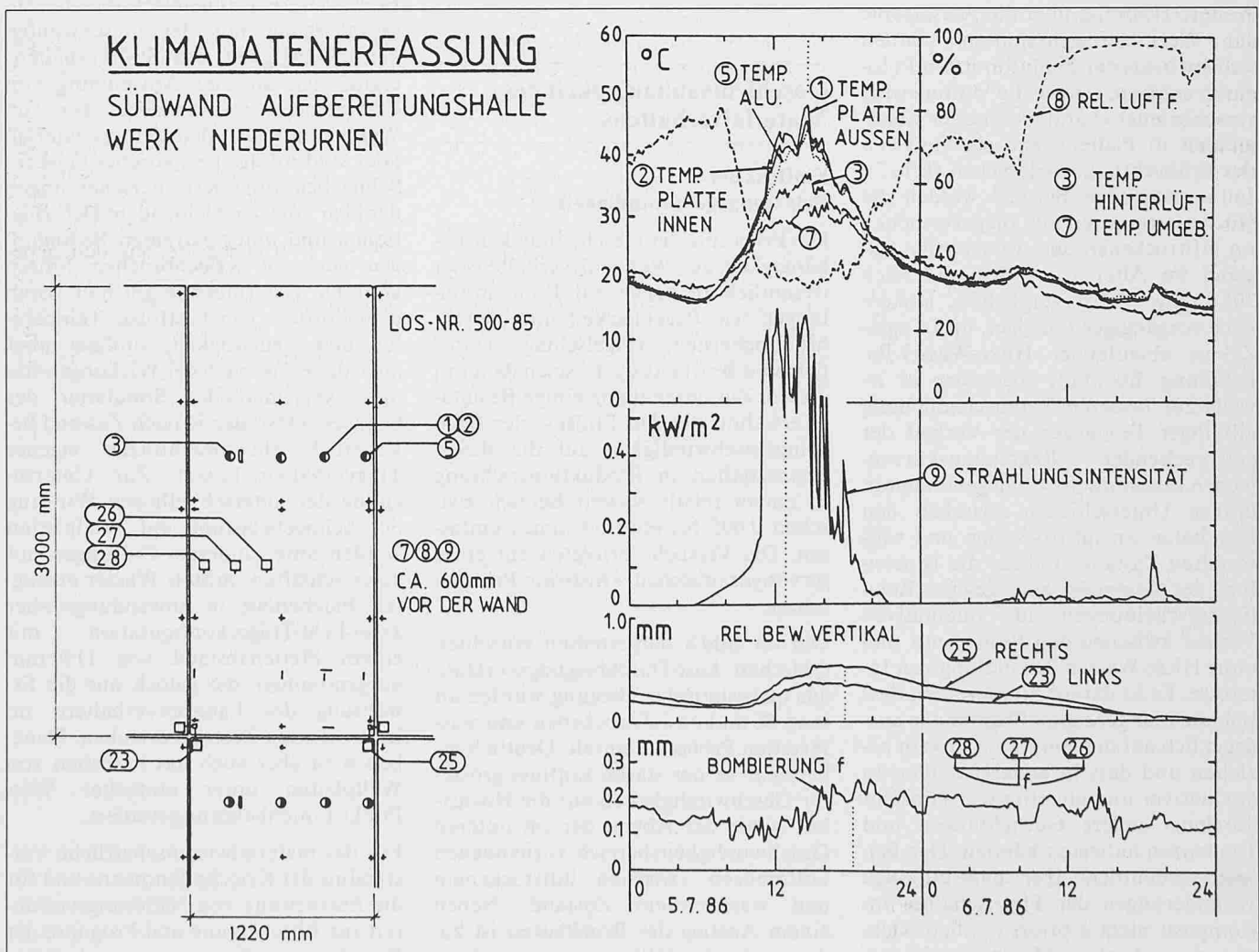


Bild 9. Biegekriechversuche an lufttrockenen (LT) und wassersatten (WS) Faserzementplättchen; a) zyklische stufenförmige Kriechbeanspruchung, b) Kriecherholungsgeschichte mit Spannungsumkehr

