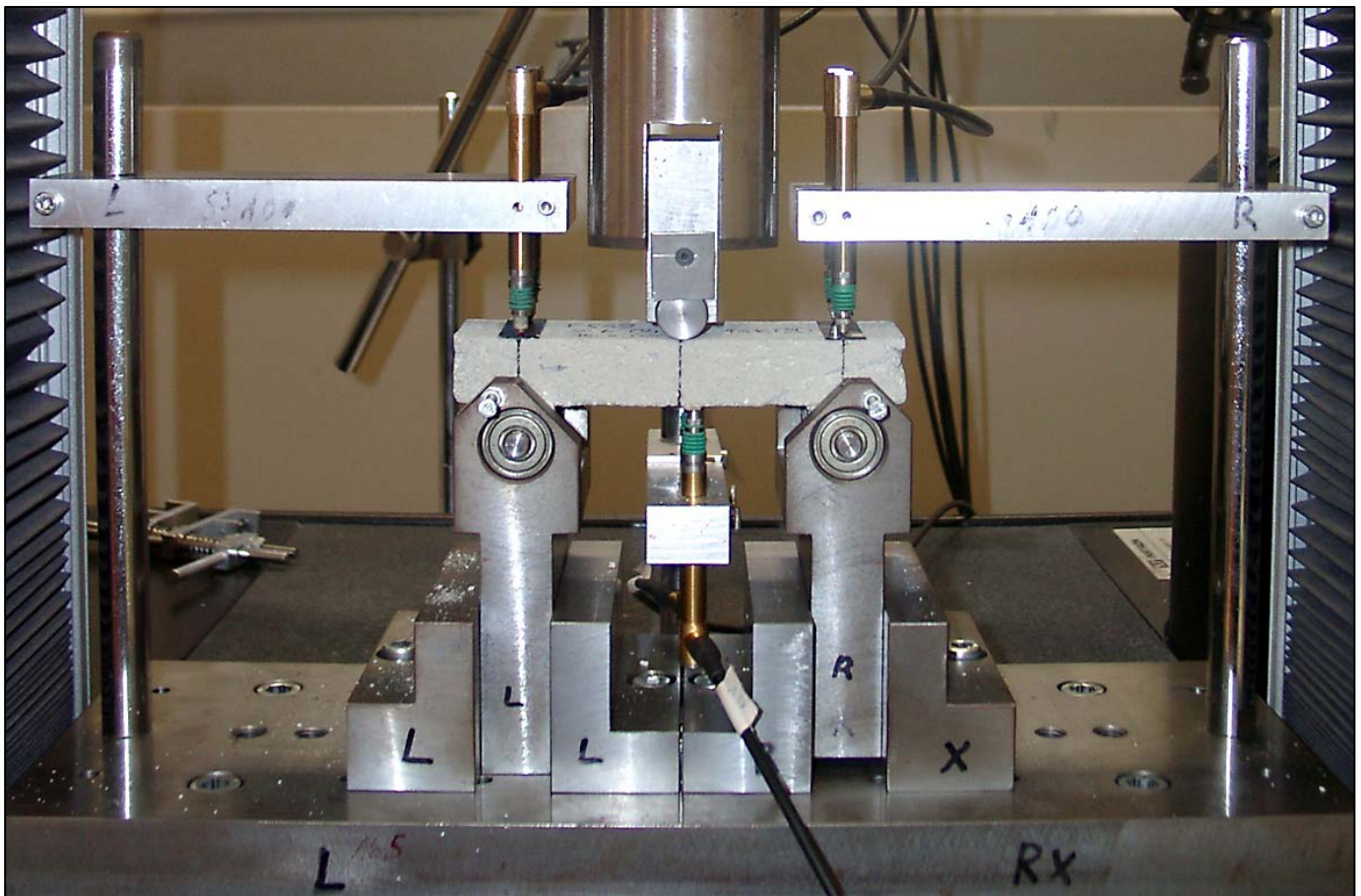


# Einfluss von Verformungen des Putzgrundes auf das Entstehen schädlicher Risse in Außenputzen

I. Beer, J. Hannawald, H. Jensen, W. Brameshuber



## **Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF-Nr. 14093 N/2**

Forschungsstelle 1:

Forschungsinstitut der Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.  
Annastr. 67-71  
50968 Köln

Forschungsstelle 2:

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen  
Institut für Bauforschung  
Schinkelstraße 3  
52062 Aachen

Die Forschungsarbeit „Einfluss von Verformungen des Putzgrundes auf das Entstehen schädlicher Risse in Außenputzen“ wurde mit Mitteln des Bundesministers für Wirtschaft (BMWi) im Rahmen eines von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) durchgeführten Forschungsvorhabens gefördert, wofür wir an dieser Stelle unseren Dank aussprechen.

<b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b>		<b>Seite</b>
1	ALLGEMEINES.....	1
1.1	Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung .....	1
1.2	Forschungsziel.....	2
1.3	Lösungsweg.....	3
1.4	Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen (KMU).....	4
2	VERWENDETE MATERIALIEN.....	4
3	UNTERSUCHUNGEN AN DEN HOCHLOCHZIEGELN .....	5
3.1	Praktische Untersuchungen.....	5
3.1.1	Versuchsprogramm.....	5
3.1.2	Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse.....	6
3.1.2.1	Normeigenschaften.....	6
3.1.2.2	Zugversuche am Außenscherben.....	6
3.1.2.3	Zugversuche an ganzen Mauersteinen in Richtung Steinhöhe und -länge	9
3.1.2.4	Druckbeanspruchung des Außenscherbens .....	11
3.1.2.5	Kapillare Wasseraufnahme über die Putzfläche .....	14
3.1.2.6	Temperaturdehnungskoeffizient.....	15
3.1.2.7	Feuchtedehnung .....	16
3.1.2.8	Untersuchungen zur Porengrößenverteilung .....	17
3.2	Theoretische Untersuchungen zur Ermittlung einer Ersatzsteifigkeit der Hochlochziegel.....	18
3.2.1	Einleitung .....	18
3.2.2	Grundlagen der Homogenisierung.....	18
3.2.3	Effektive Eigenschaften der Hochlochziegel.....	19
3.2.4	Effektive Eigenschaften des Putzgrundes.....	25
4	UNTERSUCHUNGEN AN DEN AUSSENPUTZEN .....	29
4.1	Allgemeines .....	29
4.2	Bestimmung grundlegender Materialeigenschaften .....	30

---

<b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b>		<b>Seite</b>
4.2.1	Versuchsprogramm.....	30
4.2.2	Versuchsdurchführung.....	30
4.2.2.1	Siebanalyse .....	30
4.2.2.2	Herstellung der Putzmörtel .....	31
4.2.2.3	Frisch- und Festmörtelkennwerte.....	31
4.2.2.4	Schwinden .....	31
4.2.3	Versuchsergebnisse .....	32
4.2.3.1	Siebanalyse sowie Frisch- und Festmörtelkennwerte.....	32
4.2.3.2	Schwinden .....	33
4.3	Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Putzprismen .....	33
4.3.1	Allgemeines .....	33
4.3.2	Tastversuche .....	34
4.3.2.1	Versuchsprogramm.....	34
4.3.2.2	Versuchsdurchführung.....	36
4.3.2.3	Versuchsergebnisse .....	38
4.3.3	Vergleichsversuche.....	43
4.3.3.1	Versuchsprogramm.....	43
4.3.3.2	Probenherstellung und Versuchsdurchführung.....	44
4.3.3.3	Versuchsergebnisse .....	46
4.3.4	Zusammenfassung .....	47
4.4	Bestimmung von Materialparametern der Putze und des Verbundes .....	48
4.4.1	Versuchsprogramm.....	48
4.4.2	Probenherstellung und Nachbehandlung.....	51
4.4.3	Versuchsdurchführung und -auswertung .....	53
4.4.3.1	Frisch- und Festmörtelkennwerte.....	53
4.4.3.2	Mechanische Materialparameter der Putze .....	54
4.4.3.2.1	Dynamischer E-Modul.....	54
4.4.3.2.2	Zentrische Zugfestigkeit.....	54
4.4.3.2.3	Druckfestigkeit .....	55
4.4.3.3	Bruchmechanische Materialparameter der Putze .....	55
4.4.3.3.1	Allgemeines .....	55
4.4.3.3.2	Versuchsdurchführung.....	56

---

<b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b>	<b>Seite</b>
4.4.3.3.3 Versuchsauswertung .....	58
4.4.3.4 Materialparameter des Haftverbundes.....	64
4.4.3.4.1 Allgemeines .....	64
4.4.3.4.2 Versuchsdurchführung.....	64
4.4.3.4.3 Versuchsauswertung .....	65
4.4.3.5 Materialparameter zur Beschreibung des Kriechens unter Zugbeanspruchung .....	66
4.4.3.5.1 Versuchsdurchführung.....	66
4.4.3.5.2 Versuchsauswertung .....	67
4.4.3.6 Physikalische Materialparameter .....	70
4.4.3.6.1 Trockenrohddichte und Feuchtegehalt.....	70
4.4.3.6.2 Schwinden .....	70
4.4.3.7 Begleitende Untersuchungen zu Wasserabsaugen, Porenstruktur und Karbonatisierungstiefe .....	71
4.4.4 Versuchsergebnisse .....	72
4.4.4.1 Frisch- und Festmörtelkennwerte.....	72
4.4.4.2 Mechanische Materialparameter.....	72
4.4.4.3 Bruchmechanische Materialparameter .....	76
4.4.4.3.1 Ergebnisse der Versuchsauswertung .....	76
4.4.4.3.2 Ergebnisse der Simulationen und der Bestimmung von Spannungs- Rissöffnungsbeziehungen.....	80
4.4.4.3.3 Charakteristische Länge .....	84
4.4.4.4 Materialparameter des Haftverbundes.....	86
4.4.4.5 Materialparameter zur Beschreibung des Kriechens unter Zugbeanspruchung .....	87
4.4.4.6 Physikalische Materialparameter .....	88
4.4.4.6.1 Trockenrohddichte und Feuchtegehalt.....	88
4.4.4.6.2 Schwinden .....	89
4.4.4.7 Begleitende Untersuchungen zu Wasserabsaugen, Porenstruktur und Karbonatisierungstiefe .....	92
4.4.4.7.1 Wasserabsaugen durch den Putzgrund.....	92
4.4.4.7.2 Porenstruktur .....	93
4.4.4.7.3 Karbonatisierungstiefe .....	94

**INHALTSVERZEICHNIS****Seite**

5	ZUSAMMENSTELLUNG DER MATERIALPARAMETER FÜR DIE FINITE-ELEMENTE-SIMULATIONEN .....	95
5.1	Einleitung .....	95
5.2	Materialparameter der Hochlochziegel .....	95
5.3	Materialparameter der Putze.....	97
6	UNTERSUCHUNGEN AN MAUERWERKWÄNDEN .....	104
6.1	Praktische Untersuchungen an Mauerwerkwänden.....	104
6.1.1	Versuchsprogramm.....	104
6.1.2	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung .....	106
6.1.3	Versuchsergebnisse .....	110
6.1.3.1	Begleitende Untersuchungen.....	110
6.1.3.2	Untersuchungen an den Putzflächen .....	112
6.1.3.2.1	Schwinden .....	112
6.1.3.2.2	Temperaturmessungen und Rissbilder .....	114
6.1.3.2.3	Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera .....	117
6.2	Simulationsrechnungen mit der Finite-Elemente-Methode .....	118
6.2.1	Modell und Randbedingungen .....	118
6.2.2	Materialverhalten .....	120
6.2.3	Ergebnis der Temperaturfeldberechnung .....	121
6.2.4	Belastung für die mechanische Analyse .....	123
6.2.5	Ergebnisse der mechanischen Analyse .....	123
7	ZUSAMMENFASSUNG .....	128
8	LITERATUR.....	132
	Tabellen .....	A1-A45
	Bilder.....	B1-B76

## **1 ALLGEMEINES**

### **1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung**

Es gibt drei bedeutende Mauerwerk-Außenwandkonstruktionen: die einschalige, geputzte Außenwand, die zweischalige Außenwand mit Kerndämmung und das Wärmedämmverbundsystem auf Mauerwerk. Während bei der zweischaligen Außenwand und der Konstruktion mit Wärmedämmverbundsystem die Funktionen der Außenwand von den einzelnen Konstruktionsschichten weitgehend getrennt zu erfüllen sind, muss dies bei der einschaligen Außenwand ausschließlich durch das Mauerwerk bzw. den Außenputz (Witterungsschutz) erfolgen. Durch die ständige Weiterentwicklung der Mauerwerkbaustoffe, auch hinsichtlich höherer Wärmedämmung – es werden heute Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit von  $0,09 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  und weniger erreicht – kann auch mit der einschaligen Außenwand bei wirtschaftlicher Wanddicke von 300 bzw. 365 mm eine sehr hohe Wärmedämmung erreicht werden, die den heutigen Anforderungen genügt. Der große Vorteil der einschaligen Außenwand gegenüber den anderen beiden Konstruktionen ist die deutlich geringere Ausführungsempfindlichkeit. In Zeiten abnehmender fachlicher Qualifikation des ausführenden Personals verstärkt dieser Vorteil die Bedeutung der einschaligen, geputzten Außenwand aus Mauerwerk. Wichtig ist, dass der Außenputz als „Haut“ des Gebäudes einen dauerhaften Witterungsschutz (insbesondere Feuchteschutz) gewährleistet. Dies ist grundsätzlich durch die Anwendung von wasserabweisend eingestellten Außenputzen gegeben. Allerdings dürfen sich im Außenputz keine im Hinblick auf die Funktion des Putzes schädlichen Risse bilden, also Risse, durch die Feuchtigkeit von außen in den Putzgrund eindringen kann. Ursache für schädliche Risse kann beispielsweise eine nicht geeignete Abstimmung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Putz und Mauerwerk sein.

Zur Abstimmung von Putz und Putzgrund existiert eine Näherungsgleichung, mit welcher der so genannte Risssicherheitskennwert ( $K_R$ ), vgl. /SCH93/ berechnet werden kann. Der Herleitung dieses Risssicherheitskennwertes liegen jedoch zahlreiche Vereinfachungen zugrunde. So entspricht der Risssicherheitskennwert dem Verhältniswert von Zugfestigkeit der Außenputze und der infolge von Temperaturdehnungen und Schwinden unter Annahme einer vollständigen Dehnungsbehinderung im Putz entstehenden Zugspannungen. Der Einfluss des Spannungsabbaus durch Relaxation wird vereinfachend durch eine zeitunabhängige Relaxationszahl berücksichtigt. Aus derzeitiger Sicht kann dieser Ansatz lediglich als grobe Näherung angesehen werden, da der Einfluss der zeitlichen Entwicklung

der mechanischen Eigenschaften und des Schwindens auf die entstehenden Zugspannungen nicht berücksichtigt ist. Ferner bleiben Eigenspannungen in der Putzschicht, die aus unterschiedlichen Formänderungen über die Putzdicke resultieren, wie z. B. dem ungleichmäßigen Schwinden des Putzes infolge Austrocknen über die Putzoberfläche, und auch das Nachbruchverhalten der Putze unberücksichtigt. Außerdem wird die zeitliche Entwicklung der Materialeigenschaften nicht erfasst.

Der zuvor genannte  $K_R$ -Wert wurde in /SCH04/ um ein zusätzliches Kriterium erweitert, bei dem die bei Rissbildung frei werdenden Zugkräfte im Putz mit der durch den Putzgrund aufnehmbaren Zugkraft verglichen werden. Diese Zugkraft wird nach /SCH04/ bei Lochsteinen näherungsweise vom Außenscherben aufgenommen. Voraussetzung für diese Betrachtung ist, dass in der gesamten Wand zentrische Zugspannungen aus dem Schwinden des Putzes entstehen. Ferner liegt dem Kriterium die Annahme zugrunde, dass schädliche Risse nur dann entstehen, wenn der Putzgrund nicht in der Lage ist, die entstehenden Risse fein zu verteilen. Diese Annahme ist jedoch nicht wirklichkeitsnah, da davon auszugehen ist, dass im Bereich der Rissflanken ein Versagen des Haftverbundes zu einer „Entlastung“ des Putzgrundes führt.

Aufgrund der o. g. Vereinfachungen liegen zur Abstimmung von Putz und Putzgrund derzeit keine zutreffenden Ansätze vor, mit denen die Rissicherheit von Außenputzen sicher beurteilt werden kann. Demzufolge kann auch nicht realistisch beurteilt werden, welche Auswirkungen ein verspätetes Schwinden durch einen feuchten Putzgrund auf die Rissicherheit hat, obwohl sich der Erkenntnisstand darüber, wie sich der Feuchtezustand des Putzgrundes auf die wesentlichen mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Außenputzen auswirkt, durch die Forschungsarbeit /SCH02/ erheblich erweitert und verbessert hat.

## **1.2 Forschungsziel**

Das ursprüngliche Ziel des Forschungsprojektes war, den Einfluss von Verformungen des Putzgrundes durch Temperatureinwirkungen und irreversible Quellen der Mauersteine auf die Rissicherheit von Außenputzen auf Ziegelmauerwerk näher zu untersuchen. Ferner sollten auch die Auswirkungen einer nicht regelgerechten Ausführung des Putzgrundes auf die Rissicherheit von Außenputzen untersucht werden. Auf Grundlage der

Untersuchungsergebnisse sollte dann ein praxisgerechter Kriterien- und Maßnahmenkatalog für die gezielte Abstimmung von Putz und Putzgrund erarbeitet werden.

Während der Bearbeitung des Projektes wurde jedoch in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss vereinbart, den Einfluss des irreversiblen Quellens des Putzgrundes und dessen mangelhafte Ausführung nicht näher zu untersuchen. Ferner war es wegen der Vielzahl der Einflussgrößen – und damit der erheblichen Komplexität der Fragestellung – auf Grundlage der bisherigen und der durchgeführten Untersuchungen nicht möglich, einen praxisgerechten Kriterien- und Maßnahmenkatalog zu erarbeiten.

### **1.3 Lösungsweg**

Das Projekt wurde in drei Teilen bearbeitet.

Im ersten Bearbeitungsteil wurden die wesentlichen Materialeigenschaften der im Projekt verwendeten Hochlochziegel und Außenputze ermittelt. Dabei wurden sowohl die grundlegenden Normkennwerte, um die verwendeten Materialien eingruppiert zu können, als auch alle für die Simulation der Beanspruchung von Putzen auf Putzgrund mit der Finite-Elemente-Methode erforderlichen Parameter bestimmt. Die Untersuchungen wurden an Hochlochziegeln und daraus entnommenen Prüfkörpern sowie an vom Putzgrund entnommenen Putzprismen durchgeführt. Um die Putzprismen weitgehend „ungestört“ vom Putzgrund entnehmen zu können, wurde ein neues Herstellverfahren entwickelt. Die Untersuchungen sind in den Abschnitten 3 und 4 beschrieben.

Im zweiten Bearbeitungsteil wurden Versuche an Wänden zur Validierung der im Rahmen der Simulationen im dritten Bearbeitungsteil verwendeten Finite-Elemente-Modelle durchgeführt. Bei diesen Wandversuchen wurden zunächst die Schwindverformungen auf der Putzoberfläche ermittelt. Nachdem das Schwinden des Putzes weitgehend abgeschlossen war, wurden die Wände einer zyklischen Temperaturbeanspruchung unterzogen. Die Bearbeitung des dritten Bearbeitungsteils erfolgte weitgehend zeitparallel mit den praktischen Untersuchungen an Wänden. Die Untersuchungen im Rahmen der Bearbeitungsteile zwei und drei sind im Abschnitt 6 beschrieben.

## 1.4 Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen (KMU)

In der Praxis führen eine falsche Abstimmung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Putz und Putzgrund häufig zu schädlichen Rissen, durch welche die Funktion des Außenputzes als Witterungsschutz beeinträchtigt wird. Mit den durchgeführten Untersuchungen wurden grundlegende Erkenntnisse gewonnen, mit denen eine weitergehende Abstimmung von Putz und Putzgrund möglich ist. So konnte mit Versuchen an Wänden gezeigt werden, dass die Breite entstehender Risse durch eine Abstimmung der Steifigkeiten von Putz und Putzgrund beeinflusst werden kann. Dadurch tragen die Ergebnisse dazu bei, dass schädliche Risse in Außenputzen auf leichten Hochlochziegeln, welche für stark wärmedämmendes, einschaliges Mauerwerk verwendet werden, weitergehend als bislang vermieden werden können.

## 2 VERWENDETE MATERIALIEN

Für die Untersuchungen wurden drei verschiedene, handelsübliche Planhochlochziegel mit unterschiedlichen Steifigkeiten ausgewählt. Dadurch sollte ein möglichst großer Bereich an mechanischen Materialeigenschaften untersucht werden. Folglich wurden ausgewählt:

- T16 nach der bauaufsichtlichen Zulassung Z-17.1-490 /BAZ05/,
- SX+ nach Zulassung Z-17.1-738 /BAZ06a/,
- T9 nach Zulassung Z-17.1-674 /BAZ06b/.

Alle Planhochlochziegel hatten eine Steinbreite von 365 mm. Die Ziegel sind in den Bildern B1 bis B3 dargestellt.

Als Außenputze wurden analog zu den Hochlochziegeln drei handelsübliche Außenputze mit möglichst unterschiedlichen Steifigkeiten bzw. Festigkeiten ausgewählt:

- Normalputz NP der Druckfestigkeitskategorie CS III nach DIN EN 998-1 /DIN03c/ (vgl. Abschnitt 4.2),
- Leichtputz LP der Druckfestigkeitskategorie CS II,
- faserbewehrter Ultraleichtputz ULP der Druckfestigkeitskategorie CS I.

### 3 UNTERSUCHUNGEN AN DEN HOCHLOCHZIEGELN

#### 3.1 Praktische Untersuchungen

##### 3.1.1 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm ist in der Tabelle 1 zusammengestellt. Die Untersuchungen wurden sowohl an ganzen Mauersteinen als auch an damit hergestellten Prüfkörpern sowie an aus den Mauersteinen entnommenen Prüfkörpern durchgeführt.

Tabelle 1: Versuchsprogramm für die Untersuchungen an Hochlochziegeln

Prüfung/Bestimmte Kenngrößen	Prüfkörper	Beschreibung der Prüfung in Abschnitt
1	2	3
Normeigenschaften		3.1.2.1
- Planparallelität, Ebenheit und Druckfestigkeit	je 5 Mauersteine	
- Trockenrohddichte		
- Lochanteil	je 3 Mausteine	
Zugversuche am Außenscherben in Richtung Steinhöhe und -länge	je 15 Prismen aus dem Außenscherben ( $l \cdot b \cdot h = 200 \cdot 40 \cdot d_s^1$ mm <sup>3</sup> )	3.1.2.2
Zugversuche an ganzen Mauersteinen in Richtung Steinhöhe und -länge	je 5 Prüfkörper aus 3 miteinander verklebten Mauersteinen	3.1.2.3
Druckbeanspruchung des Außenscherbens in Richtung Steinhöhe und -länge	je 5 Mauersteine des T16 und SX+ (jeweils nur Steinlänge) und des T9	3.1.2.4
Kapillare Wasseraufnahme über die Putzfläche	je 3 Mauersteine	3.1.2.5
Wärmedehnungskoeffizient in Richtung Steinhöhe und -länge	je 3 Prismen aus dem Außenscherben ( $l \cdot b \cdot h = 160 \cdot 40 \cdot d_s^1$ mm <sup>3</sup> )	3.1.2.6
Feuchtedehnung in Richtung Steinhöhe und -länge im Normalklima 20 °C, 65 % rel. Feuchte	je 3 Prismen aus dem Außenscherben ( $l \cdot b \cdot h = 160 \cdot 40 \cdot d_s^1$ mm <sup>3</sup> )	3.1.2.7
Porengrößenverteilung	je Mauerstein 1 Probe	3.1.2.8

1)  $d_s$  entspricht der Dicke des Außenscherbens

## 3.1.2 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

### 3.1.2.1 Normeigenschaften

Die Prüfung von Planparallelität, Ebenheit und Druckfestigkeit erfolgte an jeweils fünf Mauersteinen in Anlehnung an die jeweilige bauaufsichtliche Zulassung. Zur Prüfung der Druckfestigkeit wurden die Planziegel mit Zementmörtel abgeglichen. Die Prüfgeschwindigkeit wurde so eingestellt, dass die Maximallast nach etwa 60 bis 90 Sekunden erreicht werden sollte. Die Trockenrohichte wurde ebenfalls in Anlehnung an die jeweilige bauaufsichtliche Zulassung geprüft. Daher wurde beim T9 zur Prüfung die Perlite-Füllung entnommen.

Die Versuchsergebnisse Planparallelität  $\Delta h$ , Ebenheit  $w$ , Länge  $l$ , Breite  $b$ , Höhe  $h$ , Rohdichte im lufttrockenen Zustand  $\rho_l$ , Trockenrohichte  $\rho_d$  und Druckfestigkeit  $\beta_{D,st}$  sind in den Tabellen A1 bis A6 zusammengestellt. Die Anforderungen an die Planparallelität und Ebenheit nach der jeweiligen bauaufsichtlichen Zulassung von 1,0 mm sind bei allen Planziegeln erfüllt. Die Anforderungen an die Maßspanne werden mit Ausnahme der Mauersteinhöhe des T9 bei allen Ziegeln eingehalten. Ferner ist die Mauersteinhöhe des T16 und des SX+ etwas kleiner als in der bauaufsichtlichen Zulassung angegeben (Sollwert: 249 mm). Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse sind die Hochlochziegel folgenden Druckfestigkeits-/Rohdichteklassen zuzuordnen:

- T16: 12 / 0,8,
- SX+: 6 / 0,6,
- T9: 4 / 0,6.

Die Lochgeometrie und der Lochanteil der Hochlochziegel wurden mit Hilfe von Bildanalysen bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle A7 zusammengestellt. Der Lochanteil beträgt beim T16 zwischen 48,0 und 48,4 %, beim SX+ zwischen 47,4 und 51,6 % sowie beim T9 zwischen 57,5 und 63,9 %.

### 3.1.2.2 Zugversuche am Außenscherben

Zur Bestimmung der Spannungs-Dehnungslinien der Außenscherben, aus denen der E-Modul der Mauersteinmaterialien als Eingangswert für die Finite-Elemente-Simulationen in Abschnitt 3.2 abgeleitet wurde, wurden aus jeweils fünf Planziegeln jeweils drei Probekörper in Richtung Steinhöhe und Richtung Steinlänge trocken ausgesägt. Dabei wurden

die Prismen immer aus dem mittleren Bereich der Außenscherben entnommen. Die Prismen hatten eine Länge von etwa 200 mm und eine Breite von etwa 40 mm. Die Dicke der Probekörper, im Folgenden mit Höhe bezeichnet, entsprach der Außenscherbendicke. Nach der Entnahme wurden die Prüfkörper gemessen und gewogen. Anschließend wurde bei den in Richtung Steinlänge entnommenen Prüfkörpern Bildauswertungsanalysen im mittleren Bereich der Probenlänge durchgeführt, um den Einfluss der Putzrillen näherungsweise berücksichtigen zu können. Nach Versuchsdurchführung wurden ferner die Maße der Bruchflächen ermittelt.

Die Prüfung der Prismen erfolgte mit dem in Bild 1 dargestellten Prüfaufbau. Die zur Lasteinleitung in den Prüfkörper verwendeten Stahllaschen wurden mit Hilfe des Zwei-Komponenten-Klebers Ardipox in einer speziellen Stahlschalung appliziert. Die Probenlänge zwischen den applizierten Laschen betrug 120 mm. Die Messlänge der zur Ermittlung der Verformungen verwendeten angeklebten Wegaufnehmer des Typs DD1 betrug 50 mm. Die Prüfgeschwindigkeit wurde so eingestellt, dass die Maximallast innerhalb von etwa 60 bis 90 Sekunden erreicht werden sollte.

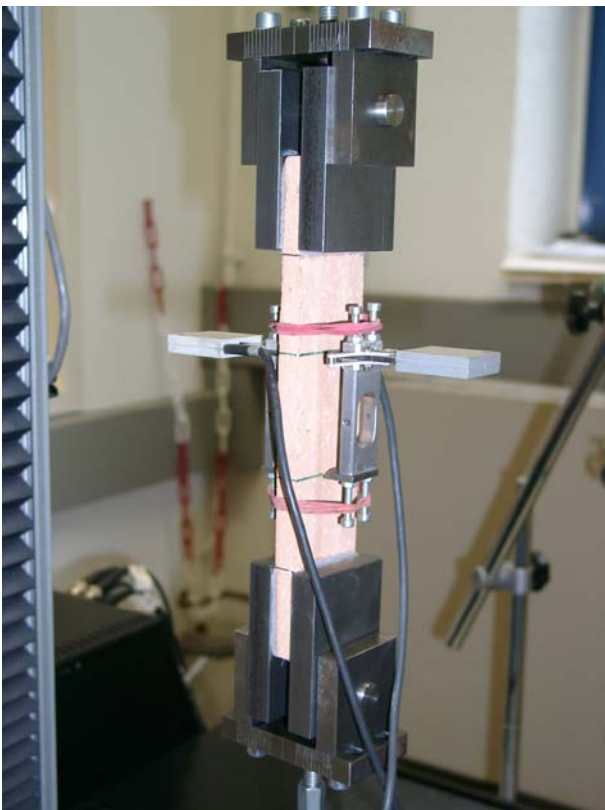


Bild 1: Prüfaufbau

Die Prüfergebnisse Länge  $l$ , Breite  $b$  und Höhe  $h$ , Rohdichte im lufttrockenen Zustand  $\rho_1$ , Zugfestigkeit  $\beta_z$ , E-Modul  $E_{z,33}$  und die Dehnungen  $\varepsilon_z$  bei 33, 66 und 100 % der Zugfestigkeit sind in den Tabellen A8 bis A13 zusammengestellt. Bei den in Richtung Steinlänge entnommenen Prismen entsprechen die in den Tabellen angegebenen Werte für  $h$  der mittels Bildanalyse ermittelten effektiven Dicke zur Bestimmung des E-Moduls.

In den Bildern B4 und B5 sind die Zugfestigkeitswerte und die E-Moduln für die verschiedenen Planziegel und Entnahmerichtungen gegenübergestellt. Grundsätzlich ist die Zugfestigkeit des Scherbens in Richtung Steinlänge kleiner als in Richtung Steinhöhe. Dies ist vermutlich weitgehend auf den Einfluss der Putzrillen zurückzuführen. Da der Werkstoff Ziegel kerbempfindlich ist, führen die durch die Putzrillen verursachten Spannungskonzentrationen zu einer geringeren Zugfestigkeit. Ferner ist die Zugfestigkeit verursacht durch den Strangpressvorgang in Richtung Steinhöhe (in Pressrichtung) größer als in Richtung Steinlänge. Ein weiterer Einfluss könnte aus der stärkeren Krümmung der in Richtung Steinlänge entnommenen Probekörper resultieren. Die Zugfestigkeit der Außenscherben des T16 und des SX+ sind näherungsweise gleich groß, die Zugfestigkeit des T9 ist deutlich kleiner als die der beiden anderen Ziegel.

Analog zur Zugfestigkeit ist auch der E-Modul abhängig von der Entnahmerichtung (s. Bild B5). So ist der E-Modul bei allen Ziegeln in Richtung Steinhöhe größer als in Richtung Steinlänge. Ursachen dafür sind möglicherweise der o. a. Einfluss des Strangpressvorgangs und die stärkere Krümmung des Scherbens in der Entnahmerichtung Steinlänge. Ferner wird der E-Modul aber auch durch die Putzrillen beeinflusst, die hier näherungsweise durch Bestimmung einer mittleren Dicke des Außenscherbens mittels Bildanalyse berücksichtigt wurden.

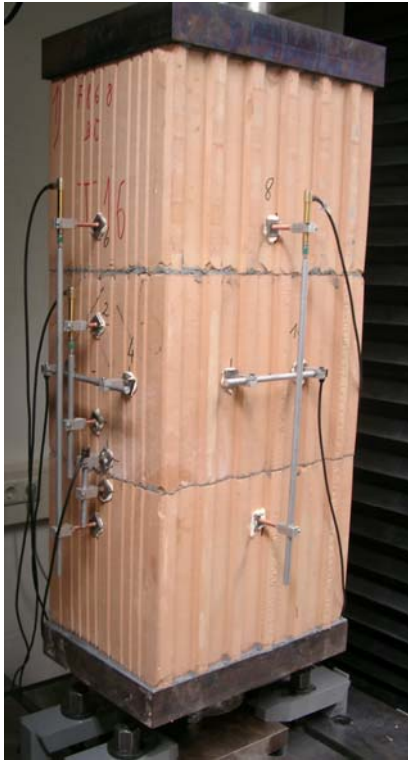
Die Unterschiede zwischen den E-Moduln der Außenscherben der verschiedenen Ziegel sind größer als bei der Zugfestigkeit. So wurden die größten E-Moduln beim T16 mit  $14.580 \text{ N/mm}^2$  (Richtung Steinhöhe) und  $10.380 \text{ N/mm}^2$  (Richtung Steinlänge) bestimmt. Beim SX+ sind die E-Moduln mit  $11.350 \text{ N/mm}^2$  (Richtung Steinhöhe) und  $9.500 \text{ N/mm}^2$  (Richtung Steinlänge) kleiner. Die kleinsten E-Moduln ergaben sich beim T9 mit  $8.860 \text{ N/mm}^2$  (Richtung Steinhöhe) und  $5.680 \text{ N/mm}^2$  (Richtung Steinlänge).

### **3.1.2.3 Zugversuche an ganzen Mauersteinen in Richtung Steinhöhe und -länge**

Mit den Zugversuchen an ganzen Mauersteinen wurden die E-Moduln der Hochlochziegel bei einaxialer Zugbeanspruchung bestimmt, um die Finite-Elemente-Modelle zur Ableitung von Kennwerten der Hochlochziegel (s. Abschnitt 3.2) zur Simulation von geputzten Wänden zu validieren. Die Versuche erfolgten sowohl bei Beanspruchung in Richtung Steinhöhe und Steinlänge an jeweils fünf Prüfkörpern. Zur Gewährleistung einer möglichst geringen Beeinflussung der Verformungsmessungen an den Plansteinen infolge des Lasteintrags wurden Prüfkörper verwendet, bei denen drei Mauersteine mit Hilfe des Zwei-Komponenten-Klebers Ardipox zusammengefügt wurden. Dadurch wiesen die Prüfkörper eine Schlankheit von etwa  $l/b \approx 2$  auf. Die Prüfkörper sowie die Messstrecken sind in den Bildern B6 bis B11 dargestellt. Gemessen wurden die Verformungen sowohl in Beanspruchungsrichtung als auch quer dazu, wobei die Messungen in Beanspruchungsrichtung sowohl im mittleren Bereich über einen Mauerstein als auch über mehrere Mauersteine durchgeführt wurden. Der bei den längeren Messstrecken vorhandene Einfluss der Klebefugen wurde bei der Auswertung mit Hilfe von Verformungsmessungen im Bereich der Klebefugen berücksichtigt.

Die Messstellen zur Bestimmung der Verformungen wurden mit dem Zwei-Komponenten-Kleber X60 appliziert. Die Verformungsmessungen erfolgten mit induktiven Wegaufnehmern (s. Bild 2).

Beanspruchung Richtung Steinhöhe



Beanspruchung Richtung Steinlänge

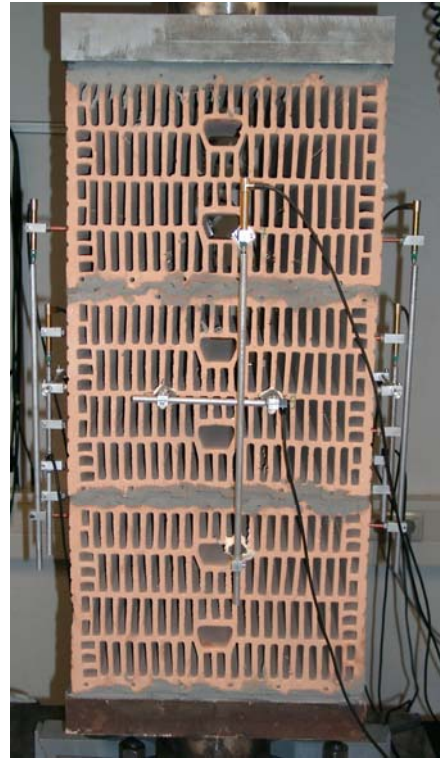


Bild 2: Prüfkörper aus dem T16

Zur Lasteinleitung wurden auf die Enden der Probekörper Stahlplatten mit Hilfe des Klebers Ardipox appliziert. Bei den in Richtung Steinlänge belasteten Prüfkörpern wurden die Nuten der Plansteine vor dem Applizieren der Stahlplatten mit Ardipox ausgeglichen.

Die Prüfkörper wurden gelenkig an die Prüfmaschine angeschlossen und kraftregelt bis zum Bruch belastet. Die Prüfungsgeschwindigkeit wurde so eingestellt, dass die Maximallast innerhalb von 60 bis 90 Sekunden erreicht werden sollte.

Bei der Auswertung der Versuche ergab sich, dass die Messungen zur Ermittlung der Querdehnung keine plausiblen Werte für die Querdehnrzahl ergaben. Vermutlich ist dies einerseits auf die geringe Größe der Verformungen quer zur Beanspruchungsrichtung und andererseits auf den Einfluss der Krümmung des Außenscherbens zurückzuführen. Ferner ist auch davon auszugehen, dass der Spannungszustand innerhalb des Querschnittes der Planziegel infolge der Lochstruktur nicht homogen ist und daraus nicht homogene Verformungen resultieren.

Da möglichst für den gesamten Ziegel repräsentative E-Moduln abgeleitet werden sollten, wurden vornehmlich die E-Moduln mit Hilfe der Verformungsmessungen über die längeren Messstrecken (Messstrecken 5 bis 8, vgl. Bilder B6 bis B11) ermittelt. Die so bestimmten E-Moduln sind im Bild B12 für die verschiedenen Mauersteine und Beanspruchungsrichtungen dargestellt. Bei den in Richtung Steinlänge beanspruchten Planziegeln SX+ konnte kein plausibler Mittelwert für den E-Modul abgeleitet werden. Vermutlich ist dies auf die in den Stegen vorhandenen Risse zurückzuführen, die die Stege im Mauerstein deutlich geschädigt haben dürften.

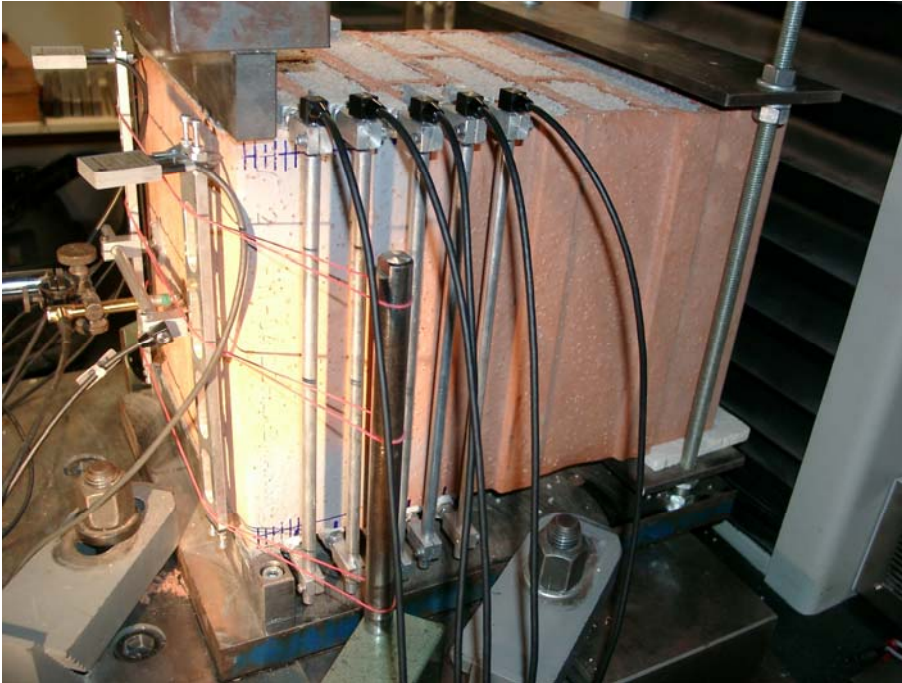
Wie dem Bild B12 zu entnehmen ist, unterscheiden sich die E-Moduln in Richtung Steinhöhe und Steinlänge infolge der Lochstruktur der Planziegel deutlich. Ebenso weisen die verschiedenen Ziegel unterschiedlich große E-Moduln auf. So ergaben sich beim T16 erwartungsgemäß die höchsten E-Moduln mit  $7.280 \text{ N/mm}^2$  in Richtung Steinhöhe und  $4.460 \text{ N/mm}^2$  in Richtung Steinlänge. Beim SX+ und beim T9 sind die E-Moduln mit  $4.520 \text{ N/mm}^2$  und  $3.890 \text{ N/mm}^2$  kleiner.

Wird unter Ansatz des in Abschnitt 3.1.2.1 aufgeführten Lochanteils und dem E-Modul der Scherben aus Abschnitt 3.1.2.2 der E-Modul des Bruttoquerschnitts für die Beanspruchungsrichtung Steinhöhe abgeschätzt, ist dieser beim T16 mit  $7.640 \text{ N/mm}^2$  und beim SX+ mit  $5.740 \text{ N/mm}^2$  etwas größer als bei den Untersuchungen an den ganzen Mauersteinen (T16:  $7.280 \text{ N/mm}^2$ , SX+:  $4.520 \text{ N/mm}^2$ ). Beim T9 ist der berechnete E-Modul mit  $3.540 \text{ N/mm}^2$  etwas kleiner ( $3.890 \text{ N/mm}^2$ ). Ein möglicher Grund für die Unterschiede ist, dass der Querschnitt der Ziegel im Versuch nicht, wie bei der Abschätzung unterstellt, eben bleibt. Eine weitere mögliche Ursache sind Risse im Mauersteinmaterial.

#### **3.1.2.4 Druckbeanspruchung des Außenscherbens**

Ziel der Druckbeanspruchung des Außenscherbens war wie bei den Zugversuchen an ganzen Steinen (s. Abschnitt 3.1.2.3), die zur Ableitung von Kennwerten für die Hochlochziegel (s. Abschnitt 3.2) zur Simulation von geputzten Wänden verwendeten Finite-Elemente-Modelle zu validieren. Die Beanspruchung der Außenscherben erfolgte über Stahlleisten, deren Breite beim Planziegel T16 13 mm, beim SX+ 11 mm und beim T9 15 mm betrug. Diese Breiten waren so gewählt, dass die Auflast zentrisch in den Außenscherben einleitet wurde. Der Versuchsaufbau ist in Bild 3 dargestellt.

Die Ziegel wurden zunächst in der Prüfmaschine ausgerichtet. Anschließend wurden die verwendeten Leisten in der Prüfmaschine mit dem Zwei-Komponenten-Klebstoff Ardipox auf dem Ziegel appliziert, um Unebenheiten der Planziegel auszugleichen.



**Bild 3:** Versuchsaufbau zur Bestimmung der Steifigkeit des Außenscherben unter Druckbeanspruchung  
Planziegel T9, Beanspruchung Richtung Steinhöhe

Im Versuch wurden dann die infolge der Auflast auftretenden Verformungen in verschiedenen Abständen vom Außenscherben ermittelt (s. Bild 3).

Bis zu einem Abstand von etwa 30 mm von der Putzfläche erfolgten die Verformungsmessungen berührungslos mit Hilfe einer Video-Messeinrichtung, die speziell auf den Versuchsaufbau angepasst wurde. Dazu wurden im vorderen Bereich auf einer Seite der Mauersteine in Abständen von jeweils 5 mm Messkreuze aufgezeichnet. Um einen guten Kontrast zwischen Messkreuz und Ziegel zu gewährleisten, wurden die Ziegel in diesem Bereich vorab mit einer grauen Farbe besprüht.

Ab einem Abstand von 30 mm von der Putzfläche wurden die Verformungen auf beiden Seiten der Mauersteine mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern und angeklebten Wegaufnehmern des Typs DD1 bestimmt. Die gewählten Abstände von der Putzfläche sind in der Tabelle 2 zusammengestellt. Ferner wurden die Verformungen auch auf der

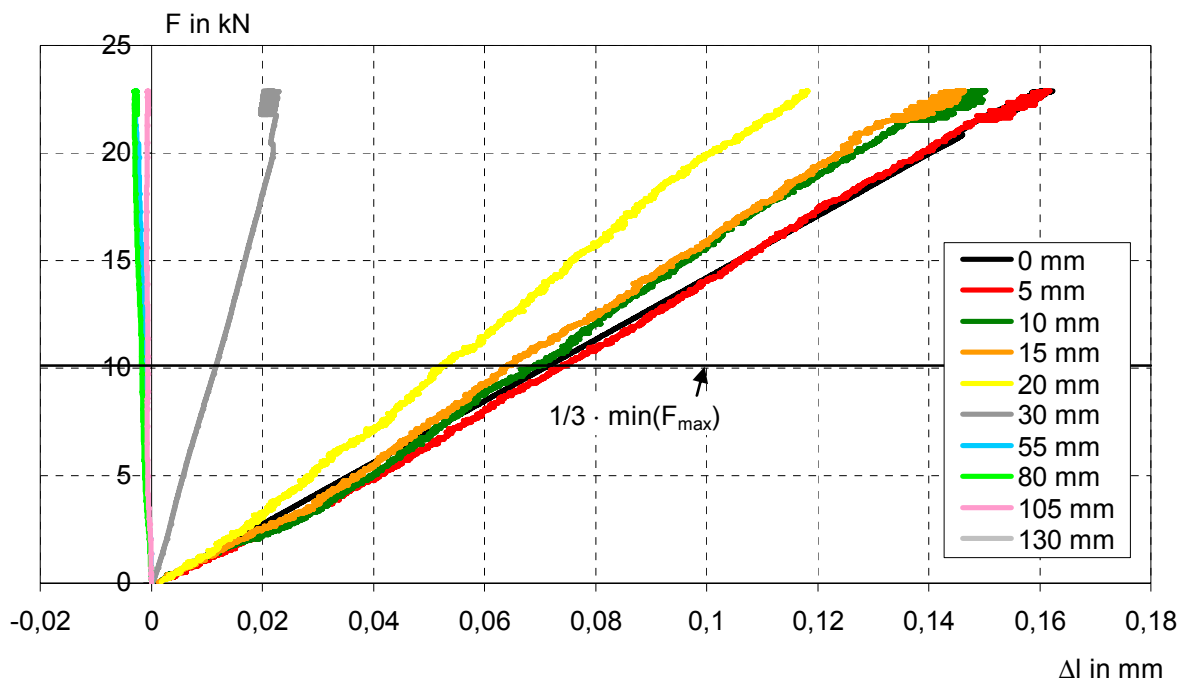
Putzfläche sowohl in Belastungsrichtung als auch quer dazu mit angeklebten Wegaufnehmern des Typs DD1 ermittelt.

**Tabelle 2:** Verformungsmessungen an den Planziegeln mit induktiven Wegaufnehmern und Wegaufnehmern des Typs DD1

Ziegel	Beanspruchungsrichtung	Abstand von der Putzfläche
-	-	mm
1	2	3
T16	Steinlänge	30, 55, 80, 105 und 130
SX+	Steinlänge	45, 75, 105 und 135
T9	Steinhöhe	30, 55, 80, 105 und 130
	Steinlänge	

Die Versuche wurden mit einer konstanten Verformungsrate der Traverse durchgeführt. Dabei wurde die Prüfgeschwindigkeit so gewählt, dass das Versagen nach etwa 20 bis 30 Minuten eintrat, wodurch gewährleistet werden sollte, dass eine möglichst umfangreiche Datenbasis zur Auswertung der Verformungsmessungen mit der Video-Analyse zur Verfügung stand.

Die Verformungen nahmen grundsätzlich bei allen Ziegeln bis zu einer Auflast von etwa 33 % und teilweise darüber hinaus linear mit der Auflast zu (s. Bild 4 sowie Bilder B13 bis B15). Um eine möglichst einfache Darstellung für die mit zunehmendem Abstand von der Putzfläche abklingenden Verformungen zu ermöglichen, wurden separat für jede Ziegelsorte und Beanspruchungsrichtung die Verformungen bei 33 % der kleinsten Maximallast in den jeweiligen Versuchen ausgewählt (linearer Bereich der Last-Verschiebungskurve, s. z. B. Bild 4). Diese Verformungen wurden auf die vorgenannten 33 % der kleinsten Maximallast bezogen. Das Ergebnis dieser Auswertung wurde mit  $\Delta l'$  bezeichnet und entspricht vom Prinzip her dem Kehrwert einer Steifigkeit, da das Multiplizieren des Ergebnisses mit einer bestimmten Auflast die korrespondierende Verformung ergibt. Dabei wurden die Last-Verformungskurven für die jeweils untersuchten fünf Planziegel einer Sorte gemittelt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Bildern B16 bis B19 dargestellt. Ebenfalls dargestellt sind die mit Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode ermittelten Verformungen, vgl. Abschnitt 3.2.



**Bild 4:** Auflast  $F$  in Abhängigkeit der Verformungen  $\Delta l$  in verschiedenen Abständen von der Putzfläche bei Beanspruchung in Richtung Steinlänge Hochlochziegel T16 (Mittelwert aller Prüfkörper, nur linearer Bereich)

Dem Bild B16 ist zu entnehmen, dass die in den Außenscherben in Richtung Steinlänge eingeleitete Auflast beim T16 im Versuch in einem Abstand von 55 mm nur noch unwesentliche Verformungen im Planziegel verursacht. Beim SX+ wurden im Unterschied dazu noch bis zu einem Abstand von 135 mm von der Putzfläche Verformungen infolge der Auflast ermittelt (s. Bild B17). Dies ist vermutlich Folge der feineren Lochstruktur des SX+. Die Beanspruchungsrichtung Steinhöhe wurde beim T16 und SX+ aufgrund des hohen Versuchsaufwandes und der guten Übereinstimmung von Simulation (s. Abschnitt 3.2) und Versuchen nicht untersucht. Die Verformungen beim T9 klingen bei Beanspruchung in Richtung Steinhöhe bis zu einem Abstand von etwa 80 mm und bei Beanspruchung in Richtung Steinlänge bis zu einem Abstand von 105 mm weitgehend ab (vgl. Bilder B18 und B19).

### 3.1.2.5 Kapillare Wasseraufnahme über die Putzfläche

Die kapillare Wasseraufnahme über die Putzfläche wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 15148:2003-03 /DIN03b/ an jeweils drei Planziegeln ermittelt. Dazu wurden die Planziegel zunächst bis zur Massekonstanz bei 105 °C getrocknet. Anschließend kühlten die

Mauersteine für 24 Stunden im Normalklima 20 °C und 65 % rel. Feuchte. ab und wurden an den Lager- und Stoßfugenflächen abgedichtet. Die Prüfung wurde danach in dem vorgenannten Klima durchgeführt. Die Eintauchtiefe des Außenscherbens in das Wasserbad betrug zwischen 5 und 7 mm. Sowohl vor dem Eintauchen als auch nach 5, 10 und 30 Minuten sowie 1, 2, 3, 4, 5, 6 und 24 Stunden im Wasserbad wurden die Prüfkörper gewogen.

Die Entwicklung der Wasseraufnahme  $W$  ist in Bild B20 dargestellt. Die aus den Versuchsergebnissen abgeleiteten mittleren Werte für den Wasseraufnahmekoeffizienten betragen  $W_W = 7,8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$  beim T16,  $W_W = 6,7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$  beim SX+ und  $W_W = 3,6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$  beim T9.

### 3.1.2.6 Temperaturdehnungskoeffizient

Die Ermittlung des Temperaturdehnungskoeffizienten erfolgte an jeweils drei in Richtung Steinhöhe und -länge aus den Außenscherben von drei Planziegeln trocken ausgesägten Prismen. Die Prismen hatten eine Länge von 160 mm und eine Breite von 40 mm und lagerten nach der Entnahme für 4 Wochen im Normalklima 20 °C und 65 % rel. Feuchte.

Bei der Vorbereitung der Prismen wurden zunächst auf die Ober- und Unterseite der Prismen Messmarken in einem Abstand von 100 mm für Verformungsmessungen mit einem Setzdehnungsmesser mit dem Zwei-Komponenten-Klebstoff X60 appliziert. Anschließend wurden die Prismen mehrfach mit Aluminiumfolie umwickelt und mit einem Dichtstoff abgedichtet, um eine Änderung des Feuchtegehaltes während der Untersuchungen zu vermeiden.

Die Probekörper wurden in einem temperaturgeregelten Klimaschrank geprüft. Die Temperaturen wurden in einem Bereich von -20 °C bis 60 °C mit einer Schrittweite von 10 K variiert. Die Temperaturstufen wurden jeweils 2 Tage konstant gehalten, wobei die Messungen der Längenänderungen mit einem Setzdehnungsmesser (Skalenteilung 1/1000 mm) an jedem Tag durchgeführt wurden. Gleichzeitig mit den Verformungsmessungen wurden auch die Massen der Prismen bestimmt.

Die ermittelten Temperaturdehnungen sind in den Bildern B21 bis B26 in Abhängigkeit von der Differenz zur Ausgangstemperatur dargestellt. Die mit Hilfe von Regressionsanalysen bestimmten Temperaturdehnungskoeffizienten – es wurde ein linearer Zusammenhang

zwischen Temperatur- und Temperaturdehnung unterstellt –, sind in der Tabelle A14 zusammengestellt. Mit Ausnahme des SX+ unterscheiden sich die Temperaturdehnungskoeffizienten ermittelt für Steinhöhe und Steinlänge nur wenig. Vermutlich ist die größere Abweichung beim SX+ auf die etwas größere Krümmung des Scherbens bei der Entnahmerichtung Steinlänge zurückzuführen, aus der bei der Messung mit dem Setz-Dehnungsmesser Biegeverformungen resultieren können, welche das Messergebnis beeinflussen. Der Temperaturdehnungskoeffizient beträgt im Mittel  $6,31 \cdot 10^{-6}$  1/K beim T16,  $6,92 \cdot 10^{-6}$  beim SX+ und  $5,48 \cdot 10^{-6}$  beim T9. Diese Werte liegen in der Größenordnung des in /SCH06/ – allerdings für Mauerwerk aus Ziegeln – angegebenen Wertebereichs von 5 bis  $6 \cdot 10^{-6}$ .

Die Masseänderungen der Prismen waren in den Versuchen mit maximal 0,54 M.-% beim SX+ sehr gering, weshalb davon auszugehen ist, dass die Messergebnisse grundsätzlich nur wenig durch feuchtebedingte Längenänderungen beeinflusst wurden.

### 3.1.2.7 Feuchtedehnung

Die Feuchtedehnung der Planziegel bei Lagerung im Normalklima 20 °C und 65 % rel. Feuchte wurde an jeweils drei in Richtung Steinhöhe und -länge trocken aus dem Außenscherben von drei Planziegeln ausgesägten Prismen bestimmt. Die Prismen hatten eine Länge von 160 mm und eine Breite von 40 mm. Die Dicke der Prismen entsprach der Dicke des Außenscherbens. Ziel der Untersuchungen war, Eingangswerte für Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode zur Beanspruchung der Putzschicht durch Verformungen des Putzgrundes zu bestimmen.

Nach der Entnahme der Prismen wurden zunächst Masse und Maße bestimmt. Anschließend wurden auf die Enden der Prismen Schwindmesszapfen in Anlehnung an DIN 52450 /DIN85/ mit dem Zwei-Komponenten-Kleber X60 appliziert. Die Messungen der Längenänderungen wurden in der Regel nach 2, 4, 7, 14, 65, 90 und 190 Tagen sowie nach etwa 1 Jahr mit einem Messgerät nach DIN 52450 /DIN85/ mit fest eingebauter digitaler Messuhr (Anzeigegegenauigkeit 1/1000 mm) durchgeführt. Parallel zu den Längenänderungen wurden auch die Massen der Prüfkörper bestimmt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen Feuchtedehnung  $\varepsilon_f$  und Masseänderung  $\Delta m$  enthalten die Tabellen A15 bis A20. Die mittleren Feuchtedehnungen  $\varepsilon_f$  sind in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer  $t$  in Bild B27 dargestellt. Bei allen Planziegeln nehmen die Feuchte-

dehnungen während der Versuchsdauer zu und sind in Richtung Steinhöhe etwas größer als in Richtung Steinlänge. Bei Versuchsende betragen die mittleren Feuchtedehnungen 0,02 mm/m beim T16, 0,06 mm/m beim SX+ und 0,22 mm/m beim T9.

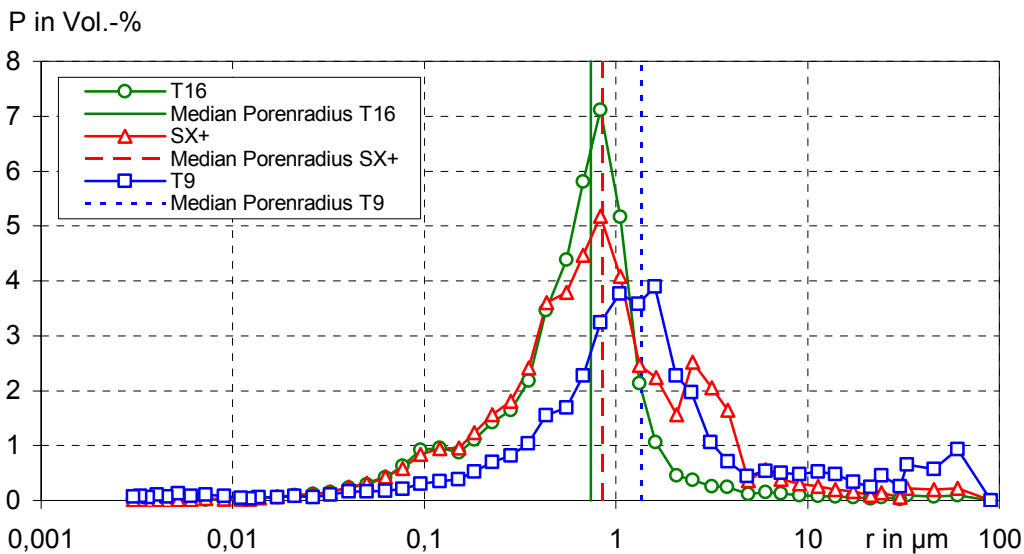
### 3.1.2.8 Untersuchungen zur Porengrößenverteilung

Die Untersuchungen zur Porengrößenverteilung wurden mit dem Ziel durchgeführt, das Porengefüge der Ziegelmaterialien näher zu charakterisieren und Feuchttransportvorgänge zwischen Putz und Ziegel besser interpretieren zu können. Die Bestimmung der Porengrößenverteilung erfolgte mittels Quecksilberdruckporosimetrie. Zunächst wurde je eine Probe aus je einem der verschiedenen Planziegel entnommen. Aus diesen Proben wurden jeweils zwei weitere Teilstücke entnommen und geprüft, d. h. es wurden Doppelbestimmungen durchgeführt. Vor der Prüfung wurden die Probekörper zunächst bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Anschließend wurden die Untersuchungen mit dem Gerät AUTOPORE IV 9500 der Firma Micromeritics durchgeführt, mit dem ein Porengrößenbereich von 0,0003 bis 90 µm erfasst wird. Das Verfahren der Quecksilberdruckporosimetrie beruht darauf, dass Quecksilber als nicht benetzende Flüssigkeit nur unter äußerem Druck in die offenen Poren eines Festkörpers eindringt. Bei der Auswertung wird jedem äußeren Druck ein bestimmter Poreneingangsradius zugeordnet.

Ermittelt wurden die Porengrößenverteilung sowie die Kennwerte Porenvolumen  $P$ , Median des Porenradius  $r_m$  (Radius bei 50 % des Porenvolumens) und Rohdichte  $\rho_{HG}$ . Die Ergebnisse enthält Tabelle A21. Das Porenvolumen ist beim SX+ mit 48,7 Vol.-% am größten und beim T9 mit 38,5 Vol.-% am kleinsten. Der Median des Porenradius ist beim T9 mit 1,36 µm am größten und beim T16 mit 0,74 µm am kleinsten.

Die inkrementellen Porengrößenverteilungen für die untersuchten Proben – es wird der Porenanteil an der Gesamtporosität über die Porenradien in logarithmischem Maßstab aufgetragen – sind in den Bildern B28 bis B30 dargestellt. Die Summe der einzelnen dort dargestellten Anteile  $P$  der Porenradien entspricht dem jeweiligen gesamten Porenvolumen, das im Messbereich zugänglich war. Es ist deutlich zu erkennen, dass die jeweils durchgeführten zwei Messungen gut übereinstimmen.

Ein Vergleich der Porengrößenverteilungen – Mittel zwischen den beiden Messungen – ist in Bild 5 dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass das Porengefüge beim T16 und beim SX+ einen größeren Anteil an Kapillarporen ( $r \leq 1 \mu\text{m}$ ) aufweist als beim T9.



**Bild 5:** Anteil des Porenvolumens  $P$  in Abhängigkeit vom Porenradius  $r$

## 3.2 Theoretische Untersuchungen zur Ermittlung einer Ersatzsteifigkeit der Hochlochziegel

### 3.2.1 Einleitung

Die Hochlochziegel können im dreidimensionalen Finite-Elemente (FE)-Modell der Wände nicht mit ihrer Lochstruktur abgebildet werden, da die Zahl der Freiheitsgrade zu groß würde. Sie werden als homogenes Ersatzkontinuum betrachtet, dessen elastische Eigenschaften im Folgenden mittels Homogenisierung ermittelt werden. Es werden hierzu zwei FE-Modelle betrachtet: das Mikromodell, in dem ein einzelner Ziegel unter Berücksichtigung seiner Lochstruktur diskretisiert wird und das homogene Makromodell des Ersatzkontinuums.

### 3.2.2 Grundlagen der Homogenisierung

Das Ziel der Homogenisierung ist es, dem Mikromodell unter Berücksichtigung der Mikrostruktur, d. h. der Ortsabhängigkeit des Elastizitätstensors  $\mathbf{E}(\mathbf{x})$  entsprechend der Aufteilung des Volumens in die Phasen Ziegelscherben und Luft, einen effektiven Elastizitätstensor zuzuweisen, der zur Charakterisierung des Materials auf der Makroebene dient. Der effektive Elastizitätstensor  $\mathbf{E}_{\text{eff}}$  ist definiert als Relation zwischen den räumlichen Mittelwerten der Spannungs- und Verzerrungsfelder des Mikromodells

$$\langle \boldsymbol{\sigma} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}) dV \quad \text{bzw.} \quad \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}) dV \quad (1)$$

in der Form

$$\langle \boldsymbol{\sigma} \rangle = \mathbf{E}_{\text{eff}} : \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle. \quad (2)$$

Der effektive Elastizitätstensor  $\mathbf{E}_{\text{eff}}$  soll die Forderung nach der Gleichheit der Verzerungsenergie  $W$  erfüllen, wenn diese mittels der mikroskopischen Felder oder mit deren Mittelwerten gebildet wird:

$$2W = \langle \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}) : \mathbf{E}(\mathbf{x}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}) \rangle = \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle : \mathbf{E}_{\text{eff}} : \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle \Leftrightarrow \langle \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}) \rangle = \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle : \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle. \quad (3)$$

Die Felder  $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x})$  und  $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x})$  sind in dem heterogenen, linear elastischen Volumenbereich  $V$  des Mikromodells verknüpft durch die Grundgleichungen der Elastizitätstheorie ( $\mathbf{u}(\mathbf{x})$  bezeichnet das Verschiebungsfeld),

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}) = \mathbf{E}(\mathbf{x}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}) \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \left[ \nabla \mathbf{u}(\mathbf{x}) + (\nabla \mathbf{u}(\mathbf{x}))^T \right] \quad (6)$$

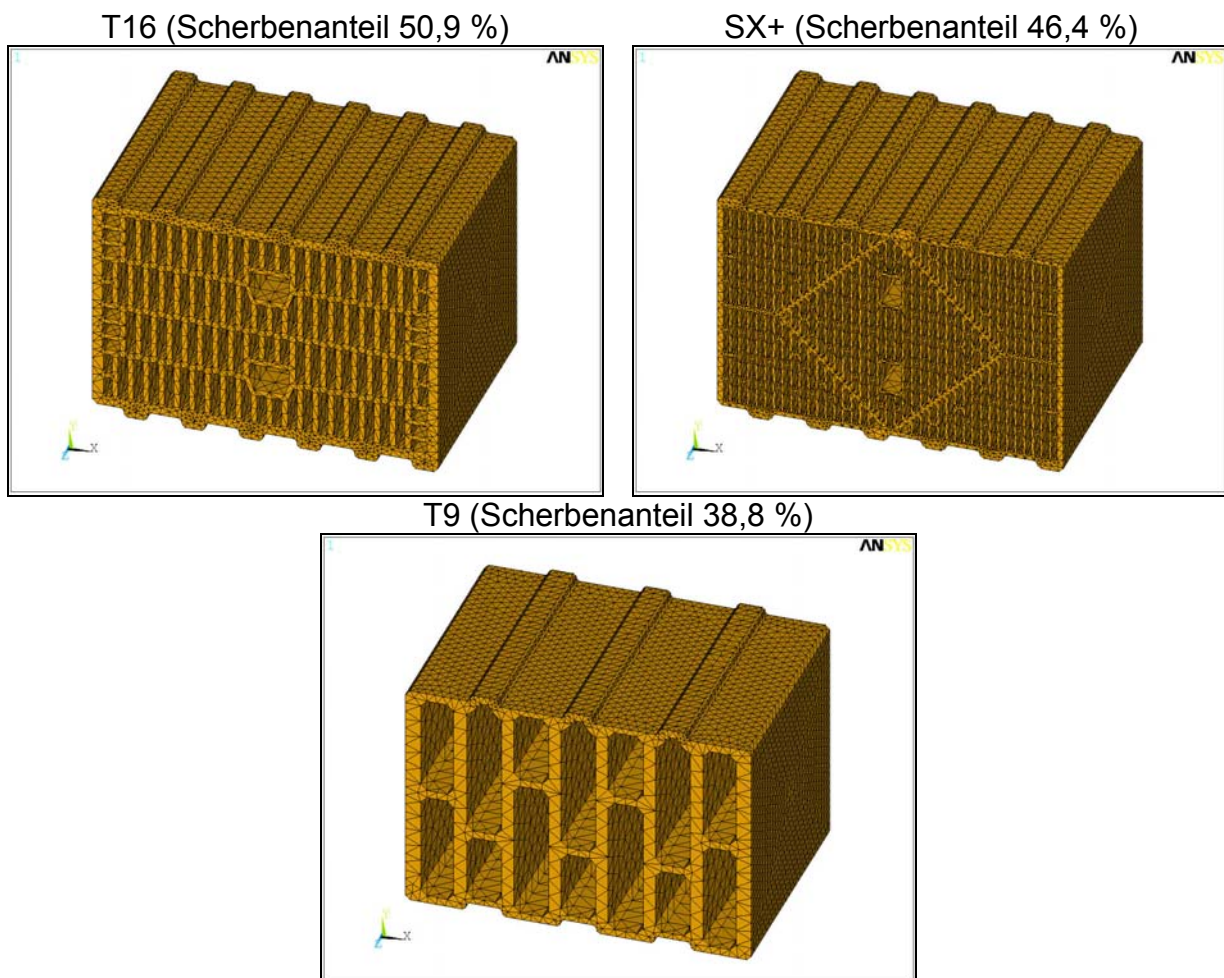
zu deren eindeutigen Lösung noch Randbedingungen auf dem Rand  $\partial V$  von  $V$  vorzugeben sind. Für die Randbedingung linear veränderlicher Verschiebungen

$$\mathbf{u}(\mathbf{x})|_{\partial V} = \boldsymbol{\varepsilon}_0 \cdot \mathbf{x} \quad (7)$$

mit beliebigem  $\boldsymbol{\varepsilon}_0 = \text{konst.}$  ist die Bedingung (3) stets erfüllt.

### 3.2.3 Effektive Eigenschaften der Hochlochziegel

Die Gleichungen (4) bis (6) mit der Randbedingung (7) wurden mit Hilfe des FE-Programms ANSYS gelöst. Die FE-Modelle (Mikromodelle) der drei Hochlochziegel sind in Bild 6 dargestellt. Das Volumen des Mikromodells (inklusive der Luft, in Bild 6 nicht dargestellt) wurde mit Tetraeder-Elementen mit 10 Knoten und quadratischem Verschiebungsansatz diskretisiert.



**Bild 6:** Diskretisierte Mikromodelle der drei Hochlochziegel (Luftelemente nicht dargestellt)

Für den Scherben wurden in der Materialgleichung (5) die in Tabelle 3 aufgelisteten, transversal isotropen elastischen Kennwerte verwendet. Die E-Moduln  $E_x$  und  $E_z$  wurden entsprechend den Messergebnissen an den Scherben in Längs- und Hochrichtung in Abschnitt 3.1.2.2 gewählt. Die Querdehnzahlen wurden zu 0,1 angenommen. Die Schubmoduln wurden mit Hilfe der E-Moduln und der Querdehnzahlen errechnet. Die Luft wurde als isotropes, elastisches Material mit E-Modul  $0,01 \text{ N/mm}^2$  und Querdehnzahl 0,1 angenommen.

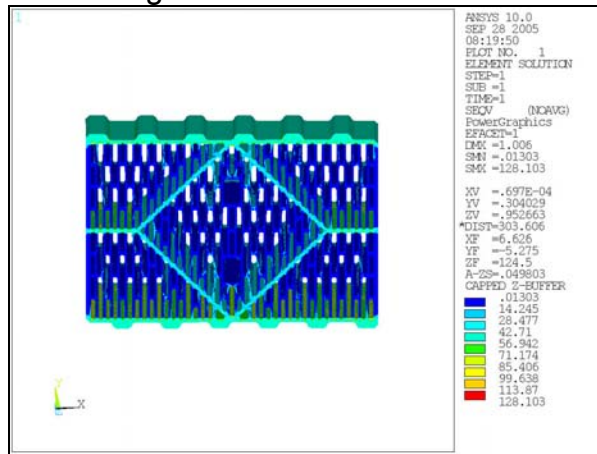
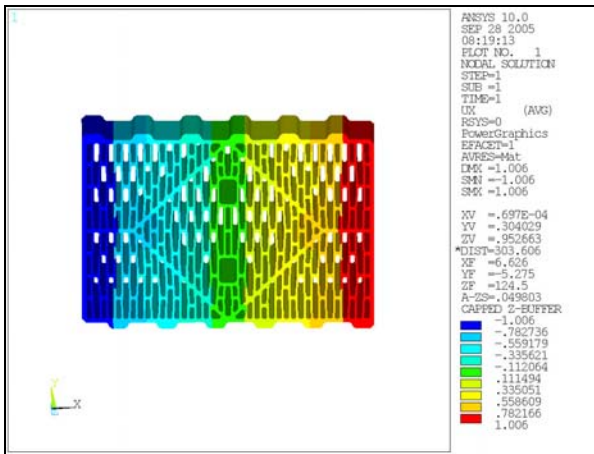
Tabelle 3: Elastizitätskennwerte des Scherbens

Kennwert	Einheit	Ziegel		
		T16	SX+	T9
1	2	3	4	5
$E_x$	N/mm <sup>2</sup>	10380	9500	5680
$E_y$				
$E_z$				
$G_{xy}$				
$G_{xz}$				
$G_{yz}$				
$\nu_{xy}$	-	0,10		
$\nu_{xz}$				
$\nu_{yz}$				

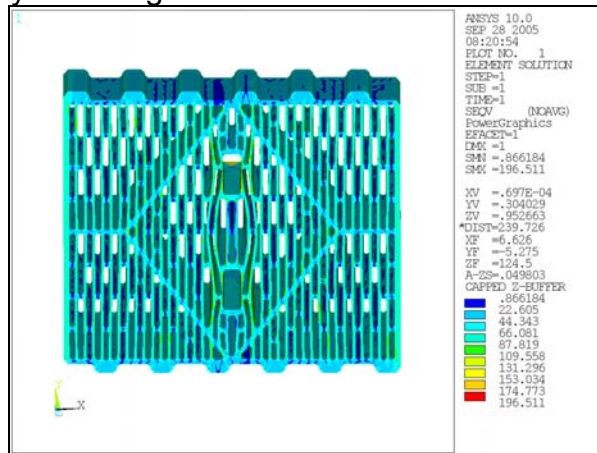
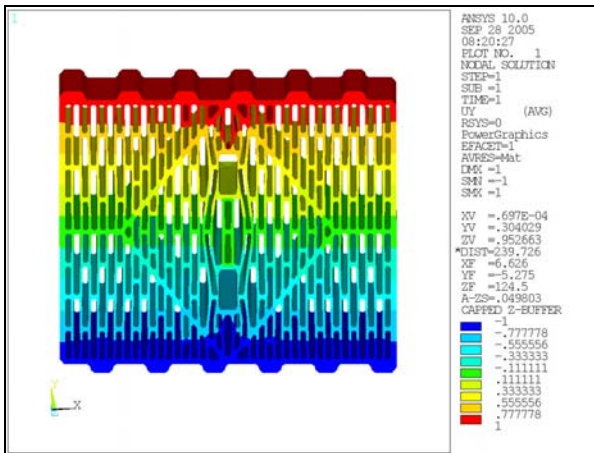
Den Ziegeln wurden durch Vorgabe des Tensors  $\epsilon_0 = \text{konst.}$  in der Randbedingung (7) insgesamt sechs Verzerrungszustände, drei einaxiale Dilatationen in x-, y- und z-Richtung und drei Scherungen in der xy-, xz- und yz-Ebene, aufgezwungen.

In Bild 7 sind in der Spalte links für die Dilatationen in x- und y-Richtung die zugehörigen Verschiebungskomponenten und für die Scherung in der xy-Ebene der Betrag des Verschiebungsvektors am aufgeschnittenen deformierten Mikromodell exemplarisch für den Ziegel SX+ dargestellt. Die Inhomogenität der Mikrospannungen  $\sigma(\mathbf{x})$  wird in der Spalte rechts anhand der von Mises-Vergleichsspannung veranschaulicht.

### Dilatation in x-Richtung



### Dilatation in y-Richtung



### Scherung in xy-Ebene

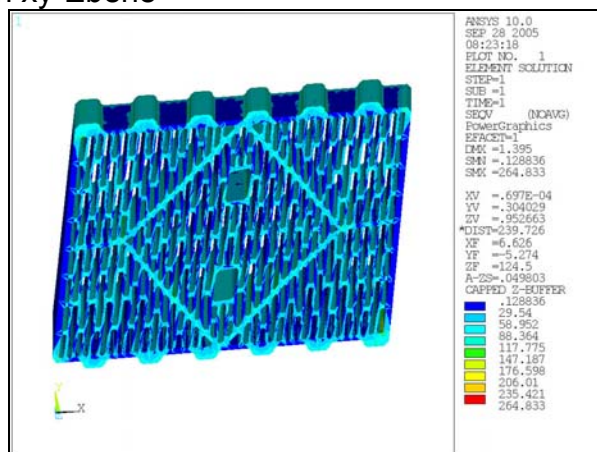
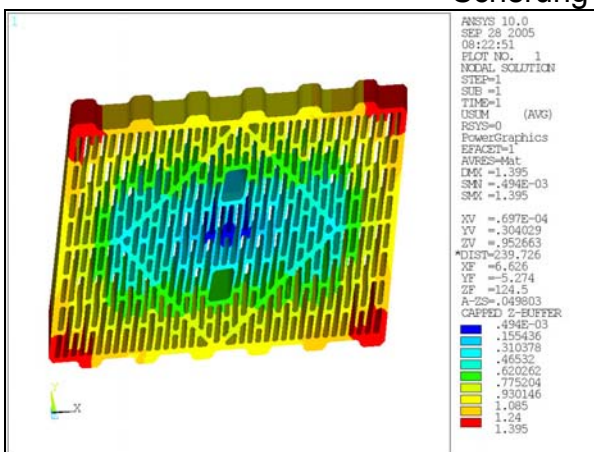


Bild 7: Verschiebung bzw. Betrag des Verschiebungsvektors (links) und von Mises-Vergleichsspannung (rechts) für Dilatationen in x- und y-Richtung bzw. Scherung in der xy-Ebene beim SX+

Der effektive Elastizitätstensor  $\mathbf{E}_{\text{eff}}$  muss Gleichung (2) simultan für alle sechs durch die Wahl der Randbedingung (7) spezifizierten Verzerrungszustände erfüllen. Dies ist nur näherungsweise möglich. Die Komponenten von  $\mathbf{E}_{\text{eff}}$  werden daher durch Minimierung der Fehlerquadratsumme

$$\sum_{l=1}^{l=6} \left( \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle^l - \mathbf{E}_{\text{eff}} : \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle^l \right)^2 \quad (8)$$

bestimmt. Der Index  $l$  in (8) nummeriert die durch die Randbedingung (7) vorgegebenen Verzerrungszustände. In (8) bedeuten  $\langle \boldsymbol{\sigma} \rangle^l$  und  $\langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle^l$  die gemäß (1) berechneten Mittelwerte der Felder  $\boldsymbol{\sigma}^l(\mathbf{x})$  und  $\boldsymbol{\varepsilon}^l(\mathbf{x})$  für einen speziellen Verzerrungszustand  $l$ . Die Differentiation von (8) bzgl.  $\mathbf{E}_{\text{eff}}$  ergibt das Gleichungssystem

$$\sum_{l=1}^{l=6} \left( \mathbf{E}_{\text{eff}} : \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle^l \right) \otimes \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle^l = \sum_{l=1}^{l=6} \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle^l \otimes \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle^l \quad (9)$$

zur Berechnung der 21 im allgemeinen Fall von Null verschiedenen Komponenten des effektiven Elastizitätstensors  $\mathbf{E}_{\text{eff}}$ . Die Auswertung von (9) hat für alle Ziegel ergeben, dass nur neun Komponenten des effektiven Elastizitätstensors  $\mathbf{E}_{\text{eff}}$  von Null verschieden sind. Die Ziegel verhalten sich somit makroskopisch orthotrop, d. h. sie haben in drei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen unterschiedliches elastisches Verhalten. Orthotropes Verhalten wird üblicherweise durch die Angabe von drei E-Moduln, drei Schubmoduln und drei Querdehnungszahlen charakterisiert.

Zur Berechnung dieser Größen aus den Komponenten des effektiven Elastizitätstensors  $\mathbf{E}_{\text{eff}}$  wird wie folgt vorgegangen. Der Zusammenhang zwischen der bei der Darstellung der Theorie der Methode der Finiten-Elemente üblicherweise in der Voigt-Notation verwendeten Elastizitätsmatrix  $\mathbf{D}$  und den Komponenten des Elastizitätstensors  $\mathbf{E}$  ist gegeben durch

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2E_{1111} & 2E_{1122} & 2E_{1133} & E_{1112} + E_{1121} & E_{1113} + E_{1131} & E_{1123} + E_{1132} \\ & 2E_{2222} & 2E_{2233} & E_{2212} + E_{2221} & E_{2213} + E_{2231} & E_{2223} + E_{2232} \\ & & 2E_{3333} & E_{3312} + E_{3321} & E_{3313} + E_{3331} & E_{3323} + E_{3332} \\ & & & E_{1212} + E_{1221} & E_{1213} + E_{1231} & E_{1223} + E_{1232} \\ \text{sym.} & & & & E_{1313} + E_{1331} & E_{1323} + E_{1332} \\ & & & & & E_{2323} + E_{2332} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Für den Fall der Orthotropie können die Komponenten der Inversen  $\mathbf{D}^{-1}$  der Elastizitätsmatrix  $\mathbf{D}$  durch die gesuchten drei E-Moduln, drei Schubmoduln und drei Querdehnungszahlen in der Form

$$\mathbf{D}^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_y & -\nu_{xz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ & & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & 1/G_{yz} & 0 \\ & & & & & 1/G_{xz} \end{bmatrix} \quad (11)$$

dargestellt werden. Nach Berechnung der Komponenten des effektiven Elastizitätstensors  $\mathbf{E}_{\text{eff}}$  aus dem Gleichungssystem (9) wird nun mittels Gleichung (10) die Elastizitätsmatrix  $\mathbf{D}$  berechnet und numerisch invertiert. Die E-Moduln und Schubmoduln können dann aus den Diagonalelementen der Inversen  $\mathbf{D}^{-1}$  der Elastizitätsmatrix (11) berechnet werden. Anschließend folgen die Querdehnzahlen aus den restlichen Komponenten in Gleichung (11). Im Ergebnis erhält man die effektiven orthotropen Elastizitätskennwerte der drei Ziegel nach Tabelle 4, die das makroskopische elastische Verhalten charakterisieren.

**Tabelle 4:** Effektive, orthotrope Elastizitätskennwerte der Hochlochziegel

Kennwert	Einheit	Ziegel		
		T16	SX+	T9
1	2	3	4	5
$E_x$	N/mm <sup>2</sup>	2060	950	550
$E_y$		4090	3650	1840
$E_z$		7430	5270	3440
$G_{xy}$		370	370	160
$G_{xz}$		1550	700	530
$G_{yz}$		2810	2090	1340
$\nu_{xy}$	-	0,14	0,13	0,12
$\nu_{xz}$		0,10	0,10	0,10
$\nu_{yz}$		0,10	0,10	0,10

Die Werte für die E-Moduln  $E_y$  und  $E_z$  können mit den Messergebnissen für die Steinlängs- bzw. die Steinhochrichtung in Abschnitt 3.1.2.3 verglichen werden. Die Übereinstimmung ist zufrieden stellend.

Wird der E-Modul  $E_z$  des Scherbens in Tabelle 3 mit dem Scherbenanteil, siehe Bild 6, multipliziert, so ergeben sich genau die mit dem Homogenisierungsverfahren ermittelten Werte in Tabelle 4. Dies kann als Kontrolle der Zuverlässigkeit des Homogenisierungs-

verfahrens angesehen werden. Für die restlichen Kennwerte existiert allerdings keine derart einfache Umrechnung auf der Basis der Scherbenkennwerte.

Weiter ist anzumerken, dass die schon sehr aufwändigen Messungen in Abschnitt 3.1.2.3 lediglich zwei der insgesamt neun erforderlichen Kennwerte der Ziegel geliefert haben. Da die Messung sämtlicher Kennwerte, insbesondere der Schubmoduln, am Ziegel prüftechnisch nur sehr schwer zu realisieren ist, stellt das punktuell auf Versuchsergebnisse abgestützte Homogenisierungsverfahren auf der Basis einer numerischen Simulation eine sinnvolle Alternative dar.

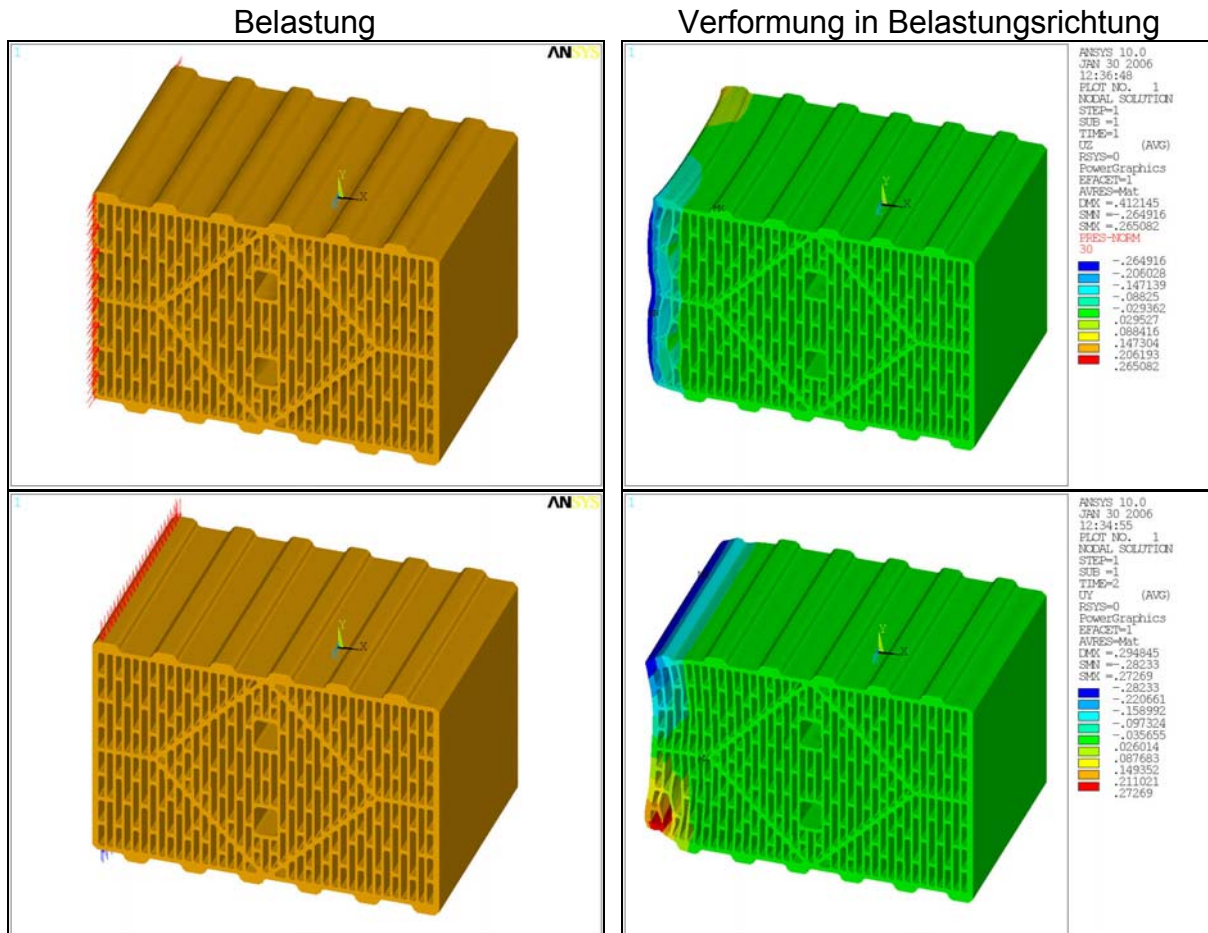
### **3.2.4 Effektive Eigenschaften des Putzgrundes**

Das dreidimensionale FE-Modell der Wände hat zum Ziel, die Rissicherheit verschiedener Putze infolge von Beanspruchungen aus dem Schwinden der Putze in der Erhärtungsphase und äußerer Temperaturbeanspruchung der erhärteten Putze zu untersuchen. Hierbei kommt der Steifigkeit (Elastizitätstensor) des Putzgrundes wegen seiner verformungsbehindernden und somit zwangauslösenden Wirkung besondere Bedeutung zu. Es ist zu erwarten, dass die Beanspruchung der Ziegel durch den Putz mit zunehmendem Abstand von der Wandoberfläche (in Richtung der Ziegelbreite) schnell abklingt. Somit wird nur eine gewisse Schicht des Ziegels (wirksame Ziegelbreite) den effektiven Elastizitätstensor des Putzgrundes bestimmen. Die wirksame Ziegelbreite ist ebenso wie der zugehörige effektive Elastizitätstensor unbekannt. Letzterer wird zwischen den Extremwerten der elastischen Kennwerte des Scherbens und des gesamten Hochlochziegels, siehe Tabellen 3 und 4, liegen.

Experimentell wurden zur Ermittlung eines Anhaltswertes für die wirksame Ziegelbreite Versuche mit Randpressung der Ziegel durchgeführt, siehe Abschnitt 3.1.2.4. Die wirksame Ziegelbreite ist jedoch nicht a priori gleich der Strecke, über die die Verformung abklingt. Weiter lässt sich aus diesen Versuchsdaten kein effektiver Elastizitätstensor des Putzgrundes ableiten, da die Spannungsverteilung unbekannt ist. Im Folgenden wird ein Verfahren zur Ableitung des effektiven Elastizitätstensors des Putzgrundes auf der Basis des Mikromodells der Hochlochziegel vorgeschlagen.

Die Mikromodelle der Ziegel, Bild 6, wurden dabei an den Rändern in einem schmalen Streifen in Steinhoch- und Steinlängsrichtung auf Druck beansprucht. Im Bild 8 sind die Belastung und die Verformung in Belastungsrichtung bei der Simulation der Randpressung

in Steinhoch- bzw. Steinlängsrichtung anhand des Mikromodells des Ziegels SX+ dargestellt.



**Bild 8:** Simulation der Randpressung mit dem Mikromodell des SX+ in Steinhochrichtung (oben) und Steinlängsrichtung (unten)

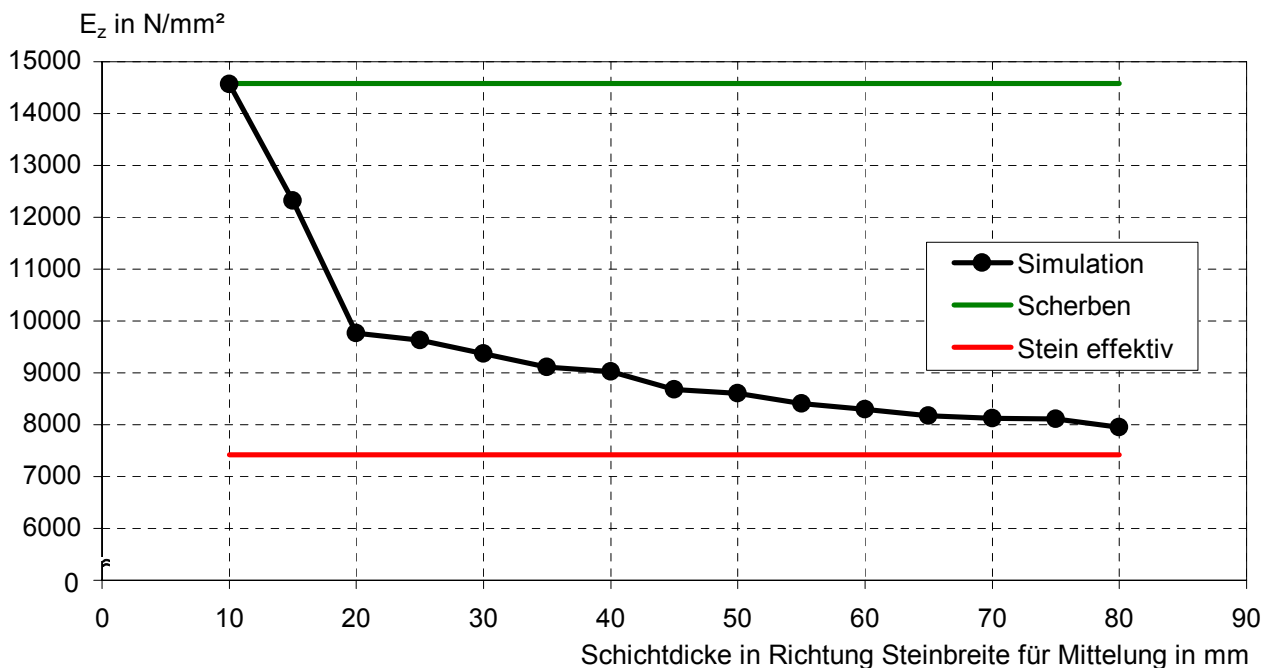
Die Abklingkurven der Verformung in Belastungsrichtung aus der Simulation sind in den Bildern B16 bis B19 den Versuchsergebnissen für die drei Ziegel gegenübergestellt. Man erkennt insgesamt eine zufrieden stellende Übereinstimmung, so dass hiermit die Realitätsnähe der Simulation als nachgewiesen angesehen werden kann. Der effektive Elastizitätstensor des Putzgrundes kann somit auf der Basis der Simulation der Randpressung mit Hilfe der Mikromodelle der Ziegel abgeleitet werden.

Zur Ableitung des effektiven Elastizitätstensors des Putzgrundes wurde analog zu Abschnitt 3.2.3 vorgegangen. Es wurden also insbesondere wieder Randbedingungen mit linear veränderlichen Verschiebungen der Form (7) auf der gesamten Oberfläche des Ziegels aufgebracht. Jedoch wurde das Volumen zur Berechnung der Mittelwerte  $\langle \sigma \rangle$  und  $\langle \epsilon \rangle$  der

Felder  $\boldsymbol{\sigma}^l(\mathbf{x})$  und  $\boldsymbol{\varepsilon}^l(\mathbf{x})$  des Mikromodells für einen speziellen Verzerrungszustand  $l$  auf eine Schicht in Richtung der Steinbreite ( $x$ -Richtung in Bild 8) eingeschränkt. Anstelle von Gleichung (1) wurde somit allgemein (ohne Berücksichtigung des speziellen Verzerrungszustandes  $l$ )

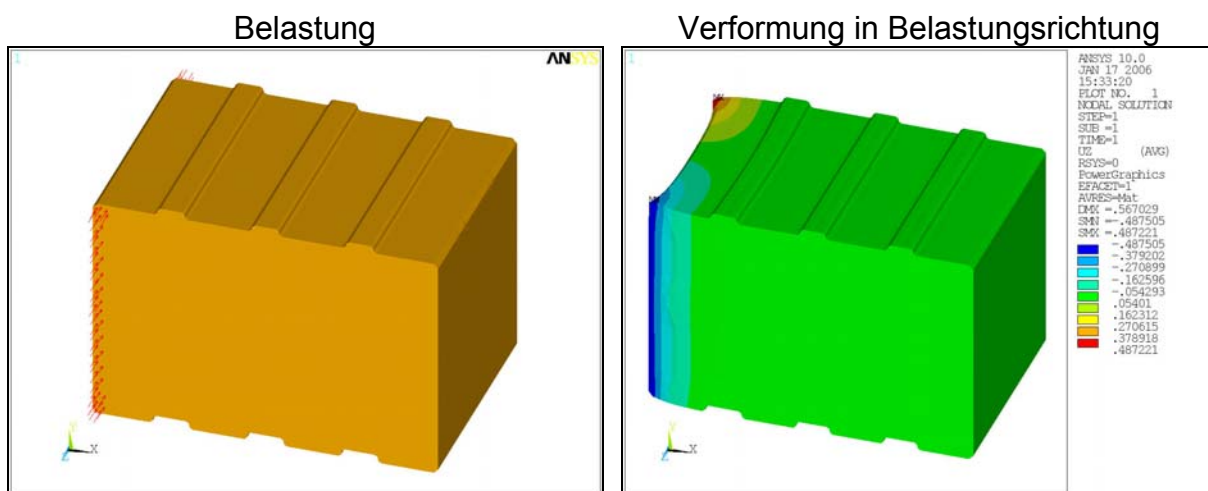
$$\langle \boldsymbol{\sigma} \rangle = \frac{1}{V} \int_{x < x_{\text{lim}}} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}) dV \quad \text{bzw.} \quad \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle = \frac{1}{V} \int_{x < x_{\text{lim}}} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}) dV \quad (12)$$

zur Berechnung der Mittelwerte verwendet. Die Dicke  $x_{\text{lim}}$  der Schicht, über die die Mittelung erstreckt wurde, wurde in 5-mm-Schritten variiert. Für jeden Wert von  $x_{\text{lim}}$  wurde zunächst der effektive Elastizitätstensors  $\mathbf{E}_{\text{eff}}$  durch Lösen des Gleichungssystems (9) berechnet. Hierbei ergab sich, dass wie für den gesamten Ziegel höchstens neun Komponenten ungleich Null waren. Somit konnten wie vor über die Elastizitätsmatrix  $\mathbf{D}$  und deren Inverse  $\mathbf{D}^{-1}$  die effektiven Elastizitätskennwerte des Putzgrundes berechnet werden. Die Abhängigkeit der effektiven Elastizitätskennwerte von der für die Mittelung berücksichtigten Schichtdicke ist anhand des E-Moduls  $E_z$  am Beispiel des Ziegels T16 in Bild 9 veranschaulicht. Der Wert fällt ausgehend vom Wert des Scherbens, siehe Tabelle 3, mit zunehmender Schichtdicke ab und erreicht bei einer Dicke von 80 mm nahezu den effektiven Kennwert des gesamten Ziegels, siehe Tabelle 4.



**Bild 9:** Abhängigkeit des effektiven E-Moduls  $E_z$  des Ziegels T16 von der Dicke der für die Mittelung berücksichtigten Schicht

Man hat nach der erläuterten Vorgehensweise im Ergebnis für jeden Ziegel zu verschiedenen Dicken der Mittelungsschicht gehörige, effektive elastische Kennwerte ermittelt, die den Putzgrund charakterisieren können. Es fehlt allerdings noch ein Kriterium, die Dicke der Mittelungsschichtdicke (wirksame Ziegelbreite), festzulegen. Hierzu wurde das Makromodell des Ziegels zur Simulation der Randpressung herangezogen, siehe Bild 10.



**Bild 10:** Simulation der Randpressung in Steinhochrichtung mit dem Makromodell des T9

Dem Material des Makromodells wurden der Reihe nach die zuvor bestimmten Eigenschaften des Putzgrundes (effektive elastische Eigenschaften des Ziegels für eine bestimmte wirksame Ziegelbreite) zugewiesen. Das Kriterium zur Festlegung der wirksamen Ziegelbreite wird anhand eines Vergleichs von Kennwerten der Simulation der Randpressung mit dem Mikro- und Makromodell gesucht.

Die zunächst nahe liegende Forderung, die wirksame Ziegelbreite so festzulegen, dass die Abklingkurven der Verformung, siehe z. B. Bild B16, übereinstimmen, ist nicht erfüllbar. Wegen der im Makromodell nicht abgebildeten Lochstruktur sind die Abklingkurven von Mikro- und Makromodell stets unterschiedlich. Es wurde daher in Anlehnung an Gleichung (3) gefordert, dass die Verzerrungsenergie von Mikro- und Makromodell unter der Randbedingung der Randpressung in Steinhoch- und Steinlängsrichtung übereinstimmen. Es wurde also die wirksame Ziegelbreite  $x_{\text{lim}}$  so festgelegt, dass

$$2W = \langle \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle : \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle \rangle_{\text{mikro}} = \langle \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle : \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle \rangle_{\text{makro}(x_{\text{lim}})} . \quad (13)$$

In Gleichung (13) wurde entsprechend Gleichung (1) über das gesamte Ziegelvolumen gemittelt.

Die Forderung (13) führte für die Ziegel T16 und SX+ auf eine wirksame Ziegelbreite von 20 mm. Für den Ziegel T9 ergab sich eine wirksame Ziegelbreite von 25 mm. Die zugehörigen effektiven elastischen Kennwerte des Putzgrundes sind in Tabelle 5 zusammengestellt und werden für die Simulation der Wandversuche verwendet.

**Tabelle 5:** Effektive, orthotrope Elastizitätskennwerte des Putzgrundes

Kennwert	Einheit	Ziegel		
		T16	SX+	T9
1	2	3	4	5
$E_x$	N/mm <sup>2</sup>	4820	1580	1240
$E_y$		5770	4880	3510
$E_z$		9770	6460	5750
$G_{xy}$		1270	500	550
$G_{xz}$		3070	1000	1040
$G_{yz}$		3800	2700	2510
$\nu_{xy}$	-	0,07	0,08	0,12
$\nu_{xz}$		0,10	0,10	0,10
$\nu_{yz}$		0,10	0,10	0,10

## 4 UNTERSUCHUNGEN AN DEN AUSSENPUTZEN

### 4.1 Allgemeines

Um die verwendeten Außenputze zu charakterisieren, wurden zunächst Untersuchungen zu grundlegenden Materialeigenschaften durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden durch das IKM (Forschungsstelle 1) durchgeführt und sind in Abschnitt 4.2 erläutert.

Es ist hinlänglich bekannt, dass die Putzeigenschaften durch das Absaugen des Anmachwassers durch den Putzgrund deutlich beeinflusst werden. Dabei ist auch der Feuchtegehalt des Putzgrundes maßgeblich für die Beeinflussung der Putzeigenschaften (vgl. /SCH03/). Aus diesen Gründen ist es für die Ermittlung von realitätsnahen Materialparametern für Außenputze zur Durchführung von Simulationsrechnungen unumgänglich, den Putz zu untersuchen, nachdem dieser Kontakt mit dem Putzgrund hatte. Dies erfolgte bislang dadurch, dass die Putze zunächst durch Trockensägen vom Putzgrund gelöst und anschließend zurechtgesägt wurden. Folge waren Störungen des Putzgefüges und große Streuungen bei den ermittelten Materialparametern.

Daher wurde im Rahmen des Forschungsprojektes zunächst ein Verfahren zur Herstellung weitgehend „ungestörter“ Putzprobekörper entwickelt. Die wesentlichen Entwicklungsziele für das Herstellverfahren waren:

1. Realitätsnahe Nachbildung des Wasserabsaugens durch den Putzgrund bzw. unwesentliche Beeinflussung durch die Verwendung geeigneter Zwischenlagen,
2. Lösen der Probekörper vom Putzgrund/Ersatzputzgrund ohne nennenswerte mechanische Beanspruchung,
3. Vermeiden von Sägearbeiten zur Anpassung der Probekörpergröße.

Dabei war wesentlich, dass sowohl die zeitliche Entwicklung des Wasserabsaugens als auch die Menge des abgesaugten Anmachwassers durch die Ziegel zutreffend nachgebildet bzw. nur unwesentlich durch die Verwendung einer Zwischenlage zur Verringerung des Verbundes zwischen Putzgrund und Putz beeinflusst wurde, da beide von entscheidendem Einfluss auf die Eigenschaften der Putze sind. Die durchgeführten Untersuchungen – Tastversuche und Vergleichsversuche – sind in Abschnitt 4.3 dargestellt.

An mit dem entwickelten Herstellverfahren hergestellten Probekörpern wurden anschließend alle für die Simulation der Beanspruchungen von Putz auf Putzgrund mit der Finite-Elemente-Methode wesentlichen Materialparameter bestimmt. Die Untersuchungen sind in Abschnitt 4.4 beschrieben.

## **4.2 Bestimmung grundlegender Materialeigenschaften**

### **4.2.1 Versuchsprogramm**

Die an den ausgewählten Außenputzen durchgeführten Untersuchungen zur Charakterisierung der Putze anhand grundlegender Materialeigenschaften sind in der Tabelle A22 zusammengestellt.

### **4.2.2 Versuchsdurchführung**

#### **4.2.2.1 Siebanalyse**

Die Siebanalyse an den Putzen wurden mit Sieben der Durchmesser 0,063, 0,125, 0,25, 0,5, 1 und 2 mm durchgeführt.

#### **4.2.2.2 Herstellung der Putzmörtel**

Die Mörtel wurden mit einem Zwangsmischer nach DIN EN 1015-2 /DIN98c/ gemischt. Zunächst wurde das Wasser in den Mischer eingefüllt. Anschließend wurde der Trockenmörtel innerhalb von 15 Sekunden in den laufenden Mischer gegeben und weitere 30 Sekunden gemischt. Die Wasserzugabemenge bezogen auf die Trockenmörtelmasse betrug beim Normalputz 18 %, beim Leichtputz 23 % und beim Ultraleichtputz 45 %.

#### **4.2.2.3 Frisch- und Festmörtelkennwerte**

Bei der Bestimmung der Frischmörtelrohddichte nach DIN EN 1015-6 /DIN98d/ erfolgte das Einfüllen und Verdichten der Mörtel mit dem Schockverfahren. Die Mörtelprismen zur Durchführung der Untersuchungen am Festmörtel wurden nach der Herstellung zunächst bis zum Ausschalen im Alter von 2 Tagen im Feuchtschrank bei 20 °C und 95 % rel. Feuchte in der Schalung gelagert. Anschließend lagerten die Prismen weitere 5 Tage im Feuchtschrank bei 20 °C und 95 % rel. Feuchte und dann bis zu den Prüfterminen im Normalklima 20 °C und 65 % rel. Feuchte.

Zur Untersuchung der kapillaren Wasseraufnahme nach DIN EN 1015-18 /DIN03a/ wurden die Prismen in nach DIN EN 1015-18 /DIN03a/ mit Filterpapier ausgekleideten Prismenschalungen hergestellt. Die Untersuchungen zur kapillaren Wasseraufnahme nach DIN V 18550 /DIN05b/ wurden sowohl an Putzprobekörper durchgeführt, die während der Lagerungsdauer von 28 Tagen drei Mal für 3 Stunden unter Wasser gelagert wurden als auch an solchen, die nicht in Wasser gelagert wurden.

Die Untersuchungen zur Wasserdampfdiffusion erfolgten nach DIN EN ISO 12572 /DIN01/, DIN EN 1015-19 /DIN05a/ und DIN 52615 /DIN87/. Die Prüfungen wurden im Normalklima 20 °C und 65 % rel. Feuchte durchgeführt. Zum Einstellen einer relativen Luftfeuchte von 95 % im Prüfgefäß wurden Calciumchlorid, Kaliumnitrat und Wasser verwendet.

#### **4.2.2.4 Schwinden**

Das Schwinden und die Masseänderung wurden an Normprismen in Anlehnung an DIN 52450 /DIN85/ untersucht. Gemessen wurden die Längenänderungen und die Prüf-

körpermasse an jeweils drei Prüfkörpern. Die zur Messung der Verformungen erforderlichen Messzapfen wurden vor der Herstellung der Probekörper in die Stahlschalungen eingesetzt und in die Mitten der Stirnflächen der prismatischen Körper eingegossen.

Zur Messung der Längenänderung wurden die Prismen in ein Messgerät mit fest eingebauter, digitaler Messuhr (Ablesegenauigkeit 0,001 mm) eingesetzt. Die Längen- und Masseänderungen wurden bei folgenden Probenaltern bestimmt: 2 (Nullmessung), 6, 9, 16, 30, 92 und 182 Tage nach der Herstellung.

