

# Zur Feuchtedehnung von Mauerwerk

**T 1018**

T 1018

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

T 1018: Zur Feuchtedehnung von Mauerwerk

**Institut für Bauforschung**

der Rheinisch-Westfälischen  
Technischen Hochschule Aachen

Direktor: o. Professor Dr.-Ing. K. Wesche



15.9

Telefon 0241/ 80-51 07... (Durchwahl)  
80-51 00... (Vermittlung)

27.07.1982  
SB/PJ.-F 90

ZUR FEUCHTEDEHNUNG VON MAUERWERK

F 9 0

ABSCHLUSSBERICHT

SACHBEARBEITER: DR.-ING. P. SCHUBERT

ERSTELLT IM AUFTRAGE DES INSTITUTS FÜR BAUTECHNIK,  
REICHPIETSCHUFER 72-76, 1000 BERLIN 30, Az.: IV/1-5-91/77

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
HÄUFIG VERWENDETE KURZZEICHEN.....	01
1. EINFÜHRUNG.....	1
2. ZIELSTELLUNG.....	2
3. DEFINITION DER FEUCHTEDEHNUNG.....	3
4. LITERATURSICHTUNG.....	5
4.1 Allgemeines.....	5
4.2 Grundlegende Literatur zum Schwinden und Feuchtigkeitsverhalten aus dem Betonbereich.....	6
4.2.1 Ursachen des Schwindens.....	6
4.2.2 Einflußgrößen auf das Schwinden.....	8
4.2.3 Untersuchungen zum Austrocknungsverhalten	10
4.3 Feuchtedehnung und Austrocknungsverhalten von Mauermörtel, Mauersteinen und Mauerwerk	12
4.3.1 Allgemeines.....	12
4.3.2 Mauermörtel.....	12
4.3.3 Mauerziegel und Mauerwerk aus Mauerziegeln	14
4.3.3.1 Allgemeines.....	14
4.3.3.2 Ursachen des chemischen Quellens.....	14
4.3.3.3 Einflüsse auf das chemische Quellen.....	15
4.3.3.4 Austrocknungsverhalten.....	17
4.3.4 Kalksandsteine und Mauerwerk aus Kalksandsteinen.....	17
4.3.4.1 Ursachen der Feuchtedehnung.....	17
4.3.4.2 Einflüsse auf die Feuchtedehnung.....	18
4.3.4.3 Austrocknungsverhalten.....	19
4.3.5 Beton- und Leichtbetonsteine und Mauerwerk aus Beton- und Leichtbetonsteinen.....	19
4.3.5.1 Ursachen der Feuchtedehnung.....	19
4.3.5.2 Einflüsse auf die Feuchtedehnung.....	19
4.3.5.3 Austrocknungsverhalten.....	21
4.3.6 Gasbetonsteine und Mauerwerk aus Gasbetonsteinen.....	22
4.3.6.1 Ursachen der Feuchtedehnung.....	22
4.3.6.2 Einflüsse auf die Feuchtedehnung.....	22
4.3.6.3 Austrocknungsverhalten.....	23
5. UNTERSUCHUNGEN ZUR FEUCHTEDEHNUNG VON MAUERMÖRTEL, MAUERSTEINEN UND MAUERWERK...	23
5.1 Allgemeines.....	23