Bild 10. Verhalten einer Fassadenplatte am Objekt unter Klimabeanspruchung



wechselnden Belastungsfolgen, wie sie auch bei Wellplatten auftreten können, sind zusätzlich Versuche an einfachen ebenen Plättchen erforderlich. Berechnungsbasis kann beispielsweise die Aufspaltung der Deformationen aufgrund des einfachen Kriecherholungsverhaltens bilden, und zwar in einen reversiblen und irreversiblen zeitabhängigen bzw. zeitunabhängigen Verformungsanteil. Dabei empfiehlt es sich, die mit zunehmenden Alter geringere Kriechneigung beispielsweise durch Einführen einer geeigneten Alterungsfunktion mit Hilfe eines Separationsansatzes zu berücksichtigen. Ein solches Vorgehen wurde auch bei der in Bild 9a gezeigten zyklischen Kriechbeanspruchungsgeschichte mit jeweils 30tägiger Belastungs- und Entlastungsphase gewählt. Wie ersichtlich, konnte sowohl bei den lufttrockenen als auch bei den wassersatten Proben im untersuchten Zeitbereich dank geeigneter Berücksichtigung der Alterung eine durchaus zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Messung und Theorie erzielt werden.

Ähnliches gilt auch für das im Bild 9b dargestellte nächste Beispiel. Hier wurde versucht, durch einfache Anwendung des Boltzmannschen Superpositionsprinzips einmal mit und einmal ohne Abminderung durch eine potenzförmige Alterungsfunktion das Verformungsverhalten einer 183 d alten Biegeprobe unter stufenförmiger wechselnder Kriecherholungsbeanspruchung mit Spannungsumkehr zu modellieren. Die Dauer der einzelnen Belastungsphasen betrug 7 d.

Hintergrund dieser Studie bildete die in der Praxis besonders bei den ersten asbestfreien Produkten bisweilen festgestellte starke Schüsselung und Bombierung ebener Platten durch Feuchtigkeits- und Temperatureinwirkung und die daraus resultierende mechanische Beanspruchung. Während bei den lufttrockenen Proben beide gewählten Ansätze für die Kriechnachgiebigkeiten das Verhalten offenbar zutreffend zu beschreiben vermögen, liefert bei den wassersatten Platten die Lösung mit der Alterungsfunktion die deutlich realistischeren Resultate.

## Abhängigkeit von Klima- und Umweltbedingungen

### Dilatationsverhalten und Befestigung

Eng mit der Geschichtsabhängigkeit verknüpft, ist auch das Materialverhalten unter Klima- und Umweltbeanspruchung, ein Problemkreis, der besonders für all jene Produkte von Bedeutung ist,

deren Anwendung im Bereich des Wetter- und Klimaschutzes zu suchen ist. Zum genaueren Verständnis des Praxisverhaltens dienen in situ vorgenommene Messungen an ganz bestimmten Objekten.