### **4.2.3 Versuchsergebnisse**

#### **4.2.3.1 Siebanalyse sowie Frisch- und Festmörtelkennwerte**

Die Ergebnisse der Siebanalyse sind in der Tabelle A23 zusammengestellt.

Die ermittelten Frischmörtelkennwerte Ausbreitmaß  $a$ , Luftgehalt  $L$  und Frischmörtelrohichte  $\rho_{fr}$  sind in der Tabelle A24 zusammengestellt. Das ermittelte Ausbreitmaß beträgt beim Normalputz 173 mm, beim Leichtputz 168 mm und beim Ultraleichtputz 158 mm. Die Luftgehalte betragen zwischen 17 % (NP) und 24,5 % (LP), die Frischmörtelrohichte beträgt beim Normalputz 1,80 kg/dm<sup>3</sup>, beim Leichtputz 1,30 kg/dm<sup>3</sup> und beim Ultraleichtputz 1,02 kg/dm<sup>3</sup>.

Die bestimmten Festmörtelkennwerte Rohichte im lufttrockenen Zustand  $\rho_i$ , Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ}$  und Druckfestigkeit  $\beta_D$  sind in der Tabelle A24 zusammengestellt. Die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit kann Bild B31 entnommen werden. Beim Normalputz nimmt die Druckfestigkeit bis zu einem Alter von 90 Tagen deutlich zu und verändert sich anschließend nur noch wenig. Im Alter von 28 Tagen beträgt die Druckfestigkeit 6,2 N/mm<sup>2</sup>. Damit entspricht der Normalputz der Druckfestigkeitskategorie CS III nach DIN EN 998-1 /DIN03c/. Die Druckfestigkeit des Leichtputzes nimmt bis zu einem Alter von 28 Tagen auf einen Wert von 4,5 N/mm<sup>2</sup> zu und ändert sich danach nur noch wenig. Der Leichtputz entspricht damit der Druckfestigkeitskategorie CS II nach DIN EN 998-1 /DIN03c/. Beim Ultraleichtputz nimmt die Druckfestigkeit bis zu einem Alter von 90 Tagen zu und im Anschluss wieder etwas ab. Im Alter von 28 Tagen beträgt die Druckfestigkeit des Ultraleichtputzes 1,4 N/mm<sup>2</sup> (Kategorie CS I nach DIN EN 998-1 /DIN03c/).

Die Wasseraufnahmekoeffizienten bestimmt nach DIN EN 1015-18 /DIN03a/  $w_{DIN EN 1015-18}$  sowie nach DIN V 18550 /DIN05b/ mit Wasserlagerung  $w_{DIN V 18550-H_2O}$  und ohne Wasser-

lagerung  $w_{\text{DIN V 18550}}$  sind in der Tabelle A25 zusammengestellt. Der Wasseraufnahmekoeffizient ermittelt nach DIN EN 1015-18 /DIN03a/  $w_{\text{DIN EN 1015-18}}$  ist bei allen Putzen kleiner als  $0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ . Damit entsprechen die Putze der Kategorie W2 nach DIN EN 1015-18 /DIN03a/. Die Wasseraufnahmekoeffizienten, geprüft nach DIN V 18550 /DIN05b/ an Putzproben mit Wasserlagerung  $w_{\text{DIN V 18550-H}_2\text{O}}$ , sind bei allen Putzen deutlich kleiner als  $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ . Die Putze sind demnach wasserabweisend nach DIN V 18550 /DIN05b/.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Wasserdampfdiffusion wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$  und Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  enthält die Tabelle A26.

#### **4.2.3.2 Schwinden**

Die ermittelten Schwinddehnungen sind in Bild B32 und die Masseänderungen in Bild B33 dargestellt. Beim Normalputz und beim Leichtputz nehmen die Schwinddehnungen während der ersten 28 Tage Prüfdauer zunächst stark zu und verändern sich im Anschluss weniger. Beim Ultraleichtputz ist das Schwinden nach etwa 14 Tagen Prüfdauer weitgehend abgeschlossen. Die Masse der Prismen aller Putze nimmt zunächst infolge Austrocknen ab. Beim Normalputz und beim Leichtputz nimmt die Masse nach einer Prüfdauer von 28 Tagen vermutlich als Folge der parallel zur Austrocknung stattfindenden Karbonatisierung wieder zu. Beim Ultraleichtputz nimmt die Masse ab einer Prüfdauer von 14 Tagen zu.

### **4.3 Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Putzprismen**

#### **4.3.1 Allgemeines**

Um geeignete Ansätze zur Simulation bzw. zur Berücksichtigung des Absaugens des Anmachwassers durch den Putzgrund zu entwickeln, wurden zunächst Tastversuche durchgeführt. Im Rahmen dieser Tastversuche wurde eine Vielzahl von Methoden zur Nachstellung des Wasserabsaugens durch den Putzgrund bzw. von Methoden, durch die der Verbund zwischen Putz und Putzgrund weitestgehend vermieden, aber das Wasserabsaugen durch den Putzgrund nur unwesentlich beeinflusst werden sollte, untersucht. Die Untersuchungen sind im Abschnitt 4.3.2 beschrieben.

Im Rahmen von Vergleichsversuchen wurde im Anschluss an die Tastversuche der Ansatz, der sich in den Tastversuchen als geeignet erwiesen hatte, weitergehend untersucht (s. Abschnitt 4.3.3).

## **4.3.2 Tastversuche**

### **4.3.2.1 Versuchsprogramm**

Grundsätzlich lassen sich die untersuchten Ansätze wie folgt einteilen:

- Verwenden eines Ersatzputzgrundes zur Simulation des Wasserabsaugens,
- Verwenden einer geeigneten Zwischenschicht zwischen Putzgrund und Putz zur Vermeidung bzw. Verringerung eines Haftverbundes.

Bei den Tastversuchen wurde zunächst der Leichtputz in Kontakt mit den verschiedenen „Putzgründen“ untersucht. Vergleichswerte wurden durch Untersuchungen in Verbindung mit dem Planhochlochziegel SX+ ermittelt. Die Putzdicke betrug 25 mm.

Bei den Tastversuchen wurde der Wassergehalt des Putzes nach verschiedenen Kontaktdauern mit dem Putzgrund durch Ermittlung des Glühverlustes bei 1000 °C bestimmt. Dadurch wurde auch das durch Hydratation chemisch gebundene Wasser mit erfasst.

Aufgrund des Umfangs der notwendigen Untersuchungen wurden diese in zwei Schritten durchgeführt (s. Tabelle 6). So wurden im ersten Schritt zunächst zahlreiche Putzgründe parallel untersucht, um eine gezielte Auswahl für die Untersuchungen im zweiten Schritt durchführen zu können.

Tabelle 6: Versuchsserien

Untersuchungs- schritt	Serie	Putzgrund	Ansatz
1	2	3	4
1	1.1	SX+ (unbehandelt)	Referenz- werte
	1.2	Viskoseschwamm-Pressplatten	Ersatz- putzgrund
	1.3	Filterpappe mit 330 g/m <sup>2</sup> , 2 Lagen	
	1.4	Filterpappe mit 380 g/m <sup>2</sup> , 2 Lagen	
	1.5	Filterpappe mit 520 g/m <sup>2</sup> , 2 Lagen	
	1.6	Filterpappe mit 650 g/m <sup>2</sup> , 2 Lagen	
	1.7	Filterpappe mit 700 g/m <sup>2</sup> , 2 Lagen	
	1.8	SX+ mit Faservlies nach DIN 18555-9 /DIN99/	Zwischen- schicht
	1.9	SX+ mit Kaolin (Pinselauftrag)	
2	2.1	SX+ (unbehandelt)	Referenz- werte (Absicherung)
	2.2	Filterpappe mit 380 g/m <sup>2</sup> , 6 Lagen	Ersatz- putzgrund
	2.3	Filterpappe mit 380 g/m <sup>2</sup> , 12 Lagen	
	2.4	Kalksandstein KS 20 mit Faservlies, 20 g/m <sup>2</sup>	
	2.5	SX+ mit Faservlies, 20 g/m <sup>2</sup>	Zwischen- schicht
	2.6	SX+ mit einer hydrophil eingestellten Kunststoffolie	
	2.7	SX+ mit Kaolin (aufgesprüht)	

In DIN 18555-9 /DIN99/ wird zur Herstellung von Mörtelprobekörpern zur Bestimmung der Druckfestigkeit des Mörtels aus der Fuge Faservlies verwendet. Bei den Versuchsserien 1.8, 2.4 und 2.5 erfolgte die Verwendung in Anlehnung an /DIN99/.

Der Einsatz von Kaolin zur Vorbereitung der Putzflächen des SX+ wurde von Untersuchungen in /KRU96/ abgeleitet. Dort wurde Kaolin verwendet, um die kapillare Wasseraufnahme von Prüfkörpern aus verschiedenen, über eine Kaolinschicht miteinander verbundenen Sandsteinen zu untersuchen. Dabei wurde in einem Vorversuch der Einfluss der Kaolinschicht bei einem zusammengesetzten Prüfkörper aus einem Sandstein durchgeführt. Ein nennenswerter Einfluss der Kaolinschicht auf die Wasseraufnahme wurde bei diesem Vorversuch nicht festgestellt.

### 4.3.2.2 Versuchsdurchführung

Sowohl die verwendeten "weichen" Ersatzputzgründe (Viskoseschwammtücher und Superabsorber) als auch die Filterpappen wurden auf kunststoffbeschichtete Sperrholzplatten gelegt.

Zur Vorbereitung der mit Kaolin vorbehandelten SX+ wurde zunächst eine Suspension aus Kaolin und Wasser hergestellt (ein Masseteil Kaolinpulver, zwei Masseteile Wasser). Diese Suspension wurde zunächst mit einem Pinsel auf die Putzfläche (Serie 1.9). Bei einem weiteren Versuch wurde die Kaolin-Suspension dann mit einer Druckluftspritzpistole auf die Putzfläche des SX+ aufgetragen. Nach dem Aufbringen der Kaolinsuspension wurden die Steine zunächst bei 60 °C bis zum Erreichen der Ausgangsmasse in Wärmeschränken getrocknet. Danach lagerten die Steine etwa 2 Wochen im Normalklima 20 °C, 65 % rel. Feuchte bis die Untersuchungen zum Wasserabsaugen durch den Putzgrund durchgeführt wurden.

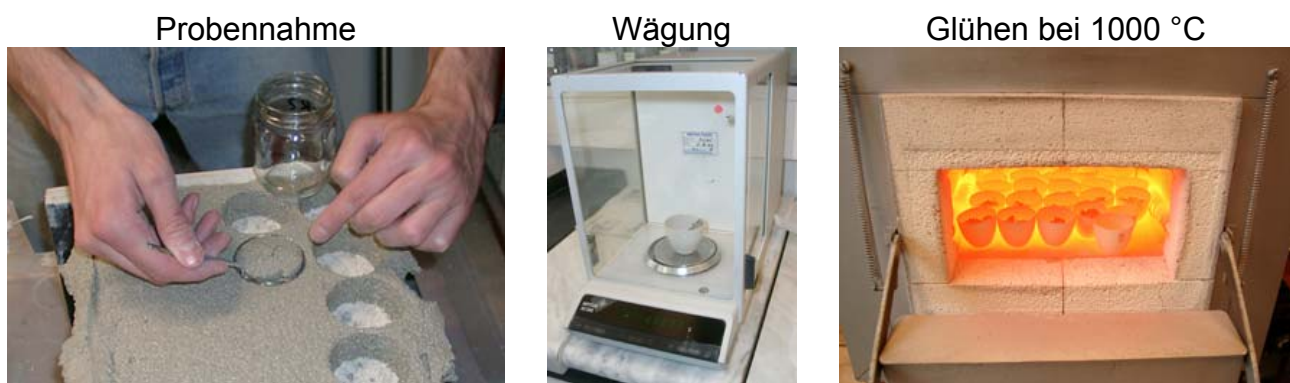
Um im ersten Untersuchungsschritt einen möglichst weiten Bereich an Putzgründen zu untersuchen, wurde der Putz mit einem Zwangsmischer angemischt. Zur Herstellung des Putzmörtels wurde zunächst der Trockenmörtel eingefüllt und durch Mischen homogenisiert. Die Wasserzugabemenge für den Leichtputz wurde so gewählt, dass der Putz eine kellingerechte Konsistenz aufwies (Ausbreitmaß nach DIN 18555-2 /DIN82b/ etwa 170 mm, vgl. auch DIN 18555-1 /DIN82a/). Der Verhältniswert von Wasserzugabemenge und Trockenmörtelmasse betrug 0,23. Das Zugabewasser wurde in den laufenden Mischer gegeben und der Mörtel etwa 45 Sekunden weitergemischt.

Der Putz wurde mit der Hand auf die „weichen“ Ersatzputzgründe aufgebracht und über seitlich angebrachte Leisten abgezogen, durch die eine gleichmäßige Putzdicke von 25 mm gewährleistet wurde. Die übrigen Putzgründe wurden ebenfalls mit einer Putzdicke von 25 mm händisch geputzt. Analog zu den „weichen“ Putzgründen wurde die Putzoberfläche über seitlich angebrachte Leisten abgezogen. Nach dem Putzen wurden die Putzoberflächen grundsätzlich für 24 Stunden mit Folie abgedeckt, die zur Entnahme von Proben jeweils abgenommen wurde.

Die Proben aus der Putzschicht zur Bestimmung des Wassergehaltes sollten nach 1, 5, 10, 15 und 30 Minuten sowie nach 1, 2, 5 und 24 Stunden entnommen werden. Auf Grund der Probenanzahl bei der ersten Versuchserie konnten diese Entnahmezeitpunkte jedoch

nicht exakt eingehalten werden. Daher wurden bei der Auswertung die tatsächlichen Entnahmezeitpunkte berücksichtigt.

Zur Probennahme wurde zunächst ein Stahlzylinder mit einem Durchmesser von etwa 50 mm in den Putz gedrückt. Anschließend wurde der Putz innerhalb des Zylinders mit einem Löffel entnommen und in ein Glas gefüllt, das sofort luftdicht verschlossen wurde (s. Bild 11).



**Bild 11:** Bestimmung des Wassergehaltes mittels Glühverlust

Das in den Gläsern enthaltene Probenmaterial wurde anschließend gründlich durchgemischt und meist vollständig auf drei Tiegel (vgl. Bild 11) verteilt. Entsprechend wurde im Allgemeinen eine Dreifachbestimmung des Glühverlustes durchgeführt. Die Einwaage je Tiegel betrug in der Regel zwischen 10 und 18 g.

Im zweiten Untersuchungsschritt wurde jeweils immer nur eine Putzmenge für die Fläche eines Steins mit einem Labormischer nach DIN 18555-1 /DIN82a/ angemischt (Verhältniswert von Wasserzugabemenge und Trockenmörtelmasse betrug 0,23) und unmittelbar auf den jeweiligen Putzgrund analog zum ersten Untersuchungsschritt aufgetragen. Dadurch konnten die Entnahmezeitpunkte, die zunächst wie im ersten Untersuchungsschritt gewählt wurden (s. o.), genau eingehalten werden. Da sich bei der Durchführung der Untersuchungen jedoch zeigte, dass sich das Absaugen des Anmachwasser in den ersten 30 Minuten zwischen den verschiedenen Putzgründen nur unwesentlichen unterschied, wurde der Wassergehalt bei den Serien 2.3, 2.4 und 2.7 nur noch nach einer Kontaktdauer von 30 Minuten sowie von 1, 2, 5 und 24 Stunden bestimmt.

### 4.3.2.3 Versuchsergebnisse

Bei der Auswertung der Versuche wurde der auf den Anfangswassergehalt bezogene Wassergehalt  $w_{\text{bez}}$  nach verschiedenen Kontaktdauern mit dem Putzgrund ermittelt. Dazu wurde zunächst eine Probe des Werk trockenmörtels geglüht, um den Glühverlust des Werk trockenmörtels zu bestimmen. Wird die Werk trockenmörtelmasse  $m_{0,\text{WTM}}$  auf das Glühbeständige der Werk trockenmörtelmasse  $m_{1000,\text{WTM}}$  bezogen, ergibt sich der Anteil des Glühbeständigen bezogen auf die Ausgangsmasse zu:

$$f_{\text{WTM}} = \frac{m_{0,\text{WTM}}}{m_{1000,\text{WTM}}} \quad (14)$$

mit:

$m_{0,\text{WTM}}$  Ausgangsmasse der Probe des Werk trockenmörtels vor dem Glühen,  
 $m_{1000,\text{WTM}}$  Masse der Probe des Werk trockenmörtel nach dem Glühen.

Der Wassergehalt  $w$  nach der Kontaktdauer  $t$  mit dem Putzgrund in M.-% der aus der Putzfläche entnommenen Probe kann dann mit Hilfe von  $f_{\text{WTM}}$  bestimmt werden mit:

$$w(t) = \frac{m_0(t) - m_{1000}(t) \cdot f_{\text{WTM}}}{m_{1000}(t) \cdot f_{\text{WTM}}} \cdot 100 \quad (15)$$

mit:

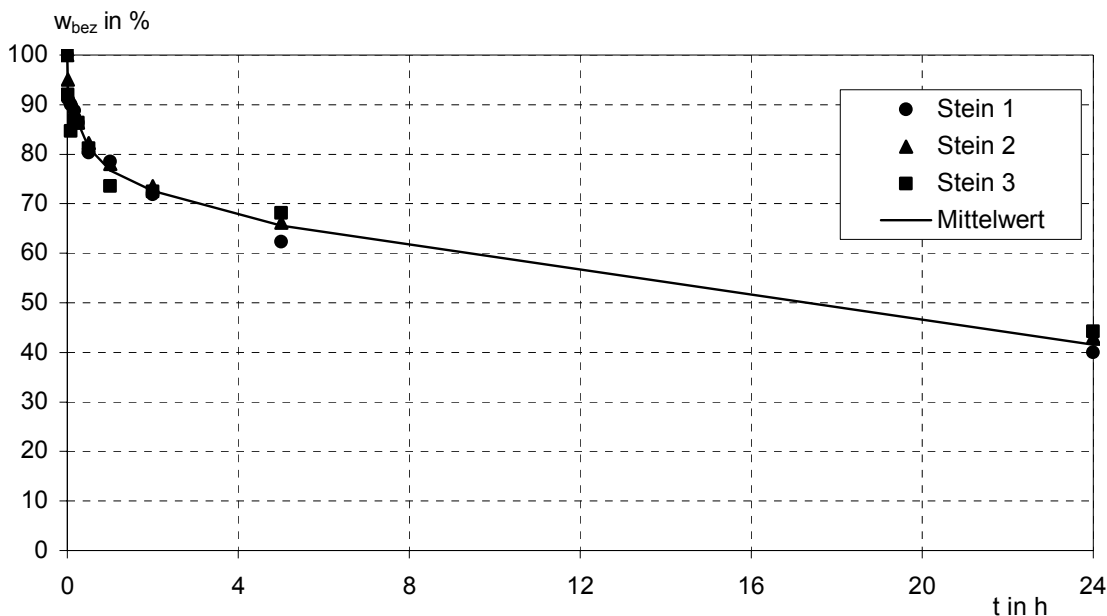
$m_0(t)$  Ausgangsmasse der nach einer Kontaktdauer  $t$  entnommenen Probe,  
 $m_{1000}(t)$  Masse der nach einer Kontaktdauer  $t$  entnommenen Probe nach dem Glühen.

Aus dem Wassergehalt  $w$  nach der Kontaktdauer  $t$  ergibt sich der bezogene Wassergehalt

$$w_{\text{bez}} = w(t) / w(t = 0) \cdot 100, \quad (16)$$

der zum Vergleich des Einflusses auf das Absaugen des Anmachwassers durch den Putzgrund bei den verschiedenen Ansätzen verwendet wurde.

Die Ergebnisse der zur Ermittlung von Vergleichswerten durchgeführten Untersuchungen an dem **Planhochlochziegel SX+** und dem **Leichtputz** sind in Bild 12 dargestellt. Wie zusätzliche Untersuchungen zum Glühverlust nach 48 Stunden Kontaktdauer – der Putz war bis zur Probennahme mit Folie abgedeckt – ergaben, wird dem Putz nach 24 Stunden durch den Putzgrund nahezu kein Wasser mehr entzogen.

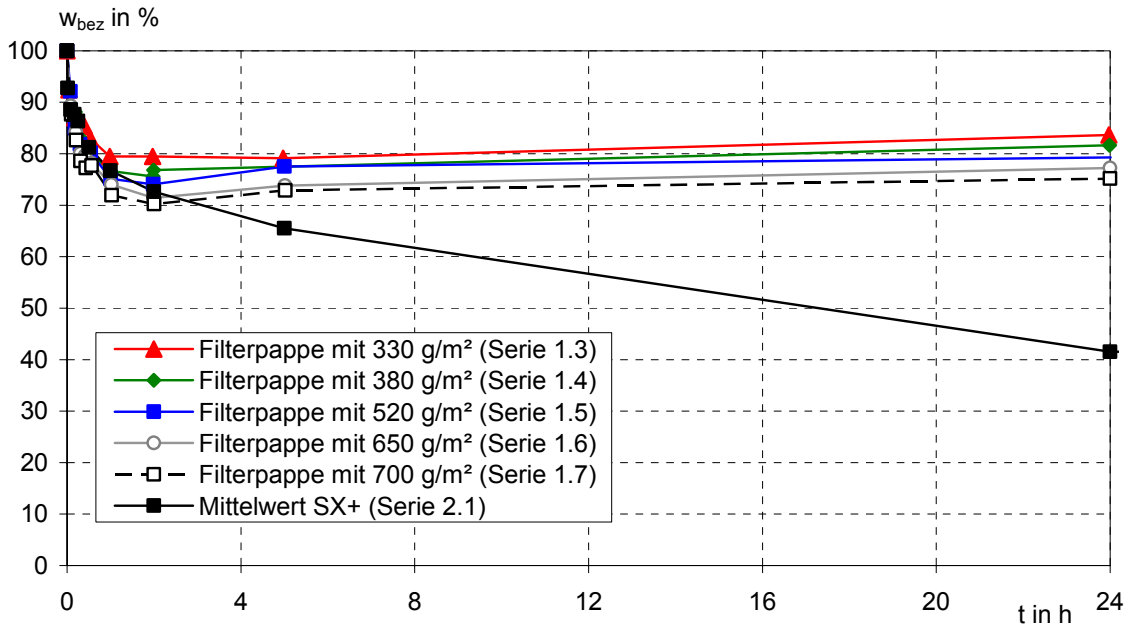


**Bild 12:** Bezogener Wassergehalt  $w_{bez}$  des Leichtputzes vom SX+ in Abhängigkeit von der Kontaktdauer  $t$ , Serie 2.1

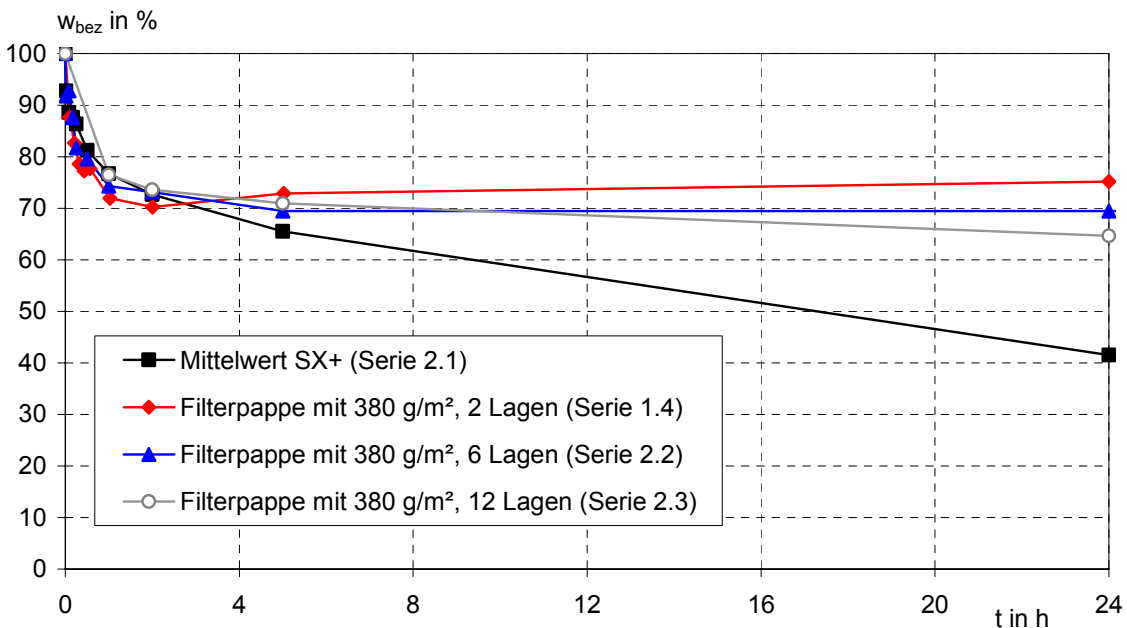
Die in den Versuchen verwendeten trocken gepressten **Viskoseschwamm-Pressplatten** (Serie 1.2) erwiesen sich als unbrauchbar, da sie beim Aufbringen des Putzes unterschiedlich über die Putzfläche aufquollen und so den Putz bereits früh in seinem Gefüge störten.

Bei den verwendeten **Filterpappen** mit unterschiedlichen Flächengewichten (Serien 1.3 bis 1.7) ergaben sich im ersten Untersuchungsschritt die in Bild 13 dargestellten zeitlichen Verläufe der bezogenen Wassergehalte. Bis zu einer Kontaktzeit von etwa 1 Stunde bis maximal 2 Stunden unterscheidet sich das Wasserabsaugen durch den Hochlochziegel (Referenz) und durch die Pappen nur wenig. Anschließend saugen die Pappen nur noch wenig Wasser aus dem Putz bzw. geben teilweise sogar wieder Wasser an den Putz zurück. Mit zunehmender Kontaktdauer mit dem Putzgrund unterscheidet sich das Wasserabsaugen durch den Ziegel und die Pappen immer deutlicher. Da die aus dem Putz abgesaugte Wassermenge mit dem Flächengewicht der Filterpappe zunahm, wurden im zweiten Untersuchungsschritt weitere Untersuchungen mit mehreren Lagen Pappe (Serien 2.2 und 2.3) durchgeführt. Jedoch wird auch bei Verwendung mehrerer Lagen Pappe immer noch weniger Wasser abgesaugt als beim Kontakt zum Mauerstein (s. Bild 14). Ursachen für die Unterschiede zwischen dem Wasserabsaugen durch die Pappen und die Mauersteine ist vermutlich einerseits eine Sättigung der verwendeten Pappen durch das abgesaugte Wasser. Andererseits könnten aber auch Feinststoffe aus den Putzen in die Poren der Pappen eingeschwemmt werden und diese verstopfen. Bei der Verwendung mehrerer

Lagen Pappe wird das Wasserabsaugen vermutlich auch durch Übergangswiderstände zwischen den Pappen beeinflusst. Es lässt sich zusammenfassen, dass die untersuchten Filterpappen nicht zur Simulation des Wasserabsaugens durch den SX+ geeignet sind.



**Bild 13:** Bezogener Wassergehalt  $w_{bez}$  des Leichtputzes in Kontakt mit Filterpappen mit unterschiedlichen Flächengewichten und mit dem SX+ in Abhängigkeit von der Kontaktdauer  $t$



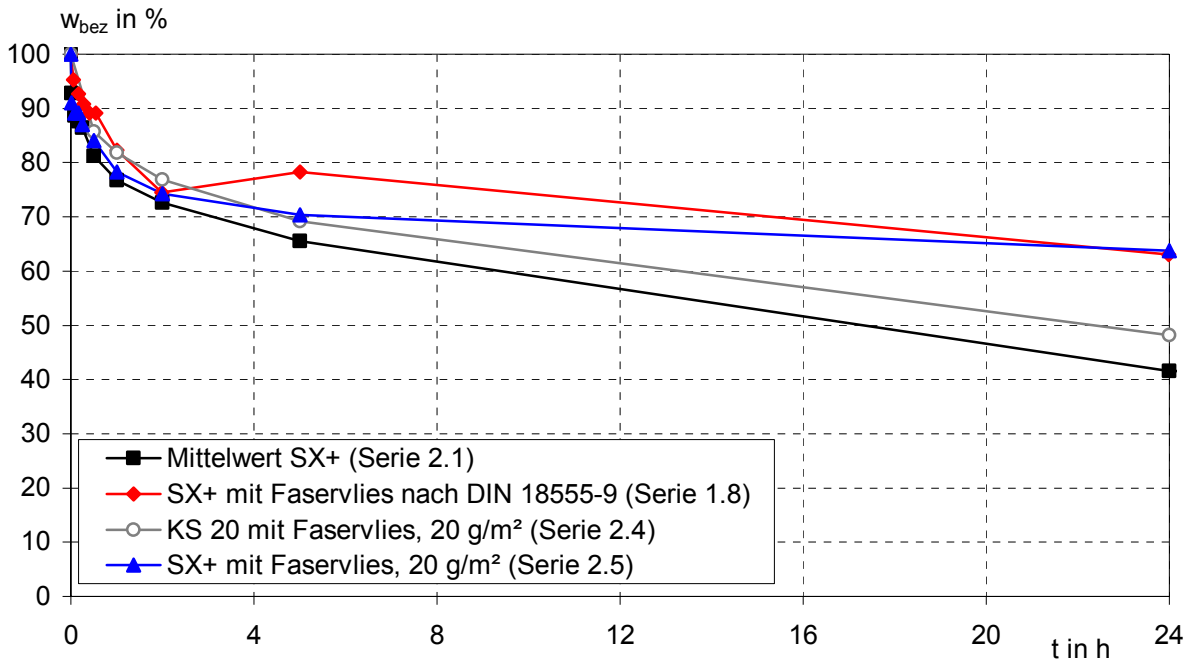
**Bild 14:** Bezogener Wassergehalt  $w_{bez}$  des Leichtputzes in Kontakt mit Filterpappen mit unterschiedlichen Lagenanzahlen und mit dem SX+ in Abhängigkeit von der Kontaktdauer  $t$

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit den zwei gewählten **Faservliesen** (Serien 1.8 und 2.5) sind in Bild 15 dargestellt. Dem Putz wird bei den mit den Faservliesen abgedeckten SX+ weniger Anmachwasser abgesaugt als bei dem unbehandelten SX+. Der Unterschied nimmt mit längerer Kontaktdauer zu. Das Absaugen des Anmachwassers durch den SX+ wird demnach deutlich durch die verwendeten Faservliese beeinflusst.

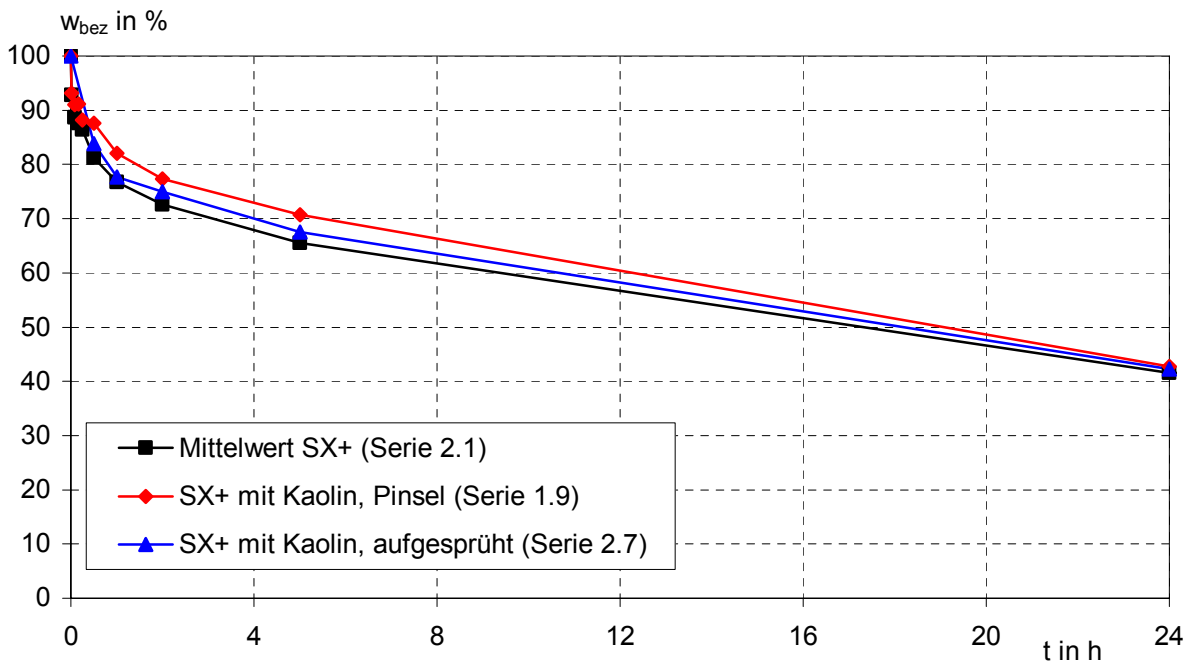
Da Kalksandsteine wegen des im Vergleich zu Ziegeln größeren Anteils an kleinen Kapillarporen (vgl. /RIE00/) das Anmachwasser mit einer größeren Saugkraft entziehen, wurde in einer weiteren Versuchsserie ein mit Faservlies abgedeckter Kalksandstein der Festigkeitsklasse 20 untersucht (Serie 2.4). Die Ergebnisse sind ebenfalls in Bild 15 dargestellt. Das Absaugen des Anmachwassers durch den mit Faservlies abgedeckten Kalksandstein unterscheidet sich im zeitlichen Verlauf nur wenig vom SX+. Jedoch ist die abgesaugte Anmachwassermenge beim Kalksandstein mit Vlies in den dargestellten 24 Stunden kleiner als beim SX+. Ferner wird dem Putz im Kontakt mit dem Kalksandstein im Unterschied zum SX+ auch nach 24 Stunden weiterhin Anmachwasser entzogen. Daher ist der mit Faservlies abgedeckte Kalksandstein nicht geeignet, das Wasserabsaugen der Ziegel zu simulieren.

Als weitere Zwischenlage zur Vermeidung eines Verbundes zwischen dem SX+ und dem Putz wurde eine **hydrophil eingestellte, poröse Folie** aus gesintertem Kunststoff untersucht (Serie 2.6). Dieser Kunststoff weist eine offene Porenstruktur auf und wird z. B. zur Herstellung von Filtern, Applikatoren für Kosmetikartikel und Schreibspitzen für Filzstifte verwendet. Die Untersuchungen zeigten jedoch, dass die verwendete Folie den Wassertransport völlig behindert und kein Wasser vom Ziegel aufgenommen wurde.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an den mit **Kaolin** vorbehandelten SX+ ergaben eine sehr gute Übereinstimmung des Absaugens des Anmachwassers mit dem unbehandelten SX+ (s. Bild 16). Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Vorbehandlungsmethoden mit Pinsel (Serie 1.9) und mit Druckluftspritzpistole (Serie 2.7) besteht nicht. Nach Aussägen von Stücken aus dem Außenscherben des Ziegels mit einer Fläche von  $140 \cdot 40 \text{ mm}^2$  (Prismengröße) konnte der Putz ohne nennenswerten Kraftaufwand vom Scherben entnommen werden.



**Bild 15:** Bezogener Wassergehalt  $w_{bez}$  des Leichtputzes in Kontakt mit dem SX+ und mit verschiedenen Putzgründen mit Faservlies in Abhängigkeit von der Kontaktdauer  $t$



**Bild 16:** Bezogener Wassergehalt  $w_{bez}$  des Leichtputzes in Kontakt mit dem unbehandelten und dem mit Kaolin vorbehandelten SX+ in Abhängigkeit von der Kontaktdauer  $t$

Zusammenfassend haben die Tastversuche gezeigt, dass das Wasserabsaugen durch den SX+ nicht mit Hilfe von Ersatzputzgründen wie beispielsweise Filterpappen simuliert werden konnte. Auch die untersuchten Zwischenlagen aus Faservliesen und hydrophil eingestellter Kunststoffolie beeinflussten das Wasserabsaugen durch den Putzgrund wesentlich. Lediglich bei der Verwendung von Kaolin als Zwischenschicht ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung des Absaugens des Anmachwassers mit dem unbehandelten SX+. Der Putz konnte ohne nennenswerte mechanische Beanspruchung von Putzgrund entnommen werden.

### **4.3.3 Vergleichsversuche**

#### **4.3.3.1 Versuchsprogramm**

Die Tastversuche, s. Abschnitt 4.3.2, an dem Planhochlochziegel SX+ in Kombination mit dem Leichtputz ergaben, dass die Kaolinschicht das Wasserabsaugverhalten nahezu nicht beeinflusst und der Putz ohne nennenswerte mechanische Beanspruchung vom Putzgrund entnommen werden kann. Um zu untersuchen, ob die Ergebnisse auch auf alle anderen Kombinationen von Putzgrund (Planhochlochziegel T16, SX+ und T9) und Außenputz (Normalputz, Leichtputz und Ultraleichtputz) übertragbar sind, wurden vergleichende Untersuchungen durchgeführt.

Im Rahmen der Vergleichsversuche wurden alle Putze in Kombination mit allen Planhochlochziegeln (ohne und mit Kaolinschicht) untersucht. Bestimmt wurden an Proben vom unbehandelten und vom mit Kaolin behandelten Putzgrund:

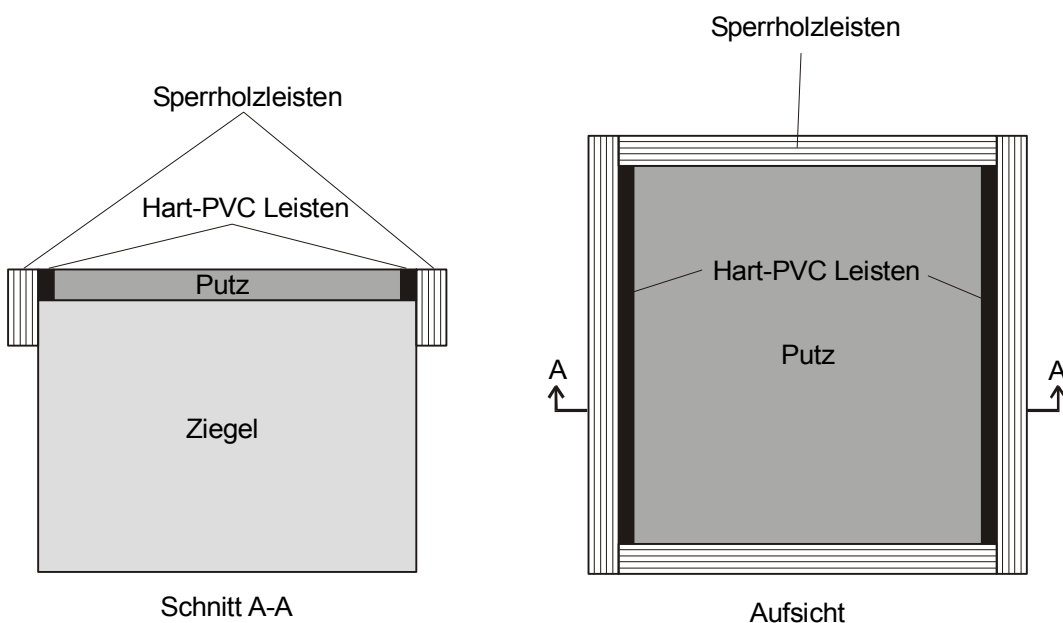
- der Wassergehalt mittels Glühverlust bei 1000 °C nach Kontaktdauern von 0 und 30 Minuten sowie von 1, 2, 5 und 24 Stunden an Proben von je drei Steinhälften,
- Rohdichte (lufttrocken) sowie Druckfestigkeit des Putzes in Anlehnung an das Verfahren III nach DIN 18555-9 /DIN99/ im Alter 28 Tagen an je acht Prismen von je zwei Steinhälften.

Ein weiteres Ziel der Vergleichsversuche war, einen möglichst repräsentativen Planhochlochziegel für die weiteren Putzuntersuchungen auszuwählen, um den Aufwand bei der Bestimmung der wesentlichen Materialparameter der Putze zu begrenzen.

### 4.3.3.2 Probenherstellung und Versuchsdurchführung

Die Planhochlochziegel wurden für die Untersuchungen aus Gründen der Handhabbarkeit zunächst in Steinbreite durch Trockensägen halbiert. Anschließend wurde für die Behandlung der Putzflächen mit Kaolin analog zu Abschnitt 4.3.2.2 eine Suspension aus Kaolin und Wasser (ein Masseteil Kaolin, zwei Masseteile Wasser) hergestellt. Diese Suspension wurde dann auf die Putzfläche der Hochlochziegelhälften mit einer Druckluftspritzpistole aufgesprüht. Danach wurden diese Hochlochziegelhälften zunächst drei Tage bei 60 °C in einem Trockenschrank getrocknet und anschließend für 2 Wochen im Normklima 20 °C und 65 % rel. Feuchte gelagert.

Um eine gleichmäßige Putzdicke (planmäßig 20 mm) zu gewährleisten, wurden Rahmen aus kunststoffbeschichtetem Sperrholz und PVC hergestellt, welche auf die zu putzenden Steinhälften aufgesetzt wurden (s. Bild 17).



**Bild 17:** Ziegel mit Putz und Putzrahmen

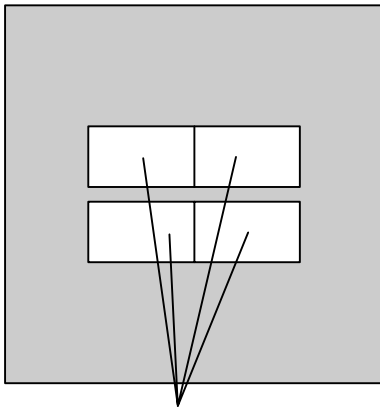
Zum Mischen des Putzmörtels wurde zunächst der Trockenmörtel sackweise in einen Zwangsmischer eingefüllt und durch Mischen homogenisiert. Anschließend wurde das Zugabewasser in den laufenden Mischer gegeben. Die Mischzeit nach Wasserzugabe betrug bei allen Putzen 2 Minuten. Die Wasserzugabemengen wurden so eingestellt, dass die Putze eine gute Verarbeitbarkeit aufwiesen. Der Verhältniswert von Wasserzugabemenge

und Trockenmörtelmasse betrug beim Normalputz (NP) 0,18, beim Leichtputz (LP) 0,23 und beim Ultraleichtputz (ULP) 0,45.

Nach fünf Minuten Reifezeit im Anschluss an den Mischvorgang wurden die vorbereiteten Hochlochziegel liegend mit der Hand geputzt. Dazu wurde der Putz möglichst schnell hintereinander auf die Putzflächen von jeweils fünf Hochlochziegelhälften "angeworfen". Dabei wurde jeweils der Zeitpunkt des ersten Kontaktes von Putz und Putzgrund notiert. Anschließend wurde der Putz über die Rahmen mit einem Stahllineal abgezogen und für 24 Stunden mit Folie abgedeckt.

Der bezogene Wassergehalt der Putze nach den o. g. Kontaktdauern mit dem Putzgrund wurde analog zum Abschnitt 4.3.2.3 bestimmt. Die Proben wurden in der gleichen Reihenfolge von den Steinen entnommen, wie diese zuvor verputzt worden waren. Dadurch sollten die vorgesehenen Kontaktdauern der Putze mit dem Stein möglichst genau eingehalten werden. In der Zeit zwischen der Probenentnahme waren die geputzten Steinhälften mit Folie abgedeckt, um ein Austrocknen zu vermeiden.

Die geputzten Planhochlochziegel zur Herstellung der Prüfkörper zur Bestimmung der Rohdichte (lufttrocken) sowie der Druckfestigkeit in Anlehnung an das Verfahren III in DIN 18555-9 /DIN99/ wurden nach der eintägigen Lagerung unter Folie (siehe oben) 27 Tage im Normalklima 20 °C und 65 % rel. Feuchte gelagert. Im Alter von 28 Tagen nach der Herstellung wurden je Planhochlochziegel vier Putzprismen von 70 · 40 · 20 mm<sup>3</sup> entnommen (Entnahmestellen s. Bild 18), gemessen und gewogen. Zur Entnahme der Putzprismen wurde zunächst der Außenscherben durch Trockensägen abgetrennt. Anschließend wurden die Prismen trocken zurechtgesägt und der Putz vom Außenscherben entnommen, wobei der Putz von den unbehandelten Ziegeln ebenfalls durch Trockensägen abgetrennt wurde. Nach der Probenvorbereitung wurde die Druckfestigkeit bestimmt. Die Prüfungsgeschwindigkeit zur Bestimmung der Druckfestigkeit wurde so eingestellt, dass die Maximallast nach etwa 60 bis 90 Sekunden erreicht werden sollte.



Putzprismen  $70 \cdot 40 \text{ mm}^3$   
zur Bestimmung der  
Druckfestigkeit

**Bild 18:**

Entnahmestellen für die Proben zur Bestimmung  
der Druckfestigkeit des Putzes vom Putzgrund

### **4.3.3.3 Versuchsergebnisse**

Die Auswertung des Wasserabsaugens durch den Putzgrund erfolgte wie bei den Tastversuchen. Die zeitlichen Verläufe der ermittelten bezogenen Wassergehalte sind in den Bildern B34 bis B36 und B40 bis B42 dargestellt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Rohdichte im lufttrockenen Zustand und zur Druckfestigkeit in Anlehnung an das Verfahren III der DIN 18555-9 /DIN99/ enthalten die Bilder B37 bis B39 sowie B43 bis B46.

#### **Einfluss der Kaolinschicht**

Den Bildern B34 bis B36 ist zu entnehmen, dass die zeitlichen Verläufe des bezogenen Wassergehaltes  $w_{\text{bez}}$  im Allgemeinen nicht nennenswert durch die Vorbehandlung der Planhochlochziegel mit Kaolin beeinflusst werden. Der etwas größere Unterschied zwischen mit Kaolin behandelten und unbehandelten Planhochlochziegeln beim Leichtputz kann auf die größere Streuung der Versuchsergebnisse zurückgeführt werden.

Die Druckfestigkeitswerte der Putze, entnommen von behandelten und unbehandelten Planhochlochziegeln, unterscheiden sich ebenfalls nur wenig (s. Bilder B37 bis B39).

## **Einfluss der Ziegelsorte**

Trotz der unterschiedlichen Wasseraufnahmekoeffizienten der drei verschiedenen Planhochlochziegel (vgl. Abschnitt 3.1.2.5) ist der Einfluss der Ziegelsorte auf das Absaugen des Anmachwassers beim Normalputz und beim Ultraleichtputz nur gering (s. Bilder B40 und B41). Die etwas größeren Unterschiede beim Leichtputz (s. Bild B42) sind wie o. a. auf die etwas größeren Streuungen der Versuchsergebnisse zurückzuführen. Demnach wird das Absaugen des Anmachwassers durch die Planhochlochziegel überwiegend von den Eigenschaften der Putze beeinflusst.

Die in Anlehnung an das Verfahren III nach DIN 18555-9 /DIN99/ im Alter von 28 Tagen ermittelten Druckfestigkeitswerte, sind in den Bilder B43 und B44 zum Vergleich des Einflusses der Planziegelsorten dargestellt. Im Rahmen der Prüfstreuungen stimmen die Druckfestigkeitswerte eines Putzes, jeweils entnommen von den verschiedenen Planhochlochziegeln, gut überein. Der Einfluss der Ziegelsorte ist demnach vernachlässigbar. Auch die im Alter von 28 Tagen bestimmten Rohdichten (lufttrocken) der Putze von den Planhochlochziegeln unterscheiden sich nicht signifikant (s. Bilder B45 und B46).

Zusammenfassend haben die Vergleichsversuche gezeigt, dass sowohl das Absaugen des Anmachwassers als auch die Druckfestigkeit der Putze im Alter von 28 Tagen nur unwesentlich durch die Vorbehandlung des Putzgrundes mit Kaolin beeinflusst wird. Auch die Unterschiede zwischen den verschiedenen Planhochlochziegeln – Absaugen des Anmachwassers, Druckfestigkeit und Rohdichte (lufttrocken) – sind sehr gering. Daher ist es gerechtfertigt, einen der drei Hochlochziegel als repräsentativen Putzgrund zur Herstellung der Probekörper zur Bestimmung der wesentlichen mechanischen Eigenschaften auszuwählen und den Putzgrund mit Kaolin zu behandeln.

### **4.3.4 Zusammenfassung**

Die durchgeführten Tastversuche (s. Abschnitt 4.3.2) und die vergleichenden Untersuchungen (s. Abschnitt 4.3.3) haben gezeigt, dass die wesentlichen Ziele (vgl. Abschnitt 4.3.1) bei der Entwicklung des Herstellungsverfahrens nur durch die Verwendung von Kaolin zur Vorbereitung der Putzflächen der Hochlochziegel erreicht werden konnten. Durch die Verwendung von Kaolin wurden weder das Absaugen des Anmachwassers durch den Putzgrund noch die Druckfestigkeit des Putzes vom Putzgrund wesentlich beeinflusst. Daher wurde Kaolin auch für das Herstellungsverfahren für Probekörper zur Be-

stimmung wesentlicher mechanischer und bruchmechanischer Materialparameter (s. Abschnitt 4.4) verwendet. Da sich die verschiedenen Hochlochziegel im Einfluss auf die untersuchten Parameter nicht wesentlich unterscheiden, wurde ferner einer der Planhochlochziegel, nämlich der SX+, zur Herstellung der o. a. Probekörper verwendet. Der SX+ weist nur kleine Putzrillen auf, die Oberfläche ist nur wenig rau. Dadurch war davon auszugehen, dass die Probekörper mit den geringsten Einwirkungen vom Putzgrund entnommen werden konnten. Um Störungen des Gefüges der Putze durch das Zurechtsägen der Putzprobekörper zu vermeiden (vgl. Abschnitt 4.3.3), wurden ferner Stahlschalungen auf die Putzflächen aufgesetzt, welche auf die Putzdicke und die Maße der Probekörper abgestimmt waren.

## **4.4 Bestimmung von Materialparametern der Putze und des Verbundes**

### **4.4.1 Versuchsprogramm**

Ziel der Untersuchungen war, realitätsnahe Materialparameter für die numerische Simulation der Beanspruchung von Putz auf geputzten Wänden zu ermitteln und dabei den Einfluss des Putzalters zu erfassen.

An Putzprobekörpern wurden die in Tabelle 7 aufgeführten mechanischen, bruchmechanischen und physikalischen Materialparameter für alle drei Putze bestimmt.

Mit den Serien A (Biegezugversuche), AZ (Zugversuche) sowie AS (Schwindversuche im Normalklima 20 °C, 65 % rel. F.) wurde die zeitliche Entwicklung der Materialparameter durch Untersuchungen zu verschiedenen Entnahmealtern bestimmt. Aufgrund der im jungen Alter der Putze schneller verlaufenden Entwicklung wurden die Prüftermine wie folgt gewählt: 3, 5, 7, 14, 27, 90 und 180 Tage (außer Schwinden). Aus organisatorischen Gründen weichen die Prüftermine jedoch teilweise von diesen Vorgaben ab. Dies wurde bei der Auswertung der Versuchsergebnisse berücksichtigt.

Im Unterschied zu den o. g. Serien A, AZ und AS wurde bei der Serie AST (Versuch zum Trocknungsschwinden im CO<sub>2</sub>-freien Lagerungsklima 20 °C, 65 % rel. F.) lediglich das Entnahmealter 2 Tage untersucht.

Mit der Serie AK (Kriechversuche) wurden Materialparameter zur Beschreibung des Kriechens unter Zugbeanspruchung bestimmt. Das Prüfalter betrug 27 Tage.

Mit der Serie B wurde der Einfluss der Belastungsrichtung (Putzgrundseite unter Zugbeanspruchung) im Biegezugversuch auf die bruchmechanischen Materialparameter geprüft.

Der Einfluss des Putzgrundkontaktes auf wesentliche Materialparameter wurde durch Untersuchungen an Prismen ohne Kontakt zum Putzgrund bei den Serien C (Biegezugversuche) und CZ (Zugversuche) quantifiziert.

Mit Hilfe der Serien D, E, F (Biegezugversuche) sowie DZ und FZ (Zugversuche) wurde der Einfluss der Putzdicke (10, 20 und 30 mm) auf wesentliche mechanische Materialparameter untersucht.

Von jeweils insgesamt fünf Steinen wurde die folgende Anzahl an Prüfkörpern für die Untersuchungen an Flachprismen mit und ohne Kontakt zum Putzgrund entnommen:

- Zugfestigkeit und dynamischer E-Modul an jeweils sechs Prismen
- Druckfestigkeit  $\beta_{D,III}$  nach dem Verfahren III aus DIN 18555-9 /DIN99/ an je einer Hälfte der zur Bestimmung der Netto-Biegezugfestigkeit und der Bruchenergie verwendeten Prismen
- Netto-Biegezugfestigkeit und Bruchenergie an jeweils fünf Prismen
- Kriechen an jeweils zwei Prismen
- Trockenrohdichte an jeweils drei Prismen
- Schwinden an jeweils drei Prismen.

An Verbundprüfkörpern, entnommen aus den Putzflächen geputzter Steine wurden auch Untersuchungen zu Materialparametern des Haftverbundes zu den o. a. verschiedenen Prüfaltern durchgeführt. Geprüft wurden dabei in der Regel jeweils drei Prüfkörper.

Parallel zu den mechanischen, bruchmechanischen und physikalischen Materialparametern der Putze wurden auch Untersuchungen zum Absaugen des Anmachwassers durch den Putzgrund an mit Kaolin vorbehandelten und nicht behandelten SX+ durchgeführt. Hierzu wurde der Wassergehalt des Putzes vom Putzgrund durch Bestimmung des Glühverlustes bestimmt (vgl. Abschnitt 4.3.2.3). Ziel dieser Untersuchungen war, die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse aus Abschnitt 4.3.3 auf Putze, die mit einer Putzmaschine hergestellt und appliziert wurden, zu überprüfen. Ferner wurden auch die Porenstruktur der Putze (Prüfalter 28 Tage) und die Karbonatisierungstiefe untersucht. Ziel der Untersuchungen zur Porenstruktur war zum einen, Unterschiede in der Porenstruktur des Putzes von unbehandeltem Putzgrund und dem mit Kaolin behandelten Putzgrund zu bestimmen. Zum anderen sollte auch überprüft werden, ob sich durch den Einfluss des Absaugens des Anmachwassers im Putz Schichten mit unterschiedlicher Porosität ausbilden.

**Tabelle 7: Bestimmte Materialparameter**

Prüfkörper bzw. Bezeichnung	Maße (l · b · h)	Prüf- alter	Herstellungs- verfahren	Besonderheiten in den Biegezugversuchen		Bestimmte Materialparameter		
				Probe mit Kerbe	Bean- spruchung			
1	2	3	4	5	6	7		
Normprismen	160 · 40 · 40	28	-	-	-	Biegezugfestigkeit $\beta_{BZ}$ , Druckfestigkeit $\beta_D$ , Rohdichte (lufttrocken) $\rho_l$ und Trockenrohddichte $\rho_d$ nach DIN 18555-3 /DIN82c/		
Flachprismen Serie A	160 · 40 · 20	3, 5, 7, 14, 27, 90 und 180	s. Abschnitt 4.4.2	ja	I	dynamischer E-Modul $E_{dyn}$ , Netto-Biegezugfestigkeit $\beta_{BZ,N}$ , Bruchenergie $G_F$ , Druckfestigkeit $\beta_{D,III}$		
Flachprismen Serie AZ				-	-	dynamischer E-Modul $E_{dyn}$ , Zugfestigkeit $\beta_Z$		
Flachprismen Serie AS				3, 5, 7, 14, 27 und 90	-	Schwinddehnungen $\varepsilon_S$ , Masseänderungen $\Delta m$		
Flachprismen Serie AST		3		-	Kriechdehnungen $\varepsilon_K$			
Flachprismen Serie AK		27		Stahlschalung (vgl. Abschnitt 4.4.2)	ja	II	wie Serie A	
Flachprismen Serie B					I			
Flachprismen Serie C					-	-	wie Serie AZ	
Flachprismen Serie CZ		160 · 40 · 10		27	s. Abschnitt 4.4.2	nein	I	dynamischer E-Modul $E_{dyn}$ , Netto-Biegezugfestigkeit $\beta_{BZ,N}$
Flachprismen Serie DZ						-	-	wie Serie AZ
Flachprismen Serie E						160 · 40 · 20	-	wie Serie D
Flachprismen Serie F	160 · 40 · 30	27	s. Abschnitt 4.4.2	nein	I			
Flachprismen Serie FZ				-	-	wie Serie AZ		
Verbundprüf- körper	90 · 90 · 20	3, 5, 7, 14, 27, 90 und 180	-	-	-	Haftzugfestigkeit $\beta_{HZ}$ , Bruchenergie $G_F$		
Flachprismen	160 · 40 · 20	27	-	-	-	Rohdichte (lufttrocken) $\rho_l$ , Trockenrohddichte $\rho_d$ , Feuchtegehalt $h_m$		
Proben aus der Putzschicht	-	27	-	-	-	Porengrößenverteilung		

Beanspruchung im Biegezugversuch:

- I Putzoberfläche (Luftseite) des Putzes unter Zugbeanspruchung
- II Putzgrundseite unter Zugbeanspruchung

#### 4.4.2 Probenherstellung und Nachbehandlung

Aus den in Abschnitt 4.3.4 aufgeführten Gründen wurden zur Herstellung der Putzprismen mit Kaolin vorbehandelte Hochlochziegel SX+ ausgewählt. Verwendet wurden dabei aus Gründen der Handhabbarkeit und der Lagerkapazitäten in Steinbreite halbierte Ziegel (vgl. Abschnitt 4.3.3). Die Kaolinschicht auf der Putzfläche der Ziegel wurde analog zu Abschnitt 4.3.3.2 mit einer Druckluftspritzpistole aufgesprüht (s. Bild 19). Anschließend wurden die Planhochlochziegel bei 60 °C in einem Trocknungsschrank bis zum Erreichen der Ausgangsmasse getrocknet und anschließend 3 Wochen im Normalklima 20 °C und 65 % rel. Feuchte gelagert.



Bild 19: Vorbereitung der Putzflächen der SX+ mit Kaolin

Um Sägearbeiten zur Anpassung der Probengröße für die durchgeführten Untersuchungen zu vermeiden – vgl. Abschnitt 4.3.4 –, wurden analog zu Verfahren III in DIN 18555-9 /DIN99/ Stahlschalungen verwendet. Diese wurden lose auf die Putzfläche aufgesetzt (s. Bilder 20 und 21). Die mit diesen Schalungen hergestellten prismatischen Prüfkörper hatten eine Länge von 140 mm und eine Breite von 40 mm.



Bild 20: SX+ mit Kaolinbehandlung und Stahlschalung

Um ein Austrocknen über die Lager- und Stoßfugenflächen sowie die Rückseite der Ziegel zu vermeiden, wurden die für die Probenherstellung verwendeten in Richtung Steinbreite halbierten Planhochlochziegel in Folie eingehüllt. Dadurch sollten zum Mauerwerk analoge Erhärtungsbedingungen simuliert werden.

Das Putzen erfolgte mit Putzmaschinen durch Anwendungstechniker des jeweiligen Herstellers der verwendeten Produkte (s. Bild 21). Die Wasserzugabe an den Maschinen wurde so eingestellt, dass sich die Putzmörtel eine verarbeitungsgerechte Konsistenz aufwiesen.

Nach der Herstellung wurden die geputzten Einzelsteine zunächst 24 Stunden unter Folie abgedeckt bei 20 °C und anschließend im Normalklima 20 °C und 65 % rel. Feuchte gelagert. Die zur Prismenherstellung auf den Putzgrund aufgesetzte Stahlschalung verblieb bis zur Entnahme der Prismen vom Putzgrund auf der Putzfläche. Die Proben wurden jeweils am Tag vor der Prüfung abgenommen und vorbereitet. Nach der Vorbereitung wurden die Prüfkörper bis zur Prüfung (1 Tag nach der Entnahme) unter Folie gelagert.



Bild 21: Herstellung der Putzprismen

### 4.4.3 Versuchsdurchführung und -auswertung

#### 4.4.3.1 Frisch- und Festmörtelkennwerte

Der Putzmörtel zur Bestimmung der Frisch- und Festmörtelkennwerte wurde mit den jeweiligen Putzmaschinen in Eimer gespritzt. Am Frischmörtel wurden dann nach 5 Minuten Reifezeit Ausbreitmaß, die Rohdichte des Frischmörtels und Luftgehalt nach DIN 18555-2 /DIN82b/ bestimmt.

Die Normprismen zur Bestimmung der Festmörtelkennwerte Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Trockenrohichte wurden nach DIN 18555-3 /DIN82c/ hergestellt und geprüft. Die Verdichtung des Putzmörtels erfolgte mit dem Schockverfahren. Nach der Herstellung lagerten die Normprismen bis zum Alter von 7 Tagen (2 Tage eingeschalt, 5 Tage

ausgeschalt) im Klima 20/95 (20 °C, 95 % rel. Feuchte) und im Anschluss daran bis zur Prüfung im Normalklima 20 °C und 65 % rel. Feuchte.

### 4.4.3.2 Mechanische Materialparameter der Putze

#### 4.4.3.2.1 Dynamischer E-Modul

Der dynamische E-Modul  $E_{\text{dyn}}$  wurde sowohl an den Flachprismen für die Zugversuche als auch an denen für die Biegezugversuche ermittelt (s. Tabelle 7). Bestimmt wurde dazu die Impulslaufzeit mit einem Steinkamp-Gerät. Der dynamische E-Modul  $E_{\text{dyn}}$  ergibt sich wie folgt (s. auch /STEIN/):

$$E_{\text{dyn}} = \rho_l \cdot \left(\frac{l}{t}\right)^2 \cdot \frac{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)}{1-\nu} \quad (17)$$

mit:

$\rho_l$	Rohdichte (lufttrocken),
$l$	Prüfkörperlänge,
$t$	Impulslaufzeit,
$\nu$	Querdehnzahl (Annahme hier: 0,2).

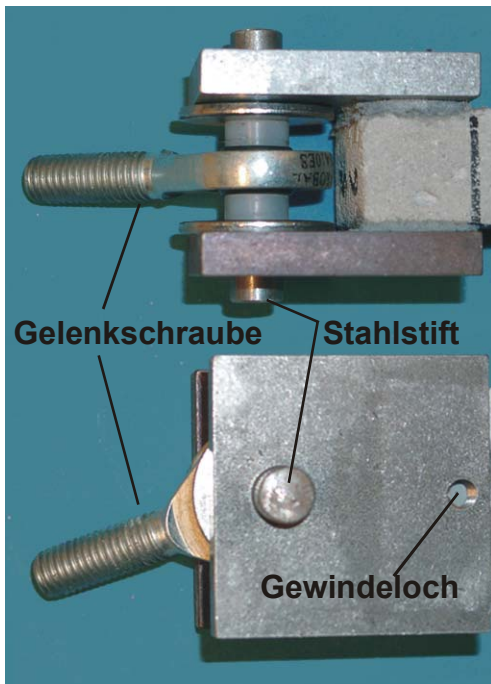
#### 4.4.3.2.2 Zentrische Zugfestigkeit

Die für die Ermittlung der Zugfestigkeit verwendeten Prismen wurden unmittelbar nach der Entnahme vom Putzgrund zunächst gemessen und gewogen. Danach wurde die Impulslaufzeit mit einem Steinkamp-Gerät zur Ermittlung des dynamischen E-Modul (s. Abschnitt 4.4.3.2.1) bestimmt. Anschließend wurden mit einer speziellen Klebevorrichtung an den beiden Enden der Prismen beidseitig Stahlplatten mit dem Zwei-Komponenten-Kleber Ardipox appliziert (s. Bild 22), über welche die Versuchslast eingeleitet wurde. Die vorbereiteten Prismen wurden dann bis zur Prüfung (24 Stunden nach der Entnahme) mit Folie umhüllt, um ein Austrocknen zu verhindern. Die freie Länge zwischen den applizierten Stahlplatten betrug 100 mm.

Der Anschluss an die Prüfmaschine erfolgte mit Gelenkschrauben. Zur Bestimmung des E-Moduls unter Zugbeanspruchung wurden Verformungsmessungen zwischen den Lasteinleitungsplatten mit induktiven Wegaufnehmern durchgeführt. Die gemessenen Verformungen wurden jedoch deutlich durch die Klebefuge beeinflusst, weshalb die Auswertungen der Verformungsmessungen unplausible Werte für den E-Modul und die Dehnung bei Erreichen der Zugfestigkeit ergaben und daher verworfen wurden.

Die Belastungsgeschwindigkeit wurde jeweils so eingestellt, dass der Bruch im Allgemeinen nach etwa 60 bis 90 Sekunden eintrat.

Lasteinleitung an den  
Prismenenden



Zugversuch



Bild 22: Flachprisma für Zugversuche

#### 4.4.3.2.3 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit der Putze wurde im Anschluss an die Biegezugversuche an einer Hälfte der verwendeten Prüfkörper in Anlehnung an das Verfahren III nach DIN 18555-9 /DIN99/ bestimmt (Prüfkörpergröße:  $l \cdot b \cdot h \approx 70 \cdot 40 \cdot 20 \text{ mm}^3$ ), vgl. Tabelle 7. Die Prüfungsgeschwindigkeit wurde jeweils so gewählt, dass die Maximallast nach etwa 60 bis 90 Sekunden erreicht werden sollte.

#### 4.4.3.3 Bruchmechanische Materialparameter der Putze

##### 4.4.3.3.1 Allgemeines

Zur Ermittlung von bruchmechanischen Materialparametern für die Putze wurden Biegezugversuche durchgeführt, bei denen vollständige Last-Durchbiegungskurven ermittelt

wurden. Die Versuche wurden mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode simuliert, um alle zur Beschreibung des Nachbruchverhaltens der Putze notwendigen Materialparameter (Zugfestigkeit, Bruchenergie und Verlauf der Spannungs-Rissöffnungsbeziehung) zur Beschreibung der Zugtragverhaltens nach Überschreiten der Zugfestigkeit für die numerischen Untersuchungen an geputzten Mauerwerkswänden invers (s. Abschnitt 6.2) zu bestimmen.

#### **4.4.3.3.2 Versuchsdurchführung**

Nach der Entnahme vom Putzgrund wurden die Flachprismen zunächst vermessen und gewogen. Danach wurde die Impulslaufzeit zur Bestimmung des dynamischen E-Moduls mit einem Steinkamp-Gerät (vgl. Abschnitt 4.4.3.2.1) gemessen. Anschließend wurden die Prismen bei den Serien A und C auf der Putzoberfläche und bei der Serie B auf der Putzgrundseite mit einem dünnen Diamantsägeblatt in Probenmitte durch Trockensägen 5 mm tief eingekerbt. Nach dem Kerben der Proben, wurden, um ebene Oberflächen für Verformungssessungen zu erhalten, oberhalb der Auflager im Biegezugversuch (s. Bild 23) dünne Federstahlstreifen und neben der Kerbe (bei den ungekerbten Probekörpern an gleicher Stelle), dünne Messingblechstreifen mit dem Zwei-Komponenten-Kleber Akepox appliziert. Im Bereich der Auflager und im Lasteinleitungsbereich wurden die Prismen anschließend mit dünnen Gipsschichten streifenförmig abgeglichen, um Unebenheiten in der Probenoberfläche z. B. durch Putzrillen auszugleichen und dadurch eine gleichmäßige Lasteinleitung zu gewährleisten. Nach der Vorbereitung wurden die Prismen analog zu Abschnitt 4.4.3.2.2 bis zur Prüfung, die einen Tag nach der Entnahme der Probekörper erfolgte, unter Folie gelagert.

Die Prüfung erfolgte mit dem in Bild 23 dargestellten Versuchsaufbau. Während der Versuche wurden die Verformungen oberhalb der Auflager (Wegaufnehmer a) und in etwa 2,5 mm von der Probenmitte entfernt (Wegaufnehmer d) auf beiden Seiten der Prismen mit induktiven Wegaufnehmern gemessen. Dadurch konnte ein Verdrehen der Prismen im Versuch erfasst werden. Die Verformungen, die aufgebrachte Kraft, der von der Traverse der Prüfmaschine zurückgelegte Weg und die Versuchsdauer wurden mit einem Rechner erfasst.

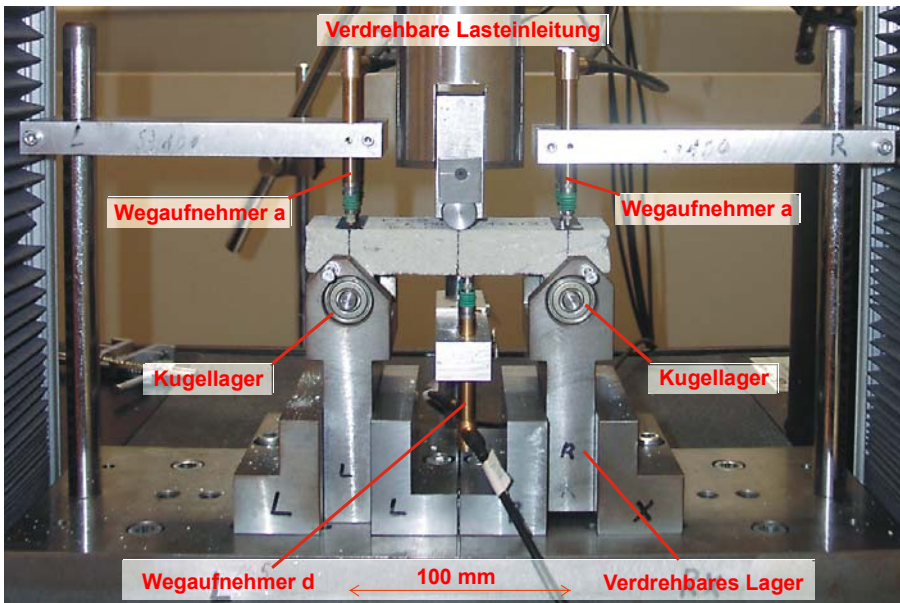


Bild 23: Biegezugversuch

In den Versuchen wurde zunächst eine geringe Vorlast (maximal 5 N) aufgebracht. Anschließend wurden die in der Tabelle 8 aufgeführten Regelungen eingeschaltet, deren Zuordnung zu den Putzen und Prüfaltem in Tabelle 9 enthalten ist. Grundsätzlich wurden die Versuche zunächst bis zum Erreichen einer geringen Kraft über den von der Traverse der Prüfmaschine zurückgelegten Weg geregelt. Anschließend wurden die Versuche über die gemessene Mittendurchbiegung geregelt, um vollständige Last-Verformungskurven ermitteln zu können.

Tabelle 8: Regelungen bei den Biegezugversuchen

Regelung	Rampe	Rampenende	Prüfgeschwindigkeit	Steuerung über
			mm/min	
1	2	3	4	5
1	1	Kraft von 25 N	0,1	Traversenweg
	2	Durchbiegung von 0,4 mm	0,01	gemessene Durchbiegung
	3	Durchbiegung von 1 mm	0,05	
2	1	Kraft von 10 N	0,1	Traversenweg
	2	Durchbiegung von 0,4 mm	0,01	gemessene Durchbiegung
	3	Durchbiegung von 1 mm	0,05	

**Tabelle 9:** Zuordnung der Regelungen

Putz	Alter	Regelung <sup>1)</sup>
	d	
1	2	3
NP	5, 7, 14, 28, 90 und 180	1
LP		
NP	3	2
LP		
ULP	3, 5, 7, 14, 28, 90 und 180	

1) s. Tabelle 8

#### 4.4.3.3 Versuchsauswertung

##### Bruchenergie

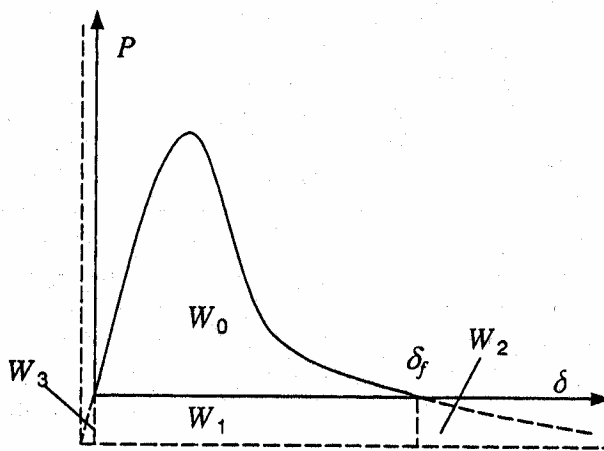
Im Rahmen der Auswertung der Biegezugversuche wurde die Bruchenergie  $G_F$  als Materialparameter der nichtlinearen Bruchmechanik bestimmt. Die Bruchenergie entspricht der auf die Bruchfläche  $A_{lig}$  bezogenen Energie  $W_{ges}$ , die für eine vollständige Materialtrennung erforderlich ist:

$$G_F = \frac{W_{ges}}{A_{lig}} \quad (18)$$

mit:

$W_{ges}$  Energie zur vollständigen Materialtrennung,  
 $A_{lig}$  Bruchquerschnitt bzw. Ligamentquerschnitt.

Im Dreipunktbiegeversuch entspricht die erforderliche Energie  $W_{ges}$  der Fläche unter der vollständigen Last-Durchbiegungskurve. In Bild 24 ist eine solche Last-Durchbiegungskurve qualitativ dargestellt ( $W_{ges}$  entspricht der Summe der Energieanteile  $W_0$ ,  $W_1$ ,  $W_2$  und  $W_3$ ).



**Bild 24:** Last-Verformungskurve aus Dreipunktbiegeversuch, aus /GUO00/

Die Last-Durchbiegungskurve kann jedoch nur dann vollständig aufgezeichnet werden, wenn der Prüfkörper gewichtskompensiert ist oder der Versuchsaufbau so konzipiert wird, dass der Versuchskörper entgegen seines Eigengewichtes belastet wird, da sonst immer ein vorzeitiges Versagen bei der Durchbiegung  $\delta_f$  (s. Bild 24) eintritt, bei welcher der Widerstand des Prüfkörpers kleiner als die aus dem Eigengewicht resultierende Belastung ist. Die Flächenanteile  $W_1$ ,  $W_2$  und  $W_3$  werden in diesem Fall nicht erfasst und müssen daher abgeschätzt werden. Dabei hat die Fläche  $W_2$  nach /PET81/ näherungsweise die gleiche Größe wie die Fläche  $W_1$  und kann als Produkt aus den Endwerten (Durchbiegung  $\delta_f$  und Kraft  $P(\delta_f)$ ) der Last-Durchbiegungskurven berechnet werden. Die Fläche  $W_3$  kann nach /PET81/ aufgrund ihrer geringen Größe im Allgemeinen vernachlässigt werden. Der Ansatz nach /PET81/ wurde auch hier zur Ermittlung des Flächenanteils  $W_2$  verwendet.

## Netto-Biegezugfestigkeit

Die Netto-Biegezugfestigkeit wurde auf Grundlage der Versuchsergebnisse wie folgt ermittelt:

$$\beta_{BZ,N} = \frac{3 F_{\max} \cdot l}{2 b \cdot h_{\text{lig}}^2} \quad (19)$$

mit:

$F_{\max}$  Maximallast im Biegezugversuch,

$l$  Stützweite (100 mm),

$b$  Breite des Prüfkörpers,

$h_{\text{lig}}$  Ligamenthöhe des Prüfkörpers (Gesamthöhe abzüglich Kerbtiefe).

## Spannungs-Rissöffnungsbeziehungen

Die durchgeführten Biegezugversuche wurden mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode simuliert, um die wesentlichen Materialparameter zur Beschreibung des Nachbruchverhaltens der Putze unter Zugbeanspruchung zu ermitteln. Verwendet wurde dazu die Software DIANA 9.

Um das Tragverhalten der untersuchten Biegezugprismen in der Simulation der Versuche möglichst zutreffend beschreiben zu können, wurde eine multilineare Formulierung für den Zusammenhang zwischen Spannung am Riss und Rissöffnung, d. h. zur Beschreibung des Tragverhaltens nach Überschreiten der Zugfestigkeit verwendet. Diese Formulierung wurde im ibac entwickelt und bereits auf zahlreiche andere mineralischen Werkstoffe angewendet (s. /HAN06/).

Grundlage dieses Ansatzes ist es, Paare von Spannung und zugehörigen Rissöffnung mit Hilfe von geometrischen Folgen zu generieren. Die Rissöffnung  $w_i$  ergibt sich aus

$$w_i = w_c \cdot p^{i-N}, 1 \leq i \leq N, w_0 = 0, p > 1, \quad (20)$$

die Spannung  $\sigma_{N-i}$  aus

$$\sigma_{N-i} = \beta_z \cdot q^i, 0 \leq i \leq N - 1, \sigma_N = 0, q > 1 \quad (21)$$

mit:

- N Anzahl der linearen Abschnitte der Spannungs-Rissöffnungsbeziehung,
- p, q Formparameter,
- $\beta_z$  Zugfestigkeit,
- $w_c$  kritische Rissöffnung.

Der Übersichtlichkeit halber sind die mit den Gleichungen (20) und (21) zu berechnenden Paare für Rissöffnung und Spannung in Tabelle 10 aufgelistet.

**Tabelle 10:** Paare für Rissöffnung  $w$  und Spannung  $\sigma$  beim verwendeten multilinearen Ansatz

I	0	1	2	...	N-2	N-1	N
1	2	3	4	5	6	7	8
w	0	$\frac{w_c}{p^{N-1}}$	$\frac{w_c}{p^{N-2}}$	...	$\frac{w_c}{p^2}$	$\frac{w_c}{p^1}$	$w_c$
$\sigma$	$\beta_z$	$\frac{\beta_z}{q^1}$	$\frac{\beta_z}{q^2}$	...	$\frac{\beta_z}{q^{N-2}}$	$\frac{\beta_z}{q^{N-1}}$	0

Durch die Bedingung

$$p = \alpha \cdot \text{Max} \left\{ \frac{1}{q-1}, 1 + \frac{1}{q} \right\}, \alpha \geq 1 \quad (22)$$

mit:

$\alpha$             Parameter (hier:  $\alpha = 1$ ),  
 $p, q$         Formparameter

wird sichergestellt, dass die Spannungs-Rissöffnungsbeziehung monoton abnehmend ist. Gleichzeitig wird dadurch der Parameter  $p$  an den Parameter  $q$  gekoppelt.

Die Fläche  $A$  unter der Spannungs-Rissöffnungsbeziehung ergibt sich aus:

$$A = \frac{w_c \cdot \beta_Z}{2} \cdot B(p, q) \quad (23)$$

mit:

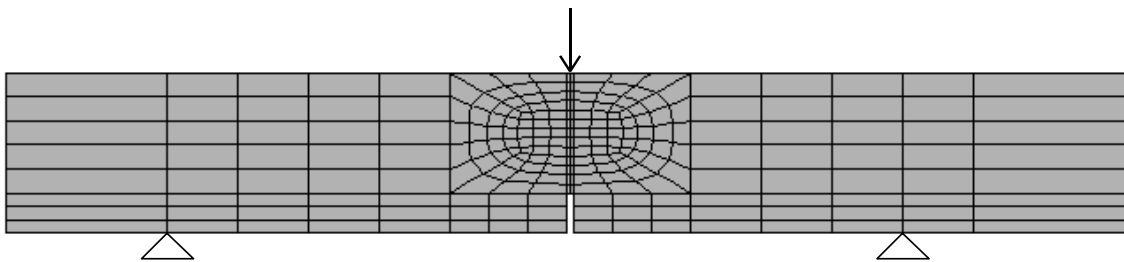
$$B(p, q) = \frac{1 + \frac{1}{q}}{p^{N-1}} + (p-1)(q+1) \sum_{k=2}^{k=N-1} \frac{1}{p^k q^{N+1-k}} + \frac{1 - \frac{1}{p}}{q^{N-1}} \quad (24)$$

Aus der Forderung, dass die Fläche unter der Kurve der Bruchenergie  $G_F$  entspricht, lässt sich die kritische Rissöffnung  $w_c$  berechnen mit:

$$w_c = \frac{2 \cdot G_F}{\beta_Z \cdot B(p, q)} \quad (25)$$

Bei dem gewählten multilinearen Ansatz können somit die drei Parameter Bruchenergie  $G_F$ , Zugfestigkeit  $\beta_Z$  und Formparameter  $q$  frei variiert werden, um eine möglichst gute Übereinstimmung von Simulation und Versuch zu erhalten.

Das zur Simulation der Versuche verwendete Modell ist in Bild 25 dargestellt. Das Netz wurde mit achtknotigen Elementen zweidimensional erstellt. Diesen Elementen wurden linear-elastische Materialeigenschaften ohne Begrenzung der Festigkeit zugeordnet. Im Ligamentquerschnitt wurden Interface-Elemente verwendet, bei denen die zuvor beschriebene multilineare Spannungs-Rissöffnungsbeziehung implementiert war. Sobald die Zugfestigkeit in den Interface-Elementen überschritten wurde, wurde das Nachbruchverhalten unter Zugbeanspruchung aktiviert. Die Querdehnzahl der Putze wurde im Modell einheitlich zu 0,2 angesetzt.



**Bild 25:** Finite-Elemente-Modell für die Biegezugversuche an Flachprismen

Bei der Simulation wurde eine maximale Durchbiegung von 0,9 mm in verschiedenen Verformungsincrementen aufgebracht. Beim Normalputz und beim Leichtputz wurde die Durchbiegung in 75 Inkrementen von 0,002 mm und anschließend 50 Inkrementen von 0,0075 mm gesteigert. Beim Ultraleichtputz wurde die Durchbiegung in 50 Inkrementen von 0,002 mm und anschließend in 100 Inkrementen von 0,008 mm vergrößert. Die Wahl dieser Verformungsincremente erfolgte so, dass die Berechnungen stabil waren und in markanten Bereichen der berechneten Last-Durchbiegungslinie ausreichend viele Punkte berechnet wurden. Die Verformung und die Reaktionskraft in den Simulationen wurden tabelliert, so dass die Last-Durchbiegungslinien (analog zum Versuch) ermittelt werden konnten.

Variiert wurden in der Simulation der Versuche der E-Modul des Putzes und die o. a. freien Parameter der Spannungs-Rissöffnungsbeziehung (Zugfestigkeit, Formparameter  $q$  und Bruchenergie), bis sich eine bestmögliche Übereinstimmung der Last-Durchbiegungslinie in Simulation und Versuch ergab. Dabei wurde die Übereinstimmung über die Summe der Fehlerquadrate beurteilt. Zur Variation der freien Parameter wurde ein am ibac entwickeltes Optimierungsverfahren verwendet, das auf einem generischen Algorithmus basiert und in /HAN06/ beschrieben ist.

Die unter Verwendung des o. a. multilinearen Ansatzes zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Rissöffnung und Spannung am Riss nach Überschreiten der Zugfestigkeit ermittelten Spannungs-Rissöffnungsbeziehungen wurden anschließend mit einem exponentiellen Ansatz nach Hordijk /HOR91/ angenähert, da lediglich dieser Ansatz im Rahmen von Simulationsrechnungen an Wänden (s. Abschnitt 6.2) verwendet werden konnte. Dieser Ansatz wurde für Betone entwickelt und wird mit folgender Gleichung beschrieben:

$$\sigma = \beta_z \cdot \left\{ \left[ 1 + \left( c_1 \cdot \frac{w}{w_c} \right)^3 \right] \cdot e^{-c_2 \cdot \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) \cdot e^{-c_2} \right\} \quad (26)$$

mit:

$\sigma$	Normalspannung,
$\beta_Z$	Zugfestigkeit,
$c_1, c_2$	Parameter,
$w$	Rissöffnung,
$w_c$	kritische Rissöffnung.

Die von Hordijk aus Versuchsergebnissen abgeleiteten Werte für die Parameter  $c_1$  und  $c_2$  von  $c_1 = 3$  und  $c_2 = 6,93$  sowie die kritische Rissaufweitung  $w_c$  nach Gleichung (27) sind in der DIANA bereits fest implementiert und wurden auch bei den Anpassungsrechnungen so angenommen.

$$w_c = 5,14 \cdot \frac{G_F}{\beta_Z} \quad (27)$$

Als freie Parameter zur Anpassung der durch Simulationsrechnungen ermittelten multilinearen Beziehung mit dem Ansatz von Hordijk wurden die Zugfestigkeit  $\beta_Z$  und die Bruchenergie  $G_F$  so lange variiert, bis eine bestmöglich Übereinstimmung von multilinearem Ansatz und Ansatz von Hordijk vorlag (Kriterium: Minimum der Fehlerquadrate).

### **Ermittlung der charakteristischen Länge**

Die charakteristische Länge  $l_{ch}$ , die ein Maß für die Duktilität eines Materials ist, wurde mit den Werten für Zugfestigkeit und Bruchenergie aus den Versuchen berechnet, s. Abschnitt 4.4.4.3.3. Je kleiner die charakteristische Länge ist, um so rissempfindlicher ist das Material. Dies wird deutlich durch die Herleitung der charakteristischen Länge. Die zur Erzeugung der Bruchfläche benötigte Arbeit  $W_{Bruch}$  ergibt sich aus der Bruchenergie  $G_F$  und der Fläche des Bruchquerschnitts  $A$ :

$$W_{Bruch} = G_F \cdot A \quad (28)$$

Diese Arbeit muss als elastische Arbeit  $W_{el}$  im System gespeichert sein:

$$W_{el} = \beta_Z \cdot \frac{\beta_Z}{E} \cdot l_{ch} \cdot A \quad (29)$$

mit:

$\beta_Z$	Zugfestigkeit,
$E$	Elastizitätsmodul.

Durch Gleichsetzen der Gleichungen (28) und (29) ergibt sich die charakteristische Länge zu:

$$l_{ch} = \frac{G_F \cdot E}{\beta_Z^2} \quad (30)$$

Bei der Berechnung der charakteristischen Länge wurde als Elastizitätsmodul der dynamische E-Modul verwendet.

Anschaulich stellt die charakteristische Länge  $l_{ch}$  die halbe Länge einer Probe dar, in der gerade so viel Energie gespeichert ist, wie zur Bildung der Bruchfläche benötigt wird. Je kleiner die Duktilität des Materials ist, um so kleiner ist die charakteristische Länge.

#### **4.4.3.4 Materialparameter des Haftverbundes**

##### **4.4.3.4.1 Allgemeines**

Zur Ermittlung von Materialparametern des Haftverbundes (Haftzugfestigkeit, Bruchenergie und Verlauf der Spannungs-Rissöffnungsbeziehung) zur Beschreibung des Zugtragverhaltens nach Überschreiten der Zugfestigkeit wurden verformungsgeregelte zentrische Haftzugversuche an Verbundprüfkörper durchgeführt, mit denen vollständige Spannungs-Rissöffnungskurven bestimmt werden sollten.

##### **4.4.3.4.2 Versuchsdurchführung**

Die Prüfungen wurden an jeweils drei Probekörper, die mittig aus der Putzfläche von jeweils drei geputzten Planhochlochziegeln durch Trockensägen entnommen wurden, durchgeführt. Die Proben hatten eine Querschnittsfläche von  $90 \cdot 90 \text{ mm}^2$ . Nach der Entnahme der Verbundproben wurden mit dem Zwei-Komponenten-Kleber Ardipox Stahlplatten zur Lasteinleitung aufgeklebt. Anschließend wurden die vorbereiteten Prüfkörper bis zur Prüfung, die einen Tag nach der Entnahme stattfand, mit Folie abgedeckt.

Die Prüfkörper wurden zum Einbau in die Prüfmaschine auf eine untere Stahlplatte aufgeschraubt, mit der die Proben in der Prüfmaschine festgespannt wurden. Der untere Anschluss an die Prüfmaschine erfolgte dementsprechend starr, der obere mit Hilfe einer Gelenkschraube (s. Bild 26). Die Versuche wurden über den Mittelwert der mit an die Prüfkörper angeklebten Wegaufnehmern des Typs DD1 gemessenen Verformungen gere-

gelt durchgeführt, um auch das Nachbruchverhalten bestimmen zu können. Die Prüfungsgeschwindigkeiten wurden jeweils so gewählt, dass die Versuche möglichst stabil erfolgten, d. h. so dass möglichst vollständige Last-Verformungskurven aufgezeichnet werden konnten. Im Allgemeinen wurde die Maximallast nach etwa 10 bis 15 Minuten erreicht. Die Versuche wurden, sofern diese stabil verliefen, beendet, sobald die gemessene Verformung 0,2 mm überschritt (Ende des Messbereichs). Dies war in der Regel nach etwa 30 bis 40 Minuten der Fall. Die Versuchsdaten (Verformungen und Kraft) wurden mit einem Rechner erfasst.

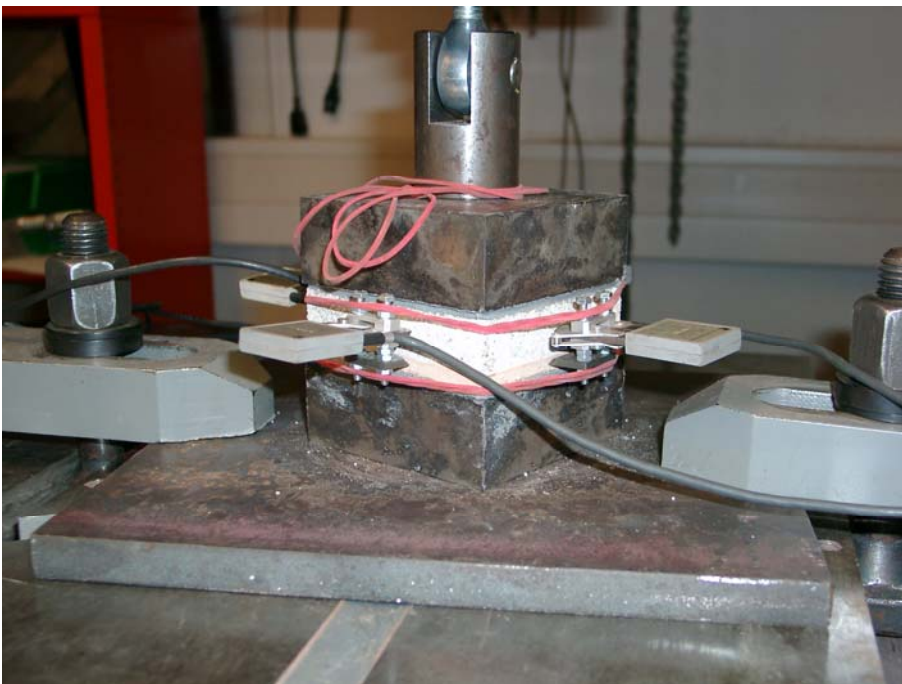


Bild 26: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Verbundeigenschaften

#### **4.4.3.4.3 Versuchsauswertung**

Bei der Auswertung der Versuche wurden die Haftzugfestigkeit  $\beta_{HZ}$  und die Bruchenergie  $G_F$  – sofern weitgehend vollständige Last-Verformungskurven aufgezeichnet wurden – ermittelt. Um die Bruchenergie zu bestimmen, wurden die aufgezeichneten Last-Verformungskurven zunächst aufgeteilt in einen ansteigenden Ast (bis zum Erreichen der Maximallast) und einen abfallenden Ast (nach Überschreiten der Maximallast). Aus dem abfallenden Ast der Last-Verformungskurve wurde dann die Spannungs-Rissöffnungsbeziehung ermittelt, indem von den ermittelten Gesamtverformungen die Verformungen des ansteigenden Astes subtrahiert wurden. Mit Hilfe des Ansatzes von Hordijk zur Beschreibung

des Zusammenhangs zwischen Spannung und Rissöffnung (vgl. Abschnitt 4.4.3.3) wurden dann Anpassungsrechnungen durchgeführt. Dabei wurde die Bruchenergie  $G_F$  so lange variiert, bis sich eine bestmögliche Übereinstimmung (Minimum der Fehlerquadrate) von Versuch und Ansatz ergab.

#### **4.4.3.5 Materialparameter zur Beschreibung des Kriechens unter Zugbeanspruchung**

##### **4.4.3.5.1 Versuchsdurchführung**

Die Bestimmung von Materialparametern zur Beschreibung des Kriechverhaltens der Putze unter Zugbeanspruchung erfolgte bei allen Putzen im Prüfalter von 27 Tagen im Normklima 20 °C und 65 % rel. Feuchte. Bei den Versuchen wurden in der Regel an jeweils zwei mit konstanter Zugkraft belasteten Prüfkörpern (Kriechversuch) als auch an zwei unbelasteten Prüfkörpern (Schwindversuch) Verformungsmessungen durchgeführt.

Die Prismen für die Kriechversuche wurden analog zu den Prismen für die Zugversuche vorbereitet (s. Abschnitt 4.4.3.2.2). Der Anschluss an die Prüfeinrichtung erfolgte analog zu den Zugversuchen gelenkig (s. Bild 27). Die Belastung erfolgte mit Behältern, in die vorab abgewogener Sand über einen Zeitraum von 2 Minuten kontinuierlich eingefüllt wurde. Das Gewicht, mit dem die Prüfkörper belastet wurden, war so eingestellt, dass die daraus resultierende Zugspannung 50 % der Zugfestigkeit entsprach.

Die Verformungsmessungen wurden mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen mit einer Messlänge von 60 mm durchgeführt, die sowohl auf der Putzoberfläche als auch auf der Putzgrundseite der Prismen appliziert wurden. Hierzu wurde vor der Prüfung zunächst eine dünne Ausgleichsschicht mit einer Länge von 95 mm und einer Breite von 10 mm mit einem Zwei-Komponenten-Klebstoff auf Polyesterbasis aufgetragen. Durch die Ausgleichsschicht sollte einerseits eine möglichst ebene Oberfläche für die Dehnungsmessstreifen hergestellt werden, andererseits sollte vermieden werden, dass Feuchtigkeit aus dem Putzprisma zu den Dehnungsmessstreifen diffundiert. Auf die erhärtete Ausgleichsschicht wurden anschließend die Dehnungsmessstreifen mit einem Sekundenkleber (Ein-Komponenten-Cyanoacrylat) appliziert und die Dehnungsmessstreifen mit Abdeckmaterial versiegelt.

Auf die unbelasteten Prüfkörper für die Schwindversuche wurden ebenfalls Stahllaschen aufgeklebt, um zu den Prüfkörpern der Kriechversuche analoge Randbedingungen zu ge-

währleisten. Die Dehnungsmessstreifen auf der Putzoberfläche und auf der Putzgrundseite wurden wie o. a. unmittelbar vor der Prüfung appliziert.



Bild 27: Kriechversuch

#### 4.4.3.5.2 Versuchsauswertung

Zur Ableitung von Materialparametern für Stoffgesetze zur Beschreibung des Kriechverhaltens der Außenputze wurden aus den ermittelten Verformungen zunächst Kriechfunktionen  $J(t, t_0)$  ermittelt. Hierzu wurden zunächst die elastischen Anfangsdehnungen und die Kriechdehnungen der belasteten Prismen aus den Gesamtdehnungen  $\epsilon_{\text{ges}}(t, t_0)$  im Versuch, die sich wie folgt zusammensetzen

$$\epsilon_{\text{ges}}(t, t_0) = \epsilon_K(t, t_0) - \epsilon_{\text{el}}(t_0) - \epsilon_S(t, t_0) \quad (31)$$

mit:

$\epsilon_K(t, t_0)$	Kriechdehnung (zeitabhängig),
$\epsilon_{\text{el}}(t, t_0)$	elastische Dehnung zum Belastungszeitpunkt $t_0$ ,
$\epsilon_S(t, t_0)$	Schwinddehnung (zeitabhängig),
$t$	Dauer der Belastung,
$t_0$	Alter bei Belastung,

rechnerisch mit

$$\epsilon_K(t, t_0) + \epsilon_{\text{el}}(t_0) = \epsilon_{\text{ges}}(t, t_0) - \epsilon_S(t, t_0) \quad (32)$$

ermittelt. Die elastische Dehnung  $\varepsilon_{el}(t_0)$  der Proben entspricht dabei der Dehnung unmittelbar nach Aufbringen der Belastung. Die Schwinddehnung  $\varepsilon_s(t, t_0)$  in Gleichung (32) wurde aus den Versuchen an unbelasteten Prüfkörpern abgeleitet, indem die zeitparallel zu den Gesamtdehnungen bestimmten Schwinddehnungen aller untersuchten unbelasteten Prismen gemittelt wurden.

Die Kriechfunktion, ermittelt aus den Versuchen, ergibt sich mit den wie o. a. ermittelten Dehnungen (vgl. Gleichung (32)) durch Division durch die Kriechspannung  $\sigma_K$  zu

$$J(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{el}(t_0) + \varepsilon_k(t, t_0)}{\sigma_K} \quad (33)$$

Damit entspricht die Kriechfunktion der auf eine Zugspannung von 1 N/mm<sup>2</sup> normierten Dehnung infolge elastischer Anfangsverformung und Kriechverformung. Die so ermittelte Kriechfunktion ist im Bereich des spannungsproportionalen Kriechens (Beanspruchung unterhalb der Proportionalitätsgrenze) spannungsunabhängig (vgl. /KOR00/).

Zur Bestimmung von Materialparametern zur Beschreibung des Kriechens wurde der folgende Ansatz für die Kriechfunktion aus dem Model Code 90 /MC90/ verwendet, der die Alterung des Materials berücksichtigt:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E(t_0)} + \frac{\left( \left( 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100\%}}{0,46 \left( \frac{2 \cdot A_C}{U} \right)^{\frac{1}{3}}} \right)^{\frac{5,3}{\left( \frac{\beta_{D,28}}{10 \text{ N/mm}^2} \right)^{0,5} \cdot 0,1 + t_0^{0,2}}} \cdot \frac{1}{E_{28}} \right)^{0,3}}{\min \left( 1500; 150 \cdot \left( 1 + \left( 12 \cdot \frac{RH}{100\%} \right)^{18} \right) \cdot \frac{h}{100 \text{ mm}} + 250 \right) + (t - t_0)} \quad (34)$$

mit:

- t        Dauer der Belastung,
- t<sub>0</sub>      Alter bei Belastung,
- RH      rel. Luftfeuchte des Umgebungsklima,
- A<sub>C</sub>      Querschnittsfläche des Prüfkörpers (hier: 40 · 20 mm<sup>2</sup>),
- U        Der Umgebungsluft ausgesetzter Umfang des Prüfkörpers  
(hier: 2 · 40 mm + 2 · 20 mm),
- β<sub>D,28</sub>   Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen (s. Abschnitt 5.3),
- E<sub>28</sub>      E-Modul im Alter von 28 Tagen (s. Abschnitt 5.3),
- E(t<sub>0</sub>)    E-Modul zum Zeitpunkt t<sub>0</sub> (bei Belastung).

Dieser Ansatz ist im Programmsystem DIANA implementiert und stand daher für die Simulationen der Wandversuche zur Verfügung (s. Abschnitt 6.2). In DIANA werden zur Abbildung des o. g. Ansatzes Kelvin-Elemente (Feder-Dämpfer-Systeme) verwendet.

Der E-Modul zum Belastungszeitpunkt  $E(t_0)$  in Gleichung (34) ergibt sich mit

$$E(t_0) = E_{28} \cdot \sqrt{e^{\left( s \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{28}{t_0}} \right) \right)}} \quad (35)$$

mit:

$E_{28}$  E-Modul im Alter von 28 Tagen (s. Abschnitt 5),  
 $s$  zementspezifischer Parameter

aus /MC90/. Auch diese Gleichung ist in der Software DIANA bereits implementiert. Durch den Parameter  $s$  in Gleichung (35) kann die zeitliche Entwicklung des E-Moduls beeinflusst werden. Dabei sind jedoch in /MC90/ und der Software DIANA lediglich die in Tabelle 11 aufgeführten Werte für  $s$  enthalten, Zwischenwerte sind nicht möglich.

**Tabelle 11:** Zementspezifischer Parameter  $s$

Zementtyp	$s$
1	3
schnell erhärtend	0,20
normal und schnell erhärtend	0,25
langsam erhärtend	0,38

Die experimentell ermittelten Kriechfunktionen wurden mit Hilfe von Gleichung (34) nachgerechnet. Hierzu wurden zunächst die Materialparameter  $s$  und  $E_{28}$  zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung des E-Moduls aus Gleichung (35) bestimmt, indem Ausgleichsrechnungen durchgeführt wurden, bis sich eine bestmögliche Übereinstimmung des E-Moduls, berechnet mit Gleichung (35), und den Versuchsergebnissen ergab. Für den Parameter  $s$  wurde dann ein Wert aus der Tabelle 11 gewählt, der am besten mit dem zuvor über Ausgleichsrechnungen bestimmten Parameterwert übereinstimmte. Danach wurde der Parameter  $RH$  in Gleichung (34), der bei Betonen zur Berücksichtigung der Umgebungsfeuchte verwendet wird, als freier Eingabeparameter durch Ausgleichsrechnungen so bestimmt, dass Versuchsergebnisse (Kriechkurven) und Ergebnisse des Ansatzes nach Gleichung (34) bestmöglich übereinstimmten.

Anschließend wurden die Versuche mit der Finite-Elemente-Methode (Software DIANA) simuliert, wobei das einfache geometrische Modell eines Würfels (Elementtyp HX24L mit acht Knoten) verwendet wurde, das auf Zug beansprucht wurde. Die Eingabeparameter ( $s$ , Gleichungen (34) und (35)) wurden aus den vorab durchgeführten analytischen Analysen der Versuche mittels Ausgleichsrechnungen entnommen. Die Anzahl von Kelvin-Elementen,

die jedoch automatisch von DIANA angepasst wurde, betrug in den Simulationsrechnungen zu Beginn grundsätzlich 10 (maximal mögliche Anzahl in DIANA).

#### **4.4.3.6 Physikalische Materialparameter**

##### **4.4.3.6.1 Trockenrohddichte und Feuchtegehalt**

Zur Bestimmung der Trockenrohddichte und des Feuchtegehaltes wurden je Prüfalter je drei Flachprismen vom Putzgrund entnommen ( $l \cdot b \cdot h = 140 \cdot 40 \cdot 20 \text{ mm}^3$ ), gemessen, gewogen und anschließend bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Die Massekonstanz galt als erreicht, wenn die Massedifferenz zwischen zwei Wägungen in einem zeitlichen Abstand von 24 Stunden kleiner als 0,1 % war.

##### **4.4.3.6.2 Schwinden**

Die Untersuchungen zum Schwinden der Putze (Serie AS) wurden im Normalklima 20 °C und 65 % rel. Feuchte an je drei Prismen je Entnahmealter bzw. Prüfalter durchgeführt. Unmittelbar nach der Entnahme wurden die Prismen zunächst gemessen und gewogen. Anschließend wurden auf die Enden der Probekörper Schwindmesszapfen in Anlehnung an DIN 52450 /DIN85/ mit dem Zwei-Komponenten-Kleber X60 appliziert. Danach wurden die Probekörper analog zu den Prismen zur Bestimmung mechanischer Materialparameter für einen Tag unter Folie gelagert und anschließend geprüft. Die Messungen der Längenänderungen wurden nach 1, 4 und 8 h, 1, 2, 4, 7 Tagen und wöchentlich bis 56 Tagen sowie nach 90 und 180 Tagen mit einem Messgerät nach DIN 52450 /DIN85/ mit fest eingebauter digitaler Messuhr (Anzeigegegenauigkeit 1/1000 mm) durchgeführt. Parallel zu den Längenänderungen wurde auch die Masse der Prüfkörper bestimmt.

Beim Entnahmealter von 2 Tagen wurden das Schwinden auch bei CO<sub>2</sub>-freier Lagerung im Normalklima 20 °C und 65 % rel. Feuchte durchgeführt, um das reine Trocknungsschwinden zu ermitteln (Serie AST).

Da in Tastversuchen festgestellt wurde, dass sich die Prismen während der Schwindmessungen verkrümmen, wurden beim Normalputz ab einem Prüfalter von 14 Tagen, beim Leichtputz ab einem Prüfalter von 90 Tagen und beim Ultraleichtputz ab einem Prüfalter von 5 Tagen oberflächenspezifische Schwindmessungen mit einem Setz-Dehnungsmesser durchgeführt. Dazu wurden auf die Putzoberfläche bzw. auf der Putzgrundseite

der Prismen runde Messingplättchen (Durchmesser 10 bis 12 mm) mit dem Zwei-Komponenten-Kleber X60 appliziert, in die vorab Metallkugeln eingeschlagen wurden. Der Abstand der Messstellen betrug 100 mm. Das verwendete Messgerät mit einer mechanischen Messuhr (Skalenteilung 1/1000 mm) wurde zur Messung der Längenänderungen auf die Stahlkugeln aufgesetzt (s. Bild 28).



Bild 28: Messung der Längenänderung mittels Setz-Dehnungsmesser

#### **4.4.3.7 Begleitende Untersuchungen zu Wasserabsaugen, Porenstruktur und Karbonatisierungstiefe**

Die Untersuchungen zum Absaugen des Anmachwassers der Putze durch den Putzgrund wurden analog zu Abschnitt 4.3 durchgeführt. Ermittelt wurde wiederum der Wassergehalt mittels Bestimmung des Glühverlustes nach verschiedenen Kontaktzeiten (30 Minuten, 1, 2, 5 und 24 Stunden) mit dem Putzgrund. Geprüft wurden Proben aus der Putzfläche von jeweils drei mit Kaolin vorbehandelten als auch von nicht vorbehandelten SX+.