		Seite
5.2	Forschungsvorhaben "Kriech- und Schwindver- suche an Mauerwerk F 60" (1964).....	21
5.3	Forschungsvorhaben "Entwicklung eines Schwindprüfverfahrens zur Ermittlung des Schwindendwertes von Wandbausteinen F 74" /S7/.....	25
5.4	Tastversuche zum Einfluß der relativen Luftfeuchte und der Karbonatisierung auf das Schwinden V 156 /I6/.....	26
5.5	Andere Schwindversuche.....	26
6.	AUSWERTUNG DER LITERATURERGEBNISSE UND DER UNTERSUCHUNGEN ZUR FEUCHTEDEHNUNG.....	27
6.1	Austrocknungsverhalten.....	27
6.1.1	Allgemeines zur Auswertung.....	27
6.1.2	Einfluß der Karbonatisierung auf die ermit- telten Feuchtigkeitsgehalte.....	30
6.1.3	Mörtel.....	31
6.1.3.1	Gleichgewichtsfeuchte.....	32
6.1.3.2	Austrocknungsverlauf.....	35
6.1.4	Mauersteine und Mauerwerk.....	36
6.1.4.1	Gleichgewichtsfeuchte.....	36
	a) Mauerziegel.....	37
	b) Kalksandsteine.....	38
	c) Leichtbetonsteine.....	38
	d) Gasbetonsteine.....	38
	e) Rechenwerte $h_{v\infty}$ .....	39
6.1.4.2	Austrocknungsverlauf.....	40
	a) Mauerziegel.....	40
	b) Kalksandsteine.....	41
	c) Leichtbetonsteine und Betonsteine.....	42
	d) Gasbetonsteine.....	44
6.1.5	Zusammenfassung der Auswerteergebnisse....	45
6.2	Feuchtedehnung.....	47
6.2.1	Allgemeines zur Auswertung.....	47
6.2.2	Grundsätzliche Überlegungen zum Einfluß der Porenverteilung auf den Endwert der Feuch- tedehnung.....	48
6.2.3	Mörtel.....	52
6.2.3.1	Endwerte (Schwinden).....	52
6.2.3.2	Schwindverlauf.....	55
6.2.3.3	Rechnerische Abschätzung des Schwindens...	56
6.2.4	Mauersteine.....	57
6.2.4.1	Allgemeines.....	57
6.2.4.2	Endwerte.....	58
6.2.4.2.1	Mauerziegel.....	58
6.2.4.2.2	Kalksandsteine.....	60

		Seite
6.2.4.2.3	Leichtbetonsteine und Betonsteine.....	66
6.2.4.2.4	Gasbetonsteine.....	67
6.2.4.3	Mindestversuchsdauer zur Bestimmung des Endwertes.....	72
6.2.4.4	Zeitlicher Verlauf der Feuchtedehnung.....	73
6.2.4.4.1	Allgemeines.....	73
6.2.4.4.2	Mauerziegel.....	74
6.2.4.4.3	Nichtkeramische Mauersteine.....	74
6.2.5	Mauerwerk.....	75
6.2.5.1	Allgemeines.....	75
6.2.5.2	Endwerte.....	76
6.2.5.2.1	Allgemeines.....	76
6.2.5.2.2	Steineigenschaften.....	76
6.2.5.2.3	Prüfkörpergröße.....	78
6.2.5.2.4	Vorlagerungsart und -dauer.....	79
6.2.5.2.5	Hauptlagerungsart und -dauer.....	80
6.2.5.2.6	Schwinden in horizontaler und vertikaler Richtung.....	81
6.2.5.2.6.1	Vergleich der Endwerte $\epsilon_{h\infty(v)}$ , $\epsilon_{h\infty(h)}$ .....	81
6.2.5.2.6.2	Rechnerische Abschätzung des Einflusses des Mörtelschwindens.....	82
6.2.5.2.6.3	Vergleich der Endwerte $\epsilon_{h\infty(v)}$ , $\epsilon_{h\infty(h)}$ un- ter Berücksichtigung des unterschiedli- chen Mörtelschwindeinflusses.....	87
6.2.5.2.7	Mindestversuchsdauer zur Bestimmung des Endwertes.....	87
6.2.5.3	Zeitlicher Verlauf der Feuchtedehnung.....	89
6.2.5.3.1	Allgemeines.....	89
6.2.5.3.2	Prüfkörpergröße.....	89
6.2.5.3.3	Verlauf der Feuchtedehnung senkrecht (v) und parallel (h) zu den Lagerfugen.....	91
6.2.5.3.4	Verlauf der Feuchtedehnung im Randbereich (Stein) und Kernbereich (Mauerwerk) senk- recht zu den Lagerfugen.....	91
6.2.5.3.5	Einfluß der relativen Luftfeuchte U.....	96
6.2.6	Zusammenhang zwischen der Feuchtedehnung von Einzelsteinen und der von Mauerwerk...	97
6.2.6.1	Endwerte.....	97
6.2.6.1.1	Allgemeines.....	97
6.2.6.1.2	Mauerziegel.....	98
6.2.6.1.3	Kalksandsteine.....	99
6.2.6.1.4	Leichtbetonsteine und Betonsteine.....	100
6.2.6.1.5	Gasbetonsteine.....	101
6.2.6.1.6	Zusammenfassende Bewertung der Auswerte- ergebnisse.....	102
6.2.6.2	Zeitlicher Verlauf der Feuchtedehnung.....	103
6.3	Zusammenhang zwischen Feuchtedehnung und Feuchtigkeitsgehalt.....	105
6.3.1	Allgemeines.....	105