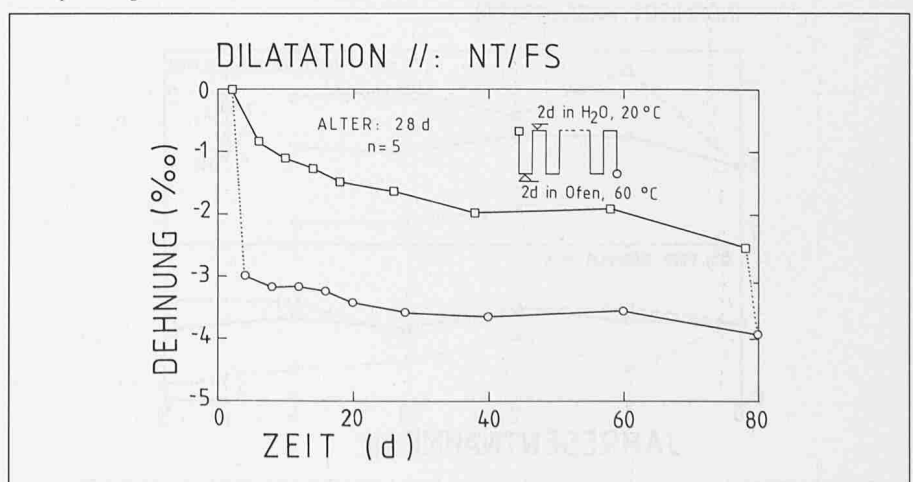
Als Beispiel diene eine Versuchswand auf dem Eternit-Werkgelände in Niederurnen, die eine mit Messinstrumenten bestückte, 3 m hohe und 1,22 m breite Prüfplatte enthält. Eine Übersicht über die Lage der verschiedenen Fühler und der Befestigungselemente gibt das Bild 10. Gemessen wurde u.a. die Strahlungsintensität (9), relative Luftfeuchte (8) und Umgebungstemperatur (7) in etwa 600 mm Entfernung von der Wand, ferner die Temperatur in der Hinterlüftungszone (3), die Plattentemperatur aussen und innen (1 und 2) sowie die Temperatur der Aluminiumunterkonstruktion im Stossbereich (5). Registriert wurde ausserdem sowohl die vertikale Relativbewegung zwischen Aluminiumprofil und Platte an der rechten und linken unteren Ecke (23 und 25) als auch die relative Bombierung bzw. Schüsselung (f) über eine Sehnenlänge von etwa 420 mm. Als Beispiel sind die Messresultate für zwei typische aufeinanderfolgende Sommertage angegeben. Der erste ist geprägt durch eine relativ ausgiebige Besonnungsphase über die Mittagszeit von etwa 8 h Dauer bei einer Umgebungstemperatur um 30 °C; der zweite Tag zeichnet sich durch starke Bewölkung mit einem heftigen Gewitterregen am Spätmittag aus, mit entsprechend hoher relativer Luftfeuchtigkeit. Die Resultate lassen eine verhältnismässig stark über der Umgebungstemperatur liegende Erwärmung des Werkstoffes auf etwa 50 °C erkennen. Zwischen der Temperatur auf der Plattenaussen- und -innenseite sowie auf der Aluminiumunterkonstruktion im Stossbereich treten nur geringe Temperaturdifferenzen auf. Die grösste Aufheizung wurde

etwa 2 h nach Erreichen der maximalen Strahlungsintensität gemessen. Trotz der doch beachtlichen Klimaschwankungen können die Deformationen der Konstruktion im vorliegenden Fall als eher gering bezeichnet werden. So resultiert infolge der Besonnung mit einer Phasenverschiebung von etwa 4 h relativ zur Aluminiumunterkonstruktion eine maximale Verlängerung der Platte um etwa 0,4 mm. Bei der Bombierungsmessung ergibt sich eine um etwa 6 h verspätete maximale relative Bewegung in Richtung Gebäudewand von etwa  $f = 0,2$  mm.

In der materialwissenschaftlichen Grundlagenforschung muss das thermische und hygrale Dilatationsverhalten sowohl möglichst getrennt als auch in bewusster Kombination untersucht werden. In Bild 11 ist als Beispiel einer Untersuchung mit kombinierter thermisch-hygraler Belastungsgeschichte das Dilatationsverhalten eines 28 d alten Faserzementes in Produktionsrichtung unter zyklischer Hitze- und Wasserbeanspruchung dargestellt. Deutlich erkennbar ist der im Laufe der Geschichte immer geringere Zuwachs des bleibenden Anteils der Schwinddehnungen sowie der sukzessiv abnehmende reversible Dehnungsbeitrag.