Die Untersuchungen zur Porenstruktur wurden mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie (vgl. Abschnitt 3.1.2.8) durchgeführt. Vom Putzgrund wurden dazu im Alter von 26 Tagen durch Trockensägen Putzproben ( $l \cdot b = 40 \cdot 40 \text{ mm}^2$ ) entnommen und in Putzdicke mit einem Diamantsägeblatt trocken in drei gleichmäßig dicke Scheiben gesägt. Die Dicke dieser Scheiben betrug nach dem Sägen etwa 6 mm. Diese Scheiben wurden anschließend für 24 Stunden in Isopropanol gelegt, um eine weitere Hydratation zu unterbinden. Danach wurden aus diesen Scheiben Proben zur Bestimmung der Porengrößenverteilung

präpariert und wie in Abschnitt 3.1.2.8 erläutert geprüft. Dabei wurden analog zu Abschnitt 3.1.2.8 in der Regel Doppelbestimmungen durchgeführt.

Zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe wurden die Bruchflächen der vorab in den Zugversuchen untersuchten Prismen mit Phenolphthalein-Lösung besprüht. 24 Stunden nach der Applikation dieser Lösung wurde dann die Karbonatisierungstiefe mit einem Messschieber gemessen.

#### **4.4.4 Versuchsergebnisse**

##### **4.4.4.1 Frisch- und Festmörtelkennwerte**

Die Frischmörtelkennwerte Ausbreitmaß  $a$ , Luftgehalt  $L$  und Frischmörtelrohddichte  $\rho_{fr}$  sowie die Festmörtelkennwerte Rohddichte (lufttrocken)  $\rho_l$ , Trockenrohddichte  $\rho_d$ , Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ}$  und die Druckfestigkeit  $\beta_D$  sind in der Tabelle A27 aufgeführt. Erwartungsgemäß ist die Druckfestigkeit des Normalputzes mit  $7,66 \text{ N/mm}^2$  am größten und beim Ultraleichtputz mit  $0,89 \text{ N/mm}^2$  am kleinsten. Die Druckfestigkeit des Leichtputzes liegt mit  $5,10 \text{ N/mm}^2$  zwischen diesen Festigkeiten.

##### **4.4.4.2 Mechanische Materialparameter**

In den Tabellen A28 bis A33 sind die ermittelten mechanischen Materialparameter dynamischer E-Modul  $E_{dyn}$  und zentrische Zugfestigkeit  $\beta_Z$  zusammengestellt.

Die in Anlehnung an Verfahren III der DIN 18555-9 /DIN99/ bestimmten Werte der Druckfestigkeit  $\beta_{D,III}$  sind in den Tabellen A34 bis A42 enthalten.

Die im Folgenden verwendeten Bezeichnungen der Versuchsserien sind in der Tabelle 7 zusammengestellt.

##### **Zeitliche Entwicklung**

In den Bildern B47 bis B52 sind die o. a. Materialparameter in Abhängigkeit vom Prüfalter aufgetragen (Druckfestigkeit  $\beta_{D,III}$  der Serie A (s. Tabelle 7) sowie zentrische Zugfestigkeit und dynamischer E-Modul der Serie AZ).

Beim Normalputz nimmt die Druckfestigkeit bis zu einem Prüfalter von 90 Tagen deutlich und anschließend nur noch wenig zu. Die Zugfestigkeit des Normalputzes ändert sich im Unterschied dazu nach 26 Tagen nur noch wenig (s. Bild B47). Der dynamische E-Modul (s. Bild B48) ändert sich analog zur Zugfestigkeit ebenfalls nach 26 Tagen kaum noch.

Beim Leichtputz nimmt die Druckfestigkeit wie beim Normalputz bis zu einem Alter von 90 Tagen deutlich zu und ändert sich im Anschluss nur noch wenig (s. Bild B49). Die Werte beim Prüfalter von 14 Tagen wurden durch den Laborablauf bedingt erst einen Tag nach den Biegezugprüfungen durchgeführt, weshalb die Proben einen Tag in Raumluft bei etwa 20 °C austrocknen konnten. Die ermittelten Werte sind daher nicht aussagekräftig. Die Zugfestigkeit nimmt beim Leichtputz über den gesamten Prüfzeitraum nahezu kontinuierlich zu. Analog dazu nimmt auch der dynamische E-Modul während des gesamten Untersuchungszeitraums (s. Bild B50) zu.

Beim Ultraleichtputz nehmen die Druckfestigkeit und die Zugfestigkeit bis zu einem Alter von 26 Tagen zu und im Anschluss wieder ab. Analog dazu nimmt auch der dynamische E-Modul bis zu einem Alter von 26 Tagen zunächst zu, im Gegensatz zu den anderen Putzen im Anschluss wieder ab. Dabei ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Zugfestigkeit und der dynamische E-Modul im Alter von 180 Tagen lediglich an einem Prisma bestimmt werden konnten. Daher haben die Materialparameter im Alter von 180 Tagen nur eine begrenzte Aussagekraft.

### **Einfluss der Putzdicke**

Mit den Versuchsserien Serien AZ, DZ und FZ (s. Tabelle 7) wurde der Einfluss der Putzdicke auf die Zugfestigkeit und den dynamischen E-Modul untersucht wurde. Die Untersuchungsergebnisse sind in den Tabellen A28 bis A33 enthalten und in den Bildern 29 und 30 dargestellt.

Die grundsätzlich möglichen Ursachen für unterschiedliche mechanische Materialparameter bei verschiedenen Putzdicken sind im Folgenden aufgeführt:

- Verschiedene Feuchtegehalte durch unterschiedliche Austrocknungsbedingungen und Feuchtekapazitäten,
- Unterschiedlich große Eigenspannungen und Mikrorissbildung durch den infolge Austrocknen über die Putzoberfläche entstehenden Feuchtegradienten in der Putzschicht,
- Unterschiedliche Karbonatisierung (Anteil am Gesamtquerschnitt),

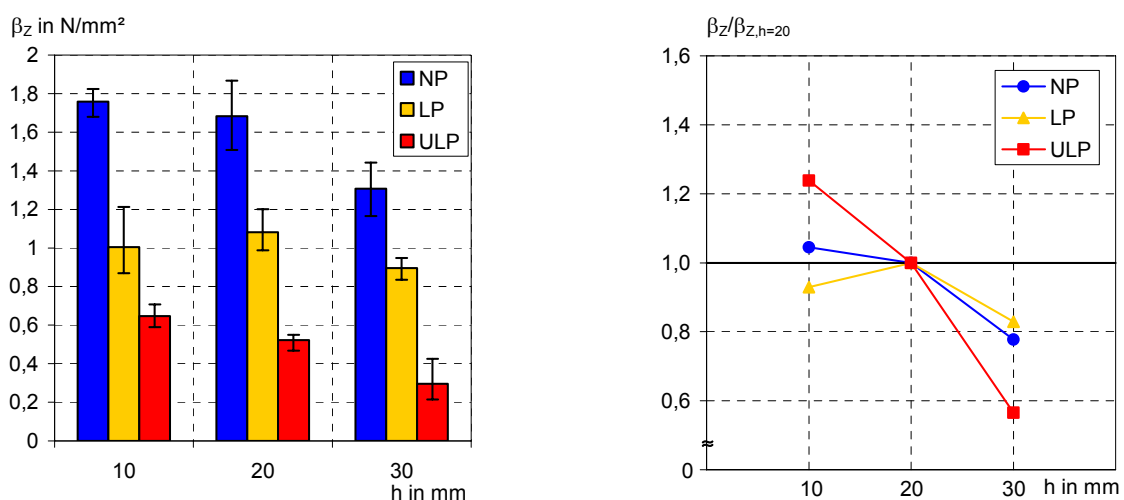
- Unterschiedliche Erhartungsbedingungen durch verschiedene abgesaugte Anmachwassermengen (begrenzte Aufnahmekapazität des Außenscherbens, der das Absaugen aus dem Putz maßgeblich bestimmt) und unterschiedliches Absaugen über die Putzdicke.

Beim Normalputz nimmt die Zugfestigkeit mit der Putzdicke etwas ab (s. Bild 29). Beim dynamischen E-Modul ist kein wesentlicher Einfluss der Putzdicke erkennbar (s. Bild 30).

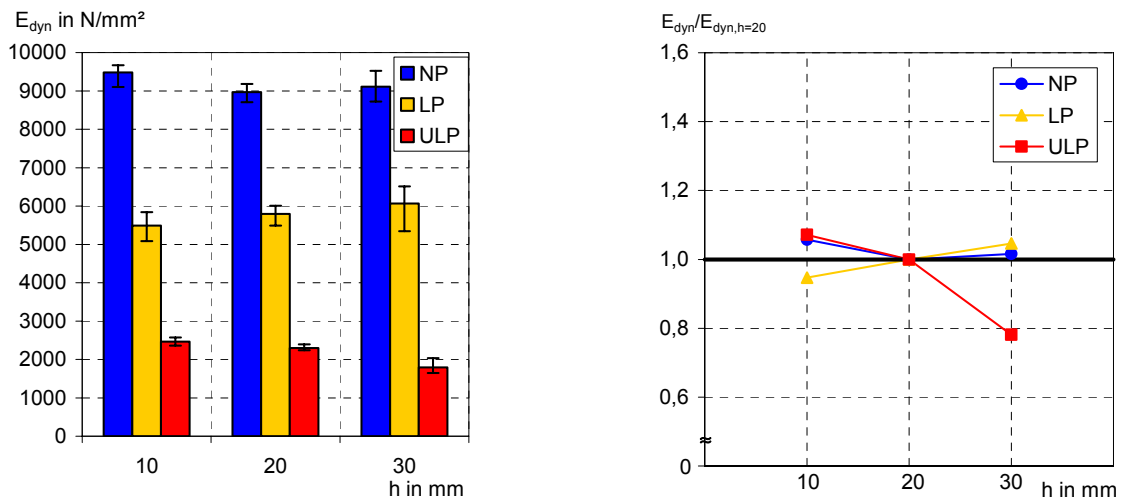
Beim Leichtputz ist die Zugfestigkeit bei einer Putzdicke von 30 mm im Vergleich zu einer Putzdicke von 10 bzw. 20 mm etwas kleiner (s. Bild 29). Bei den Putzdicken von 10 und 20 mm ist kein eindeutiger Unterschied erkennbar, die Streubereiche (Minimum, Maximum) sind nahezu gleich. Der dynamische E-Modul nimmt beim Leichtputz mit der Putzdicke etwas zu (s. Bild 30). Eine mögliche Ursache könnte ein etwas höherer Feuchtegehalt der Proben bei den Putzdicken von 20 und 30 mm sein (vgl. Rohdichte im lufttrockenen Zustand, Tabellen A30 und A31).

Beim Ultraleichtputz nimmt die Zugfestigkeit deutlich mit der Putzdicke ab (s. Bild 29). Analog dazu sinkt auch der dynamische E-Modul mit der Putzdicke (s. Bild 30).

Aufgrund der Vielzahl der grundsätzlich möglichen, oben aufgeführten Einflüsse auf die mechanischen Materialparameter und deren Überlagerung ist es nicht möglich, den ermittelten Unterschieden zwischen den Materialparametern bei den verschiedenen Putzdicken separat Ursachen zuzuordnen und die Ergebnisse weitergehend zu interpretieren.



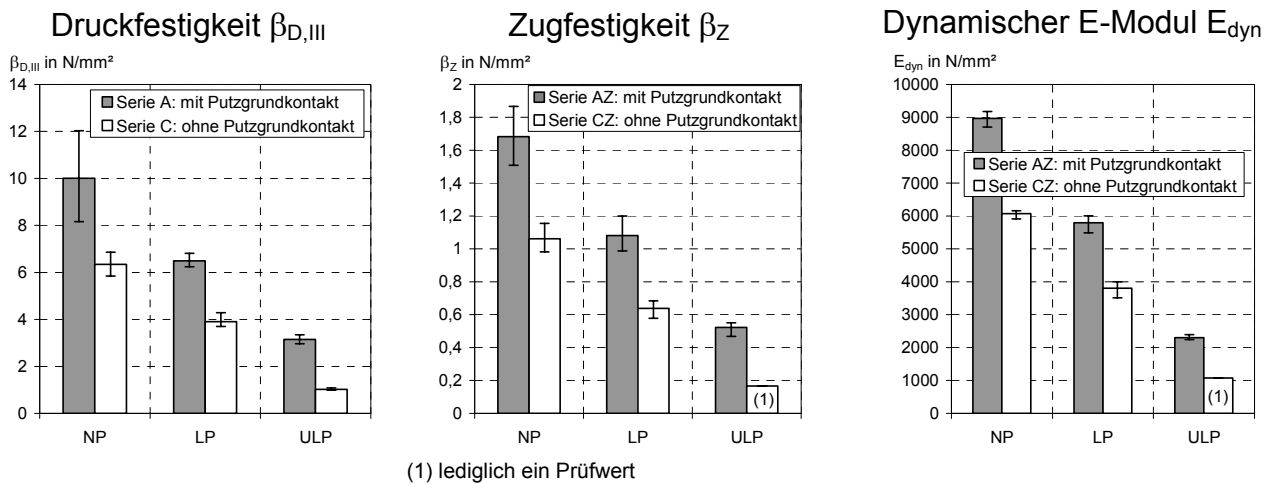
**Bild 29:** Zugfestigkeit  $\beta_z$  (links) und auf die Zugfestigkeit  $\beta_{z,h=20}$  ( $h = 20$  mm) bezogene Zugfestigkeit  $\beta_z$  (rechts) in Abhängigkeit von der Putzdicke  $h$  Serien DZ (10 mm), AZ (20 mm) und FZ (30 mm), vgl. Tabelle 7



**Bild 30:** Dynamischer E-Modul  $E_{dyn}$  (links) und auf den dynamischen E-Modul  $E_{dyn,h=20}$  ( $h = 20$  mm) bezogener dynamischer E-Modul  $E_{dyn}$  (rechts) in Abhängigkeit von der Putzdicke  $h$   
 Serien DZ (10 mm), AZ (20 mm) und FZ (30 mm), vgl. Tabelle 7

### **Einfluss des Absaugens des Anmachwassers durch den Putzgrund**

Der Einfluss des Entzuges des Anmachwassers durch den Kontakt mit dem Putzgrund wird in Bild 31 deutlich (Serien A und C sowie AZ und CZ (vgl. Tabelle 7), s. Tabellen A28 bis A33 sowie A34, A35, A37, A38, A40 und A41). Unabhängig von der Putzsorte sind die Druckfestigkeit, die Zugfestigkeit und der dynamische E-Modul der Prismen vom Putzgrund erwartungsgemäß deutlich größer als bei den Prismen aus der Stahlschalung (Putzdicke jeweils 20 mm). Beim Normalputz und beim Leichtputz sind Druckfestigkeit, Zugfestigkeit und der dynamische E-Modul der Putze vom Putzgrund etwa 50 bis 70 % größer als beim Putz ohne Kontakt mit dem Putzgrund. Bei der Druckfestigkeit und der Zugfestigkeit des Ultraleichtputzes beträgt dieser Unterschied sogar über 200 %, wobei jedoch bei der Zugfestigkeit aufgrund der geringen Festigkeit lediglich ein Prisma ohne Kontakt zum Putzgrund geprüft werden konnte. Folglich ist davon auszugehen, dass sich der effektive  $w/z$ -Wert (maßgeblich für die maximal erreichbare Festigkeit) der Putze so verringert, dass eine Festigkeitssteigerung stattfindet (vgl. /RIE00/).



**Bild 31:** Einfluss des Putzgrundkontaktes auf die Druckfestigkeit  $\beta_{D,III}$ , die Zugfestigkeit  $\beta_Z$  und den dynamischen E-Modul  $E_{dyn}$  Serien A und C bzw. AZ und CZ, vgl. Tabelle 7

#### 4.4.4.3 Bruchmechanische Materialparameter

##### 4.4.4.3.1 Ergebnisse der Versuchsauswertung

Die experimentell ermittelten Kennwerte Bruchenergie und Netto-Biegezugfestigkeit sind in den Tabellen A34 bis A42 enthalten.

##### Zeitliche Entwicklung der Bruchenergie

Die zeitliche Entwicklung der Bruchenergie (Serie A (vgl. Tabelle 7), Tabellen A34, A37 und A40) ist in den Bildern B53 bis B55 dargestellt. Beim Normalputz (s. Bild B53) ändert sich die Bruchenergie bis zu einem Alter von 90 Tagen zunächst kaum und ist im Alter von 180 Tagen größer, wobei der Streubereich bei diesem Alter vergleichsweise groß ist. Die Bruchenergie nimmt beim Leichtputz bis zu einem Alter von etwa 14 Tagen zu und ändert sich danach kaum. Beim Ultraleichtputz nimmt die Bruchenergie bis zu einem Alter von 27 Tagen zu und im Anschluss wieder ab, wobei die Streubereiche im Alter von 27 und 90 Tagen nahezu gleich groß sind.

##### Einfluss der Belastungsrichtung auf Bruchenergie und Netto-Biegezugfestigkeit

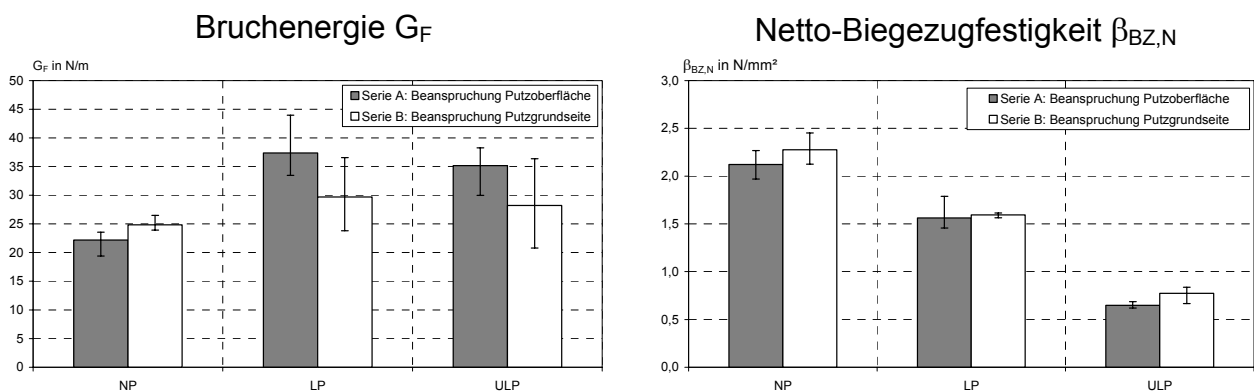
Der Vergleich der für die verschiedenen Belastungsrichtungen ermittelten Bruchenergien und Netto-Biegezugfestigkeiten (Serien A und B (vgl. Tabelle 7), s. Tabellen A34, A35,

A37, A38, A40 und A41) ist in Bild 32 dargestellt. Die grundsätzlich möglichen Ursachen für Unterschiede bei den beiden Belastungsrichtungen sind:

- Unterschiedlicher Wasserentzug über die Putzdicke und daraus resultierende unterschiedliche mechanische Eigenschaften,
- Karbonatisierung von der Putzoberfläche aus,
- Einfluss von Eigenspannungen durch einen Feuchtgradienten über die Putzdicke infolge Austrocknen und daraus resultierende Mikrorisse.

Beim Normalputz ist die Bruchenergie etwas kleiner, wenn die Putzoberfläche der Zugseite entspricht (s. Bild 32). Die Netto-Biegezugfestigkeit ist analog zur Bruchenergie bei der Beanspruchung der Putzoberfläche etwas höher als bei Beanspruchung der Putzgrundseite.

Beim Leichtputz und beim Ultraleichtputz ist der Einfluss umgekehrt, die Bruchenergie bei Beanspruchung der Putzoberfläche ist größer als bei Beanspruchung der Putzgrundseite. Die Netto-Biegezugfestigkeit des Leichtputzes liegt bei beiden Belastungsrichtungen in der gleichen Größenordnung, beim Ultraleichtputz ist die Netto-Biegezugfestigkeit im Gegensatz zur Bruchenergie bei Zugbeanspruchung der Putzoberfläche analog zum Normalputz etwas kleiner als bei Beanspruchung der Putzgrundseite.



**Bild 32:** Einfluss der Belastungsrichtung auf Bruchenergie  $G_F$  und Netto-Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ,N}$   
Serien A und B, vgl. Tabelle 7

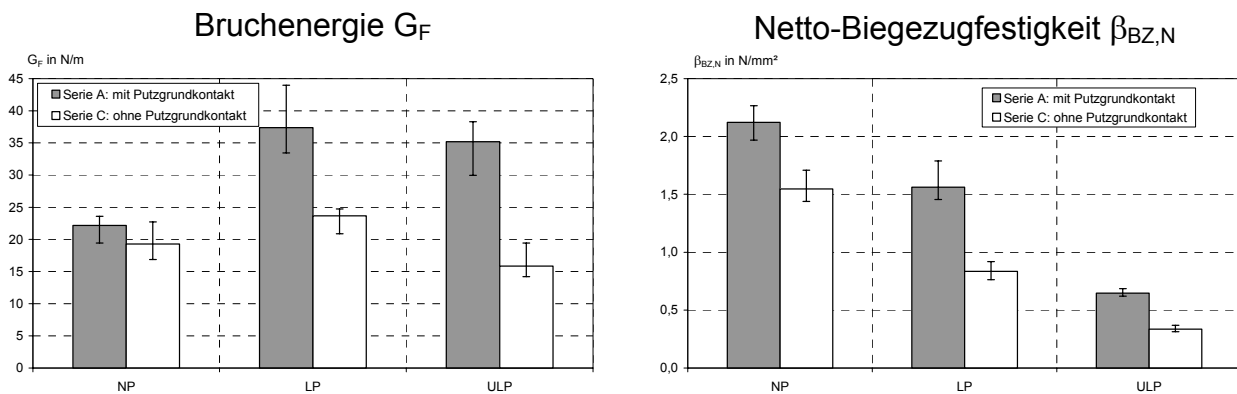
Aufgrund der Überlagerung der oben aufgeführten, grundsätzlich möglichen Ursachen für Unterschiede zwischen den Belastungsrichtungen können den festgestellten Unterschieden die Ursachen nicht separat zugewiesen und die Ergebnisse nicht eingehender interpretiert werden.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die ermittelten Kennwerte durch die 5 mm tiefe Kerbe in den Prismen beeinflusst werden. Dadurch werden insbesondere mögliche Änderungen der mechanischen Eigenschaften der Randschichten (Putzoberfläche, Putzgrundseite) durch die o. a. Einflüsse nicht in voller Größe erfasst. Daher ist nicht ausgeschlossen, dass sich größere oder andere Unterschiede zwischen den Belastungsrichtungen ergeben, wenn ungekerbte Prismen untersucht werden. An diesen lässt sich allerdings die Bruchenergie nicht ermitteln.

### **Einfluss des Absaugens des Anmachwassers durch den Putzgrund auf Bruchenergie und Netto-Biegezugfestigkeit**

Mit den Serien A und C (vgl. Tabelle 7) wurde analog zu den mechanischen Materialparametern (vgl. Abschnitt 4.4.4.2) der Putzgrundeinfluss auf Bruchenergie und Netto-Biegezugfestigkeit untersucht. Die Ergebnisse enthalten die Tabellen A34, A35, A37, A38, A40 und A41 und sind in Bild 33 dargestellt.

Analog zu den mechanischen Materialparametern (s. Abschnitt 4.4.4.2) ergaben sich unabhängig von der Putzsorte bei den Prismen vom Putzgrund im Vergleich zu den Prismen aus der Stahlschalung höhere Werte für Bruchenergie und Netto-Biegezugfestigkeit. Beim Normalputz ergab sich bei den Prismen vom Putzgrund eine etwa 15 % größere Bruchenergie, die Netto-Biegezugfestigkeit war etwa 40 % größer. Beim Leichtputz war die Bruchenergie des Putzes vom Putzgrund etwa 60 % und die Netto-Biegezugfestigkeit 90 % größer, beim Ultraleichtputz etwa 120 % bei der Bruchenergie und 90 % bei der Netto-Biegezugfestigkeit. Demnach ist auch bei der Ermittlung bruchmechanischer Materialparameter der Putzgrundeinfluss zu berücksichtigen.



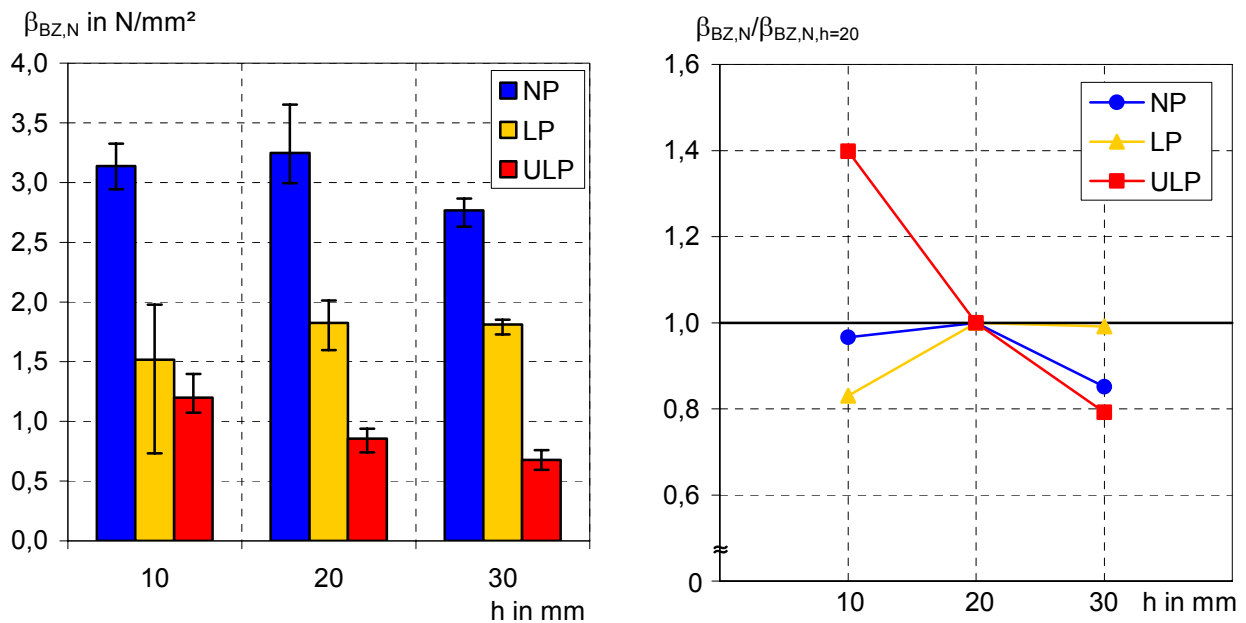
**Bild 33:** Einfluss des Putzgrundkontaktes auf Bruchenergie  $G_F$  und Netto-Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ,N}$   
Serien A und C, vgl. Tabelle 7

### Einfluss der Putzdicke auf die Netto-Biegezugfestigkeit

Mit den Serien D, E und F (vgl. Tabelle 7) wurde analog zu den mechanischen Materialparametern der Einfluss der Putzdicke auf die Netto-Biegezugfestigkeit untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen enthalten die Tabellen A36, A39 und A42.

Beim Normalputz ist im Unterschied zur Zugfestigkeit (s. Abschnitt 4.4.4.2) keine eindeutige Tendenz erkennbar (s. Bild 34). Bei den Putzdicken von 10 und 20 mm ist die Netto-Biegezugfestigkeit nahezu gleich groß. Bei der Putzdicke von 30 mm ergab sich analog zur Zugfestigkeit eine kleinere Netto-Biegezugfestigkeit. Beim Leichtputz war die Netto-Biegezugfestigkeit im Unterschied zur Zugfestigkeit bei der Putzdicke von 10 mm am kleinsten, bei den Putzdicken von 20 und 30 mm ergaben sich nahezu gleich große Festigkeiten. Beim Ultraleichtputz nimmt die Netto-Biegezugfestigkeit analog zur Zugfestigkeit deutlich mit der Putzdicke ab.

Aufgrund der bekannten Zusammenhänge zwischen Kerbempfindlichkeit und Kerbtiefe /BRA88/ muss die Netto-Biegezugfestigkeit von der bezogenen Kerbtiefe abhängig sein, insbesondere, wenn man eine von der Putzdicke unabhängige Biegezugfestigkeit als Ausgangsbasis nimmt. Zusätzliche Größeneffekte (vgl. /BAZ98/) machen eine Interpretation der Ergebnisse schwierig, was für die Gesamtfragestellung auch nicht so von übergeordneter Bedeutung ist.



**Bild 34:** Netto-Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ,N}$  (links) und auf die Netto-Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ,N,h=20}$  ( $h = 20$  mm) bezogene Netto-Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ,N}$  in Abhängigkeit von der Putzdicke  $h$   
 Serien D (10 mm), E (20 mm) und F (30 mm), vgl. Tabelle 7

#### 4.4.4.3.2 Ergebnisse der Simulationen und der Bestimmung von Spannungs-Rissöffnungsbeziehungen

##### Allgemeines

Die mit den Optimierungsrechnungen im Rahmen der Finite-Elemente-Simulationen bestimmten Parameter Formparameter  $q$ , Zugfestigkeit  $\beta_Z$  und Bruchenergie  $G_F$  sind in den Tabellen A43, A44 und A45 im Vergleich zu den Mittelwerten der Versuchsergebnisse zusammengestellt. Ferner enthalten die Tabellen die mit dem Ansatz von Hordijk ermittelten Werte für Zugfestigkeit und Bruchenergie. Die mit den Simulationsrechnungen ermittelten Last-Durchbiegungskurven und die Spannungs-Rissöffnungsbeziehungen sind in den Bildern B59 bis B85 dargestellt. Wie aus den Bildern ersichtlich ist, konnte das Tragverhalten der Biegezugprismen aus Normalputz und Leichtputz mit dem angewendeten Modell zutreffend beschrieben werden. Beim Ultraleichtputz ergaben sich etwas größere Abweichungen. Dies kann vermutlich darauf zurückgeführt werden, dass die wesentliche Bedingung – die Grundlage für die durchgeführten Berechnungen ist – für die Anwendung des fiktiven Rissmodells, die Lokalisierung eines Risses, nicht erfüllt ist, da durch die Fasern

energiedissipierende Anteile aus Reibung hinzukommen. Dies führt zu deutlich abweichenden Ergebnissen vor allem bei der Bruchenergie.

Auf die Ergebnisse der Auswertung der Simulationsergebnisse mit dem Ansatz nach Hordijk wird im Abschnitt 5 eingegangen. Grundsätzlich sei bereits angemerkt, dass sich mit dem Ansatz von Hordijk bei allen Putzen geringere Werte für die Bruchenergie ergaben (s. Tabellen A43, A44 und A45). Die Werte für die Zugfestigkeit ermittelt aus der Simulation und aus der Optimierung mit Hordijk weichen nur wenig voneinander ab.

### **Zeitliche Entwicklung**

Die zeitliche Entwicklung der mit Hilfe des multilinearen Ansatzes ermittelten Bruchenergie ist in den Bildern B53, B54 und B55 und die ermittelte Zugfestigkeit in den Bildern B56, B57 und B58 jeweils im Vergleich zu den experimentell bestimmten Werten dargestellt (Serien A und AZ, vgl. Tabelle 7).

Beim Normalputz ist die zeitliche Entwicklung der numerisch und experimentell ermittelten Bruchenergie ähnlich (s. Bild B53). Im Vergleich zu den aus den Versuchen bestimmten Absolutwerten ergibt sich eine meist etwas geringere Bruchenergie. Ggf. ist dies darauf zurückzuführen, dass bei der Versuchsauswertung ein Teil der Last-Durchbiegungskurve abgeschätzt wurde (s. Abschnitt 4.4.3.3.3). Bei der zeitlichen Entwicklung der Zugfestigkeit zeigen sich deutlich größere Unterschiede zwischen Versuch (zentrische Zugfestigkeit) und Simulation (s. Bild B56). Die zeitliche Entwicklung der numerisch ermittelten Zugfestigkeit ist nicht stetig und tendenziell ähnlich zu der Entwicklung der Netto-Biegezugfestigkeit (vgl. Tabellen A34 und A43). Mögliche Ursachen für die Unterschiede zwischen Versuch und Simulation könnten

- der Einfluss der Feuchteverteilung über die Putzdicke und der daraus resultierenden Eigenspannungen sowie Mikrorissbildungen und
- der Einfluss der Karbonatisierung von der Putzoberfläche aus

sowie Überlagerungen davon sein.

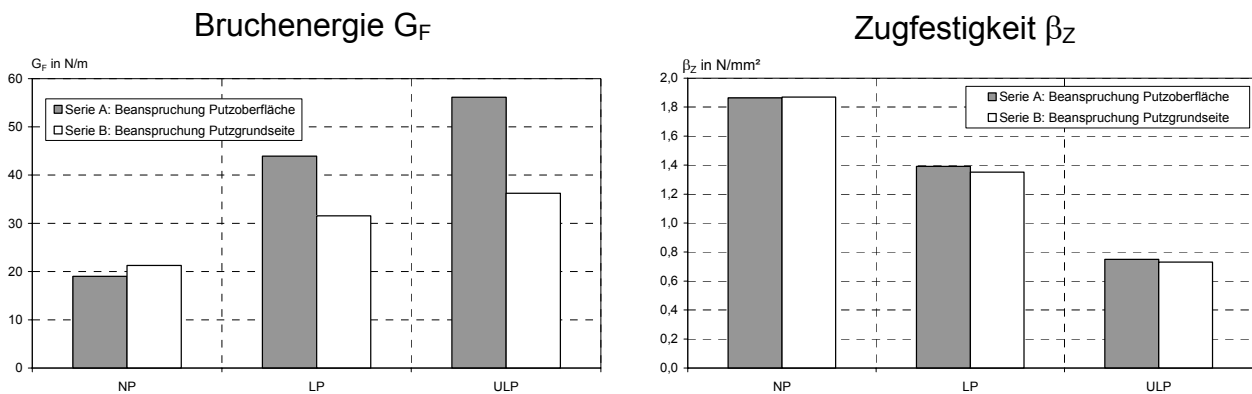
Die Unterschiede zwischen experimentell und numerisch ermittelter Bruchenergie des Leichtputzes (s. Bild B54) sind mit Ausnahme der Prüfalter 3, 14 und 26 Tagen geringer als beim Normalputz. Dabei sind jedoch größerer Differenzen bei der zeitliche Entwicklung zu erkennen; die zeitliche Entwicklung in der Simulation ist weitgehend unstetig. Für die Zugfestigkeit ergaben sich im Vergleich zu den Versuchsergebnissen in der Simulation

höhere Werte. Die in Bild B57 dargestellten Kurvenverläufe zeigen qualitativ die gleiche Festigkeitsentwicklung. Analog zum Normalputz ist die Entwicklung der numerisch ermittelten Zugfestigkeit tendenziell ähnlich zu der Entwicklung der Netto-Biegezugfestigkeit (vgl. Tabellen A37 und A44). Mögliche Ursachen für die Unterschiede zwischen Simulation und Versuch wurden bereits oben genannt.

Beim Ultraleichtputz ergaben sich teilweise erhebliche Unterschiede zwischen der experimentell und numerisch ermittelten Bruchenergie (s. Bild B55). Sowohl der zeitliche Verlauf als auch die Absolutwerte stimmen sehr schlecht überein. In der Simulation ergaben sich mit wenigen Ausnahmen deutlich höhere Werte für die Bruchenergie, der zeitliche Verlauf ist unstetig. Mögliche Ursachen für die Unterschiede zwischen Versuch und Simulation wurden bereits zuvor angeführt. Hinzu kommen beim Ultraleichtputz die teilweise etwas größeren Unterschiede zwischen den Last-Durchbiegungskurven in Simulation und Versuch. Die numerisch ermittelte Zugfestigkeit des Ultraleichtputzes ist im Allgemeinen deutlich größer als die experimentell ermittelte Zugfestigkeit, die zeitliche Entwicklung ist sehr ähnlich. Die numerisch ermittelte Zugfestigkeit nimmt zunächst bis zu einem Alter von 27 Tagen zu und danach ab. Analog zum Normalputz und zum Leichtputz ist die zeitliche Entwicklung der numerisch ermittelten Zugfestigkeit und der Netto-Biegezugfestigkeit weitgehend ähnlich (vgl. Tabellen A40 und A45).

### **Einfluss der Belastungsrichtung**

Der Einfluss der Belastungsrichtung (untersucht mit den Serien A und B, vgl. Tabelle 7) bei den Ergebnissen der Finite-Elemente-Simulationen ist aus Bild 35 ersichtlich. Die Werte für die Zugfestigkeit unterscheiden sich unabhängig vom Putz nur unwesentlich. Im Vergleich zur experimentell ermittelten Netto-Biegezugfestigkeit (s. Bild 32) sind die Unterschiede zwischen den Belastungsrichtungen kleiner.

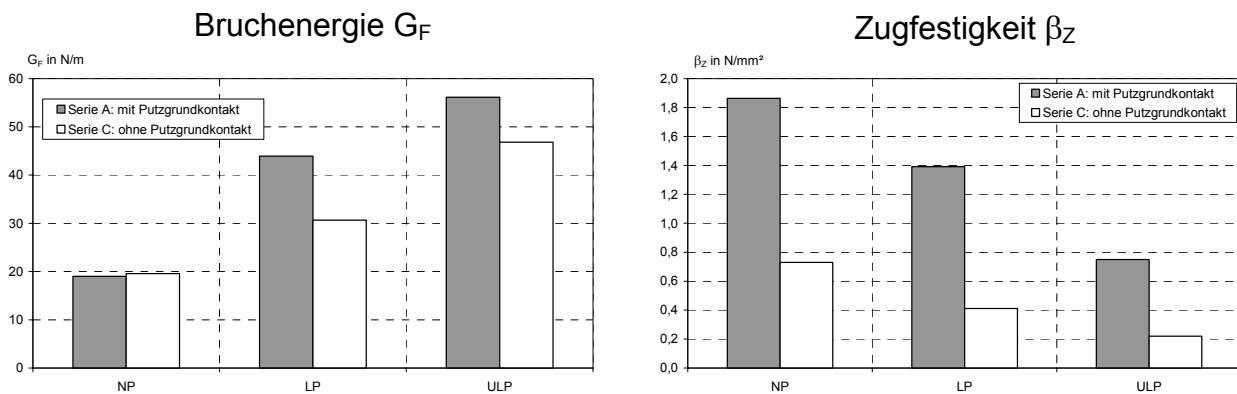


**Bild 35:** Einfluss der Beanspruchungsrichtung auf Bruchenergie  $G_F$  und Zugfestigkeit  $\beta_Z$  Serien A und B, vgl. Tabelle 7

Analog zu den Versuchsergebnissen (s. Abschnitt 4.4.4.3.1) ist die Bruchenergie des Normalputzes etwas größer, wenn die Putzoberfläche auf Zug beansprucht wird. Beim Leichtputz und beim Ultraleichtputz ergaben sich bei Zugbeanspruchung der Putzoberfläche ebenfalls analog zu den Versuchen höhere Bruchenergien als bei der Putzgrundseite.

### **Einfluss des Absaugens des Anmachwassers durch den Putzgrund**

Im Gegensatz zu den experimentellen Ergebnissen (s. Abschnitt 4.4.4.3.1) unterscheidet sich die Bruchenergie der Prismen aus Normalputz vom Putzgrund nur unwesentlich von den Prismen ohne Kontakt zum Putzgrund (s. Bild 36, Serien A und C, vgl. Tabelle 7). Beim Leichtputz und beim Ultraleichtputz ist die Bruchenergie des Putzes ohne Kontakt mit dem Putzgrund analog zu den Versuchsergebnissen deutlich kleiner als die der Putze mit Kontakt zum Putzgrund (43 % beim Normalputz und 20 % beim Leichtputz). Dies trifft auch bei der Zugfestigkeit (155 % beim Normalputz und 240 % beim Leicht- und Ultraleichtputz) analog zur zentrischen Zugfestigkeit (s. Abschnitt 4.4.4.2) bei allen Putzen zu. Der große Unterschied belegt wiederum, dass die Berücksichtigung des Putzgrundkontaktes wesentlich für die Bestimmung zutreffender Materialparameter der Putze ist.



**Bild 36:** Einfluss des Putzgrundkontaktes auf Bruchenergie  $G_F$  und Zugfestigkeit  $\beta_Z$  Serien A und C, vgl. Tabelle 7

#### 4.4.4.3.3 Charakteristische Länge

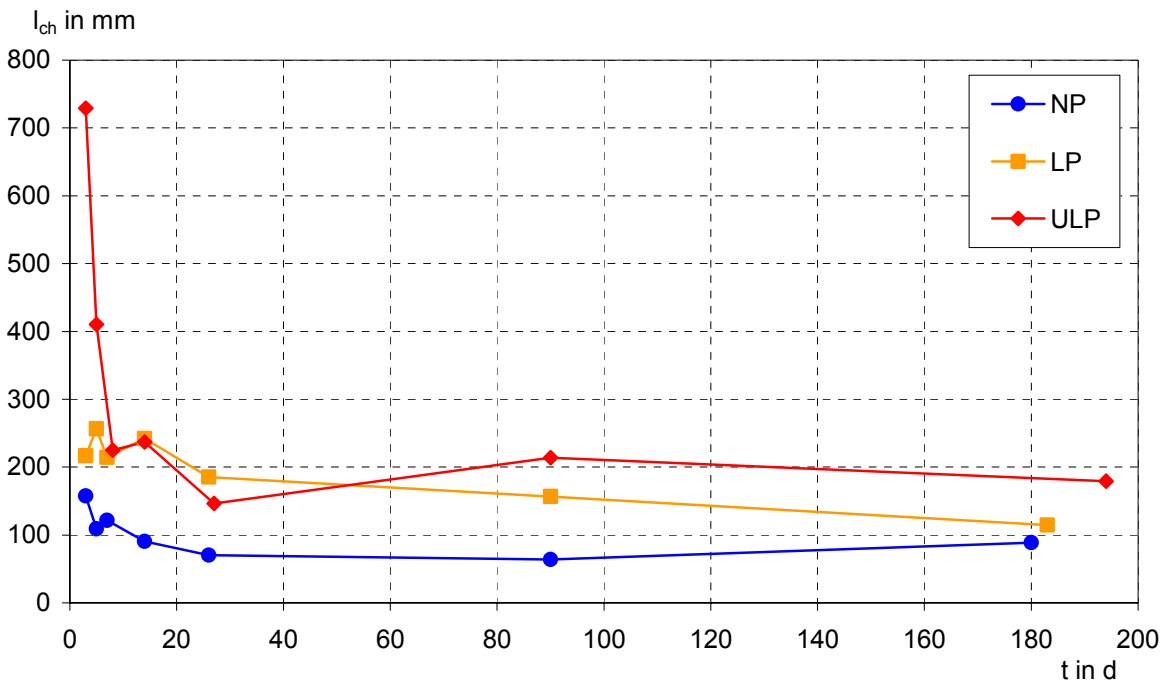
##### Allgemeines

Die charakteristische Länge wurde mit den experimentell bestimmten Werten für Zugfestigkeit (zentrische Zugversuche) und Bruchenergie (Biegezugversuche) ermittelt. Als E-Modul wurde der an den Prismen zur Bestimmung der zentrischen Zugfestigkeit ermittelte dynamische E-Modul verwendet.

Da die charakteristische Länge mit den vorgenannten, in Versuchen ermittelten Materialparametern ermittelt wird, wird die charakteristische Länge von den Streuungen dieser Materialparameter beeinflusst. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

##### Zeitliche Entwicklung

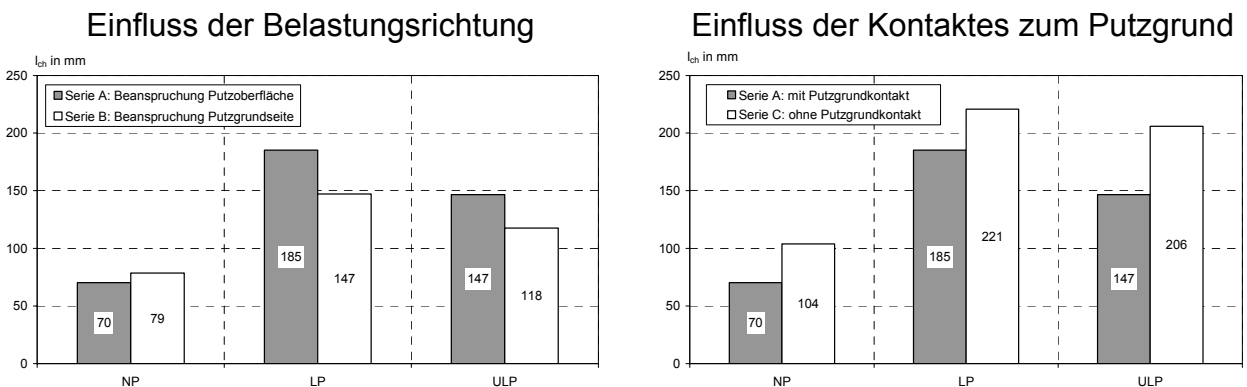
Die zeitliche Entwicklung der charakteristischen Länge (Serie A, s. Tabelle 7), ist im Bild 37 dargestellt. Im Allgemeinen nimmt die charakteristische Länge mit zunehmendem Putzalter ab. Die Duktilität der Putze nimmt demnach mit zunehmendem Alter ab. Mit Ausnahme der Prüfalter 14 und 26 Tage weist der faserbewehrte Ultraleichtputz die größte charakteristische Länge auf, die kleinste charakteristische Länge ergab sich beim Normalputz. Entsprechend ist der Ultraleichtputz im Vergleich zum Normalputz deutlich duktiler.



**Bild 37:** Charakteristische Länge  $I_{ch}$  der Putze in Abhängigkeit vom Prüflager  $t$

### Einfluss der Belastungsrichtung

Der Einfluss der Belastungsrichtung ist im Bild 38 ersichtlich (Serien A und B, s. Tabelle 7). Dabei wurde in erster Näherung unterstellt, dass der E-Modul bei beiden Beanspruchungsrichtungen gleich groß ist. Es wird deutlich, dass die Duktilität des Normalputzes bei Zugbeanspruchung der Putzoberfläche geringer ist als bei Beanspruchung der Putzgrundseite. Beim Leichtputz und beim Ultraleichtputz ist die Duktilität bei Zugbeanspruchung der Putzoberfläche größer als bei Beanspruchung der Putzgrundseite.



**Bild 38:** Einfluss der Belastungsrichtung und des Putzgrundkontaktes auf die charakteristische Länge  $I_{ch}$ . Serien A, B und C, vgl. Tabelle 7

### **Einfluss des Absaugens des Anmachwassers durch den Putzgrund**

Bild 38 kann entnommen werden, dass die Duktilität der Putze deutlich durch den Kontakt mit dem Putzgrund beeinflusst wird (Serien A und C, s. Tabelle 7). Bei allen Putzen ergibt sich bei den Putzen ohne Kontakt zum Putzgrund eine deutlich größere Duktilität als bei den Putzen mit Kontakt zum Putzgrund.

#### **4.4.4.4 Materialparameter des Haftverbundes**

Die Materialparameter zur Beschreibung des Haftverbundes – Haftzugfestigkeit  $\beta_{HZ}$  und Bruchenergie  $G_F$  – sind in den Tabellen A46 bis A48 zusammengestellt. Da nicht alle Versuche stabil durchgeführt werden konnten und daher auch keine Spannungs-Rissöffnungskurven ermittelt wurden, konnte die Bruchenergie nicht für alle untersuchten Prüfkörper bestimmt werden.

Die zeitliche Entwicklung der Materialparameter ist in den Bildern B86 und B87 dargestellt. Neben den Versuchsergebnissen enthalten diese Bilder auch Regressionskurven zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Materialparameter, auf die in Abschnitt 5 eingegangen wird.

Die Haftzugfestigkeit nimmt beim Normalputz und beim Ultraleichtputz bis zu einem Alter von 26 Tagen bzw. 27 Tagen deutlich zu und ändert sich im Anschluss daran nur noch wenig. Da beim Ultraleichtputz die Bruchfläche überwiegend im Putz (Kohäsionsbruch) auftrat, ist die Festigkeitsentwicklung des Putzes maßgeblich für die ermittelte Haftzugfestigkeit. So sind die zeitliche Entwicklung der experimentell ermittelten Zugfestigkeit und die der Haftzugfestigkeit mit Ausnahme des Prüfalters von 194 Tagen sehr ähnlich (vgl. hierzu Bilder B58 und B86). Beim Leichtputz ergab sich vermutlich als Folge von Versuchsstreuungen keine stetige Festigkeitsentwicklung.

Die Bruchenergie (Auswertemethode s. Abschnitt 4.4.3.4.3) nimmt beim Normalputz bis zu einem Alter von 14 Tagen zu. Im Anschluss konnten die Versuche nicht mehr stabil durchgeführt werden, die Prüfkörper versagten bei Erreichen der Haftzugfestigkeit schlagartig. Beim Leichtputz ist die Entwicklung der Bruchenergie analog zur Haftzugfestigkeit unste-tig. Beim Ultraleichtputz nimmt die Bruchenergie bis zu einem Alter von 26 Tagen zu und ändert sich bis zum Alter von 90 Tagen kaum. Im Alter von 180 Tagen konnten keine

Spannungs-Rissöffnungskurven ermittelt werden, da der Bruch außerhalb der Messstrecken auftrat.

#### **4.4.4.5 Materialparameter zur Beschreibung des Kriechens unter Zugbeanspruchung**

Wie in Abschnitt 4.4.3.5.2 erläutert, wurden zur Auswertung der Kriechversuche zunächst die zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung des E-Moduls mit Gleichung (35) erforderlichen Parameter  $s$  und der E-Modul im Alter von 28 Tagen bestimmt. Die so ermittelten E-Moduln sind zusammen mit den Versuchsergebnissen aus Abschnitt 4.4.4.2 in den Bildern B48, B50 und B52 dargestellt. Beim Normalputz und beim Leichtputz wird die zeitliche Entwicklung der E-Moduln gut abgebildet, die Bestimmtheitsmaße betragen 0,91 beim Normalputz und 0,89 beim Leichtputz. Die zeitliche Entwicklung des E-Moduls des Ultraleichtputzes unterscheidet sich deutlich von den mit Gleichung (35) ermittelten Werten, das Bestimmtheitsmaß ist mit 0,50 sehr gering. Problematisch ist beim Ultraleichtputz, dass der E-Modul ab einem Prüfalter von 27 Tagen abnimmt und diese zeitliche Entwicklung nicht mit Gleichung (35) beschrieben werden kann. Gleichung (35) wurde für Betone entwickelt, die sich in der Entwicklung der mechanischen Eigenschaften insbesondere vom verwendeten Ultraleichtputz unterscheiden.

Die Ergebnisse der Nachrechnung der Versuche zum Zugkriechen mit Hilfe von Gleichung (34) sowie die mit DIANA ermittelten Werte und die Versuchsergebnisse sind in den Bildern B88, B89 und B90 dargestellt. Die verwendeten bzw. bestimmten Eingangswerte zur Berechnung der Kriechfunktion – E-Modul im Alter von 28 Tagen  $E_{28}$ , Parameter  $s$ , Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen  $\beta_{D,28}$ , sowie die rel. Luftfeuchte des Umgebungs-klimas  $RH$ , die als freier Eingabeparameter durch Ausgleichsrechnungen so bestimmt wurde, dass Versuchsergebnisse (Kriechkurven) und Gleichung (34) bestmöglich übereinstimmen (s. Abschnitt 4.4.3.5.2) – sind in der Tabelle 12 zusammengestellt. Aufgrund der Verwendung von  $RH$  als freier Eingabeparameter ist dieser unabhängig vom Umgebungs-klima und kann nicht näher interpretiert werden. Die Druckfestigkeit  $\beta_{D,28}$  als Eingangsparameter für die Kriechfunktion nach Model Code 1990 wurde mit dem gewählten empirischen Ansatz

$$\beta_{D,III} = a \cdot (1 - e^{b \cdot t^c}) \quad (36)$$

mit:

$a, b, c$  freie Parameter

berechnet, dessen Parameter zuvor mittels Ausgleichsrechnung aus den Versuchsergebnissen aus Abschnitt 4.4.4.2 ermittelt wurden. Dabei wurde dieser Ansatz gewählt, da mit ihm eine bestmögliche Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen – auch bei der zeitlichen Entwicklung der bruchmechanischen Materialparametern der Putze (s. Abschnitt 5.3) – erreicht wurde.

**Tabelle 12:** Eingangswerte für die Berechnung der Kriechfunktionen mit Gleichung (34)

Putz	$E_{28}$	s	$\beta_{D,28}$	RH
-	N/mm <sup>2</sup>	-	N/mm <sup>2</sup>	%
1	2	3	4	5
NP	8810	0,25	10,45	90,22
LP	6450	0,38	7,4	77,97
ULP	1990	0,25	2,7	110,80

Den Bildern B88, B89 und B90 ist zu entnehmen, dass die aus den Versuchen abgeleiteten Kriechfunktionen sehr gut mit den Kriechfunktionen nach Model Code 1990 (in den Bildern bezeichnet mit MC 90 und Prüfalter, Berechnung mit Parametern aus Tabelle 12 und Gleichung (34)) und den bestimmten Materialparametern abgebildet werden. Die Bestimmtheitsmaße betragen beim Normalputz und beim Leichtputz 0,99 sowie beim Ultraleichtputz 0,90. Es ist mit Hilfe weiterer Versuche bei anderen Putzaltern zu überprüfen, ob auch die Alterung der Putze mit dem gewählten Ansatz zutreffend beschrieben wird.

Der Vergleich der mit DIANA errechneten Kriechfunktionen (bezeichnet mit DIANA und Prüfalter) und den mit Gleichung (34) und den Parametern in Tabelle 12 (bezeichnet mit MC 90 und Prüfalter) in den Bildern B88, B89 und B90 zeigt, dass die Kriechfunktionen beim Normalputz und beim Ultraleichtputz gut übereinstimmen. Die Modellierung des Kriechens mit DIANA ist demnach zutreffend. Beim Leichtputz ergaben sich mit abnehmendem Prüfalter zunehmende Unterschiede zwischen der Modellierung mit DIANA und der mit Gleichung (34) ermittelten Kriechfunktionen.

#### 4.4.4.6 Physikalische Materialparameter

##### 4.4.4.6.1 Trockenrohdichte und Feuchtegehalt

Die Untersuchungsergebnisse (Rohdichte im lufttrockenen Zustand  $\rho_l$ , Trockenrohdichte  $\rho_d$  und Feuchtegehalt  $h_m$ ) enthalten die Tabellen A49 bis A51. Dabei ist zu beachten, dass mit dem Feuchtegehalt lediglich das im Porengefüge vorhandene, nicht gebundene Was-

ser angegeben wird (Trocknung bei 105 °C). Die zeitliche Entwicklung der Rohdichten und der Feuchtegehalte sind in den Bildern B91 bis B93 dargestellt. Erwartungsgemäß nimmt bei allen Putzen der Feuchtegehalt mit zunehmendem Putzalter ab. Im Allgemeinen nimmt der Feuchtegehalt bei allen Putzen bis zu einem Alter von 26 Tagen zunächst schnell und im Anschluss daran langsamer ab. Der Verlauf des Feuchtegehalts des Leichtputzes im Alter von 26 Tagen wirkt etwas ungewöhnlich und ist wahrscheinlich durch Ungenauigkeiten bei der Versuchsdurchführung bedingt (s. Bild B92). Ursachen für die unterschiedlichen Austrocknungsgeschwindigkeiten sind vermutlich die unterschiedlichen Transportmechanismen (zunächst schnellerer Kapillartransport, anschließend langsamere Diffusion) bei der Austrocknung. Beim Normalputz und beim Leichtputz nimmt die Trockenrohddichte ab einem Putzalter von 26 Tagen etwas zu (s. Bilder B91 und B92). Dies ist vermutlich auf Karbonatisierung zurückzuführen. Beim Ultraleichtputz verändert sich die Trockenrohddichte ab einem Alter von 90 Tagen praktisch nicht mehr (s. Bild B93).

#### **4.4.4.6.2 Schwinden**

Die Untersuchungsergebnisse der Schwindversuche (Serie AS) mit dem Messgerät mit fest eingebauter Messuhr (s. Abschnitt 4.4.3.6.2) der im Normalklima 20 °C und 65 % rel. Feuchte gelagerten Prismen sind in den Bildern B94 bis B99 dargestellt.

Beim Normalputz nehmen die Schwinddehnungen unabhängig vom Entnahmealter mit der Lagerungsdauer zu, wobei die Größe der Schwinddehnungen erwartungsgemäß mit steigendem Alter bei Messbeginn abnimmt. Eine Ausnahme stellt das Entnahmealter von 6 Tagen dar. Analog zur Schwinddehnung wird auch die Größe der Masseänderung mit steigendem Alter bei Messbeginn (Ausnahme Entnahmealter 6 Tage) kleiner. Möglicherweise wird zwischen den Entnahmealtern von 4 und 6 Tagen Feuchte aus dem Ziegel in den Putz zurück transportiert, da sich auch bei den Untersuchungen zum Feuchtegehalt beim Normalputz eine Zunahme des Feuchtegehaltes (s. Abschnitt 4.4.4.6.1) – analog zur Zunahme der Masseänderung – vom Entnahmealter von 4 Tagen zum Entnahmealter von 6 Tagen ergab. Zur Klärung sind jedoch weitere Untersuchungen, insbesondere zur Feuchteverteilung im Putz notwendig. Grundsätzlich ist dem zeitlichen Verlauf der Masseänderung zu entnehmen, dass die Masse zunächst ab und im Anschluss daran wieder zunimmt. Diese Massezunahme ist auf Karbonatisierung zurückzuführen, die sich mit der Masseabnahme durch das Austrocknen der Prismen im Lagerungsklima überlagert. Im Unterschied zu den übrigen Entnahmealtern nimmt die Masse beim Entnahmealter von

90 Tagen nahezu unmittelbar nach der Entnahme zu. Dies lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass sich in den Prismen nahezu der Ausgleichsfeuchtegehalt eingestellt hat und die Putze nach der Entnahme keine Feuchte mehr abgeben, sondern nur noch durch Karbonatisierung an Masse zunehmen. Durch Vergleich der Entnahmealter von 25 und 90 Tagen wird ersichtlich, dass neben dem Austrocknungspotential (vorhandene Feuchte im Putz, die zum Austrocknen zur Verfügung steht) auch das Karbonatisierungspotential (mögliche Massezunahme durch Karbonatisierung) mit steigendem Putzalter abnimmt, da die Massezunahme im Alter von 89 Tagen kleiner als im Alter von 25 Tagen ist.

Grundsätzlich lassen sich die Erkenntnisse zum Schwinden und zur Masseänderung des Normalputzes auch auf den Leichtputz übertragen, wobei beim Entnahmealter von 4 Tagen weder eine größere Schwinddehnung noch eine größere Masseänderung als beim Entnahmealter von 6 Tagen ermittelt wurde. Ferner unterscheidet sich vom Normalputz, dass die Schwinddehnungen und Masseänderungen bei den Entnahmealtern von 2 und 4 Tagen nahezu gleich groß sind.

Auf den Ultraleichtputz können die zuvor aufgeführten Erläuterungen zum Schwinden und zur Masseänderung des Normalputzes ebenfalls übertragen werden, wobei beim Entnahmealter von 89 Tagen im Unterschied zum Normalputz keine nennenswerte Massezunahme mehr auftrat.

Auf die Schwindmessungen mit Setz-Dehnungsmesser wird nicht näher eingegangen, da sich nur geringe Unterschiede zwischen der mittleren Schwinddehnung ermittelt mit dem Militast-Gerät und dem Setz-Dehnungsmesser ergaben. Im Bild 39 sind exemplarisch die mit dem Setz-Dehnungsmesser gemessenen, gemittelten Schwindverformungen an Prismen aus Normalputz – entnommen im Alter von 13 und 89 Tagen – dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass sich die Schwinddehnungen auf der Putzgrundseite der Prismen stark von den Schwinddehnungen auf der Putzoberfläche unterscheiden, wobei der Unterschied mit zunehmendem Entnahmealter abnimmt. Die verschiedenen Schwinddehnungen auf der Putzgrundseite und der Putzoberfläche sind einerseits Folge des im Putz entstehenden Feuchtegradienten über die Putzdicke, da der Putz über die Putzoberfläche austrocknet. Andererseits karbonatisiert der Putz aber auch von der Putzoberfläche her (vgl. auch Abschnitt 4.4.4.7.3). Daher weist der Putz grundsätzlich auf der Putzgrundseite ein höheres Schwindpotential als auf der Putzoberfläche auf.

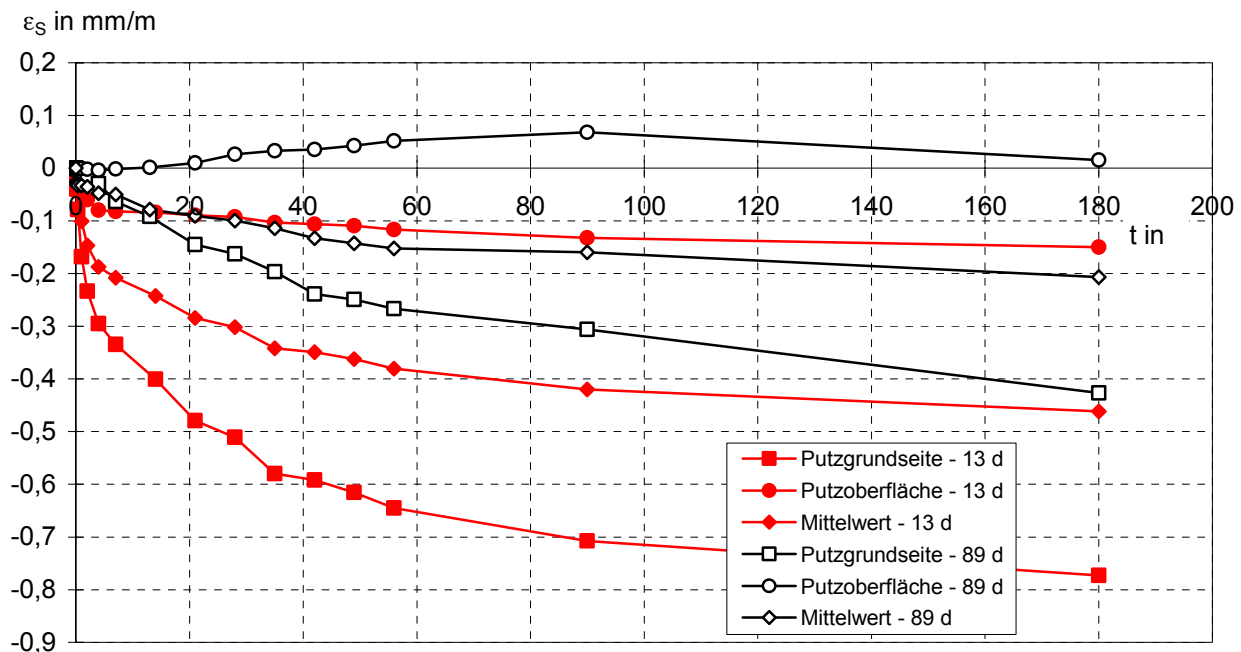


Bild 39: Schwinddehnung  $\varepsilon_s$  in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer  $t$

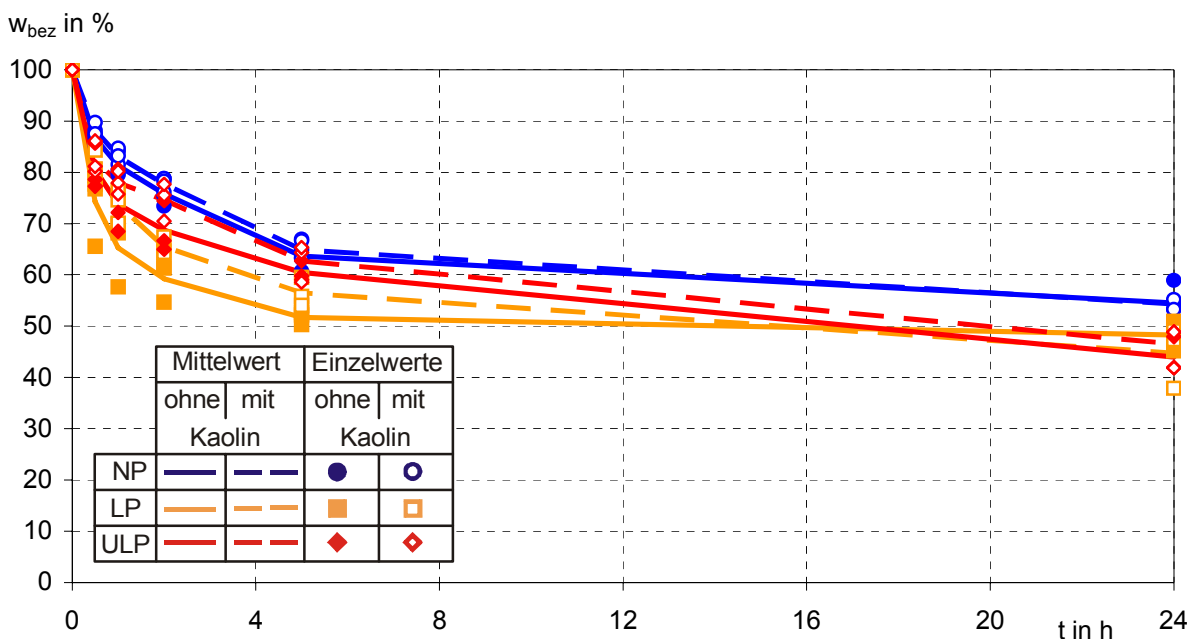
In den Bildern B100, B101 und B102 sind die mit den im  $\text{CO}_2$ -freien Lagerungsklima bei  $20^\circ\text{C}$  und  $65\%$  rel. Feuchte gelagerten Prismen (Serie AST) ermittelten Schwinddehnungen in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt der Prismen (bezogen auf die mittlere Trockenrohddichte im Entnahmealter von 2 Tagen, s. Abschnitt 4.4.6.1) dargestellt. Häufig wird bei Simulationsrechnungen mit der Finite-Elemente-Methode von zementgebundenen Reparaturschichten ein linearer Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt und Schwinden unterstellt, vgl. z. B. /MAR00/ und /YOO89/. Dieser Zusammenhang kann auf Außenputze in dieser Form zunächst nicht übertragen werden. Die Bilder B100 und B102 zeigen, dass beim Normalputz und beim Ultraleichtputz die Schwinddehnung zu Beginn, d. h. unmittelbar nach der Entnahme, zunächst nicht linear verläuft (Beim Leichtputz, s. Bild B101, wurde dies vermutlich nicht beobachtet, da die erste Messung aus ablauforganisatorischen Gründen erst nach 7 Tagen Lagerungsdauer erfolgte). Mit abnehmendem Feuchtegehalt nimmt das Schwinden dann bezogen auf die Abnahme des Feuchtegehaltes stärker zu, bis der Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt und Schwinden näherungsweise linear wird. Eine mögliche Ursache für die gefundenen Zusammenhänge zwischen Schwinddehnung und Feuchtegehalt ist, dass die Prismen über die Oberfläche austrocknen und sich damit keine homogene Feuchteverteilung über die Prismendicke ausbildet. Aus dieser Feuchteverteilung resultieren dann auch unterschiedliche Schwinddehnungen über die Prismendicke. Dadurch kann der Zusammenhang zwischen Schwinden und

Feuchtegehalt aus den Messungen nicht ohne inverse Analyse der Untersuchungen mit der Finite-Elemente-Methode zutreffend bestimmt werden. Ferner ist möglich, dass bei den unterschiedlichen Bereichen der Feuchtegehalte der Prismen verschiedene Schwindmechanismen wirksam sind (s. u. a. /WIT77/).

#### 4.4.4.7 Begleitende Untersuchungen zu Wasserabsaugen, Porenstruktur und Karbonatisierungstiefe

##### 4.4.4.7.1 Wasserabsaugen durch den Putzgrund

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Absaugen des Anmachwassers durch den Putzgrund sind in Bild 40 dargestellt. Analog zu den Vergleichsversuchen zur Entwicklung des Herstellverfahrens, s. Abschnitt 4.3.3, ergab sich auch bei den Untersuchungen des mit der Putzmaschine aufgetragenen Putzes kein wesentlicher Einfluss der Kaolinschicht auf das Absaugen des Anmachwassers durch den Putzgrund. Der bezogene Wassergehalt des Putzes vom Putzgrund ohne Vorbehandlung und des Putzes von mit Kaolin vorbehandeltem Putzgrund sind (sowohl die Mittelwerte als auch die Wertebereiche) nahezu gleich groß. Die Ergebnisse der Vergleichsversuche (vgl. Abschnitt 4.3.3.3) werden damit bestätigt. Es ist daher davon auszugehen, dass die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Putze auch bei Aufbringen des Putzes mit einer Putzmaschine nicht maßgeblich durch die Kaolinschicht beeinflusst werden.



**Bild 40:** Bezogener Wassergehalt  $w_{bez}$  der Putze vom Putzgrund in Abhängigkeit von der Kontaktdauer  $t$

#### **4.4.4.7.2 Porenstruktur**

Die mit den Untersuchungen ermittelten Kennwerte – Porenvolumen  $P$ , Median des Porenradius  $r_m$  (Radius bei 50 % des Porenvolumens) und Rohdichte  $\rho_{HG}$  – sind in der Tabelle A52 zusammengestellt. Die Porengrößenverteilungen sind in den Bildern B103 bis B108 dargestellt.

#### **Einfluss der Putzgrundvorbehandlung**

In den Bildern B103 bis B105 sind die in den verschiedenen Entnahmetiefen (Putzoberfläche, Mitte und Putzgrund) ermittelten Porengrößenverteilungen der Proben vom mit Kaolin behandelten und unbehandelten Putzgrund vergleichend gegenübergestellt.

Beim Normalputz und beim Ultraleichtputz ergaben sich sowohl bei den Porengrößenverteilungen (s. Bild B103 und B105) als auch bei den ermittelten Kennwerten (s. Tabelle A52) keine signifikanten Unterschiede zwischen den Proben vom behandelten und vom unbehandelten Putzgrund.

Beim Leichtputz war aufgrund eines Defekts am verwendeten Gerät ein Teil der Messungen nicht verwertbar. Daher liegen bei zahlreichen Proben lediglich Einfachbestimmungen vor (vgl. Tabelle A52). Folglich lässt sich aus den vorliegenden Ergebnissen lediglich vermuten, dass die Verwendung von Kaolin keinen Einfluss auf die Porengrößenverteilung und die ermittelten Kennwerte hat (s. Bild B104 und Tabelle A52). Die teilweise vorliegenden deutlichen Unterschiede beim Leichtputz lassen sich vermutlich auf Streuungen bei den Materialeigenschaften zurückführen.

#### **Einfluss der Entnahmetiefe der Proben (Putzgrund, mittlerer Bereich der Dicke und nahe Putzoberfläche)**

In den Bildern B106, B107 und B108 sind die ermittelten Porengrößenverteilungen der drei verschiedenen Entnahmebereiche über die Putzdicke für die Putze vergleichend gegenübergestellt.

Bei dem Normalputz nimmt der Anteil der feinen Poren zur Putzoberfläche hin leicht zu (Porenradien von etwa 0,55 bis 0,03  $\mu\text{m}$ ) (vgl. Bild B106). Eine mögliche Ursache dafür ist Karbonatisierung, die entstehenden Calciumcarbonat-Kristalle wachsen in den Porenraum hinein und verkleinern die Poren. Eine weitere mögliche Ursache ist eine Verdichtung

durch das Abziehen der Putzoberfläche nach dem Putzen. Auffallend ist der Peak der Porengrößenverteilung der Proben aus der putzgrundnahen Schicht bei einem Porenradius 1,6  $\mu\text{m}$ . Zum Putzgrund hin weist der Putz offensichtlich gröbere Poren auf. Die Gesamtporosität beträgt bei allen drei untersuchten Schichten etwa 28 bis 30 % (s. Tabelle A52). Demnach verschiebt sich die Porenverteilung vom Putzgrund zur Putzoberfläche hin in den feineren Bereich.

Beim Leichtputz war, wie o. a., ein Teil der Messungen aufgrund eines Defektes am verwendeten Gerät nicht verwertbar. Eine eindeutige Abhängigkeit der ermittelten Porengrößenverteilungen (s. Bild B107) oder der ermittelten Kennwerte (vgl. Tabelle A52) von der Entnahmetiefe ist aufgrund der teilweise großen Unterschiede vermutlich als Folge von Materialstreuungen nicht erkennbar. Auch beim Ultraleichtputz ist kein Einfluss der Entnahmetiefe auf die Porengrößenverteilungen (s. Bild B108) und Kennwerte (vgl. Tabelle A52) ersichtlich.

#### 4.4.4.7.3 Karbonatisierungstiefe

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Karbonatisierungstiefe sind in Bild 49 dargestellt. Offensichtlich setzt die Karbonatisierung, die diffusionsgesteuert abläuft, beim Ultraleichtputz erst nach einem Prüfalter von etwa 5 Tagen ein. Ursache hierfür ist vermutlich das Porenwasser, durch welches das in der Luft enthaltene Kohlendioxid daran gehindert wird, in den Putz einzudringen. Mit zunehmendem Putzalter trocknet der Putz immer weiter aus, das Kohlendioxid kann eindiffundieren und der Putz entsprechend karbonatisieren. Beim Normalputz tritt die verzögerte Karbonatisierung ansatzweise auf.

Der zeitliche Verlauf der Karbonatisierungstiefe kann im Allgemeinen mit einem  $\sqrt{t}$ -Ansatz zutreffend beschrieben werden:

$$d_{\text{Karbo}} = a \cdot \sqrt{t} \quad (37)$$

Der Parameter  $a$  in Gleichung (37) wurde für alle Putze mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Die so ermittelten Ansätze zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Karbonatisierungstiefe sind für den Normalputz und den Leichtputz in Bild 49 dargestellt. Beim Normalputz ist der Zusammenhang zufrieden stellend (Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,87$ ). Beim Leichtputz wird die zeitliche Entwicklung relativ schlecht beschrieben, beim Ultraleichtputz, bei dem auch ein etwas modifizierter  $\sqrt{t}$ -Ansatz untersucht

wurde, mit dem der verzögerte Karbonatisierungsbeginn berücksichtigt wurde, ergab sich kein Zusammenhang.

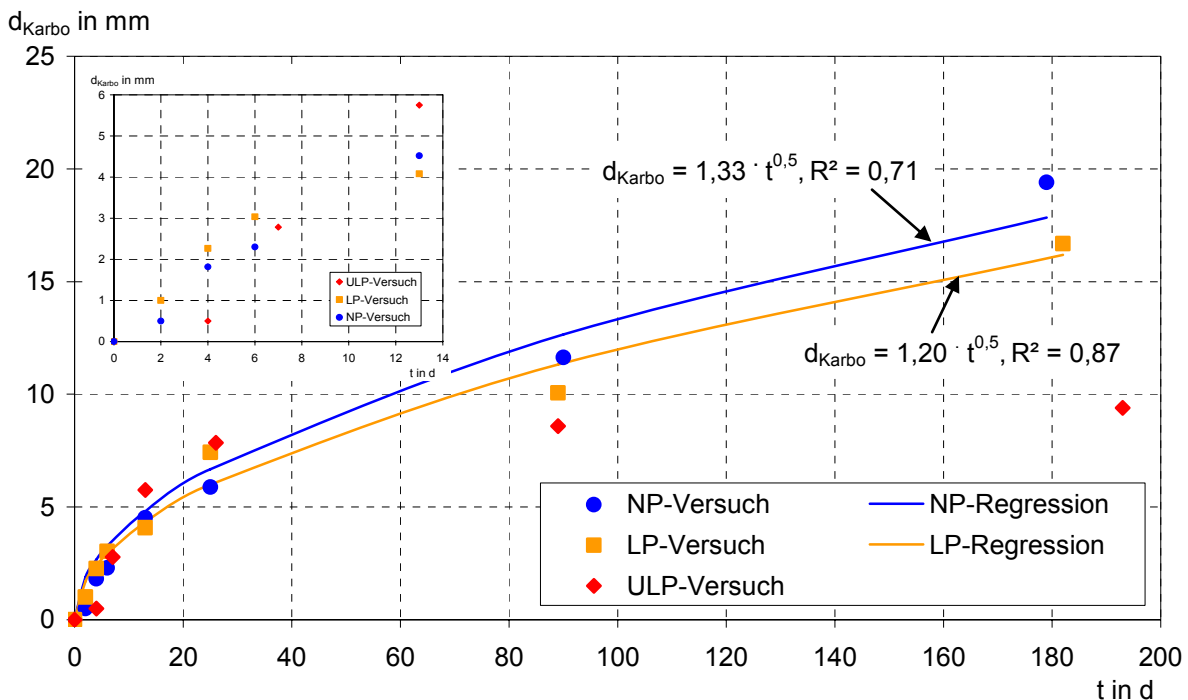


Bild 49: Karbonatisierungstiefe  $d_{\text{Karbo}}$  in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$

## 5 ZUSAMMENSTELLUNG DER MATERIALPARAMETER FÜR DIE FINITE-ELEMENTE-SIMULATIONEN

### 5.1 Einleitung

Im Folgenden werden die Materialparameter für die Planhochlochziegel und die Putze, welche für die Finite-Elemente-Simulationen an geputztem Mauerwerk benötigt und mit Hilfe von Untersuchungen ermittelt wurden, aufbereitet bzw. zusammengestellt.

### 5.2 Materialparameter der Hochlochziegel

#### Mechanische Materialparameter

Die verwendeten mechanischen Materialparameter für die Abbildung der Planhochlochziegel sind in der Tabelle 13 zusammengestellt und Tabelle 5 entnommen. Da die Materialparameter und das der Modellierung zugrunde liegende Materialmodell bereits in Ab-

schnitt 3.2 erläutert wurde, wird hier nicht weiter darauf eingegangen. Grundsätzlich sei jedoch erwähnt, dass die Ziegel linear elastisch sind und ein Versagen des Putzgrundes zunächst ausgeschlossen wurde.

**Tabelle 13:** Effektive, orthotrope Elastizitätskennwerte des Putzgrundes

Kennwert	Einheit	Ziegel		
		T16	SX+	T9
1	2	3	4	5
$E_x$	N/mm <sup>2</sup>	4820	1580	1240
$E_y$		5770	4880	3510
$E_z$		9770	6460	5750
$G_{xy}$		1270	500	550
$G_{xz}$		3070	1000	1040
$G_{yz}$		3800	2700	2510
$\nu_{xy}$	-	0,07	0,08	0,12
$\nu_{xz}$		0,10	0,10	0,10
$\nu_{yz}$		0,10	0,10	0,10

### Physikalische Materialparameter

Die für die Modellierung benötigten physikalischen Materialparameter der Ziegel sind die spezifische Wärmekapazität  $c$ , die Rohdichte  $\rho$ , die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  sowie der Wärmedehnungskoeffizient  $\alpha_T$ . Diese Materialparameter sind in der Tabelle 14 zusammengestellt. Die spezifische Wärmekapazität wurde /DIN02/ entnommen, die Rohdichte der Steine entspricht der mittleren Rohdichte der Ziegel im lufttrockenen Zustand, die sich bei der Bestimmung der Mauersteinkennwerte (s. Tabellen A2, A4 und A6) ergab. Die Wärmeleitfähigkeit (Rechenwert) wurde den jeweiligen bauaufsichtlichen Zulassungen der Planhochlochziegel entnommen, wobei beim SX+ zwischen den Tabellenangaben mit der ermittelten Trockenrohddichte (s. Abschnitt 3.1.2.1) interpoliert wurde. Für die Wärmedehnungskoeffizienten wurden die Mittelwerte in Tabelle A14 angenommen.

Tabelle 14: Physikalische Materialparameter der Ziegel für die Modellierung

Materialparameter	Einheit	Ziegel		
		T16	SX+	T9
1	2	3	4	5
c	J/(kg · K)	1000		
$\rho$	kg/dm <sup>3</sup>	0,75	0,57	0,63
$\lambda$	W/(m · K)	0,16	0,09	
$\alpha_T$	1/K	$6,31 \cdot 10^{-6}$	$6,92 \cdot 10^{-6}$	$5,48 \cdot 10^{-6}$

### 5.3 Materialparameter der Putze

#### Mechanische und bruchmechanische Materialparameter

Der E-Modul wurde in den Simulationsrechnungen von geputzten Wänden mit der in DIANA implementierten Gleichung (35) berechnet. Verwendet wurden die Parameterwerte E-Modul im Alter von 28 Tagen  $E_{28}$  und zementspezifischer Parameter s in Tabelle 15. Die Bestimmung der Parameter ist in Abschnitt 4.4.3.5 beschrieben.

Tabelle 15: Parameterwerte zur Beschreibung der E-Modul-Entwicklung

Putz	$E_{28}$	s
-	N/mm <sup>2</sup>	-
1	2	3
NP	8810	0,25
LP	6450	0,38
ULP	1990	0,25

Das Nachbruchverhalten der Putze wurde zunächst mit einem multilinearen Ansatz beschrieben und möglichst zutreffende Materialparameter ermittelt. Bei der Simulation der Wandprüfkörper ist jedoch der Ansatz von Hordijk vorgegeben. Daher wurden die durch Finite-Elemente-Simulationen von Biegezugversuchen unter Verwendung eines multilinearen Ansatzes ermittelten Spannungs-Rissöffnungsbeziehungen mit Hilfe des Ansatzes von Hordijk angenähert (s. Abschnitt 4.4.3.3.3). Dabei wurden die Parameter – Zugfestigkeit und Bruchenergie – so lange variiert, bis eine bestmögliche Übereinstimmung der beiden Ansätze vorlag (Kriterium: Minimum der Fehlerquadrate). Die so ermittelten Werte von Zugfestigkeit und Bruchenergie zur Beschreibung des Nachbruchverhaltens der Putze unter Zugbeanspruchung mit Hilfe des Ansatzes von Hordijk sind in den Tabellen A43 bis

A45 zusammengestellt und in den Bildern B109 bis B114 in Abhängigkeit vom Prüfalter der Putze dargestellt. Die zeitliche Entwicklung der Zugfestigkeit bzw. der Bruchenergie wurde analog zur Druckfestigkeit mit Gleichung (36) (s. Abschnitt 4.4.4.5) beschrieben. Dabei wurden beim Leichtputz die 14-Tage-Werte nicht berücksichtigt, da die Bruchenergie sehr groß war. Beim Ultraleichtputz wurden die 3-Tage-Werte aus dem gleichen Grund nicht einbezogen. Die zeitliche Entwicklung von Zugfestigkeit und Bruchenergie wird beim Leichtputz und beim Ultraleichtputz zutreffend abgebildet. Obwohl die Anpassung von Gleichung (36) beim Normalputz vergleichsweise schlecht war, wurden die wie o. a. ermittelten zeitlichen Verläufe von Zugfestigkeit und Bruchenergie dennoch für die Finite-Elemente-Simulationen der Wände verwendet, sofern Rissbildung in den Simulationen berücksichtigt wurde. Eine Aufstellung der Ansätze enthält Tabelle 16.

**Tabelle 16:** Ansätze zur Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung von Zugfestigkeit und Bruchenergie

Putz	Ansatz
1	2
NP	$\beta_z(t) = 9,0 \cdot (1 - e^{-0,13 \cdot t^{0,22}})$
	$G_F(t) = 11,4 \cdot (1 - e^{-0,31 \cdot t^{1,10}})$
LP	$\beta_z(t) = 39,7 \cdot (1 - e^{-0,02 \cdot t^{0,27}})$
	$G_F(t) = 13,4 \cdot (1 - e^{-0,79 \cdot t^{0,62}})$
ULP	$\beta_z(t) = 0,6 \cdot (1 - e^{-0,10 \cdot t^{1,24}})$
	$G_F(t) = 3,5 \cdot (1 - e^{-0,12 \cdot t^{0,91}})$

### Materialparameter des Haftverbundes

Die zeitliche Entwicklung von Haftzugfestigkeit und Bruchenergie wurde ebenfalls mit Gleichung (36) approximiert. Zwar kann die zeitliche Entwicklung nicht bei den Finite-Elemente-Simulationen berücksichtigt werden, dennoch sollten die Werte im hohen Alter (180 Tage) ermittelt werden, die beispielsweise für Normalputz und Ultraleichtputz nicht versuchsmäßig bestimmt werden konnten. Die so bestimmten Werte für Haftzugfestigkeit und Bruchenergie (s. Tabelle 17) wurden dann in den Finite-Elemente-Simulationen (sofern Rissbildung berücksichtigt wurde) verwendet, um frühes Haftzugversagen auszuschließen und so möglichst große Zugspannungen in der Putzschicht zu verursachen. Die Ergebnisse der Approximationen sind in den Bildern B86 und B87 dargestellt. Die hohen Bestimmtheitsmaße belegen, dass die Haftzugfestigkeitsentwicklung unabhängig vom

Putz mit dem gewählten Ansatz zutreffend beschrieben werden kann. Bei der Bruchenergie ergaben sich auch beim Leichtputz und beim Ultraleichtputz relativ hohe Bestimmtheitsmaße. Beim Normalputz lässt sich die Übereinstimmung wegen der geringen Anzahl an Versuchswerten und des vergleichbar hohen 3-Tage-Wertes nicht beurteilen.

**Tabelle 17:** Werte für Haftzugfestigkeit  $\beta_{HZ}$  und Bruchenergie  $G_F$

Putz	$\beta_{HZ}$	$G_F$
-	N/mm <sup>2</sup>	N/m
1	2	3
NP	1,55	7,2
LP	0,55	4,2
ULP	0,51	4,1

### Materialparameter zur Beschreibung des Kriechens unter Zugbeanspruchung

Das Kriechen wurde mit dem in Abschnitt 4.4.3.5.2 beschriebenen Ansatz berücksichtigt. In der Tabelle 18 sind die verwendeten Parameter aufgeführt. Die ermittelten Parameterwerte sind in Abschnitt 4.4.4.5 erläutert.

**Tabelle 18:** Parameter zur Berücksichtigung des Kriechens

Putz	$\beta_{D,28}$	RH
-	N/mm <sup>2</sup>	%
1	2	3
NP	10,45	90,22
LP	7,4	77,97
ULP	2,7	110,80

### Schwinden

Das Schwinden der Putze wurde in erster Näherung auf Grundlage der Schwindmessungen an Prismen vom Putzgrund (Abschnitt 4.4.4.6.2) ermittelt. Für den zeitlichen Verlauf wurden dabei die Schwindmessungen der Putzprismen mit einem Entnahmealter von 2 Tagen angesetzt. Jedoch würde das Schwinden ohne Berücksichtigung der bis zu diesem Entnahmealter auftretenden Schwinddehnungen nicht zutreffend erfasst. Daher musste ein Teil der Schwindverformungen abgeschätzt werden. Dies erfolgte näherungsweise durch Ermittlung der Schwindendwerte der zu verschiedenen Putzaltern entnom-

menen Prismen. Zur Ermittlung der Schwindendwerte wurden die Versuchskurven mit Hilfe des Ansatzes nach Ross zunächst angenähert:

$$\varepsilon_s = \frac{t}{a + b \cdot t} \quad (38)$$

mit:

t Lagerungsdauer,  
a, b Parameter.

Die Parameter a und b der Gleichung (38) wurden jeweils mit Ausgleichsrechnungen so bestimmt, dass die Summe der Fehlerquadrate ein Minimum ergab. Begonnen wurde dabei zunächst mit den letzten drei Versuchswerten. Anschließend wurde das Bestimmtheitsmaß ermittelt und ein weiterer, zeitlich früherer Versuchswert mit in die Auswertung einbezogen und die Ausgleichsrechnung erneut durchgeführt. Diese Prozedur wurde so lange wiederholt, bis sich für das Bestimmtheitsmaß ein Maximum ergab. Diese schrittweise Vorgehensweise begründet sich dadurch, dass die Anpassung mit Gleichung (38) an die im Anfangszeitraum der Schwindmessung ermittelten Prüfwerte in der Regel unzureichend ist. Der Schwindendwert wurden dann aus dem Grenzwert der Gleichung (38) wie folgt berechnet:

$$\varepsilon_{s,\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{t}{a + b \cdot t} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{a}{t} + b} = \frac{1}{b} \quad (39)$$

Die so ermittelten Schwindendwerte  $\varepsilon_{s,\infty}$  sind zusammen mit den Bestimmtheitsmaßen  $R^2$  in der Tabelle A53 zusammengestellt. Mit Ausnahme der Entnahmealter von 4 und 13 Tagen beim Ultraleichtputz ergaben sich mit dem gewählten Ansatz grundsätzlich sehr hohe Bestimmtheitsmaße, die Werte betragen teilweise nahezu 1. Die zeitliche Entwicklung der Schwindendwerte ist in den Bildern B115 bis B117 dargestellt. Es ist deutlich festzustellen, dass der Schwindendwert der jeweiligen Putze mit zunehmendem Entnahmealter erwartungsgemäß abnimmt.

Anschließend wurde die Abhängigkeit der Schwindendwerte vom Entnahmealter mit dem folgenden empirischen Ansatz beschrieben, dessen Parameter mittels Ausgleichsrechnung ermittelt wurden (Kriterium: Minimum der Fehlerquadrate):

$$\varepsilon_{s,\infty}(t) = a - b \cdot (1 - e^{c \cdot t^d}) \quad (40)$$

mit:

t Entnahmealter,  
a, b, c, d freie Parameter.

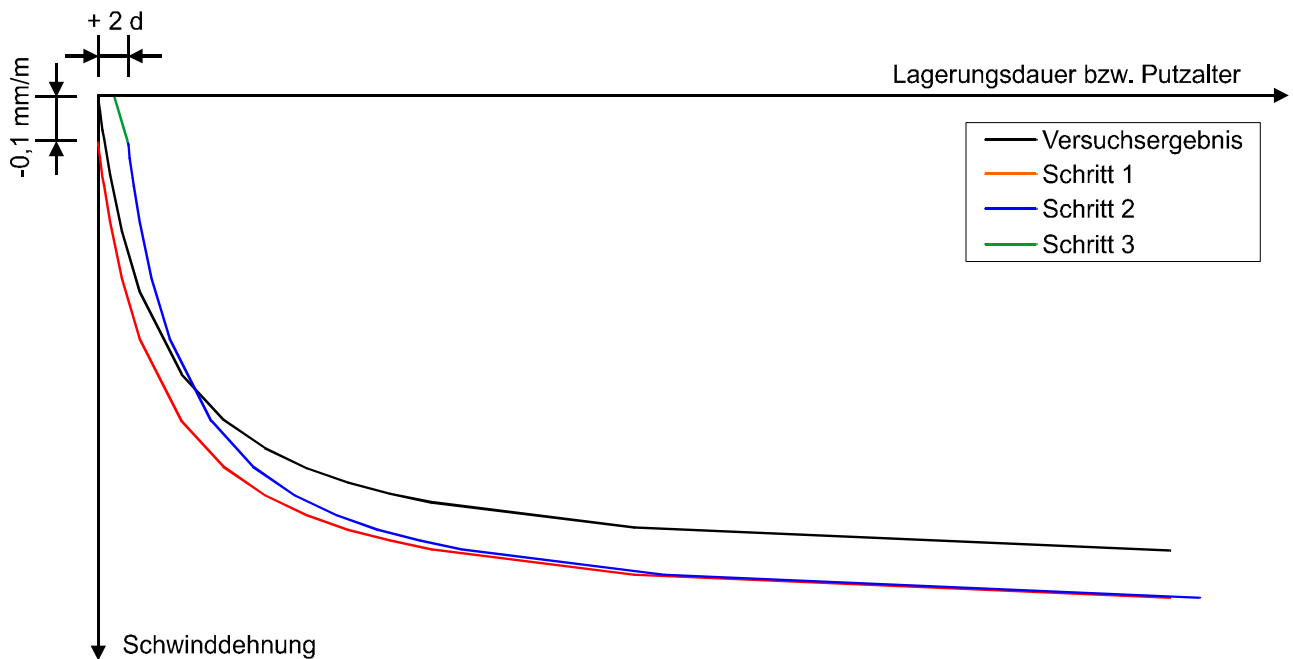
Die Ergebnisse dieser Ausgleichsrechnungen sind in den Bildern B115 bis B117 dargestellt. Die unabhängig vom Putz bestimmten hohen Werte für das Bestimmtheitsmaß (0,87 bis 0,97) belegen, dass die zeitliche Entwicklung des Schwindendwertes mit Gleichung (40) zutreffend abgebildet wird.

Mit den ermittelten Parameterwerten und Gleichung (40) wurden danach die Schwindendwerte für die Entnahmealter von 1 und 2 Tagen ermittelt. Die Differenz zwischen den beiden Schwindendwerten wurde als Schwinddehnung des Putzes interpretiert, welche bei den Schwindmessungen der im Alter von 2 Tagen entnommenen Prismen nicht erfasst wurde.

Mit diesem Unterschied, wurde dann der zeitliche Verlauf des Schwindens des Putzes wie folgt abgeschätzt:

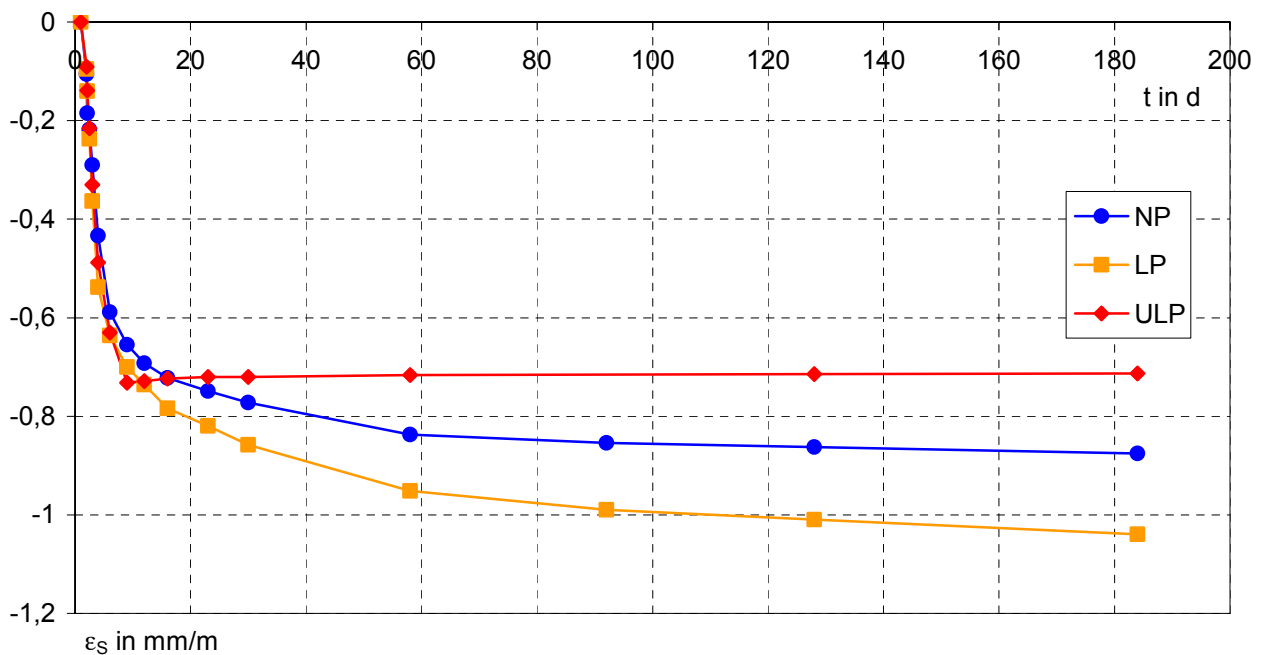
- Schritt 1: Addition der Differenz zwischen den wie o. a. ermittelten Endschwindmaßen bei den Entnahmealtern von 1 und 2 Tagen zu den Schwinddehnungen der Prismen beim Entnahmealter von 2 Tagen (bei allen Putzen etwa  $-0,1 \text{ mm/m}$ ),
- Schritt 2: Zeitliches Verschieben der wie zuvor erläutert ermittelten Schwindkurve auf ein Putzalter von 2 Tagen,
- Schritt 3: Annahme einer linearen zeitlichen Zunahme der Schwinddehnungen von einem Putzalter von 1 Tag auf die im Schritt 2 ermittelte Schwinddehnung bei einem Alter von 2 Tagen.

Dieses Vorgehen ist schematisch in Bild 41 dargestellt. Das Versuchsergebnis entspricht dabei den Schwinddehnungen der nach einer Kontaktdauer von 2 Tagen entnommenen Prismen. Der Schwindbeginn wurde auf das Putzalter von 1 Tag festgelegt, da der Putz in den ersten 24 Stunden mit Folie abgedeckt war und der Putz daher nicht nennenswert austrocknen und damit schwinden konnte.



**Bild 41:** Schema zur Abschätzung des Schwindens des Putzes auf dem Putzgrund

Die wie oben beschrieben ermittelten und bei der Simulation von geputzten Wänden verwendeten Schwindverläufe sind im Bild 42 dargestellt.



**Bild 42:** Bei den Simulationen angesetzte Schwinddehnungen  $\epsilon_S$  der Putze in Abhängigkeit vom Putzalter  $t$

## Physikalische Materialparameter

Die physikalischen Materialparameter der Putze zur Bestimmung der Temperaturverteilung im Wandquerschnitt – spezifische Wärmekapazität  $c$ , Rohdichte  $\rho$  und Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  – sind in der Tabelle 19 zusammengestellt. Da die Rohdichten und die Wärmeleitfähigkeiten aus den Ergebnissen von begleitenden Untersuchungen (vgl. Abschnitt 6.1.1) an den Putzen abgeleitet wurden, wurde entsprechend zwischen den verschiedenen untersuchten Putzflächen (s. Abschnitt 6.1.1) unterschieden. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte mit der folgenden Gleichung aus DIN EN 1742 /DIN02/:

$$\lambda_R = \lambda_{10,dry} \cdot e^{f_u \cdot u} \quad (41)$$

mit:

$\lambda_{10,dry}$  Wärmeleitfähigkeit, im trockenen Zustand bei einer Durchschnittstemperatur von 10 °C,

$f_u$  Massebezogener Feuchteumrechnungskoeffizient aus DIN EN 1742, hier  $f_u = 4$ ,

$u$  Massebezogener Feuchtegehalt des jeweiligen Putzes.

Die Werte für  $\lambda_{10,dry}$  wurden der Tabelle A.12 in DIN EN 1742 /DIN02/ entnommen, wobei Zwischenwerte mit den zugehörigen Trockenrohdsichten (s. Abschnitt 6.1.3.1) linear interpoliert wurden. Die spezifische Wärmekapazität  $c$  in Tabelle 19 wurde analog zu den Ziegeln entsprechend der Angaben in DIN EN 1742 /DIN02/ gewählt.

**Tabelle 19:** Physikalische Materialparameter der Putze für die Modellierung

Materialparameter	Einheit	Kombination <sup>1)</sup>	Wert
1	2	3	4
$c$	J/(kg · K)	1 – 5	1000
$\rho$	kg/dm <sup>3</sup>	1	1,73
		2	n. b.
		3	1,70
		4	1,28
		5	0,85
$\lambda$	W/(m · K)	1	0,80
		2	n. b.
		3	0,77
		4	0,42
		5	0,25

1) s. Tabelle 20

n. b. nicht bestimmt

Der Wärmedehnungskoeffizient der Putze wurde zu  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$  angenommen. Dies entspricht dem unteren Grenzwert des in /MAR00/ angegebenen Größenbereich für übliche Instandsetzungsmörtel ( $1,2$  bis  $1,4 \cdot 10^{-5}$ ).

## 6 UNTERSUCHUNGEN AN MAUERWERKWÄNDEN

### 6.1 Praktische Untersuchungen an Mauerwerkwänden

#### 6.1.1 Versuchsprogramm

Ziel der Untersuchungen an den Mauerwerkwänden war, die für die Simulationsrechnungen an Putz auf Putzgrund erstellten Modelle möglichst weitgehend zu kalibrieren. Dazu sollten fünf verschiedene Mauerstein-Putzkombinationen untersucht werden. Die ausgewählten Mauerstein-Putzkombinationen sind in der Tabelle 20 zusammengestellt, ferner sind dort die Maße der Putzflächen aufgeführt. Da jedoch die Putzfläche der Kombination 2 bereits nach dem Entfernen der Folienabdeckung (24 Stunden nach dem Putzen) starke, ausführungsbedingte Risse aufwies, konnten die Untersuchungen nur an vier verschiedenen Kombinationen durchgeführt werden.

Tabelle 20: Ausgewählte Mauerstein-Putzkombinationen

Kombination	Putz	Ziegel	Maße der Putzfläche <sup>1)</sup>	
			l	h
			mm	
1	2	3	4	5
1	NP	T16	1240	1490
2 <sup>2)</sup>	LP	SX+	1230	750
3	NP			
4	LP	T9	1230	750
5	ULP			

1) gerundet

2) bereits 24 h nach dem Putzen starke Risschäden im Putz, daher nicht weiter untersucht

Hierzu wurden unter Anwendung der derzeitigen Modellvorstellungen zur Entstehung von schädlichen Rissen in der Putzschicht kritische Kombinationen von Putz und Putzgrund ausgewählt. So wurde zunächst der steifste Putz in Verbindung mit dem steifsten Putzgrund kombiniert (Kombination 1), um möglichst hohe Zugspannungen in der Putzschicht zu verursachen. Mit der Kombination 3 wurde der steifste Putz in Verbindung mit einem

weichen Putzgrund untersucht, um aus den derzeitigen Modellvorstellungen heraus folgernd besonders breite Risse zu provozieren. Bei den Kombinationen 4 und 5 wurden ein weicher und ein besonders weicher Putz mit dem weichsten Putzgrund kombiniert, um den Einfluss der Steifigkeiten der Putze auf das Entstehen möglicher Rissen noch weitgehender untersuchen zu können.

An den Putzflächen/Wänden wurden zunächst Untersuchungen zum Schwinden des Putzes auf dem Putzgrund durchgeführt. Nachdem das Schwinden der Putze weitgehend abgeschlossen war, wurden die Putzflächen in Bewitterungsversuchen zyklisch bewittert (s. Abschnitt 6.1.2). In den Bewitterungsversuchen wurden die Temperaturen auf der Putzoberfläche, im Bereich Putz/Putzgrund und auf der Wandrückseite an verschiedenen Messstellen bestimmt. Um nähere Erkenntnisse zur Verteilung der Oberflächentemperatur zu gewinnen, wurden ferner bei den Kombinationen 1 und 3 Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera während der Bewitterung (kurz vor Ende der Haltephase, s. Abschnitt 6.1.2) durchgeführt. Nach verschiedenen Anzahlen von Bewitterungszyklen wurden die Putzflächen augenscheinlich auf Risse untersucht

An den Putzen wurden die in der Tabelle 21 aufgeführten Untersuchungen durchgeführt, um grundlegende Materialparameter der Putze als Vergleichswerte zu den Materialparameter aus Abschnitt 4.4.4 zu bestimmen und somit zu überprüfen, ob die Materialparameter aus Abschnitt 5.3 bei den Simulationen angewendet werden können. Dabei wurden die Untersuchungen zur Bestimmung der Festmörtelkennwerte des Putzes ohne Kontakt zum Putzgrund im Alter von 28 Tagen durchgeführt. Der Festmörtel vom Putzgrund wurde im Unterschied dazu immer unmittelbar vor Beginn der Bewitterung der Putzflächen untersucht, die Prüfalter sind daher unterschiedlich (s. Abschnitte 6.1.2 und 6.1.3). Bei der Kombination 2, die wie o. a. bereits nach 24 Stunden starke Risschäden aufwies, wurden an dem Putz vom Putzgrund lediglich dynamischer E-Modul und Druckfestigkeit bestimmt, wobei das Prüfalter des Putzes 26 Tage betrug. Mit den ebenfalls in Tabelle 21 aufgeführten Untersuchungen wurde der verwendete Dünnbettmörtel näher charakterisiert, wobei auch diese Prüfungen unmittelbar vor Beginn der Bewitterung der Wände durchgeführt wurden.

**Tabelle 21:** Begleitende Untersuchungen an den verwendeten Putzen und Mauermörteln

Untersuchung an	Zustand	Untersuchte Materialparameter	Prüfung nach
1	2	3	4
Dünnbettmörtel	frisch	Ausbreitmaß, Luftgehalt, Rohdichte	DIN 18555-2 /DIN82b/
	fest	Druckfestigkeit, Trockenrohddichte	DIN 18555-3 /DIN82c/
Putz	frisch	Wassergehalt mittels Glühverlust	vgl. Abschnitte 4.3.2.2 und 4.3.2.3
		Ausbreitmaß, Luftgehalt, Rohdichte	DIN 18555-2 /DIN82b/
	fest	Druckfestigkeit, Trockenrohddichte	DIN 18555-3 /DIN82c/
Putz vom Putzgrund	fest	Dynamischer E-Modul, Druckfestigkeit in Anlehnung an das Verfahren III nach DIN 18555-9 /DIN99/	vgl. Abschnitte 4.4.3.2.1 und 4.4.3.2.3
		Trockenrohddichte	vgl. Abschnitt 4.4.3.6.1

Die Herstellung der Prüfkörper zur Bestimmung der Materialparameter der Putze vom Putzgrund erfolgte analog zu Abschnitt 4.4. Jedoch wurden jeweils die Mauersteine als Putzgrund ausgewählt, die auch bei den jeweiligen Wandversuchen verwendet wurden. Die Prüfkörperanzahl zur Bestimmung der Materialparameter vom Putzgrund betragen bei der Trockenrohddichte 3 und bei der Bestimmung des dynamischen E-Moduls und der Druckfestigkeit 6.