		Seite
6.3.2	Grundsätzlicher Zusammenhang zwischen s, q .....	109
6.3.3	Auswertung der vorliegenden Versuchser- gebnisse.....	109
6.3.3.1	Allgemeines.....	109
6.3.3.2	Mörtel.....	110
6.3.3.3	Kalksandsteine.....	112
6.3.3.4	Leichtbetonsteine.....	113
6.3.3.5	Betonsteine.....	115
6.3.3.6	Gasbetonsteine.....	116
6.3.3.7	Mauerwerk.....	117
6.3.3.8	Zusammenhang $\epsilon$ -h und Kapillarzugspan- nungen.....	118
6.3.3.9	Erkenntnisse aus den Auswerteergebnissen und Anwendungsmöglichkeiten.....	119
7.	BESTIMMUNG VON ENDWERT UND VERLAUF DER FEUCHTEDEHNUNG VON MAUERWERK.....	121
7.1	Allgemeines.....	121
7.2	Aus Versuchen an Mauerwerk oder Einzel- steinen.....	121
7.2.1	Allgemeines.....	121
7.2.2	Bestimmungsverfahren.....	122
7.2.3	Verfahrensweise.....	122
7.2.3.1	Versuchsdurchführung.....	123
7.2.3.2	Auswertung der Versuchsergebnisse (A bis C)	126
7.3	Rechnerische und grafische Bestimmung.....	128
7.3.1	Allgemeines.....	128
7.3.2	Rechnerische Bestimmung des Endwertes.....	128
7.3.2.1	Grundgleichungen.....	128
7.3.2.2	Grundendwerte und Beiwerte.....	129
7.3.2.2.1	Grundendwerte.....	129
7.3.2.2.2	Beiwert Meßstelle Mauerstein.....	130
7.3.2.2.3	Beiwert Mörtel einfluß.....	131
7.3.2.2.4	Beiwert relative Luftfeuchte.....	131
7.3.2.2.5	Beiwert Prüfkörpergröße.....	132
7.3.2.2.6	Beiwert Alter Mauersteine.....	133
7.3.2.2.7	Beiwert Vorlagerung Mauersteine.....	133
7.3.3	Bestimmung des Feuchtedehnungsverlaufes...	134
8.	AUSBLICK AUF WEITERE UNTERSUCHUNGEN.....	136
9.	ZUSAMMENFASSUNG.....	137
10.	LITERATURVERZEICHNIS.....	138
11.	TABELLEN.....	A1
12.	BILDER.....	B1



## Häufig verwendete Kurzzeichen

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
Allgemein		
A	mm <sup>2</sup>	Fläche
A, BEST	%	Bestimmtheitsmaß
cal	-	berechnete Größe
d	mm	Dicke
d <sub>ef</sub>	mm	wirksame Dicke
E, E <sub>v</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul
g	-	Zuschlag
h, H	Vol.-%, M.-%	Feuchtigkeitsgehalt
h <sub>v</sub> , HV	Vol.-%	Feuchtigkeitsgehalt
h <sub>m</sub> , HM	M.-%	Feuchtigkeitsgehalt
Δm, DM	M.-%	Masseänderung
Δh, DH	Vol.-%, M.-%	Feuchtigkeitsänderung
k	verschieden	Beiwert
m	g, kg	Masse
MG	-	Mörtelgruppe
MT	-	Masseteile
max x	verschieden	Größtwert
min t	verschieden	Mindestversuchsdauer
min x	verschieden	Kleinstwert
n	-	Anzahl der Stichprobenwerte
obs	-	gemessene Größe
p	Vol.-%	Porenanteil
RT	-	Raumteile
s	verschieden	Standardabweichung
S	%	Aussagesicherheit
t	d	Zeit
t <sub>h</sub> , TH	d	Halbwertzeit
U	-, %	relative Luftfeuchte
u	mm	Umfang