Diskutiert sei schliesslich noch in enger Anlehnung an die erwähnte Befestigungsproblematik der in Bild 12 aufgeführte Einzelversuch an einer jungen, 1 d alten Probe, bei welcher der Spannungsverlauf an einem beidseitig in konstantem Abstand eingespannten Zugstreifen bei Raumtemperatur und 42% rel. Luftfeuchtigkeit aus dem experimentell bestimmten Schwindverlauf berechnet wurde. Die stark vereinfachte Näherung beruht auf der linearen Viskoelastizitätstheorie und entsprechenden Exponentialansätzen für den Relaxationsmodul und den zeitlichen Schwindverlauf. Die Übereinstimmung

Bild 11. Dilatationsverhalten in Plattenebene eines 28 d alten Faserzementes unter zyklischer Hitze-Wasserbeanspruchung



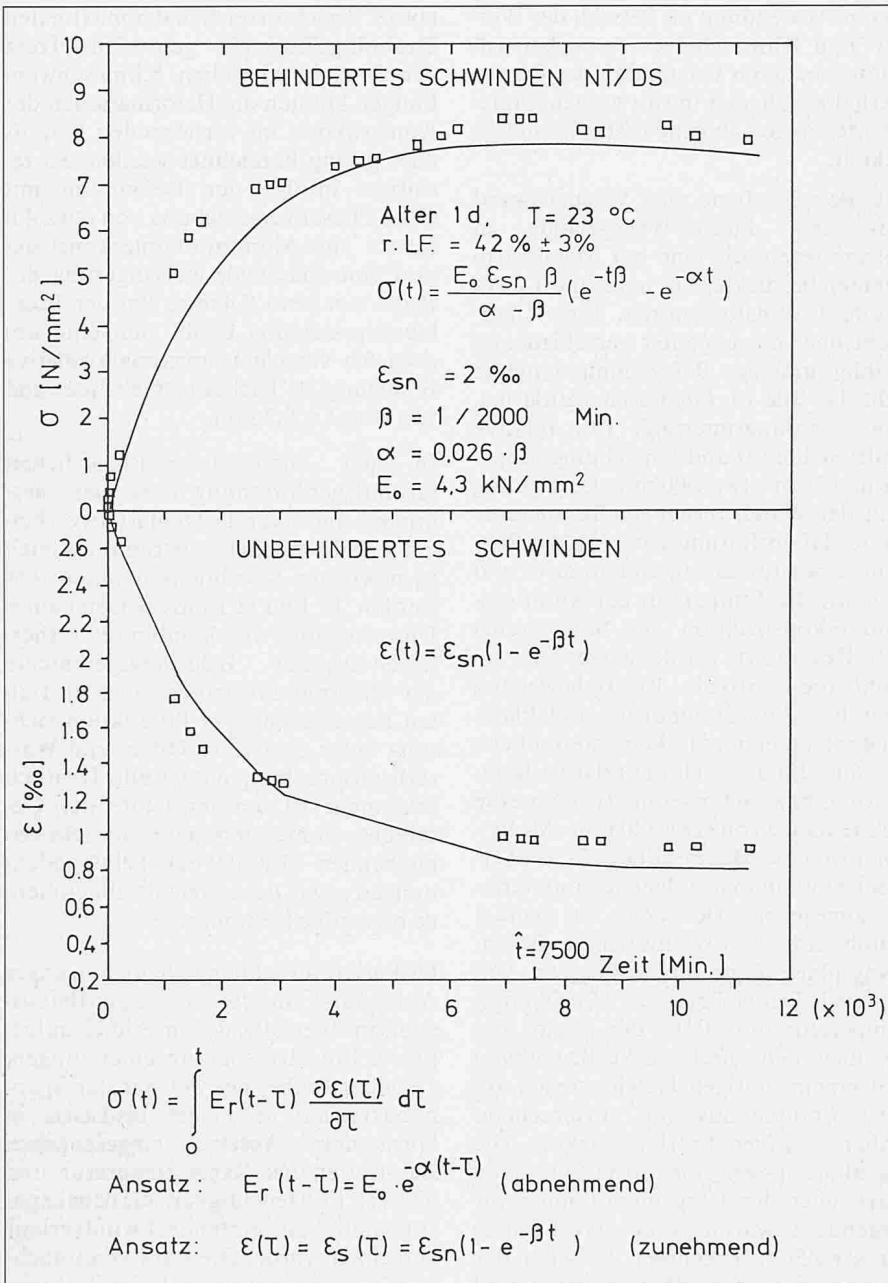
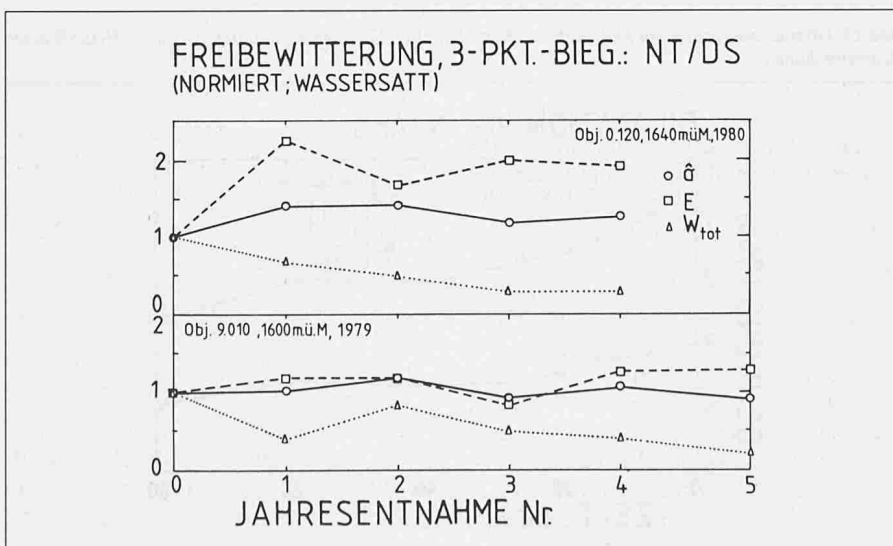