### 6.1.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die untersuchten Mauerwerk-Prüfkörper sind zusammen mit den Messstellen zur Erfassung der Schwindverformungen in den Bildern B118 bis B120 dargestellt. Die Herstellung, Lagerung und Prüfung der geputzten Mauerwerkswände erfolgte im Normaklima 20 °C, 65 % rel. Feuchte. Bei allen Mauerwerkswänden wurde ein deckelnder Dünnbettmörtel als Mauermörtel verwendet. Nach dem Mauern wurden die Wände für einen Tag mit Folie abgedeckt. Die Wände für die Kombinationen 1 bis 3 wurden 14 Tage nach dem Mauern geputzt, bei den Kombinationen 4 und 5 erfolgte das Putzen aus Termingründen 7 Tage nach dem Mauern. Vor dem Putzen wurden die Wandränder mit einer 100 mm dicken Polystyrolämmung gedämmt. Bei den Prüfkörpern, bei denen zwei verschiedene Kombinationen gleichzeitig untersucht wurden (Kombinationen 2 und 3 sowie 4 und 5), wurde

eine 20 mm dicke Polystyrol-Dämmung als Zwischenlage zwischen den Wänden verwendet. Vor der Bewitterung wurden die Fugen zwischen Dämmstoff und Wand dauerelastisch versiegelt, um den Eintritt von Feuchte bei der Bewitterung zu vermeiden (s. Bild 43). Zur weitgehenden Vermeidung von Verformungsbehinderungen am Wandfuß bzw. auch am Wandkopf bei den kombinierten Wandprüfkörpern wurden gefettete Gleitfolien als Zwischenlagen verwendet. Die zur Herstellung der Wände verwendeten Planhochlochziegel wurden bis unmittelbar vor dem Mauern über einen Zeitraum von etwa 4 Wochen im Normklima 20 °C, 65 % rel. Feuchte gelagert.

Beim Putzen wurden die Putze jeweils durch Einstellen der Wasserzugabemenge an der Putzmaschine so eingestellt, dass die Putze zu den für die Bestimmung der Materialparameter in Abschnitt 4.4 verwendeten Putzmörtel im Allgemeinen analoge Frischmörtel-eigenschaften (im Wesentlichen Ausbreitmaß) aufwiesen. Ziel dieser Vorgehensweise war, auch möglichst ähnliche mechanische Eigenschaften der Putze zu gewährleisten. Das Putzen der Wände erfolgte einlagig in einer Dicke von 20 mm. Die Oberfläche der Putze wurde mit Hilfe einer Kartätsche abgezogen. Unmittelbar nach dem Putzen wurde die Putzfläche für 24 Stunden mit Folie abgedeckt. Anschließend wurden die Folien entfernt und Messsockel zur Bestimmung der Schwindverformungen auf der Putzoberfläche mit dem Zwei-Komponenten-Kleber Akepox appliziert.

Mit der Bestimmung der Schwindverformungen wurde 48 Stunden nach dem Putzen begonnen. Die Anordnung der Messstellen ist, wie bereits o. a., ebenfalls in den Bildern B118 bis B120 dargestellt. Die Schwindverformungen wurden sowohl im Bereich der Mauersteine als auch im Bereich einer Stoßfuge ermittelt. Ferner wurden die Schwindverformungen auch über längere Messstrecken (mehrere Mauersteine) gemessen. Sowohl die Messungen im Bereich der Steine als auch über längere Messstrecken wurden in Richtung Steinhöhe und Steinlänge durchgeführt, um zu erfassen, wie sich die richtungsabhängigen Steifigkeitseigenschaften (vgl. Abschnitt 3.2.4) des Putzgrundes auf das Schwinden auswirken.

Nachdem davon auszugehen war, dass die Schwindverformungen weitgehend abgeschlossen waren, wurden die Wände zyklisch bewittert. Dies war bei der Kombination 1 nach 81 Tagen, bei der Kombination 3 nach 64 und bei den Kombinationen 4 und 5 nach 47 Tagen (LP) bzw. 48 Tagen (ULP) der Fall. Der Bewitterungszyklus wurde folgendermaßen gewählt:

- 1 Stunde kontinuierliches Aufheizen der Putzoberfläche auf eine Temperatur von 70 °C (in Anlehnung an die EOTA-Richtlinie ETAG 004 für Europäisch-Technische Zulassungen für Wärmedämmverbundsysteme, /ETA00/),
- 2 Stunden Halten der Oberflächentemperatur von 70 °C,
- 1 Stunde Besprühen der Oberfläche mit Leitungswasser (Temperatur von 10 bis 15 °C, in Anlehnung an /ETA00/),
- 20 Stunden Ruhen.

Die Dauer des Zyklus betrug damit 24 Stunden. Die Wassermenge beim Besprühen der Oberfläche mit Leitungswasser betrug etwa 9 l/(m<sup>2</sup> · min). Da sich beim ersten Zyklus bei der Kombination 1 während der Bewitterung Probleme mit der Versuchssteuerung ergaben, betrug die Berechnungsdauer bei diesem Zyklus abweichend von der o. g. Dauer lediglich 8 Minuten.



**Bild 43:** Putzfläche der Kombination 1 nach dem vierten Zyklus

Das Aufheizen der Oberfläche erfolgte mit Hilfe von sechs gleichmäßig über die Höhe der Mauerwerk-Prüfkörper verteilten Infrarot-Strahlern, die einen horizontalen Abstand von 60 cm von der Putzoberfläche hatten. Die Regelung der Infrarot-Strahler erfolgte mit einem Rechner über die mit Hilfe von vier auf der Putzoberfläche applizierten Temperaturfühlern (Widerstandsthermometer PT 100 mit Edelstahl-Bodenscheibe) gemessene

Temperatur. Während der Bewitterung der Mauerwerk-Wände wurden ferner weitere Temperaturmessungen auf der Putzoberfläche, im Bereich zwischen Putz und Putzgrund sowie auf der Rückfläche der Mauerwerk-Prüfkörper durchgeführt. Die Anordnung der Messstellen sowie deren Bezeichnung sind in den Bildern B121 bis B123 dargestellt. Für die Messungen auf der Putzoberfläche und der Rückseite der Mauerwerk-Prüfkörper wurden analog zu den Messungen zur Versuchssteuerung Widerstandsthermometer PT 100 mit Edelstahl-Bodenscheibe verwendet. Die Messungen im Bereich Putzgrund/Putz wurden mit Hilfe von Widerstandsthermometern PT 100 durchgeführt, die in dünnen Metallröhren untergebracht waren. Diese wurden beim Aufmauern der Wände in die Lagerfugen eingelegt. Die Zuführung der Messkabel erfolgte von der Rückseite der Mauerwerk-Prüfkörper aus (s. Bild 44).



**Bild 44:** Messstelle zur Bestimmung der Temperatur im Bereich Putzgrund/Putz

Nach verschiedenen Zyklenanzahlen wurden die Putzflächen auf Risse überprüft. Bei der Kombination 1 erfolgten diese Untersuchungen vor der Bewitterung und bis zum 4. Zyklus mit bloßem Auge. Nach dem 5. Zyklus sowie nach jedem weiteren folgenden Zyklus und nach Ende der Bewitterung (Gesamtanzahl: 14 Zyklen) wurde die Putzfläche dann mit einer Lupe mit vierfacher Vergrößerung auf Risse untersucht. Die Breite der Risse wurde mit einem Rissbreitenmaßstab bestimmt. Bei den Kombinationen 3 sowie 4 und 5 wurde die Putzoberfläche vor Beginn der Bewitterung sowie nach jedem Bewitterungszyklus mit einer Lupe auf Risse überprüft. Die Gesamtanzahl der Zyklen betrug 10 bei der Kombination 3 und 8 bei den Kombinationen 4 und 5.

### **6.1.3 Versuchsergebnisse**

#### **6.1.3.1 Begleitende Untersuchungen**

Die Ergebnisse der in den begleitenden Untersuchungen an dem verwendeten Dünnbettmörtel bestimmten Frisch- und Festmörtelkennwerten – Luftgehalt  $L$ , Frischmörtelrohddichte  $\rho_{fr}$ , Trockenrohddichte  $\rho_d$ , Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ}$  und Druckfestigkeit  $\beta_D$  – sowie das jeweilige Prüfalter  $t$  bei Bestimmung der Festmörtelkennwerte sind in der Tabelle A54 zusammengestellt.

Die Frisch- und Festmörtelkennwerte – Ausbreitmaß  $a$ , Luftgehalt  $L$ , Frischmörtelrohddichte  $\rho_{fr}$ , Trockenrohddichte  $\rho_d$ , Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ}$  und Druckfestigkeit  $\beta_D$  – der zum Putzen der Wände verwendeten Putzmörtel sind in der Tabelle A55 enthalten. Zum Vergleich sind dort auch die Frisch- und Festmörtelkennwerte der zur Bestimmung der Materialparameter (s. Abschnitt 4.4) verwendeten Putzmörtel aufgeführt. Mit Ausnahme des Normalputzes bei der Kombination 3, bei der das Ausbreitmaß trotz mehrfachen Einstellens der Wasserzufuhr an der Putzmaschine nicht gezielter eingestellt werden konnte, sind die Ausbreitmaße bei den Putzmörteln für die Wandversuche nahezu genauso groß wie bei der Bestimmung der Materialparameter. Biegezug- und Druckfestigkeit sind beim Normalputz und beim Leichtputz bei allen Kombinationen etwas kleiner als bei den Putzmörteln zur Bestimmung der Materialparameter. Gleiches trifft jedoch auch für die Rohdichten zu, daher sind die geringeren Festigkeiten vermutlich im Wesentlichen auf eine andere Verdichtung der Putze bei der Probenherstellung zurückzuführen. Beim Ultraleichtputz ergaben sich bei der Kombination 5 für die Wände im Unterschied zu den anderen beiden Putzen eine etwas höhere Biegezugfestigkeit und eine etwas höhere Rohddichte als bei dem Putzmörtel zur Bestimmung der Materialparameter.

Die Wassergehalte der Frischmörtel (s. Tabelle A56) unterscheiden sich – insbesondere auch beim Normalputz, bei dem sich ein größerer Unterschied beim Ausbreitmaß bei Kombination 3 ergab – mit Ausnahme der Kombination 2 beim Leichtputz nur wenig von den Putzmörteln zur Bestimmung Materialparameter. Das Ziel, einen gleichmäßigen Wassergehalt der Putze zu gewährleisten, wurde daher mit Ausnahme der Kombination 2 erreicht.

Die Ergebnisse der Untersuchungen am Putz vom Putzgrund sind in den Tabellen A57 und A58 zusammengestellt. Beim Normalputz unterscheiden sich die Mittelwerte des dynamischen E-Moduls und der Druckfestigkeit unter Berücksichtigung des Prüfalters nur wenig von den Putzprismen, verwendet zur Bestimmung der Materialparameter (mittlerer

dynamischer E-Modul im Alter von 90 Tagen  $9.190 \text{ N/mm}^2$ , mittlere Druckfestigkeit  $11,9 \text{ N/mm}^2$ ). Ferner stimmen die Werte auch gut mit den Ergebnissen der Regressionen zur Erfassung der zeitlichen Entwicklung überein. Die Rohdichten sind bei den Putzen für die Wandprüfungen etwas größer als bei den Putzmörteln zur Bestimmung der Materialparameter. Beim Leichtputz der Kombination 2 ist die Druckfestigkeit mit  $7,48 \text{ N/mm}^2$  etwas größer als bei den Untersuchungen zur Bestimmung der Materialparameter (dort:  $6,49 \text{ N/mm}^2$ ), der dynamische E-Modul ist nahezu gleich groß. Bei der Kombination 4 ergaben sich geringere Werte für Druckfestigkeit und E-Modul. So war die Druckfestigkeit unter Berücksichtigung des Prüfaltes etwa 30 % geringer als sich mit der in Abschnitt 4.4.4.5 ermittelten Gleichung zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Druckfestigkeit des Leichtputzes ergibt. Beim E-Modul beträgt der Unterschied zwischen dem verwendeten Ansatz zur Ermittlung des E-Moduls in Abhängigkeit vom Prüfaltes, vgl. Abschnitt 4.4.4.5, zu dem mit den begleitenden Untersuchungen ermittelten Werten etwa 20 %. Diese Unterschiede können zum Teil auf Prüfstreuungen zurückgeführt werden. Die Rohdichten des Leichtputzes sind in den begleitenden Untersuchungen ebenfalls etwas geringer als bei der Bestimmung der Materialparameter (etwa 8 % bei der Trockenrohddichte). Jedoch ist der Unterschied vergleichsweise gering. Beim Ultraleichtputz (Kombination 5) ergaben sich im Vergleich zu den mit den Ansätzen zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung berechneten Materialparametern (s. Abschnitt 4.4.4.5) analog zum Leichtputz für die Kombination 4 für die Druckfestigkeit etwa 18 % und für den E-Modul etwa 16 % kleinere Werte. Dies ist neben Prüfstreuungen jedoch auch darauf zurückzuführen, dass die zeitliche Entwicklung – Abnahme der Werte für höhere Prüfaltes – mit den Ansätzen nicht zutreffend abgebildet werden.

Es lässt sich zusammenfassen, dass die Wassergehalte mit Ausnahme des Putzes für die Kombination 2 nahezu genauso groß war wie bei der Herstellung der Probekörper zur Bestimmung der Materialparameter für die Finite-Elemente-Simulationen. Für Druckfestigkeit und E-Modul ergaben sich beim Normalputz ebenfalls Werte, die unter Berücksichtigung des Prüfaltes nahezu genauso groß waren wie bei der Bestimmung der Materialparameter. Daher ist es beim Normalputz gerechtfertigt, die in Abschnitt 5.3 aufgeführten Materialparameter für die Simulation der Wandversuche zu verwenden. Beim Leichtputz und beim Ultraleichtputz ergaben sich zwar bei Druckfestigkeit und E-Modul mit etwa 20 bis 30 % etwas größere Unterschiede zu den Ergebnissen in Abschnitt 4.4, bzw. den Ansätzen zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung in Abschnitt 5.3. Jedoch ist bei der Bewertung zu berücksichtigen, dass auch im Abschnitt 4.4 bei verschiedenen Prüfaltes etwas größere Abweichungen von den zu erwartenden Werten ergaben (s. auch Vergleich mit den An-

sätzen zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung in Abschnitt 5.3). Daher erscheint auch bei diesen Putzen die Verwendung der Materialparameter aus Abschnitt 5.3 gerechtfertigt zu sein.

### **6.1.3.2 Untersuchungen an den Putzflächen**

#### **6.1.3.2.1 Schwinden**

Wie in Abschnitt 6.1.2 erläutert, wurden auf den Putzflächen Schwindmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Schwindmessungen sind in den Bildern B124 bis B128 dargestellt.

#### **Kombination 1**

Mit Ausnahme der Messstrecke F2 im Bereich einer Stoßfuge wurden bei der Kombination 1 ausschließlich Verkürzungen bestimmt (s. Bild B124). Die Schwinddehnungen nehmen in den ersten 49 Tagen zunächst kontinuierlich zu und verändern sich im Anschluss nur noch wenig. Die in verschiedenen Wandhöhen bestimmten Schwinddehnungen (Messstrecken H1 bis H3) nehmen mit dem Abstand zum Wandfuß zu, wobei der Unterschied zwischen den Messstrecken mit zunehmendem Abstand vom Wandfuß abnimmt. Eine mögliche Ursache könnte eine Verformungsbehinderung am Wandfuß sein, da Reibungskräfte am Wandfuß trotz der gefetteten Gleitfolien nicht ausgeschlossen werden können. Die über die Steinlänge bestimmte Schwinddehnung (Messstrecke SH1) ist bis zu einer Messdauer von 42 Tagen nahezu genauso groß wie an der Messstrecke H3. Anschließend ist die Schwinddehnung im Steinbereich etwas größer.

Erwartungsgemäß sind die Schwinddehnungen in vertikaler Richtung aufgrund der höheren Steifigkeit der Planziegel kleiner als in Richtung Steinlänge (vgl. Messstrecken H1 bis H3 und V1). Die Schwinddehnungen über die kurze Messstrecke F1 im Bereich des Steins sind kleiner als an den Messstrecken H1 bis H3. Eine mögliche Ursache dafür könnten größere Unsicherheiten infolge der geringen Messlänge der Strecke F1 sein. An der Messstrecke F2 über die Fuge ergab sich über die gesamte Messdauer ein Quellen. Dieses nimmt bis zu einem Alter von 42 Tagen zu und ändert sich danach nur noch geringfügig. Mögliche Ursachen für das ermittelte Quellen könnten Verformungen des Putzes senkrecht zur Putzfläche sowie größere Unsicherheiten infolge der geringen Messlänge sein.

### **Kombination 3**

Die bei der Kombination 3 ermittelten Dehnungen sind im Bild B125 dargestellt. In den ersten 2 Tagen nach Messbeginn wurde mit Ausnahme der Messstrecke SHU1 bei allen Messstrecken ein geringfügiges Quellen bestimmt. Im Anschluss an dieses anfängliche Quellen nehmen die Verformungen mit Ausnahme der kurzen Messstrecken FU1 und FU2 wieder ab.

An den „längeren“ Messstrecken (HU, SHU1, SVU1, VU) nehmen die Schwinddehnungen während des gesamten Untersuchungszeitraums kontinuierlich zu. Analog zur Kombination 1 ergaben sich bei den horizontalen Messstrecken größere Verformungen als bei den vertikalen Messstrecken. Diese Differenz ist bei den Messungen im Bereich des Mauersteins (Messstellen SHU1 und SVU1) größer als bei den Messstrecken über die gesamte Putzfläche.

Das im Bereich der kurzen Messstrecken FU1 und FU2 ermittelte Quellen nimmt bis zu einer Prüfdauer von 3 Tagen (Messstelle FU1) bzw. 7 Tagen (Messstelle FU2) zu. Im Anschluss wurde wieder ein Schwinden gemessen. Analog zu Kombination 1 sind die Dehnungen in der Messstrecke FU1 kleiner als die an den längeren horizontalen Messstrecken (SHU1, HU) bestimmten Werte. Mögliche Ursachen dafür wurden bereits bei der Kombination 1 aufgeführt. Das Schwinden im Bereich der Messstrecke FU2 ist am kleinsten. Im Unterschied zur Kombination 1 wurde nicht nur Quellen bestimmt, was möglicherweise auf einen anderen Einfluss von Verformungen senkrecht zur Putzfläche zurückzuführen ist.

### **Kombination 4**

Die bei der Kombination 4 ermittelten Dehnungen sind im Bild B126 dargestellt. Analog zur Kombination 2 wurde an der Messstrecke FU2 über die Stoßfuge ein Quellen bestimmt, das bis zu einem Prüfalter von 14 Tagen zunächst zu und im Anschluss wieder etwas abnimmt. Bei den übrigen Messstrecken wurde Schwinden gemessen, das bis zu einem Alter von 35 Tagen kontinuierlich zunimmt. Ebenfalls analog zu den Kombinationen 1 und 3 sind die Schwinddehnungen an den „längeren“ Messstrecken in horizontaler Richtung vermutlich als Folge der unterschiedlichen Steifigkeiten der Mauersteine in Richtung Steinlänge und Steinhöhe größer als in vertikaler Richtung. Die an der Messstrecke SVU1 ermittelte Schwinddehnung ist deutlich kleiner als an der Messstrecke VU. Ursachen dafür

könnte beispielsweise eine größere Messungenaugigkeit bei der kleineren Messstrecke sein.

In der linken unteren Ecke der Putzfläche (jeweils 20 mm von den Wandrändern entfernt) wurden mit einer zusätzlichen Messstelle die in Bild B127 dargestellten Verformungen senkrecht zur Putzfläche ermittelt. Dadurch sollte festgestellt werden, ob sich der Putz vom Putzgrund ablöst und der Putz analog zu einem über die Oberfläche austrocknenden Estrich aufschüsselt. Wie dem Bild entnommen werden kann, nehmen die Verformungen während der gesamten Versuchsdauer nahezu kontinuierlich zu, der Putz schüsselt scheinbar auf. Zum Ende der Schwindmessungen betrug die Verformung 0,07 mm.

### **Kombination 5**

Die Dehnungen bei der Kombination 5 enthält das Bild B128. Bei der kurzen Messstrecke im Bereich der Stoßfuge FO2 ergab sich ein ausgeprägtes Quellen. Die Dehnungen nehmen bis zu einer Prüfdauer von 14 Tagen stark und im Anschluss wenig zu. Dies entspricht den Ergebnissen bei der Kombination 1, wobei das ermittelte Quellen sehr hoch ist. Die Messstrecke FO1 ergab unplausible Ergebnisse und wurde daher nicht verwertet.

Die Schwinddehnungen an den Messstrecken SHO1, HO, SVO1 und VO nehmen bis zu einer Messdauer von etwa 28 Tagen im Allgemeinen kontinuierlich zu und ändern sich danach weniger. Wie bei den übrigen untersuchten Kombinationen sind die Schwinddehnungen in Richtung Wandlänge aufgrund der geringeren Steifigkeit des Planziegels in dieser Richtung größer als in Richtung Wandhöhe. Bei den Messstrecken im Bereich eines Mauersteins ergaben sich sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung im Allgemeinen etwas kleinere Dehnungen als bei den Messstrecken über die gesamte Putzoberfläche.

## **6.1.3.2.2 Temperaturmessungen und Rissbilder**

### **Kombination 1**

Die im Bewitterungsversuch bei der Kombination 1 ermittelten Temperaturverläufe sind beispielhaft für den zweiten Zyklus in den Bildern B129, B130 und B131 in Abhängigkeit von der Messdauer dargestellt. Die mit den für die Regelung der Bewitterungsanlage verwendeten Fühlern REG U, REG M und REG O bestimmten Temperaturen in Bild B129 zeigen, dass die vorgegebenen Randbedingungen für das Aufheizen der Putzoberfläche und das Halten der Oberflächentemperatur sehr genau eingehalten wurden. Bei den im

Randbereich angeordneten Temperaturfühlern ergaben sich mit etwa 63 °C bei Ende der Haltephase geringere Oberflächentemperaturen als in Wandmitte. Die Temperaturverteilung über die Wandbreite ist demnach nicht vollständig homogen (s. auch Abschnitt 6.1.3.2.3). Vermutlich ist dies zum Teil auf das Zuströmen kälterer Luft aus dem Umgebungsklima im Randbereich infolge Konvektion zurückzuführen. Zu Beginn der Beregnungsphase ändert sich die Oberflächentemperatur sehr schnell und im Anschluss wieder langsamer, innerhalb von etwa 2 Minuten nach Regenbeginn fällt die Oberflächentemperatur von 70 °C auf etwa 25 °C ab.

Wie Bild B130 entnommen werden kann, verändert sich die Temperatur im Bereich Putzgrund/Putz (Messstellen PG1 bis PG3) infolge des Wärmespeichervermögens der Planziegel und des Putzes und des Wärmedurchgangswiderstandes des Putzes erwartungsgemäß langsamer als auf der Oberfläche (Messstellen Z1 bis Z3 und REG M). Bei der Messstelle PG2 ergab sich zum Ende der Haltephase eine etwas höhere Temperatur als auf der Oberfläche. Dies ist vermutlich auf Messungenauigkeiten zurückzuführen. Während der Aufheizphase nehmen die Temperaturen auf der Wandrückseite von 20 °C auf etwa 24 °C zu (s. Bild B131). Da die Raumluft im gleichen Zeitraum wegen der begrenzten Leistungsfähigkeit der im Prüfraum vorhandenen Klimaanlage ebenfalls von 20 °C auf etwa 24 °C zunahm, ist ein Teil der bestimmten Erwärmung auch auf die höhere Raumlufttemperatur zurückzuführen.

Grundsätzlich wurde zum Zyklusende (24 Stunden) an allen Messstellen wieder die Ausgangstemperatur von etwa 20 °C erreicht. Daher ist auch davon auszugehen, dass die Temperaturbeanspruchungen bei allen Zyklen gleich sind und sich die Wand nicht kontinuierlich erwärmt.

Die Putzfläche der Kombination 1 wies unmittelbar nach dem Entfernen der Folienabdeckung (24 Stunden nach dem Putzen) die in Bild B132 dargestellten Risse mit einer maximalen Breite von 0,20 mm auf. Die Breite dieser Risse nahm bis zum Ende der Bewitterung nur in einem Fall von 0,05 mm auf 0,1 mm zu. Nach dem 5. Zyklus wurde das in Bild B133 dargestellte Rissbild aufgenommen, wobei ein Einfluss der Stoß- und Lagerfugen auf die Rissbildung nicht erkennbar ist. Das Rissbild in Bild B133 änderte sich bis zum Ende der Bewitterung nicht mehr, d. h. die Rissbildung war nach dem 5. Zyklus abgeschlossen. Da die Rissbeobachtung vor dem 5. Zyklus lediglich mit bloßem Auge erfolgte, kann leider nicht beurteilt werden, ob die Risse analog zur Kombination 3 bereits nach dem 1. Zyklus in nahezu vollständigem Umfang vorhanden war.

### **Kombination 3**

Die Temperaturverläufe im zweiten Zyklus bei der Kombination 3 sind in den Bildern B134 und B135 dargestellt. Grundlegende Unterschiede im zeitlichen Verlauf zur Kombination 1 bestehen nicht, weshalb die Ergebnisse hier nicht weiter diskutiert werden.

Die Temperatur auf der Wandrückseite nimmt anders als bei der Kombination 1 auf etwa 22 °C zu, wobei die Raumlufttemperatur ebenfalls lediglich auf 22 °C zunahm. Der Unterschied zwischen den Messstellen zur Regelung (s. z. B. REG U2 und Z2) ist nahezu genauso groß wie bei der Kombination 1.

Die Rissbilder der Kombination 3 sind in den Bildern B136 , B137 und B138 dargestellt. Die Risse in Bild B136 waren bereits 24 Stunden nach dem Putzen (Entfernen der Folie) aufgetreten und veränderten sich bis zum Beginn der Bewitterung nicht. Bereits nach dem ersten Bewitterungszyklus war das Rissbild nahezu abgeschlossen, bis zum Ende der Bewitterung traten nur noch wenige zusätzliche Risse auf (vgl. Bilder B137 und B138). Die Breite der Risse, die bereits nach dem ersten Bewitterungszyklus vorhanden waren, nahm teilweise etwas zu.

### **Kombination 4 und 5**

Der zeitliche Verlauf der bei den Kombinationen 4 und 5 bestimmten Temperaturen ist beispielhaft für den zweiten Zyklus in den Bildern B139 und B140 enthalten. Grundlegende Unterschiede im qualitativen Verlauf zu den Kombinationen 1 und 3 ergaben sich nicht. Deutlich zu erkennen ist, dass die Temperaturunterschiede zwischen Putzoberfläche und Bereich Putzgrund/Putz beim Ultraleichtputz, vermutlich als Folge der geringeren Wärmeleitfähigkeit des Ultraleichtputzes, größer sind als beim Leichtputz. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass sich vermutlich als Folge von Messungenauigkeiten bei der Messstelle PG2 im Putzgrundbereich eine etwas höhere Temperatur als auf der Putzoberfläche (Messstelle Z2) ergab.

Die Rissbilder der Kombinationen 4 und 5 sind in den Bildern B141 bis B143 dargestellt. Bei der Kombination 5 (ULP) wurden bis zum 7. Zyklus keine sichtbaren Risse festgestellt. Nach Abschluss des Bewitterungsversuchs wurden bei der Kombination die in B143 dargestellten Risse aufgenommen. Bei der Kombination 4 (LP) waren die in Bild B141 dargestellten Risse bereits 24 Stunden nach dem Putzen aufgetreten. Die Breite dieser Risse änderte sich bis zum Bewitterungsbeginn praktisch nicht. Nach dem ersten Bewitterungs-

zyklus nahm zum einen die Länge der Risse etwas zu, zum anderen traten auch zusätzliche Risse auf, s. Bild B142, wobei die Rissbreite dieser Risse kleiner als 0,05 mm war. Bis zum Ende der Bewitterung traten noch weitere Risse mit Rissbreiten von maximal 0,05 mm auf.

### **6.1.3.2.3 Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera**

Die mit einer Wärmebildkamera während einer Haltephase bei den Kombinationen 1 und 3 ermittelten Temperaturverteilungen auf der Putzoberfläche sind im Bild 45 dargestellt. Wie bereits aus den Temperaturmessungen auf der Putzoberfläche gefolgert werden konnte (vgl. Abschnitt 6.1.3.2.2), ist die Temperaturverteilung über die Höhe der Putzfläche gleichmäßig. Bei der Kombination 1 ergaben sich jedoch in unmittelbarer Nähe zu den Rändern Temperaturen von etwa 50 °C, während die Temperatur in Wandmitte etwa 70 °C beträgt. Folglich nimmt die Oberflächentemperatur zu den Rändern hin ab. Wie in Abschnitt 6.1.3.2.2 bereits erwähnt wurde, ist eine mögliche Ursache dafür Konvektion. Um eine gleichmäßigere Temperaturverteilung bei den auf die Kombination 1 folgenden Untersuchungen zu erreichen, wurde der Versuchsaufbau daher bei den Kombinationen 2 und 3 sowie 4 und 5 während der Bewitterung „stärker“ eingehaust. Wie Bild 45 zu entnehmen ist, war die Temperatur im Bereich der Wandränder nach der „stärkeren“ Einhausung gleichmäßiger als bei der Kombination 1. Die Temperaturen im Bereich der Wandränder sind jedoch nach wie vor etwas geringer als in Wandmitte (vgl. auch Abschnitt 6.1.3.2.2).

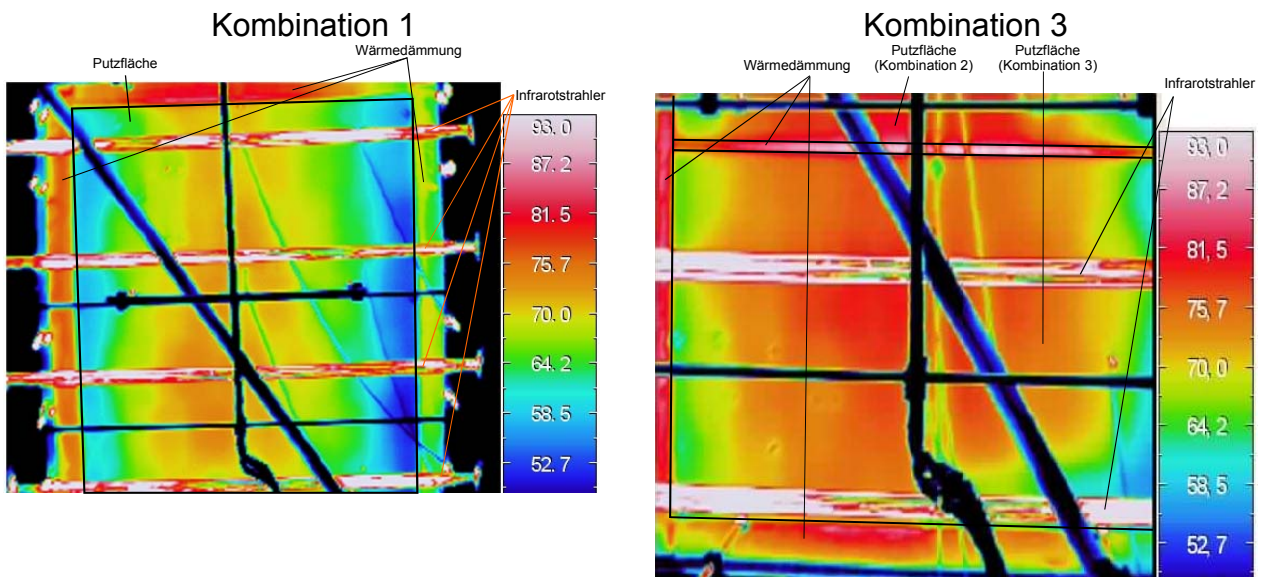


Bild 45:  $\frac{1}{3}$  Temperaturverteilung auf der Wandoberfläche bei den Kombinationen 1 und 3

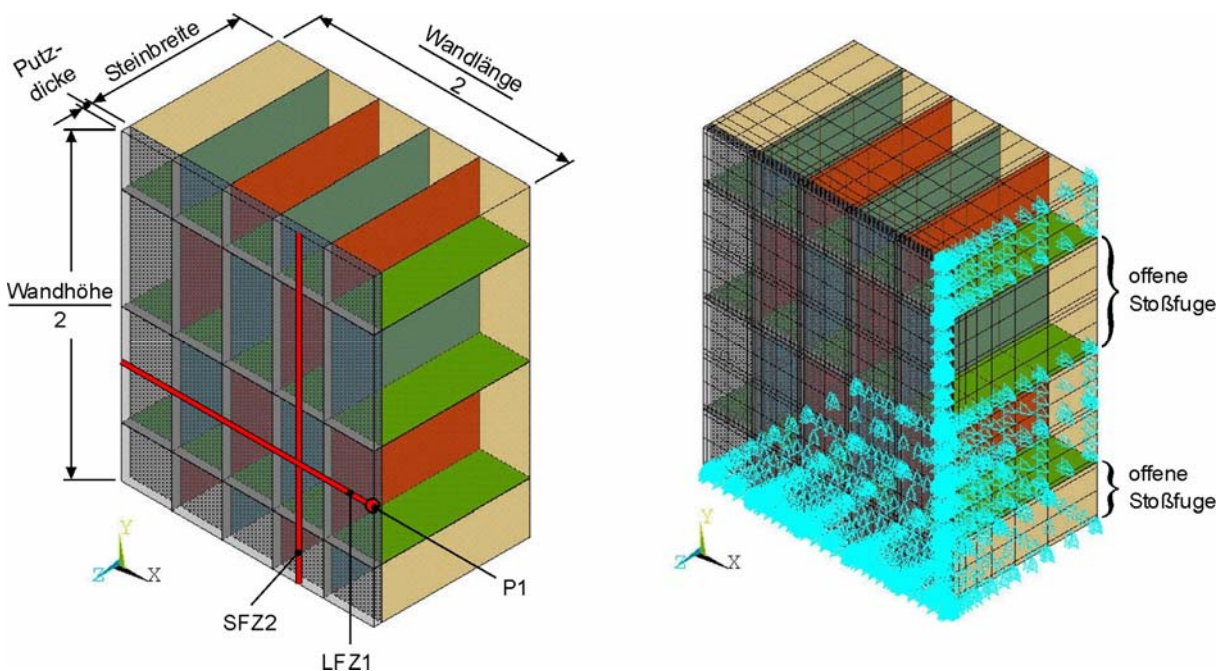
## 6.2 Simulationsrechnungen mit der Finite-Elemente-Methode

Das Ziel der Simulation war, die Beanspruchung in der Putzschicht infolge der Beanspruchung aus dem durch den Putzgrund behinderten Schwinden der Putzschicht und einer Temperaturwechselbeanspruchung der Putzoberfläche zu ermitteln. Für eine realitätsnahe Berechnung mussten die zeitliche Entwicklung der mechanischen Eigenschaften sowie die zeitabhängigen Verformungseigenschaften des Putzes berücksichtigt werden.

### 6.2.1 Modell und Randbedingungen

Im Wandmodell der in Bild B118 dargestellten Wandscheibe (Kombination 1) wurden die Komponenten Ziegel und Putz sowie die Lager- und Stoßfugen abgebildet. In Bild 46 links sind die Komponenten Ziegel und Putz transparent orange bzw. grau dargestellt, die Lagerfugen grün und die Stoßfugen rot. Bild 46 rechts zeigt die Unterteilung des Volumens in finite Elemente. Da die Knotenlinien längs der Lager- und Stoßfugen nicht unterbrochen werden konnten, entstanden zwangsläufig im Ziegel vertikale Pseudofugen (blau), im Putz horizontal und vertikal verlaufende Pseudofugen (grau).

Die zu den Komponenten Ziegel und Putz gehörigen Volumina wurden mit Kontinuums-elementen mit 20 Knoten und quadratischem Verschiebungsansatz diskretisiert. Das Fugensystem wurde mit Interface-Elementen abgebildet. Für die Verbundschicht zwischen Putz und Putzgrund wurden ebenfalls Interface-Elemente vorgesehen. Aufgrund der Symmetrie der Wandscheibe, s. Bild B118, brauchte nur das obere linke Viertel berücksichtigt zu werden. Auf den Symmetrieebenen wurden alle Knoten senkrecht zur Symmetrieebene festgehalten, mit Ausnahme der Knoten auf der vertikalen Symmetrieebene, die im Bereich einer unvermörtelten Stoßfuge liegen, siehe Bild 46 rechts.



**Bild 46:** Wandmodell: Komponenten Putz und Ziegel mit Fugensystem (links) sowie Unterteilung in finite Elemente mit mechanischen Randbedingungen (rechts)

Die Randbedingungen zur instationären Berechnung der Temperaturverteilung infolge der Temperaturwechselbeanspruchung waren wie folgt: sämtlichen Flächen des Randes des Berechnungsausschnittes mit Ausnahme der Putzoberfläche wurden adiabate Randbedingungen (thermische Isolation) zugewiesen. Den Knoten auf der Putzoberfläche wurde der gemessene, zeitlich variable Temperaturgang im Versuch, vgl. Bild B129, Messstellen REG O, M und U, aufgezwungen. Aus diesen Randbedingungen resultierte eine nur vom Abstand von der Putzoberfläche abhängige, eindimensionale Temperaturverteilung.

## 6.2.2 Materialverhalten

Der Ziegel wurde als lineares, orthotropes, elastisches Material beschrieben, mit den effektiven Eigenschaften des Putzgrundes nach Tabelle 13 in Abschnitt 5.2 (Ziegel T16). Daraus resultierte insbesondere eine unterschiedliche Verformungsbehinderung für den Putz in Hoch- und Längsrichtung (vgl. Abschnitt 3.2). Der Putz wurde als lineares, isotropes, alterndes, viskoelastisches Material abgebildet. Zur Eingabe des E-Moduls als Funktion des Alters wurde Gleichung (35) mit den Parametern nach Tabelle 15 in Abschnitt 5.3 für den Normalputz (NP) ausgewertet. Das viskoelastische Verhalten des Putzes wurde durch eine alternde Kelvinkette beschrieben, deren Parameter auf der Basis des an die Versuchsergebnisse angepassten Kriechmodells des Model Codes 90 /MC90/ automatisch im verwendeten FE-Programm DIANA generiert wurden, siehe Abschnitt 4.4.3.5.2. Die verwendeten Materialparameter sind in der Tabelle 18 aufgeführt (s. Abschnitt 5.3). Zusätzlich wurde für den Putz ein verschmiertes, rotierendes Rissmodell aktiviert. Das Entfestigungsverhalten wurde durch den Ansatz von Hordijk /HOR91/ beschrieben (vgl. auch Abschnitt 4.4.3.3.3). Die Parameter Zugfestigkeit und Bruchenergie waren ebenfalls alternde Materialeigenschaften und wurden wie in Abschnitt 5.3 aufgeführt gewählt.

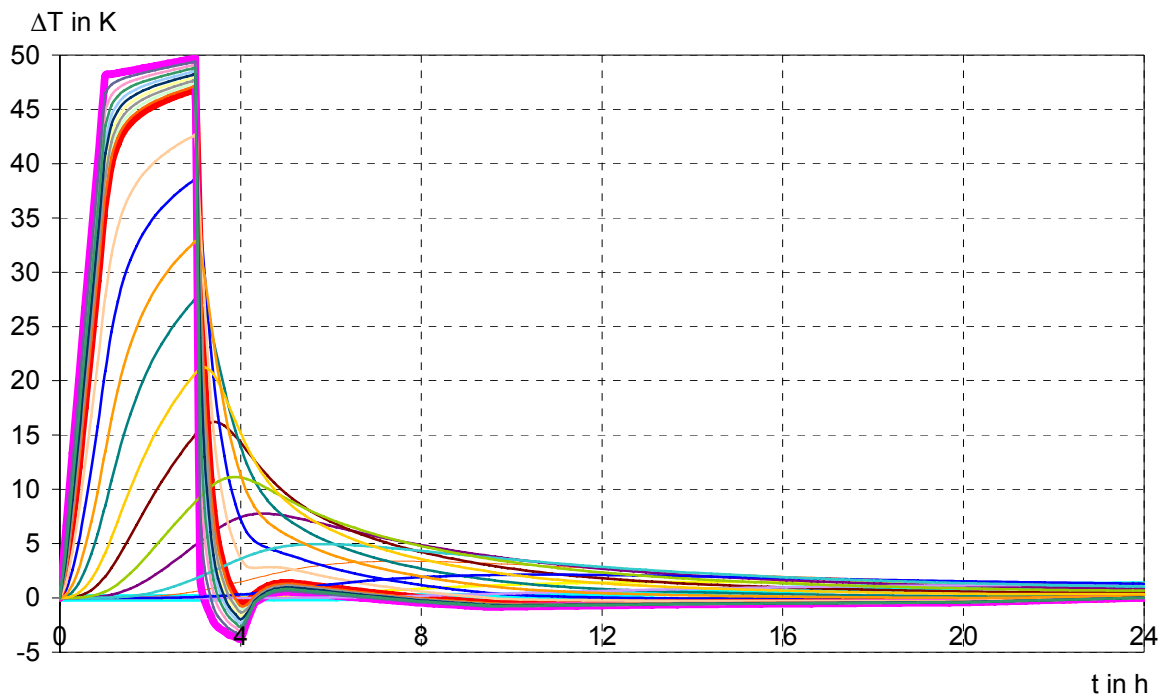
Sämtliche Interface-Elemente der Fugen mit Ausnahme der Putzverbundschicht verhielten sich linear elastisch. Die Interface-Elemente der Lagerfugen erhielten eine Normal- und Tangentialsteifigkeit von  $5000 \text{ N/mm}^3$  bzw.  $2083 \text{ N/mm}^3$ . Die Interface-Elemente der unvermörtelten Stoßfugen hatten eine vernachlässigbare Steifigkeit von  $0,1 \text{ N/mm}^3$ . Die Steifigkeit der Interface-Elemente der Pseudofugen im Putz musste sehr groß gewählt werden. Da Interface-Elemente keine Volumenänderung infolge Temperaturveränderung oder Schwinden ausführen können, würde sich der Zwang in der Putzschicht bei einer in Abhängigkeit der Putzeigenschaften gewählten Steifigkeit der Interface-Elemente in den Pseudofugen entspannen können. Sämtliche Pseudofugen erhielten daher die Steifigkeit  $10^6 \text{ N/mm}^3$ . Diese Steifigkeit wurde auch für die Verbundschicht zwischen Putz und Ziegel verwendet, da hier von einer vernachlässigbaren Dicke ausgegangen werden konnte. Zur Abbildung des Haftzugversagens wurde für die Interface-Elemente der Verbundschicht ein Rissmodell mit Entfestigung entsprechend dem Ansatz von Hordijk /HOR91/ aktiviert (vgl. auch Abschnitt 4.4.3.4.3). Die Parameter Zugfestigkeit und Bruchenergie wurden auf die Endwerte in Tabelle 17, Abschnitt 5.3, gesetzt, da in DIANA keine Berücksichtigung einer Altersabhängigkeit dieser Parameter vorgesehen ist.

Für die instationäre Berechnung der Temperaturverteilung infolge der Temperaturwechselbeanspruchung wurden Ziegel und Putz als isotroper Stoff mit einer Wärmekapazität, Dichte und Wärmeleitfähigkeit nach Tabelle 14 in Abschnitt 5.2 bzw. Tabelle 19 in Abschnitt 5.3 angenommen. Die Wärmeleitfähigkeit sämtlicher Interface-Elemente wurde auf den vergleichsweise hohen Wert von  $1000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  gesetzt, so dass sie als sehr gute Wärmeleiter wirkten und keine Barrieren für den Wärmestrom bildeten.

Der Wärmedehnkoeffizient betrug  $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  für den Putz (vgl. Abschnitt 5.3) und  $6,31 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  für den Ziegel T16, siehe Tabelle 14 in Abschnitt 5.2.

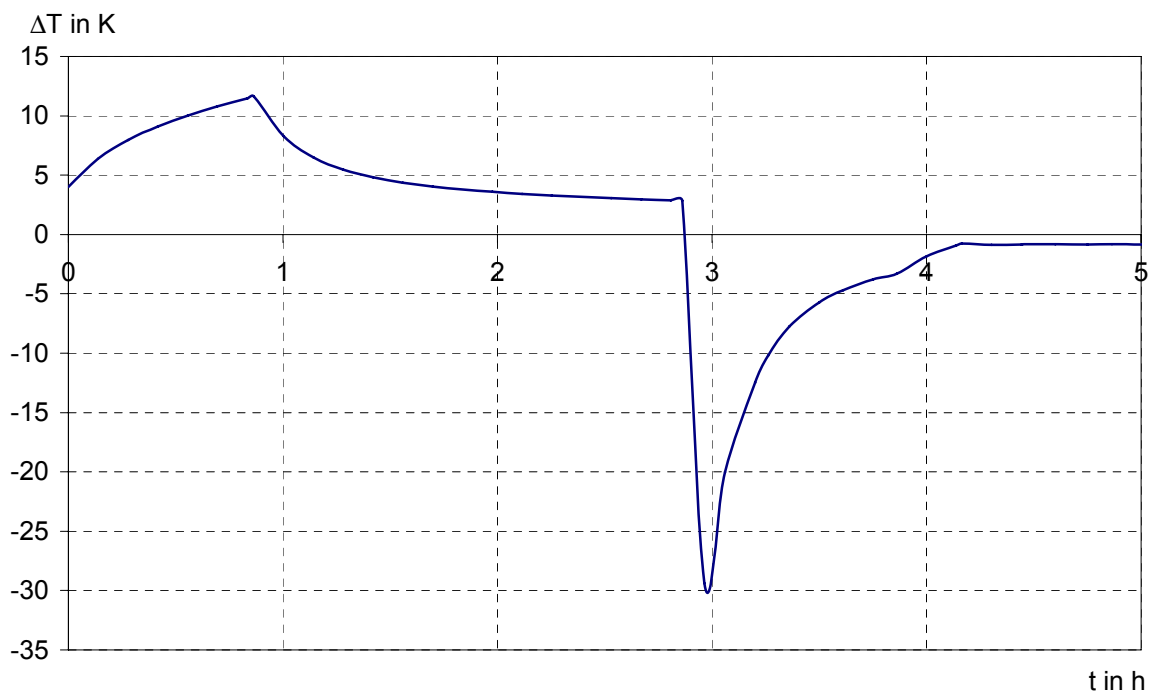
### **6.2.3 Ergebnis der Temperaturfeldberechnung**

Das aus der Temperaturwechselbeanspruchung resultierende Temperaturfeld ist in Bild 47 dargestellt. Jede Kurve gehört zu einer Knotenebene (z-Koordinate – Richtung Wanddicke), siehe Bild 46 rechts. Dargestellt ist die Temperaturänderung gegenüber der homogen verteilten Ausgangstemperatur von  $20 \text{ °C}$  als Funktion der Dauer der Beanspruchung. Auf der Putzoberfläche (dicke magentafarbene Linie) folgt der Temperaturgang exakt der gemessenen Temperaturganglinie, so wie es durch die Randbedingung verlangt wurde. Die dicke rote Linie markiert die Grenze zwischen Putz und Ziegel. Die Unterkante des Ziegels (dicke türkisfarbene Linie), d. h. die Wandrückseite, ist von der Temperaturwechselbeanspruchung nahezu unberührt.



**Bild 47:** Temperaturverteilung im Wandmodell für die Temperaturwechselbeanspruchung

Die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterkante der Putzschicht beträgt in der Aufheizphase mehr als 10 K und in der Abkühlphase etwa -30 K, s. Bild 48.



**Bild 48:** Temperaturdifferenz zwischen der Ober- und Unterkante der Putzschicht

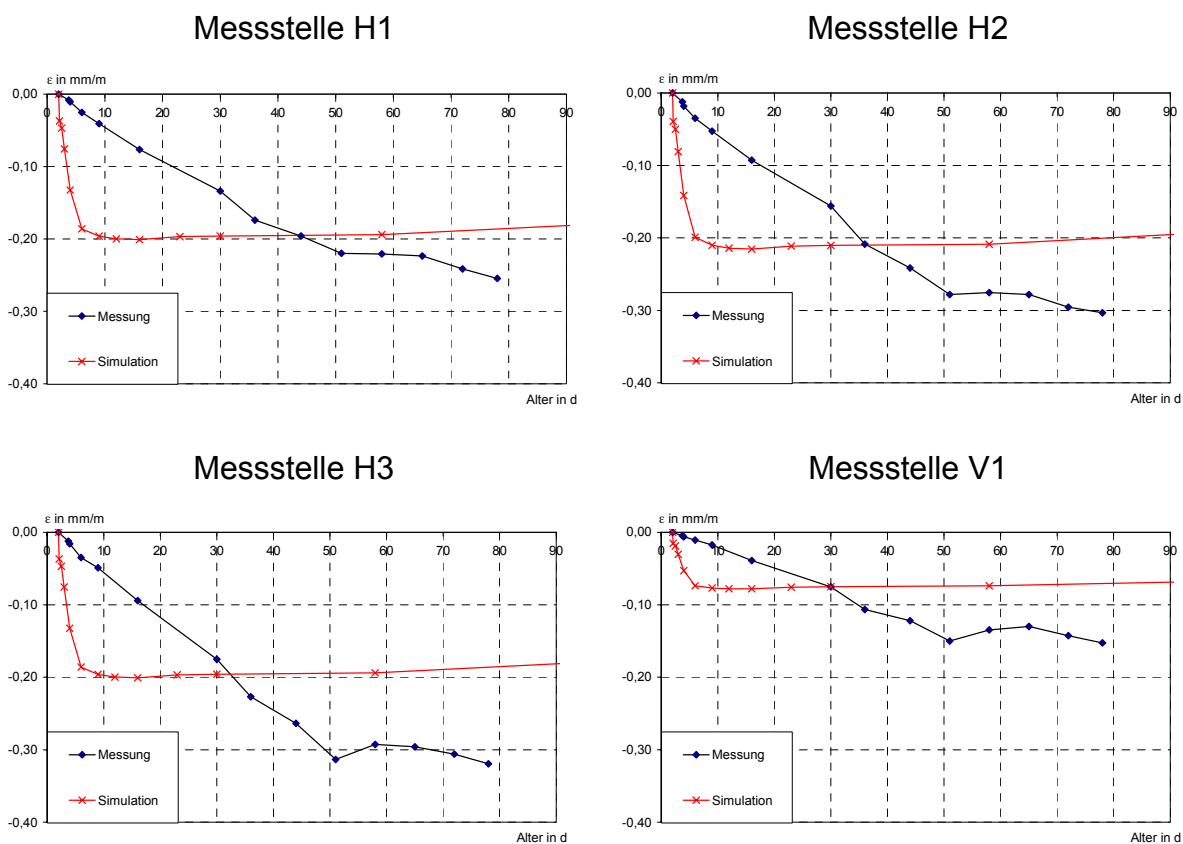
#### **6.2.4 Belastung für die mechanische Analyse**

Mit der Temperaturwechselbeanspruchung wurde analog zum Versuch (s. Abschnitt 6.1) 81 Tage nach dem Putzauftrag (Alter 81 d) begonnen. Zu diesem Zeitpunkt waren in der Putzschicht bereits Spannungen aus der vorangegangenen Schwindperiode wirksam. Um diese Situation in der Simulation zu erfassen, mussten der Lastfall Schwinden und der Lastfall Temperaturwechselbeanspruchung in einer einzigen Belastungsgeschichte zusammengefasst werden. Hierzu wurde zunächst die Temperaturänderung nach Bild 47 mittels der Wärmedehnkoeffizienten von Putz und Ziegel nach Abschnitt 6.2.2 in eine Temperaturdehnung umgerechnet. Anschließend wurde der Ursprung der Zeitskala für die Temperaturdehnung um 81 Tage verschoben. (Für Putzalter kleiner als 81 d wurde die Temperaturdehnung Null gesetzt.) Die Schwinddehnung nach Bild 42 in Abschnitt 5.3 und die Temperaturdehnung wurden nun superponiert und jedem Knoten des Berechnungsausschnittes als Funktion des Putzalters als Belastung vorgegeben. Für Knoten, die auf das Ziegelvolumen entfallen, ist demnach die Belastung bis zum Alter von 81 d gleich Null, anschließend wirkt über 24 h Stunden die Bild 47 entsprechende Temperaturdehnung. Für Knoten im Putz wirkt zunächst die Schwinddehnung und ab dem 81. Tag zusätzlich die Temperaturdehnung. (Die Schwinddehnung wurde während der Dauer der Temperaturwechselbeanspruchung konstant gehalten. Die Wärmedehnkoeffizienten wurden für den Putz und den Ziegel einheitlich zu  $10^{-3}$  1/K gesetzt, so dass die Dehnungen in mm/m eingegeben werden mussten.)

#### **6.2.5 Ergebnisse der mechanischen Analyse**

In Bild 49 sind die in den Versuchen auf der Putzoberfläche an den Messstellen H1 bis H3 und V1 (vgl. Bild B118) ermittelten Dehnungen den Ergebnissen der Simulation gegenübergestellt. Analog zu den Messergebnissen blieb die Schwinddehnung aus der Simulation bis zum Alter von 2 Tagen (Messbeginn im Versuch, vgl. Abschnitt 6.1) unberücksichtigt. Die Dehnungen gegen Ende der Schwindperiode werden in der Simulation geringfügig unterschätzt. Dies kann an den Schwindeingabewerten für die Simulation liegen, da sich die an vom Putzgrund entnommenen Prismen gemessene Schwinddehnung grundsätzlich vom Schwinden des Putz mit dauerndem Kontakt zum Putzgrund unterscheiden kann. Der zeitliche Verlauf ist insbesondere in der Anfangsphase deutlich unterschiedlich. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass in der Simulation die Schwinddehnung homogen über die gesamte Putzdicke wirksam ist, während im Versuch der Putz über seine Ober-

fläche langsam austrocknet und der entstehende Feuchtegradient erst gegen Ende der Schwindperiode verschwindet. Insgesamt gesehen legt der Vergleich der Dehnungen nahe, das Austrocknungsverhalten und die resultierende Feuchtigkeitsverteilung in der Simulation zukünftig zu berücksichtigen und das Schwinden in Abhängigkeit des lokal vorherrschenden Feuchtezustandes anzusetzen. Die Dehnung in vertikaler Richtung ist übereinstimmend in der Simulation und in der Messung geringer als in horizontaler Richtung, da der Putzgrund auf Grund seiner Anisotropie das Schwinden in dieser Richtung stärker behindert als in der horizontalen Richtung.

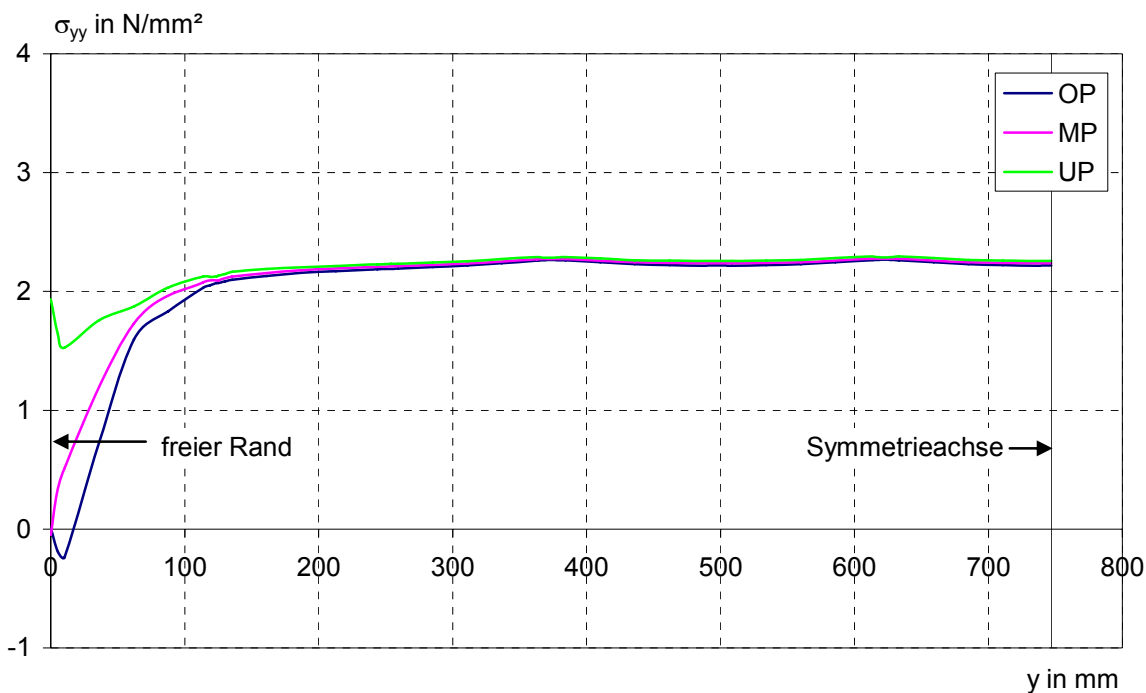


**Bild 49:** Vergleich der Dehnungen  $\epsilon$  auf der Putzoberfläche

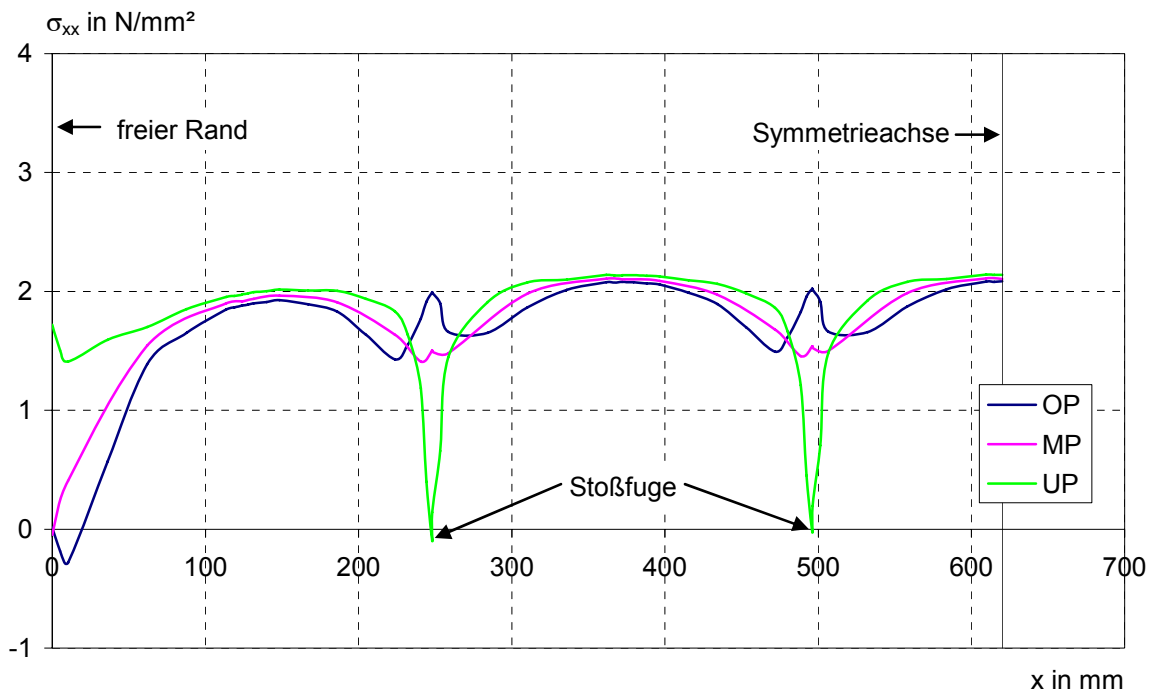
In Bild 50 ist der Verlauf der Zugspannung  $\sigma_{yy}$  längs des vertikalen Pfades SFZ2, siehe Bild 46, im Alter von rd. 9 Tagen (maximale Schwindzugspannung in der Simulation, s. Bild 52) dargestellt. Die Spannungen bauen sich vom freien Rand schnell bis zum Maximalwert auf. Im Einleitungsbereich, bis etwa 200 mm Abstand vom Rand, sind die Zugspannungen an der Unterkante, d. h. in der Kontaktfläche zum Putzgrund, größer als an der Putzoberfläche. Danach ist die Zugspannung in der Putzschicht homogen verteilt.

Bezüglich des Einleitungsbereichs gilt für den Verlauf der Zugspannung  $\sigma_{xx}$  längs des horizontalen Pfades LFZ1, siehe Bild 46, das Gleiche wie für die Spannung  $\sigma_{yy}$ , Bild 51. Auffallend ist die Auswirkung der unvermörtelten Stoßfugen. Die Stoßfugen befinden sich dort, wo die Spannung an der Unterkante des Putzes ein ausgeprägtes lokales Minimum annimmt. Der Einflussbereich ist jedoch bereits in größerem Abstand spürbar, wobei die Spannungen in der Putzschicht mit zunehmender Annäherung an die Stoßfuge zunächst abnehmen. Unmittelbar über der Stoßfuge nimmt die Spannung an der Putzoberfläche wieder zu und erreicht ein lokales Maximum, während die Spannung an der Putzunterkante zunehmend stärker abfällt und das bereits erwähnte lokale Minimum annimmt. Dieses Spannungsprofil über die Putzdicke unmittelbar über der unvermörtelten Stoßfuge ist vermutlich auf ein Verdrehen der Ziegel zurückzuführen.

Auf Grund der Anisotropie des Putzgrundes ist die vertikal gerichtete Spannung  $\sigma_{yy}$  größer als die horizontale Spannung  $\sigma_{xx}$ .



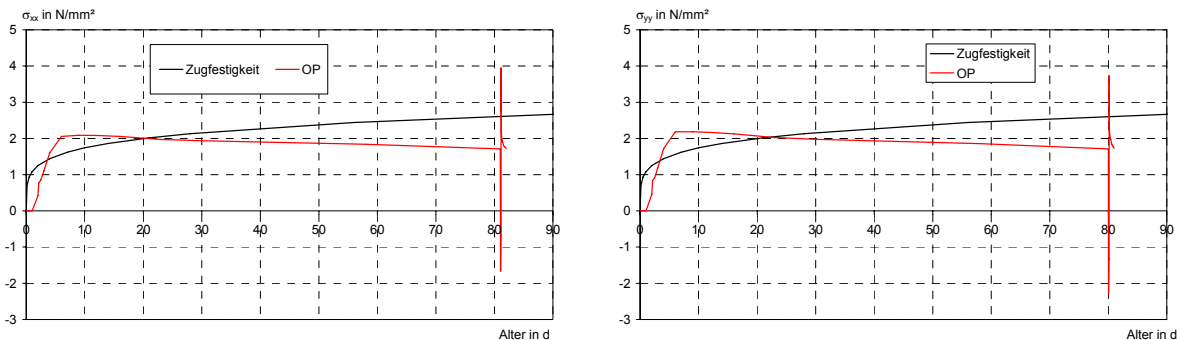
**Bild 50:** Verlauf der Zugspannung  $\sigma_{yy}$  längs des vertikalen Pfades SFZ2, siehe Bild 46, im Alter von rd. 9 Tagen  
Oberkante Putz (OP), Mittelebene im Putz (MP) und Unterkante Putz (UP)



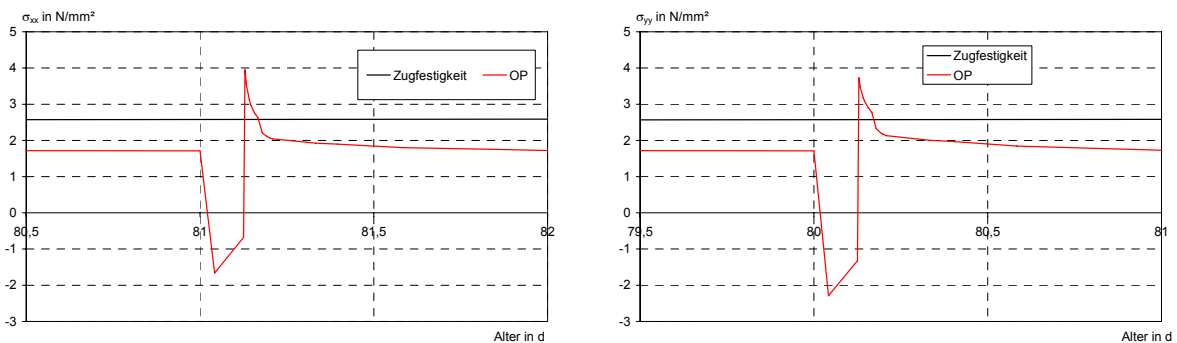
**Bild 51:** Verlauf der Zugspannung  $\sigma_{xx}$  längs des horizontalen Pfades LFZ1, siehe Bild 46, im Alter von rd. 9 Tagen  
Oberkante Putz (OP), Mittelebene im Putz (MP) und Unterkante Putz (UP)

Am Punkt P1, einem Punkt mit großem Abstand von beiden Rändern und mittig über einem Ziegel, haben sich die Zugspannungen in horizontaler ( $\sigma_{xx}$ ) und vertikaler Richtung ( $\sigma_{yy}$ ) in vollem Umfang aufgebaut, siehe oben. Beide Spannungskomponenten durchlaufen wegen der Relaxation infolge des viskoelastischen Materialgesetzes ein Maximum nach etwa 9 Tagen, s. Bild 52. Beide Zugspannungen überschreiten im Zeitraum von etwa 4 bis 20 d die aufgrund der Alterung kontinuierlich zunehmende Zugfestigkeit. Die Zugspannung in vertikaler Richtung ( $\sigma_{yy}$ ) übersteigt die horizontal gerichtete Komponente ( $\sigma_{xx}$ ) auf Grund des in vertikaler Richtung steiferen Putzgrundes.

Für Alter größer 20 d wird die Zugfestigkeit erst wieder in der Abkühlphase der Temperaturwechselbeanspruchung überschritten, s. Bild 53.



**Bild 52:** Zeitlicher Verlauf der Zugspannungen  $\sigma_{xx}$  (links) und  $\sigma_{yy}$  (rechts) im Punkt P1, siehe Bild 46, an der Putzoberfläche (OP)



**Bild 53:** Zeitlicher Verlauf der Zugspannungen  $\sigma_{xx}$  (links) und  $\sigma_{yy}$  (rechts) im Punkt P1, siehe Bild 46, an der Putzoberfläche (OP)  
Detail Temperaturwechselbeanspruchung

Die bisher dargestellten Ergebnisse der Simulation waren ohne Aktivierung des Rissmodells für den Putz erhalten worden. Die Simulation mit Rissmodell ergab zunächst ein Kohäsionsversagen im Putz infolge der senkrecht zur Verbundfläche orientierten Schälspannung  $\sigma_{zz}$  nach rd. 3 Tagen beginnend in der linken oberen Ecke des Berechnungsausschnitts. Kurz darauf folgte ein lokales Zugversagen an der Putzoberfläche infolge der vertikal gerichteten Zugspannung  $\sigma_{yy}$ , wobei die Risse über den unvermörtelten Stoßfugen initiiert wurden. Die Rissweite im letzten konvergierten Schritt der Berechnung betrug lediglich etwa 0,001 mm. Dies korrespondiert mit der Beobachtung, dass im Versuch keine Risse während der Schwindperiode zu erkennen waren.

Da die Simulation wegen nicht mehr vorhandener Konvergenz bereits während der Schwindperiode abbrach, konnte der Prozess der Rissbildung infolge der Temperaturwechselbeanspruchung nicht weiter verfolgt werden. Eine Analyse der räumlichen Verteilung der Zugspannungen  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  an der Putzoberfläche zum Zeitpunkt des Maximums

in Bild 53 hat ergeben, dass die zu diesem Alter vorhandene Zugfestigkeit des Putzes auf der gesamten Putzoberfläche mit Ausnahme eines schmalen Streifens parallel zu den Rändern des Berechnungsausschnittes überschritten ist. Demzufolge ist überall dort mit Rissbildung zu rechnen. Dies korrespondiert mit den krakeleeartigen Rissen im Versuch, die ebenfalls die gesamte Putzfläche erfassen.

## **7 ZUSAMMENFASSUNG**

Ziel des Forschungsprojektes war es, die Rissicherheit von Außenputzen auf geputzten Wänden zu untersuchen. Insbesondere wurden Einflüsse aus Schwinden der Putze und Temperaturverformungen untersucht. Für die Untersuchungen wurden, um einen möglichst weiten Bereich an Materialeigenschaften der in der Praxis verwendeten Mauersteine und Putze zu erfassen, drei verschiedene handelsübliche Planhochlochziegel (T16, SX+ und T9) und drei verschiedene marktübliche Putze (Normalputz, Leichtputz und Ultraleichtputz) mit jeweils unterschiedlichen Steifigkeiten ausgewählt.

Zunächst wurden die Planziegel und die Putze untersucht, um realitätsnahe Materialparameter für Finite-Elemente-Simulationen an geputzten Wänden zu bestimmen. Dies erfolgte teilweise invers mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode.

Um die Hochlochziegel bei der Simulation von geputzten Wänden abbilden zu können, wurden Materialparameter eines homogenen Ersatzkontinuums mittels Homogenisierung ermittelt. Dabei erfolgte ein Abgleich der verwendeten Finite-Elemente-Modelle mit Zugversuchen an ganzen Steinen und Versuchen, bei denen zur Simulation der Beanspruchung des Mauersteins durch das Schwinden des Putzes eine Randpressung in den Außenscherben eingeleitet wurde. Die Simulationen ergaben die größte Steifigkeit in Richtung Steinhöhe und Steinlänge beim T16 und die kleinste beim T9. Damit ist die Verformungsbehinderung einer Putzschicht auf dem T16 am größten und auf dem T9 am kleinsten. Der E-Modul der Scherben als Eingangsparameter für die o. g. Simulationen wurde in Zugversuchen bestimmt. In diesen Zugversuchen ergaben sich sowohl bei der Zugfestigkeit als auch beim E-Modul deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Beanspruchungsrichtungen Steinhöhe und Steinlänge, die vermutlich einerseits auf den Einfluss der Putzrillen und andererseits vermutlich auf den Einfluss des Strangpressvorgangs bei der Ziegelherstellung zurückzuführen sind.

Ferner wurden auch Untersuchungen zu den Feuchte- und Temperaturdehnungen des Außenscherbens durchgeführt, um weitere Eingangsparameter für Simulationen zu ermitteln. Bei den Untersuchungen zur Feuchtedehnung ergab sich bei Versuchsende die größte Feuchtedehnung beim T9 (+0,22 mm/m, Prüfdauer etwa 350 Tage) und die kleinste beim T16 (+0,02 mm/m, Prüfdauer etwa 400 Tage). Die Wärmedehnungskoeffizienten betrugen bei den Ziegeln zwischen  $5,48 \cdot 10^{-6}$  1/K im Mittel beim T9 und  $6,92 \cdot 10^{-6}$  1/K im Mittel beim SX+.

Da die Materialparameter der Putze durch das Absaugen des Anmachwassers nach dem Kontakt mit dem Mauerstein deutlich beeinflusst werden, war es zur Ermittlung realitätsnaher Materialparameter notwendig, diese nach Kontakt mit dem Putzgrund zu prüfen. Durch die bisherige Vorgehensweise, bei der die Putze durch Trockensägen vom Putzgrund entnommen werden, wird das Gefüge der Putze jedoch gestört. Folge sind Einflüsse auf die Prüfergebnisse und große Streuungen. Im Rahmen dieses Projektes wurde daher ein Herstellverfahren entwickelt, bei dem der Putz nach Kontakt mit dem Putzgrund ohne nennenswerte mechanische Beanspruchung entnommen werden kann. Verwendet wurde hierzu Kaolin, das in wässriger Suspension auf die Putzfläche der Planziegel aufgesprüht wurde und das Absaugen des Anmachwassers praktisch nicht beeinflusst. Ferner wurde nachgewiesen, dass auch die Druckfestigkeit und die Rohdichte im lufttrockenen Zustand praktisch nicht beeinflusst werden. Da sich das Absaugen des Anmachwassers zwischen den ausgewählten Ziegeln praktisch nicht unterschieden hatte und auch nahezu die gleichen Werte für Druckfestigkeit und Rohdichte der Putze von den Ziegeln bestimmt wurden, wurde aus praktischen Gesichtspunkten – möglichst glatte Putzfläche – der SX+ als Putzgrund zur Bestimmung der Materialparameter ausgewählt. Mit Hilfe von Stahlschalungen wurden auch Sägearbeiten zur Anpassung der Probengröße vermieden.

Bestimmt wurden an mit dem o. g. Verfahren und einer Putzmaschine hergestellten Putzprobekörper alle für die Simulationen wesentlichen Materialparameter wie z. B. die E-Moduln, die bruchmechanischen Materialparameter und das Schwinden und Kriechen der Putze. Ferner wurden auch die Haftzugfestigkeit und die Bruchenergie bei Haftzugversagen sowie die Trockenrohichte und der Feuchtegehalt der Putze bestimmt. Dabei wurde insbesondere der Einfluss des Putzalters erfasst und punktuell bei einem Prüfalter auch der Einfluss des Wasserabsaugens durch den Putzgrund bestimmt. Es ergab sich, dass die Eigenschaften der Putze erwartungsgemäß entscheidend durch den Putzgrundkontakt beeinflusst werden. Bei Probekörpern aus Normalputz vom Putzgrund ergaben sich bei Druckfestigkeit, Zugfestigkeit und dynamischem E-Modul 50 bis 70 % größere

Werte als ohne Putzgrundkontakt. Bei der Druckfestigkeit und der Zugfestigkeit des Ultraleichtputzes beträgt der Unterschied sogar über 200 %, wobei jedoch bei der Zugfestigkeit aufgrund der geringen Festigkeit lediglich ein Prisma ohne Kontakt zum Putzgrund geprüft werden konnte. Anlog dazu ergaben sich auch deutliche Unterschiede bei den bruchmechanischen Materialparametern (Bruchenergie, Netto-Biegezugfestigkeit und charakteristische Länge).

Die Untersuchungen zum Schwinden der Putze ergaben, dass die Schwinddehnungen mit steigendem Entnahmealter als Folge geringerer Ausgleichsfeuchte und zunehmender Karbonatisierung (wenige Ausnahmen im frühen Alter) abnehmen. Die Schwinddehnungen der im Alter von 2 Tagen entnommenen Probekörper betragen bei Versuchsende (etwa 180 Tage nach Entnahme) -0,77 mm/m beim Normalputz, -0,94 mm/m beim Leichtputz und -0,62 mm/m beim Ultraleichtputz. Bei den Schwinduntersuchungen wurde auch festgestellt, dass sich die zur Bestimmung der Schwinddehnung entnommenen Prismen verkrümmen. Diese Verkrümmung resultiert daraus, dass die Putze über die Putzoberfläche austrocknen und karbonatisieren. Entsprechend weisen die Putzprismen im Putzgrundbereich eine höhere Feuchte und ein höheres Karbonatisierungspotential auf. Grundsätzlich wurde festgestellt, dass das Verkrümmen mit zunehmendem Entnahmealter abnimmt.

Die Finite-Elemente-Modelle sollten mit Untersuchungen an geputzten Wand-Prüfkörpern möglichst weitgehend validiert bzw. kalibriert werden. Nach dem Putzen wurden zunächst die Schwindverformungen auf der Putzoberfläche der Wandprüfkörper bestimmt. Nachdem diese Schwindverformungen weitgehend abgeschlossen waren, wurden die Wände zyklisch bewittert, indem die Putzoberfläche zunächst in Anlehnung an die EOTA-Richtlinie 004 /ETA00/ auf eine Temperatur von 70 °C aufgeheizt wurde. Diese Temperatur wurde anschließend für zwei weitere Stunden konstant gehalten, bis die Oberfläche mit Leitungswasser (Temperatur 10 bis 15 °C) eine Stunde lang beregnet wurde. Anschließend ruhte die Wand für 20 Stunden. Vor und nach der Bewitterung wurden die Putzflächen auf Risse untersucht. Ausgewählt wurden für die Untersuchungen aus der derzeitigen Modellvorstellung hinsichtlich der Entstehung breiter Risse besonders kritische Kombinationen von Putz und Putzgrund.

Die Untersuchungen an den geputzten Wänden ergaben, dass sich die Rissbilder bereits nach wenigen Zyklen kaum noch ändern und daher abgeschlossen sind (Ausnahme Ultraleichtputz auf dem T9). Es konnte gezeigt werden, dass die Breite entstehender Risse

durch eine Abstimmung der Steifigkeiten von Putz und Putzgrund beeinflusst werden kann.

Der gewählte Ansatz im Rahmen dieses Forschungsvorhabens hat sich als geeignet erwiesen. Eine quantitative Aussage zum Verhalten unterschiedlicher Putze auf unterschiedlich steifen Untergründen ist grundsätzlich möglich.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

## LITERATUR

- /BAZ98/ Bazant, Z.P. ; Planas, J.: Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasi-brittle Materials. Boca Raton : CRC Press, 1998
- /BAZ05/ DIBt ; Wienerberger Ziegelindustrie ; Z-17.1-490: Zulassungsgegenstand : Mauerwerk aus Poroton-T-Planhochlochziegeln mit Stoßfugenverzahnung im Dünnbettverfahren. Antragsteller : Wienerberger Ziegelindustrie GmbH & Co, Oldenburger Allee 26, 30659 Hannover. Berlin : Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt, 2005. - Zulassungsnummer : Z-17.1-490 (12.05) ; Geltungsdauer : 22. Dezember 2010
- /BAZ06a/ DIBt ; Ziegelwerk Bellenberg Wiest ; Z-17.1-738: Zulassungsgegenstand : Mauerwerk aus Plan-Leichthochlochziegeln "SX Plus" mit gedeckelter Lagerfuge (VD System). Antragsteller : Ziegelwerk Bellenberg Wiest GmbH & Co. KG, Tiefenbacher Straße 1, 89287 Bellenberg. Berlin : Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt, 2006. - Zulassungsnummer : Z-17.1-738 (03.06) ; Geltungsdauer : 30. März 2011
- /BAZ06b/ DIBt ; Schlagmann-Baustoffwerke ; Z-17.1-674: Zulassungsgegenstand : Mauerwerk aus Plan-Hochlochziegel mit integrierter Wärmedämmung (bezeichnet als POROTON-T9-Planziegel) im Dünnbettverfahren. Antragsteller : Schlagmann-Baustoffwerke GmbH & Co. KG, Ziegeleistr. 1, 84367 Zeilarn. Berlin : Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt, 2006. - Zulassungsnummer : Z-17.1-674 (04.06) ; Geltungsdauer : 19. September 2010
- /BRA88/ Brameshuber, W. ; Institut für Massivbau und Baustofftechnologie: Bruchmechanische Eigenschaften von jungem Beton. Karlsruhe : Institut für Massivbau und Baustofftechnologie. - In: Massivbau und Baustofftechnologie Karlsruhe (1988), Nr. 5 = Dissertation
- /DIN82a/ DIN 18 555-1:1982-09. Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 1: Allgemeines, Probennahme, Prüfmörtel
- /DIN82b/ DIN 18 555-2:1982-09. Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 2: Frischmörtel mit dichten Zuschlägen; Bestimmung der Konsistenz, der Rohdichte und des Luftgehalts
- /DIN82c/ DIN 18 555-3:1982-09. Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 3: Festmörtel; Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte
- /DIN85/ DIN 52450:1985-08. Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe. Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörper
- /DIN87/ DIN 52615:1987-11. Wärmeschutztechnische Prüfungen - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen

- /DIN98a/ DIN EN 1015-10:1998-10. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 10: Bestimmung der Trockenrohdichte von Festmörtel
- /DIN98b/ DIN EN 1015-11:1998-10. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel
- /DIN98c/ DIN EN 1015-2:1998-12. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 2: Probenahme von Mörteln und Herstellung von Prüfmörteln
- /DIN98d/ DIN EN 1015-6:1998-12. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel
- /DIN98e/ DIN EN 1015-7:1998-12. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 7: Bestimmung des Luftgehaltes von Frischmörtel
- /DIN99/ DIN 18 555-9:1999-09. Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln - Teil 9: Festmörtel; Bestimmung der Fugendruckfestigkeit
- /DIN01/ DIN EN ISO 12572:2001-09. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
- /DIN02/ DIN EN 1745:2002-08. Mauerwerk und Mauerwerksprodukte: Verfahren zur Ermittlung von Wärmeschutzrechenwerten
- /DIN03a/ DIN EN 1015-18:2003-03. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 18: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von erhärtetem Mörtel (Festmörtel)
- /DIN03b/ DIN EN ISO 15148:2003-03. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen
- /DIN03c/ DIN EN 998-1:2003-09. Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau - Teil 1: Putzmörtel
- /DIN04/ DIN EN 1015-3:2004-06. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch)
- /DIN05a/ DIN EN 1015-19:2005-01. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 19: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Festmörteln aus Putzmörteln
- /DIN05b/ DIN V 18550:2005-04. Putz und Putzsysteme - Ausführung
- /DIN05c/ DIN EN 196:2005-05: Prüfverfahren für Zement
- /ETA00/ ETAG 004 ; EOTA ; European Organisation for Technical Approvals ; Europäische Organisation für Technische Zulassungen: Bekanntmachung der Leitlinie für Europäische Technische Zulassungen für außenseitige Wärmedämm-Verbandssysteme mit Putzschicht (ETAG 004); Ausgabe 2000-03. Brussels : EOTA.

- /GUO00/ Guo, X.H.; Gilbert, R.I.: The Effect of Specimen Size on the Fracture Energy and Softening Function of Concrete. In: Materials and Structures (RILEM) 33 (2000), Nr.229, S. 309 – 316, 2000
- /HAN06/ Hannawald, J.: Determining the Tensile Softening Diagram of Concrete-Like Materials Using Hybrid Optimisation. Dordrecht, The Netherlands 2006. - In: Measuring, Monitoring and Modelling Concrete Properties. Proceedings of the International Symposium Measuring, Monitoring and Modelling Concrete Properties, Alexandroupolis, Greece, 3-7 July 2006, (Konsta-Gdoutos, Maria S. (Ed.)
- /HOR91/ Hordijk, D.A.: Local Approach to Fatigue of Concrete. Delft, Technische Universität, Diss., 1991
- /KOR00/ Kordina, K. ; Schubert, L. ; Troitzsch, U.: Kriechen von Beton unter Zugbeanspruchung. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2000), Nr. 498
- /KRU96/ Krus, M.: Flüssigkeitstransport über die Schichtgrenze zwischen kapillaraktiven Materialien Teil 1: Idealer hygrischer Kontakt. AEDIFICATIO, 1996. - In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung. Berichtsband zum vierten Internationalen Kolloquium. Band I. (Wittmann, F.H. ; Gerdes, A.(Ed.)), S. 57-81
- /MAR00/ Martinola, G.: Rissbildung und Ablösung zementgebundener Beschichtungen auf Beton. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Diss., 2000
- /MC90/ Schießl, P.: CEB-FIP Model Code 1990. Lausanne : Comite Euro-International du Beton - CEB - In: Bulletin d'Information (1993), Nr. 213/214
- /PET81/ Petersson, P.-E.: Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials. Lund, Sweden : Division of Building Materials, University of Lund, 1981. - Report Nr. TVBM-1006, Dissertation
- /RIE00/ Riechers, H.-J.: Ein neues Modell zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung von Mauermörtel in der Fuge : A New Model to Characterize the Strength Development of Masonry Mortar Hardening in Contact with Bricks. In: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (2000), Nr. 10, Diss.
- /SCH90/ Schubert, P.; Schmidt, S.: Erarbeitung von quantitativen Kriterien zur Reißsicherheit von Außenputzen auf Mauerwerk. Aachen: Institut für Bauforschung, 1990. - Forschungsbericht Nr. F 278
- /SCH93/ Schubert, P.: Putz auf Leichtmauerwerk, Eigenschaften von Putzmörteln. Berlin: Ernst & Sohn. - In: Mauerwerk-Kalender 18 (1993), S. 657-666
- /SCH02/ Schubert, P. ; Bohne, D. ; Beer, I.: Untersuchungen zum Einfluß des Feuchtezustandes des Putzgrundes auf die Putzeigenschaften. Aachen : Institut für Bauforschung, 2002. - Forschungsbericht Nr. F 701

- /SCH03/ Schubert, P. ; Beer, I.: Außenputz auf Leichtmauerwerk – Einfluss des Feuchtezustandes des Putzgrundes auf die Putzeigenschaften. - In: Mauerwerk 7 (2003), Nr. 2, S. 66-72, Nr. 3, S. 94-107
- /SCH04/ Schubert, P.; Beer, I.; Graubohm, M.: Rissicherer Außenputz auf Leichtmauerwerk. Aachen : Institut für Bauforschung, 2004. - Forschungsbericht Nr. F 861
- /SCH06/ Schubert, P.: Eigenschaftswerte von Mauerwerk, Mauersteinen und Mauer-  
mörtel. Berlin : Ernst & Sohn. - In: Mauerwerk-Kalender 31 (2006), S. 171-192
- /STEIN/ Steinkamp, G.: Handbuch für das Ultraschall-Prüfgerät Typ: B P 5. Bremen :  
Selbstvlg.
- /WIT77/ Wittmann, F.H.: Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer  
Eigenschaften des Betons. Berlin : Ernst & Sohn. - In: Schriftenreihe des Deut-  
schen Ausschusses für Stahlbeton (1977), Nr. 290, S. 45-95
- /YOO89/ Yoon, W.-H.: Untersuchung der temperatur- und feuchtebedingten Spannungs-  
verhältnisse im Bereich von Instandsetzungen bei massiven Betonbauten.  
Aachen, Technische Hochschule, Fachbereich 3, Diss., 1989

**Tabelle A1:** Planhochlochziegel T16  
Ebenheit und Planparallelität

Prüfkörper	$\Delta h$	$w_{O1}$	$w_{U1}$	$w_{O2}$	$w_{U2}$
-	mm				
1	2	3	4	5	6
1	0,1	0,10 (kv)	< 0,05	< 0,05	< 0,05
2	0,2	0,15 (kv)	< 0,05	0,10 (kv)	0,10 (kv)
3	0,3	0,10 (kk)	< 0,05	0,10 (kk)	< 0,05
4	0,3	0,10 (kv)	< 0,05	0,10 (kv)	0,10 (kv)
5	0,1	< 0,05	0,15 (kv)	< 0,05	< 0,05

kv konvex  
kk konkav

**Tabelle A2:** Planhochlochziegel T16  
Maße, Rohdichte (lufttrocken), Trockenrohichte und  
Druckfestigkeit

Prüfkörper	Maße			$\rho_l$	$\rho_d$	$\beta_{D,st}^{1)}$
	l	b	h			
-	mm			kg/dm <sup>3</sup>		N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
1	247,9	363,7	247,6	0,74	-	16,4
2	246,3	362,1	247,6	0,74		16,7
3	246,2	362,2	247,5	0,75		12,5
4	247,0	363,8	247,5	0,74		16,5
5	246,2	361,2	247,5	0,75		12,9
Mittelwert	246,7	362,6	247,5	0,74	-	15,0
6	246,3	362,9	247,7	-	0,74	-
7	246,3	361,5	247,6		0,75	
8	246,5	361,7	247,4		0,75	
9	246,7	361,9	247,6		0,74	
10	246,0	361,8	247,7		0,75	
Mittelwert	246,4	362,0	247,6	-	0,75	-

1) mit Formfaktor 1,2

**Tabelle A3:** Planhochlochziegel SX +  
Ebenheit und Planparallelität

Prüfkörper	$\Delta h$	$w_{O1}$	$w_{U1}$	$w_{O2}$	$w_{U2}$
-	mm				
1	2	3	4	5	6
1	0,9	< 0,05	0,05 (kv)	< 0,05	0,10 (kv)
2	0,1	0,10 (kv)	< 0,05	0,10 (kv)	0,15 (kv)
3	0,4	0,15 (kv)	0,05 (kv)	< 0,05	0,15 (kv)
4	0,4	0,15 (kk)	0,10 (kv)	0,15 (kv)	0,10 (kv)
5	0,1	0,15 (kv)	0,05 (kv)	0,20 (kv)	0,10 (kv)

kv konvex  
kk konkav

**Tabelle A4:** Planhochlochziegel SX +  
Maße, Rohdichte (lufttrocken), Trockenrohddichte und  
Druckfestigkeit

Prüfkörper	Maße			$\rho_l$	$\rho_d$	$\beta_{D,st}^{1)}$
	l	b	h			
-	mm			kg/dm <sup>3</sup>		N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
1	244,1	360,6	247,6	0,57	-	8,2
2	245,5	361,3	247,7	0,57		6,2
3	245,3	362,2	247,5	0,57		8,4
4	243,6	359,7	247,6	0,58		9,1
5	244,2	360,4	247,5	0,58		8,6
<b>Mittelwert</b>	244,5	360,8	247,6	0,57	-	8,1
6	244,9	360,7	247,6	-	0,57	-
7	242,0	357,4	247,6		0,58	
8	244,9	360,9	247,5		0,58	
9	242,9	360,2	247,4		0,57	
10	245,0	361,9	247,5		0,57	
<b>Mittelwert</b>	243,9	360,2	247,5	-	0,57	-

1) mit Formfaktor 1,0

**Tabelle A5:** Planhochlochziegel T9  
Ebenheit und Planparallelität

Prüfkörper	$\Delta h$	$w_{O1}$	$w_{U1}$	$w_{O2}$	$w_{U2}$
-	mm				
1	2	3	4	5	6
1	0,4	0,05 (kk)	0,10 (kk)	0,10 (kk)	< 0,05
2	0,3	0,10 (kk)	0,05 (kk)	0,05 (kk)	0,05 (kk)
3	0,4	0,10 (kk)	0,05 (kk)	0,05 (kk)	< 0,05
4	0,4	0,05 (kk)	0,10 (kk)	0,05 (kk)	0,10 (kk)
5	0,1	0,10 (kk)	0,05 (kk)	0,05 (kk)	0,05 (kk)

kv konvex

kk konkav

**Tabelle A6:** Planhochlochziegel T9  
Maße, Rohdichte (lufttrocken), Trockenrohichte und  
Druckfestigkeit

Prüfkörper	Maße			$\rho_l$	$\rho_d$	$\beta_{D,st}^{1)}$
	l	b	h			
-	mm			kg/dm <sup>3</sup>		N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
1	246,9	365,9	248,5	0,63	-	5,1
2	246,7	365,1	249,0	0,63		5,8
3	247,0	365,1	249,1	0,63		5,2
4	246,9	365,6	249,2	0,64		6,1
5	246,7	365,0	248,8	0,63		5,6
Mittelwert	246,8	365,3	248,9	0,63	-	5,6
6	245,9	364,9	249,1	-	0,56	-
7	246,3	365,4	248,4		0,57	
8	246,7	365,1	249,0		0,56	
9	245,9	365,4	249,0		0,57	
10	246,2	364,9	250,4		0,56	
Mittelwert	246,2	365,1	249,2	-	0,56	-

1) mit Formfaktor 1,0

**Tabelle A7:** Planhochlochziegel  
Lochanteile bestimmt mit Bildanalyse

Ziegel	Prüfkörper	Maße			Lochanteil
		l	b	h	
		mm			%
1	2	3	4	5	6
T16	1	247,1	363,4	247,5	48,0
	2	246,9	362,8	247,6	48,2
	3	246,3	361,8	247,5	48,4
SX+	1	245,4	361,2	247,6	51,5
	2	244,8	360,2	247,7	49,3
	3	245,1	362,2	247,5	47,4
T9	1	246,8	365,2	249,1	63,9
	2	246,9	365,0	248,9	57,5
	3	247,0	365,1	248,5	58,9

**Tabelle A8:** Planhochlochziegel T16  
Zugversuche an Prismen aus dem Außenscherben  
Entnahme in Richtung Steinhöhe

Prisma	l	b	h	$\rho_l$	$\beta_z$	$E_{z,33}$	$\epsilon_{z,33}$	$\epsilon_{z,66}$	$\epsilon_{z,u}$
-	mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>		mm/m		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	201,0	41,0	9,3	1,43	4,05	13390	0,10	0,20	0,31
2	200,0	41,2	9,5	1,57	4,59	13780	0,11	0,22	0,35
3	201,0	39,6	11,6	1,59	4,25	14960	0,09	0,19	0,30
4	200,0	40,4	11,5	1,50	4,41	13460	0,11	0,23	0,35
5	201,0	39,7	9,8	1,67	3,75	14730	0,10	0,21	0,32
6	200,0	41,1	10,7	1,59	4,53	14970	0,11	0,23	0,35
7	203,0	41,1	10,4	1,48	4,55	14820	0,11	0,22	0,34
8	201,0	39,8	11,2	1,65	3,63	15090	0,09	0,18	0,28
9	200,0	37,1	10,9	1,72	3,62	15770	0,10	0,19	0,30
10	201,0	37,9	10,8	1,69	3,42	15250	0,09	0,19	0,29
11	200,0	39,2	11,2	1,59	3,56	14960	0,09	0,18	0,27
12	202,0	40,4	11,0	1,61	3,81	14530	0,10	0,20	0,31
13	200,0	39,4	9,3	1,75	3,61	14690	0,10	0,20	0,31
14	200,0	39,1	9,7	1,51	3,23	14290	0,08	0,16	0,24
MW	200,7	39,8	10,4	1,60	3,96	14580	0,10	0,20	0,31

MW Mittelwert

**Tabelle A9:** Planhochlochziegel T16  
Zugversuche an Prismen aus dem Außenscherben  
Entnahme in Richtung Steinlänge

Prisma	l	b	h	$\rho_l$	$\beta_z$	$E_{z,33}$	$\varepsilon_{z,33}$	$\varepsilon_{z,66}$	$\varepsilon_{z,u}$
-	mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>		mm/m		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	200,0	39,6	11,3	1,71	2,47	12010	0,07	0,14	0,22
2	199,0	39,8	11,6	1,71	2,41	11500	0,07	0,14	0,21
3	200,0	40,3	11,1	1,71	2,26	11540	0,07	0,14	0,22
4	200,0	39,6	10,4	1,71	2,65	11020	0,08	0,16	0,24
5	201,0	38,8	10,1	1,71	2,41	8960	0,10	0,19	0,28
6	200,0	39,3	10,2	1,71	2,66	10490	0,09	0,17	0,26
7	<b>199,0</b>	38,8	9,8	1,71	2,60	11360	0,08	0,16	0,26
8	200,0	38,5	9,4	1,71	2,93	10660	0,10	0,20	0,31
9	199,0	40,7	9,5	1,71	1,90	10510	0,06	0,12	0,19
10	201,0	40,8	9,8	1,70	1,96	10890	0,06	0,13	0,19
11	201,0	40,9	10,2	1,70	2,66	9230	0,10	0,21	0,33
<b>12</b>	200,0	41,2	9,8	1,70	2,03	8440	0,10	0,20	0,30
13	200,0	39,8	11,2	1,70	2,56	9970	0,10	0,19	0,29
14	201,0	40,4	11,3	1,70	2,20	8730	0,10	0,19	0,29
<b>MW</b>	200,1	39,9	10,4	<b>1,71</b>	<b>2,41</b>	<b>10380</b>	0,08	0,17	<b>0,26</b>

MW Mittelwert

**Tabelle A10:** Planhochlochziegel SX+  
Zugversuche an Prismen aus dem Außenscherben  
Entnahme in Richtung Steinhöhe

Prisma	l	b	h	$\rho_l$	$\beta_Z$	$E_{Z,33}$	$\epsilon_{Z,33}$	$\epsilon_{Z,66}$	$\epsilon_{Z,u}$
-	mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>		mm/m		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	201,0	39,8	6,3	1,53	3,87	11110	0,14	0,28	0,43
2	201,0	39,2	6,5	1,52	3,72	11730	0,13	0,27	0,41
3	200,0	39,0	7,3	1,36	3,82	10580	0,14	0,28	0,44
4	200,0	39,0	7,4	1,31	3,59	9360	0,13	0,26	0,41
5	200,0	39,0	6,7	1,43	3,86	12270	0,12	0,24	0,37
6	202,0	39,2	7,2	1,46	4,62	12720	0,14	0,27	0,42
7	200,0	39,6	6,9	1,38	4,96	11490	0,15	0,31	0,48
8	199,0	39,5	6,0	1,40	4,84	12500	0,14	0,29	0,46
9	200,0	39,2	6,5	1,45	5,21	13100	0,15	0,31	0,48
10	201,0	39,7	8,1	1,36	3,75	9920	0,14	0,29	0,45
11	201,0	39,4	6,8	1,31	2,06	9090	0,08	0,15	0,24
12	201,0	39,2	6,5	1,48	3,75	11220	0,13	0,27	0,42
13	199,0	39,6	5,7	1,48	3,88	11690	0,12	0,25	0,39
14	200,0	40,1	5,1	1,53	4,32	11850	0,15	0,29	0,46
15	199,0	40,2	5,4	1,52	3,61	11600	0,12	0,25	0,38
MW	200,3	39,4	6,6	1,43	3,99	11350	0,13	0,27	0,41

MW Mittelwert

**Tabelle A11:** Planhochlochziegel SX+  
Zugversuche an Prismen aus dem Außenscherben  
Entnahme in Richtung Steinlänge

Prisma	l	b	h	$\rho_l$	$\beta_Z$	$E_{Z,33}$	$\epsilon_{Z,33}$	$\epsilon_{Z,66}$	$\epsilon_{Z,u}$
-	mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>		mm/m		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	200,0	39,5	5,5	1,71	1,66	9540	0,07	0,15	0,26
2	200,0	39,1	6,3	1,50	1,75	9130	0,07	0,15	0,23
3	201,0	38,8	6,7	1,54	3,30	10280	0,13	0,26	0,40
4	201,0	39,0	5,6	1,62	3,81	11520	0,13	0,28	0,43
5	200,0	39,0	6,5	1,49	2,02	8340	0,08	0,17	0,27
6	200,0	37,3	5,9	1,62	2,69	9920	0,10	0,21	0,32
7	200,0	38,5	6,4	1,56	2,22	9460	0,09	0,18	0,28
8	200,0	39,4	6,8	1,47	2,98	9030	0,12	0,25	0,39
9	200,0	39,0	6,3	1,53	3,01	10720	0,10	0,20	0,31
10	200,1	40,8	5,6	1,53	2,52	9030	0,11	0,21	0,33
11	200,7	40,1	6,9	1,58	1,89	8190	0,09	0,17	0,27
12	201,2	40,4	6,8	1,62	3,42	9140	0,13	0,26	0,42
13	201,0	41,2	6,9	1,62	3,07	9240	0,12	0,24	0,37
MW	200,4	39,4	6,3	1,57	2,64	9500	0,10	0,21	0,33

MW Mittelwert

**Tabelle A12:** Planhochlochziegel T9  
Zugversuche an Prismen aus dem Außenscherben  
Entnahme in Richtung Steinhöhe

Prisma	l	b	h	$\rho_l$	$\beta_Z$	$E_{Z,33}$	$\epsilon_{Z,33}$	$\epsilon_{Z,66}$	$\epsilon_{Z,u}$
-	mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>		mm/m		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	201,0	40,8	13,8	1,55	2,73	9530	0,10	0,22	0,36
2	202,0	40,1	13,8	1,69	2,20	9060	0,09	0,20	0,32
3	200,0	40,4	13,2	1,60	1,80	7320	0,08	0,18	0,34
4	200,0	39,5	13,4	1,67	1,78	8500	0,08	0,17	0,25
5	201,0	39,3	14,1	1,58	1,88	9510	0,07	0,16	0,26
6	<b>201,0</b>	39,0	13,3	1,68	1,53	8330	0,07	0,16	0,26
7	203,0	39,7	12,9	1,71	1,81	8300	0,09	0,19	0,35
8	201,0	39,8	13,7	1,61	2,04	8450	0,09	0,20	0,33
9	201,0	39,2	13,5	1,69	2,07	9020	0,09	0,20	0,32
10	202,0	38,9	13,4	1,62	1,97	8050	0,08	0,18	0,32
11	200,0	39,8	12,0	1,61	2,31	9700	0,08	0,18	0,28
12	201,0	40,1	12,9	1,63	2,07	9400	0,07	0,16	0,25
13	199,0	41,7	13,7	1,53	2,39	9610	0,08	0,18	0,29
14	200,0	40,2	13,2	1,66	2,62	9210	0,09	0,20	0,32
MW	200,9	39,9	13,4	1,63	2,08	<b>8860</b>	0,08	0,18	0,30

MW Mittelwert

**Tabelle A13:** Planhochlochziegel T9  
Zugversuche an Prismen aus dem Außenscherben  
Entnahme in Richtung Steinlänge

Prisma	l	b	h	$\rho_l$	$\beta_Z$	$E_{Z,33}$	$\epsilon_{Z,33}$	$\epsilon_{Z,66}$	$\epsilon_{Z,u}$
-	mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>		mm/m		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	200,0	38,9	13,4	1,59	1,82	5880	0,10	0,22	0,43
2	200,0	39,6	13,8	1,58	1,43	5380	0,09	0,20	0,33
3	201,0	39,3	13,6	1,57	1,57	6550	0,08	0,17	0,28
4	200,0	39,1	13,4	1,62	1,75	6450	0,09	0,19	0,34
5	200,0	39,0	13,3	1,60	1,74	5670	0,10	0,22	0,38
6	200,0	39,2	13,4	1,60	<b>0,68</b>	5200	0,05	0,14	0,38
7	200,0	39,5	13,6	1,57	0,30	5060	0,02	0,04	0,07
8	201,0	39,3	13,4	1,60	0,37	5660	0,03	0,05	0,08
9	200,4	39,7	15,1	1,36	1,38	5590	0,08	0,19	0,36
10	199,4	39,2	14,8	1,39	0,92	5250	0,06	0,12	0,18
11	198,7	38,4	15,2	1,39	1,05	5220	0,07	0,15	0,24
12	199,1	38,6	15,3	1,37	1,12	6180	0,05	0,11	0,18
13	197,0	40,7	15,1	1,37	0,27	5770	0,08	0,17	0,28
MW	199,7	39,3	14,1	1,51	1,11	5680	0,07	0,15	0,27

MW Mittelwert

**Tabelle A14:** Planhochlochziegel  
Temperaturdehnungskoeffizienten der  
Außenscherben

Ziegel	Entnahmerichtung	$\alpha_T \cdot 10^{-6}$	
		Einzelwert	Mittelwert
1	2	3	4
T16	Steinhöhe	6,27	6,31
	Steinlänge	6,34	
SX+	Steinhöhe	6,41	6,92
	Steinlänge	7,43	
T9	Steinhöhe	5,42	5,48
	Steinlänge	5,53	

**Tabelle A15:** Planhochlochziegel T16  
Feuchtedehnung von Prismen aus dem Außenscherben  
im Normalklima 20/65  
Entnahme in Richtung Steinhöhe

t	Prisma 1		Prisma 2		Prisma 3		Mittelwert	
	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$
d	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,01	0,16	0,02	0,04	0,00	0,05	0,01	0,08
7	0,00	0,48	0,01	0,15	-0,02	0,16	0,00	0,26
14	-0,03	0,70	-0,02	0,24	-0,04	0,27	-0,03	0,41
21	0,00	0,87	0,00	0,33	-0,01	0,36	0,00	0,52
28	-0,01	0,98	-0,01	0,38	-0,02	0,42	-0,01	0,59
64	-0,01	1,32	0,00	0,60	-0,03	0,64	-0,01	0,86
100	-0,02	1,50	-0,01	0,73	-0,04	0,78	-0,02	1,01
190	0,00	1,70	0,03	0,90	-0,01	0,97	0,01	1,19
398	0,02	1,90	0,03	1,10	0,01	1,15	0,02	1,38

1) Vorzeichen Minus: Schwinden , Plus: Quellen

2) Vorzeichen Minus: Masseabnahme , Plus: Massezunahme

**Tabelle A16:** Planhochlochziegel T16  
Feuchtedehnung von Prismen aus dem Außenscherben  
im Normalklima 20/65  
Entnahme in Richtung Steinlänge

t	Prisma 1	Prisma 2	Prisma 3	Mittelwert
---	----------	----------	----------	------------

	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$
d	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-0,02	0,08	-0,01	0,03	-0,01	0,07	-0,01	0,06
7	0,00	0,27	-0,02	0,13	-0,01	0,21	-0,01	0,20
14	-0,04	0,43	-0,04	0,24	-0,04	0,30	-0,04	0,32
21	-0,02	0,54	-0,03	0,33	-0,01	0,40	-0,02	0,42
28	-0,02	0,61	-0,03	0,36	-0,01	0,46	-0,02	0,48
64	-0,02	0,90	-0,02	0,57	-0,02	0,69	-0,02	0,72
100	-0,02	1,03	-0,04	0,71	-0,01	0,81	-0,02	0,85
190	-0,02	1,24	-0,02	0,88	-0,01	1,00	-0,02	1,04
398	0,03	1,42	0,01	1,05	0,01	1,22	0,01	1,23

- 1) Vorzeichen Minus: Schwinden , Plus: Quellen  
 2) Vorzeichen Minus: Masseabnahme , Plus: Massezunahme

**Tabelle A17:** Planhochlochziegel SX+  
 Feuchtedehnung von Prismen aus dem Außenscherben  
 im Normalklima 20/65  
 Entnahme in Richtung Steinhöhe

t	Prisma 1		Prisma 2		Prisma 3		Mittelwert	
	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$
d	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-0,05	0,05	-0,04	0,02	-0,03	0,02	-0,04	0,03
7	-0,01	0,16	-0,01	0,15	0,00	0,10	-0,01	0,14
14	-0,02	0,18	-0,01	0,15	0,00	0,08	-0,01	0,14
21	-0,01	0,21	-0,01	0,18	0,01	0,13	0,00	0,17
28	-0,01	0,25	-0,01	0,20	0,01	0,15	0,00	0,20
64	0,01	0,34	0,01	0,28	0,02	0,23	0,01	0,28
100	0,02	0,44	0,00	0,42	0,01	0,31	0,01	0,39
190	0,03	0,53	0,05	0,52	0,06	0,37	0,04	0,47
398	0,04	0,71	0,06	0,68	0,08	0,50	0,06	0,63

- 1) Vorzeichen Minus: Schwinden , Plus: Quellen  
 2) Vorzeichen Minus: Masseabnahme , Plus: Massezunahme