Häufig verwendete Kurzzeichen

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
Allgemein		
v	%	Variationskoeffizient
V	dm <sup>3</sup>	Volumen
w/z	-	Wasserzementwert
$\bar{x}$	verschieden	Mittelwert
$x_{10}, x_{90}, x_{95}$	verschieden	10 %-, 90 %-, 95 %-Fraktile
z	-	Zement
$\alpha$	verschieden	Beiwert, Verhältniszahl
$\alpha_{\epsilon}$	-	= $\epsilon_h(t)/\epsilon_{h\infty}$
$\alpha_h$	-	= $h(t)/h_{\infty}$
$\beta$	verschieden	Verhältniszahl
$\beta_D$	N/mm <sup>2</sup>	Druckfestigkeit
$\epsilon$	mm/m	Dehnung
$\epsilon_h$	mm/m	Feuchtedehnung
$\epsilon_s$	mm/m	Schwinden
$\epsilon_q$	mm/m	Quellen
$\epsilon_{cq}$	mm/m	Chemisches Quellen
$\epsilon_{ck}$	mm/m	Karbonatisierungsschwinden
$\Delta\epsilon$	mm/m	Dehnungsdifferenz
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Rohdichte
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Spannung
$\omega$	-	Wasserzementwert
Bezeichnung von Meßstellen		
BA		Meßstellen bei Mauersteinen;
BR		B, H, L: Meßrichtung:
HA		Steinbreite, -höhe, -länge
HR		A, R : Meßort:
LA		Steinachse, -rand
LR		

Häufig verwendete Kurzzeichen

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
Bezeichnung von Meßstellen		
MV MH SH SL	-	Meßstellen bei Mauerwerkprüf- körpern; SH, SL: Oberfläche Stein, Richtung Steinhöhe, -länge MV, MH: Im Stein-Fugenbereich vertikal, horizontal
Bezeichnung von Zuschlägen		
BS BT FA N NB	-	Blähschiefer Blähton Flugasche dichter Zuschlag Naturbims
Bezeichnung von Mauersteinen		
B G KS LB MZ	-	Betonsteine, dichter Zuschlag Gasbetonsteine Kalksandsteine Leichtbetonsteine Mauerziegel
Bezeichnung der Art der Mauerwerkprüfkörper		
W P VP	-	Wände Pfeiler, je Schicht 1 Stein Pfeiler im Verband, je Schicht 2 Steine

### Häufig verwendete Indizes

index	Bedeutung
d	trocken, Dicke
f	Mörtelfuge
h	Feuchte, horizontal
k	Karbonatisierung
kap	Kapillar
mö	Mörtel
mw	Mauerwerk
max t	bei Versuchsende
MS	Meßstelle
st	Stein
t	Zeit
VL	Vorlagerung
w	Wasser
v	vertikal, Verformung
o (Null)	anfangs
$\epsilon$	Dehnung, Feuchtedehnung
$\infty$	Endwert
U	relative Feuchte