Bild 12. Zusammenhang zwischen unbehindertem und behindertem Schwinden in Plattenebene (Einzelversuch)

Bild 13. Entwicklung der Biegeeigenschaften unter extremer Freibewitterung am Objekt am Beispiel asbestfreier Faserzement-Dachschiefer der älteren Generation



mit dem Experiment ist befriedigend. Insbesondere lässt sich der Einfluss der Relaxationseigenschaften mit dem Auftreten eines Spannungshöchstwertes nach etwa  $t = 7500$  min augenfällig demonstrieren.

#### Natürliche Alterung unter Freibewitterung

Die natürliche Alterung unter Freibewitterung umfasst einen weiten Problembereich, der in engem Zusammenhang mit den geschichtsabhängigen Eigenschaften des Werkstoffes steht. Die Untersuchung erfolgt u.a. an zahlreichen, nach klimatischen, geographischen und bauphysikalischen Gesichtspunkten ausgewählten Testobjekten, die periodisch sowohl qualitativ durch visuelle Kontrolle als auch quantitativ durch jährliche Entnahme von Proben für Laboruntersuchungen überwacht werden.

Zu den älteren Objekten, die bereits mit asbestfreien Vorläufern der heutigen deutlich verbesserten Produkte belegt sind, gehören die beiden in Bild 13 diskutierten Gebäude in Graubünden und in den Glarner Alpen auf etwa 1600 m ü.M. Oben handelt es sich um ein Ferienhaus in Brambrüesch, unten um eine Hütte auf der Rautalp, wo im Winter während längerer Zeit durchaus Schneedecken von etwa 2,5 bis 3 m Dicke auftreten können. Aufgetragen sind jeweils die auf den Ausgangszustand bei 28 d normierten Höchstfestigkeits-, E-Modul- und Bruchenergie-Werte an wassersatt geprüften Proben der einzelnen Jahresentnahmen. Das Verhalten ist in den vorliegenden Fällen geprägt durch eine mehr oder weniger starke Zunahme des E-Moduls, eine im wesentlichen gleichbleibende Höchstfestigkeit und eine im Sinne einer Versprödung abnehmende Tendenz der Bruchenergie.