**Tabelle A18:** Planhochlochziegel SX+  
 Feuchtedehnung von Prismen aus dem Außenscherben  
 im Normalklima 20/65  
 Entnahme in Richtung Steinlänge

t	Prisma 1		Prisma 2		Prisma 3		Mittelwert	
	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$

d	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-0,06	0,03	-0,06	0,02	-0,05	0,02	-0,06	0,02
7	-0,02	0,19	-0,02	0,15	-0,02	0,09	-0,02	0,14
14	-0,04	0,25	-0,02	0,18	-0,02	0,11	-0,03	0,18
21	-0,02	0,29	-0,02	0,23	-0,01	0,14	-0,02	0,22
28	-0,02	0,30	-0,02	0,25	-0,01	0,15	-0,02	0,24
64	-0,02	0,42	-0,01	0,35	0,01	0,23	0,00	0,33
100	-0,02	0,52	-0,01	0,47	0,02	0,29	0,00	0,43
190	0,01	0,61	0,02	0,57	0,04	0,34	0,02	0,50
398	0,04	0,78	0,04	0,72	0,07	0,48	0,05	0,66

- 1) Vorzeichen Minus: Schwinden , Plus: Quellen  
 2) Vorzeichen Minus: Masseabnahme , Plus: Massezunahme

**Tabelle A19:** Planhochlochziegel T9  
 Feuchtedehnung von Prismen aus dem Außenscherben  
 im Normalklima 20/65  
 Entnahme in Richtung Steinhöhe

t	Prisma 1		Prisma 2		Prisma 3		Mittelwert	
	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$
d	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00
7	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
14	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01
21	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01
28	0,03	0,02	0,03	0,01	0,04	0,02	0,03	0,02
66	0,07	0,05	0,07	0,05	0,08	0,05	0,07	0,05
91	0,09	0,07	0,10	0,07	0,10	0,07	0,10	0,07
191	0,14	0,12	0,14	0,12	0,16	0,10	0,15	0,11
352	0,22	0,17	0,22	0,17	0,23	0,15	0,23	0,16

- 1) Vorzeichen Minus: Schwinden , Plus: Quellen  
 2) Vorzeichen Minus: Masseabnahme , Plus: Massezunahme

**Tabelle A20:** Planhochlochziegel T9  
 Feuchtedehnung von Prismen aus dem Außenscherben  
 im Normalklima 20/65  
 Entnahme in Richtung Steinlänge

t	Prisma 1		Prisma 2		Prisma 3		Mittelwert	
	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$	$\varepsilon_s^{1)}$	$\Delta m^{2)}$
d	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%	mm/m	M.-%

1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-0,04	0,00	0,00	-0,01	0,01	0,00	-0,01	0,00
7	-0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00
14	-0,02	0,00	0,02	0,00	0,01	-0,01	0,00	0,00
21	-0,02	0,04	0,03	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02
28	0,00	0,01	0,04	0,01	0,02	0,00	0,02	0,01
66	0,02	0,04	0,07	0,05	0,07	0,04	0,06	0,05
91	0,06	0,05	0,11	0,06	0,09	0,04	0,09	0,05
191	0,11	0,09	0,15	0,10	0,13	0,09	0,13	0,09
352	0,18	0,14	0,23	0,16	0,21	0,14	0,21	0,14

- 1) Vorzeichen Minus: Schwinden , Plus: Quellen  
 2) Vorzeichen Minus: Masseabnahme , Plus: Massezunahme

**Tabelle A21:** Planhochlochziegel  
 Quecksilberdruckporosimetrie an  
 Proben aus dem Außenscherben

Ziegel	Messung	P	$r_m$	$\rho_{HG}$
-	-	Vol.-%	$\mu\text{m}$	$\text{kg}/\text{dm}^3$
1	2	3	4	5
T16	a	44,9	0,68	1,42
	b	40,8	0,79	1,40
	Mittelwert	42,9	0,74	1,41
SX+	a	48,6	0,80	1,30
	b	48,9	0,90	1,29
	Mittelwert	48,7	0,85	1,30
T9	a	38,5	1,31	1,51
	b	38,4	1,42	1,49
	Mittelwert	38,5	1,36	1,50

**Tabelle A22:** Außenputze  
 Versuchsprogramm grundlegende Materialeigenschaften

Prüfung	Prüfalter	Prüfung nach bzw. in Anlehnung an
1	2	3
Sieblinie	-	-
Ausbreitmaß		DIN EN 1015-3 /DIN04/
Frischmörtelrohddichte		DIN EN 1015-6 /DIN98d/
Luftgehalt		DIN EN 1015-7 /DIN98e/
Biegezug- und Druckfestigkeit	2, 4, 7, 14, 28, 90 und 180 d	DIN EN 1015-11 /DIN98b/

kapillare Wasseraufnahme	28 d	DIN EN 1015-18 /DIN03a/
		DIN V 18550 /DIN05b/
Wasserdampfdiffusion		DIN EN ISO 12572 /DIN01/
		DIN EN 1015-19 /DIN05a/
Schwinden	2 d	DIN 52615 /DIN87/ DIN 52450 /DIN85/

Tabelle A23: Außenputze  
Siebanalyse

Putz	Sieb	Siebdurchgang
-	mm	%
1	2	3
NP	2	100
	1	86,6
	0,5	53,7
	0,25	38,5
	0,125	29,9
	0,063	25,4
LP	2	100
	1	92,3
	0,5	70,7
	0,25	51,3
	0,125	39,1
	0,063	31,3
ULP	2	100
	1	86,9
	0,5	62,8
	0,25	41,2
	0,125	36,8
	0,063	35,0

**Tabelle A24:** Außenputze  
Frisch- und Festmörtelkennwerte

Putz	a	L	$\rho_{fr}$	Prüfalter	$\rho_l$	$\beta_{BZ}$	$\beta_{D,m\ddot{o}}$
-	mm	%	kg/dm <sup>3</sup>	d	kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8
NP	173	17,0	1,80	2	1,76	1,10	1,70
				4	1,48	1,50	2,90
				7	1,77	1,80	3,40
				14	1,68	2,00	4,80
				28	1,63	3,40	6,20
				90	1,64	3,10	7,90
				180	1,65	3,30	8,00
LP	168	24,5	1,30	2	1,29	0,60	0,90
				4	1,34	1,10	2,10
				7	1,34	1,40	2,70
				14	1,25	1,40	3,70
				28	1,20	2,00	4,50
				90	1,25	1,90	4,10
				180	1,26	2,10	4,50
ULP	158	24,0	1,02	2	1,00	0,20	0,20
				4	1,01	0,30	0,30
				7	1,01	0,30	0,40
				14	0,82	0,40	0,80
				28	0,77	0,90	1,40
				90	0,77	0,80	1,50
				180	0,78	0,60	1,10

**Tabelle A25:** Außenputze  
kapillare Wasseraufnahme

Putz	Einheit	W <sub>DIN 1015-18</sub>	W <sub>DIN V18550-H2O</sub>	W <sub>DIN V18550</sub>
1	2	3	4	5
NP	kg/(m <sup>2</sup> · min <sup>0,5</sup> )	0,06	0,01	0,02
	kg/(m <sup>2</sup> · h <sup>0,5</sup> )	0,48	0,09	0,15
LP	kg/(m <sup>2</sup> · min <sup>0,5</sup> )	0,03	0,01	0,02
	kg/(m <sup>2</sup> · h <sup>0,5</sup> )	0,25	0,09	0,14
ULP	kg/(m <sup>2</sup> · min <sup>0,5</sup> )	0,03	0,02	0,01
	kg/(m <sup>2</sup> · h <sup>0,5</sup> )	0,22	0,18	0,07

Tabelle A26: Außenputze  
Wasserdampfdiffusion

Putz	Prüfung nach	Medium	$s_d$	$\mu$
-	-	-	m	-
1	2	3	4	5
NP	DIN EN ISO 12572 /DIN01/	Calciumchlorid	0,38	18,9
		Kaliumnitrat	0,31	15,7
		Wasser	0,24	12,1
	DIN EN 1015-19 /DIN05a/	Calciumchlorid	0,38	18,9
		Kaliumnitrat	0,32	15,8
		Wasser	0,24	11,7
	DIN 52615 /DIN87/	Calciumchlorid	0,38	18,9
		Kaliumnitrat	0,31	15,7
		Wasser	0,24	12,1
LP	DIN EN ISO 12572 /DIN01/	Calciumchlorid	0,33	16,6
		Kaliumnitrat	0,24	11,6
		Wasser	0,16	7,8
	DIN EN 1015-19 /DIN05a/	Calciumchlorid	0,32	16,0
		Kaliumnitrat	0,23	11,2
		Wasser	0,15	7,6
	DIN 52615 /DIN87/	Calciumchlorid	0,33	16,6
		Kaliumnitrat	0,24	11,6
		Wasser	0,16	7,8
ULP	DIN EN ISO 12572 /DIN01/	Calciumchlorid	0,16	8,1
		Kaliumnitrat	0,12	5,8
		Wasser	0,10	5,1
	DIN EN 1015-19 /DIN05a/	Calciumchlorid	0,17	8,2
		Kaliumnitrat	0,12	5,9
		Wasser	0,10	5,2
	DIN 52615 /DIN87/	Calciumchlorid	0,16	8,1
		Kaliumnitrat	0,12	5,8
		Wasser	0,10	5,1

Tabelle A27: Außenputze  
Frisch- und Festmörtelkennwerte

Putz	a	L	$\rho_{fr}$	$\rho_l$	$\rho_d$	$\beta_{BZ}$	$\beta_D$
-	mm	Vol.-%	kg/dm <sup>3</sup>			N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8
NP	173	9,5	1,93	1,69	1,65	3,18	7,66
LP	188	16,0	1,58	1,37	1,32	2,08	5,10
ULP	169	13,4	1,16	0,80	0,79	0,36	0,89

**Tabelle A28:** Normalputz NP  
 Untersuchungen zum dynamischen E-Modul und  
 zur Zugfestigkeit an Prismen  
 Serie AZ

Prüfalter	Prisma	Maße			$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_z$
		l	b	h			
d	-	mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8
3	1	139,9	39,7	21,3	1,71	6810	0,88
	2	139,7	39,6	20,8	1,79	6550	0,90
	3	139,6	39,6	20,6	1,77	6570	0,99
	4	139,3	39,7	21,2	1,80	6290	0,83
	5	139,2	39,7	22,3	1,74	6250	0,90
	MW	139,6	39,6	21,2	1,76	6490	0,90
5	1	140,2	40,0	21,2	1,69	7170	1,11
	2	139,8	39,8	21,1	1,76	7610	1,08
	3	139,6	39,8	21,4	1,72	7610	1,23
	4	140,6	39,9	21,4	1,71	7870	1,12
	5	139,9	39,9	20,3	1,77	8160	1,29
	6	139,8	40,1	20,7	1,74	7450	1,10
	MW	140,0	39,9	21,0	1,73	7640	1,16
7	1	139,5	39,8	22,8	1,72	8550	1,20
	2	139,7	40,1	21,6	1,73	8350	1,21
	3	140,0	39,9	22,4	1,71	8400	1,12
	4	139,7	40,0	20,5	1,74	8120	1,41
	5	140,1	40,0	22,2	1,73	8220	1,04
	6	139,2	39,9	21,0	1,71	7890	1,36
	MW	139,7	40,0	21,8	1,72	8260	1,22
14	1	139,4	39,9	20,6	1,73	8430	1,57
	2	139,7	39,8	21,0	1,72	8180	1,26
	3	139,7	39,8	21,6	1,71	8530	1,36
	4	139,9	39,9	20,4	1,74	7730	1,40
	MW	139,7	39,9	20,9	1,73	8210	1,40
26	1	138,9	39,8	21,7	1,72	8950	1,51
	2	139,8	39,9	20,5	1,72	8710	1,70
	3	139,5	39,9	19,9	1,78	9180	1,87
	4	139,6	40,1	20,7	1,72	8860	1,64
	5	139,6	39,9	20,8	1,76	9140	1,69
	MW	139,5	39,9	20,7	1,74	8970	1,68

MW Mittelwert

Tabelle A28: (Fortsetzung)

Prüfalter	Prisma	Maße			$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_z$
		l	b	h			
d	-	mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8
90	1	139,7	39,7	21,7	1,71	9120	1,49
	2	140,5	39,9	21,0	1,72	9000	1,85
	3	139,9	39,9	20,4	1,70	9120	1,67
	4	140,2	40,1	21,0	1,76	9090	1,64
	5	139,9	39,9	20,2	1,75	9600	1,70
	MW	140,0	39,9	20,8	1,73	9190	1,67
180	1	139,8	40,0	20,8	1,76	9580	2,09
	2	140,0	40,0	20,6	1,72	8980	1,46
	3	139,4	39,8	20,2	1,73	9500	1,81
	4	139,8	39,9	21,2	1,74	9250	1,96
	5	140,0	39,9	20,7	1,72	8960	1,84
	MW	139,8	39,9	20,7	1,73	9250	1,83

MW Mittelwert

**Tabelle A29:** Normalputz NP  
 Untersuchungen zum dynamischen E-Modul und  
 zur Zugfestigkeit an Prismen  
 Serien CZ, DZ und FZ, Prüfalter 27 d

Serie	Prisma	Maße			$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_z$
		l	b	h			
-		mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8
CZ	1	140,0	40,0	20,0	1,61	5920	1,16
	2	139,8	39,9	20,1	1,62	6130	1,01
	3	139,9	39,9	20,2	1,63	6090	1,10
	4	140,0	40,1	20,2	1,64	6160	0,98
	MW	139,9	40,0	20,1	1,62	6080	1,06
DZ	1	140,0	40,1	11,5	1,73	9490	1,72
	2	140,1	40,0	11,4	1,73	9670	1,82
	3	140,0	39,6	12,0	1,68	9480	1,78
	4	139,7	39,7	11,4	1,79	9670	1,80
	5	140,0	40,0	10,7	1,74	9100	1,68
	MW	140,0	39,9	11,4	1,73	9480	1,76
FZ	1	140,0	40,1	30,1	1,77	9000	1,29
	2	140,0	40,0	30,3	1,75	9000	1,28
	3	140,1	40,1	29,8	1,74	8730	1,36
	4	139,9	40,0	30,0	1,77	9520	1,44
	5	140,1	40,0	30,7	1,75	9300	1,16
	MW	140,0	40,0	30,2	1,75	9110	1,31

MW Mittelwert

Tabelle A30: Leichtputz LP  
 Untersuchungen zum dynamischen E-Modul und  
 zur Zugfestigkeit an Prismen  
 Serie AZ

Prüfalter	Prisma	Maße			$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_z$
		l	b	h			
d	-	mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8
3	1	139,4	39,7	20,8	1,38	4070	0,67
	2	139,6	39,5	20,4	1,45	4440	0,78
	3	139,6	39,5	20,6	1,39	4340	0,76
	4	139,5	39,7	20,0	1,42	4170	0,74
	5	139,0	39,7	21,0	1,32	3990	0,61
	MW	139,4	39,6	20,5	1,39	4200	0,71
5	1	139,6	39,7	20,4	1,43	5140	0,72
	2	139,1	39,8	20,1	1,46	6190	0,83
	3	139,4	39,6	21,5	1,41	5160	0,78
	4	139,3	39,6	21,0	1,37	4840	0,77
	5	139,4	39,9	20,0	1,40	5240	0,76
	MW	139,4	39,7	20,6	1,41	5310	0,77
7	1	139,4	39,6	22,0	1,37	5440	0,79
	2	139,4	39,7	22,4	1,38	5340	0,82
	3	139,2	39,6	20,4	1,40	5590	0,84
	4	139,2	39,8	20,4	1,41	5710	0,85
	MW	139,3	39,6	21,0	1,40	5540	0,86
14	1	139,9	39,8	21,1	1,36	5640	0,87
	2	139,5	39,3	20,8	1,42	6310	1,07
	3	139,5	39,5	20,6	1,37	5470	0,87
	4	139,4	39,5	21,4	1,39	5760	0,95
	5	139,3	39,5	20,1	1,39	5550	0,90
	MW	139,5	39,5	20,8	1,39	5750	0,93
26	1	139,6	39,5	21,2	1,38	5830	1,10
	2	139,4	39,6	19,8	1,40	6010	1,00
	3	139,5	39,7	20,0	1,40	5920	1,20
	4	139,5	39,6	21,5	1,37	5490	0,99
	5	139,7	39,3	19,9	1,39	5820	1,19
	6	139,3	39,4	21,5	1,36	5690	1,01
	MW	139,5	39,5	20,7	1,38	5800	1,08

MW Mittelwert

Tabelle A30: (Fortsetzung)

Prüfalter	Prisma	Maße			$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_z$
		l	b	h			
d	-	mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8
90	1	139,4	40,0	21,0	1,50	7240	1,33
	2	139,9	40,1	21,2	1,41	6890	1,42
	3	139,8	39,8	19,6	1,47	7340	1,26
	4	139,9	39,8	19,4	1,43	7100	1,07
	5	139,4	39,7	19,8	1,37	6290	1,24
	MW	139,7	39,9	20,2	1,43	6970	1,27
183	1	139,4	39,6	20,4	1,44	7310	1,31
	2	139,8	39,7	20,6	1,43	7250	1,58
	3	139,9	39,8	20,7	1,48	7900	1,82
	4	139,2	39,8	20,1	1,42	7370	1,46
	5	140,3	39,8	20,5	1,51	8590	1,72
	6	140,4	40,1	20,7	1,48	7820	1,78
	MW	139,8	39,8	20,5	1,46	7710	1,61

MW Mittelwert

**Tabelle A31:** Leichtputz LP  
 Untersuchungen zum dynamischen E-Modul und  
 zur Zugfestigkeit an Prismen  
 Serien CZ, DZ und FZ, Prüfalter 27 d

Serie	Prisma	Maße			$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_z$
		l	b	h			
-		mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8
CZ	1	140,0	40,0	20,4	1,32	3840	0,64
	2	140,1	39,9	20,0	1,33	3860	0,65
	3	140,1	40,0	20,3	1,31	3800	0,58
	4	139,9	40,0	20,5	1,30	3510	0,64
	5	140,0	40,0	20,0	1,33	4000	0,68
	MW	140,0	40,0	20,2	1,32	3800	0,64
DZ	1	140,2	40,1	12,4	1,28	5290	0,99
	2	140,1	40,3	11,3	1,32	5840	1,21
	3	140,2	39,6	11,9	1,29	5450	1,08
	4	140,0	39,7	12,8	1,21	5080	0,87
	5	140,0	39,9	11,4	1,34	5770	0,88
	MW	140,1	39,9	12,0	1,29	5490	1,00
FZ	1	139,5	39,7	31,9	1,37	6180	0,89
	2	139,5	39,8	31,5	1,37	5910	0,86
	3	139,2	40,0	30,9	1,31	5340	0,83
	4	139,5	39,9	30,5	1,41	6370	0,94
	5	139,3	39,7	30,4	1,44	6510	0,95
	MW	139,4	39,8	31,0	1,38	6060	0,90

MW Mittelwert

**Tabelle A32:** Ultraleichtputz ULP  
 Untersuchungen zum dynamischen E-Modul und  
 zur Zugfestigkeit an Prismen  
 Serie AZ

Prüfalter	Prisma	Maße			$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_z$
		l	b	h			
d	-	mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8
3	1	139,6	39,8	20,9	0,99	1460	0,09
	2	138,9	39,8	20,8	0,95	1370	0,06
	3	139,4	39,8	20,4	0,92	1180	0,13
	4	139,4	39,9	20,3	0,96	1330	0,09
	MW	139,3	39,8	20,6	0,96	1330	0,09
5	1	139,9	39,7	20,5	0,94	1480	0,12
	2	139,3	39,7	20,1	0,93	1600	0,25
	3	139,5	39,6	19,6	0,96	1470	0,24
	4	139,5	40,0	19,9	0,94	1520	0,12
	5	139,5	39,9	20,0	0,94	1550	0,25
	MW	139,5	39,8	20,0	0,94	1520	0,20
8	1	139,5	39,6	20,1	0,95	2010	0,30
	2	139,7	39,7	20,2	0,95	2000	0,28
	3	139,4	39,8	20,2	0,93	1790	0,33
	MW	139,5	39,7	20,2	0,94	1930	0,30
14	1	139,3	39,7	19,7	0,91	2100	0,38
	2	139,4	39,9	19,2	0,92	2160	0,45
	3	139,1	39,7	19,7	0,93	2250	0,50
	4	139,5	39,6	20,3	0,89	1980	0,07
	MW	139,3	39,7	19,7	0,91	2120	0,35
27	1	140,1	19,7	39,8	0,92	2250	0,47
	2	140,0	19,7	39,7	0,91	2240	0,54
	3	139,8	19,6	39,6	0,92	2280	0,53
	4	140,6	20,1	39,6	0,95	2390	0,55
	5	139,7	20,0	39,6	0,93	2330	0,52
	MW	140,0	19,8	39,7	0,93	2300	0,52
90	1	139,6	40,0	22,4	0,87	2100	0,48
	2	139,7	39,8	21,7	0,89	2200	0,46
	3	139,3	40,0	21,1	0,88	2110	0,23
	4	139,6	40,1	20,8	0,87	2160	0,47
	5	139,4	39,8	21,3	0,87	2060	0,45
	6	139,8	40,0	20,5	0,87	2070	0,41
	MW	139,6	39,9	21,3	0,87	2120	0,45
194	1	139,2	39,6	20,1	0,85	1800	0,35

MW Mittelwert

Tabelle A33: Ultraleichtputz ULP  
 Untersuchungen zum dynamischen E-Modul und  
 zur Zugfestigkeit an Prismen  
 Serien CZ, DZ und FZ, Prüfalter 28 d

Serie	Prisma	Maße			$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_z$
		l	b	h			
-		mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8
CZ	1	139,9	20,2	40,0	0,82	1070	0,17
DZ	1	140,3	10,5	39,6	0,92	2460	0,64
	2	140,2	10,4	39,7	0,88	2360	0,59
	3	141,2	10,9	39,7	0,92	2570	0,71
	MW	140,6	10,6	39,7	0,90	2460	0,65
FZ	1	141,2	31,0	40,5	0,86	1710	0,23
	2	139,6	28,5	39,9	0,91	2030	0,39
	3	140,0	31,1	40,1	0,87	1720	0,28
	4	140,1	29,0	39,8	0,88	2010	0,43
	5	139,8	29,3	39,9	0,89	1650	0,23
	6	140,5	30,2	40,0	0,85	1650	0,21
	MW	140,2	29,9	40,0	0,88	1800	0,30

MW Mittelwert

**Tabelle A34:** Normalputz NP  
 Untersuchungen zu bruchmechanischen Materialparametern an Prismen  
 Serie A

Prüfalter	Prisma	Maße				$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_{BZ,N}$	$G_F$	$\beta_{D,III}$
		l	b	h	$h_{lig}$					
d	-	mm				kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/m	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	1	139,3	39,8	21,7	17,5	1,76	3880	1,30	18,5	5,07
	2	139,5	39,7	21,6	17,7	1,75	3900	1,28	16,5	5,09
	3	139,6	39,8	21,7	16,5	1,75	3870	1,43	20,9	4,49
	4	139,4	39,8	19,7	15,5	1,78	3860	1,63	21,0	4,38
	5	139,5	39,6	21,2	17,0	1,81	4040	1,54	21,7	4,91
	MW	139,5	39,7	21,2	16,8	1,77	3910	1,43	19,7	4,79
5	1	139,7	39,9	20,5	15,3	1,74	3320	1,71	16,8	7,10
	2	139,6	39,8	20,7	15,9	1,77	3290	1,90	20,4	8,01
	3	139,6	39,9	21,6	17,0	1,77	3180	1,90	17,5	5,99
	4	139,8	39,8	21,6	16,3	1,75	3190	1,86	21,5	7,54
	MW	139,7	39,9	21,1	16,1	1,76	3240	1,84	19,1	7,16
7	1	140,1	39,9	22,0	16,5	1,75	3020	1,93	21,9	8,13
	2	139,8	40,1	22,0	16,5	1,76	2870	1,90	22,0	8,67
	3	139,8	39,8	20,1	15,4	1,74	2950	1,76	21,1	7,02
	4	139,3	40,2	20,7	15,7	1,73	2970	1,78	23,4	6,64
	MW	139,8	40,0	21,2	16,0	1,75	2950	1,84	22,1	7,62
14	1	139,8	40,0	20,0	14,5	1,72	2950	1,81	20,9	8,30
	2	139,8	39,9	21,7	16,3	1,69	2690	1,72	22,3	9,69
	3	139,6	39,9	21,2	16,1	1,76	3010	1,52	20,3	9,49
	4	139,8	40,1	19,9	15,0	1,76	3090	1,76	22,7	9,00
	MW	139,8	40,0	20,7	15,5	1,73	2940	1,70	21,6	9,12
26	1	139,7	40,1	20,7	15,9	1,74	2700	2,27	22,2	12,03
	2	139,3	39,8	20,0	14,8	1,73	2750	1,97	19,4	8,55
	3	139,5	40,0	20,2	15,2	1,77	2670	2,17	23,5	11,28
	4	139,8	39,8	20,2	15,9	1,80	2760	2,08	23,6	8,16
	MW	139,6	39,9	20,3	15,5	1,76	2720	2,12	22,2	10,01

MW Mittelwert

Tabelle A34: (Fortsetzung)

Prüfalter	Prisma	Maße				$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_{BZ,N}$	$G_F$	$\beta_{D,III}$
		l	b	h	$h_{lig}$					
d	-	mm				kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/m	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
90	1	140,4	39,9	21,6	16,7	1,73	2600	3,00	16,4	13,45
	2	139,8	39,9	19,5	14,9	1,71	2620	3,39	19,4	12,34
	3	140,1	39,8	20,5	14,9	1,73	2550	3,08	22,1	9,92
	MW	140,1	39,9	20,5	15,5	1,73	2590	3,16	19,3	11,91
180	1	139,7	39,8	20,4	15,2	1,72	2550	2,93	22,8	15,83
	2	139,8	39,9	21,3	15,6	1,73	2650	2,98	25,6	13,43
	3	140,0	39,9	21,2	16,0	1,71	2690	2,79	38,1	10,48
	4	140,0	40,1	20,6	15,1	1,74	2680	2,77	42,5	9,63
	MW	139,9	39,9	20,9	15,5	1,72	2640	2,87	32,3	12,34

MW Mittelwert

Tabelle A35: Normalputz NP  
 Untersuchungen zu bruchmechanischen Materialparametern an Prismen  
 Serien B und C, Prüfalter 26 d

Serie	Prisma	Maße				$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_{BZ,N}$	$G_F$	$\beta_{D,III}$
		l	b	h	$h_{lig}$					
-	-	mm				kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/m	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
B	1	139,7	40,1	21,5	15,1	1,68	2700	2,45	24,3	8,71
	2	139,1	39,8	21,8	16,5	1,75	2820	2,26	25,4	8,98
	3	139,4	39,9	20,4	15,3	1,78	2890	2,24	26,5	7,76
	4	139,4	39,8	19,3	14,1	1,73	2750	2,31	24,1	7,57
	5	139,6	39,8	20,6	15,0	1,76	2720	2,13	23,9	9,54
	MW	139,4	39,9	20,7	15,2	1,74	2770	2,28	24,8	8,51
C	1	139,9	40,0	20,0	15,0	1,63	3410	1,71	19,2	6,86
	2	139,8	40,0	20,1	14,8	1,60	3570	1,55	16,9	6,44
	3	139,9	40,0	20,3	14,3	1,61	3450	1,44	22,7	6,24
	4	140,2	40,5	20,0	14,9	1,60	3490	1,49	18,3	5,84
	MW	140,0	40,1	20,1	14,8	1,61	3480	1,55	19,3	6,35

MW Mittelwert

Tabelle A36: Normalputz NP  
 Untersuchungen zu bruchmechanischen Material-  
 parametern an Prismen  
 Serien D, E und F, Prüfalter 27 d

Serie	Prisma	Maße			$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_{BZ,N}$
		l	b	h			
-		mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8
D	1	139,9	40,0	11,6	1,66	2430	3,23
	2	139,9	40,1	10,3	1,64	2660	2,94
	3	140,0	40,4	10,2	1,67	2540	3,21
	4	139,4	39,7	11,4	1,69	2450	3,33
	5	140,0	40,1	10,8	1,71	2550	2,99
	MW	139,8	40,1	10,9	1,67	2530	3,14
E	1	139,3	40,0	19,9	1,80	2670	3,65
	2	139,4	40,1	19,5	1,68	2630	3,23
	3	139,9	40,1	20,5	1,71	2710	3,12
	4	139,1	39,8	20,9	1,75	2790	3,00
	MW	139,4	40,0	20,2	1,74	2700	3,25
F	1	140,4	39,9	30,1	1,73	2750	2,70
	2	140,3	40,1	30,6	1,74	2680	2,86
	3	140,7	40,1	30,1	1,69	2640	2,63
	4	140,2	40,1	30,5	1,72	2630	2,86
	MW	140,4	40,1	30,3	1,72	2680	2,77

MW Mittelwert

Tabelle A37: Leichtputz LP  
 Untersuchungen zu bruchmechanischen Materialparametern an Prismen  
 Serie A

Prüfalter	Prisma	Maße				$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_{BZ,N}$	$G_F$	$\beta_{D,III}$
		l	b	h	$h_{lig}$					
d	-	mm				kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/m	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	1	139,4	39,7	20,2	15,1	1,37	3900	0,88	23,8	4,40
	2	139,3	39,7	20,3	15,8	1,43	3920	0,94	23,8	3,82
	3	139,3	39,4	20,9	15,5	1,39	3520	1,15	30,4	4,84
	MW	139,3	39,6	20,5	15,5	1,40	3780	0,99	26,0	4,35
5	1	139,3	39,7	20,6	15,5	1,51	2890	1,69	32,0	6,25
	2	139,5	39,5	21,1	16,1	1,37	3140	1,30	25,9	5,28
	MW	139,4	39,6	20,9	15,8	1,44	3010	1,50	29,0	5,77
7	1	139,5	39,8	22,0	16,7	1,41	2940	1,47	29,2	5,98
	2	139,4	39,9	20,0	16,0	1,36	2870	1,32	27,1	5,79
	3	139,5	39,8	20,2	15,7	1,44	2820	1,37	26,2	5,47
	4	139,4	39,8	20,5	15,4	1,42	2880	1,56	30,8	5,89
	MW	139,5	39,8	20,7	16,0	1,41	2880	1,43	28,3	5,78
14	1	140,2	39,8	20,3	16,1	1,36	2680	1,50	35,0	7,73
	2	140,3	39,8	21,9	18,3	1,35	2570	1,38	35,5	7,57
	3	140,1	40,0	20,0	15,5	1,36	2760	1,41	39,4	7,84
	4	140,2	39,8	20,1	15,3	1,41	2660	1,68	36,6	8,66
	MW	140,2	39,9	20,6	16,3	1,37	2670	1,49	36,6	7,95
26	1	139,4	39,8	20,2	15,5	1,37	2680	1,55	33,5	6,32
	2	139,4	39,7	20,2	15,0	1,37	2740	1,79	33,8	6,81
	3	136,6	40,0	21,2	15,5	1,37	2780	1,55	37,4	6,65
	4	139,3	40,1	20,8	15,7	1,33	2630	1,46	38,2	6,43
	5	139,8	39,6	22,4	17,0	1,34	2710	1,47	44,0	6,24
	MW	138,9	39,8	21,0	15,7	1,36	2710	1,56	37,4	6,49
90	1	139,9	40,0	20,7	15,3	1,41	2520	2,53	36,6	10,35
	2	139,5	39,9	20,5	15,7	1,48	2450	2,95	35,6	10,97
	3	139,8	40,0	20,0	14,5	1,46	2340	2,57	36,2	9,64
	MW	139,7	40,0	20,4	15,2	1,45	2440	2,68	36,1	10,32
183	1	139,6	39,5	20,7	15,7	1,37	2210	2,52	33,0	10,14
	2	139,6	40,0	20,1	13,9	1,38	2230	3,29	37,4	9,40
	3	139,4	39,7	20,5	15,4	1,41	2210	2,62	38,4	11,96
	4	139,4	39,8	20,4	15,6	1,50	2220	2,90	45,9	11,86
	MW	139,5	39,8	20,4	15,2	1,42	2220	2,83	38,7	10,84

MW Mittelwert

**Tabelle A38:** Leichtputz LP  
 Untersuchungen zu bruchmechanischen Materialparametern an Prismen  
 Serien B und C, Prüfmuster 26 d

Serie	Prisma	Maße				$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_{BZ,N}$	$G_F$	$\beta_{D,III}$
		l	b	h	$h_{lig}$					
-		mm				kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/m	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
B	1	139,4	39,6	20,1	15,0	1,39	2560	1,56	36,6	8,04
	2	140,0	39,5	20,6	15,0	1,38	2730	1,61	31,7	6,59
	3	139,8	39,6	19,5	14,8	1,40	2800	1,59	23,8	6,08
	4	139,1	39,6	19,5	15,0	1,34	2710	1,60	26,7	5,47
	MW	139,6	39,6	19,9	15,0	1,38	2700	1,59	29,7	6,54
C	1	140,1	40,0	20,5	15,0	1,29	3870	0,76	24,4	3,70
	2	140,0	40,0	20,4	14,8	1,30	3570	0,80	20,9	3,89
	3	140,0	40,0	20,2	14,8	1,30	3760	0,89	24,7	3,76
	4	140,0	40,1	20,5	14,8	1,33	3490	0,92	24,5	4,29
	5	140,1	40,0	21,0	15,4	1,30	3710	0,81	23,7	3,90
	MW	140,0	40,0	20,5	15,0	1,30	3680	0,83	23,6	3,91

MW Mittelwert

Tabelle A39: Leichtputz LP  
 Untersuchungen zu bruchmechanischen Material-  
 parametern an Prismen  
 Serien D, E und F, Prüfalter 27 d

Serie	Prisma	Maße			$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_{BZ,N}$
		l	b	h			
-		mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8
D	1	140,2	39,7	10,9	10,9	2320	1,46
	2	140,7	39,5	11,2	11,2	2630	1,89
	3	140,4	39,6	11,6	11,6	2730	1,98
	4	140,7	39,7	10,8	10,8	2560	0,73
	MW	140,5	39,6	11,1	11,1	2560	1,52
E	1	139,5	39,7	19,4	19,4	2710	2,01
	2	139,5	40,0	21,2	21,2	2790	1,60
	3	139,4	40,1	20,0	20,0	2700	1,92
	4	139,4	39,7	21,6	21,6	2590	1,87
	5	139,5	40,2	20,3	20,3	2730	1,74
	MW	139,5	39,9	20,5	20,5	2700	1,83
F	1	139,7	40,1	31,6	31,6	2580	1,73
	2	139,6	39,7	30,6	30,6	2580	1,85
	3	139,8	39,6	30,4	30,4	2560	1,84
	4	139,8	39,7	30,3	30,3	2480	1,83
	MW	139,7	39,8	30,7	30,7	2550	1,81

MW Mittelwert

**Tabelle A40:** Ultraleichtputz ULP  
 Untersuchungen zu bruchmechanischen Materialparametern an Prismen  
 Serie A

Prüfalter	Prisma	Maße				$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_{BZ,N}$	$G_F$	$\beta_{D,III}$
		l	b	h	$h_{lig}$					
d	-	mm				kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/m	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	1	139,3	39,8	21,0	15,5	0,97	5370	0,34	16,7	1,17
	2	139,5	39,6	20,0	15,7	0,97	6260	0,26	18,7	1,06
	3	139,7	39,7	20,1	15,5	0,96	6860	0,28	13,9	0,81
	MW	139,5	39,7	20,4	15,6	0,97	6160	0,30	16,4	1,01
5	1	139,0	39,8	19,8	14,0	0,98	4970	0,36	11,5	1,33
	2	139,3	39,4	19,4	14,2	0,96	4990	0,45	34,4	1,02
	3	139,6	39,7	21,6	14,8	0,94	4580	0,40	23,3	1,26
	4	139,4	39,8	20,0	15,0	0,94	4740	0,33	17,0	1,28
	5	139,6	39,7	19,8	15,0	0,94	4610	0,38	24,9	1,44
	MW	139,4	39,7	20,1	14,6	0,95	4780	0,39	22,2	1,27
8	1	139,4	39,8	19,6	14,9	0,96	3830	0,47	14,8	1,84
	2	139,6	39,6	19,6	15,0	0,93	3730	0,39	22,3	1,48
	3	139,5	39,8	20,1	15,1	0,92	3630	0,46	21,3	1,48
	4	139,8	39,8	21,2	15,0	0,90	3950	0,42	16,7	1,26
	5	139,3	39,9	21,0	15,0	0,91	3950	0,42	16,4	1,47
	MW	139,5	39,8	20,3	15,0	0,93	3820	0,43	18,3	1,51
14	1	139,6	39,6	19,6	15,0	0,93	3730	0,54	31,9	1,48
	2	139,5	39,8	20,1	15,1	0,92	3630	0,51	23,1	1,48
	3	139,8	39,8	21,2	15,0	0,90	3950	0,57	36,9	1,26
	MW	139,6	39,7	20,3	15,0	0,92	3770	0,54	30,7	1,40
27	1	139,9	39,6	20,1	15,0	0,90	2990	0,62	37,3	3,35
	2	139,8	39,7	19,7	15,5	0,91	3040	0,64	38,3	2,97
	3	139,6	39,6	20,3	15,1	0,88	2880	0,69	30,0	3,13
	MW	139,8	39,6	20,0	15,2	0,90	2970	0,65	35,2	3,15
90	1	139,9	40,0	19,7	13,8	0,90	3090	0,87	29,9	2,80
	2	139,8	40,0	20,8	14,8	0,89	3100	0,83	37,0	2,90
	MW	139,9	40,0	20,3	14,3	0,89	3100	0,85	33,4	2,85
194	1	139,2	39,6	19,7	13,5	0,84	3460	0,49	23,6	2,30
	2	139,1	39,6	20,4	13,7	0,85	3250	0,68	27,7	2,44
	3	139,5	39,5	20,2	14,1	0,84	3150	0,58	24,8	1,91
	MW	139,2	39,6	20,0	13,8	0,86	3290	0,58	25,4	2,22

MW Mittelwert

**Tabelle A41:** Ultraleichtputz ULP  
 Untersuchungen zu bruchmechanischen Materialparametern an Prismen  
 Serien B und C, Prüfalter 27 d

Serie	Prisma	Maße				$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_{BZ,N}$	$G_F$	$\beta_{D,III}$
		l	b	h	$h_{lig}$					
-		mm				kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/m	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
B	1	139,9	39,5	19,9	14,9	0,91	3030	0,67	20,8	2,94
	2	139,9	39,5	19,9	14,6	0,90	2830	0,82	27,5	3,22
	3	139,6	39,6	20,9	14,9	0,88	2980	0,84	36,4	3,26
	MW	139,8	39,5	20,2	14,8	0,90	2950	0,77	28,2	3,14
C	1	140,2	39,9	20,7	15,0	0,82	4930	0,32	14,2	1,04
	2	140,1	40,2	20,8	15,1	0,81	5110	0,31	15,4	1,08
	3	140,2	39,9	20,5	15,0	0,81	4970	0,34	14,4	0,98
	4	140,1	39,9	20,4	15,2	0,83	4780	0,37	19,4	0,99
	MW	140,2	40,0	20,6	15,1	0,82	4950	0,34	15,9	1,02

MW Mittelwert

**Tabelle A42:** Ultraleichtputz ULP  
 Untersuchungen zu bruchmechanischen Material-  
 parametern an Prismen  
 Serien D, E und F, Prüfalter 28 d

Serie	Prisma	Maße			$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_{BZ,N}$
		l	b	h			
-		mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8
D	1	140,8	39,6	11,6	11,2	2480	1,34
	2	140,8	40,0	11,1	11,1	2580	1,09
	3	140,1	39,5	10,3	10,8	2640	1,40
	4	139,9	39,7	10,5	10,6	2730	1,09
	5	140,1	39,7	10,4	10,5	2600	1,07
	MW	140,3	39,7	10,8	10,8	2610	1,20
E	1	139,4	39,8	20,7	20,0	2890	0,94
	2	139,8	39,9	21,4	20,9	3020	0,84
	3	140,0	39,7	20,1	20,0	2980	0,74
	4	139,8	39,8	19,6	19,4	3070	0,91
	MW	139,8	39,8	20,5	20,1	2990	0,86
F	1	140,0	39,9	30,1	30,2	3670	0,60
	2	139,9	39,7	29,8	29,6	3150	0,76
	MW	140,0	39,8	30,0	29,9	3410	0,68

MW Mittelwert

**Tabelle A43:** Normalputz NP  
Zusammenfassung der bruchmechanischen Materialparameter

Prüfalter	Serie	Versuch			Simulation Versuche (multilinear)			Optimierung mit Hordijk	
		$\beta_z$	$G_F$	$l_{ch}$	$q$	$\beta_z$	$G_F$	$\beta_z$	$G_F$
d	-	N/mm <sup>2</sup>	N/m	mm	-	N/mm <sup>2</sup>	N/m	N/mm <sup>2</sup>	N/m
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	A	0,90	19,7	158	1,58	1,41	15,9	1,41	7,6
5		1,16	19,1	109	1,60	2,03	15,3	2,05	8,7
7		1,22	22,1	122	1,63	1,54	16,2	1,54	10,9
14		1,40	21,6	90	1,62	1,17	19,5	1,17	12,8
26		1,68	22,2	70	1,61	1,86	19,0	1,87	11,8
26	B	1,68	24,8	79	1,60	1,87	21,3	1,89	12,5
26	C	1,06	19,3	104	1,66	0,73	19,6	0,73	13,9
90	A	1,67	19,3	64	1,75	3,43	13,3	3,47	10,4
180		1,83	19,7	89	1,58	2,66	21,2	2,67	10,6



**Tabelle A44:** Leichtputz LP  
Zusammenfassung der bruchmechanischen Materialparameter

Prüfalter	Serie	Versuch			Simulation Versuche (multilinear)			Optimierung mit Hordijk	
		$\beta_z$	$G_F$	$l_{ch}$	$q$	$\beta_z$	$G_F$	$\beta_z$	$G_F$
d	-	N/mm <sup>2</sup>	N/m	mm	-	N/mm <sup>2</sup>	N/m	N/mm <sup>2</sup>	N/m
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	A	0,71	26,0	217	1,57	0,61	34,0	0,60	14,5
5		0,77	29,0	257	1,55	1,16	31,7	1,15	11,4
7		0,86	28,3	214	1,55	1,35	30,1	1,33	10,5
14		0,93	36,6	242	1,56	1,13	48,9	(0,99)	(22,8)
26		1,08	37,4	185	1,53	1,39	43,9	1,37	13,2
26	B	1,08	29,7	147	1,54	1,35	31,5	1,33	9,9
26	C	0,64	23,6	221	1,60	0,41	30,7	0,41	16,8
90	A	1,27	36,1	157	1,55	2,21	33,5	2,19	12,0
183		1,61	38,7	115	1,56	2,46	35,4	2,45	13,8

Tabelle A45: Ultraleichtputz ULP  
Zusammenfassung der bruchmechanischen Materialparameter

Prüfalter	Serie	Versuch			Simulation Versuche (multilinear)			Optimierung mit Hordijk	
		$\beta_z$	$G_F$	$l_{ch}$	$q$	$\beta_z$	$G_F$	$\beta_z$	$G_F$
d	-	N/mm <sup>2</sup>	N/m	mm	-	N/mm <sup>2</sup>	N/m	N/mm <sup>2</sup>	N/m
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	A	0,09	16,4	730	1,50	0,10	57,9	(0,10)	(11,2)
5		0,20	22,2	410	1,37	0,36	46,9	0,31	1,5
8		0,30	18,3	225	1,42	0,42	28,7	0,38	1,9
14		0,35	30,7	237	1,41	0,56	55,4	0,53	2,3
27		0,52	35,2	147	1,41	0,75	56,2	0,67	3,2
27	B	0,52	28,2	118	1,45	0,73	36,2	0,68	3,5
27	C	0,17	15,9	206	1,43	0,22	46,8	0,20	3,4
90	A	0,45	33,4	214	1,43	0,64	68,0	0,59	5,3
194		0,35	25,4	179	1,40	0,50	36,4	0,44	1,7



**Tabelle A46:** Normalputz NP  
Untersuchungen zum Haftverbund

Prüfalter	Probe	Maße		$\beta_{HZ}$	$G_F$	Bruchbild	
		l	b				
d	-	mm		N/mm <sup>2</sup>	N/m	%	
1	2	3	4	5	6	7	8
3	1	90,2	91,0	0,74	n. b.	90	10
	2	90,7	90,3	0,25	7,1	70	30
	MW	90,5	90,6	0,50	7,1	-	
5	1	90,1	89,8	0,94	n. b.	30	70
	2	88,7	88,7	0,73		50	50
	3	89,1	89,1	0,71		40	60
	MW	89,3	89,2	0,79	n. b.	-	
7	1	90,5	89,8	0,93	4,3	50	50
	2	89,9	89,7	0,84	3,5	20	80
	3	90,1	90,4	0,77	3,9	60	40
	MW	90,2	90,0	0,84	3,9	-	
14	1	89,9	89,3	0,91	n. b.	60	40
	2	89,7	89,6	1,00		80	20
	3	89,9	89,5	1,07	5,1	40	60
	MW	89,8	89,5	0,99	5,1	-	
26	1	89,4	88,6	0,97	n. b.	98	2
	2	90,0	88,6	1,69		95	5
	3	89,9	88,9	1,63		80	80
	MW	89,8	88,7	1,43	n. b.	-	
90	1	89,6	90,2	1,62	n. b.	60	40
	2	90,1	91,0	1,39		95	5
	3	90,8	90,1	1,43		95	5
	4	89,7	90,0	1,56		70	30
	MW	90,1	90,3	1,50	n. b.	-	
180	1	89,7	90,0	1,46	n. b.	60	40
	2	89,4	88,7	1,61		95	5
	3	88,0	89,5	1,63		95	5
	MW	89,0	89,4	1,57	n. b.	-	

n. b. nicht bestimmbar, da kein stabiler Versuch

MW Mittelwert



Tabelle A47: Leichtputz LP  
Untersuchungen zum Haftverbund

Prüfalter	Probe	Maße		$\beta_{HZ}$	$G_F$	Bruchbild	
		l	b				
d	-	mm		N/mm <sup>2</sup>	N/m	%	
1	2	3	4	5	6	7	8
3	1	90,7	88,8	0,17	1,1	100	0
	2	89,5	89,9	0,28	1,7	100	0
	3	89,4	89,5	0,15	2,1	100	0
	4	88,0	87,6	0,13	2,1	100	0
	MW	89,4	89,0	0,18	1,7	-	
5	1	88,3	90,0	0,28	3,3	50	50
	2	88,0	89,3	0,35	n. b.	60	40
	3	87,4	89,4	0,42	2,4	85	15
	MW	87,9	89,6	0,35	2,8	-	
7	1	89,2	91,3	0,24	n. b.	70	30
	2	88,1	87,5	0,08	2,2	80	20
	3	89,9	88,3	0,44	n. b.	30	70
	MW	89,1	89,0	0,26	2,2	-	
14	1	89,6	89,4	0,44	n. b.	40	60
	2	89,2	90,0	0,39		85	15
	3	89,4	90,5	0,51		85	15
	MW	89,4	90,0	0,45	n. b.	-	
26	1	89,8	89,8	0,28	3,2	20	80
	2	89,1	89,5	0,42	3,1	50	50
	MW	89,4	89,6	0,35	3,2	-	
90	1	90,0	90,3	0,18	n. b.	50	50
	2	90,4	89,8	0,75		50	50
	3	90,4	89,4	0,24		90	10
	MW	90,3	89,8	0,39	n. b.	-	
183	1	88,4	88,6	0,55	n. b.	70	30
	2	88,8	88,2	0,54	4,3	80	20
	3	88,2	88,5	0,54	n. b.	0	100
	MW	88,5	88,4	0,54	4,3	-	

n. b. nicht bestimmbar, da kein stabiler Versuch

MW Mittelwert

**Tabelle A48:** Ultraleichtputz ULP  
Untersuchungen zum Haftverbund

Prüfalter	Probe	Maße		$\beta_{HZ}$	$G_F$	Bruchbild	
		l	b				
d	-	mm		N/mm <sup>2</sup>	N/m	%	
1	2	3	4	5	6	7	8
3	1	89,4	89,5	0,17	n. b.	0	100
	2	89,4	89,6	0,16	1,7	0	100
	MW	89,4	89,6	0,16	1,7	-	
5	1	88,6	88,7	0,18	2,1	10	90
	2	89,0	89,2	0,22	1,5	0	100
	3	88,8	89,9	0,23	n. b.	0	100
	MW	88,8	89,3	0,21	1,8	-	
8	1	89,1	89,5	0,22	1,3	0	100
	2	89,1	89,1	0,21	2,6	10	90
	3	89,0	88,6	0,20	2,1	5	95
	MW	89,1	89,0	0,21	2,0	-	
14	1	88,3	89,1	0,27	2,2	0	100
	2	89,4	88,7	0,34	2,7	0	100
	3	88,4	88,7	0,28	2,3	0	100
	MW	88,7	88,9	0,30	2,4	-	
27	1	90,0	89,3	0,47	4,0	0	100
	2	90,0	89,8	0,48	3,6	0	100
	3	88,7	88,9	0,47	n. b.	0	100
	MW	89,6	89,3	0,47	3,8	-	
90	1	87,6	89,4	0,48	3,9	0	100
	2	88,1	87,5	0,52	n. b.	0	100
	3	87,1	87,2	0,52		0	100
	MW	87,6	88,0	0,50	3,9	-	
194	1	88,9	89,4	0,52	n. b.	0	100
	2	98,1	89,0	0,42		0	100
	3	88,9	89,8	0,55		0	100
	MW	92,0	89,4	0,50	n. b.	-	

n. b. nicht bestimmbar, da kein stabiler Versuch

MW Mittelwert

**Tabelle A49:** Normalputz NP  
 Untersuchungen zu Rohdichte (lufttrocken),  
 Trockenrohichte und Feuchtegehalt

Prüfalter	Prisma	Maße			$\rho_l$	$\rho_d$	$h_m$
		l	b	h			
d	-	mm			kg/dm <sup>3</sup>		M.-%
1	2	3	4	5	6	7	8
2	1	140,0	39,7	20,3	1,81	1,66	8,7
	2	139,7	39,6	21,0	1,79	1,65	7,9
	3	139,4	39,8	22,0	1,80	1,64	9,9
	MW	139,7	39,7	21,1	1,80	1,65	8,8
4	1	139,5	39,7	22,7	1,77	1,69	4,8
	2	139,4	39,8	21,0	1,75	1,68	4,0
	3	139,7	39,8	20,7	1,74	1,67	4,0
	MW	139,5	39,8	21,5	1,75	1,68	4,3
6	1	139,7	39,7	22,7	1,71	1,64	4,2
	2	139,4	39,7	21,7	1,72	1,65	4,4
	3	139,9	39,9	22,6	1,73	1,65	4,9
	MW	139,7	39,8	22,3	1,72	1,64	4,5
13	1	139,6	40,0	20,4	1,70	1,65	2,8
	2	139,6	39,7	21,9	1,70	1,67	2,2
	3	139,4	39,8	21,8	1,72	1,68	2,7
	MW	139,5	39,8	21,4	1,71	1,67	2,6
25	1	139,1	40,2	21,6	1,67	1,63	2,3
	2	140,3	39,8	21,1	1,73	1,69	2,4
	3	140,6	40,0	22,4	1,66	1,62	2,9
	MW	140,0	40,0	21,7	1,69	1,65	2,5
89	1	140,0	40,1	22,8	1,67	1,65	1,2
	2	139,7	40,5	20,4	1,70	1,68	1,3
	3	139,8	40,0	19,7	1,73	1,71	1,4
	MW	139,9	40,2	21,0	1,70	1,68	1,3
179	1	140,3	39,9	20,3	1,75	1,73	1,1
	2	139,8	40,0	20,5	1,69	1,68	0,9
	3	139,8	39,9	22,5	1,70	1,68	0,9
	MW	139,9	39,9	21,1	1,71	1,70	1,0

MW Mittelwert

**Tabelle A50:** Leichtputz LP  
 Untersuchungen zu Rohdichte (lufttrocken),  
 Trockenrohichte und Feuchtegehalt

Prüfalter	Prisma	Maße			$\rho_l$	$\rho_d$	$h_m$
		l	b	h			
d	-	mm			kg/dm <sup>3</sup>		M.-%
1	2	3	4	5	6	7	8
2	1	139,5	39,7	21,3	1,37	1,30	5,5
	2	139,1	39,8	20,2	1,40	1,32	6,2
	3	139,3	39,5	20,8	1,39	1,32	5,7
	MW	139,3	39,7	20,8	1,39	1,31	5,8
4	1	139,8	39,6	21,2	1,43	1,36	4,5
	2	139,7	39,6	20,7	1,49	1,42	5,1
	3	139,4	39,8	20,6	1,44	1,39	3,6
	MW	139,6	39,7	20,8	1,45	1,39	4,4
6	1	139,1	39,4	21,8	1,36	1,29	5,7
	2	139,2	39,7	20,1	1,45	1,39	4,3
	3	139,3	39,6	21,0	1,42	1,36	4,5
	MW	139,2	39,6	21,0	1,41	1,34	4,9
13	1	139,5	39,6	21,1	1,34	1,29	3,7
	2	139,8	40,0	20,3	1,40	1,35	3,8
	3	139,3	39,5	22,1	1,33	1,28	3,8
	MW	139,5	39,7	21,2	1,36	1,31	3,8
25	1	139,3	39,5	20,9	1,42	1,40	1,5
	2	139,5	39,8	23,0	1,35	1,33	1,7
	3	139,5	39,6	21,6	1,36	1,35	1,0
	MW	139,4	39,6	21,8	1,38	1,36	1,4
89	1	140,0	39,7	21,3	1,41	1,38	2,1
	2	140,6	39,5	20,4	1,48	1,45	1,9
	3	139,7	39,9	20,0	1,37	1,35	1,7
	MW	140,1	39,7	20,6	1,42	1,39	1,9
182	1	140,4	39,6	21,0	1,39	1,36	1,6
	2	140,4	40,0	20,9	1,48	1,45	1,7
	3	139,6	39,8	20,9	1,39	1,37	1,5
	MW	140,1	39,8	20,9	1,42	1,40	1,6

MW Mittelwert

**Tabelle A51:** Ultraleichtputz ULP  
 Untersuchungen zu Rohdichte (lufttrocken),  
 Trockenrohichte und Feuchtegehalt

Prüfalter	Prisma	Maße			$\rho_l$	$\rho_d$	$h_m$
		l	b	h			
d	-	mm			kg/dm <sup>3</sup>		M.-%
1	2	3	4	5	6	7	8
2	1	139,4	39,4	21,0	1,02	0,88	15,2
	2	139,4	39,8	21,3	0,96	0,83	15,5
	3	139,3	39,6	21,3	0,97	0,85	14,9
	MW	139,4	39,6	21,2	0,98	0,85	15,2
4	1	139,4	39,5	21,4	0,94	0,84	11,6
	2	139,7	39,5	20,0	0,97	0,87	11,9
	3	139,6	39,7	20,2	0,95	0,84	14,1
	MW	139,6	39,6	20,5	0,96	0,85	12,5
7	1	139,4	39,8	21,6	0,89	0,81	9,7
	2	139,6	39,8	20,5	0,90	0,82	9,6
	3	139,6	39,7	23,0	0,85	0,78	9,6
	MW	139,4	39,8	21,6	0,89	0,81	9,7
13	1	139,1	39,6	21,7	0,90	0,83	8,0
	2	139,7	39,5	20,3	0,92	0,87	5,8
	3	139,5	39,7	20,4	0,91	0,86	5,5
	MW	139,4	39,6	20,8	0,91	0,86	6,5
26	1	139,4	39,6	19,9	0,90	0,88	2,6
	2	139,2	39,6	20,5	0,92	0,89	3,5
	3	139,2	39,5	20,3	0,91	0,88	3,5
	MW	139,3	39,6	20,2	0,91	0,88	3,2
89	1	139,6	39,7	19,4	0,88	0,86	2,1
	2	139,4	39,7	22,0	0,85	0,84	2,2
	3	139,3	39,4	21,1	0,84	0,83	2,1
	MW	139,4	39,6	20,8	0,86	0,84	2,1
193	1	139,7	40,0	20,1	0,85	0,83	2,0
	2	140,0	39,9	19,5	0,87	0,85	2,0
	MW	139,8	39,9	19,8	0,86	0,84	2,0

MW Mittelwert

Tabelle A52: Außenputze  
Quecksilberdruckporosimetrie

Putz	Kennwert	Einheit	Entnahmestelle	Vorbereitung der Putzgrundes					
				keine			mit Kaolin		
				Messung					
				a	b	MW	a	b	MW
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NP	P	%	Putzgrundseite	26,9	29,1	28,0	30,3	30,3	30,3
			Mitte	27,4	28,4	27,9	28,5	27,6	28,1
			Putzoberfläche	27,8	28,4	28,1	30,0	30,1	30,1
	r <sub>m</sub>	µm	Putzgrundseite	1,47	1,34	1,41	1,44	1,44	1,44
			Mitte	1,12	1,08	1,10	1,21	1,09	1,15
			Putzoberfläche	1,15	1,06	1,11	1,27	1,29	1,28
	ρ <sub>HG</sub>	kg/dm <sup>2</sup>	Putzgrundseite	1,77	1,81	1,79	1,74	1,73	1,74
			Mitte	1,75	1,76	1,76	1,73	1,77	1,75
			Putzoberfläche	1,79	1,81	1,80	1,75	1,76	1,75
LP	P	%	Putzgrundseite	40,9	-	40,9	45,0	44,1	44,6
			Mitte	52,8	41,7	47,3	43,7	-	43,7
			Putzoberfläche	50,1	-	50,1	44,4	44,7	44,6
	r <sub>m</sub>	µm	Putzgrundseite	4,56	-	4,56	3,60	3,56	3,58
			Mitte	4,68	3,14	3,91	3,08	-	3,08
			Putzoberfläche	4,14	-	4,14	3,54	3,33	3,44
	ρ <sub>HG</sub>	kg/dm <sup>2</sup>	Putzgrundseite	1,32	-	1,32	1,28	1,27	1,27
			Mitte	1,10	1,38	1,24	1,31	-	1,31
			Putzoberfläche	1,23	-	1,23	1,37	1,40	1,38
ULP	P	%	Putzgrundseite	56,5	57,9	57,2	53,9	56,3	55,1
			Mitte	59,8	58,3	59,1	54,4	54,7	54,5
			Putzoberfläche	55,1	58,3	56,7	57,5	56,1	56,8
	r <sub>m</sub>	µm	Putzgrundseite	1,30	1,25	1,28	1,42	1,34	1,38
			Mitte	1,40	1,38	1,39	1,58	1,69	1,64
			Putzoberfläche	1,46	1,27	1,36	1,42	1,31	1,37
	ρ <sub>HG</sub>	kg/dm <sup>2</sup>	Putzgrundseite	0,90	0,85	0,87	0,86	0,88	0,87
			Mitte	0,88	0,87	0,88	0,86	0,88	0,87
			Putzoberfläche	0,92	0,91	0,91	0,91	0,94	0,92

MW Mittelwert

**Tabelle A53:** Außenputze  
Auswertung der Schwindversuche

NP			LP			ULP		
t	$\varepsilon_{s,\infty}$	R <sup>2</sup>	t	$\varepsilon_{s,\infty}$	R <sup>2</sup>	t	$\varepsilon_{s,\infty}$	R <sup>2</sup>
d	mm/m	-	d	mm/m	-	d	mm/m	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	-0,79	0,99	2	-0,99	0,99	2	-0,62	0,71
4	-0,62	≈ 1	4	-1,02	0,99	4	-0,64	0,19
6	-0,72	0,99	6	-0,85	≈ 1	7	-0,56	0,81
13	-0,43	≈ 1	13	-0,71	≈ 1	13	-0,45	0,36
25	-0,45	≈ 1	25	-0,57	≈ 1	26	-0,18	0,81
89	-0,24	0,97	89	-0,33	0,98	89	-0,16	0,99

**Tabelle A54:** Dünnbettmörtel  
Frisch- und Festmörtelkennwerte

Kombination	t <sup>1)</sup>	L	$\rho_{fr}$	$\rho_d$	$\beta_{BZ}$	$\beta_D$
-	d	Vol.-%	kg/dm <sup>3</sup>		N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7
1	81	12,0	1,69	1,44	3,79	13,7
2, 3	64	15,0	1,64	1,36	3,41	14,7
4, 5	55	8,8	1,70	1,38	3,73	14,7

1) Prüfmörtel Festmörtelkennwerte

**Tabelle A55:** Außenputze  
Frisch- und Festmörtelkennwerte

Kombination	a	L	$\rho_{fr}$	$\rho_l$	$\rho_d$	$\beta_{BZ}$	$\beta_D$
-	mm	Vol.-%	kg/dm <sup>3</sup>			N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8
NP <sup>1)</sup>	173	9,5	1,93	1,69	1,65	3,18	7,66
1	174	11,0	1,90	1,68	1,65	2,71	7,23
3	165	12,0	1,86	1,65	1,61	2,60	6,20
LP <sup>1)</sup>	188	16,0	1,58	1,37	1,32	2,08	5,10
2	193	17,0	1,54	1,32	1,27	2,00	4,80
4	194	17,2	1,38	1,17	1,13	1,37	2,93
ULP <sup>1)</sup>	169	13,4	1,16	0,80	0,79	0,36	0,89
5	172	11,8	1,19	0,84	0,82	0,42	0,88

1) Putze zur Bestimmung der Materialparameter (s. Abschnitt 4.4)

Tabelle A56: Außenputze  
Untersuchungen zum Wassergehalt

Kombination	Wassergehalt
-	M.-%
1	2
NP <sup>1)</sup>	18,7
1	19,0
3	19,9
LP	29,6
2	25,9
4	28,6
ULP	53,9
5	49,9

- 1) Putze zur Bestimmung der Materialparameter (s. Abschnitt 4.4)

**Tabelle A57:** Außenputze  
 Untersuchungen zum dynamischen E-Modul und zur Druckfestigkeit an  
 Prismen vom Putzgrund

Putz	Kombination	t	Prisma	Maße			$\rho_l$	$E_{dyn}$	$\beta_{D,III}$
				l	b	h			
-		d	-	mm			kg/dm <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NP	1	81	1	139,7	39,7	19,7	1,76	9600	13,45
			2	139,7	39,8	19,8	1,74	9500	13,21
			3	139,3	39,8	19,7	1,77	9630	14,07
			4	139,5	39,8	20,3	1,74	9560	13,93
			5	139,4	39,7	19,5	1,77	9770	12,77
			6	139,5	39,8	19,5	1,75	9240	12,90
			MW	139,5	39,8	19,8	1,75	9550	13,39
LP	2	26	1	139,6	39,9	20,8	1,35	5560	6,77
			2	139,6	39,7	20,8	1,40	6060	8,36
			3	139,5	39,8	20,6	1,34	5580	6,53
			4	139,7	39,6	21,4	1,37	5870	7,90
			5	139,9	39,8	20,7	1,37	5770	8,00
			6	139,6	39,5	21,0	1,39	5730	7,30
			MW	139,6	39,7	20,9	1,37	5760	7,48
NP	3	64	1	140,1	39,6	21,3	1,70	8780	12,46
			2	140,3	39,8	20,4	1,72	9020	11,50
			3	139,7	39,7	21,3	1,71	8800	11,68
			4	139,5	39,5	21,3	1,74	8860	12,43
			5	139,5	39,8	20,8	1,72	8910	12,10
			6	139,8	39,7	20,1	1,73	9000	10,84
			MW	133,8	39,7	20,9	1,72	8900	11,83
LP	4	47	1	139,4	39,2	20,3	1,30	5380	5,38
			2	139,3	39,4	20,5	1,30	5370	5,32
			3 <sup>1)</sup>	139,4	39,3	20,3	1,30	5330	3,56
			4	139,1	39,4	20,2	1,34	5440	5,37
			5	139,1	39,4	20,3	1,33	5380	6,88
			6	139,3	39,4	20,7	1,34	5470	5,98
			MW	139,2	39,4	20,4	1,32	5410	5,78
ULP	5	48	1	139,2	39,7	20,0	0,89	1820	2,15
			2	139,1	39,9	20,5	0,87	1840	2,80
			3	139,1	39,9	20,0	0,87	1690	2,26
			4	139,2	39,8	20,0	0,87	1880	2,40
			5	139,3	39,7	19,6	0,87	1990	2,40
			6	139,5	39,6	20,3	0,88	1880	2,72
			MW	139,2	39,8	20,1	0,88	1850	2,46

1) nicht im Mittelwert  
 MW Mittelwert

**Tabelle A58:** Außenputze  
 Untersuchungen zur Trockenrohddichte und zum Feuchtegehalt an Prismen vom Putzgrund

Putz	Kombination	t	Prisma	Maße			$\rho_l$	$\rho_d$	$h_m$
				l	b	h			
-	-	d	-	mm			kg/dm <sup>3</sup>		M.-%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NP	1	81	1	139,4	40,0	19,7	1,71	1,69	1,42
			2	139,4	40,0	20,2	1,76	1,73	1,54
			3	139,6	40,0	20,1	1,72	1,70	1,50
			MW	139,4	40,0	19,7	1,73	1,71	1,48
	3	64	1	138,8	39,7	21,0	1,70	1,68	1,35
			2	140,6	39,8	21,2	1,69	1,67	1,42
			3	139,7	39,7	20,8	1,71	1,69	1,44
			MW	139,7	39,7	21,0	1,70	1,68	1,40
LP	4	47	1	139,4	39,4	20,4	1,32	1,29	2,51
			2	139,3	39,3	20,3	1,29	1,26	2,46
			3	139,0	39,4	20,0	1,31	1,28	2,44
			MW	139,2	39,4	20,2	1,31	1,28	2,47
ULP	5	48	1	139,3	39,9	20,0	0,88	0,86	2,46
			2	139,3	40,0	20,0	0,87	0,85	2,51
			3	139,2	40,0	20,5	0,86	0,84	2,52
			MW	139,3	40,0	20,2	0,87	0,85	2,50

MW Mittelwert



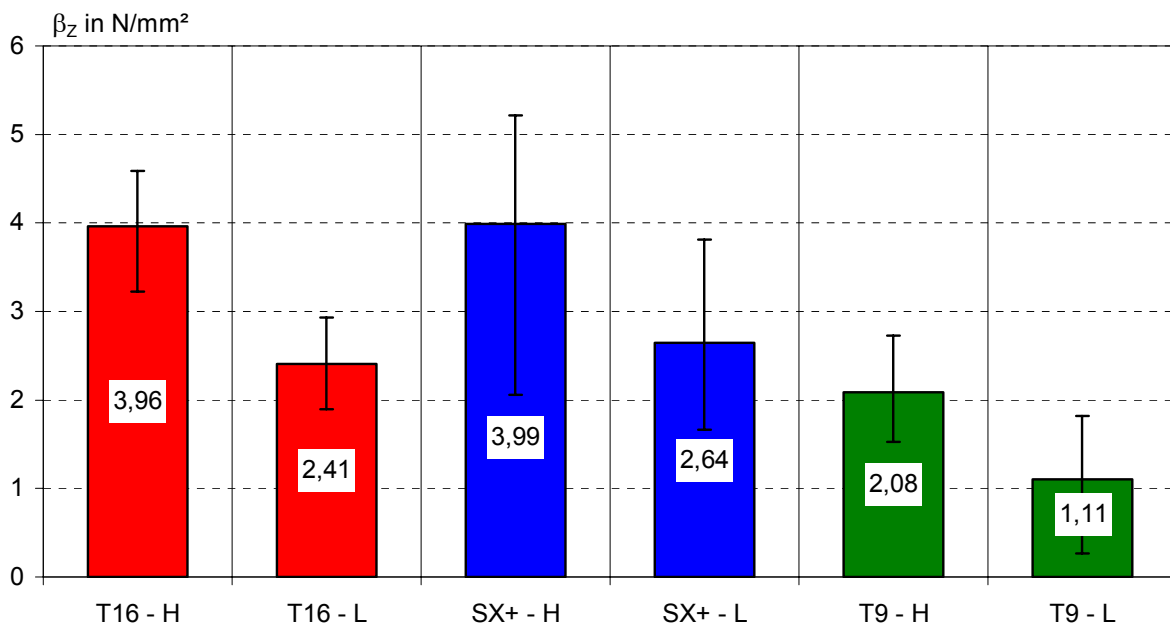
Bild B1: Planhochlochziegel T16



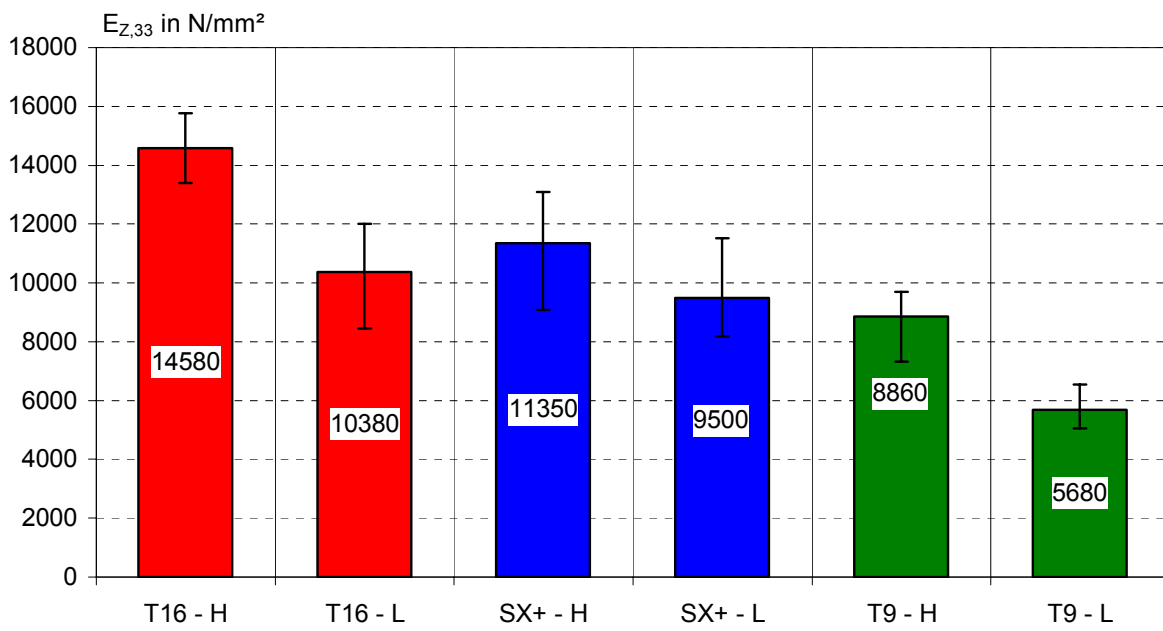
Bild B2: Planhochlochziegel SX+



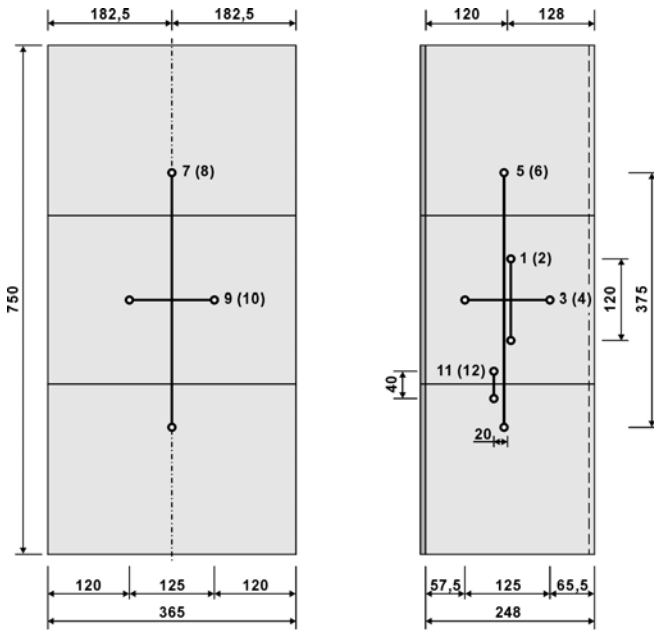
**Bild B3:** Planhochlochziegel T9 (ohne Perlite-Füllung)



**Bild B4:** Zugfestigkeit der Außenscherben in Richtung Steinhöhe H und Steinlänge L Hochlochziegel T16, SX und T9

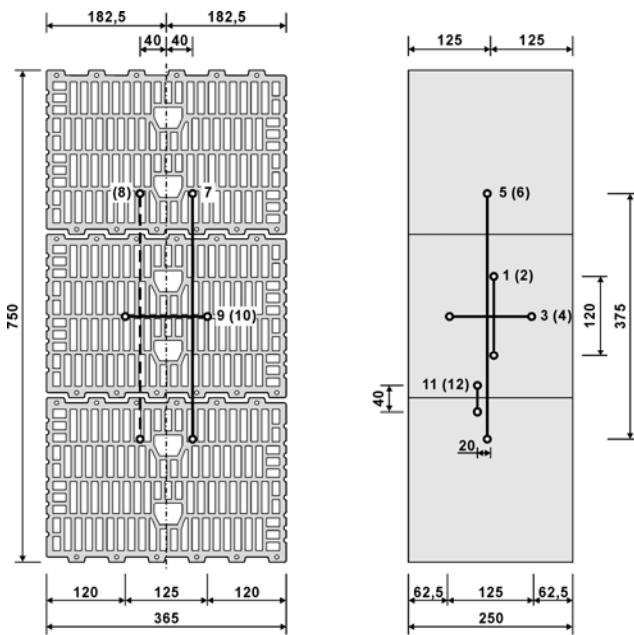


**Bild B5:** E-Moduln der Außenscherben unter Zugbeanspruchung in Richtung Steinhöhe H und Steinlänge L Hochlochziegel T16, SX und T9



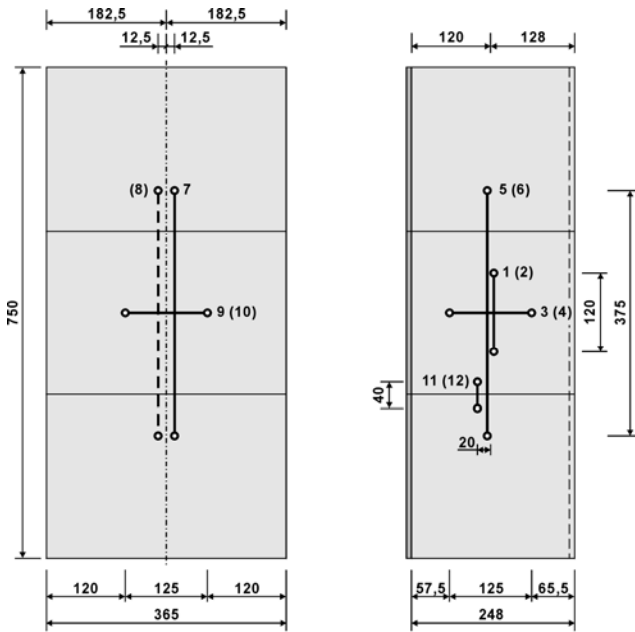
Maße in mm

**Bild B6:** Zugversuche an Dreistein-Prüfkörpern in Richtung Steinhöhe Hochlochziegel T16



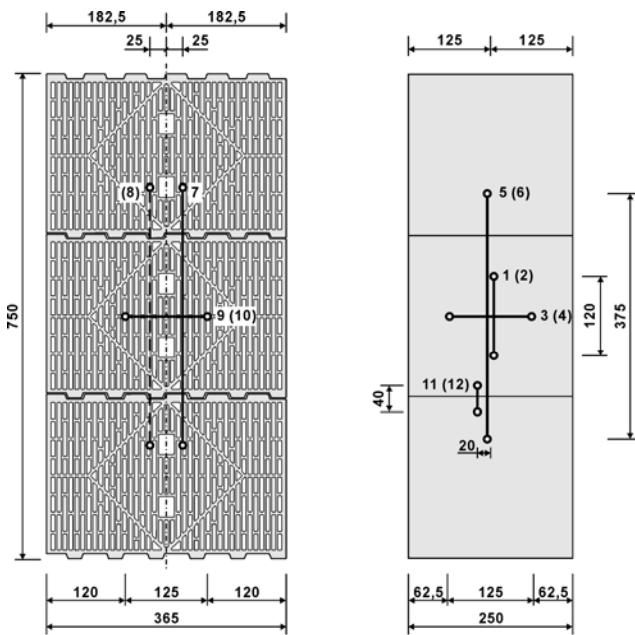
Maße in mm

**Bild B7:** Zugversuche an Dreistein-Prüfkörpern in Richtung Steinlänge Hochlochziegel T16



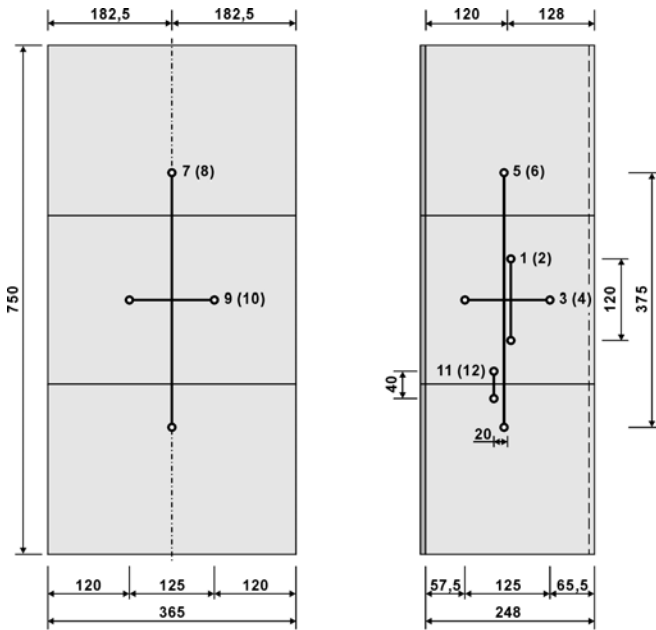
Maße in mm

**Bild B8:** Zugversuche an Dreistein-Prüfkörpern in Richtung Steinhöhe Hochlochziegel SX+



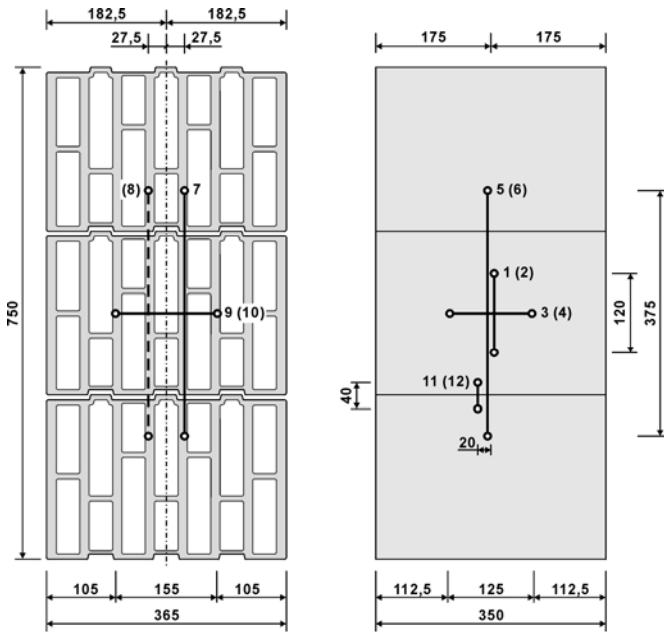
Maße in mm

**Bild B9:** Zugversuche an Dreistein-Prüfkörpern in Richtung Steinlänge Hochlochziegel SX+



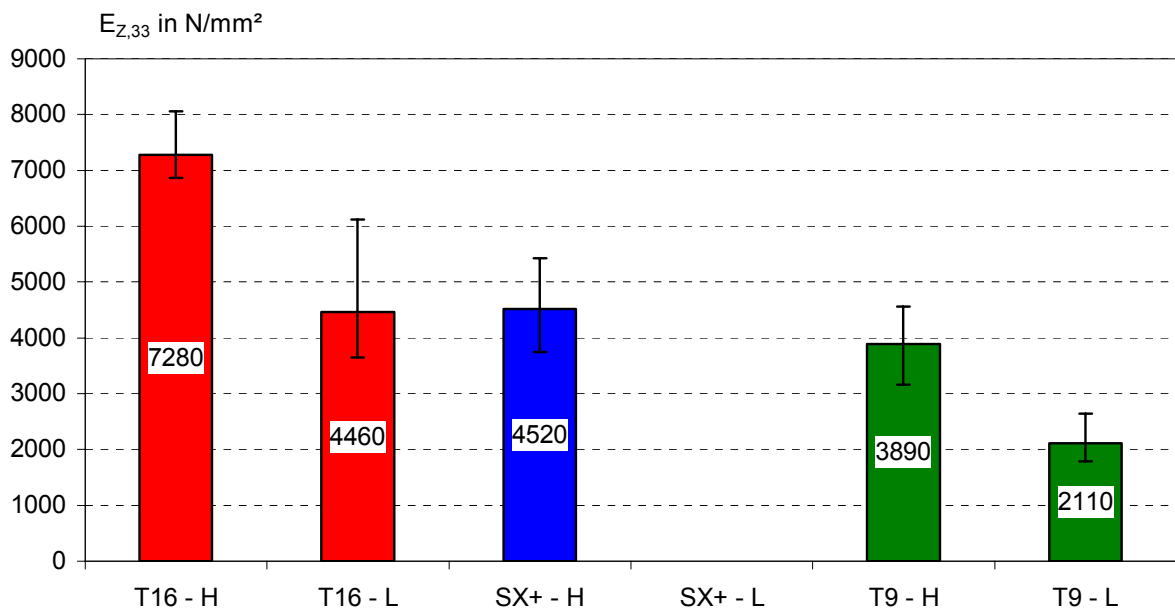
Maße in mm

**Bild B10:** Zugversuche an Dreistein-Prüfkörpern in Richtung Steinhöhe  
Hochlochziegel T9

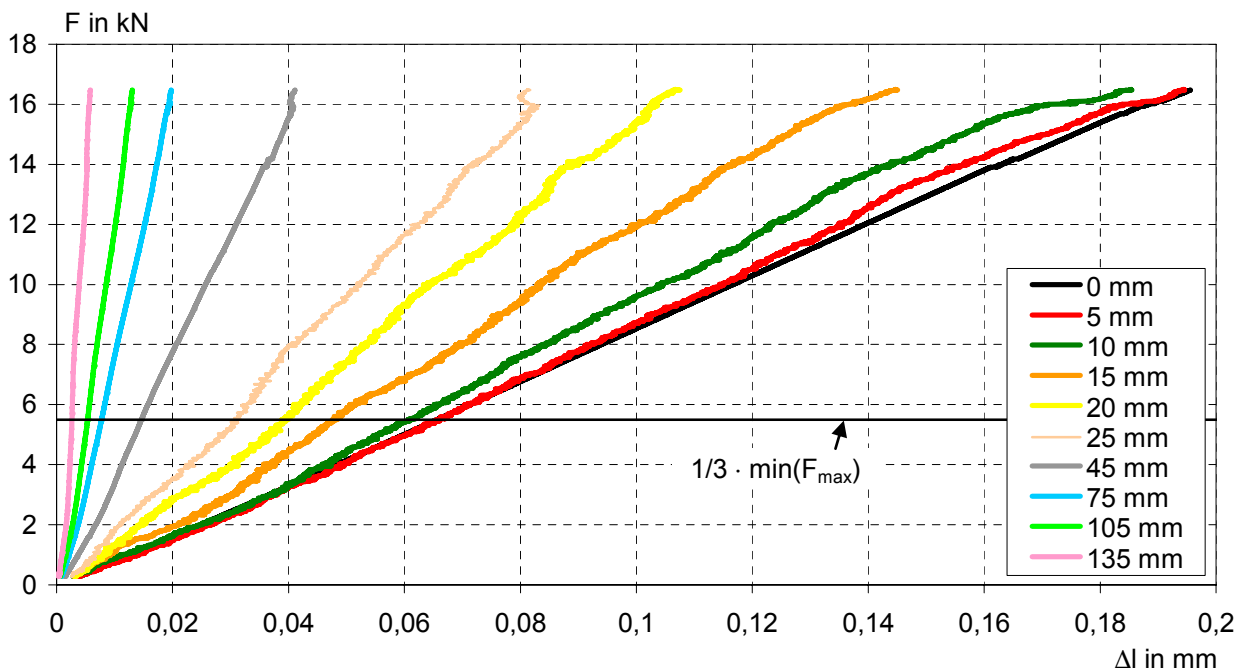


Maße in mm

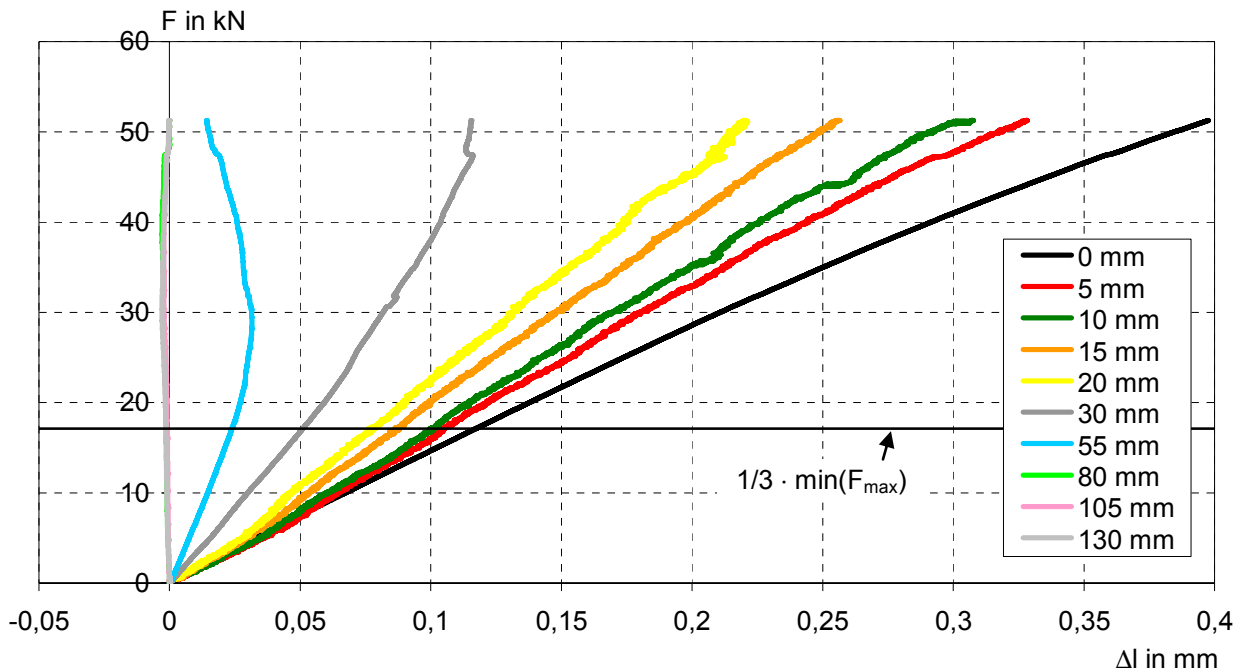
**Bild B11:** Zugversuche an Dreistein-Prüfkörpern in Richtung Steinlänge  
Hochlochziegel T9



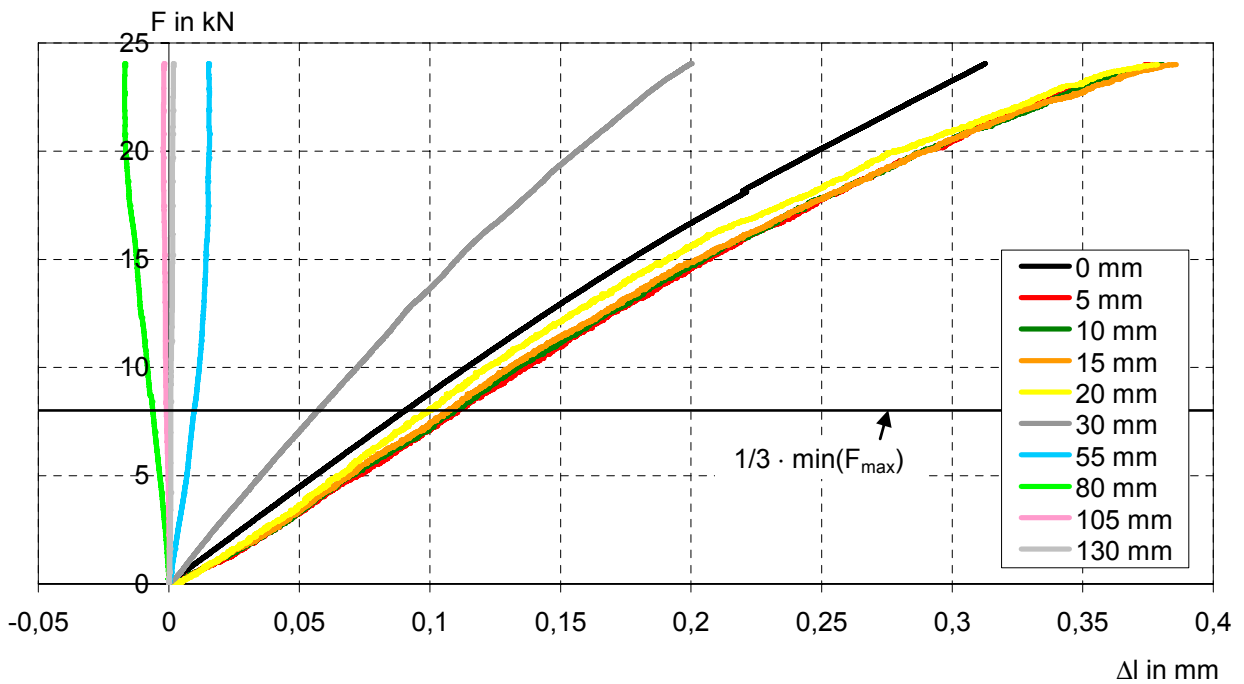
**Bild B12:** E-Moduln der Mauersteine unter Zugbeanspruchung (Mittelwert über die Messlängen 5, 6, 7 und 8)



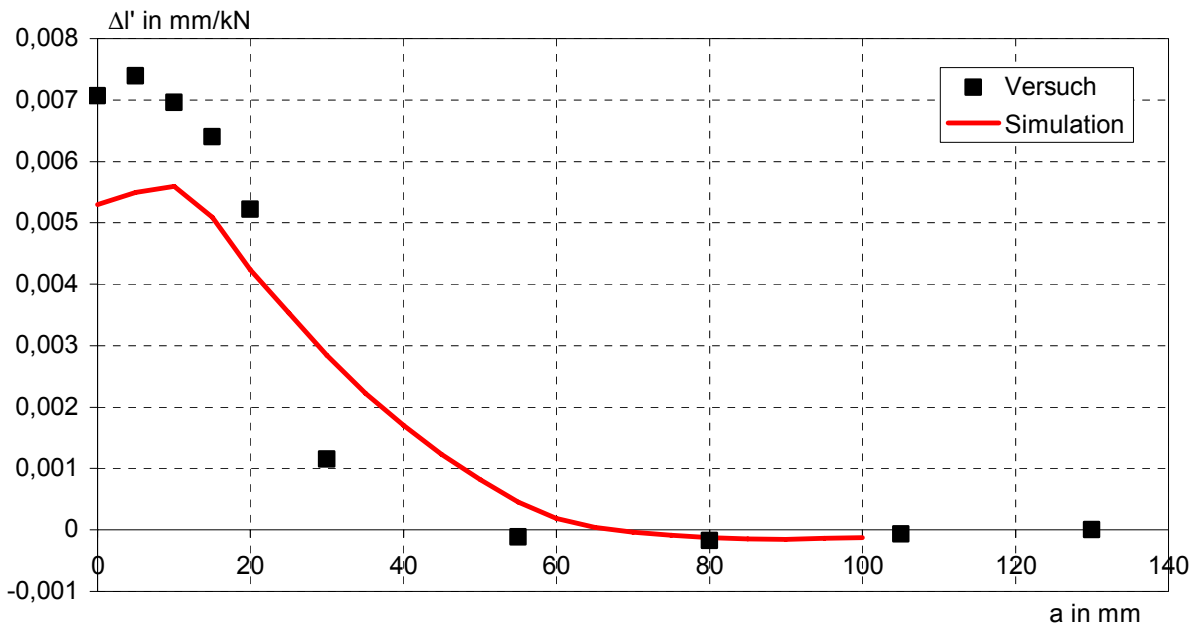
**Bild B13:** Auflast  $F$  in Abhängigkeit der Verformungen  $\Delta l$  in verschiedenen Abständen von der Putzfläche bei Beanspruchung in Richtung Steinlänge Hochlochziegel SX+ (Mittelwert aller Prüfkörper)



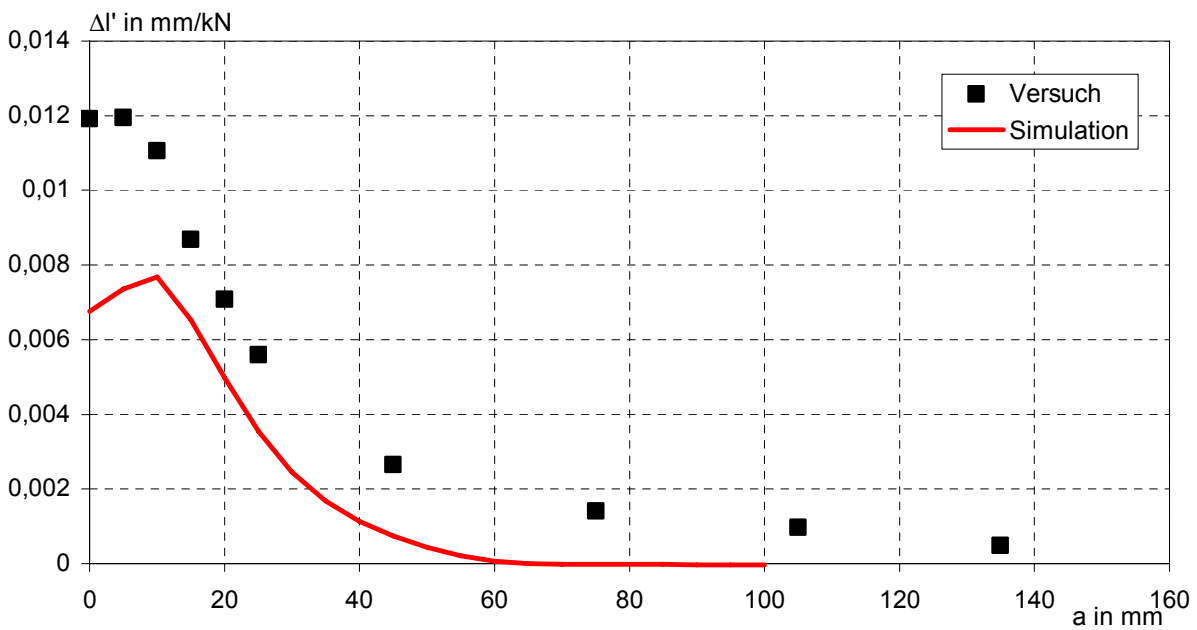
**Bild B14:** Auflast  $F$  in Abhängigkeit der Verformungen  $\Delta l$  in verschiedenen Abständen von der Putzfläche bei Beanspruchung in Richtung Steinhöhe Hochlochziegel T9 (Mittelwert aller Prüfkörper)



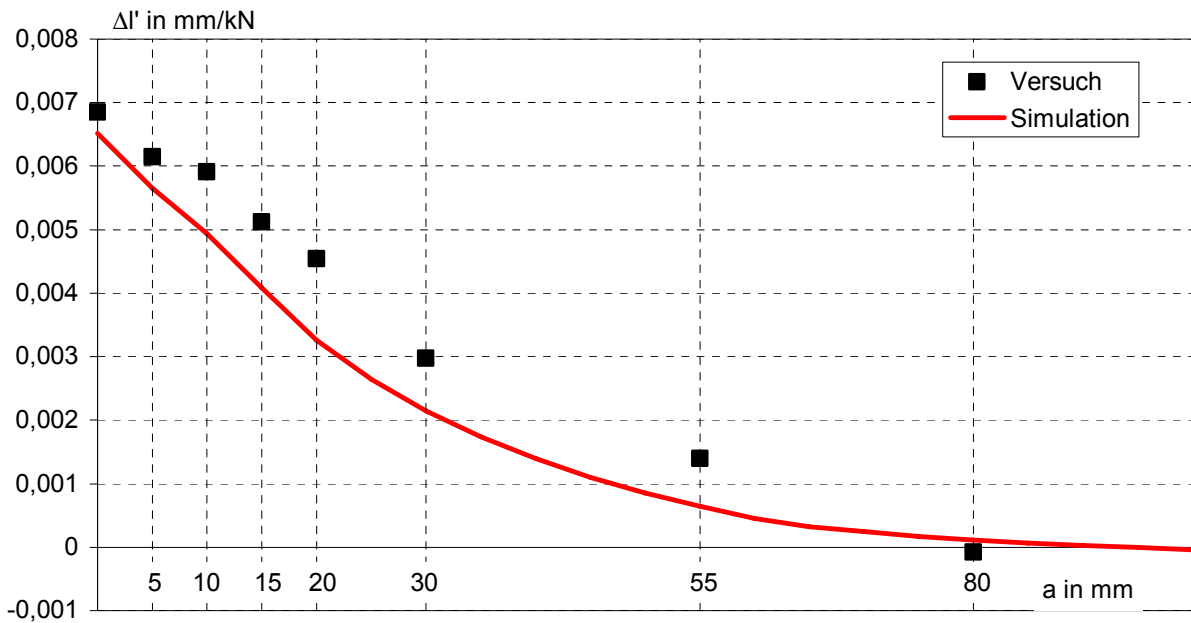
**Bild B15:** Auflast  $F$  in Abhängigkeit der Verformungen  $\Delta l$  in verschiedenen Abständen von der Putzfläche bei Beanspruchung in Richtung Steinlänge Hochlochziegel T9 (Mittelwert aller Prüfkörper)



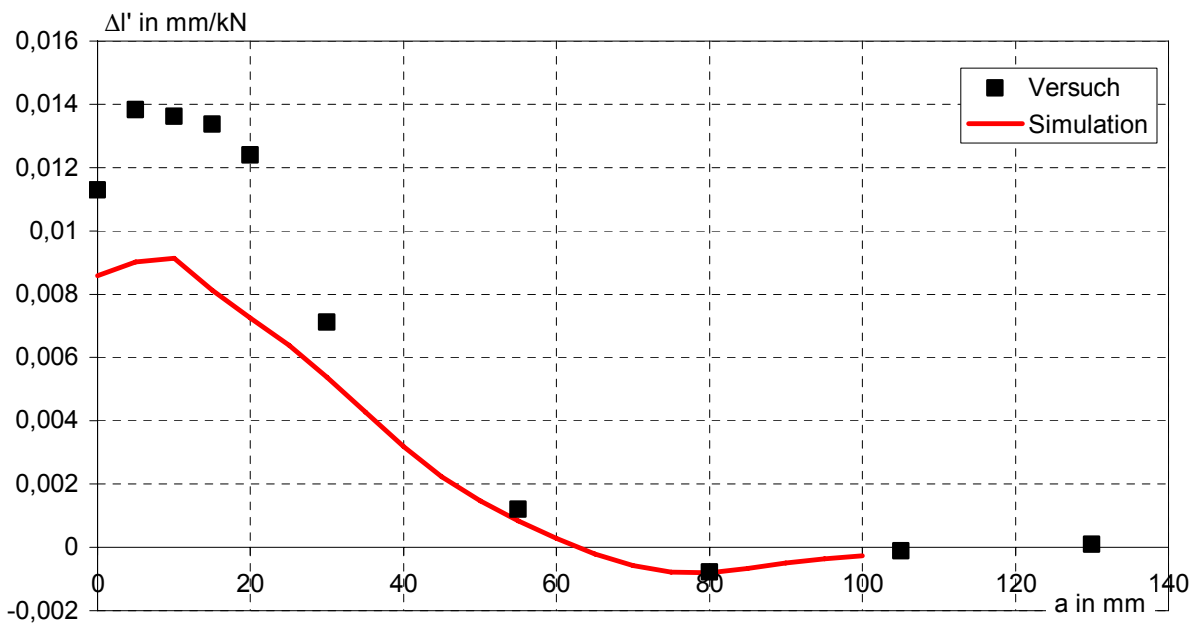
**Bild B16:** Bezogene Verformung  $\Delta l'$  in Abhängigkeit vom Abstand von der Putzfläche  $a$  bei Beanspruchung in Steinlänge  
Planhochlochziegel T16



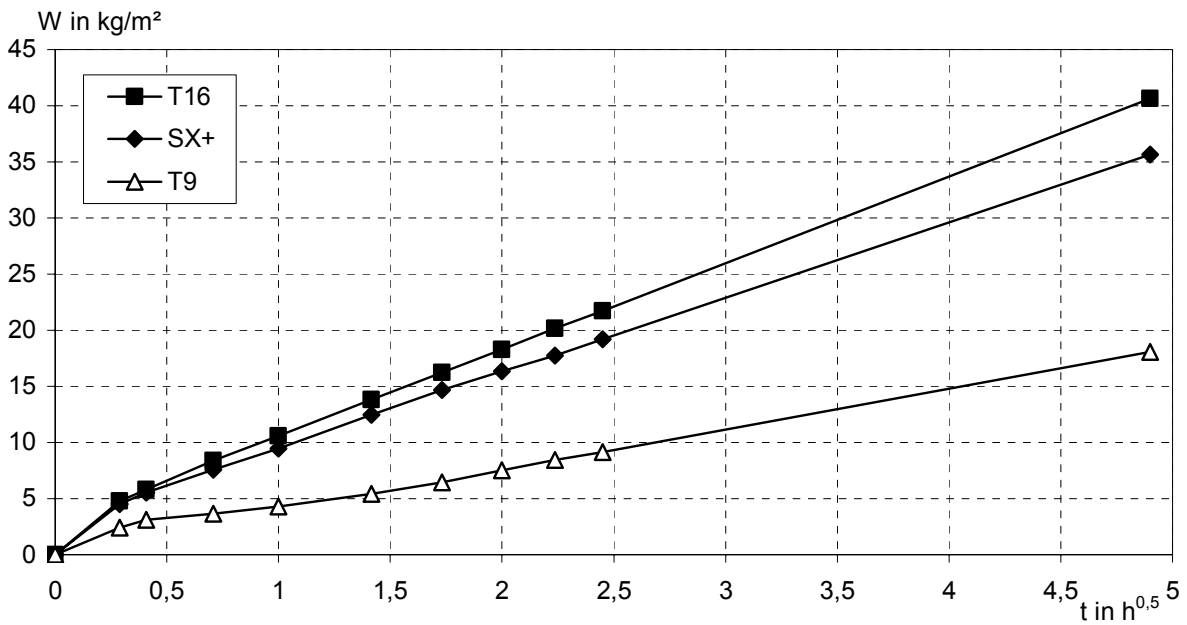
**Bild B17:** Bezogene Verformung  $\Delta l'$  in Abhängigkeit vom Abstand von der Putzfläche  $a$  bei Beanspruchung in Steinlänge  
Planhochlochziegel SX+



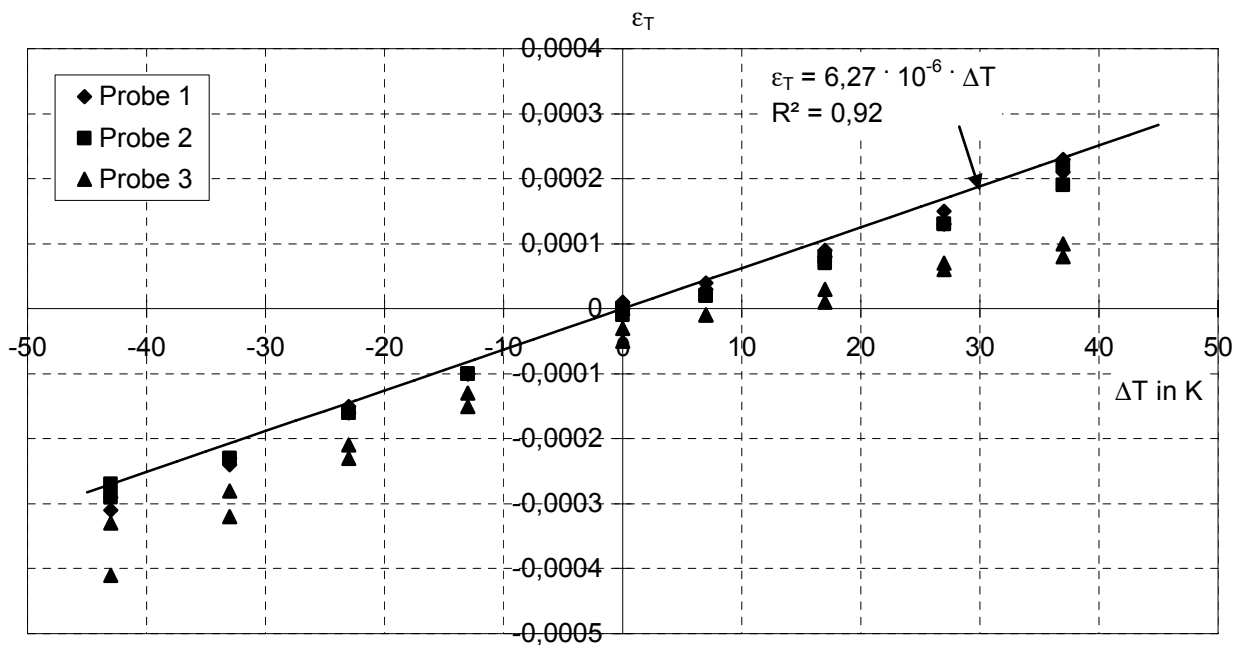
**Bild B18:** Bezogene Verformung  $\Delta l'$  in Abhängigkeit vom Abstand von der Putzfläche  $a$  bei Beanspruchung in Steinhöhe  
Planhochlochziegel T9