## 1. EINFÜHRUNG

Während das Schwinden von Beton seit Jahrzehnten Gegenstand weltweiter intensiver Forschung war und auch noch ist und darüber eine Fülle von Veröffentlichungen vorliegt, sind über das Schwinden von Mauerwerk vergleichsweise wenige Untersuchungen bekannt geworden. Dies ist, abgesehen von Unterschieden in den Anwendungsbereichen und in der Beanspruchbarkeit der beiden Baustoffe, sicherlich auch darauf zurückzuführen, daß das in früherer Zeit fast ausschließliche Bauen mit keramischen Mauersteinen, den Mauerziegeln, in Bezug auf das Schwinden unproblematisch war, da bei diesen nennenswertes Schwinden nicht auftritt. Zudem waren die Mauerwerksbauteile relativ dick - was langsameres und damit rißungefährlicheres Schwinden bewirkte - und die Bauwerkshöhe relativ gering, so daß Schwindunterschiede zwischen benachbarten Bauteilen klein blieben. Es sind jedoch im Laufe dieses Jahrhunderts andere Mauersteinarten, im wesentlichen nämlich Kalksandsteine, Gasbetonsteine und Beton- und Leichtbetonsteine dazu gekommen, deren Formänderungen, insbesondere die infolge Feuchtigkeitsänderung sich untereinander aber auch vor allem gegenüber denen der Mauerziegel erheblich unterscheiden können. Zudem hat sich die Bauweise geändert: Die Bauteile sind im allgemeinen wesentlich dünner, was zu schnellerem, rißgefährlicherem Schwinden führt, die Bauwerke sind zum Teil erheblich höher, wodurch sich Verformungsunterschiede vervielfachen können, und an einem Bauwerk werden meist verschiedenartige Mauersteine verwendet, die oft nur nach Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit, Bauphysik und der Tragfähigkeit ohne Beachtung der möglichen Verformungsunterschiede ausgewählt und eingesetzt werden. Dies hat insbesondere im letzten Jahrzehnt häufig zu Rißschäden an Mauerwerksbauteilen geführt. Die daraufhin eingeleitete Forschungstätigkeit führte zur Angabe von ersten Rechenwerten für die verschiedenen Formänderungen von Mauerwerk und zu Abschätzverfahren für die Rißsicherheit /W9/, die auch Eingang in die Mauerwerksnorm fanden /1/.

Unter den verschiedenen Formänderungen - lastbedingte Formänderungen und Wärmedehnung - ist die Formänderung infolge Feuchtigkeitseinwirkung, im wesentlichen das Schwinden, von großer Bedeutung, weil deren Anteil an der gesamten Formänderung, außer bei den Mauerziegeln, meist sehr hoch ist und damit die Rißsicherheit erheblich beeinflussen kann. Über das Schwindverhalten von Mauerwerk aus den verschiedenen Mauersteinen liegen jedoch, wie bereits erwähnt, relativ wenige Untersuchungen vor. Dies führte dazu, daß die in /1/ angegebenen Rechenwerte nur als Anhaltswerte zu betrachten sind und mit einem möglichen Schwankungsbereich von  $\pm 50\%$  versehen werden mußten. Ausreichend abgesicherte Angaben über den zeitlichen Verlauf des Schwindens, den Einfluß von Alter bei Schwindbeginn, Klima und Bauteilgröße analog zu Beton, waren nicht möglich.

Dies führt zu erheblichen Unsicherheiten bei der Beurteilung der Rißsicherheit von Mauerwerksbauten, was sich auf die Wirtschaftlichkeit bzw. Schadensfreiheit ungünstig auswirkt. Es ist deshalb als dringlich anzusehen, den Erkenntnisstand in Bezug auf das Schwindverhalten von Mauerwerk zu erweitern.

## 2. ZIELSTELLUNG

Ziel der Forschungsarbeit ist es, das Schwindverhalten der verschiedenen Mauerwerksarten in Abhängigkeit von den wesentlichen Einflußgrößen quantitativ hinreichend genau zu beschreiben. Im einzelnen betrifft dies:

- a) Beschreibung des Schwindverlaufs durch geeignete mathematische Ansätze,
- b) Bestimmung des Schwindendwertes durch geeignete mathematische Ansätze,
- c) quantitative Ermittlung der wesentlich erscheinenden Einflußgrößen auf a) und b):

Mauersteinart,  
Mörtelart,  
Mörtelanteil im Mauerwerk,  
Bauteilgröße,  
Alter bei Schwindbeginn,  
Feuchtigkeitszustand bei Schwindbeginn,  
Lagerungsbedingungen,

- d) Rechnerische Ermittlung des Schwindens nach einer bestimmten Schwinddauer und des Schwindendwertes in Abhängigkeit von den unter c) genannten Einflußgrößen,
- e) Angabe von Endschwindwerten mit Schwankungsbereich für verschiedene Bedingungen.

Da das Schwinden, abgesehen von den jeweiligen Baustoffeigenschaften, im wesentlichen von der Feuchtigkeitsänderung abhängt, soll außerdem versucht werden, das Schwinden feuchtigkeitsbezogen zu beschreiben. Voraussetzung dafür ist eine ausreichende Kenntnis des Austrocknungsverhaltens von Mauerwerk, das deshalb mit behandelt wird.