Die an solchen schon früh asbestfrei eingedeckten Objekten gewonnenen Erkenntnisse lieferten rückblickend einen wichtigen Beitrag zur Konfektionierung immer weiter optimierter Produkte und damit Basis zum Erreichen des heutigen Qualitätsstandards. Sie bildeten aber auch gleichzeitig Ausgangspunkt für die Entwicklung neuer Prüfmethode zur gezielten künstlichen Bewitterung einschliesslich Beschleunigung gewisser Alterungseffekte sowie zum tieferen Verständnis der damit verbundenen Mechanismen. Allerdings wird sich die materialwissenschaftliche Grundlagenforschung in Zukunft eher noch vermehrt mit diesen Phänomenen und Fragestellungen zu beschäftigen haben, ist doch die Bewitterungsthematik heute immer mehr mit verschiedensten zusätzlichen zivilisationsbedingten Korrosionsproblemen verknüpft.

## Zusammenfassung

Die Notwendigkeit des Asbestersatzes und die Erarbeitung bzw. Realisierung neuer alternativer Faserzementkonzeptionen ist mit grundsätzlichen komplexen materialwissenschaftlichen Fragestellungen verbunden, die in der traditionellen Faserzementindustrie in den letzten Jahren zu einem intensivierten Ausbau der eigenen vielseitigen und praxisorientierten werkstoffwissenschaftlichen Forschungstätigkeit geführt hat. Das breite Spektrum dieser vornehmlich auf phänomenologischer Betrachtungsweise basierenden Grundlagenforschung umfasst den Bereich zwischen Entwicklung und Werkstoff-

konfektionierung einerseits und ingenieurmässiger Umsetzung, Bewertung und Anwendung andererseits.

Anhand einiger Beispiele wurden materialwissenschaftliche Problemstellungen im Zusammenhang mit Anisotropie, Feuchte-, Zeit- und Alterungsabhängigkeit vorgestellt und verschiedene Lösungsansätze kurz diskutiert. Dabei konnte selbstverständlich nur ein kleiner repräsentativer Einblick in die Forschungstätigkeit an Eternit-Faserzementprodukten vermittelt werden. Eine Forschungstätigkeit, die getragen ist von der Aufgabe, beim Übergang zu asbestfreien Produkten einerseits eine harmonische Synthese zwischen alter und neuer Technologie vorzunehmen,

andererseits aber auch die Basis für unkonventionelle zukunftsorientierte Lösungen zu schaffen.

Adresse des Verfassers: Dr. sc.techn. M. Partl, dipl. Bau.-Ing. ETH/SIA, Ametex AG, 8867 Niederurnen.

## Literatur

- [1] Studinka, J.: Faserzement ohne Asbest. Forschung und Technik, Neue Zürcher Zeitung, Nr. 286 (1983).
- [2] Studinka, J.: Asbestersatz in der Faserzementindustrie – Stand der Substitution, bisherige Erfahrungen. Internationale Chemieforschung Dornbirn, Österreich (1986)

# Asbest – Eigenschaften und Bedeutung im Bauwesen

Asbest ist ein natürlicher, faseriger Silikatstoff mit bemerkenswerten Eigenschaften wie Zugfestigkeit, Säurebeständigkeit, geringe elektrische und thermische Leitfähigkeit und vor allem Unbrennbarkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber Hitze und Feuer. Schon im Altertum hat man die biegsamen, verspinnbaren Fasern (zum Beispiel zu «unverfaulbaren» Leinentüchern) gewoben. Der grosse Aufschwung kam aber erst in unserem Jahrhundert, vor allem nach dem Zweiten Weltkrieg. Auf dem Markt kommt Asbest zu mehr als 90% als Weissasbest (Chrysotil) vor; eine gewisse Rolle spielen ferner (der gefährlichere) Blauasbest (Crocidolit) und Braunasbest (Amosit).