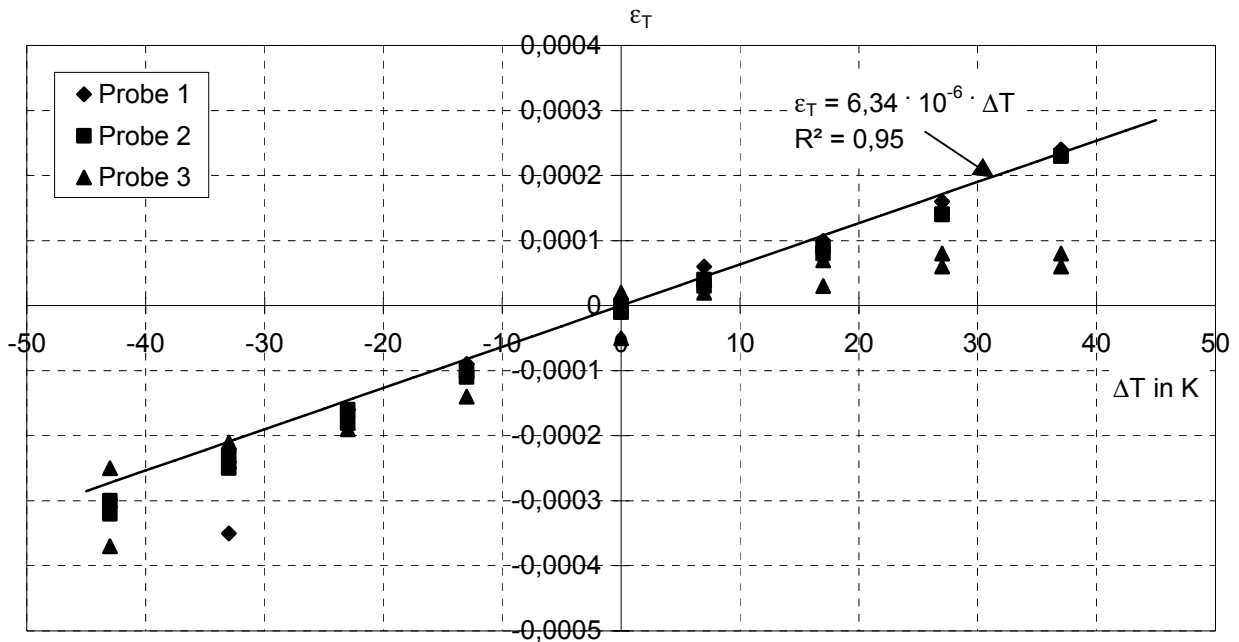
**Bild B19:** Bezogene Verformung  $\Delta l'$  in Abhängigkeit vom Abstand von der Putzfläche  $a$  bei Beanspruchung in Steinlänge  
Planhochlochziegel T9



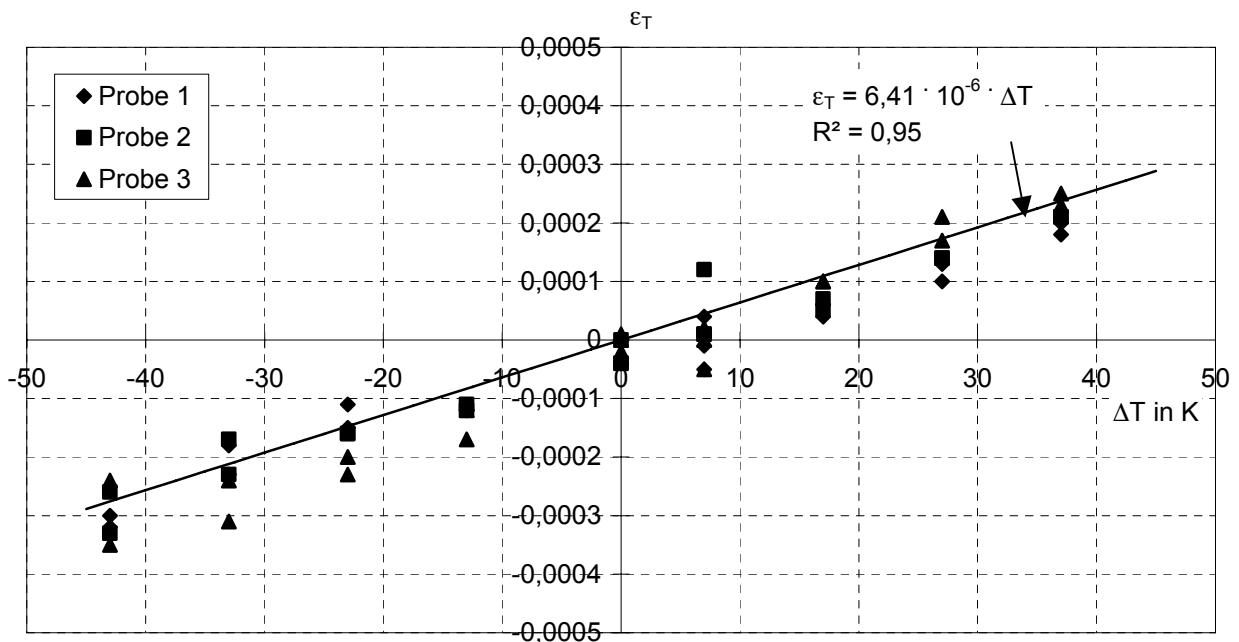
**Bild B20:** Untersuchungen zur kapillaren Wasseraufnahme  
Wasseraufnahme W in Abhängigkeit von der Aufnahmedauer t



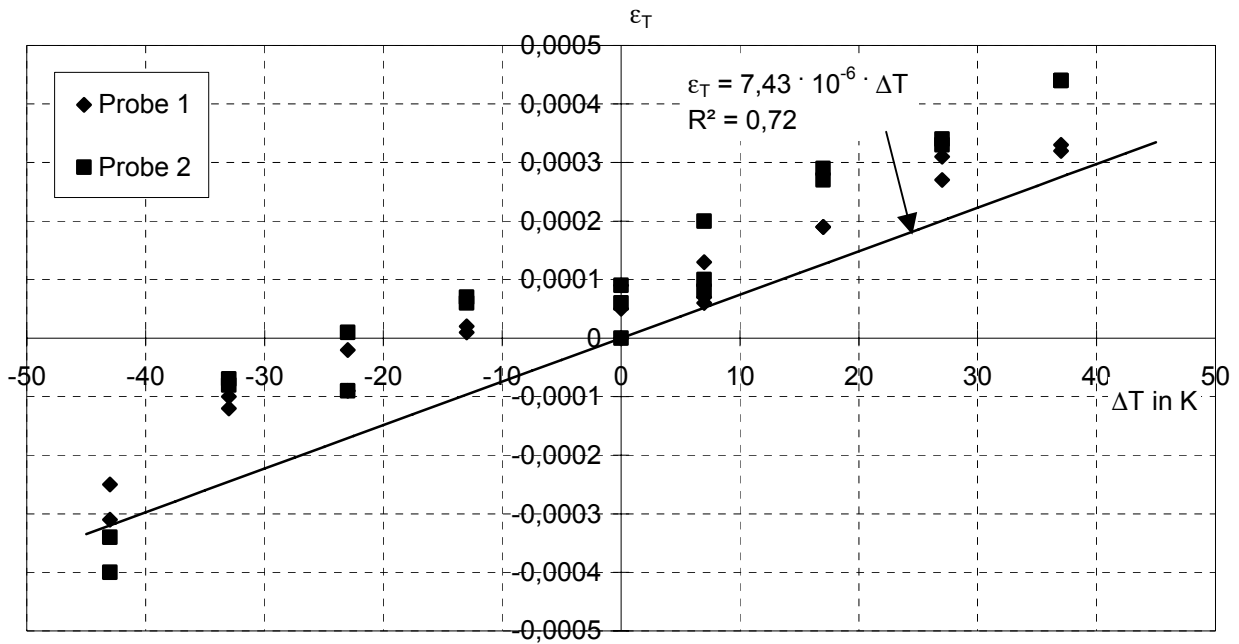
**Bild B21:** Wärmedehnung des Außenscherben s in Steinhöhe  
Hochlochziegel T16



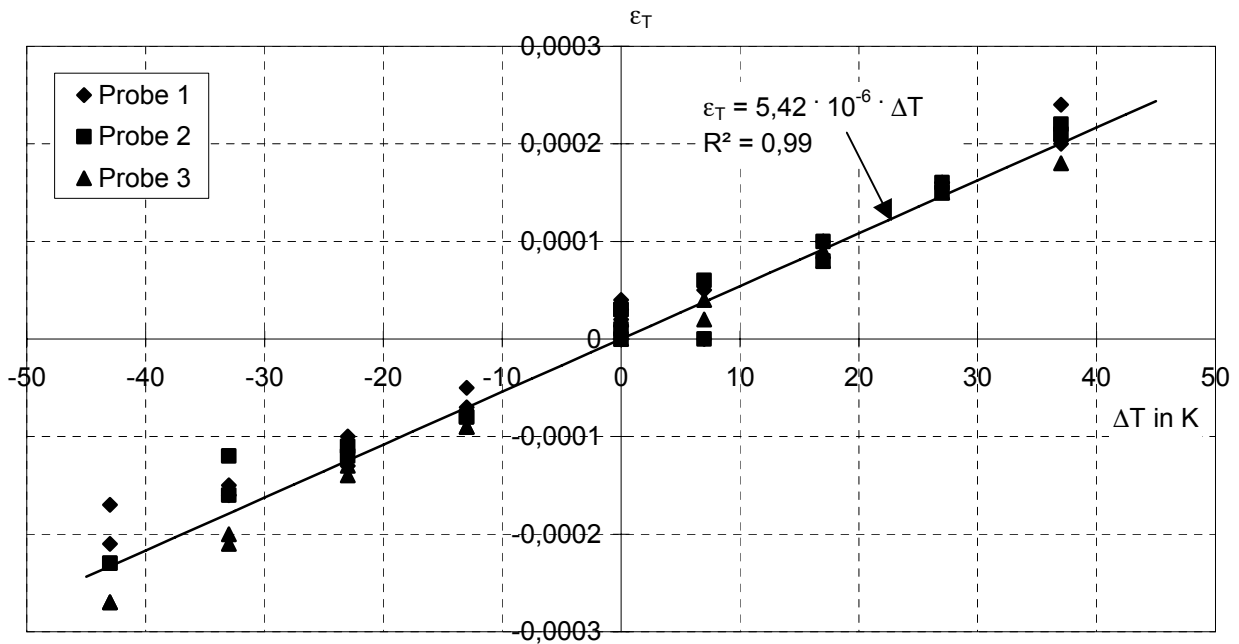
**Bild B22:** Wärmedehnung des Außenscherbens in Steinlänge Hochlochziegel T16



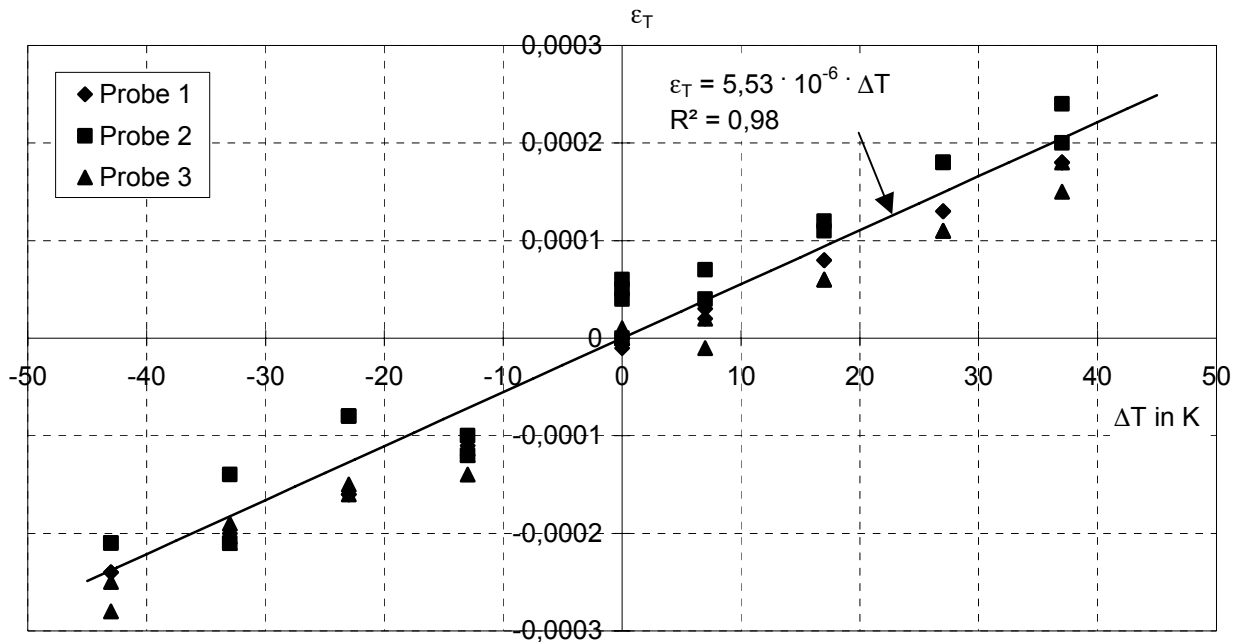
**Bild B23:** Wärmedehnung des Außenscherbens in Steinhöhe Hochlochziegel SX+



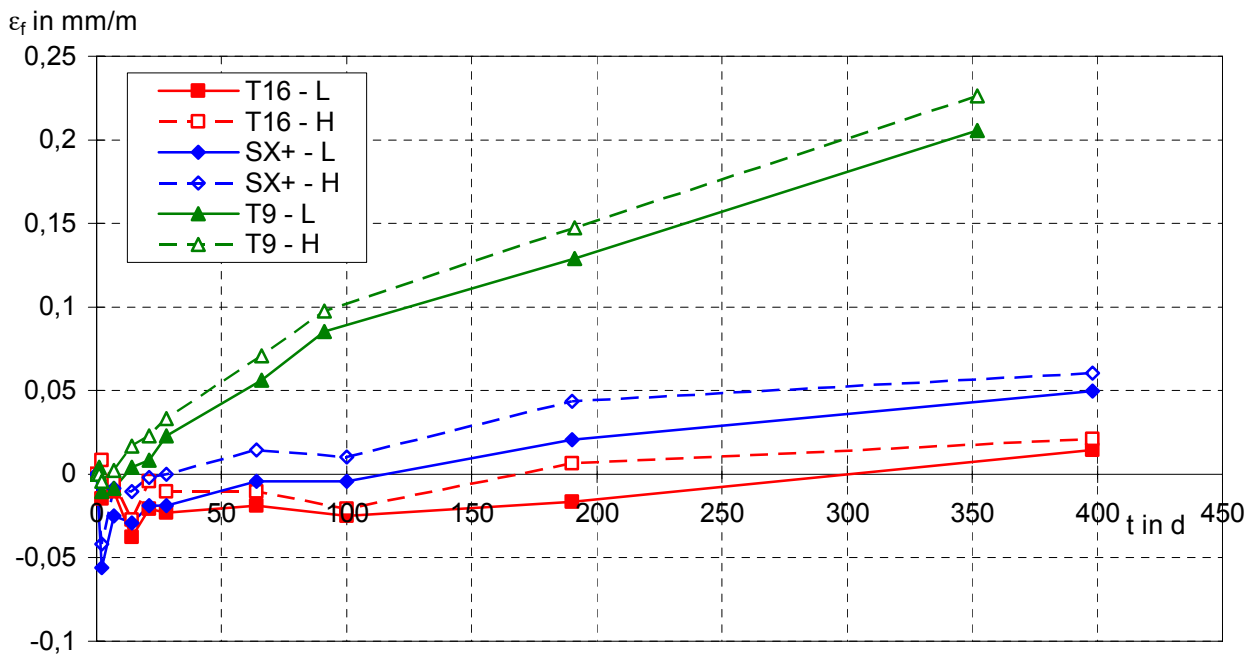
**Bild B24:** Wärmedehnung des Außenscherben in Steinlänge Hochlochziegel SX+



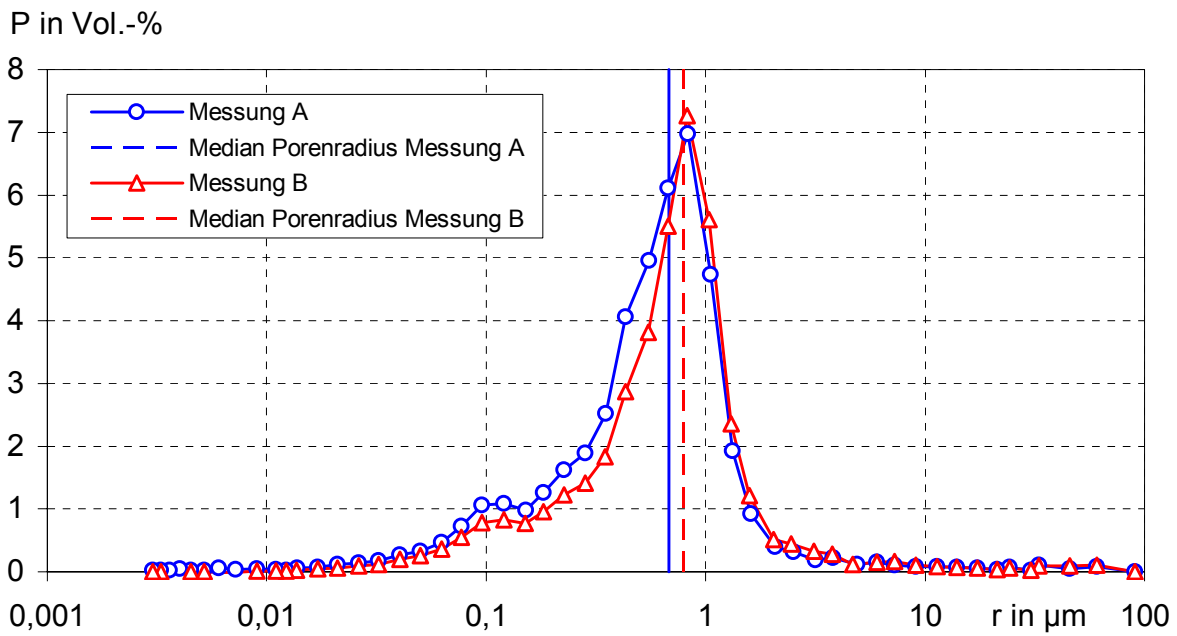
**Bild B25:** Wärmedehnung des Außenscherbens in Steinhöhe Hochlochziegel T9



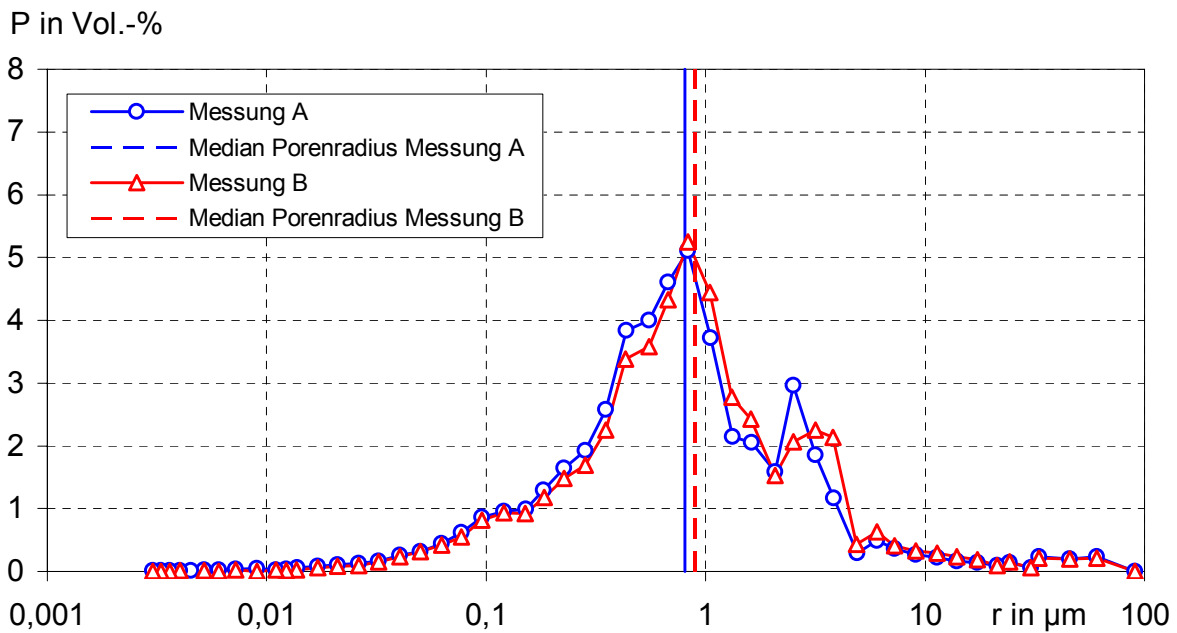
**Bild B26:** Wärmedehnung des Außenscherbens in Steinlänge Hochlochziegel T9



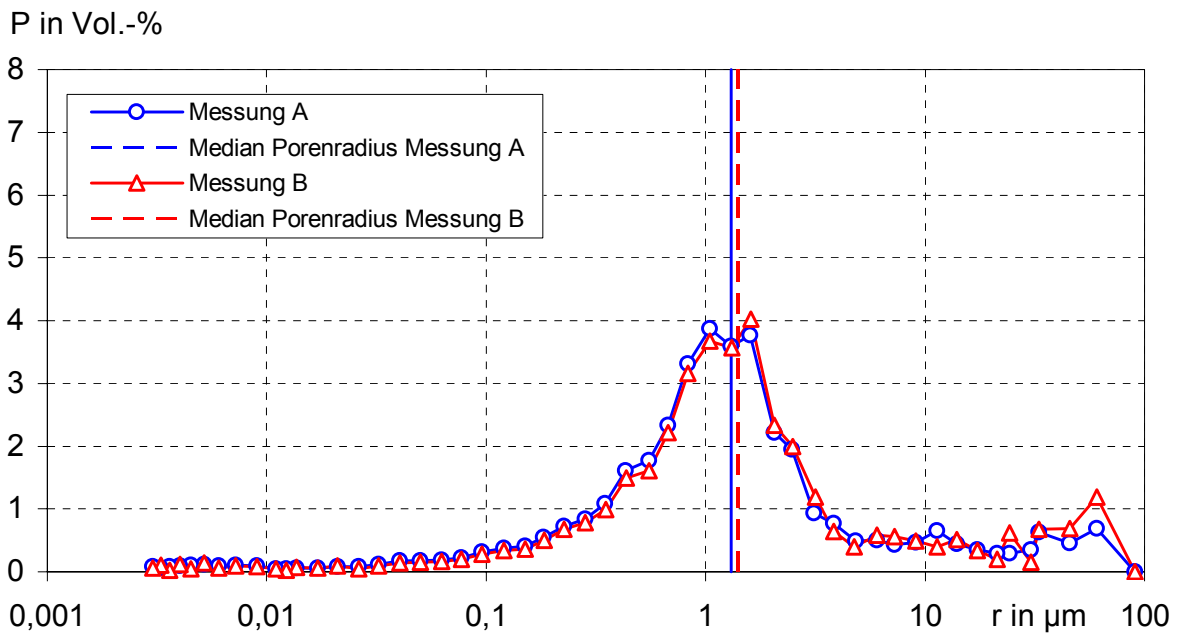
**Bild B27:** Feuchtedehnung  $\epsilon_f$  des Außenscherbens in Richtung Steinhöhe H und Steinlänge L in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer t Hochlochziegel T16, SX+ und T9



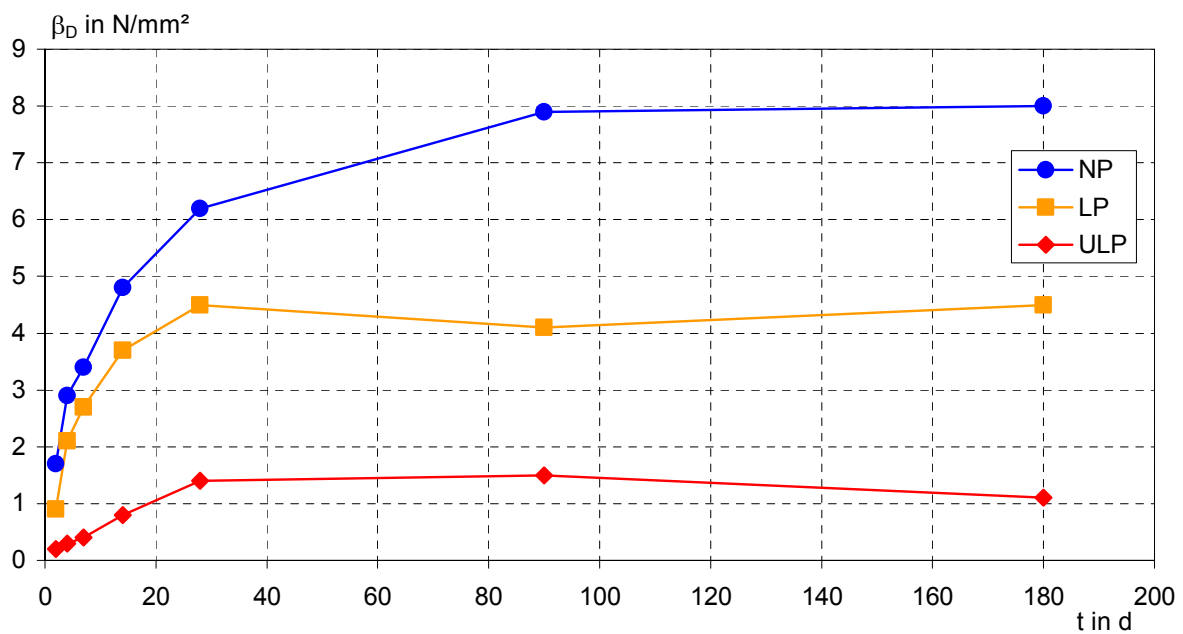
**Bild B28:** Porenanteil P in Abhängigkeit vom Porenradius r  
Hochlochziegel T16



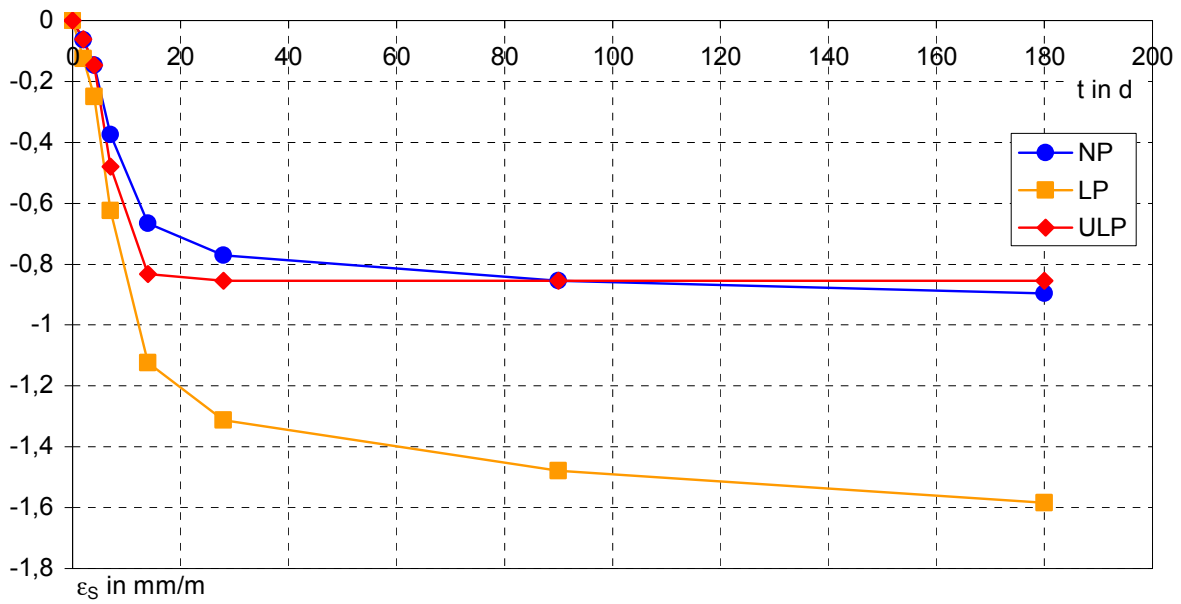
**Bild B29:** Porenanteil P in Abhängigkeit vom Porenradius r  
Hochlochziegel SX+



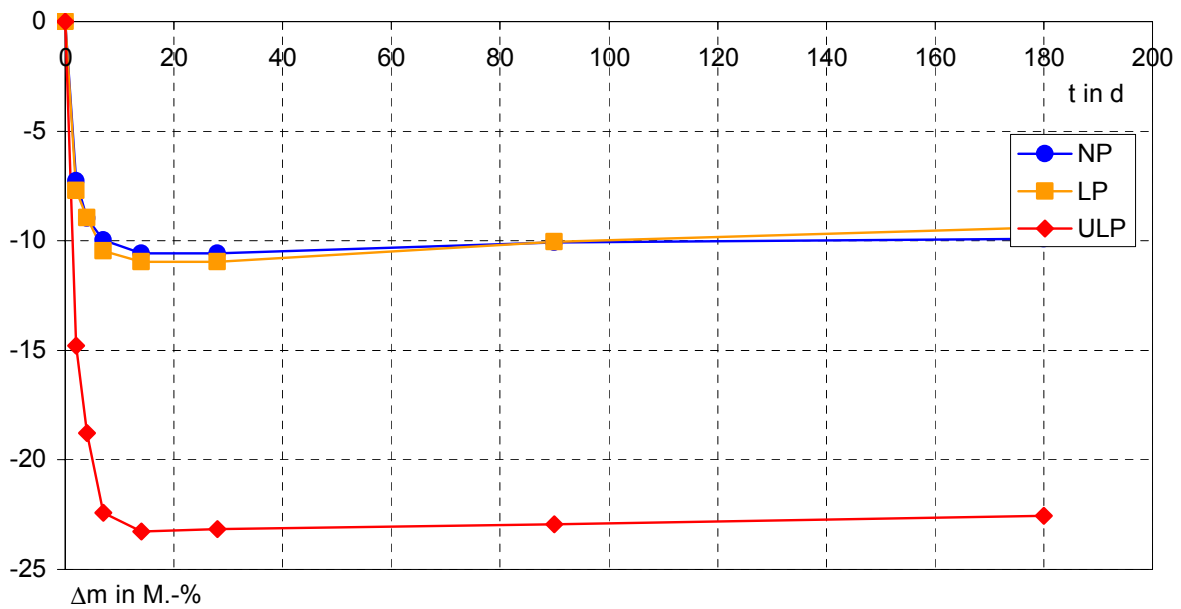
**Bild B30:** Porenanteil P in Abhängigkeit vom Porenradius r  
Hochlochziegel T9



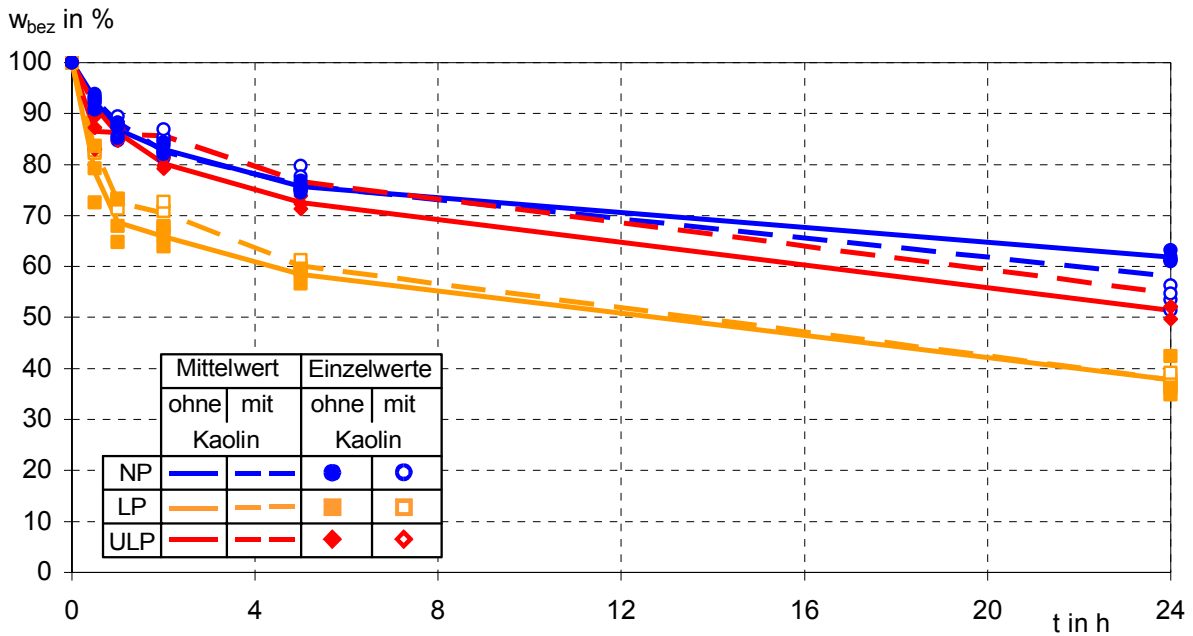
**Bild B31:** Druckfestigkeit  $\beta_D$  in Abhängigkeit vom Prüfalter t  
Normalputz, Leichtputz und Ultraleichtputz



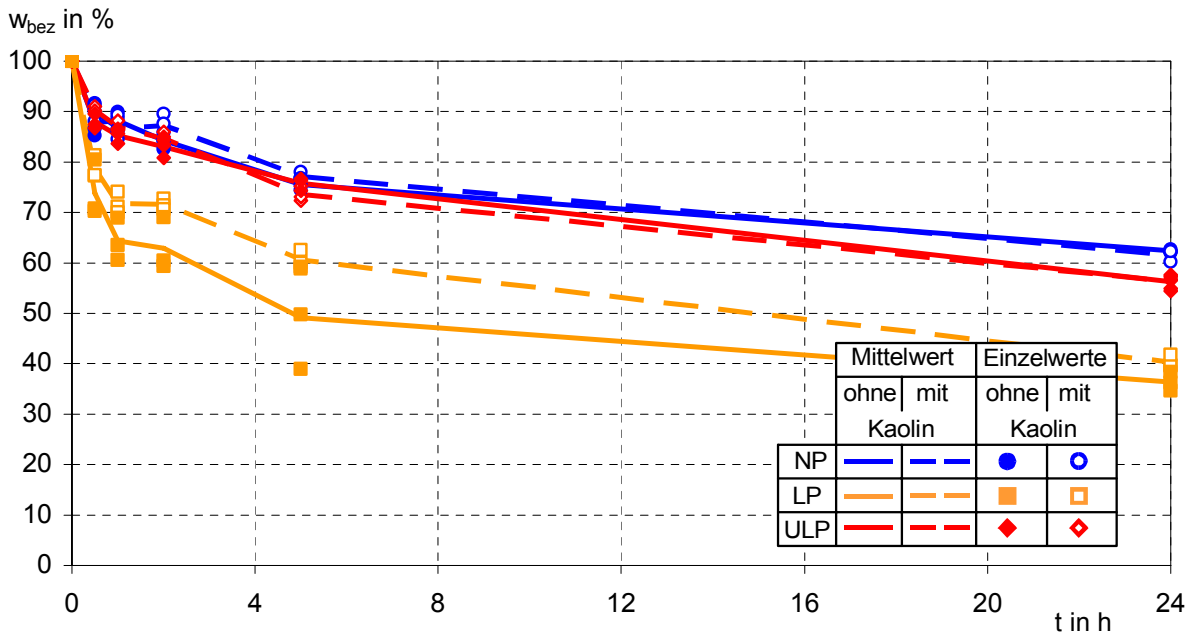
**Bild B32:** Schwinddehnung  $\epsilon_S$  in Abhängigkeit von der Prüfdauer t  
Normalputz, Leichtputz und Ultraleichtputz



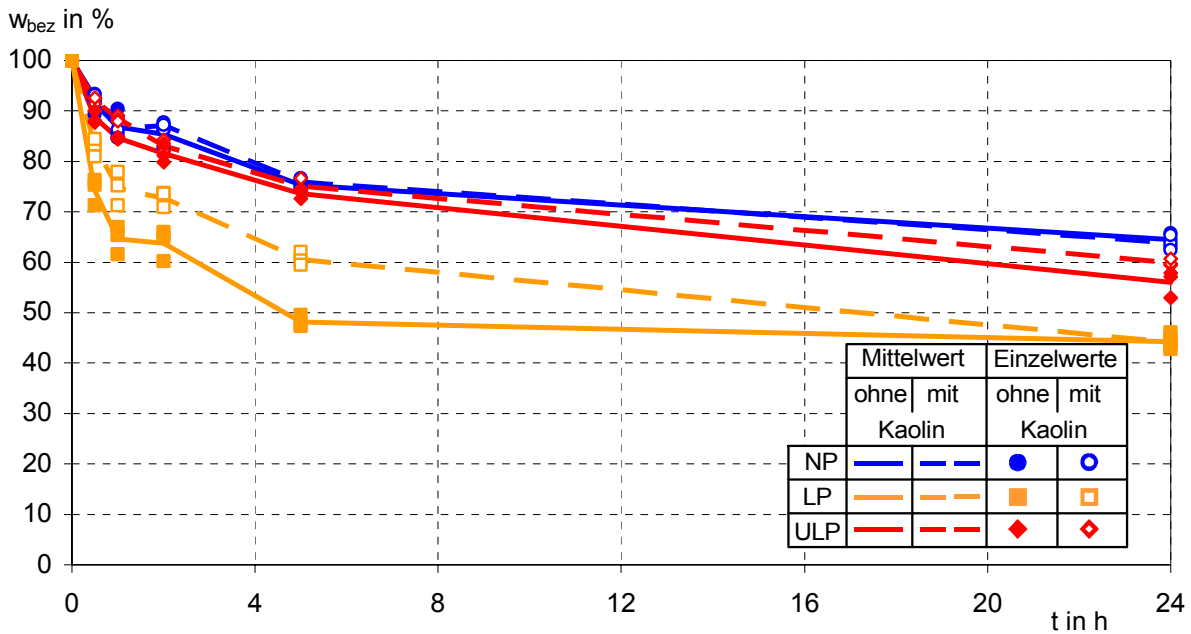
**Bild B33:** Masseänderung  $\Delta m$  in Abhängigkeit von der Prüfdauer t  
Normalputz, Leichtputz und Ultraleichtputz



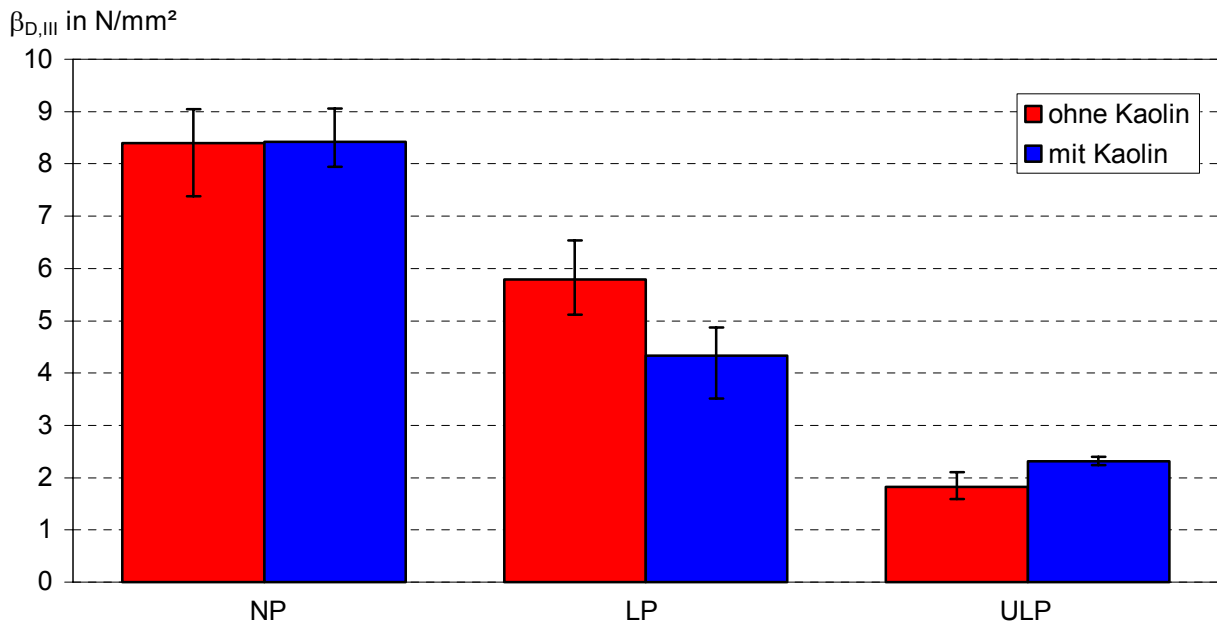
**Bild B34:** Bezogener Wassergehalt  $w_{bez}$  in Abhängigkeit von der Kontaktdauer  $t$  Putze in Kontakt mit dem Hochlochziegel T16



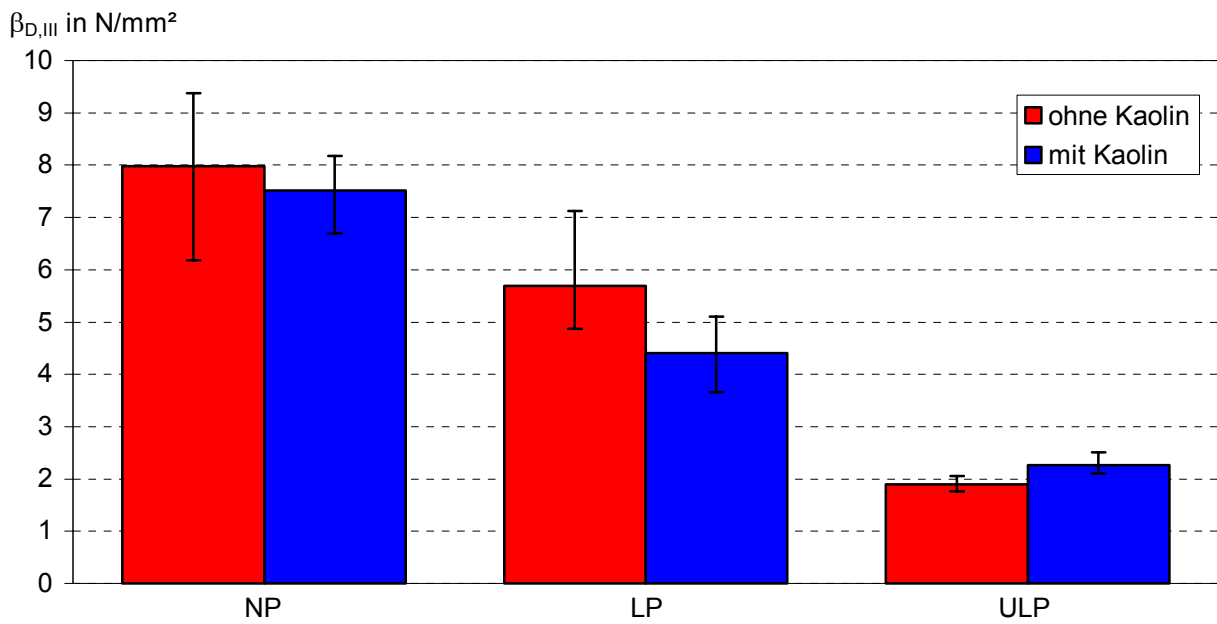
**Bild B35:** Bezogener Wassergehalt  $w_{bez}$  in Abhängigkeit von der Kontaktdauer  $t$  Putze in Kontakt mit dem Hochlochziegel SX+



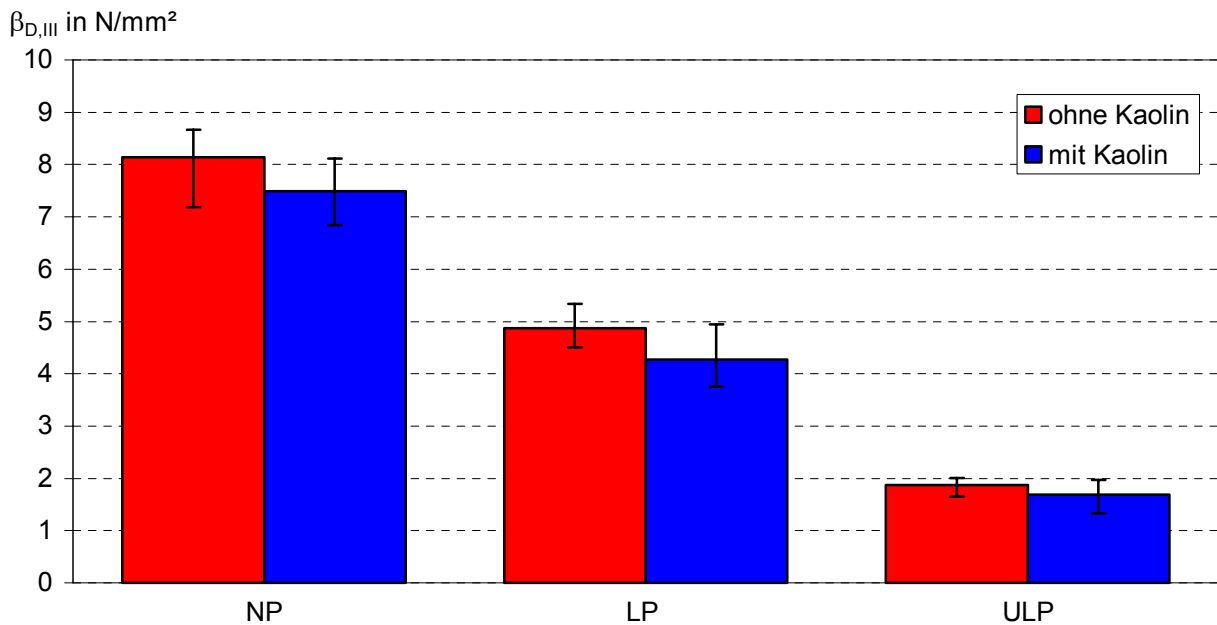
**Bild B36:** Bezogener Wassergehalt  $w_{bez}$  in Abhängigkeit von der Kontaktdauer  $t$  Putze in Kontakt mit dem Hochlochziegel T9



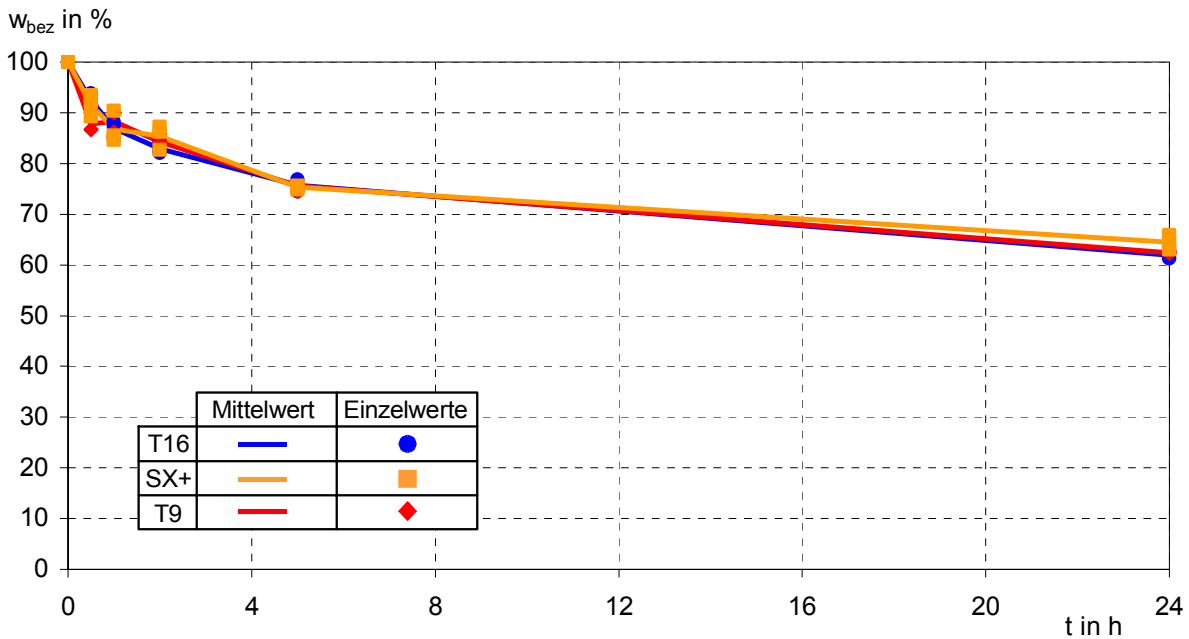
**Bild B37:** Druckfestigkeit  $\beta_{D,III}$  in Anlehnung an das Verfahren III nach DIN 18555-9 /DIN99/ Normalputz, Leichtputz und Ultraleichtputz vom Planhochlochziegel T16



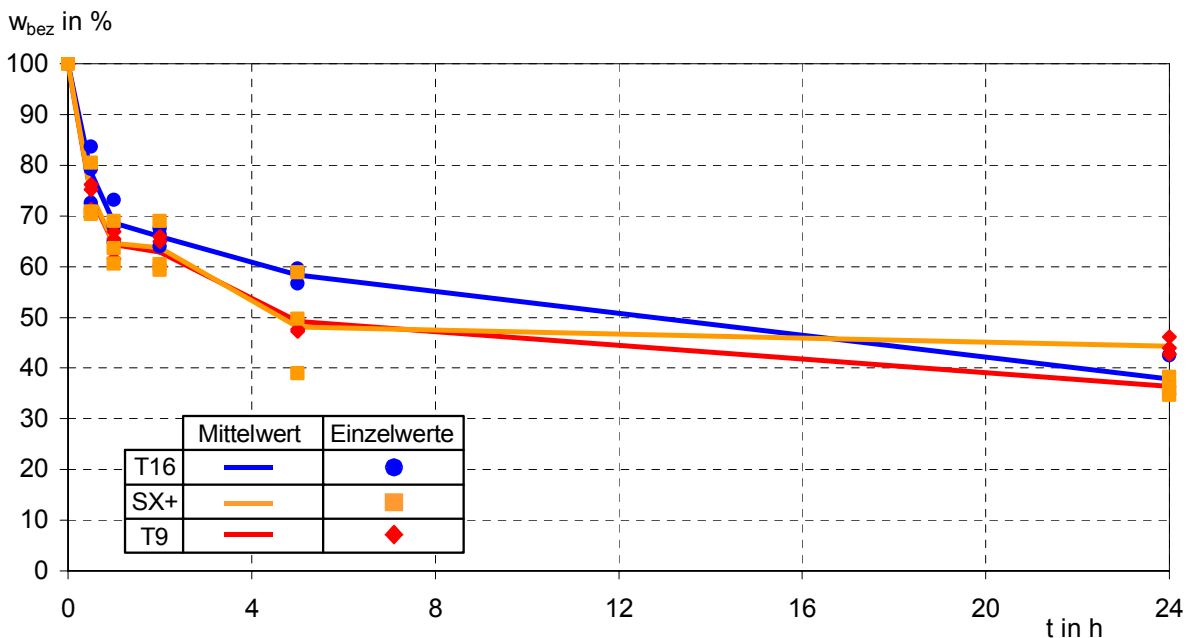
**Bild B38:** Druckfestigkeit  $\beta_{D,III}$  in Anlehnung an das Verfahren III nach DIN 18555-9 /DIN99/ Normalputz, Leichtputz und Ultraleichtputz vom Planhochlochziegel SX+



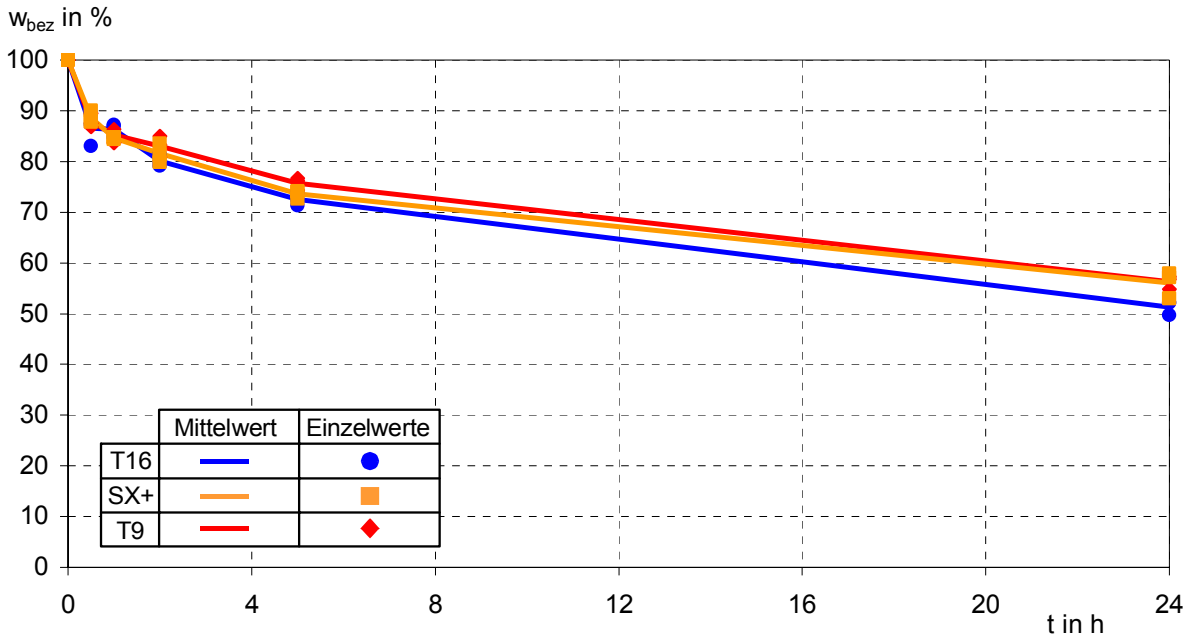
**Bild B39:** Druckfestigkeit  $\beta_{D,III}$  in Anlehnung an das Verfahren III nach DIN 18555-9 /DIN99/ Normalputz, Leichtputz und Ultraleichtputz vom Planhochlochziegel T9



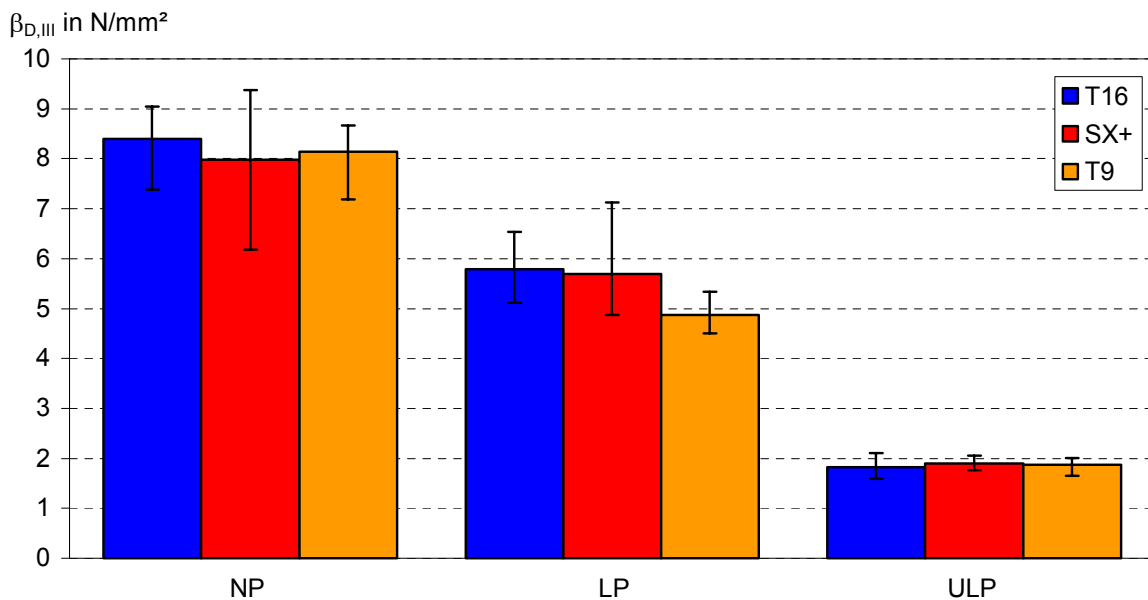
**Bild B40:** Bezogener Wassergehalt  $w_{bez}$  in Abhängigkeit von der Kontaktdauer  $t$  Normalputz in Kontakt mit den verschiedenen, unbehandelten Hochlochziegeln



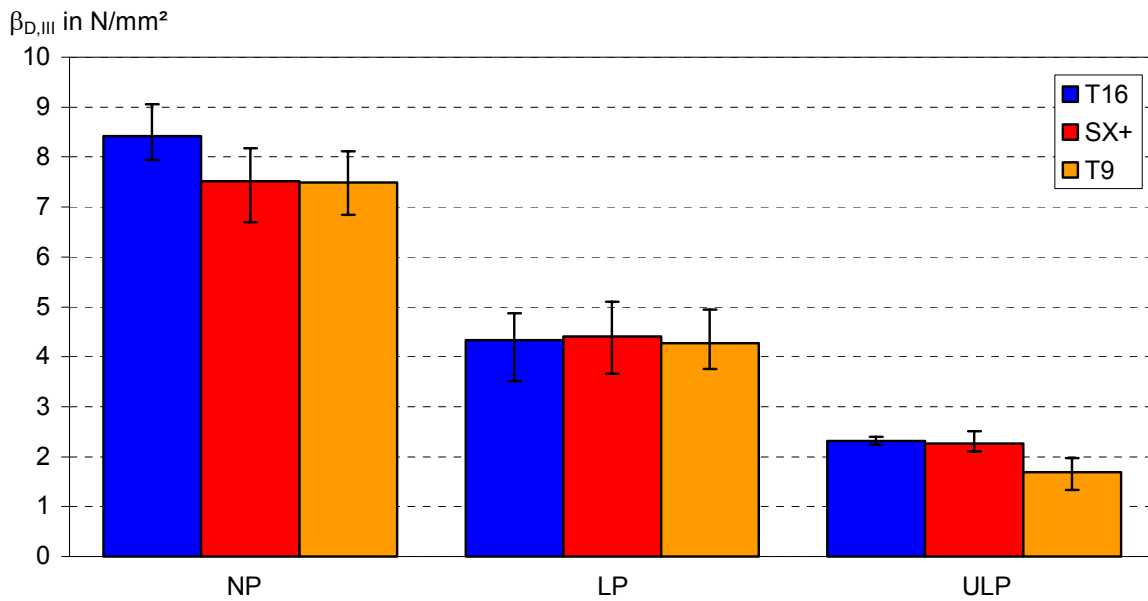
**Bild B41:** Bezogener Wassergehalt  $w_{bez}$  in Abhängigkeit von der Kontaktdauer  $t$  Leichtputz in Kontakt mit den verschiedenen, unbehandelten Hochlochziegeln



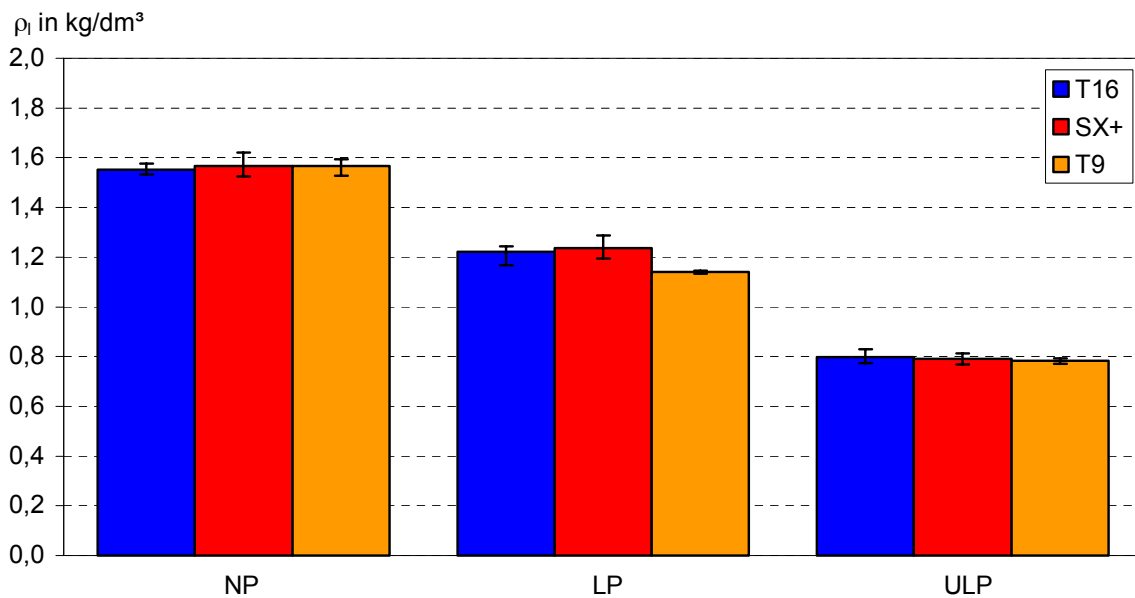
**Bild B42:** Bezogener Wassergehalt  $w_{bez}$  in Abhängigkeit von der Kontaktdauer  $t$  Ultraleichtputz in Kontakt mit den verschiedenen, unbehandelten Hochlochziegeln



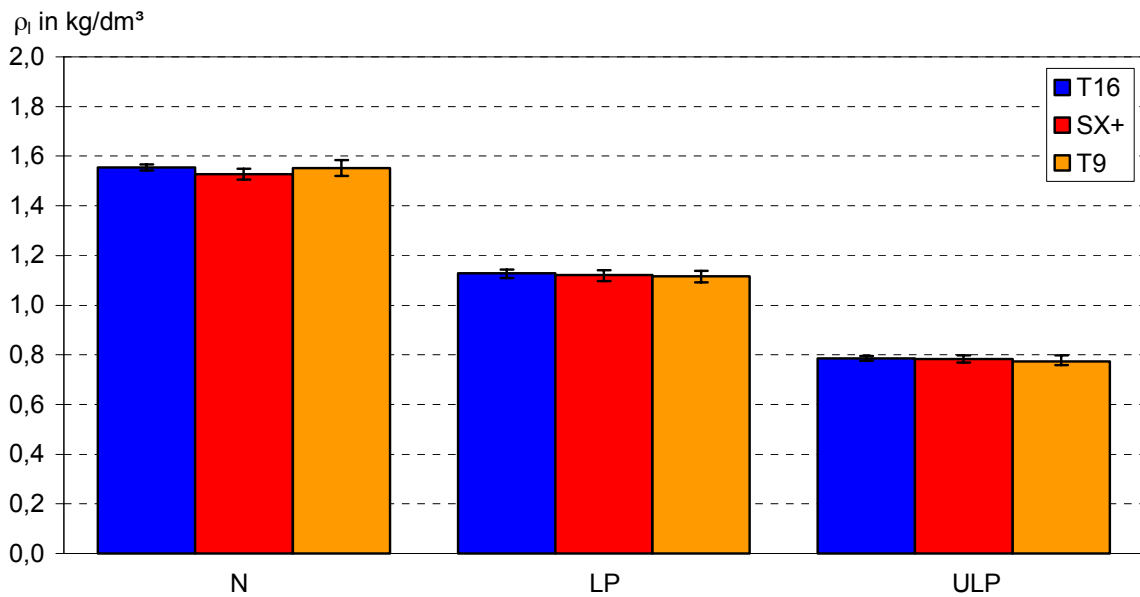
**Bild B43:** Druckfestigkeit  $\beta_{D,III}$  in Anlehnung an das Verfahren III nach DIN 18555-9 /DIN99/ bestimmt an Normalputz, Leichtputz und Ultraleichtputz von den unbehandelten Planhochlochziegeln



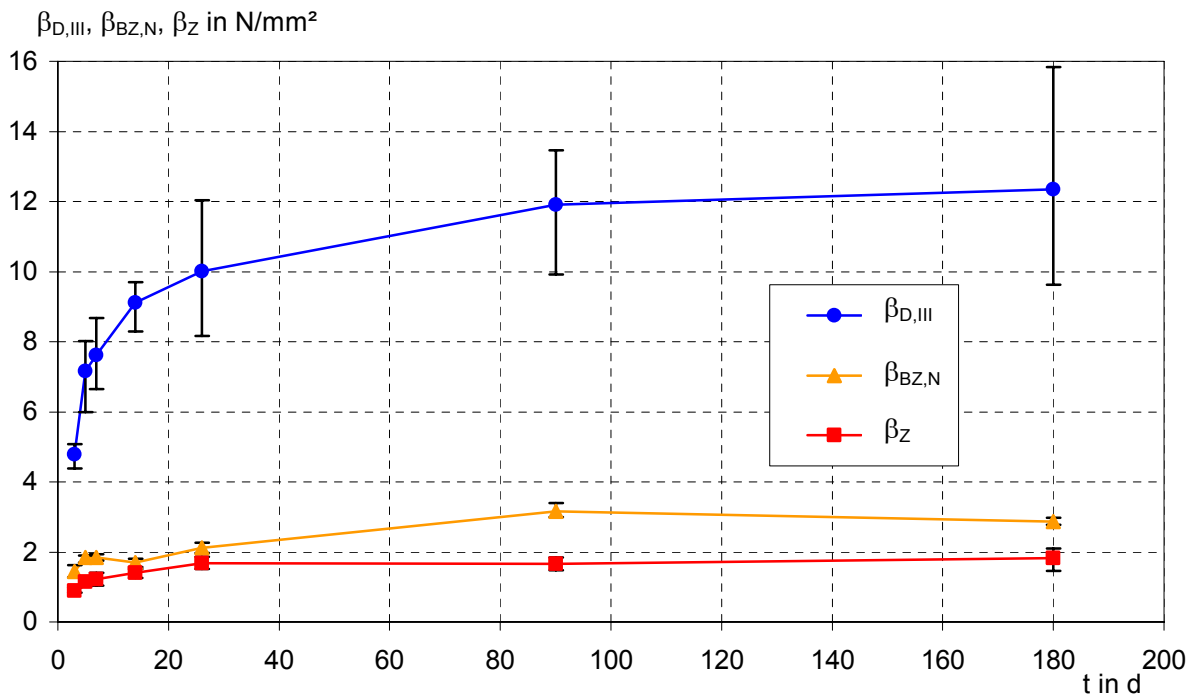
**Bild B44:** Druckfestigkeit  $\beta_{D,III}$  in Anlehnung an das Verfahren III nach DIN 18555-9 /DIN99/ bestimmt an Normalputz, Leichtputz und Ultraleichtputz von den behandelten Planhochlochziegeln



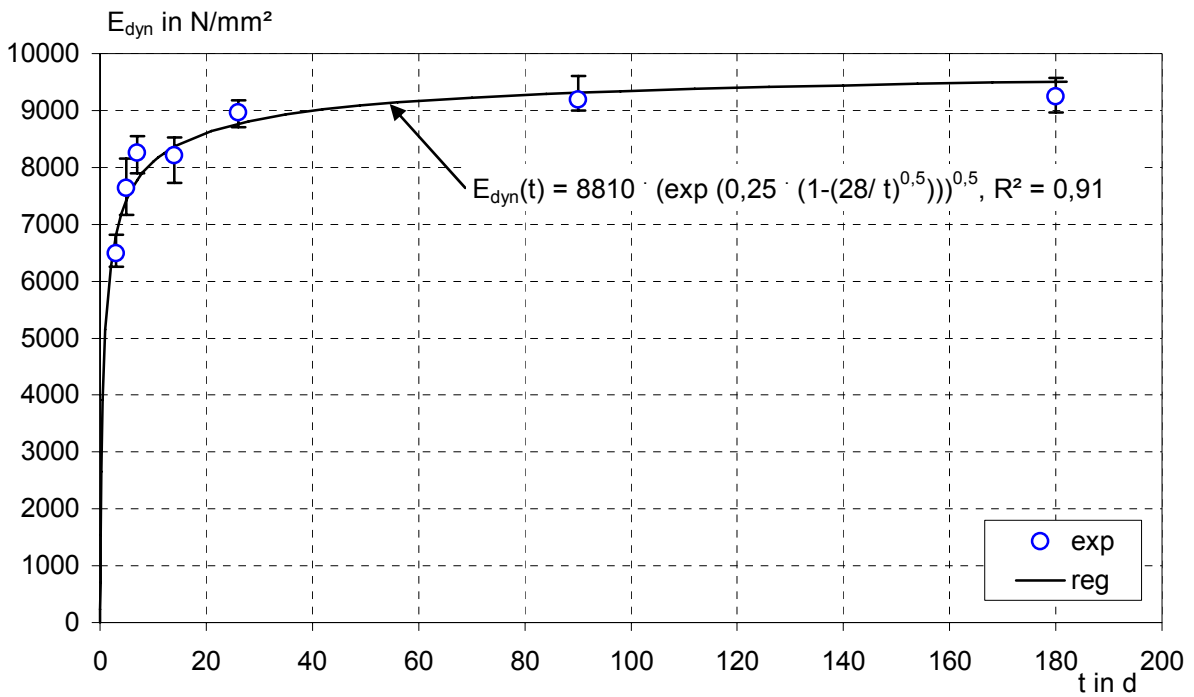
**Bild B45:** Rohdichte  $\rho_i$  bestimmt an Normalputz, Leichtputz und Ultraleichtputz von den unbehandelten Planhochlochziegeln



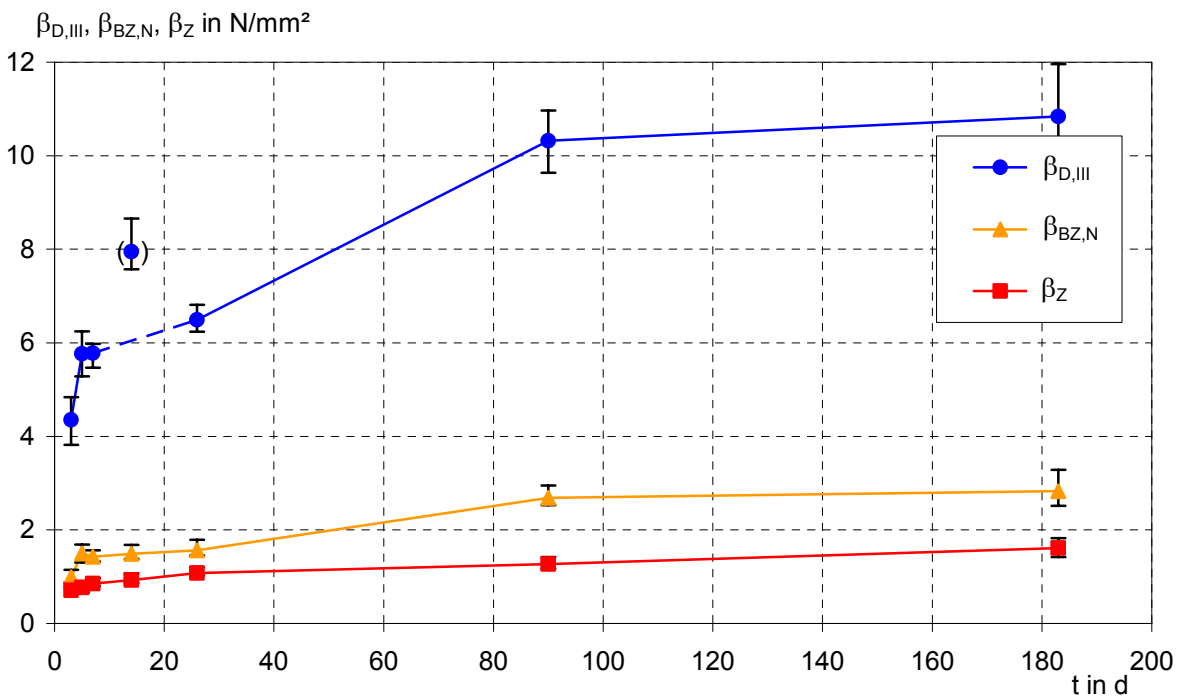
**Bild B46:** Rohdichte  $\rho_i$  bestimmt an Normalputz, Leichtputz und Ultraleichtputz von den behandelten Planhochlochziegeln



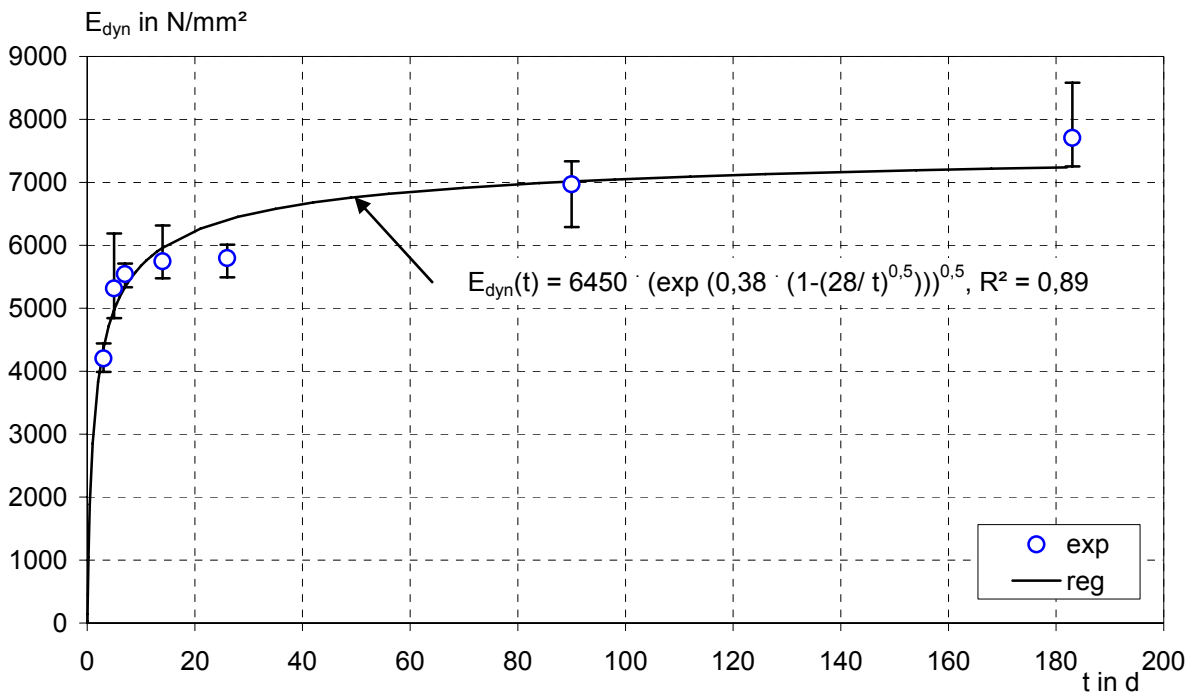
**Bild B47:** Druckfestigkeit  $\beta_{D,III}$ , Netto-Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ,N}$  und Zugfestigkeit  $\beta_Z$  des Normalputzes in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$



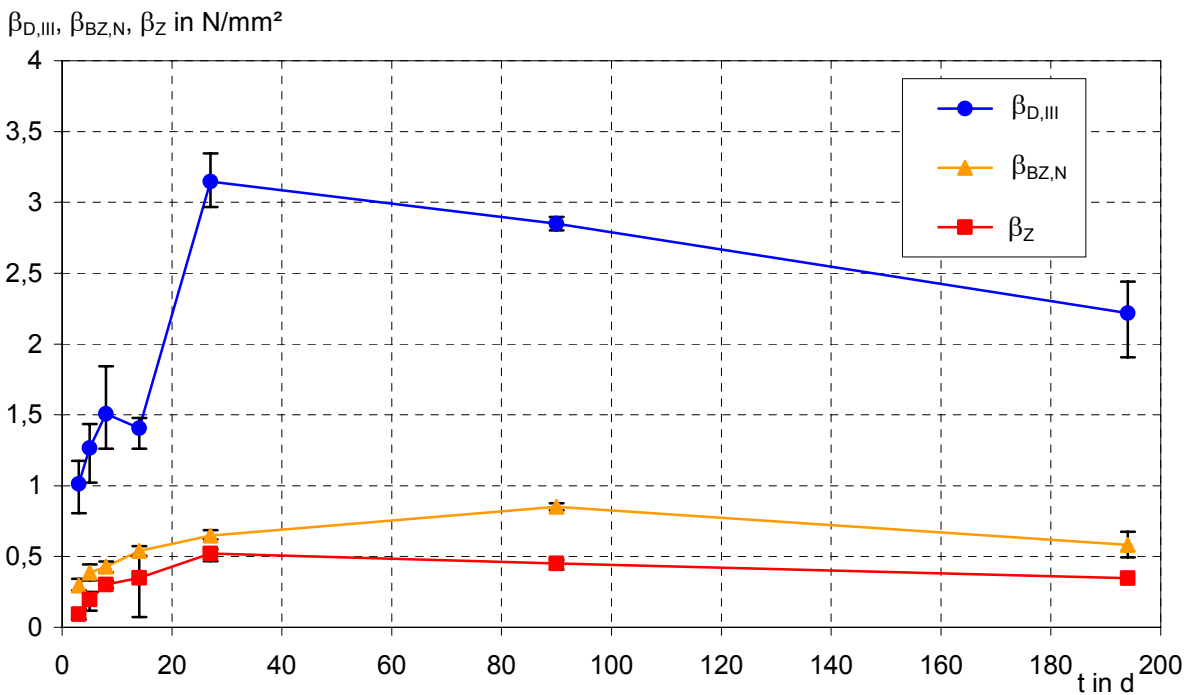
**Bild B48:** Dynamischer E-Modul  $E_{dyn}$  des Normalputzes im Versuch (exp) und berechnet mit Näherung (reg) in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$



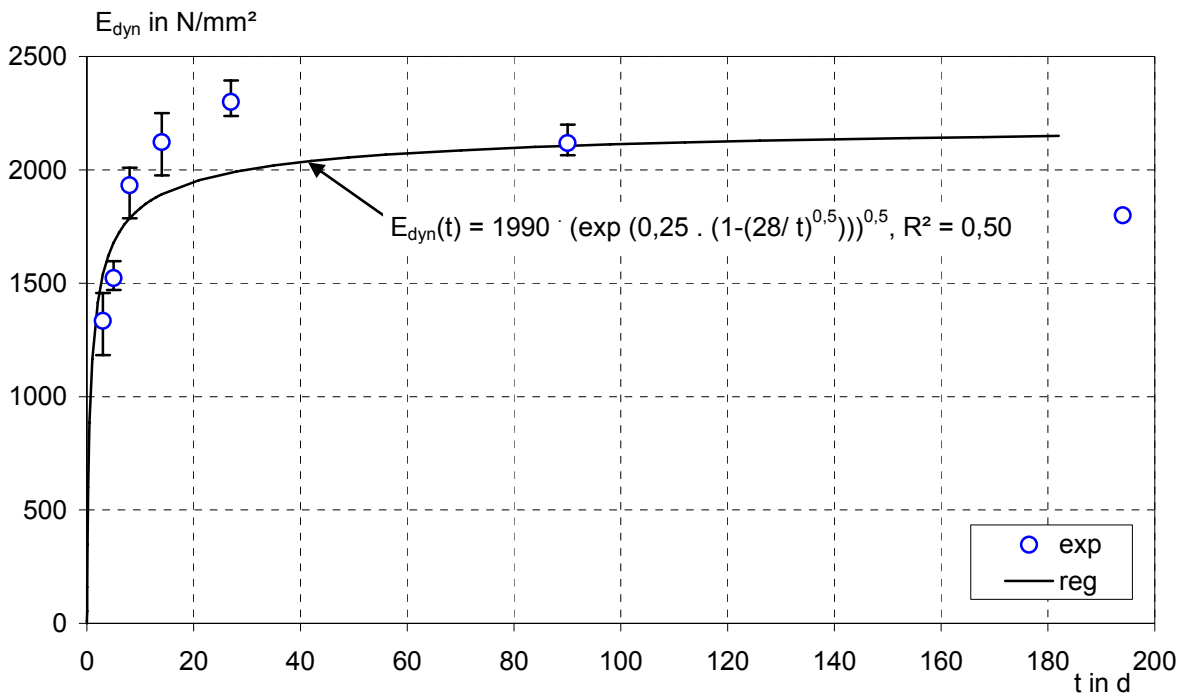
**Bild B49:** Druckfestigkeit  $\beta_{D,III}$ , Netto-Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ,N}$  und Zugfestigkeit  $\beta_Z$  des Leichtputzes in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$



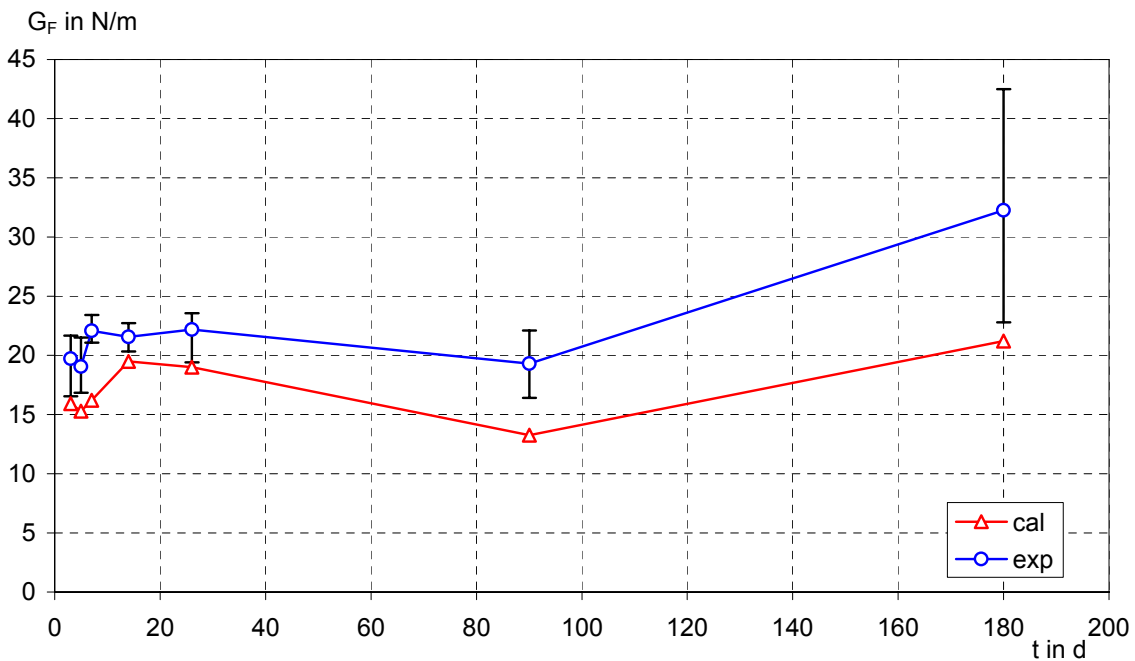
**Bild B50:** Dynamischer E-Modul  $E_{dyn}$  des Leichtputzes im Versuch (exp) und berechnet mit Näherung (reg) in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$



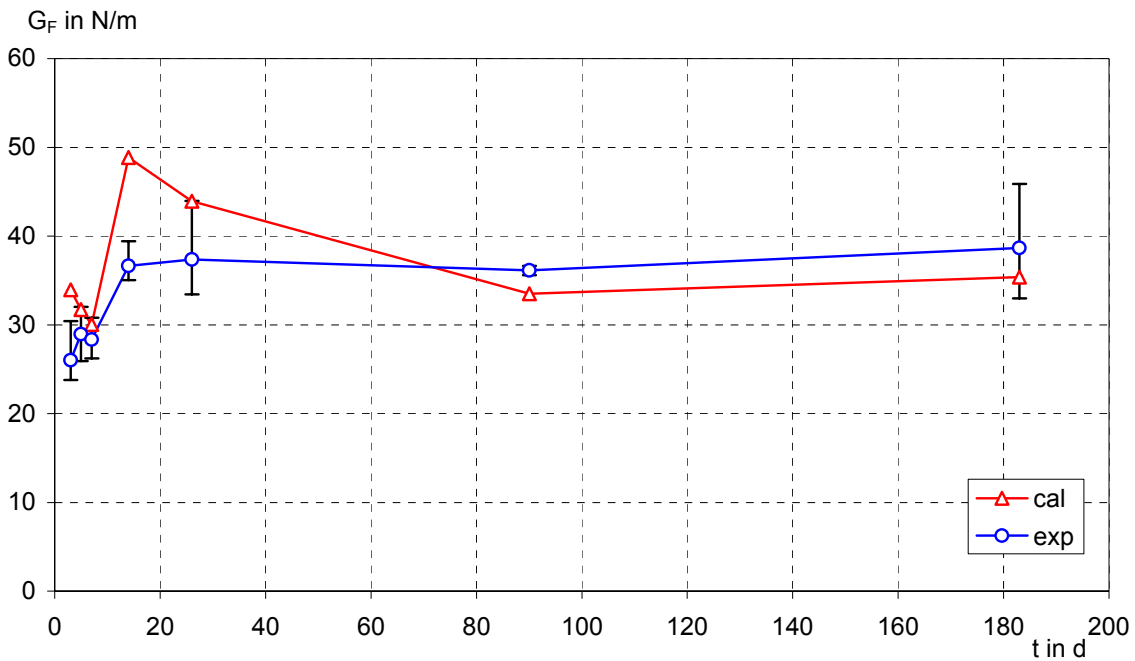
**Bild B51:** Druckfestigkeit  $\beta_{D,III}$ , Netto-Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ,N}$  und Zugfestigkeit  $\beta_Z$  des Ultraleichtputzes in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$



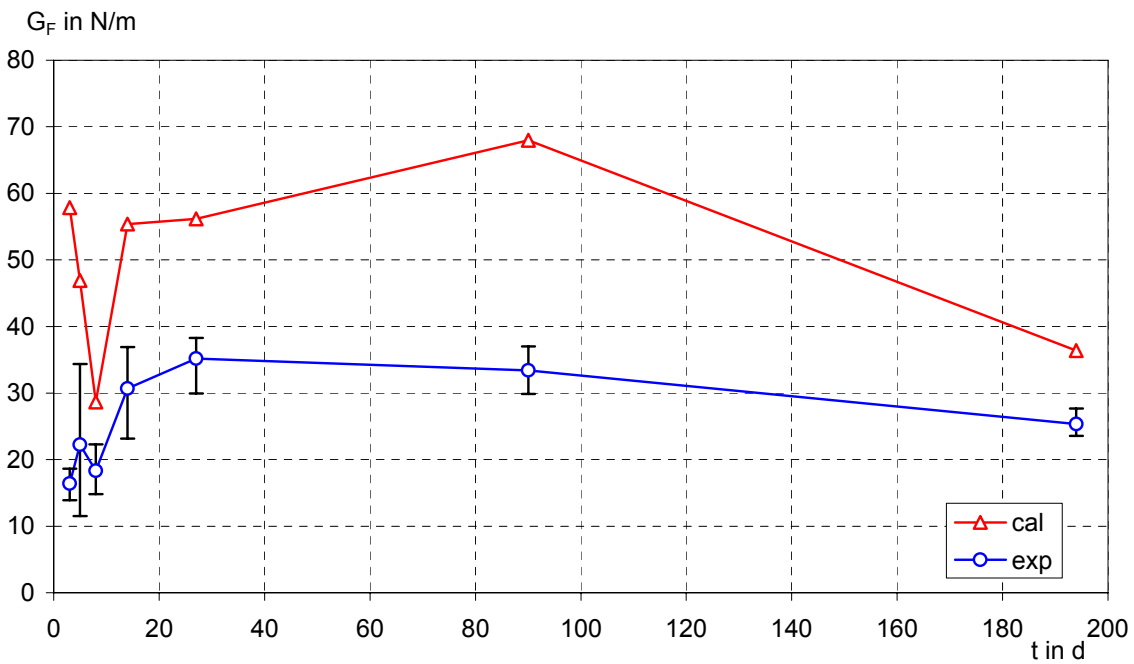
**Bild B52:** Dynamischer E-Modul  $E_{dyn}$  des Ultraleichtputzes im Versuch (exp) und berechnet mit Näherung (reg) in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$



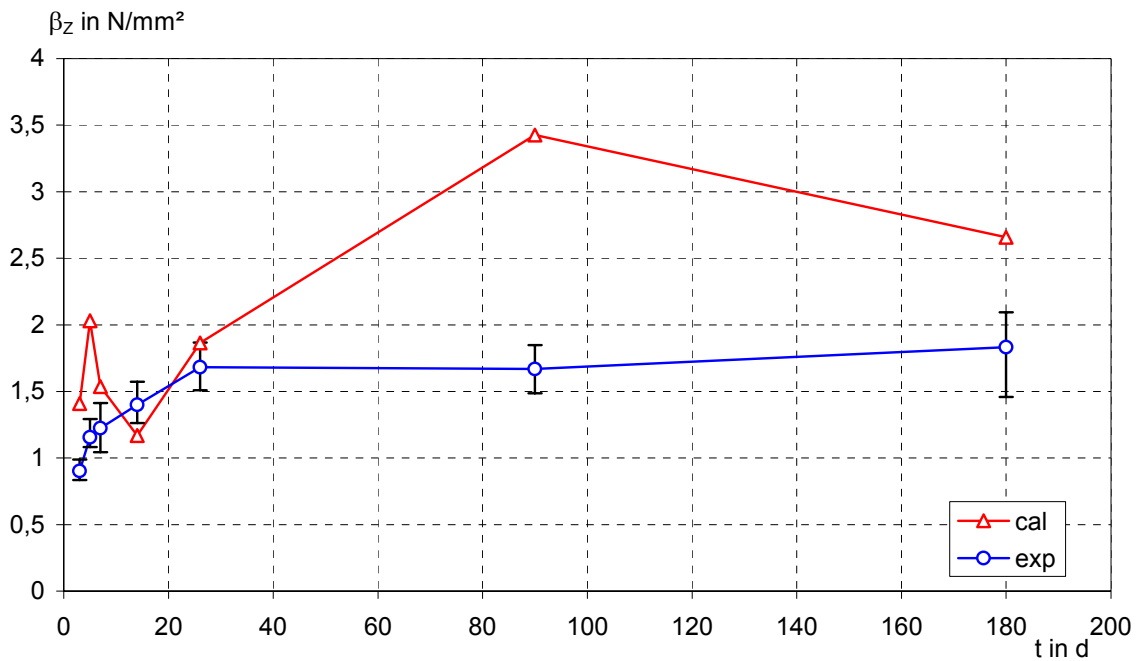
**Bild B53:** Bruchenergie  $G_F$  des Normalputzes ermittelt durch Versuchsauswertung (exp) und Simulation der Biegezugversuche (cal) in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$



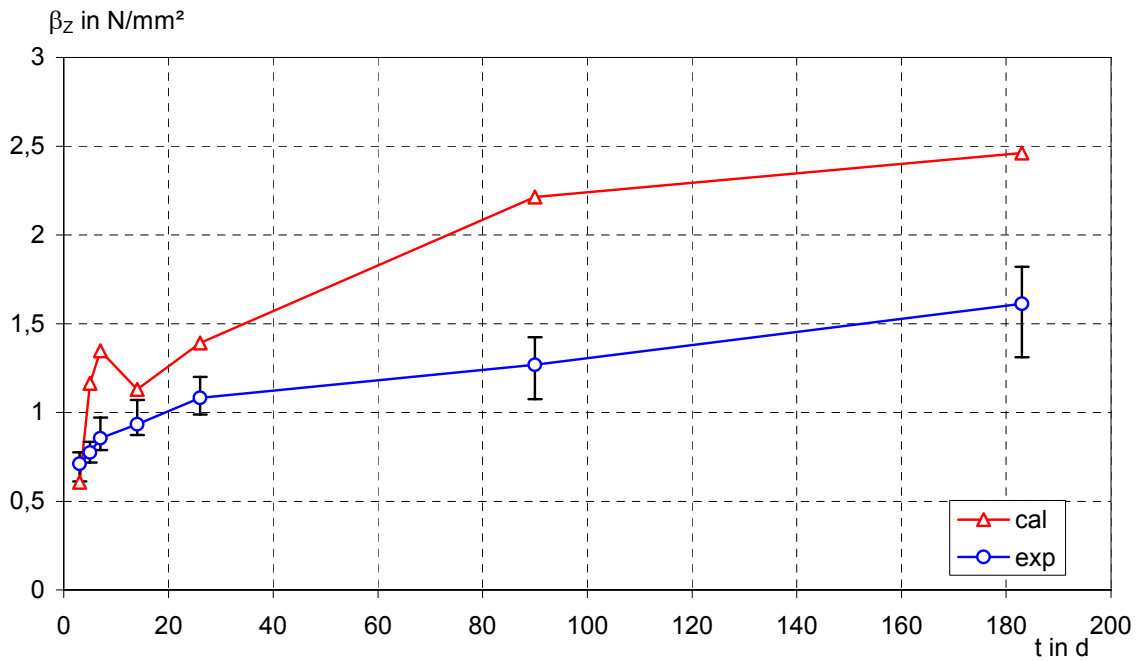
**Bild B54:** Bruchenergie  $G_F$  des Leichtputzes ermittelt durch Versuchsauswertung (exp) und Simulation der Biegezugversuche (cal) in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$



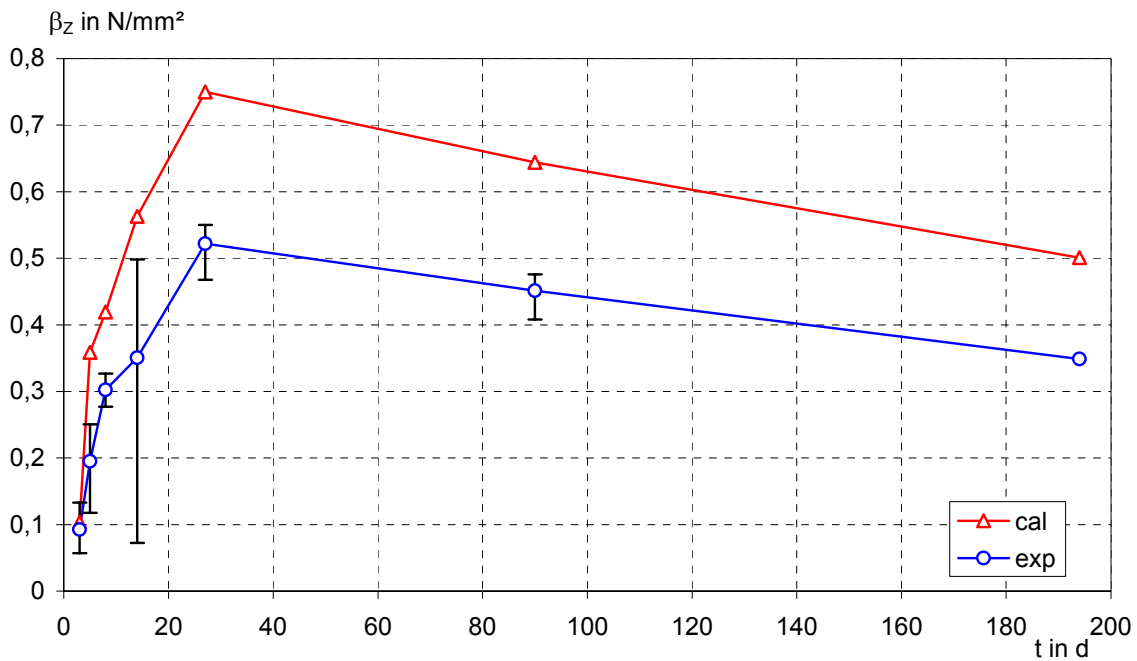
**Bild B55:** Bruchenergie  $G_F$  des Ultraleichtputzes ermittelt durch Versuchsauswertung (exp) und Simulation der Biegezugversuche (cal) in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$



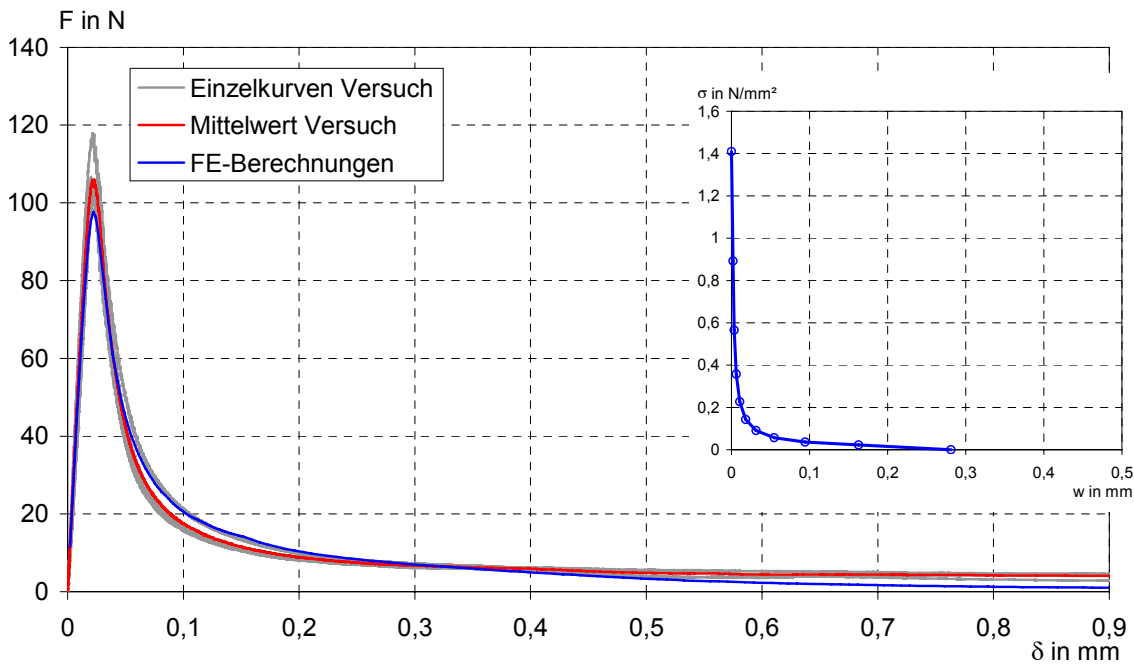
**Bild B56:** Zugfestigkeit  $\beta_z$  des Normalputzes ermittelt im zentrischen Zugversuch (exp) und durch Simulation der Biegezugversuche (cal) in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$



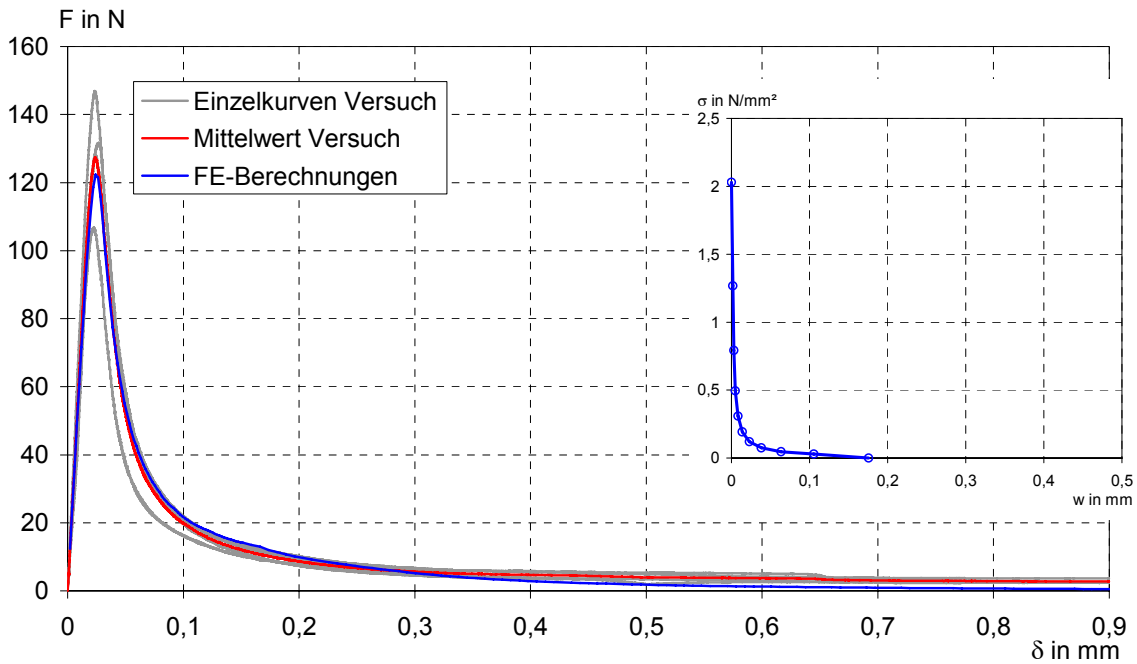
**Bild B57:** Zugfestigkeit  $\beta_z$  des Leichtputzes ermittelt im zentrischen Zugversuch (exp) und durch Simulation der Biegezugversuche (cal) in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$



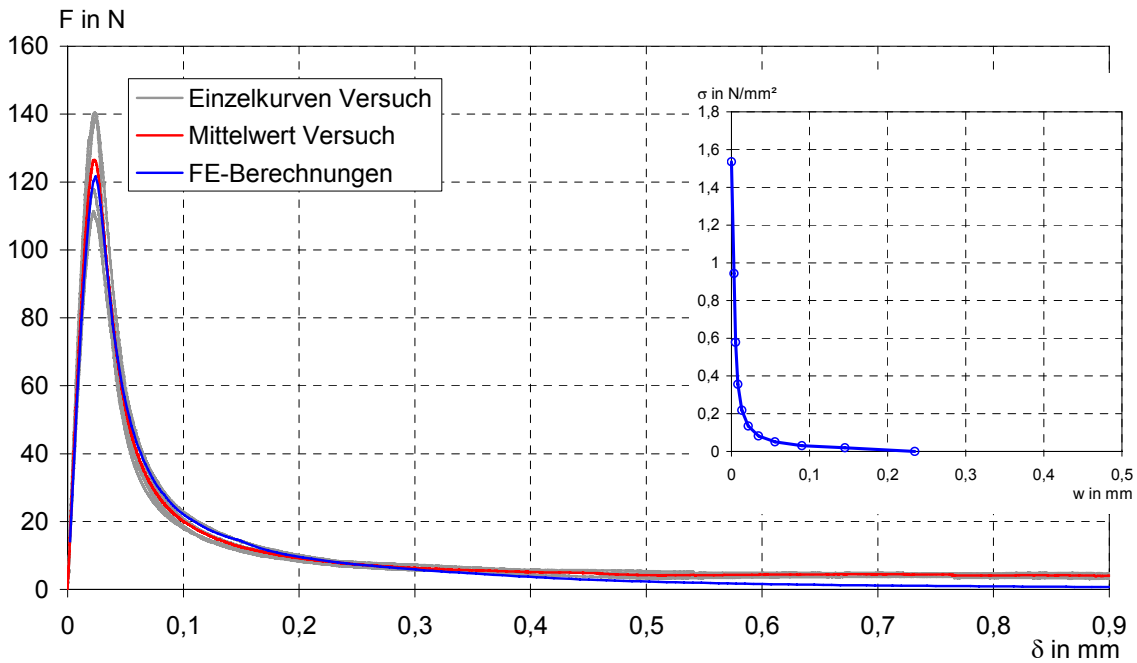
**Bild B58:** Zugfestigkeit  $\beta_z$  des Ultraleichtputzes ermittelt im zentrischen Zugversuch (exp) und durch Simulation der Biegezugversuche (cal) in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$



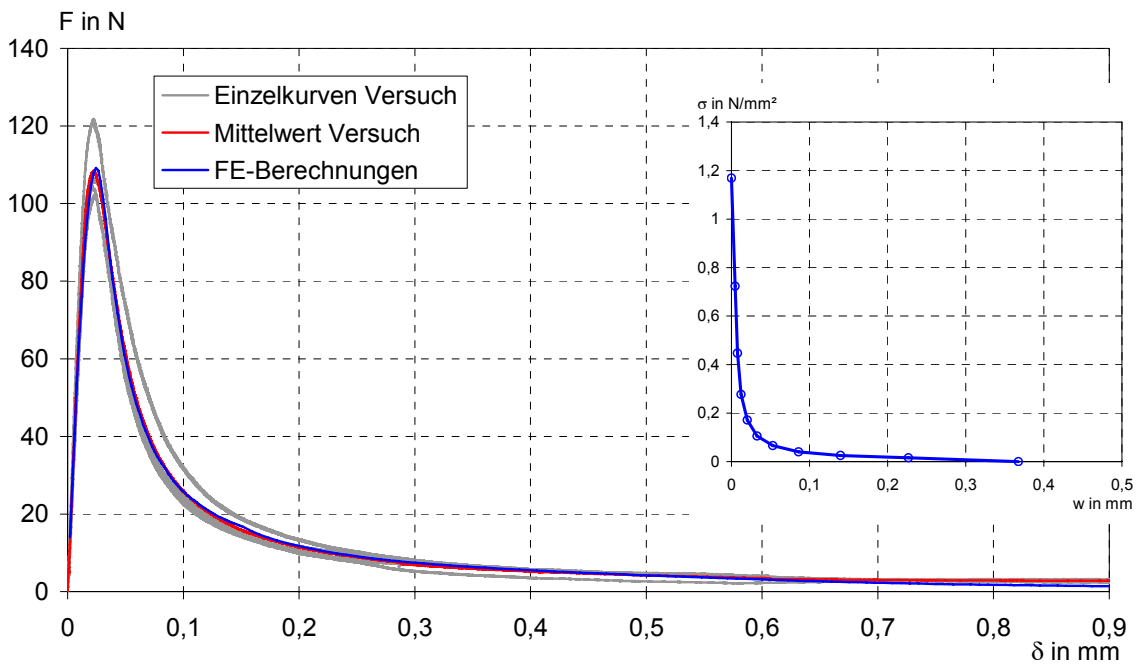
**Bild B59:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs ( $w$ )-Beziehung für Normalputz, Serie A, Prüfalter 3 d



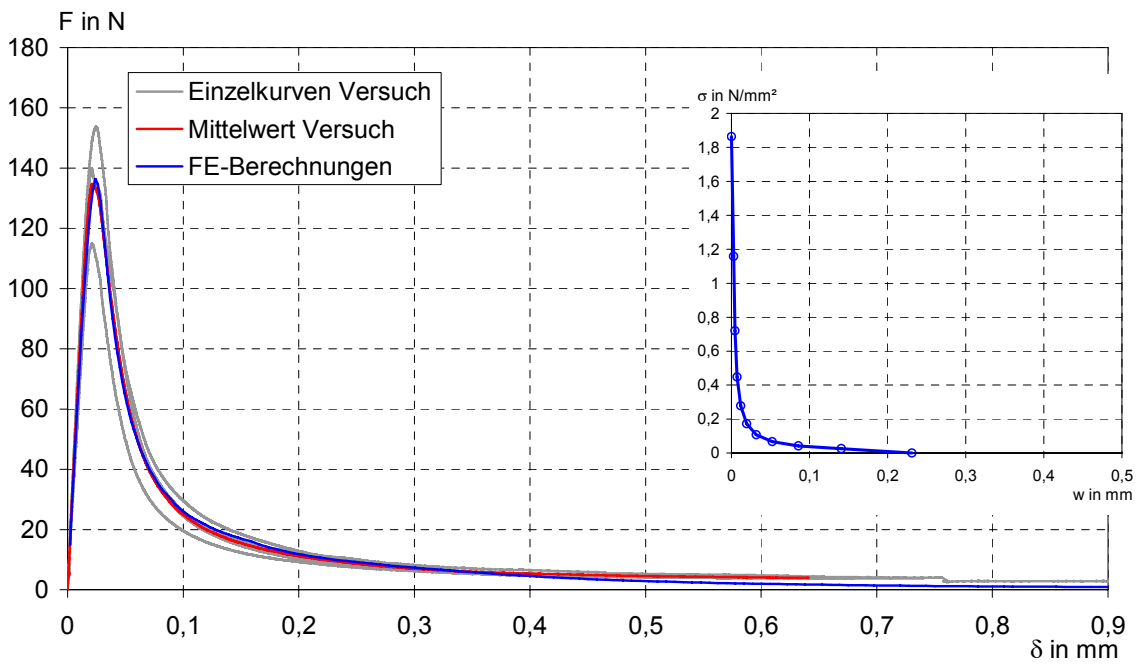
**Bild B60:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Normalputz, Serie A, Prüfalter 5 d



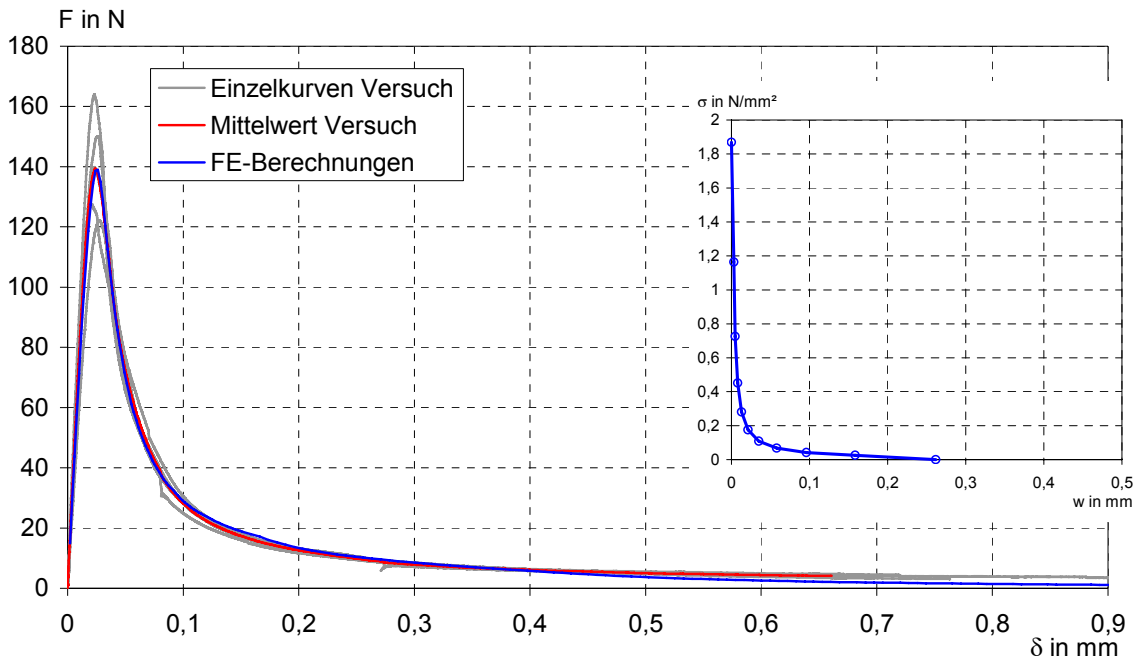
**Bild B61:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Normalputz, Serie A, Prüfalter 7 d



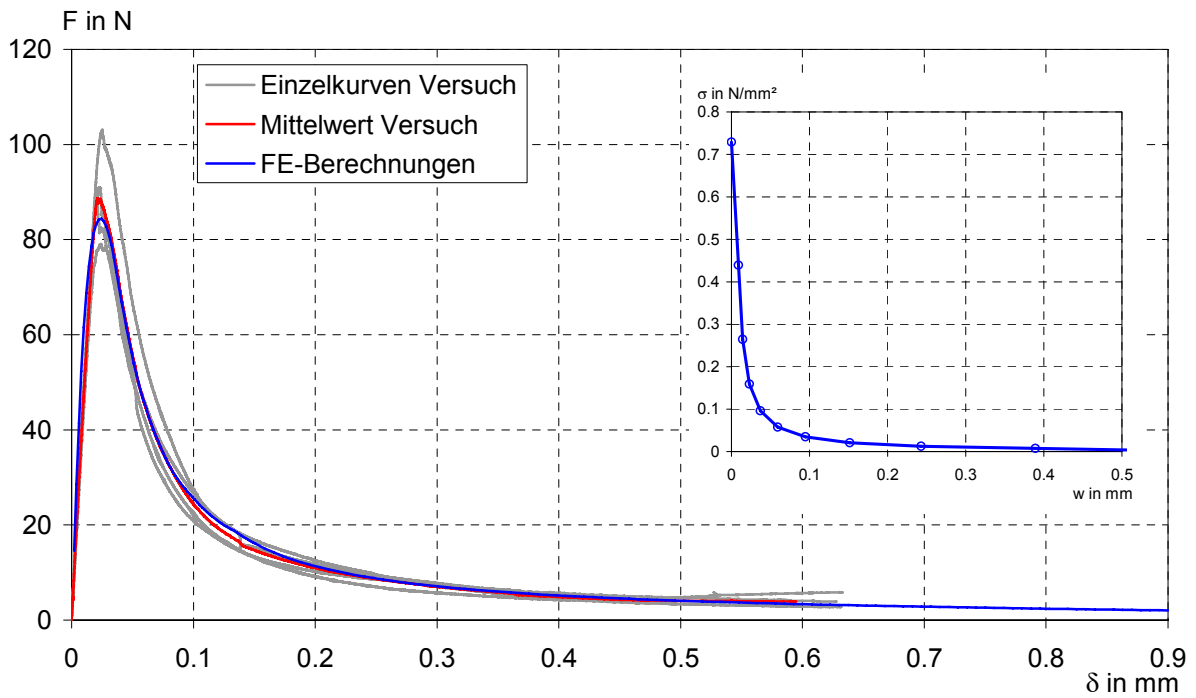
**Bild B62:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Normalputz, Serie A, Prüfalter 14 d



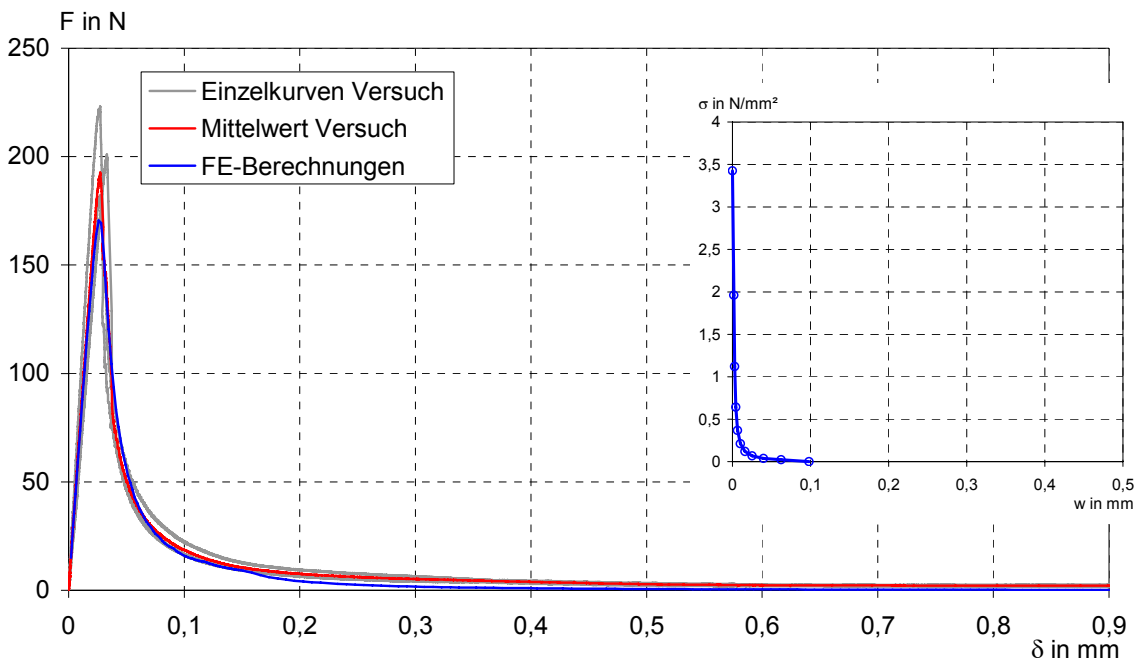
**Bild B63:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Normalputz, Serie A, Prüfalter 26 d



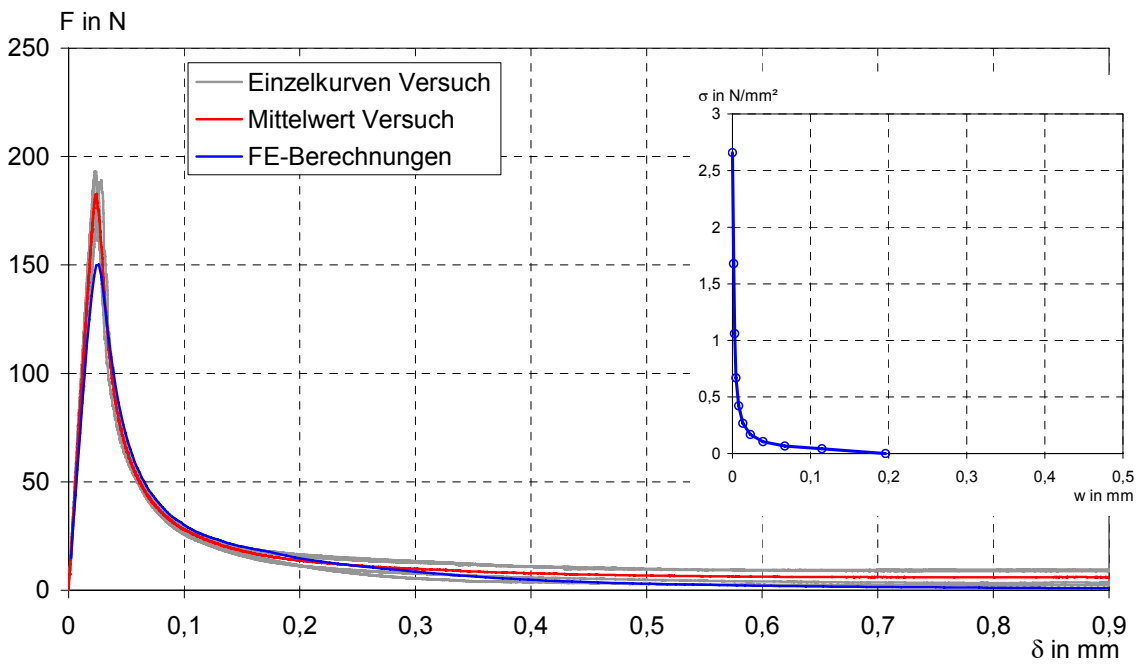
**Bild B64:** Last (F)-Durchbiegungs (δ)-Kurven und Spannungs (σ)-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Normalputz, Serie B, Prüfmuster 26 d



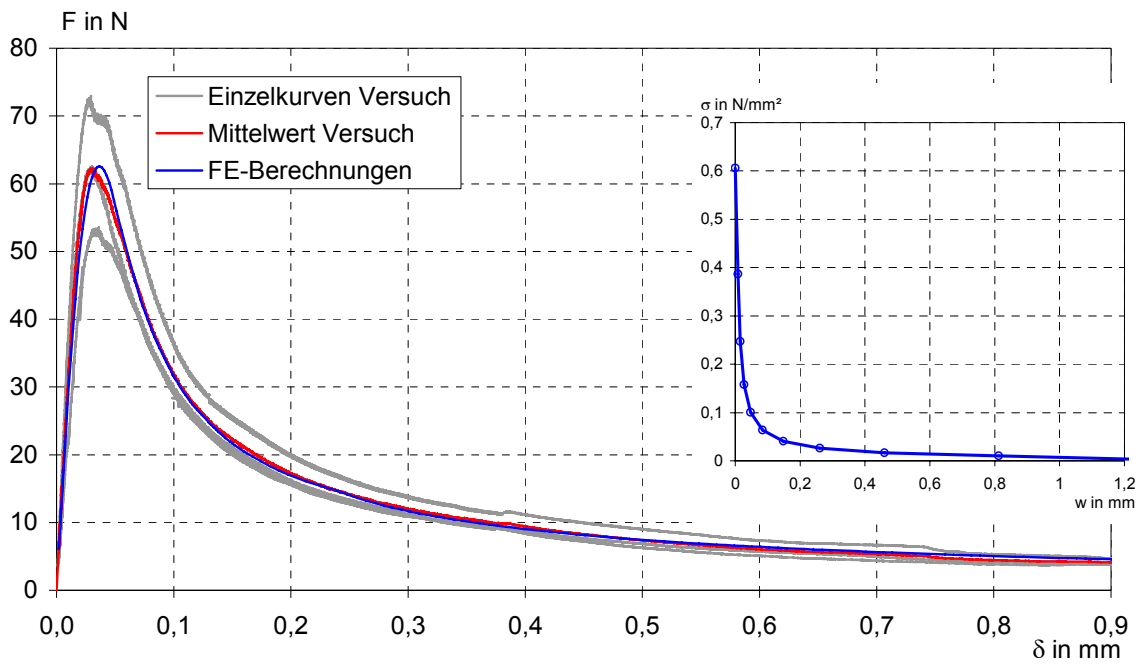
**Bild B65:** Last (F)-Durchbiegungs (δ)-Kurven und Spannungs (σ)-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Normalputz, Serie C, Prüfmuster 26 d



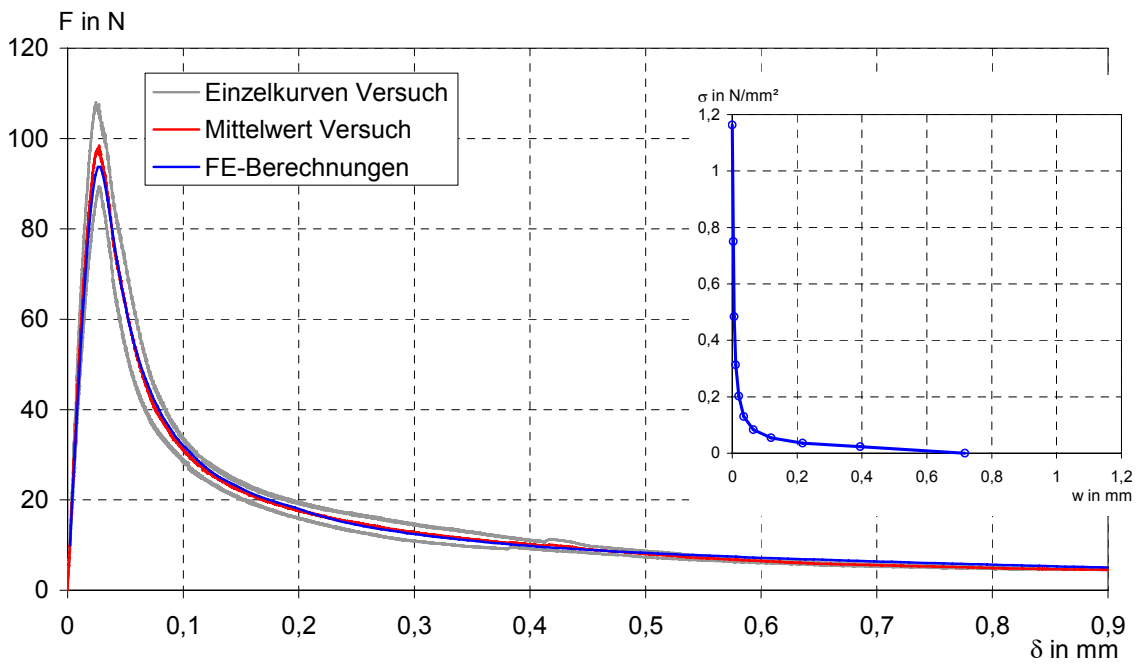
**Bild B66:** Last (F)-Durchbiegungs (δ)-Kurven und Spannungs (σ)-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Normalputz, Serie A, Prüfalter 90 d



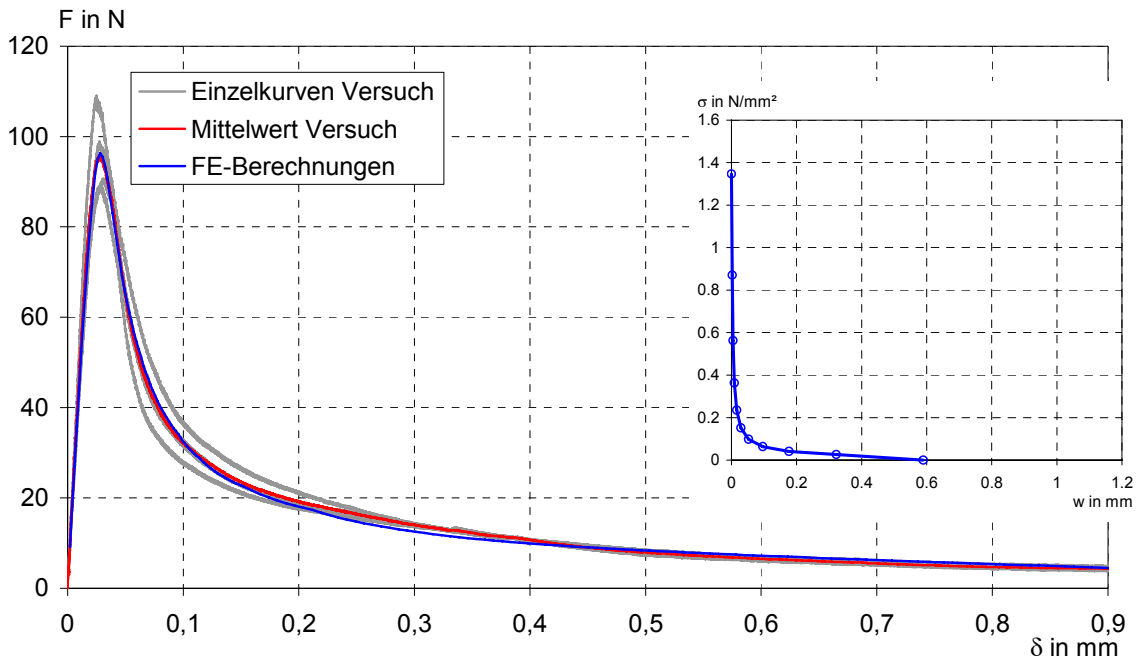
**Bild B67:** Last (F)-Durchbiegungs (δ)-Kurven und Spannungs (σ)-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Normalputz, Serie A, Prüfalter 180 d



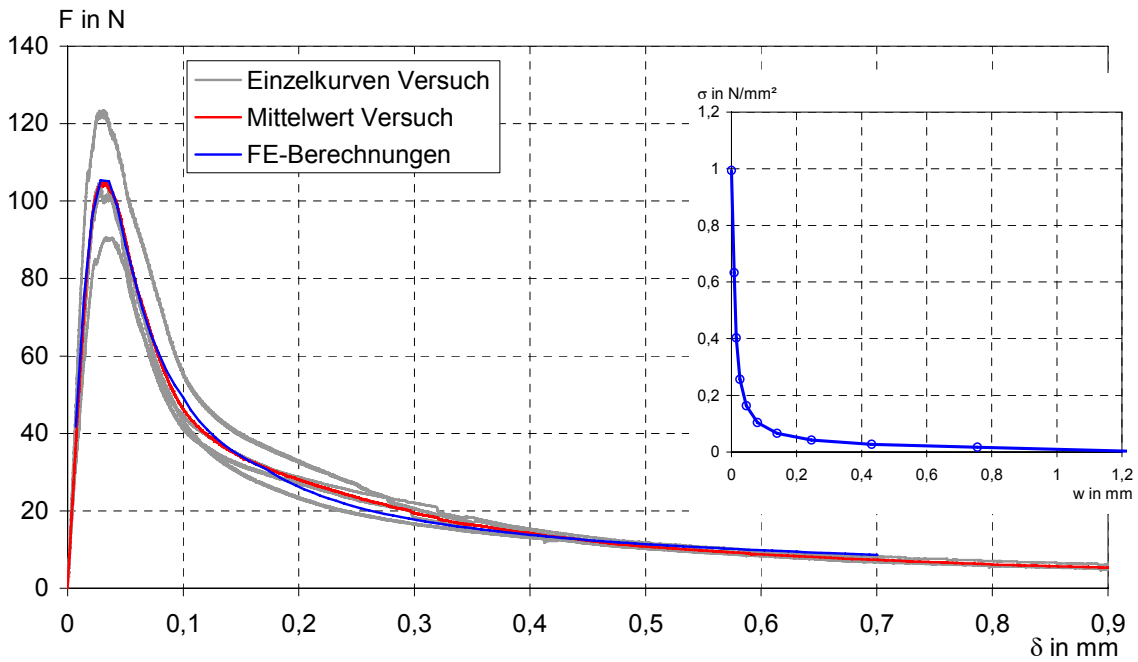
**Bild B68:** Last (F)-Durchbiegungs (δ)-Kurven und Spannungs (σ)-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Leichtputz, Serie A, Prüfmutter 3 d



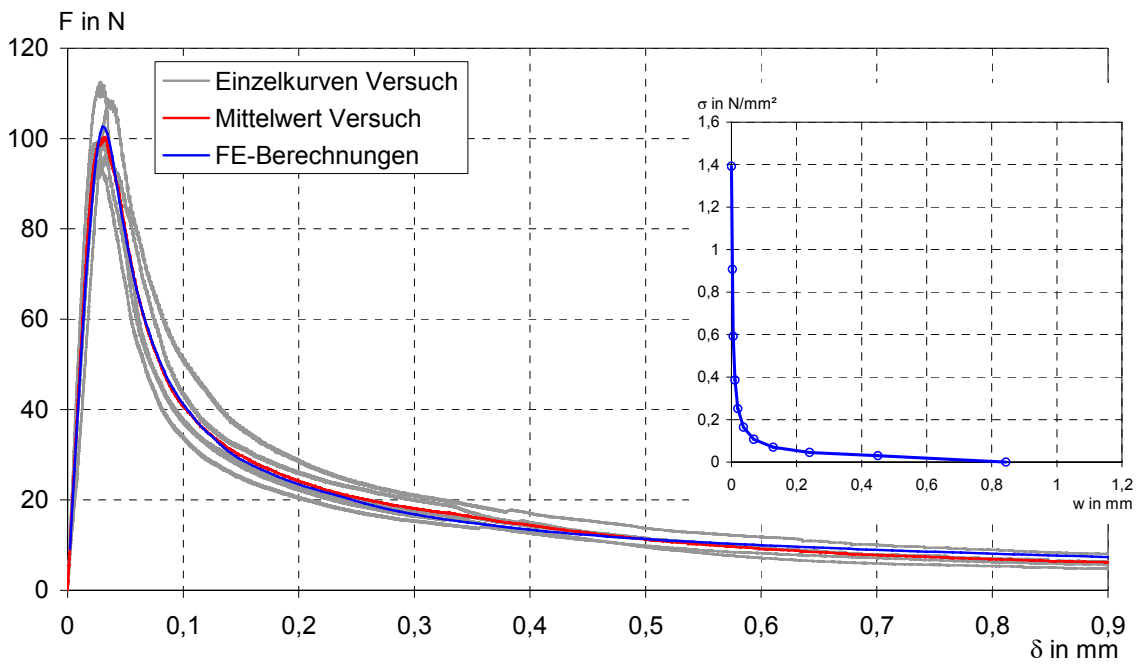
**Bild B69:** Last (F)-Durchbiegungs (δ)-Kurven und Spannungs (σ)-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Leichtputz, Serie A, Prüfmutter 5 d



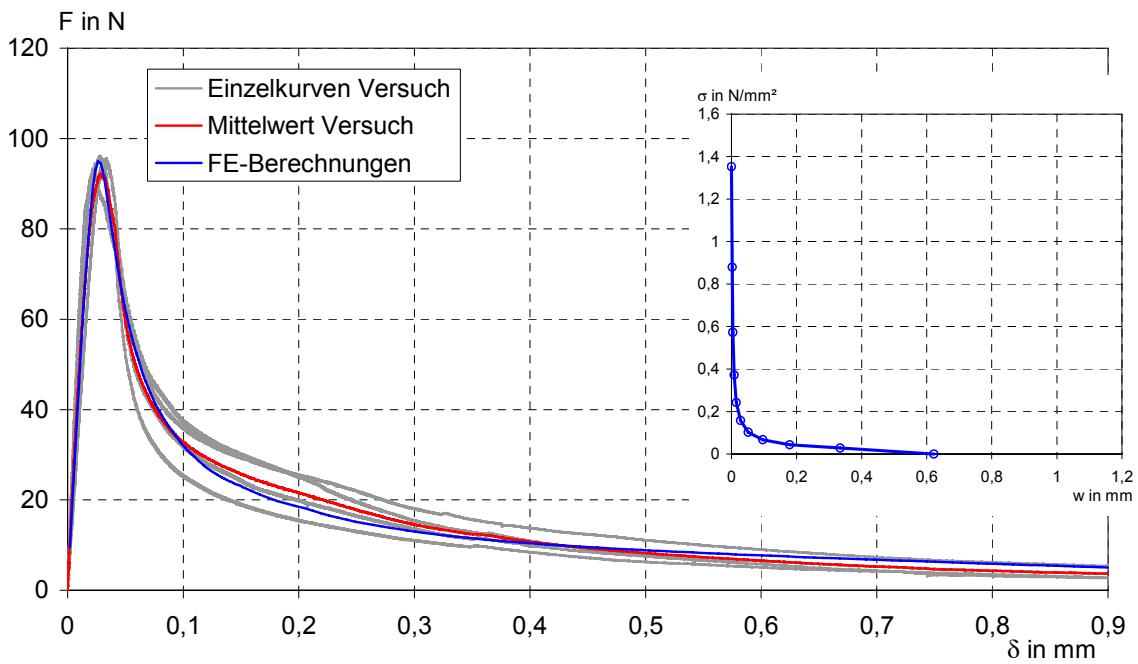
**Bild B70:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Leichtputz, Serie A, Prüfalter 7 d



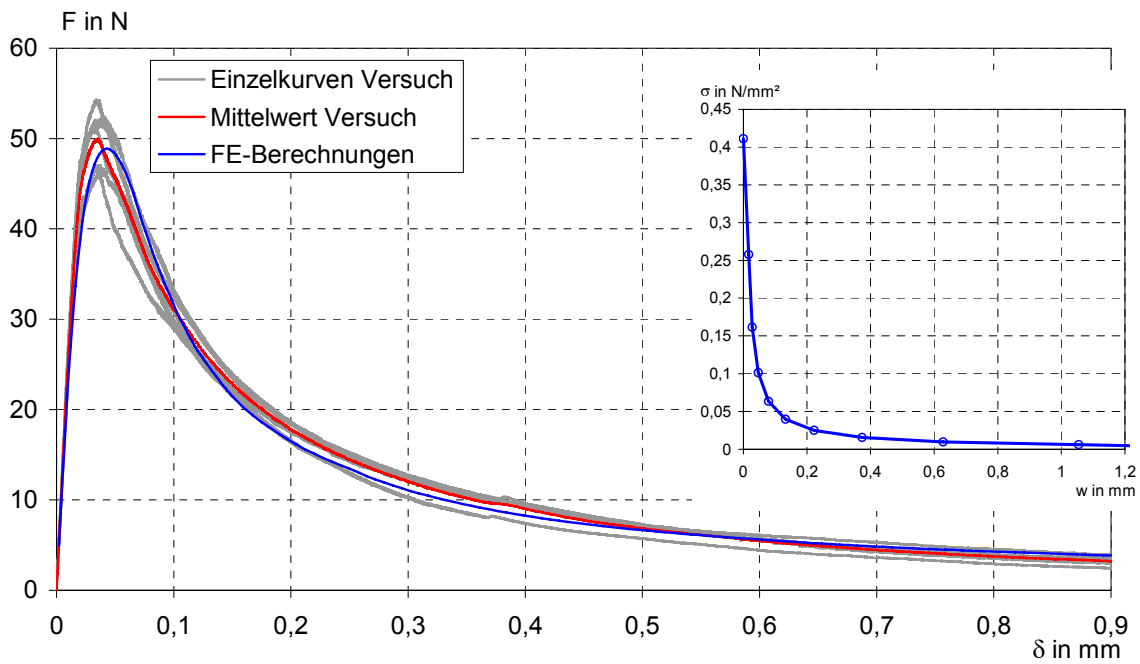
**Bild B71:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Leichtputz, Serie A, Prüfalter 14 d



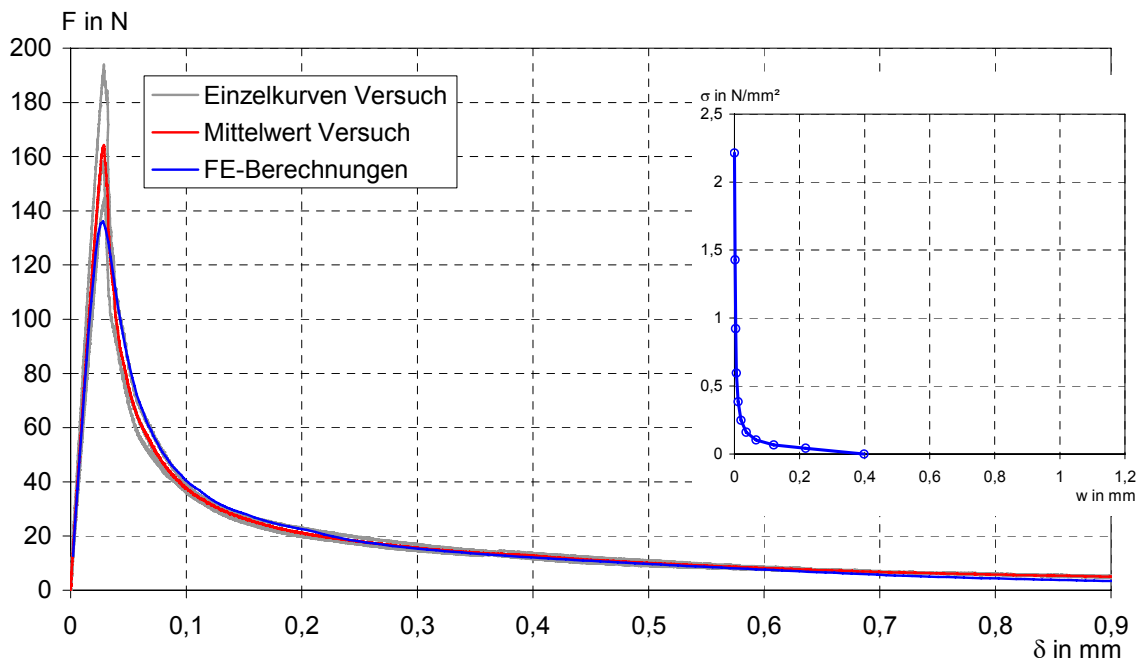
**Bild B72:** Last (F)-Durchbiegungs (δ)-Kurven und Spannungs (σ)-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Leichtputz, Serie A, Prüfalter 26 d



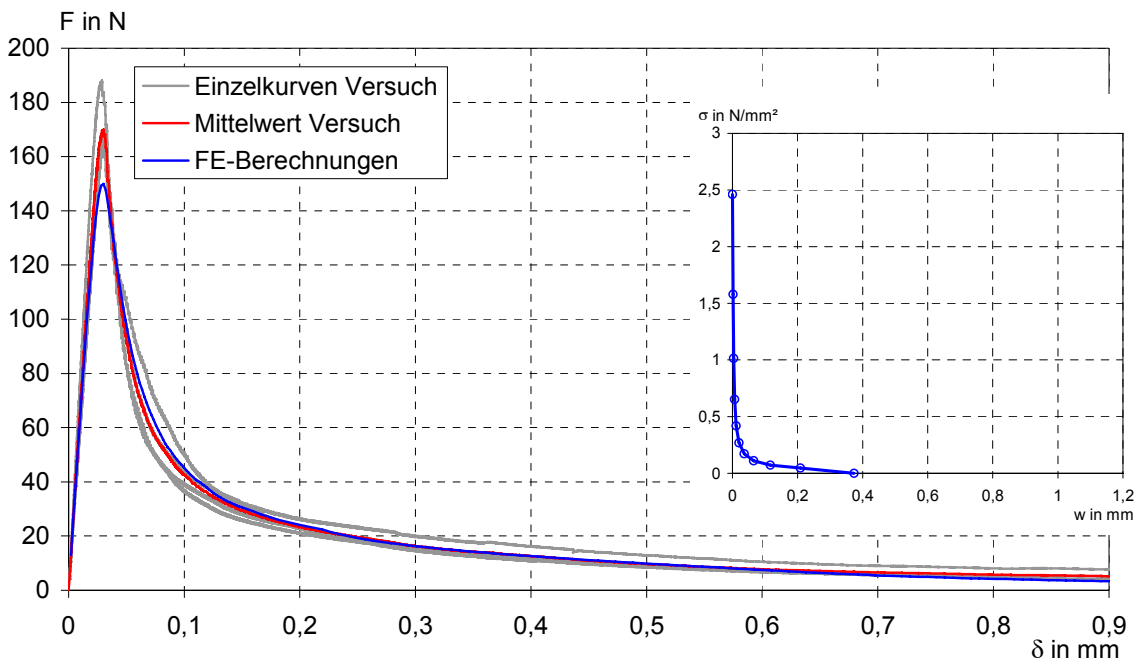
**Bild B73:** Last (F)-Durchbiegungs (δ)-Kurven und Spannungs (σ)-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Leichtputz, Serie B, Prüfalter 26 d



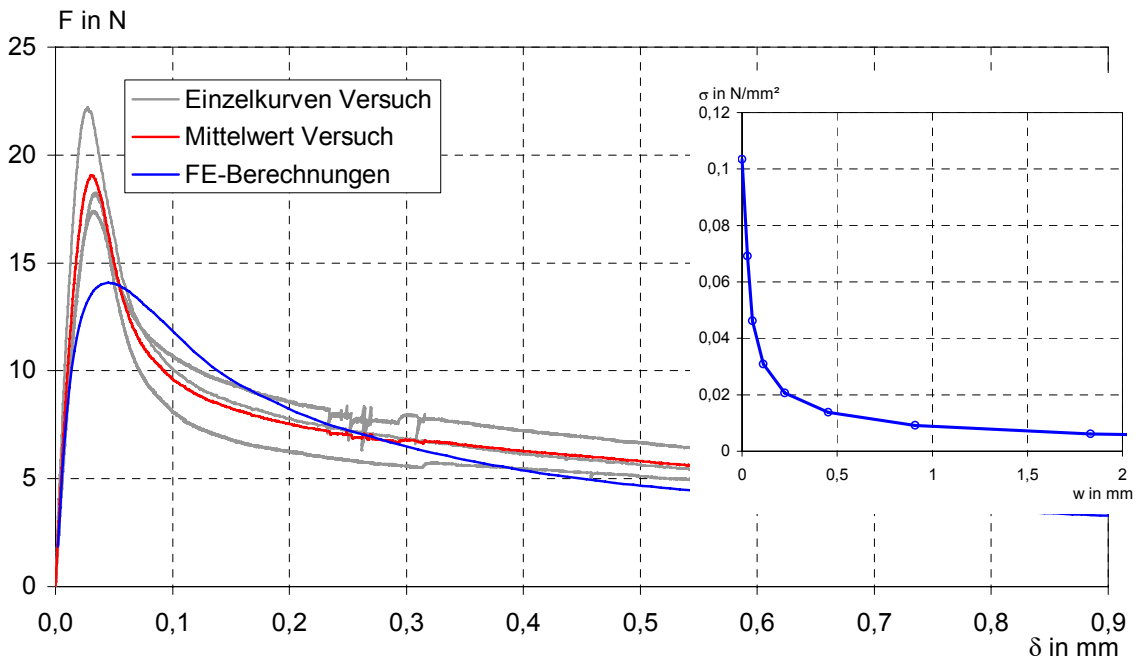
**Bild B74:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Leichtputz, Serie C, Prüfalter 26 d



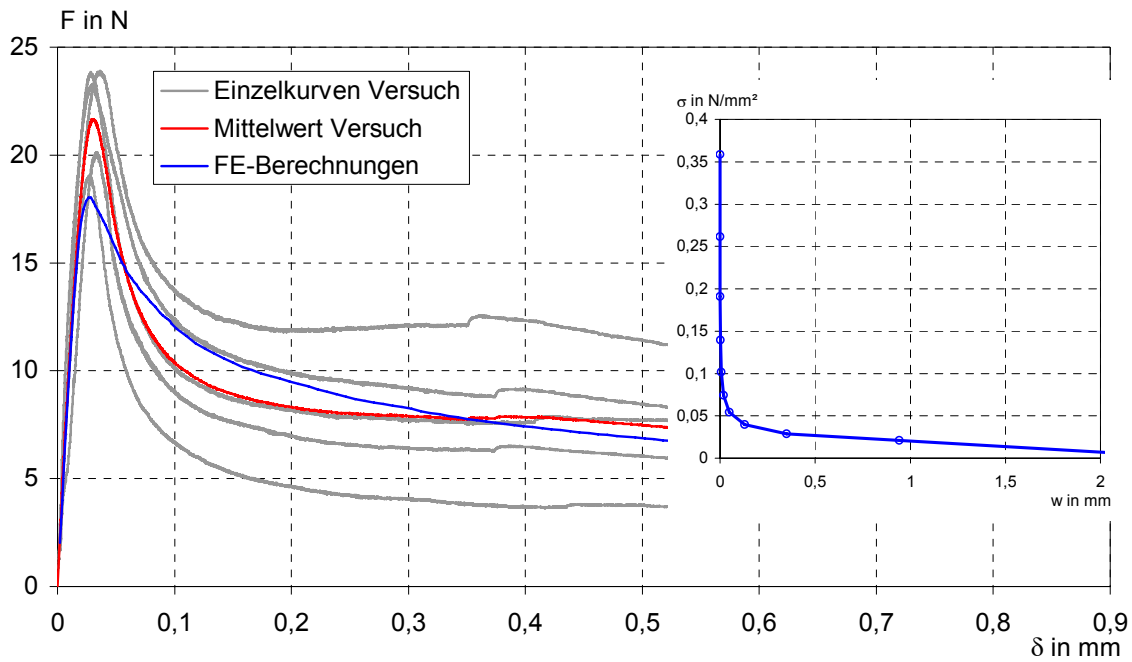
**Bild B75:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Leichtputz, Serie A, Prüfalter 90 d



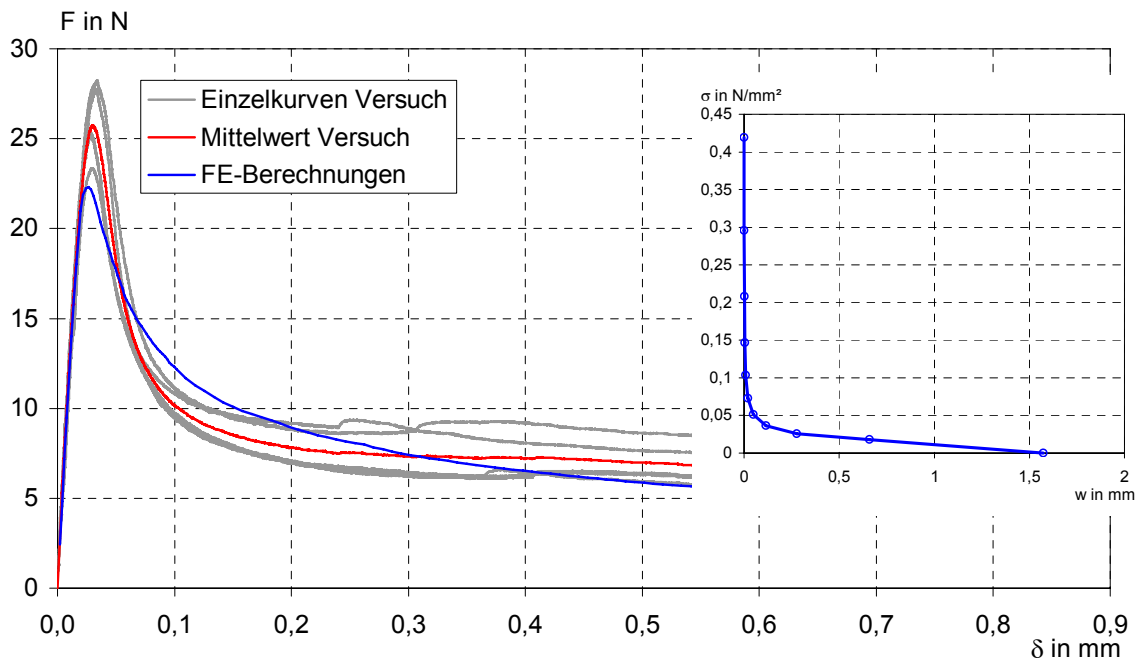
**Bild B76:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Leichtputz, Serie A, Prüfalter 183 d



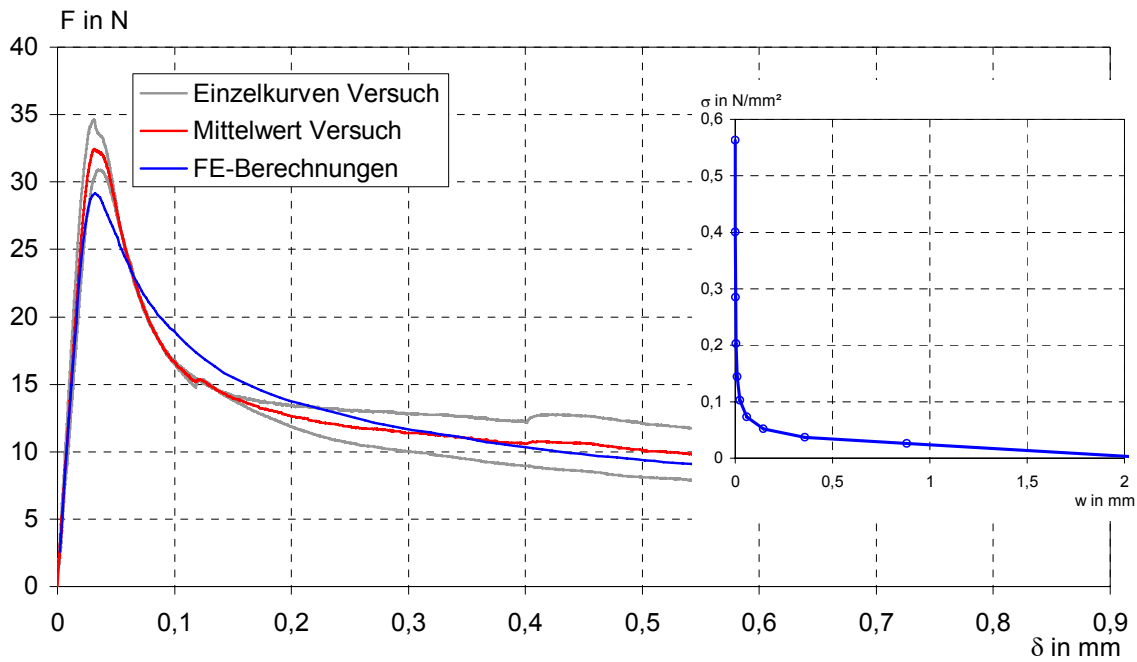
**Bild B77:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Ultraleichtputz, Serie A, Prüfalter 3 d



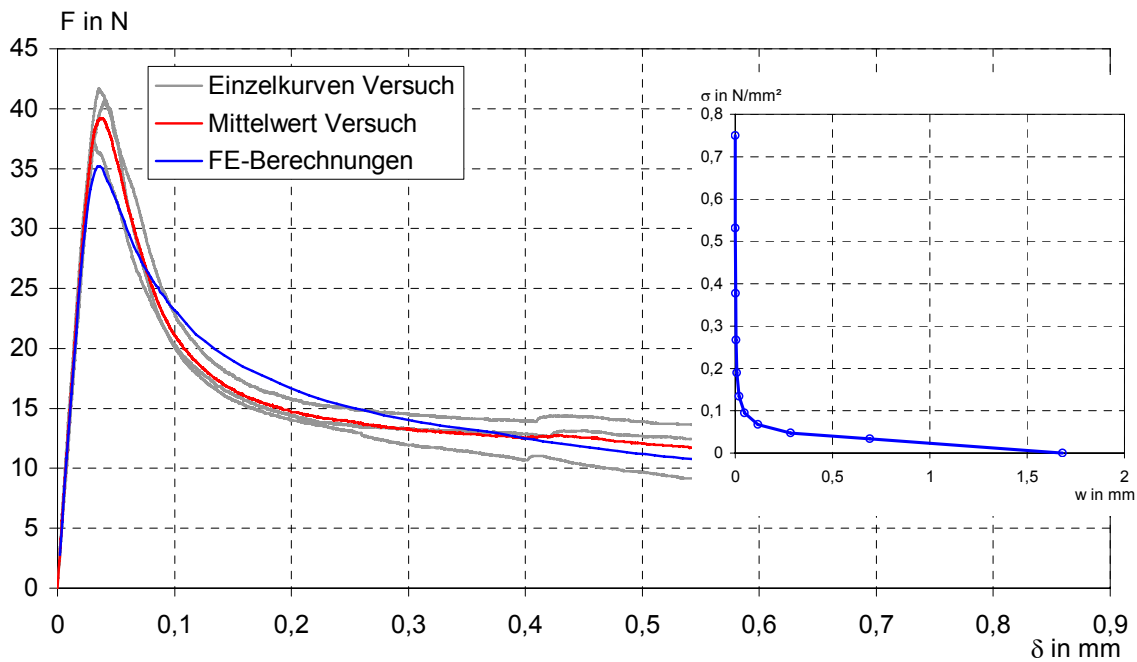
**Bild B78:** Last (F)-Durchbiegungen ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs ( $w$ )-Beziehung für Ultraleichtputz, Serie A, Prüfmutter 5 d



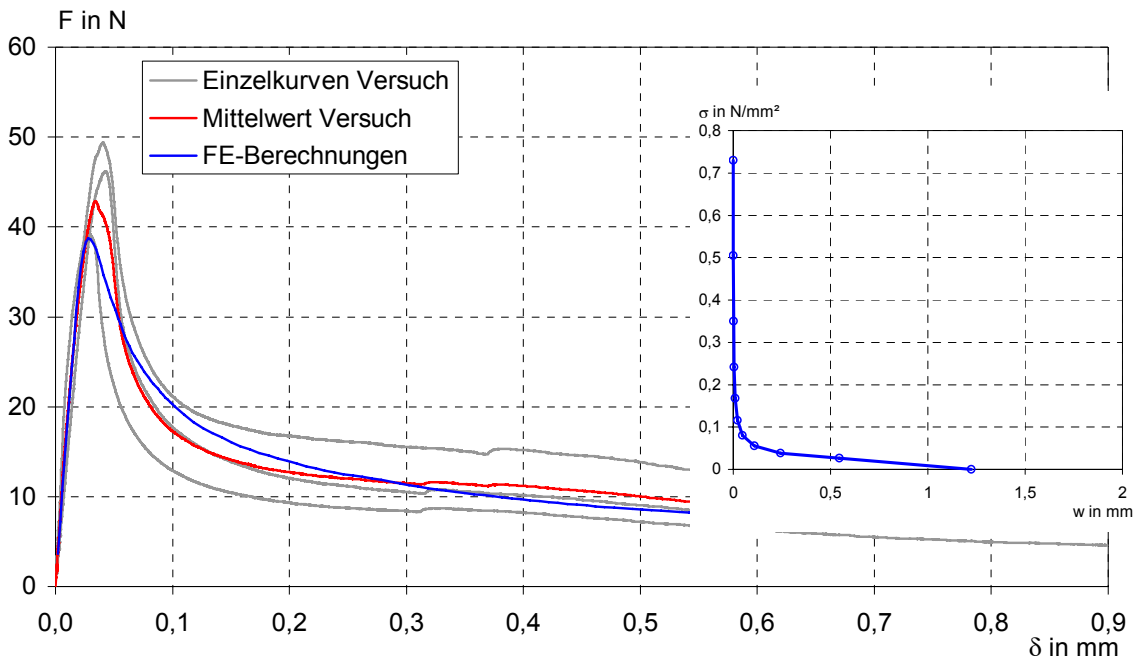
**Bild B79:** Last (F)-Durchbiegungen ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs ( $w$ )-Beziehung für Ultraleichtputz, Serie A, Prüfmutter 8 d



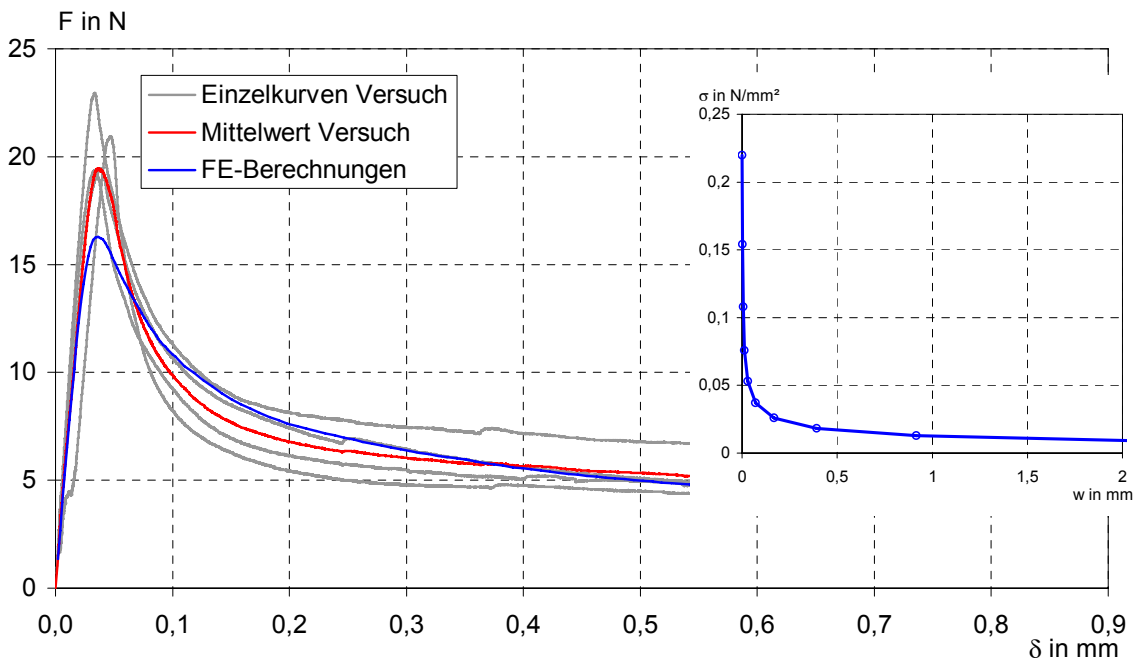
**Bild B80:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Ultraleichtputz , Serie A, Prüfalter 14 d



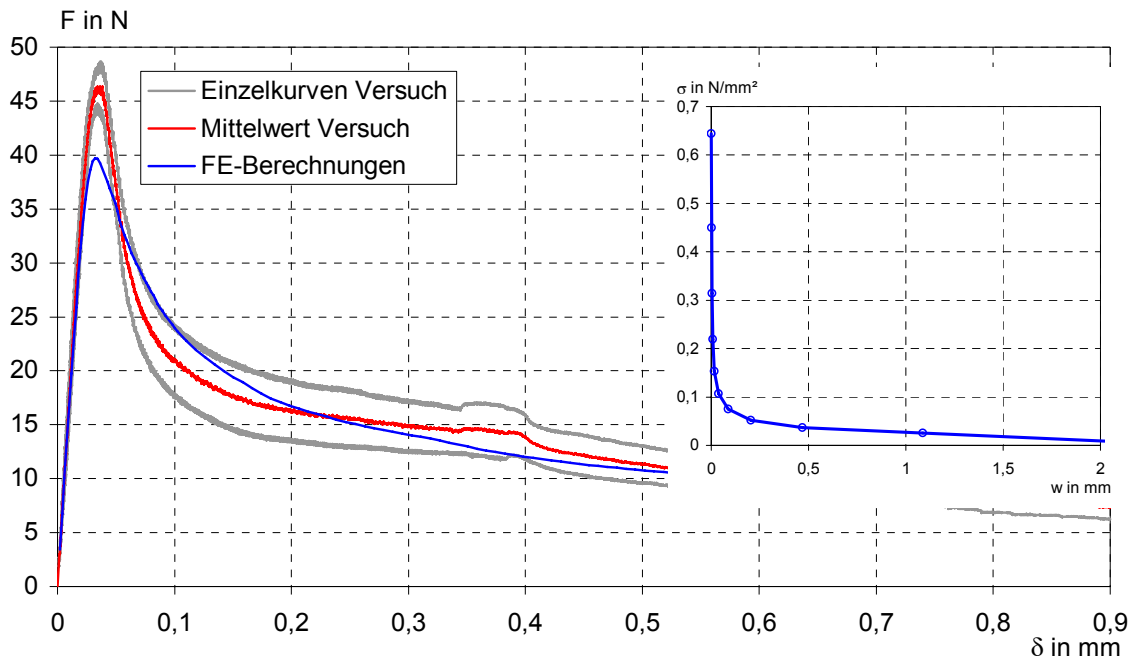
**Bild B81:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Ultraleichtputz , Serie A, Prüfalter 27 d



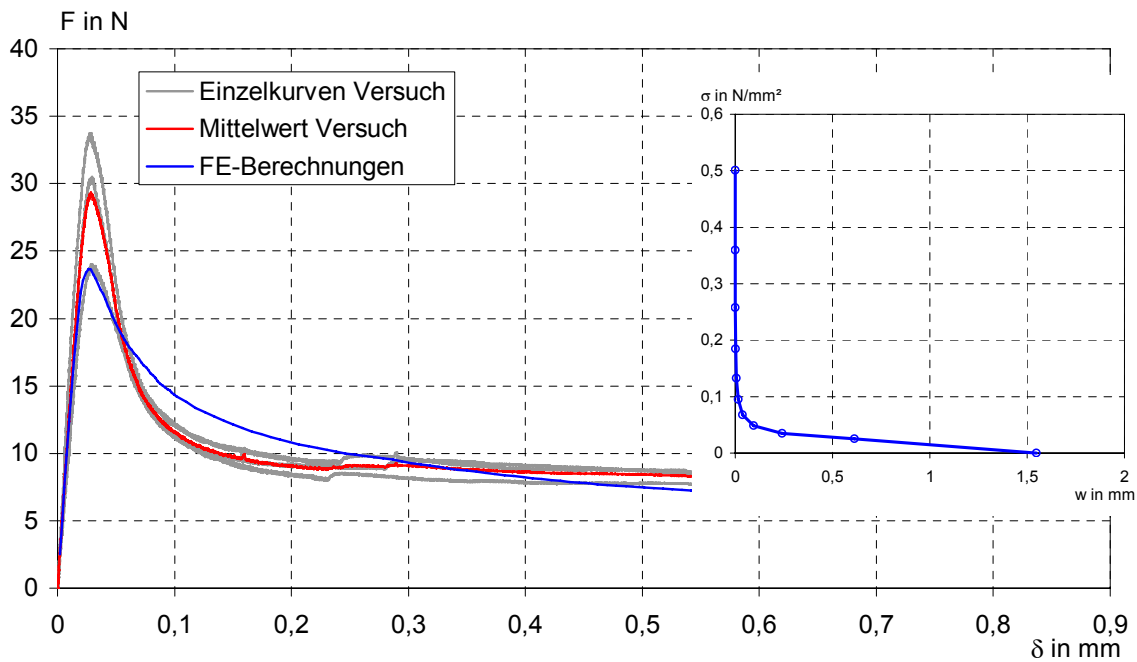
**Bild B82:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Ultraleichtputz, Serie B, Prüfalter 27 d



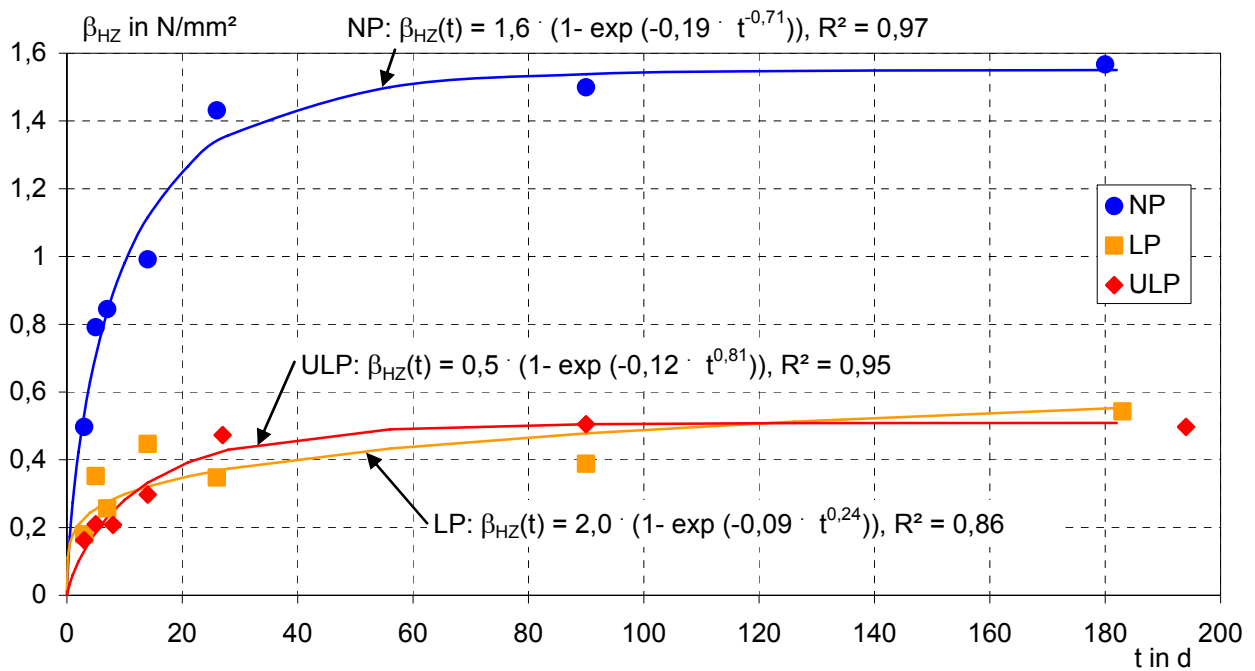
**Bild B83:** Last (F)-Durchbiegungs ( $\delta$ )-Kurven und Spannungs ( $\sigma$ )-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Ultraleichtputz, Serie C, Prüfalter 27 d



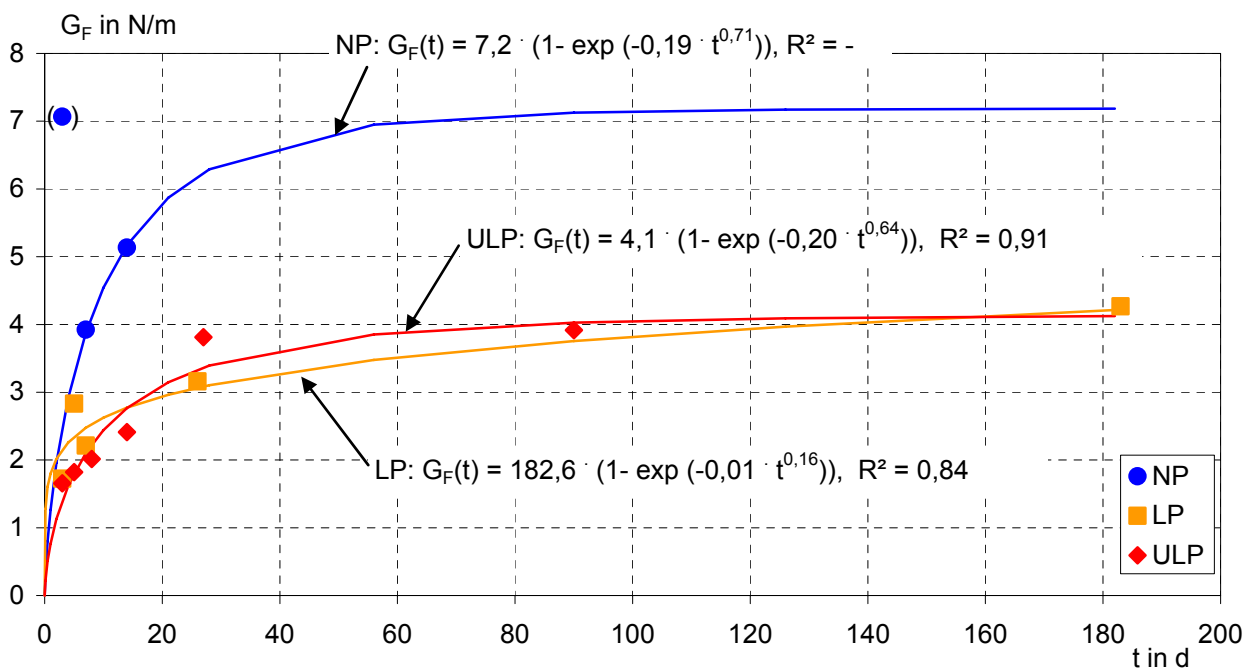
**Bild B84:** Last (F)-Durchbiegungs (δ)-Kurven und Spannungs (σ)-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Ultraleichtputz , Serie A, Prüfmutter 90 d



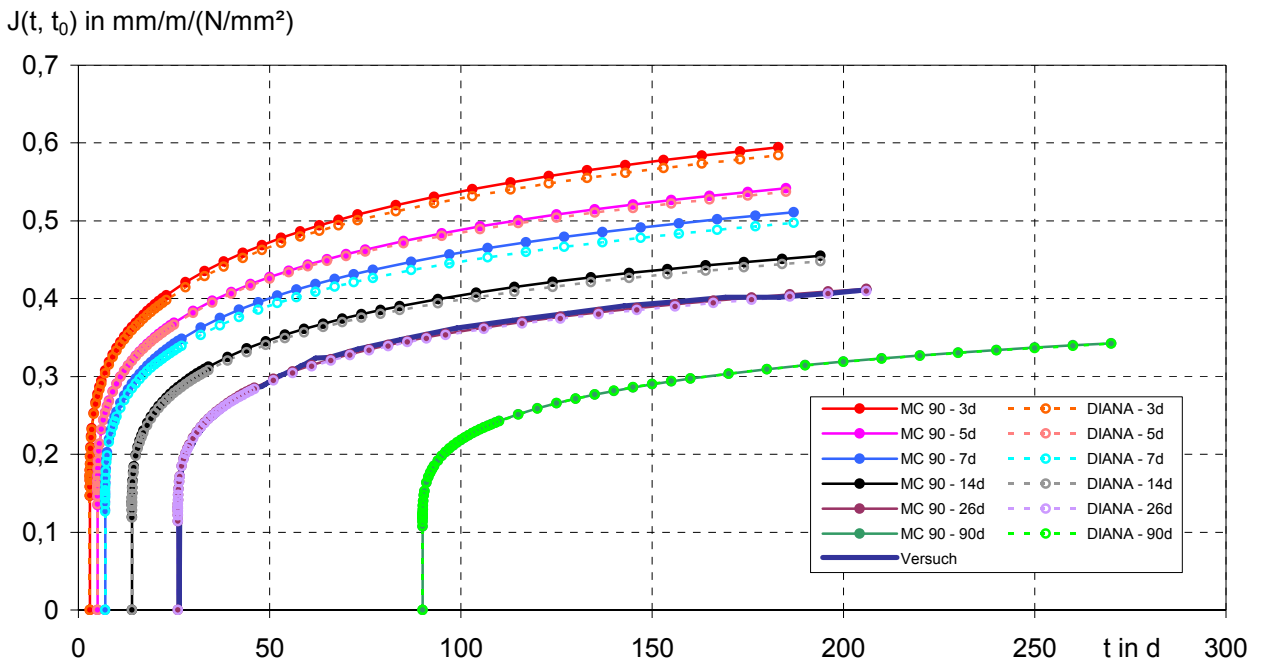
**Bild B85:** Last (F)-Durchbiegungs (δ)-Kurven und Spannungs (σ)-Rissöffnungs (w)-Beziehung für Ultraleichtputz , Serie A, Prüfmutter 194 d



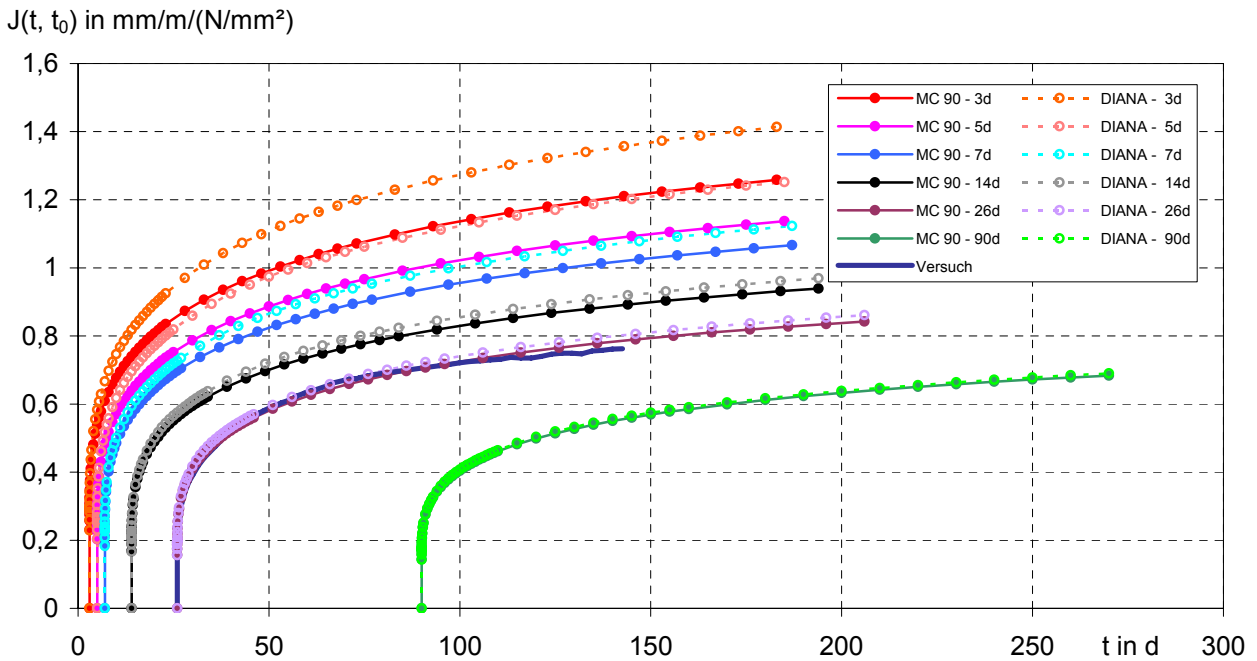
**Bild B86:** Haftzugfestigkeit  $\beta_{HZ}$  in Abhängigkeit vom Prüfalter t



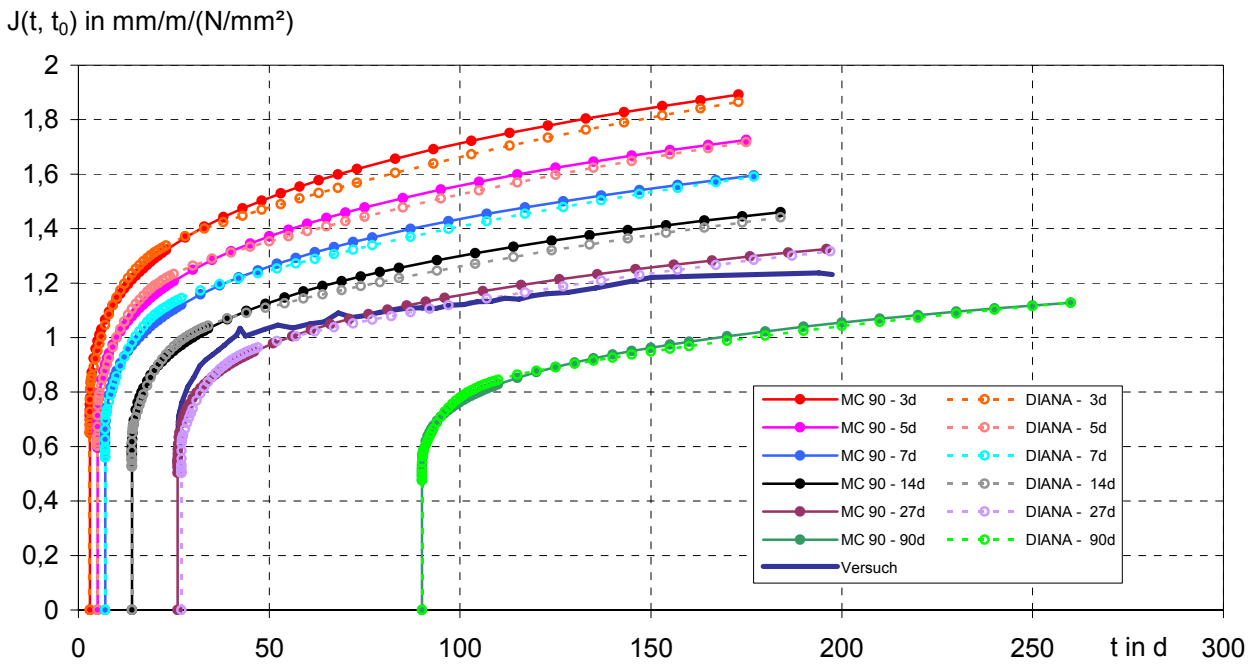
**Bild B87:** Bruchenergie  $G_F$  bei Haftzugversagen in Abhängigkeit vom Prüfalter t



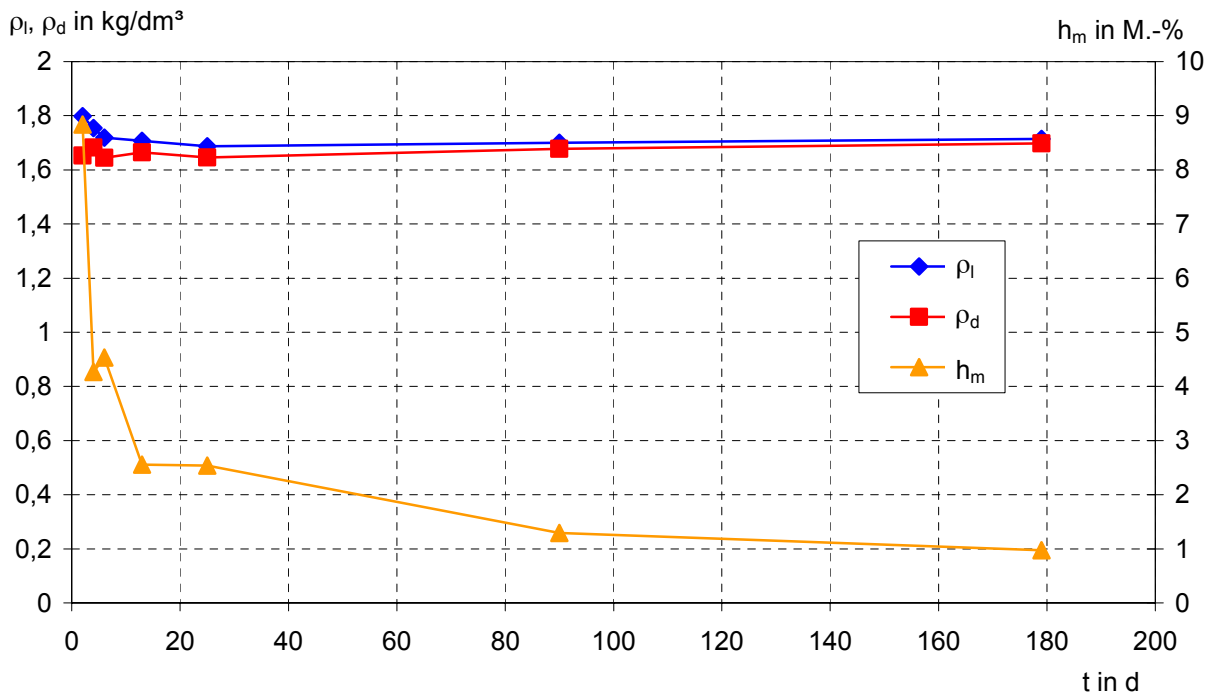
**Bild B88:** Kriechfunktion  $J(t, t_0)$  für Normalputz ermittelt mit Gleichung (34) (MC 90), mit DIANA und mit Versuch (Prüfalter: 26 Tage) in Abhängigkeit von der Belastungsdauer  $t$



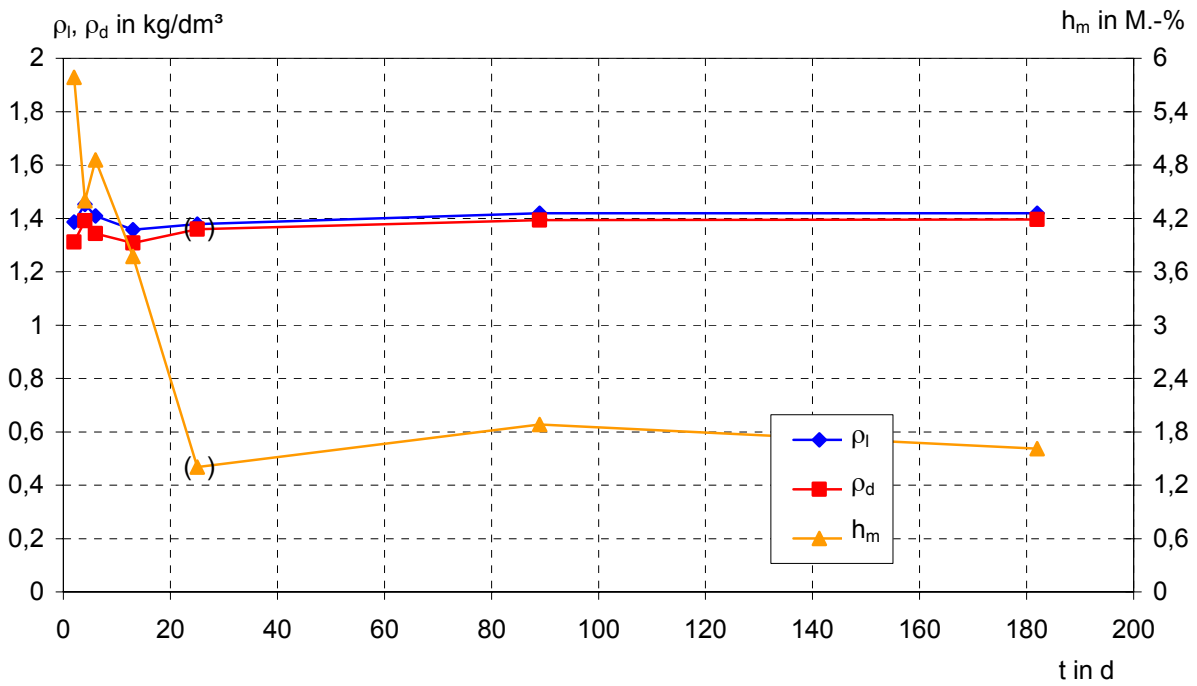
**Bild B89:** Kriechfunktion  $J(t, t_0)$  für Leichtputz ermittelt mit Gleichung (34) (MC 90), mit DIANA und mit Versuch (Prüfalter: 26 Tage) in Abhängigkeit von der Belastungsdauer  $t$



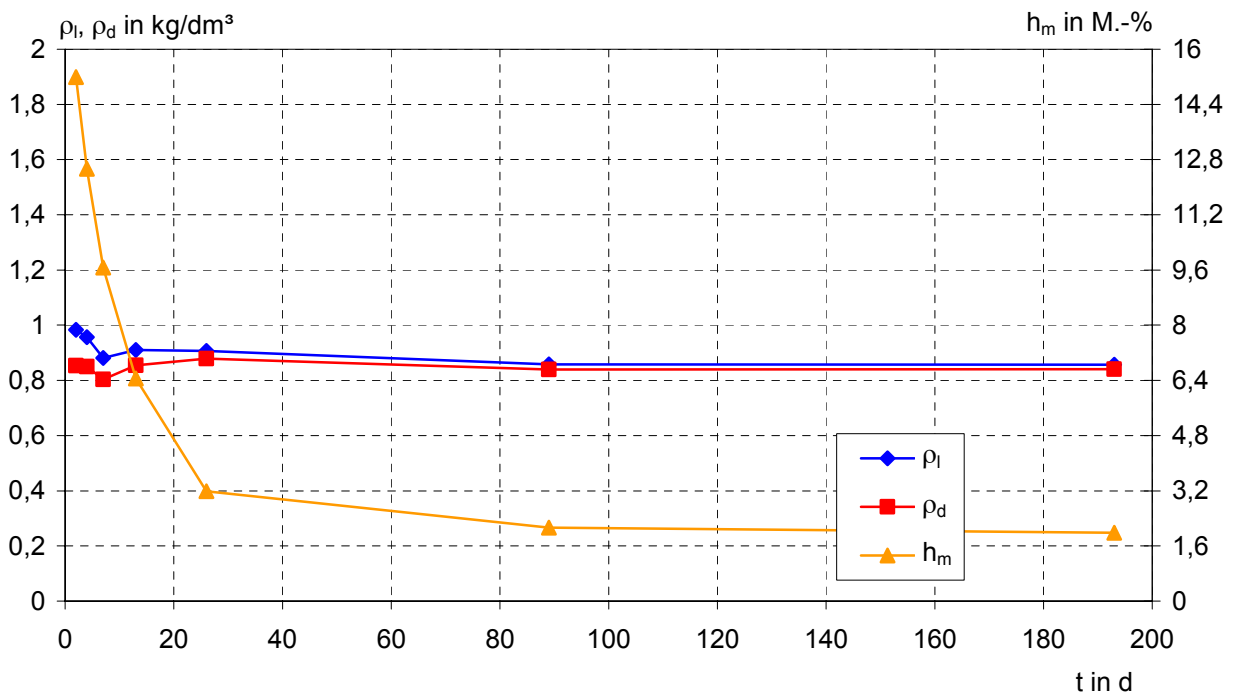
**Bild B90:** Kriechfunktion  $J(t, t_0)$  für Ultraleichtputz ermittelt mit Gleichung (34) (MC 90), mit DIANA und mit Versuch (Prüfalter: 27 Tage) in Abhängigkeit von der Belastungsdauer  $t$



**Bild B91:** Rohdichte (lufttrocken)  $\rho_l$ , Trockenrohddichte  $\rho_d$  und Feuchtegehalt  $h_m$  des Normalputzes in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$



**Bild B92:** Rohdichte (lufttrocken)  $\rho_l$ , Trockenrohichte  $\rho_d$  und Feuchtegehalt  $h_m$  des Leichtputzes in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$



**Bild B93:** Rohdichte (lufttrocken)  $\rho_l$ , Trockenrohichte  $\rho_d$  und Feuchtegehalt  $h_m$  des Ultraleichtputzes in Abhängigkeit vom Prüfalter  $t$

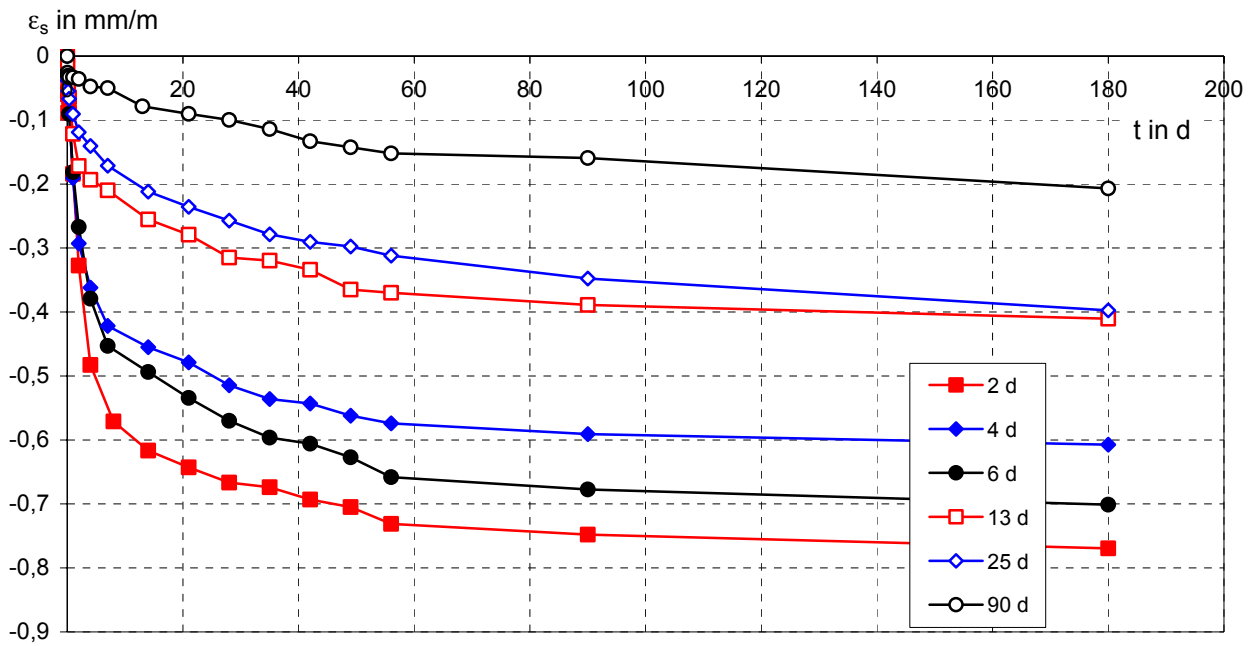


Bild B94: Schwinddehnung  $\epsilon_s$  der Prismen aus Normalputz in Abhängigkeit von der Prüfdauer t

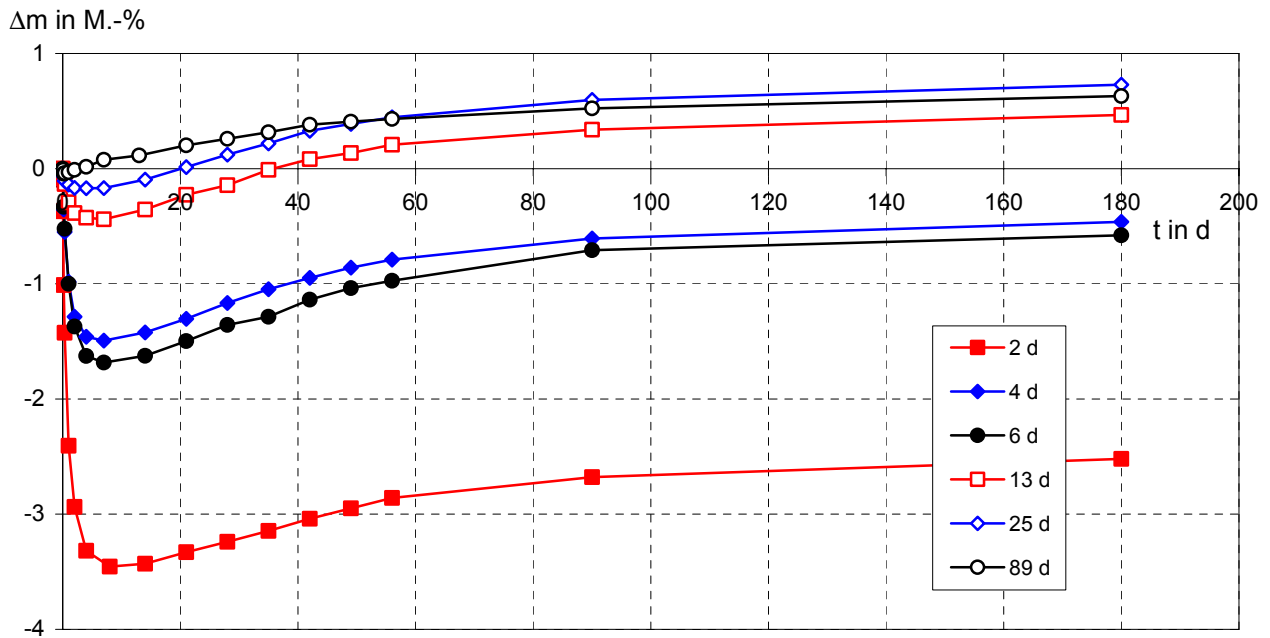
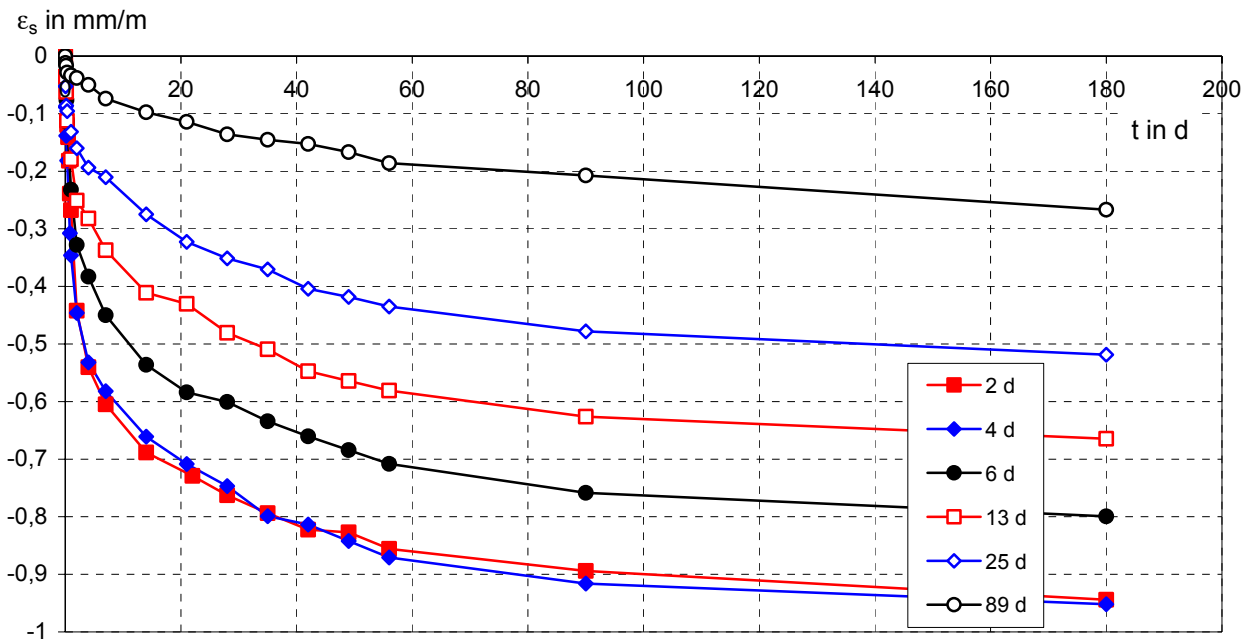
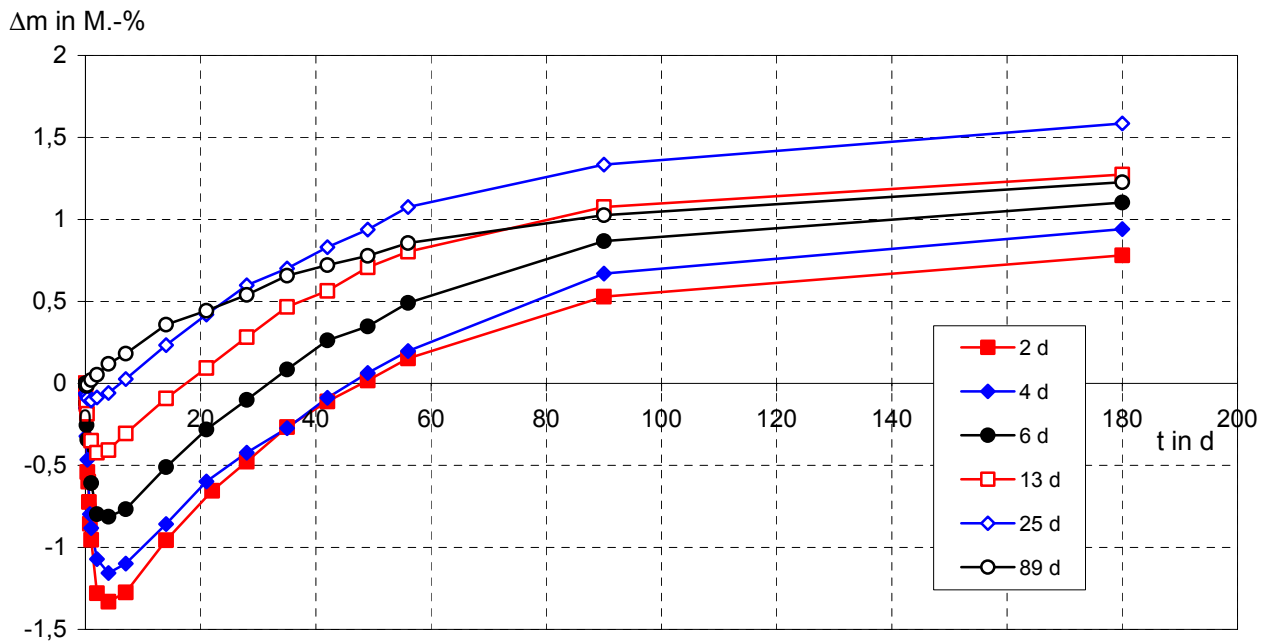


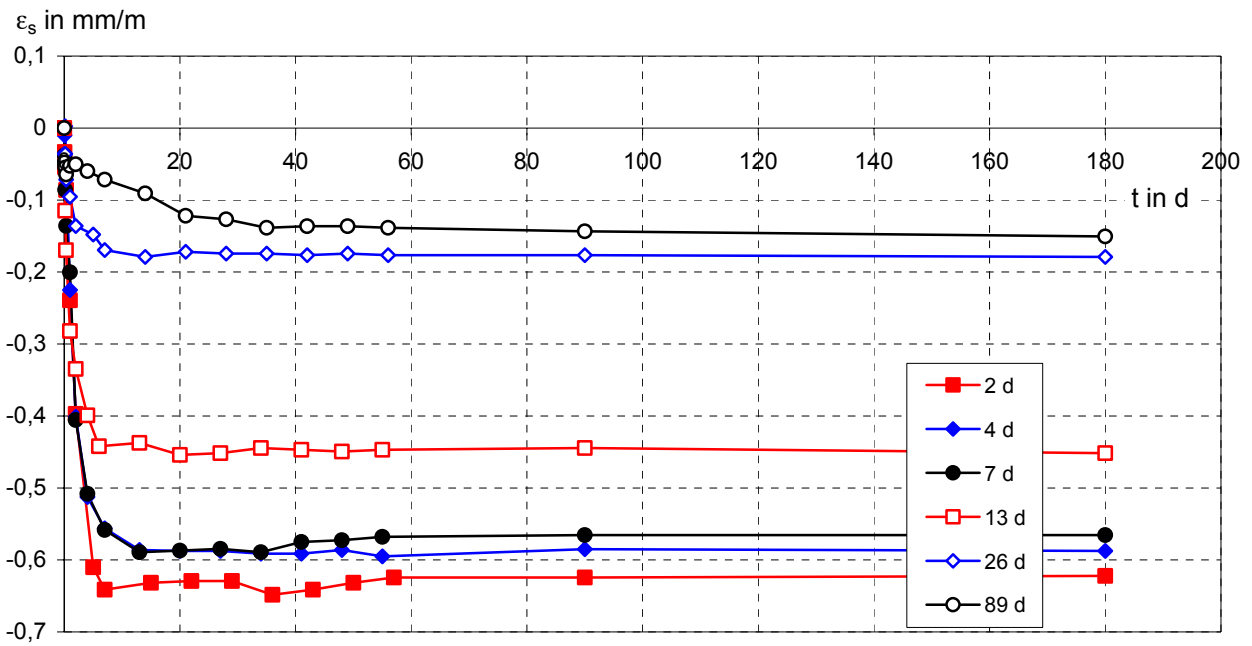
Bild B95: Masseänderung  $\Delta m$  der Prismen aus Normalputz in Abhängigkeit von der Prüfdauer t



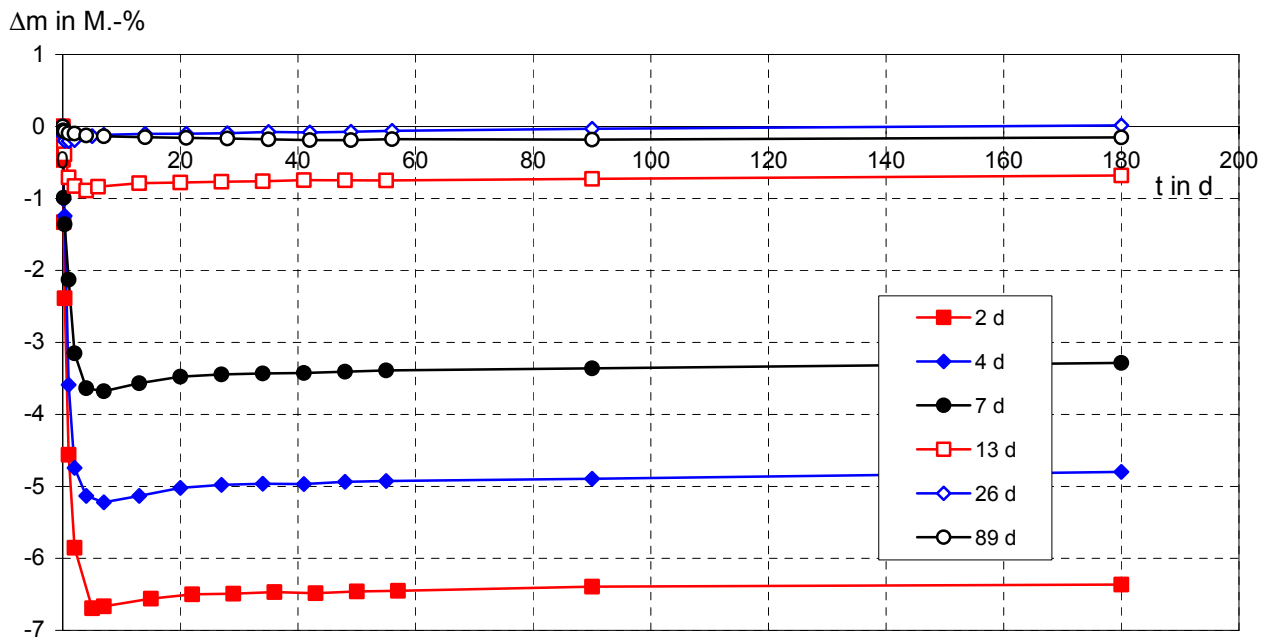
**Bild B96:** Schwinddehnung  $\epsilon_s$  der Prismen aus Leichtputz in Abhängigkeit von der Prüfdauer  $t$



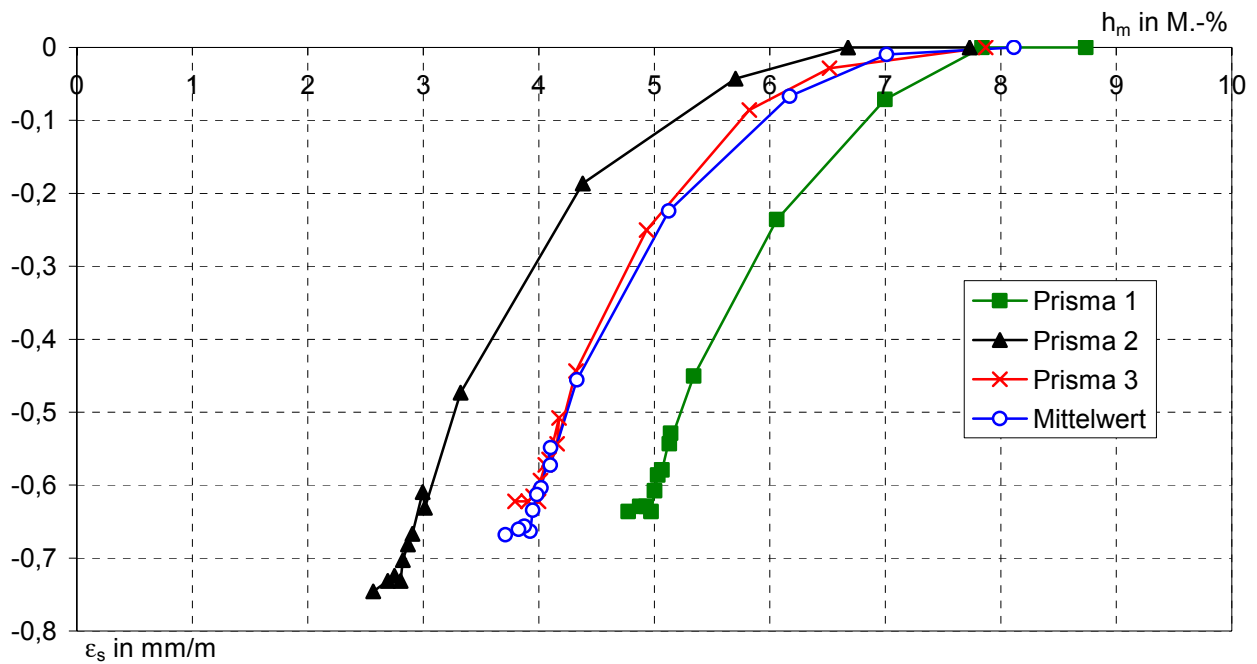
**Bild B97:** Masseänderung  $\Delta m$  der Prismen aus Leichtputz in Abhängigkeit von der Prüfdauer  $t$



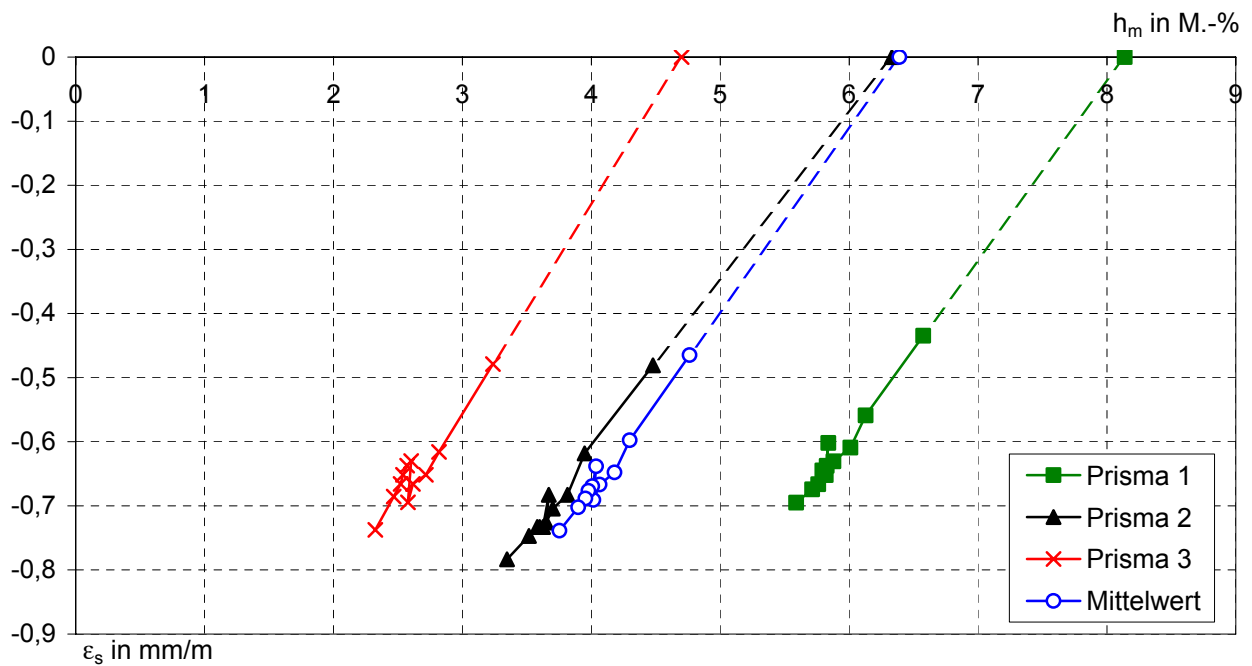
**Bild B98:** Schwinddehnung  $\epsilon_s$  der Prismen aus Ultraleichtputz in Abhängigkeit von der Prüfdauer t



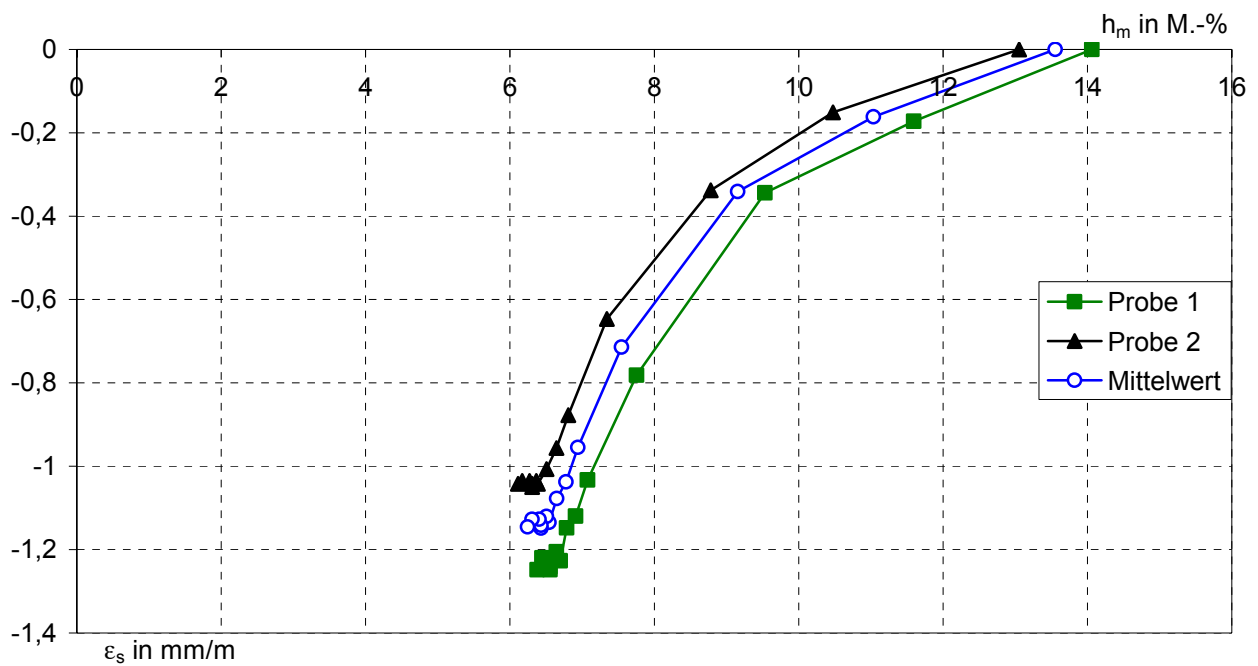
**Bild B99:** Masseänderung  $\Delta m$  der Prismen aus Ultraleichtputz in Abhängigkeit von der Prüfdauer t