Im Bauwesen – bei weitem der vorwiegende Einsatzbereich von Asbest – tritt dieser Stoff in erster Linie mit Zement gebunden als Asbestzement (Eternit) auf. Von Ende der dreissiger bis Mitte der sechziger Jahre wurde Asbest – eventuell in Gemisch mit einem anderen Füllmaterial, z. B. Steinwolle – auch relativ häufig in Spritzbelägen zum Brandschutz sowie zur Wärme- und Schalldämmung verwendet. Ein vom Bundesamt für Umweltschutz erstelltes Inventar, das rund 90% der mit Spritzasbest behandelten Gebäude in der Schweiz einschliessen dürfte, erfasst gegen 4000 öffentliche und private

Gebäude mit einer Spritzfläche von insgesamt etwa 2 Mio. m<sup>2</sup>. Diese Spritzbeläge dürften nicht einmal 1% der totalen in der Schweiz eingesetzten Asbestmenge enthalten. Weitere Anwendungen von Asbest im Bauwesen (Asbestisolierschäume, Beimischung in Strassendecken, Dichtungen, u. ä.) spielen eine geringere Rolle.

## Gesundheitliche Aspekte

Den interessanten technischen Eigenschaften steht die gesundheitsgefährdende Wirkung entgegen. Asbestfasern bestimmter Formen und Dimensionen können durch die Atemwege bis in die Alveolen eindringen. Sie verursachen einen bindegewebsartigen Umbau der Lunge (Asbestose) und haben – insbesondere bei Rauchern – eine tumor erzeugende Wirkung (in erster Linie Lungen- und Bronchienkrebs sowie bösartige Tumoren des Rippen- und Bauchfells, sogenannte Mesotheliome). Die Latenzzeit dieser Krankheiten ist sehr lang (im Mittel 15 bis 20 Jahre) und die Frühdiagnose schwierig. Ferner stösst das Erfassen der gefährdeten Berufskategorien auf Schwierigkeiten, da auch ausserhalb der eigentlichen Asbestindustrie in vielen Branchen, unter anderem im Bausektor, mit asbesthaltigen Produkten umgegangen wird.

Nachstehender Aufsatz ist Teil der in loser Folge im SI+A erscheinenden Reihe «Bauen und Gesundheit» der Fachgruppe für Architektur (FGA). Bisher veröffentlichte Beiträge: «Formaldehyd» (29/1987 S. 873); «Holzschutz» (36/1987, S. 1044).

Wie Tierversuche und Sezierungen gestorbener Asbestarbeiter zeigen, ist die Gefahr um so grösser, je länger und dünner die Fasern sind. Bei der Abschätzung des Risikos werden meistens nur solche Fasern berücksichtigt, die länger als 5 µm und dünner als 3 µm sind. Die Erfassung des zusätzlichen Beitrags kürzerer Fasern zum tumor erzeugenden Potential erfordert noch weitere experimentelle Abklärungen.

## Grenzwerte

Die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) in der Schweiz, die zunächst (1978) auf 2 000 000 Fasern/m<sup>3</sup> gesetzt wurde, ist 1984 auf die Hälfte gesenkt worden. Diese verschärfte Norm beinhaltet immerhin ein noch nicht vernachlässigbares Risiko. Nach einer arbeitsmedizinischen Abschätzung dürfte die lebenslängliche, berufliche Exposition (30–40 Jahre, 40–45 Stundenwoche) bei 0,5% der Arbeiter Asbestose, bei 2% Lungen- oder Bronchienkrebs, bei 2–4% Mesotheliome verursachen.

Dieser MAK-Wert ist allenfalls höchstens für die relativ kleine Zahl der Beschäftigten, keineswegs aber für die Allgemeinbevölkerung zulässig. Immisionsmessungen an dichtbesiedelten