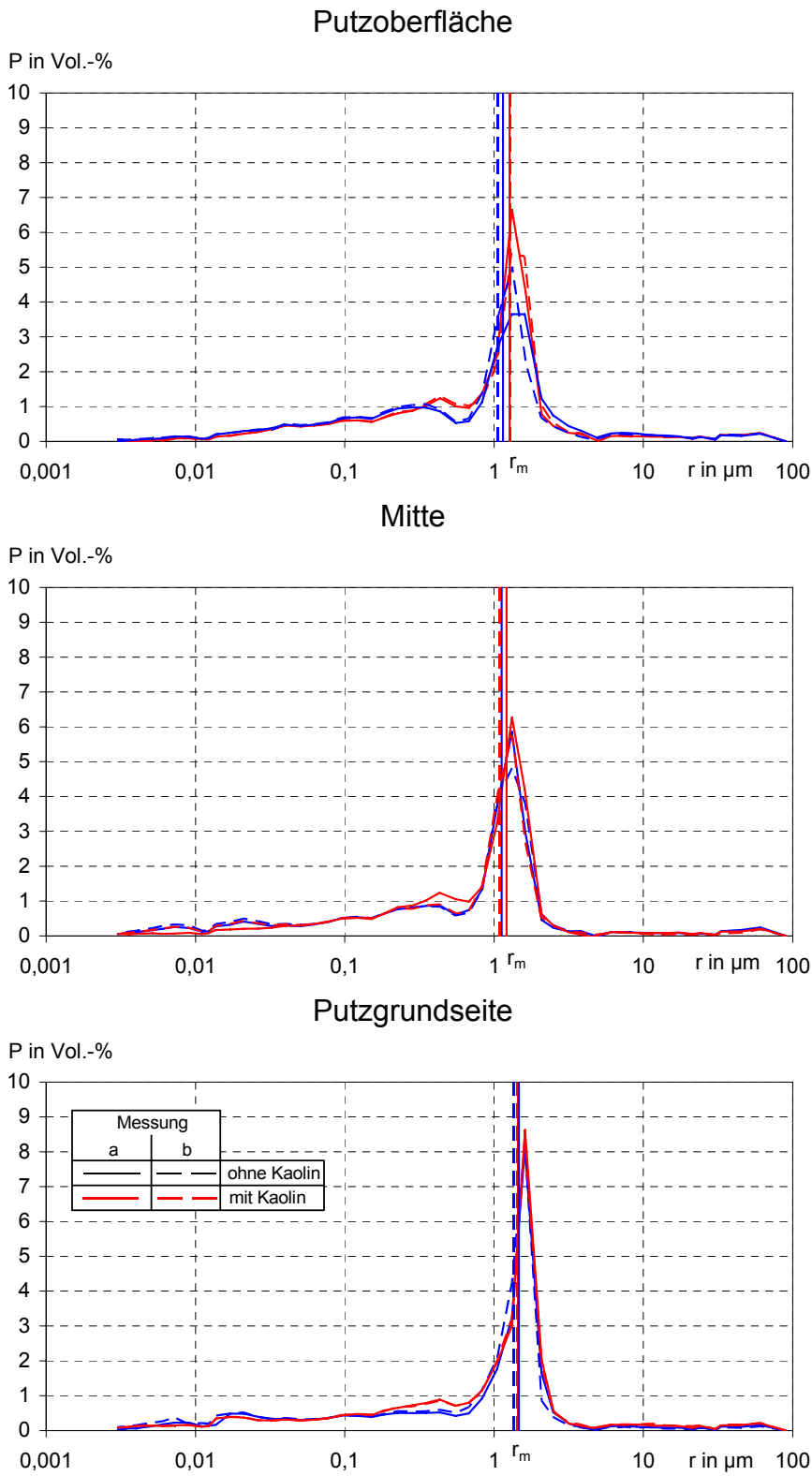
**Bild B100:** Schwinddehnung  $\epsilon_S$  der Prismen aus Normalputz im CO<sub>2</sub>-freien Lagerungsklima 20 °C und 65 % rel. F. in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt  $h_m$



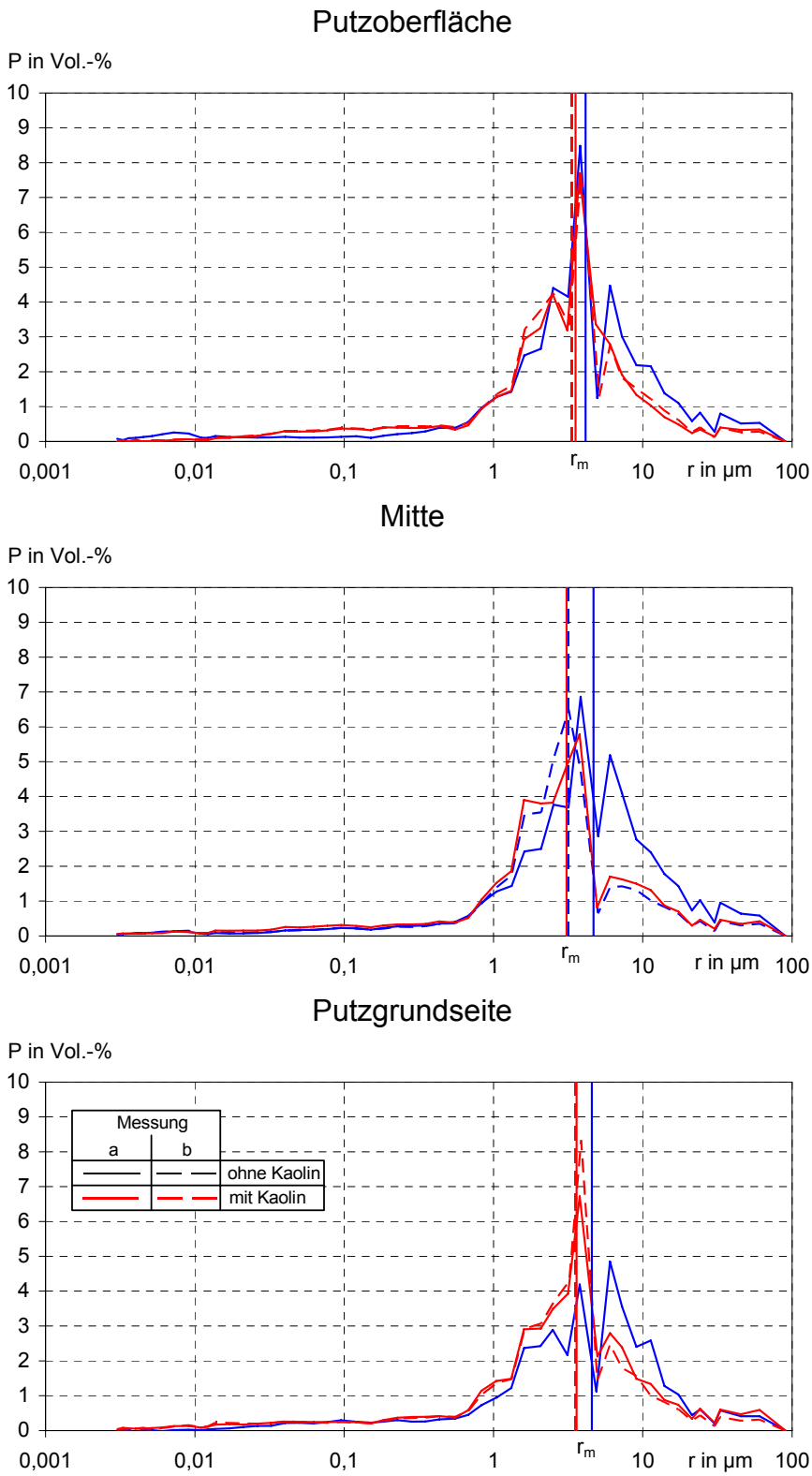
**Bild B101:** Schwinddehnung  $\epsilon_S$  der Prismen aus Leichtputz im CO<sub>2</sub>-freien Lagerungsklima 20 °C und 65 % rel. F. in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt  $h_m$



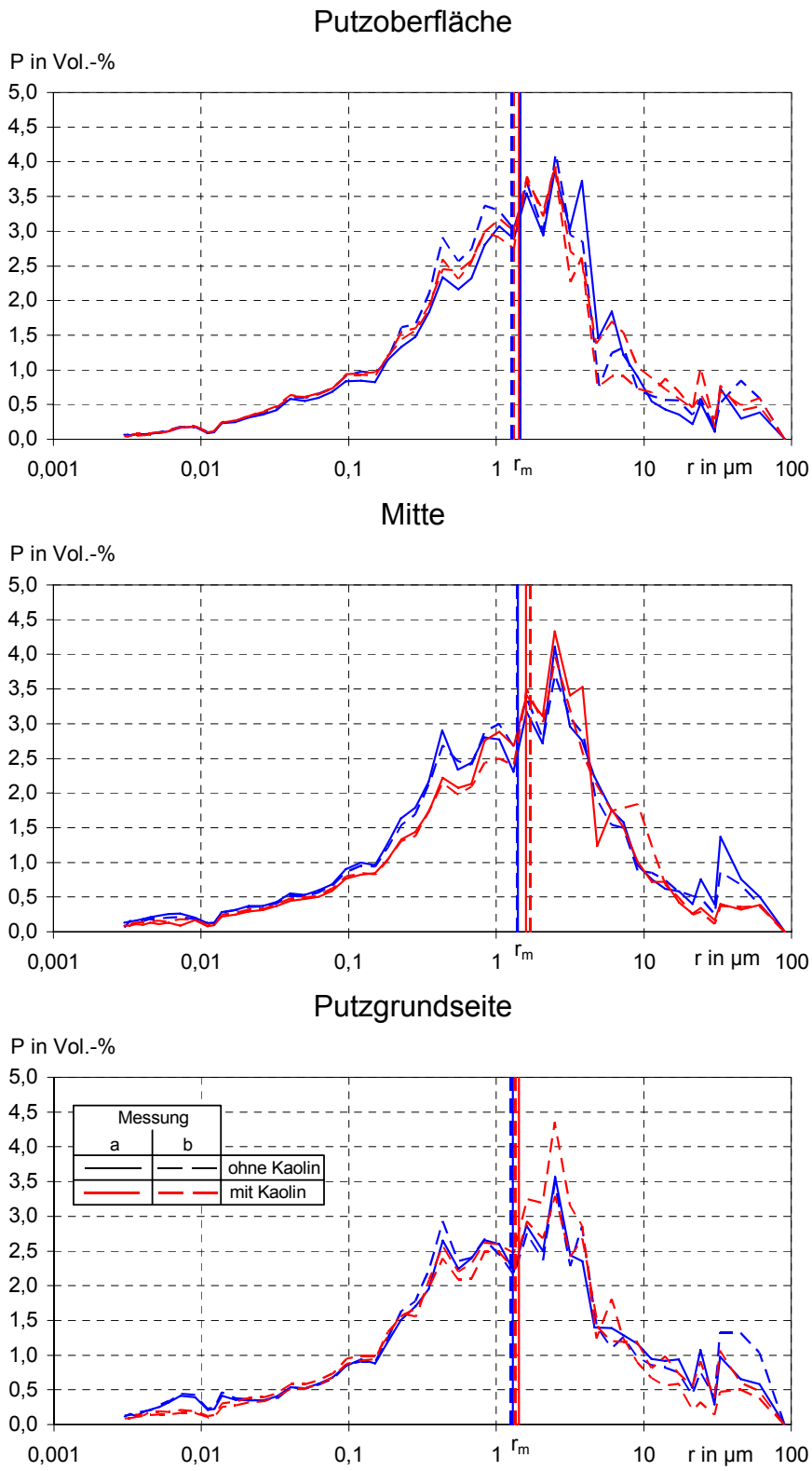
**Bild B102:** Schwinddehnung  $\epsilon_s$  der Prismen aus Ultraleichtputz im  $\text{CO}_2$ -freien Lagerungsklima 20 °C und 65 % rel. F. in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt  $h_m$



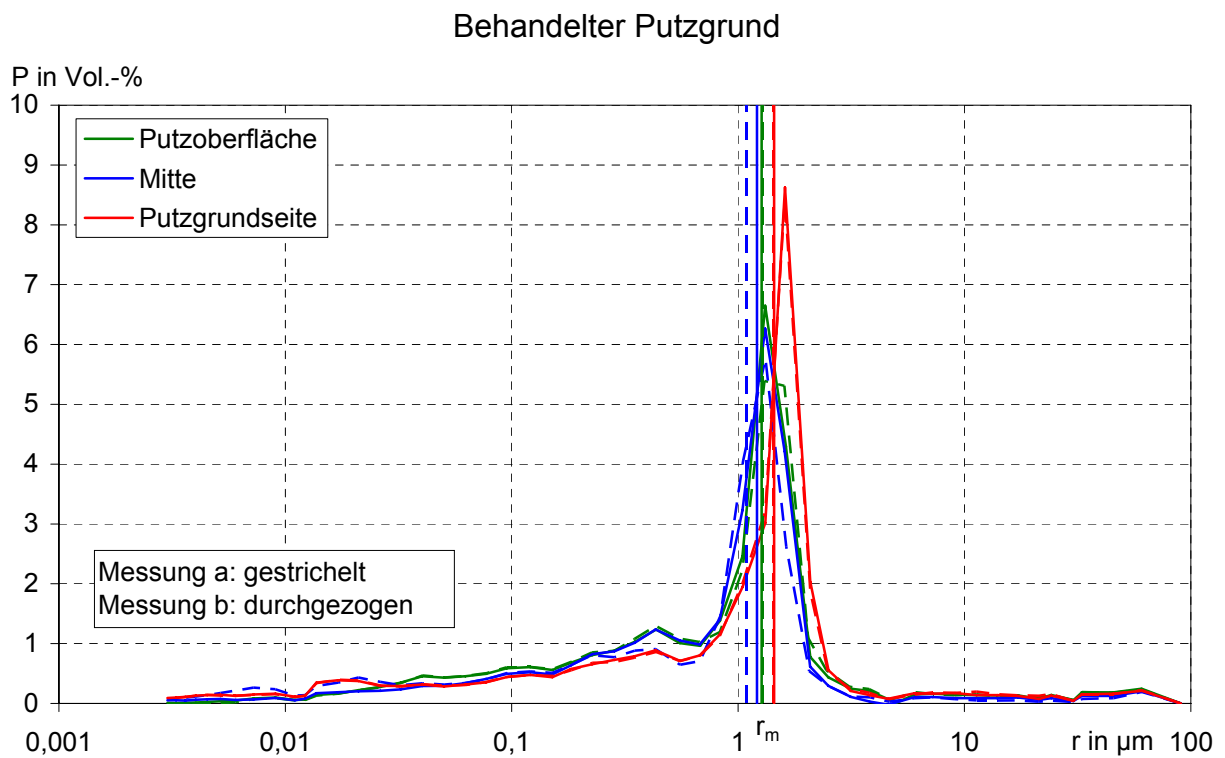
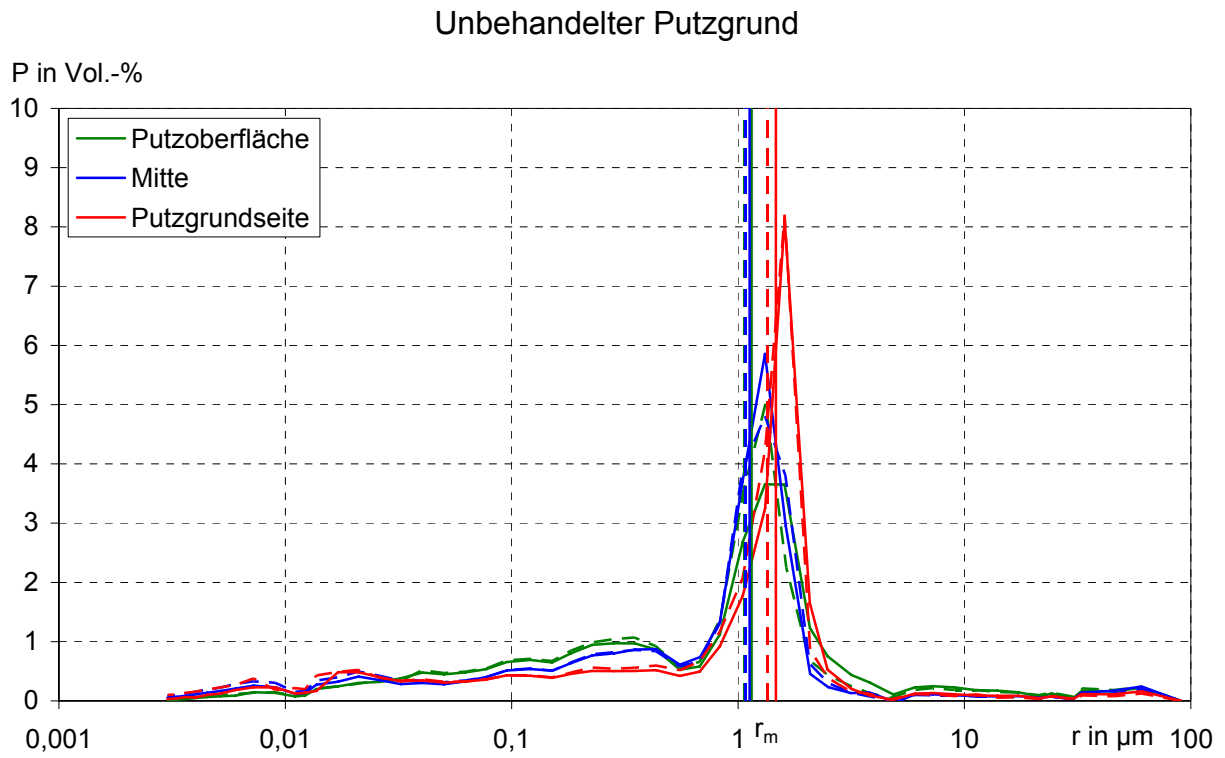
**Bild B103:** Anteil des Porenvolumens P in Abhängigkeit vom Porenradius r  
 Normalputz vom unbehandelten und mit Kaolin behandelten Putzgrund



**Bild B104:** Anteil des Porenvolumens P in Abhängigkeit vom Porenradius r  
 Leichtputz vom unbehandelten und mit Kaolin behandelten Putzgrund

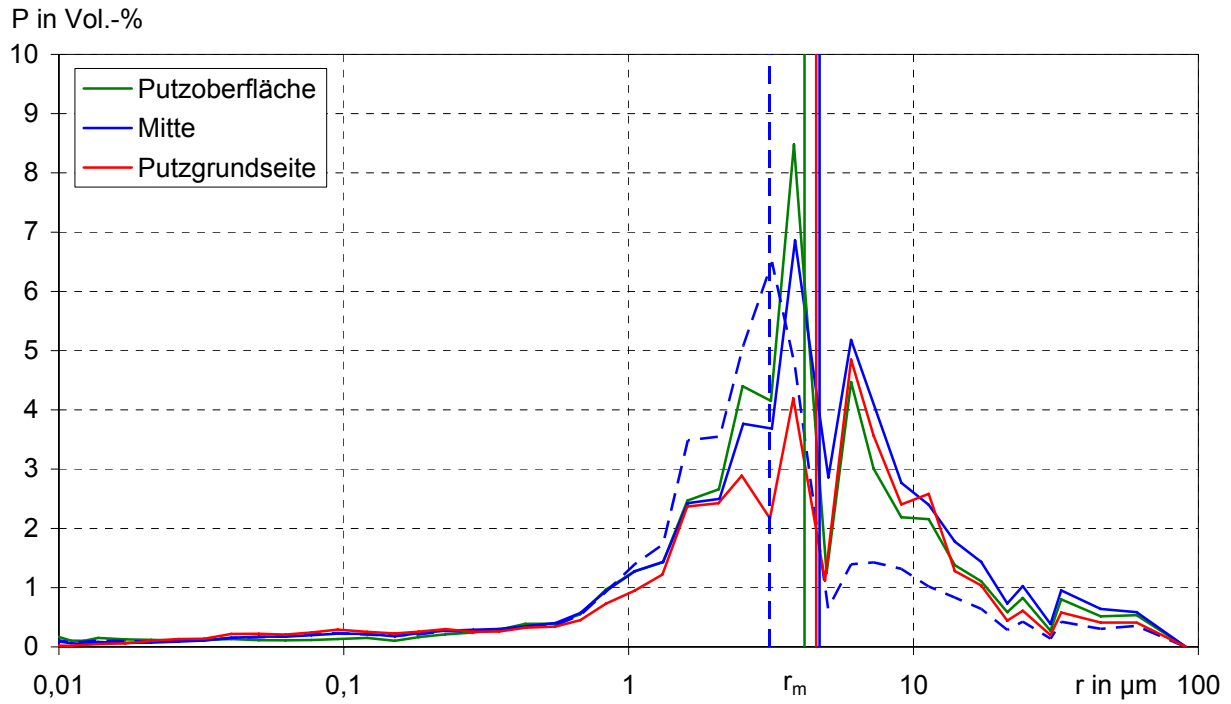


**Bild B105:** Anteil des Porenvolumens P in Abhängigkeit vom Porenradius r  
Ultraleichtputz vom unbehandelten und mit Kaolin behandelten Putzgrund

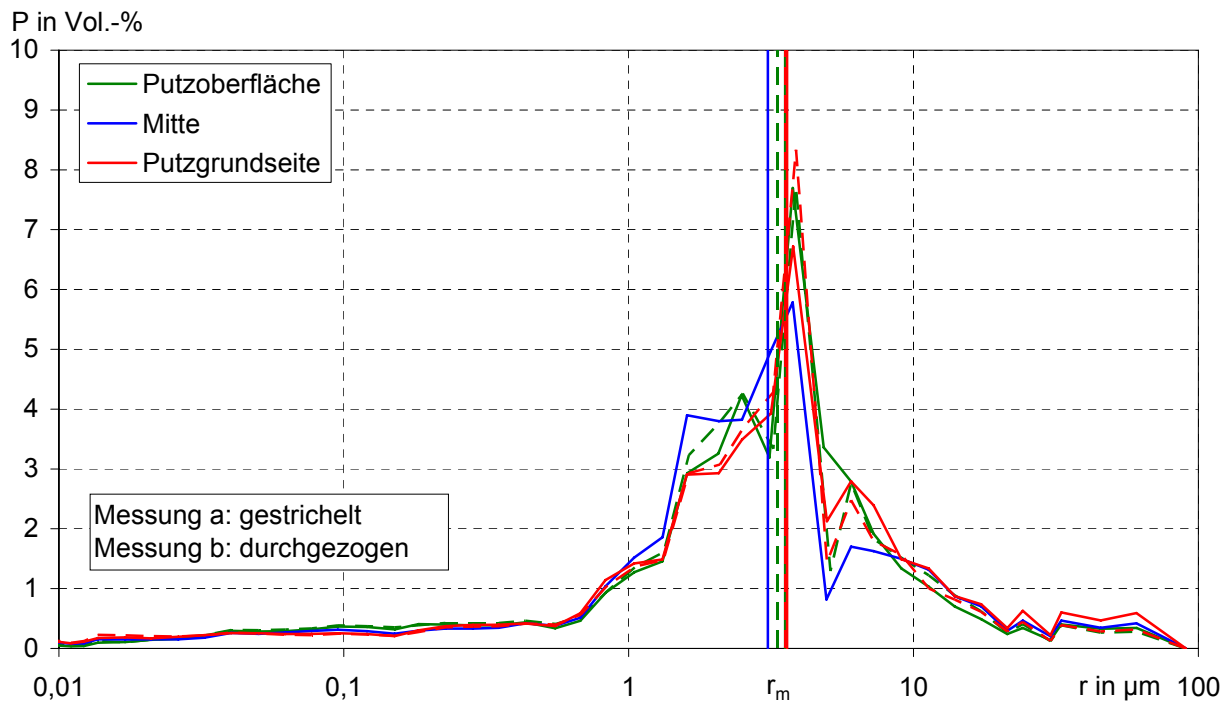


**Bild B106:** Anteil des Porenvolumens P in Abhängigkeit vom Porenradius r  
Normalputz vom unbehandelten und mit Kaolin behandelten Putzgrund

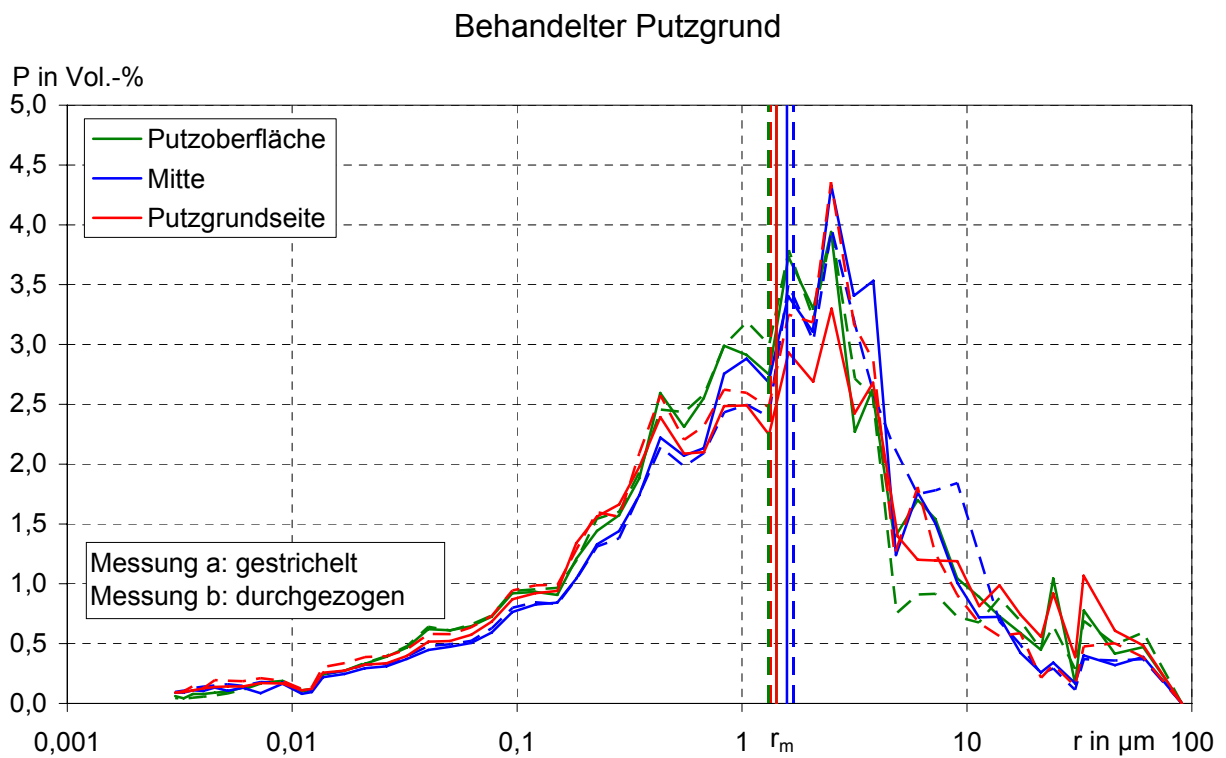
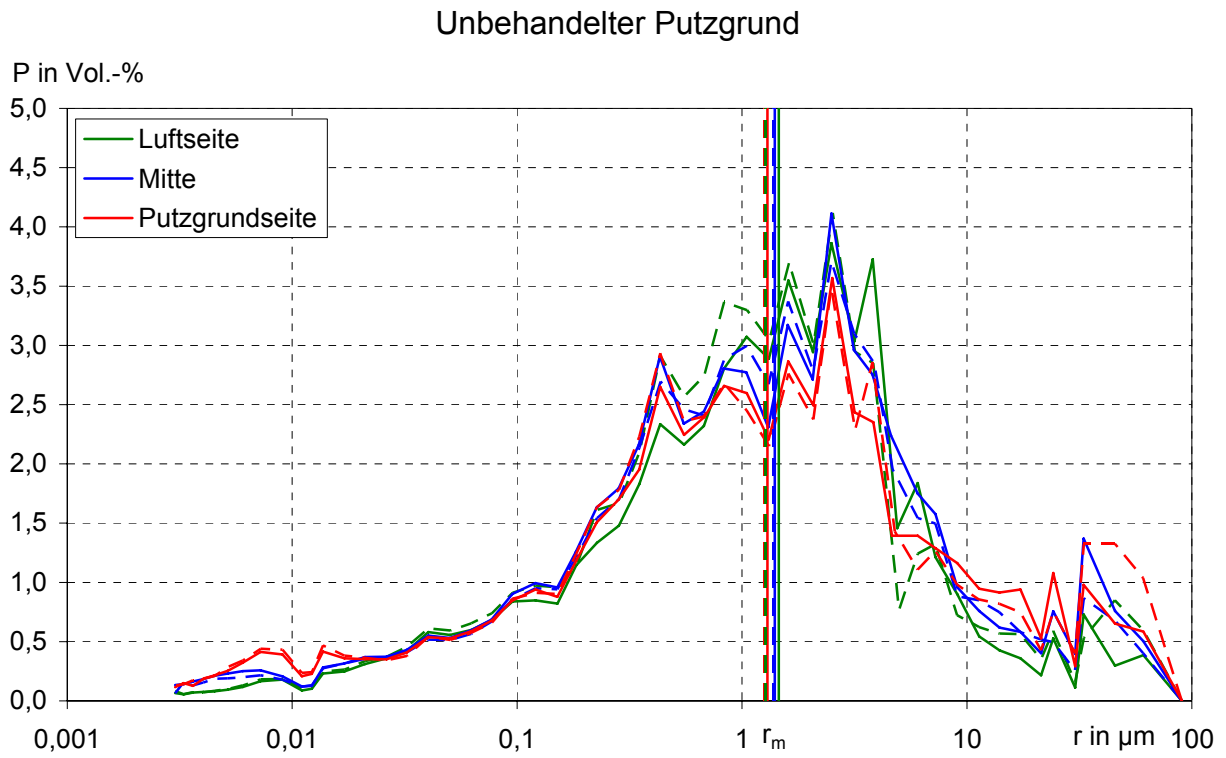
Unbehandelter Putzgrund



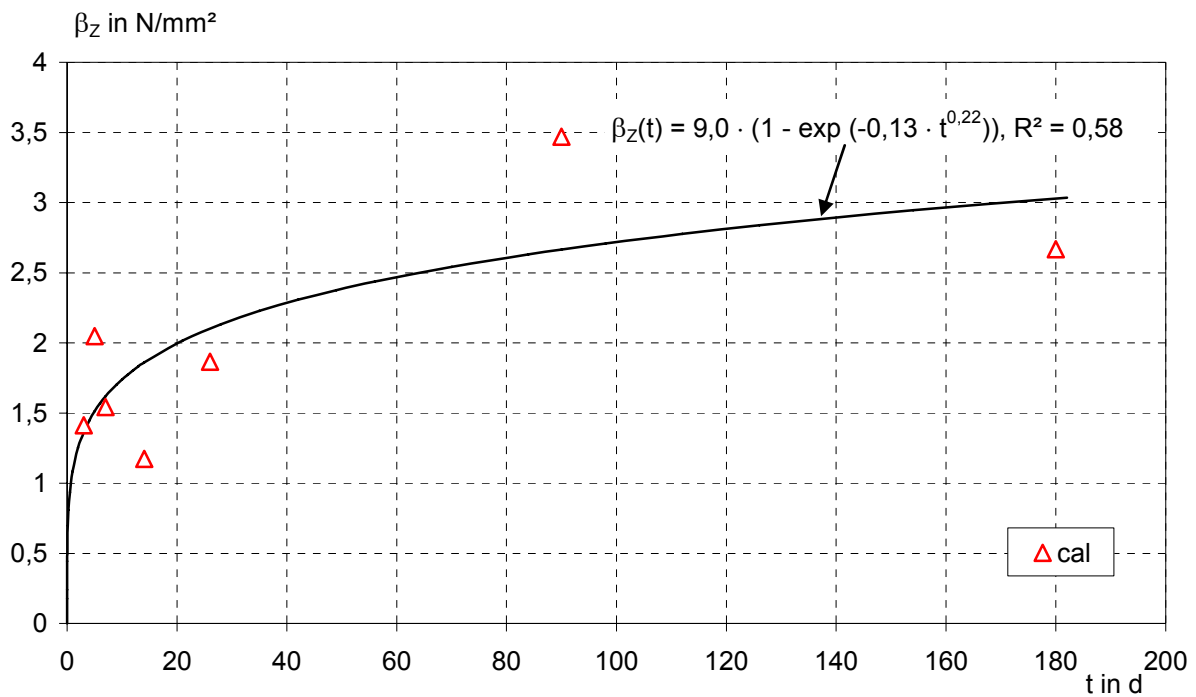
Behandelter Putzgrund



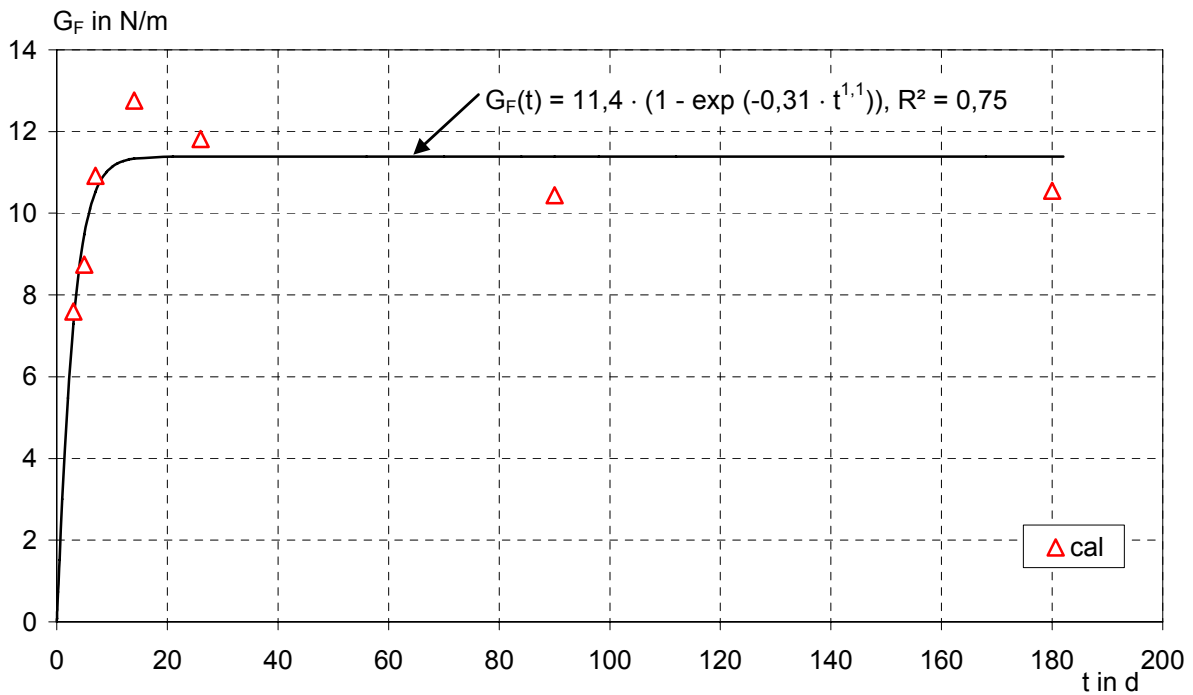
**Bild B107:** Anteil des Porenvolumens P in Abhängigkeit vom Porenradius r  
Leichtputz vom unbehandelten und mit Kaolin behandelten Putzgrund



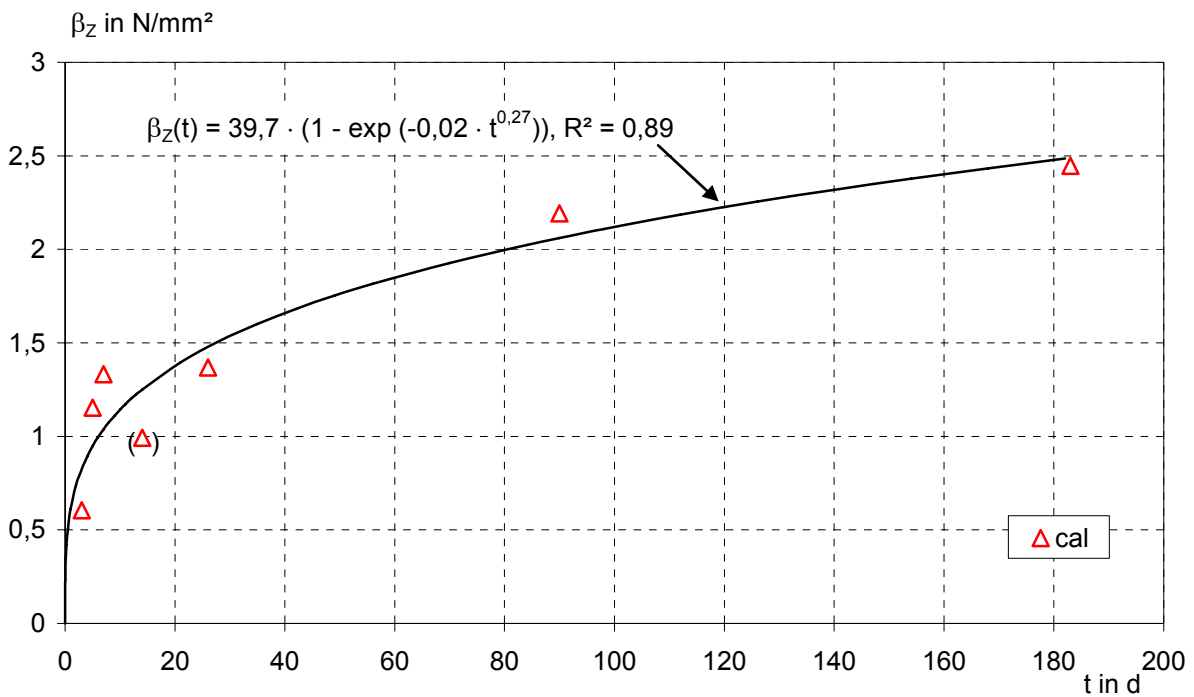
**Bild B108:** Anteil des Porenvolumens P in Abhängigkeit vom Porenradius r  
Ultraleichtputz vom unbehandelten und mit Kaolin behandelten Putzgrund



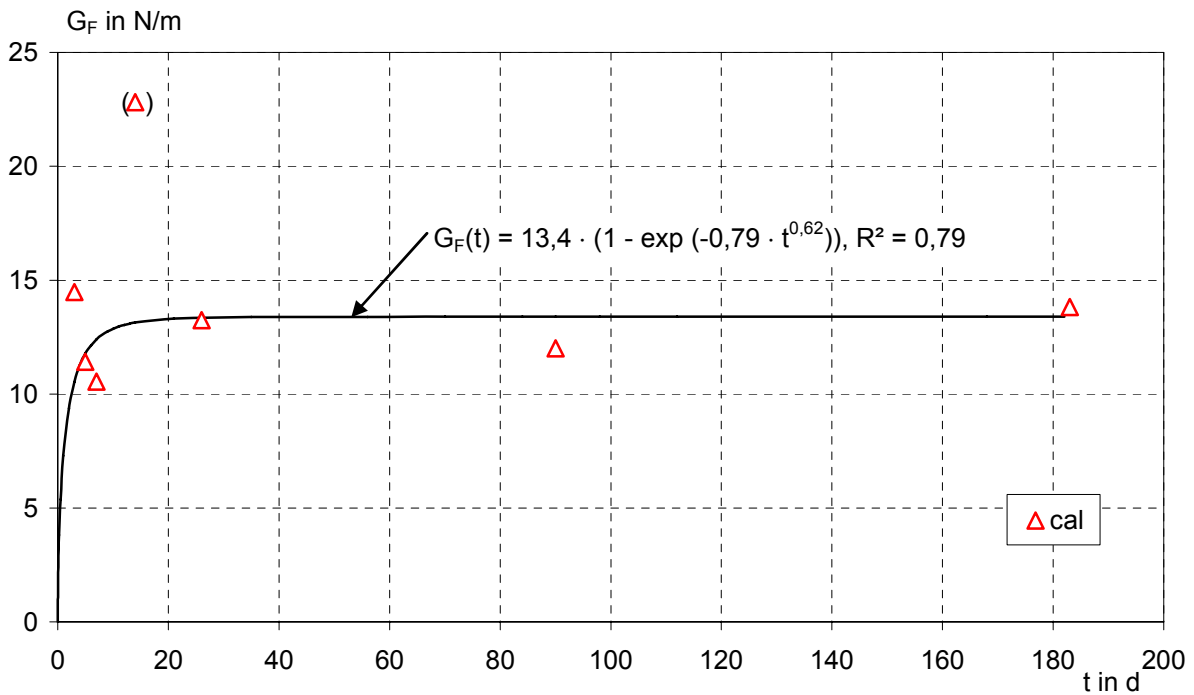
**Bild B109:** Zugfestigkeit  $\beta_z$  des Normalputzes abgeleitet aus Anpassungsrechnungen mit dem Ansatz nach Hordijk in Abhängigkeit vom Prüfalter t



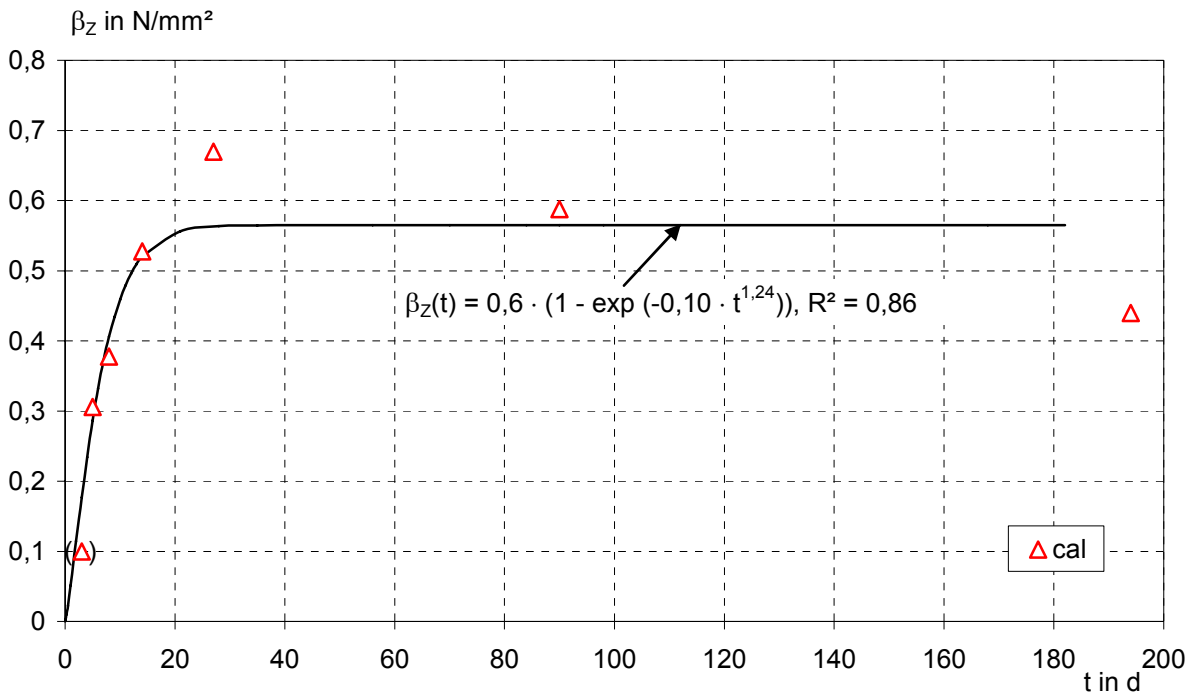
**Bild B110:** Bruchenergie  $G_F$  des Normalputzes abgeleitet aus Anpassungsrechnungen mit dem Ansatz nach Hordijk in Abhängigkeit vom Prüfalter t



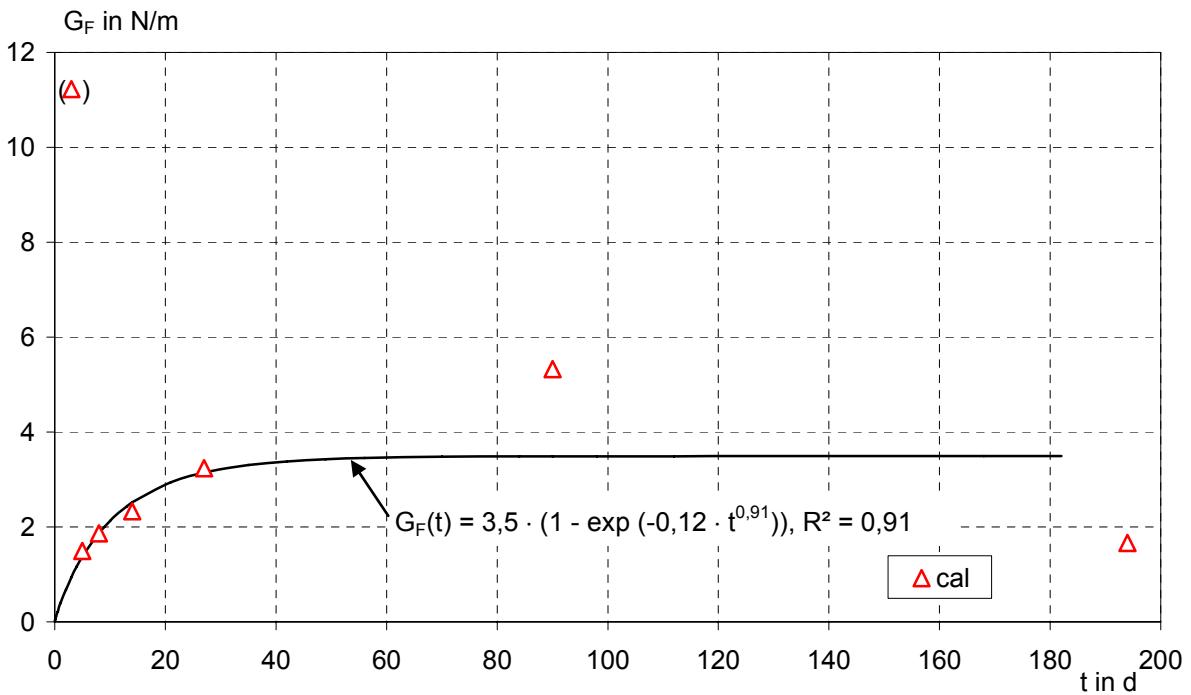
**Bild B111:** Zugfestigkeit  $\beta_z$  des Leichtputzes abgeleitet aus Anpassungsrechnungen mit dem Ansatz nach Hordijk in Abhängigkeit vom Prüfalter t



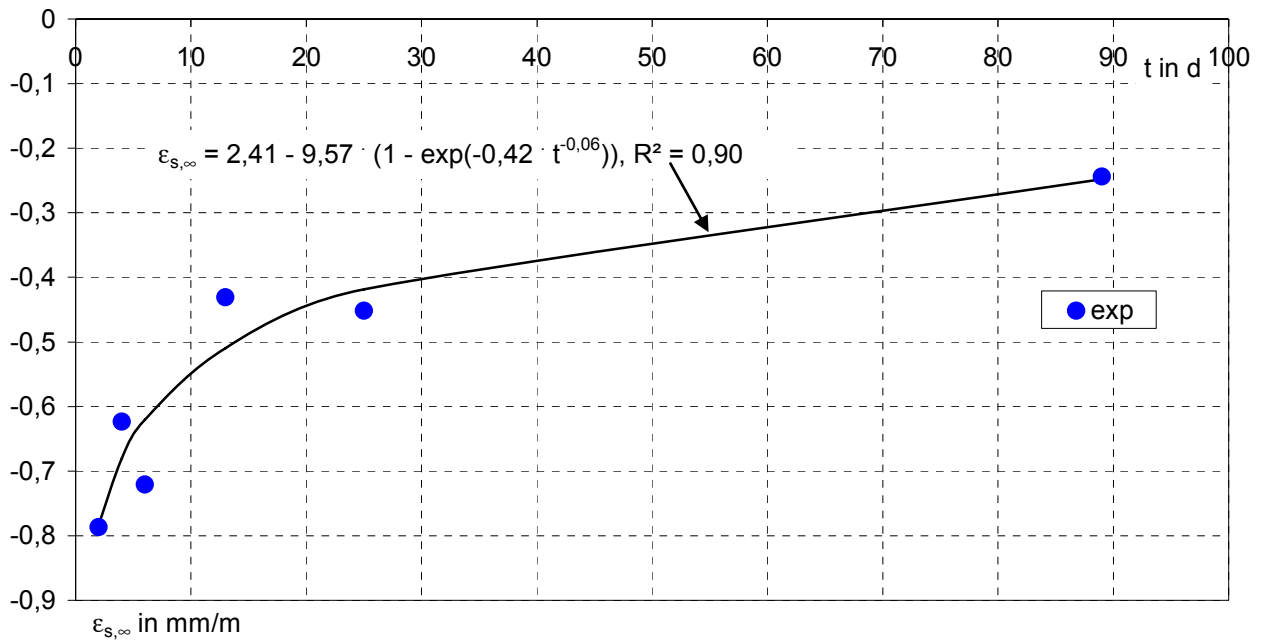
**Bild B112:** Bruchenergie  $G_F$  des Leichtputzes abgeleitet aus Anpassungsrechnungen mit dem Ansatz nach Hordijk in Abhängigkeit vom Prüfalter t



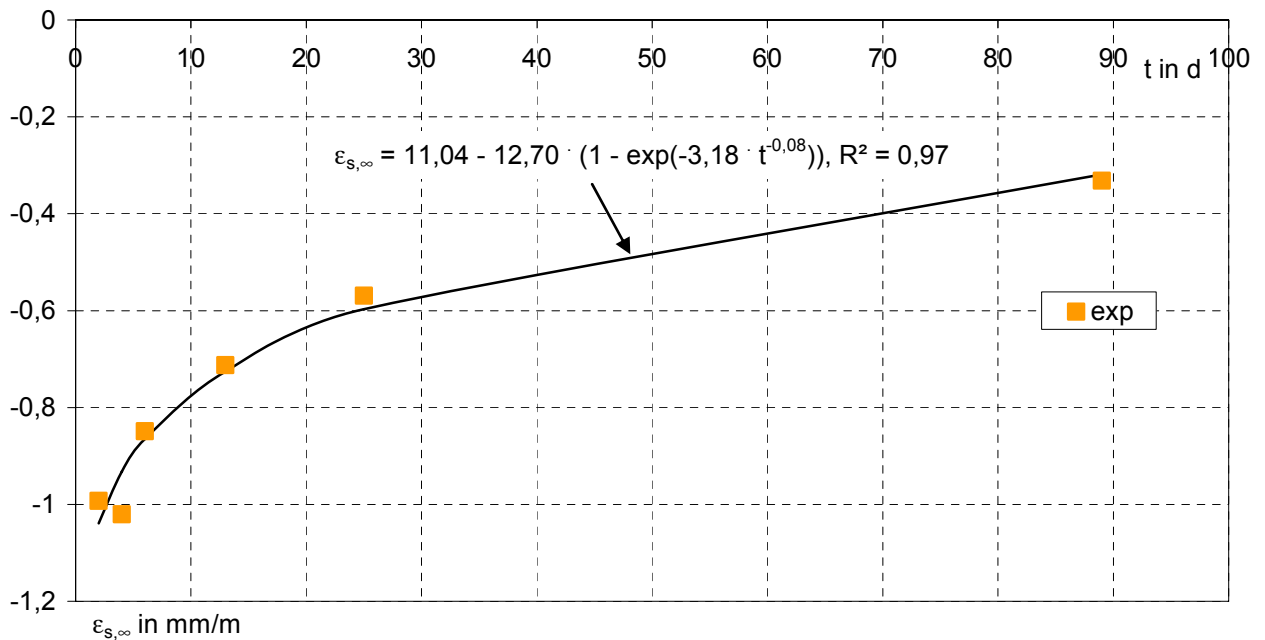
**Bild B113:** Zugfestigkeit  $\beta_z$  des Ultraleichtputzes abgeleitet aus Anpassungsrechnungen mit dem Ansatz nach Hordijk in Abhängigkeit vom Prüfalter t



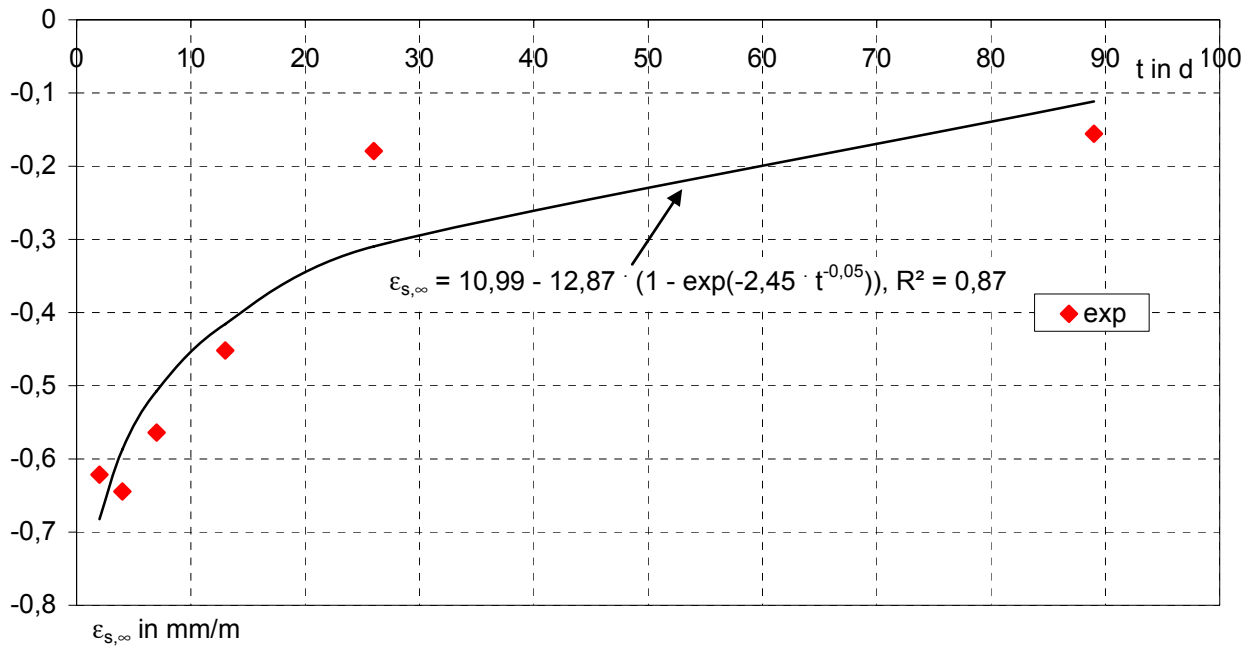
**Bild B114:** Bruchenergie  $G_F$  des Ultraleichtputzes abgeleitet aus Anpassungsrechnungen mit dem Ansatz nach Hordijk in Abhängigkeit vom Prüfalter t



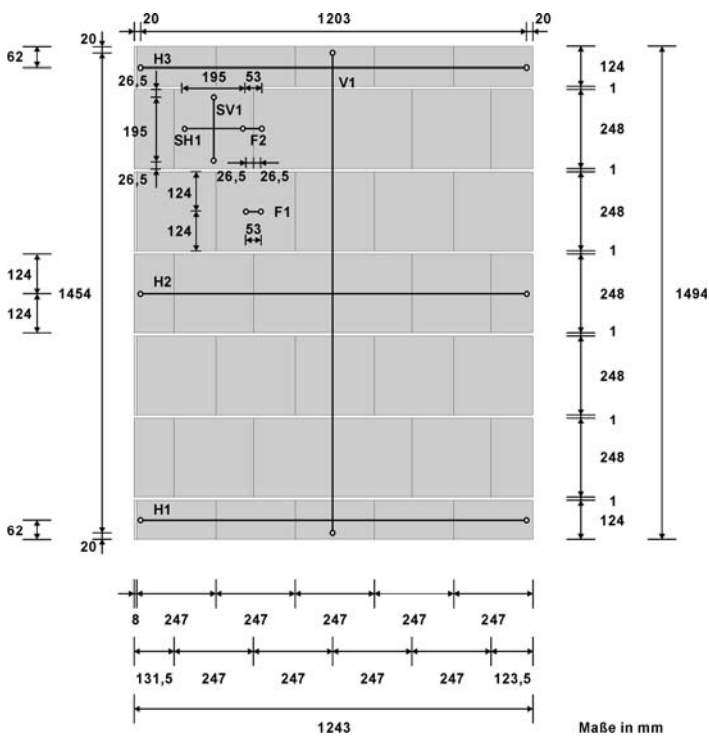
**Bild B115:** Schwindendwert  $\epsilon_{S,\infty}$  des Normalputzes in Abhängigkeit vom Entnahmealter t



**Bild B116:** Schwindendwert  $\epsilon_{S,\infty}$  des Leichtputzes in Abhängigkeit vom Entnahmealter t

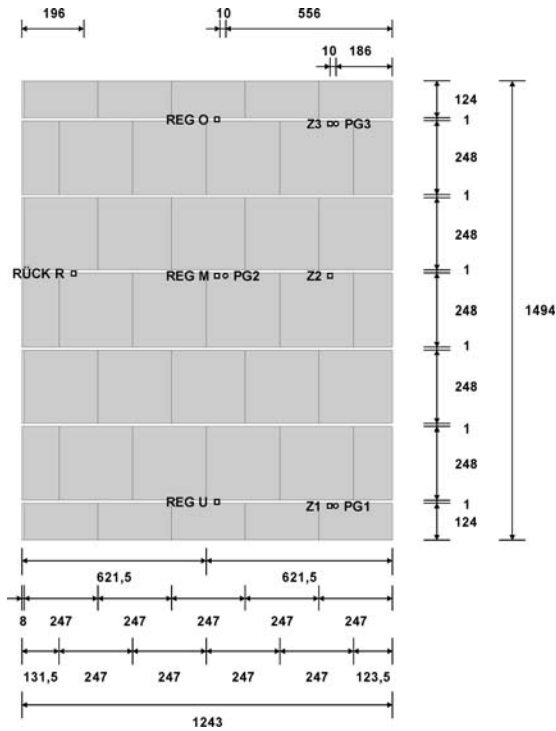


**Bild B117:** Schwindendwert  $\epsilon_{s,\infty}$  des Ultraleichtputzes in Abhängigkeit vom Entnahmealter t

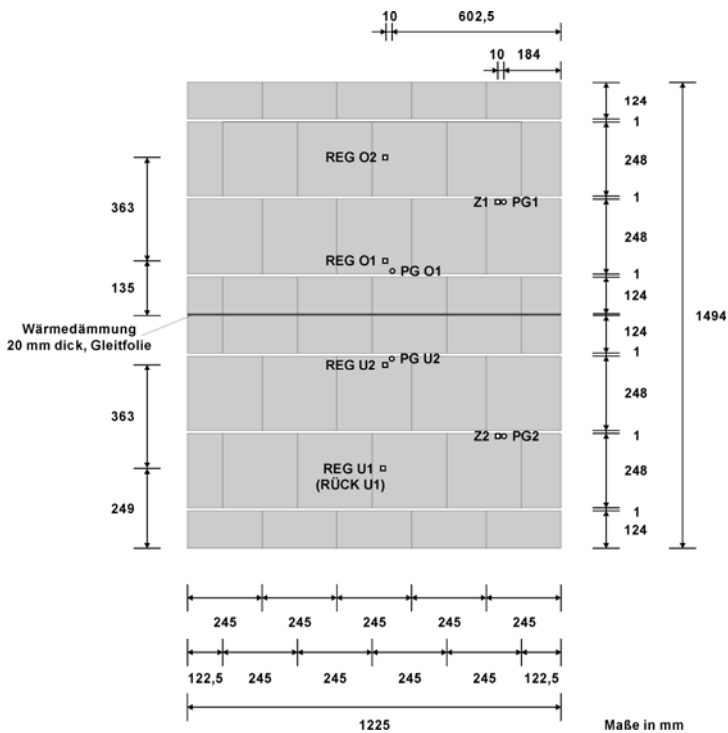


**Bild B118:** Mauerwerk-Prüfkörper mit Verformungsmessstellen Kombination 1 (vgl. Tabelle 20)

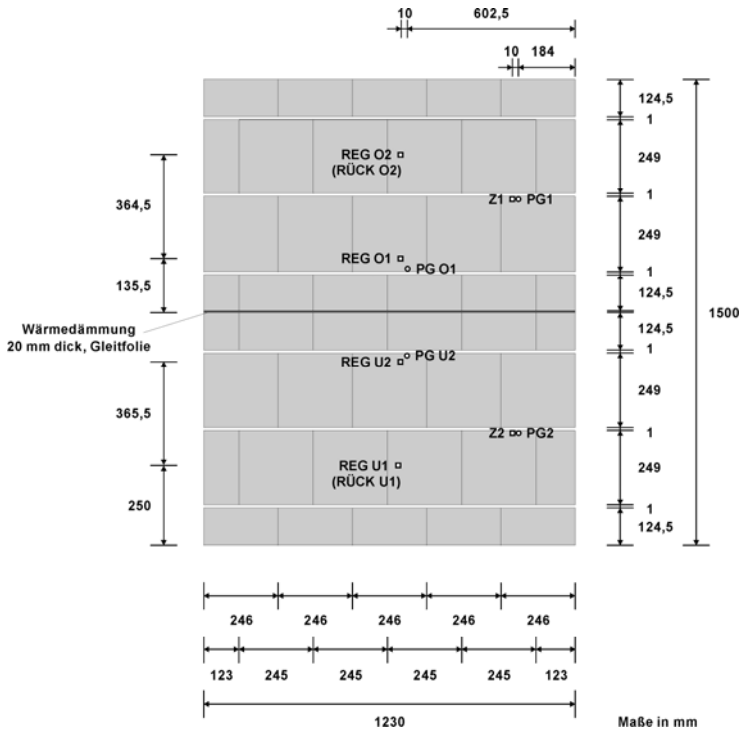




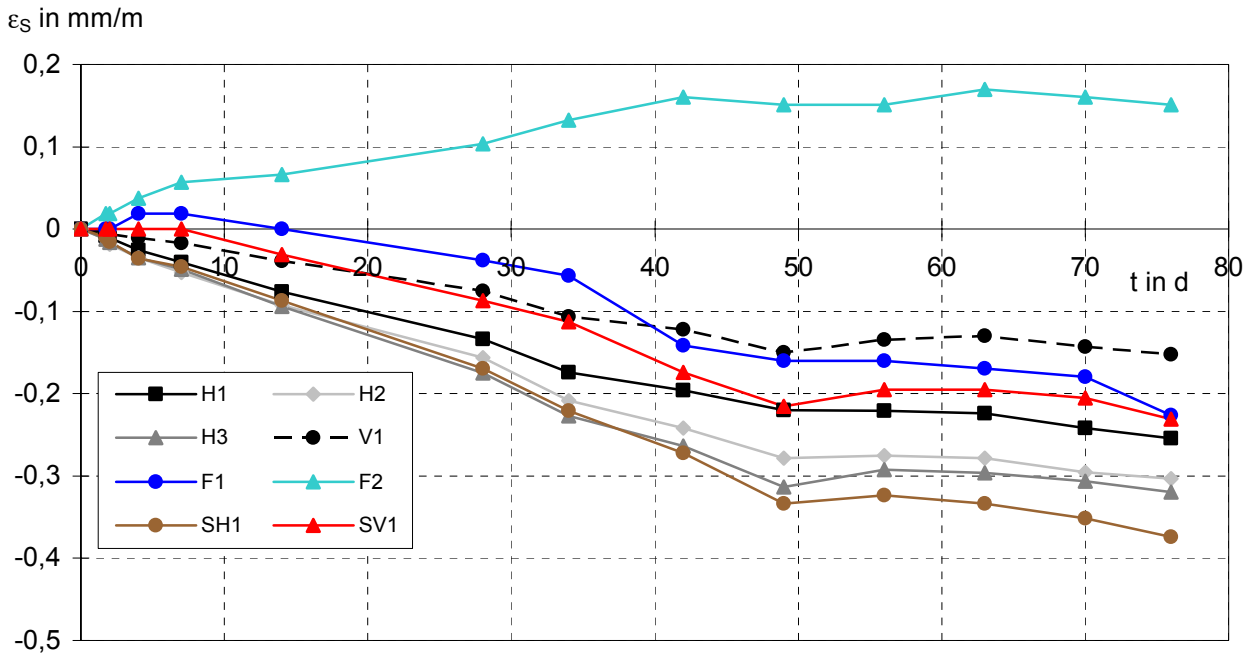
**Bild B121:** Mauerwerk-Prüfkörper mit Temperaturmessstellen Kombination 1 (vgl. Tabelle 20)



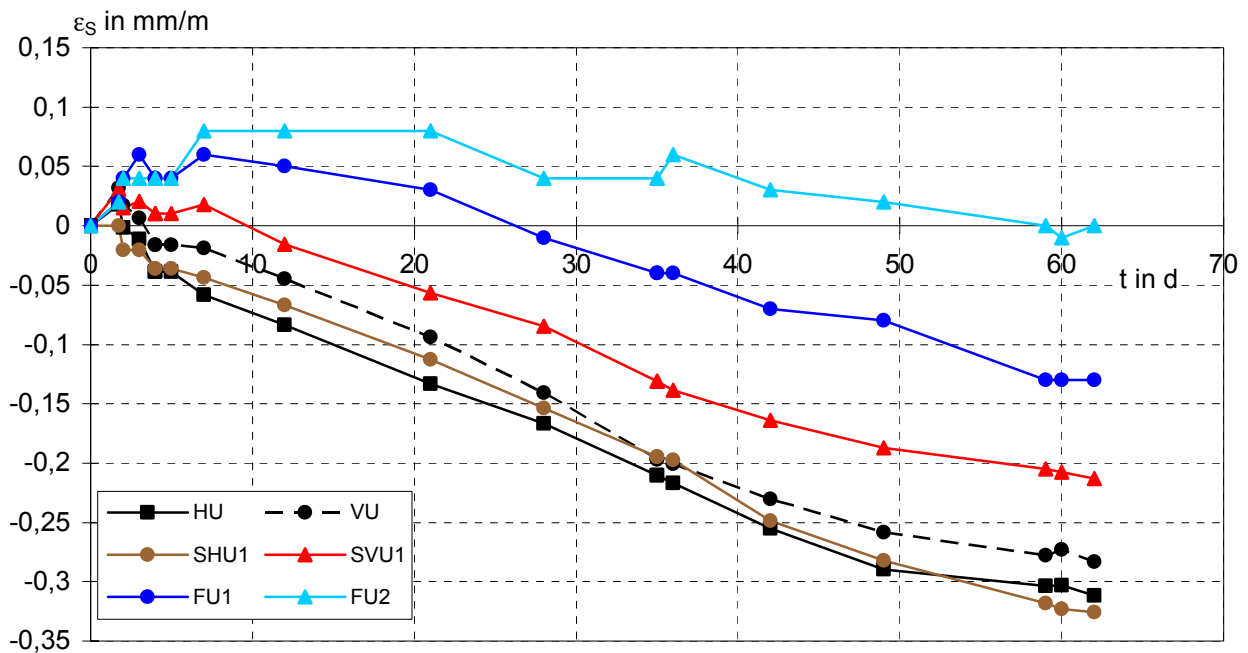
**Bild B122:** Mauerwerk-Prüfkörper mit Temperaturmessstellen Kombinationen 2 und 3 (vgl. Tabelle 20)



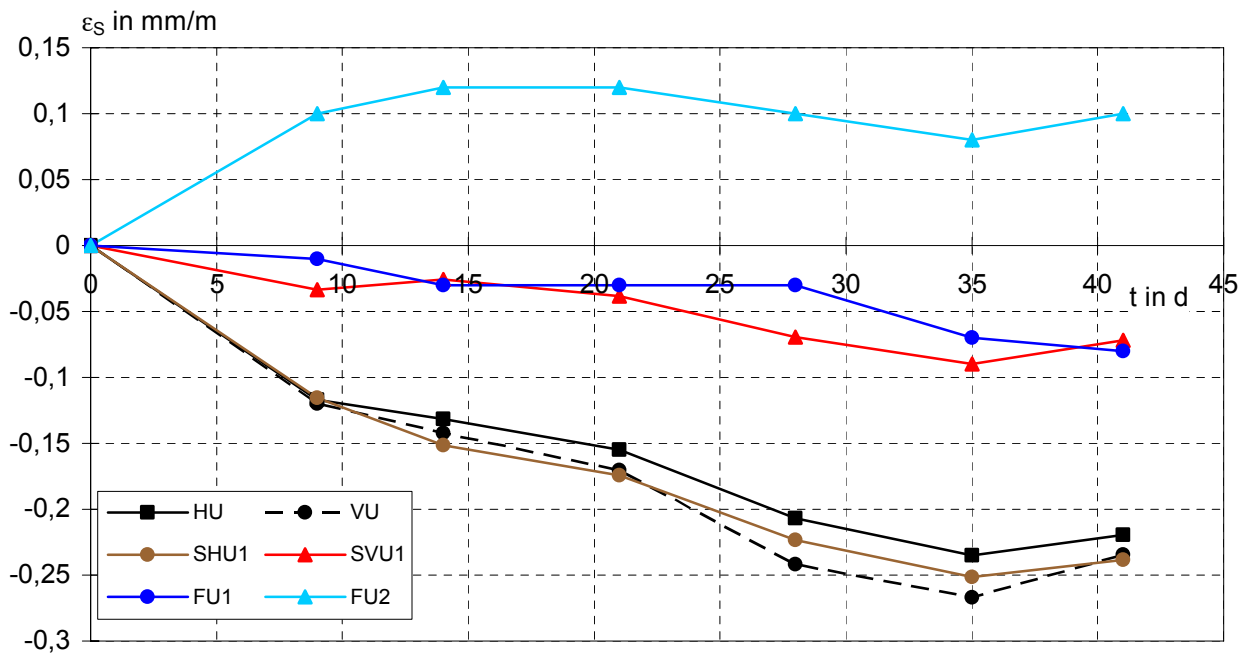
**Bild B123:** Mauerwerk-Prüfkörper mit Temperaturmessstellen Kombinationen 4 und 5 (vgl. Tabelle 20)



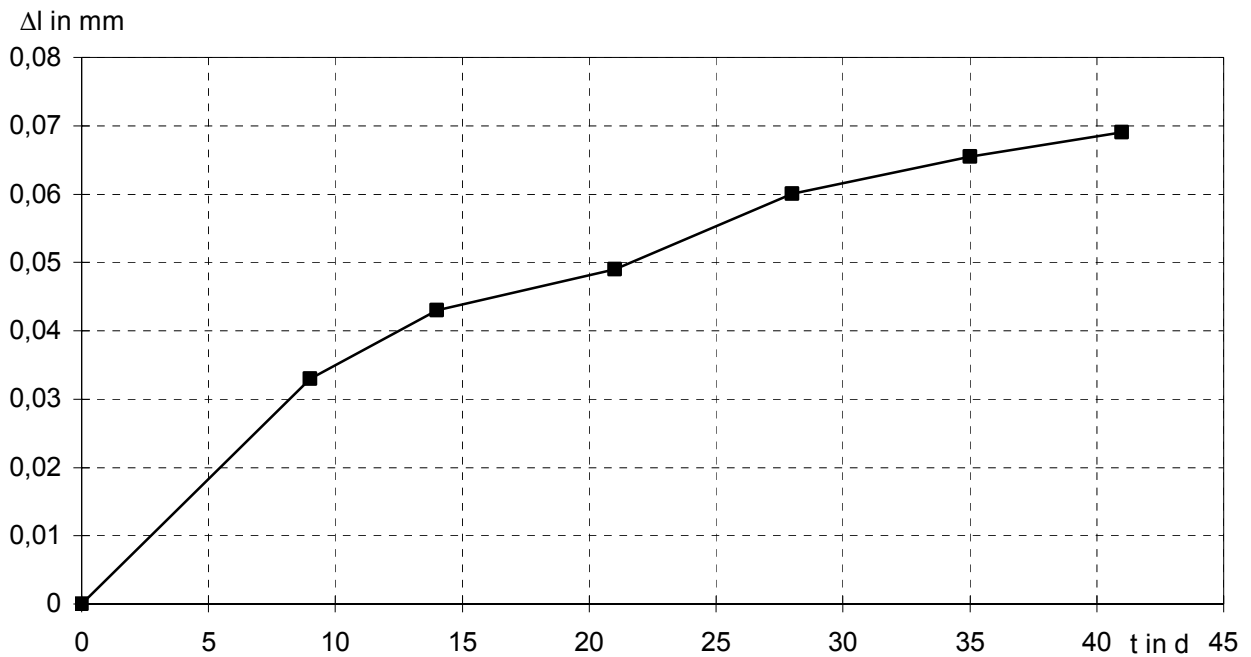
**Bild B124:** Schwinddehnungen  $\epsilon_S$  bei der Kombination 1 in Abhängigkeit von der Messdauer  $t$  (Messstellenanordnung s. Bild B118)



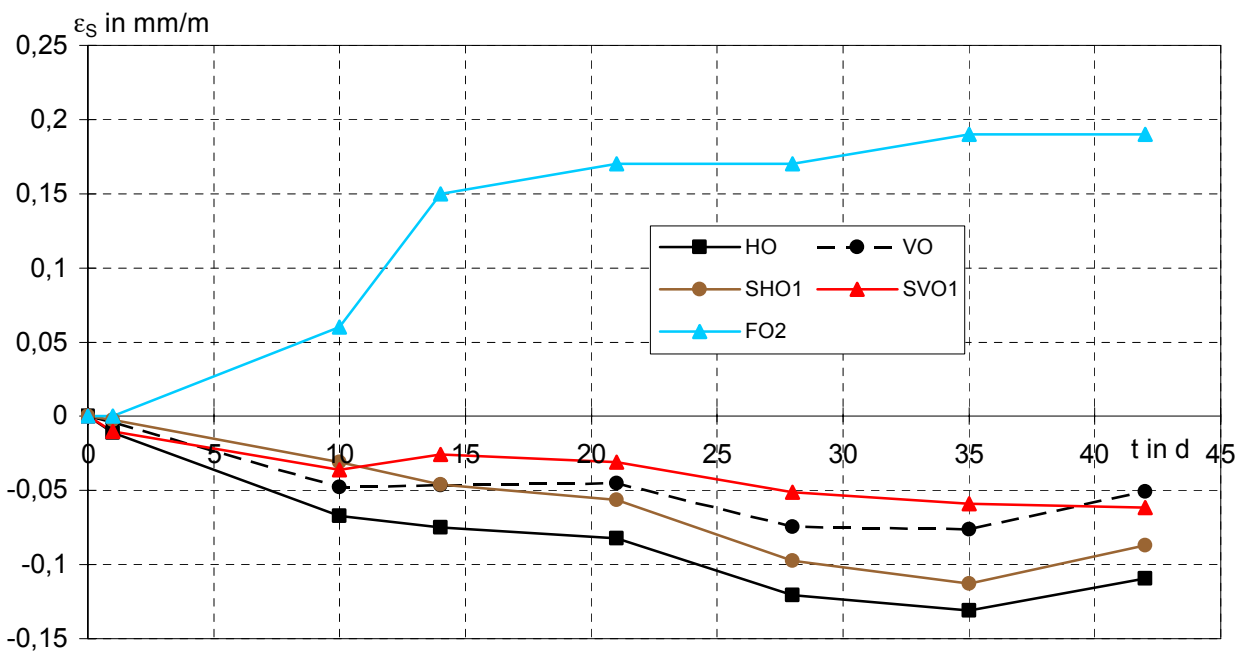
**Bild B125:** Schwinddehnungen  $\epsilon_S$  bei der Kombination 3 in Abhängigkeit von der Messdauer  $t$  (Messstellenanordnung s. Bild B119)



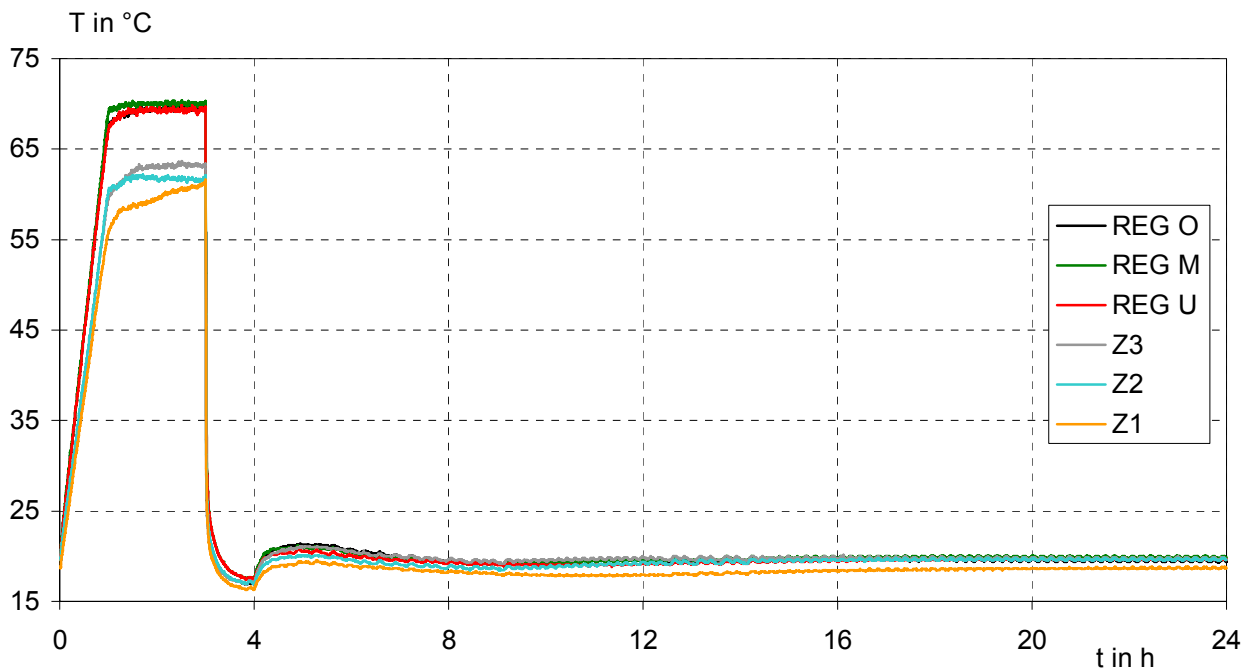
**Bild B126:** Schwinddehnungen  $\epsilon_S$  bei der Kombination 4 in Abhängigkeit von der Messdauer  $t$  (Messstellenanordnung s. Bild B120)



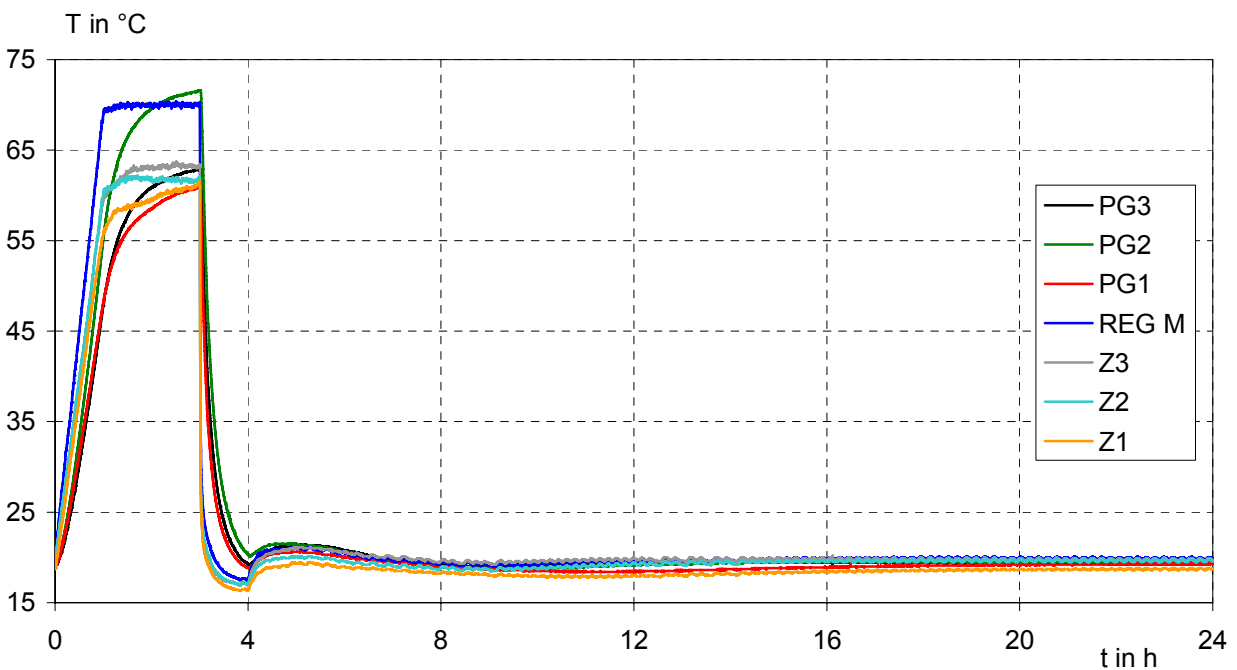
**Bild B127:** Verformung senkrecht zur Putzfläche  $\Delta l$  bei der Kombination 4 in Abhängigkeit von der Messdauer  $t$



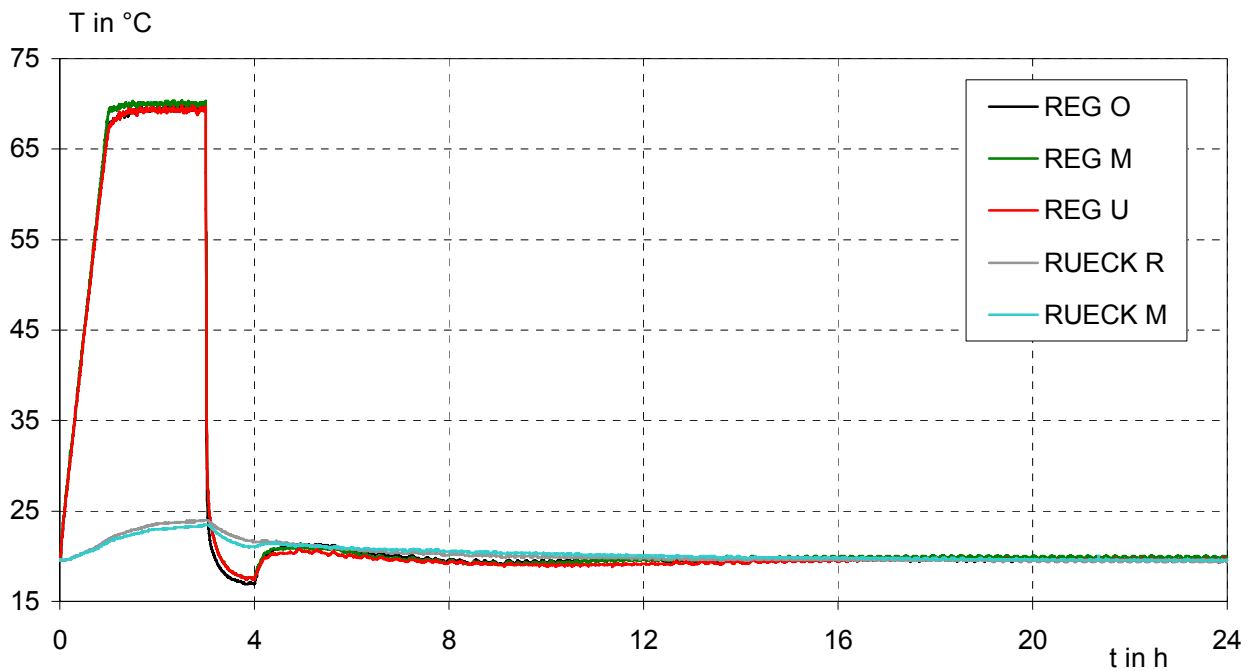
**Bild B128:** Schwinddehnungen  $\epsilon_s$  bei der Kombination 5 in Abhängigkeit von der Messdauer  $t$  (Messstellenanordnung s. Bild B120)



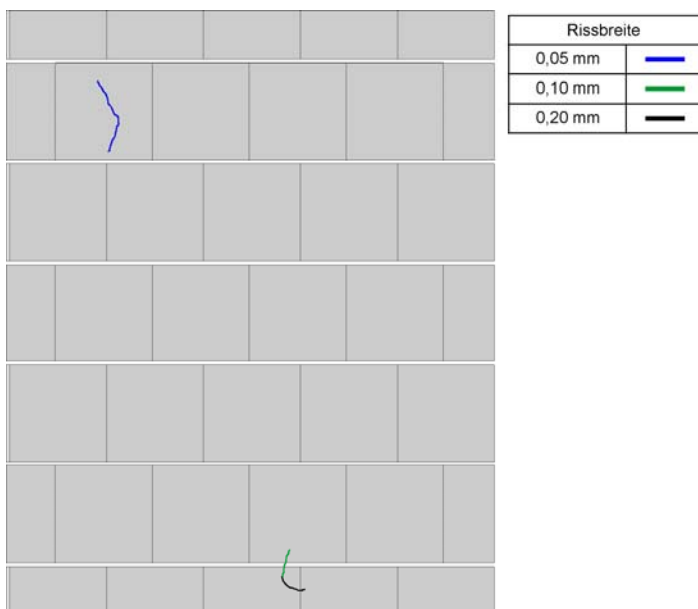
**Bild B129:** Temperaturen T verschiedener Messstellen auf der Putzoberfläche bei der Kombination 1 und dem zweiten Zyklus in Abhängigkeit von der Messdauer t (Messstellenanordnung s. Bild B121)



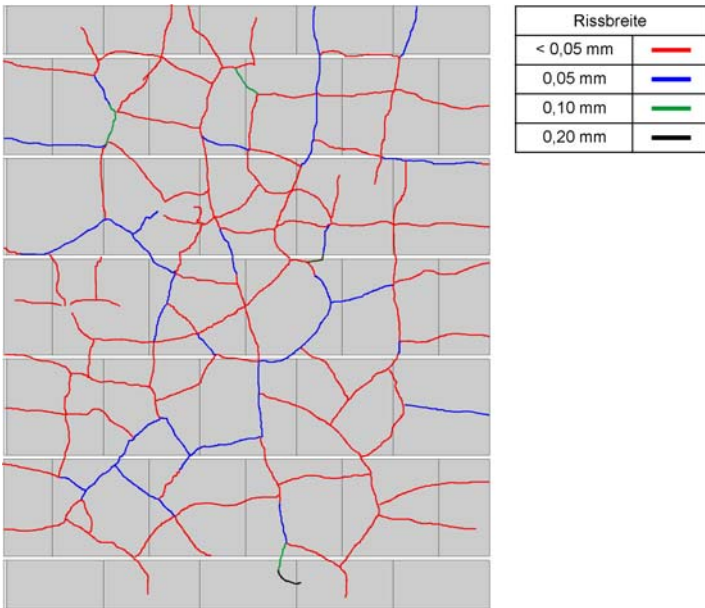
**Bild B130:** Temperaturen T verschiedener Messstellen auf der Putzoberfläche und im Bereich Putz/Putzgrund bei der Kombination 1 und dem zweiten Zyklus in Abhängigkeit von der Messdauer t (Messstellenanordnung s. Bild B121)



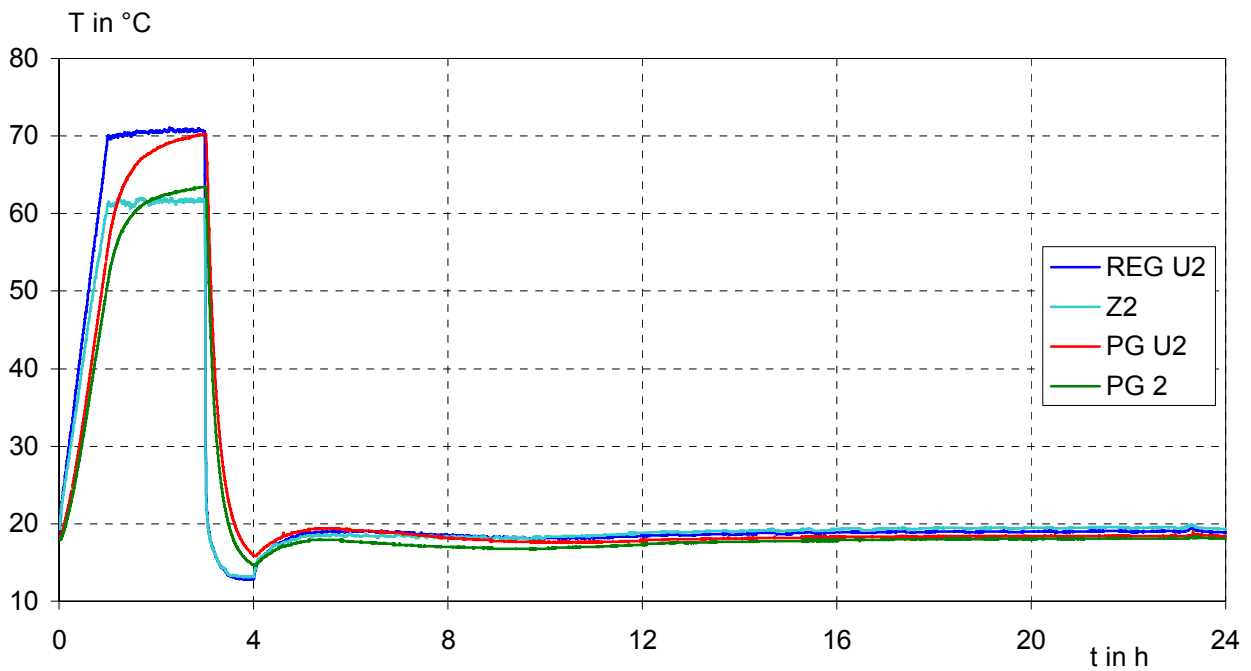
**Bild B131:** Temperaturen  $T$  verschiedener Messstellen auf der der Putzoberfläche und der Wandrückseite bei der Kombination 1 und dem zweiten Zyklus in Abhängigkeit von der Messdauer  $t$  (Messstellenanordnung s. Bild B121)



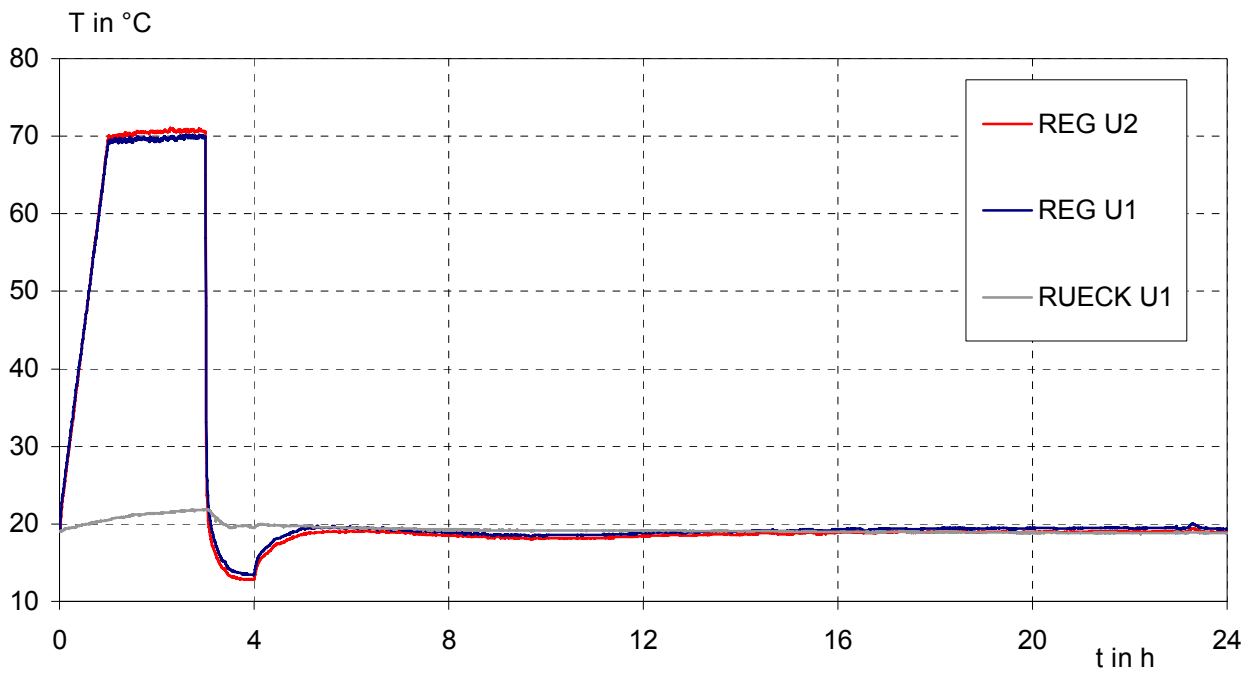
**Bild B132:** Risse in der Putzfläche der Kombination 1 vor Beginn der Bewitterung



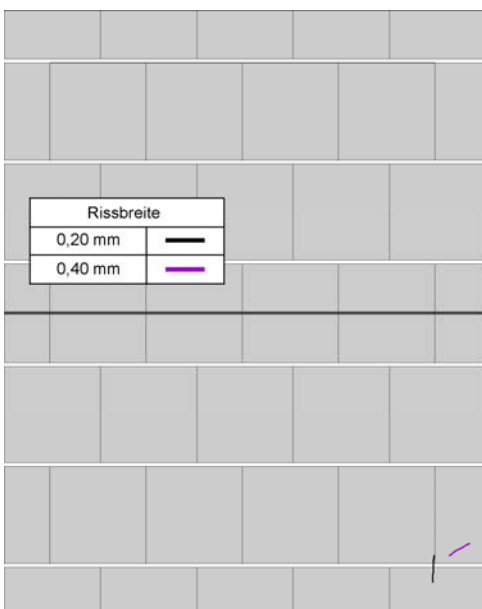
**Bild B133:** Risse in der Putzfläche der Kombination 1 nach dem 5. Zyklus



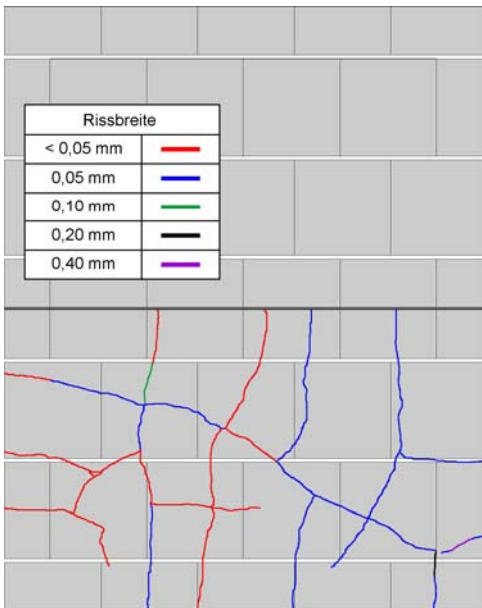
**Bild B134:** Temperaturen T verschiedener Messstellen auf der Putzoberfläche und im Bereich Putz/Putzgrund bei der Kombination 3 und dem zweiten Zyklus in Abhängigkeit von der Messdauer t (Messstellenanordnung s. Bild B122)



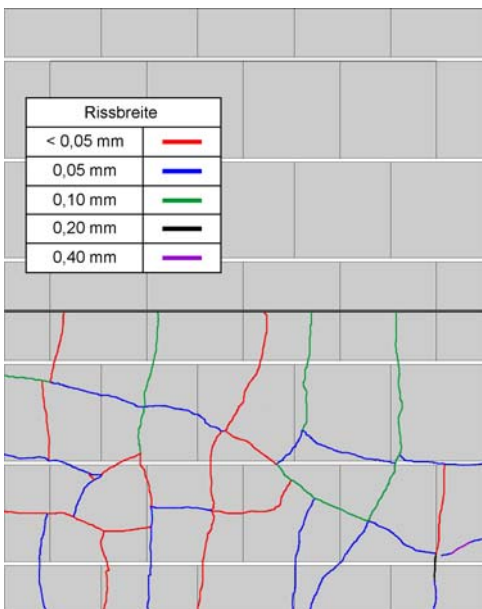
**Bild B135:** Temperaturen T verschiedener Messstellen auf der Putzoberfläche und der Wandrückseite bei der Kombination 3 und dem zweiten Zyklus in Abhängigkeit von der Messdauer t (Messstellenanordnung s. Bild B122)



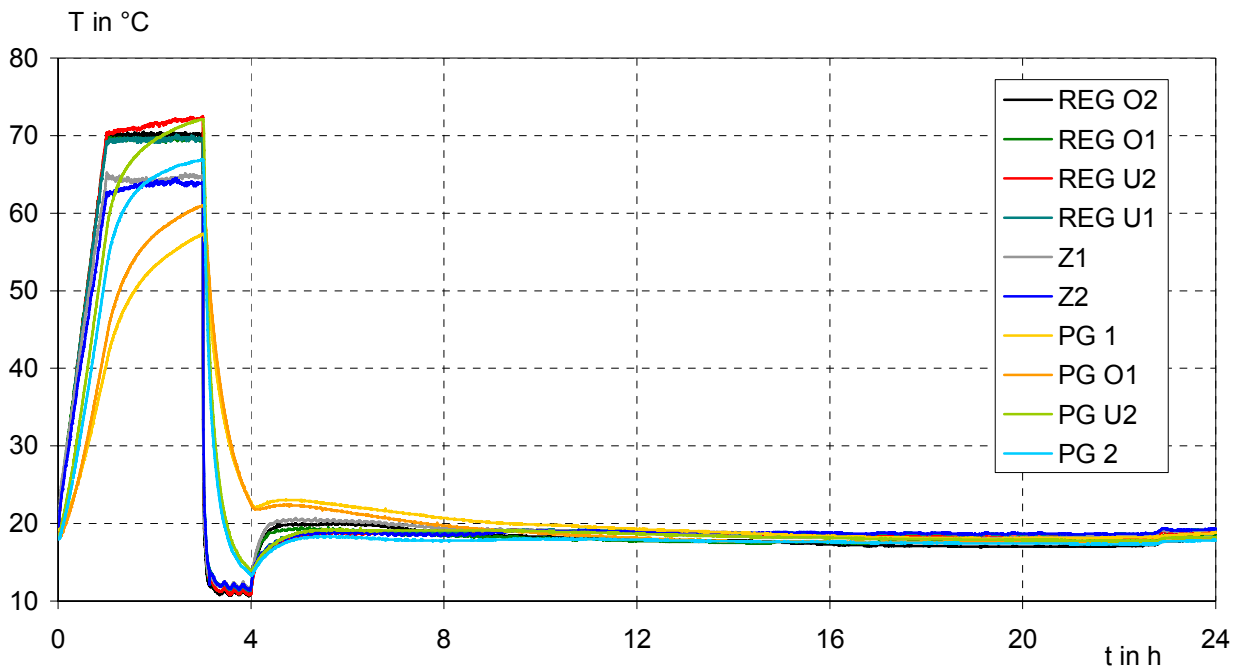
**Bild B136:** Risse in der Putzfläche der Kombination 3 vor Beginn der Bewitterung



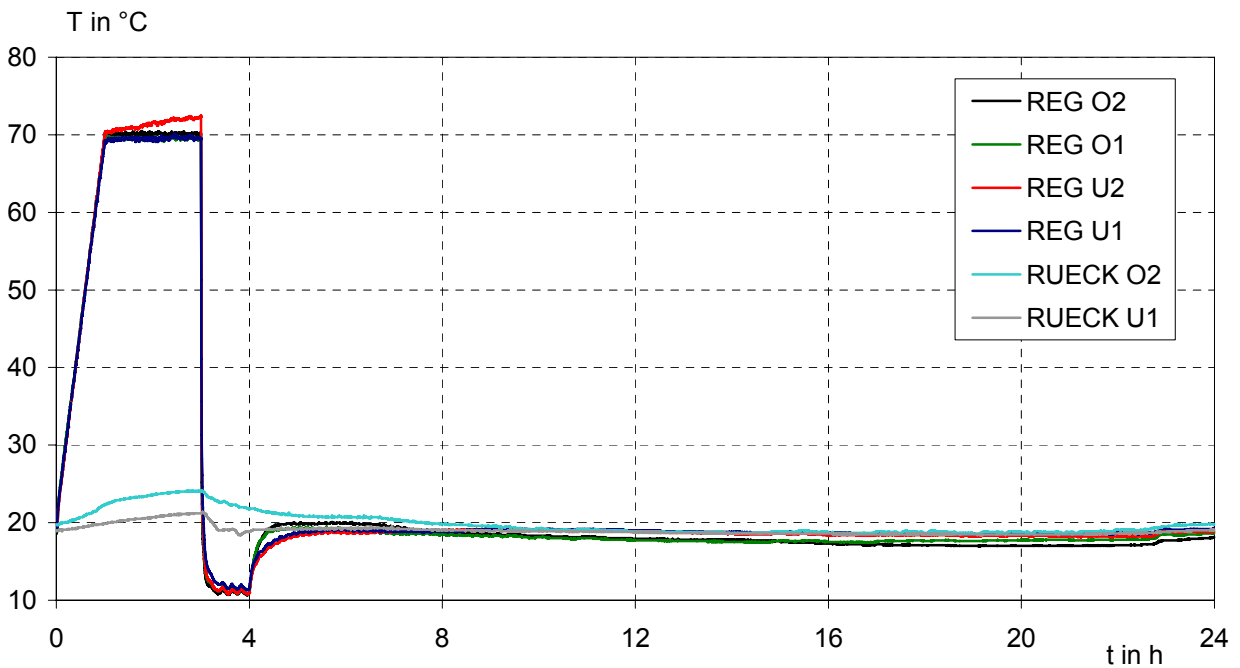
**Bild B137:** Risse in der Putzfläche der Kombination 3 nach dem 1. Zyklus



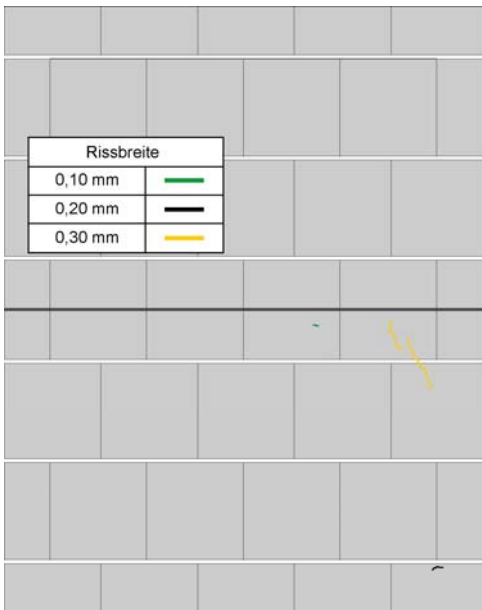
**Bild B138:** Risse in der Putzfläche der Kombination 3 nach Ende der Bewitterung



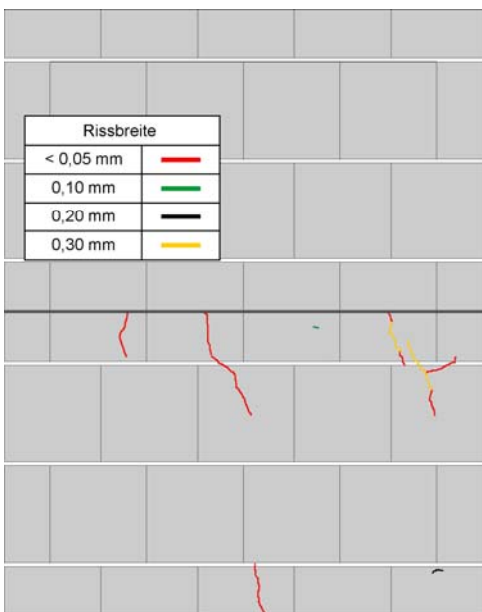
**Bild B139:** Temperaturen T verschiedener Messstellen auf der Putzoberfläche und im Bereich Putz/Putzgrund bei den Kombinationen 4 und 5 und dem zweiten Zyklus in Abhängigkeit von der Messdauer t (Messstellenanordnung s. Bild B123)



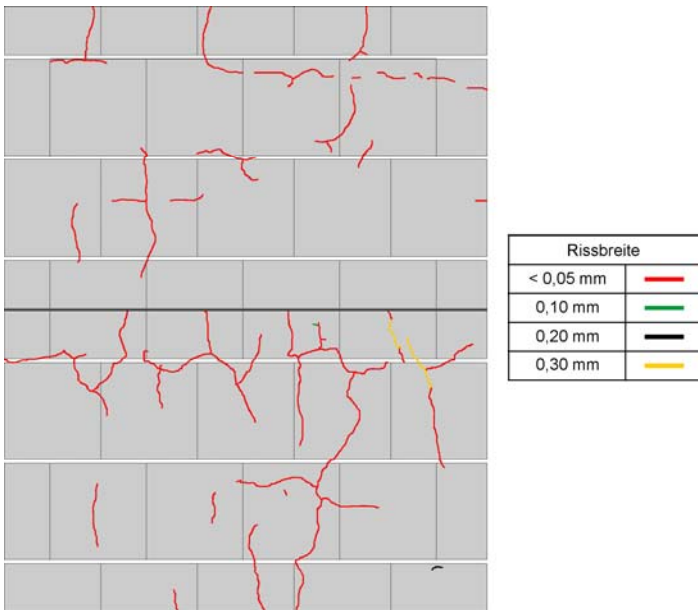
**Bild B140:** Temperaturen T verschiedener Messstellen auf der Putzoberfläche und der Wandrückseite bei den Kombinationen 4 und 5 und dem zweiten Zyklus in Abhängigkeit von der Messdauer t (Messstellenanordnung s. Bild B123)



**Bild B141:** Risse in der Putzfläche der Kombinationen 4 und 5 vor Beginn der Bewitterung



**Bild B142:** Risse in der Putzfläche der Kombinationen 4 und 5 nach dem 1. Zyklus



**Bild B143:** Risse in der Putzfläche der Kombinationen 4 und 5 nach Ende der Bewitterung