### 3. DEFINITION DER FEUCHTEDEHNUNG

Volumenverringerung infolge Feuchtigkeitsabgabe wird als Schwinden bezeichnet  $/W7/$ . Dieser Vorgang ist physikalischer Natur und weitgehend umkehrbar, was dann Quellen genannt wird. Da Schwindvorgänge im allgemeinen mit dem Entstehen von Zugspannungen verbunden sind, ist Schwinden bei wenig zugfesten Baustoffen wie Mauerwerk und Beton wesentlich bedeutungsvoller als das Quellen. Zudem ist Schwinden wegen der relativ hohen Einbaufeuchtigkeit von Mauerwerk und Beton der häufigere Vorgang, abgesehen von stark feuchtigkeitsbeanspruchten Bauteilen. So ist es erklärlich, daß praktisch nur vom Schwinden gesprochen wird, wenn feuchtigkeitsbedingte Formänderungen gemeint sind. Diese vom Beton herkommende Betrachtungsweise läßt sich

ohne weiteres auf den grundsätzlich ähnlichen Baustoff Kalksandstein und selbstverständlich auch auf Gasbeton- und Beton- und Leichtbetonstine übertragen. Bei Mauerziegeln kann jedoch neben dem physikalisch bedingten Schwinden und Quellen eine Volumenvergrößerung infolge molekularer Wasserbindung eintreten, die erst durch Erhitzen auf etwa 600 °C rückgängig zu machen ist. Sie wurde bislang als Feuchtedehnung bezeichnet. Diese Bezeichnung befriedigt nicht, da Feuchtedehnung vom Begriff her alle durch Feuchtigkeitseinwirkung bedingten Formänderungen einschließt. Zur begrifflichen Klarstellung wird deshalb im folgenden Feuchtedehnung als Oberbegriff im vorgenannten Sinne verwendet und mit  $\epsilon_h$  bezeichnet.

Die verschiedenen Arten der Feuchtedehnung werden in 2 Gruppen unterteilt: a) Feuchtedehnung, die überwiegend auf einem physikalischen Vorgang beruht und b) Feuchtedehnung infolge chemischer und chemisch-physikalischer Vorgänge. Die Kennzeichnung der Gruppe b) erfolgt durch den Index c. Zur Gruppe a) gehören Schwinden  $\epsilon_s$  und Quellen  $\epsilon_q$ , zur Gruppe b) das chemische Quellen  $\epsilon_{sq}$ .

Bei der in den Folgeabschnitten durchgeführten Literatursichtung und Auswertung von Versuchsergebnissen werden, da es sich überwiegend um Schwinden handelt, zur Vereinfachung Verkürzungen mit plus und Verlängerungen mit minus bezeichnet.

Bei nichtkeramischen Mauersteinen kann außer dem Schwinden analog zu Beton eine Volumenverringerung durch Karbonatisierung auftreten. Dieser Vorgang beruht auf der chemischen Reaktion der Luftkohlendensäure mit bestimmten chemischen Verbindungen des Baustoffes und ist nicht umkehrbar. Der Begriff Schwinden ist deshalb nicht zutreffend und müßte durch chemisches Schwinden bzw. Schrumpfen ersetzt werden. Es wird jedoch seit langem vor allem in der ausländischen Literatur von "Karbonatisierungsschwinden" gesprochen, so daß deswegen von einer Begriffsänderung abgesehen wird. Als Kurzzeichen wird  $\epsilon_{ck}$  verwendet. Da



Karbonatisierungsschwinden meist auch während der Feuchtedehnung (Schwinden) auftritt, wird es im folgenden mitbehandelt.

#### 4. LITERATURSICHTUNG

##### 4.1 Allgemeines

Die vorliegende Literatur zum Feuchtedehn- und Feuchtigkeitsverhalten von Mauerwerk bzw. Mauersteinen bezieht sich überwiegend auf spezielle, meist sehr eng gefaßte Untersuchungen. Grundlegende Literatur über Ursachen und theoretische Beschreibung des Schwindens existiert praktisch nicht. Hierfür kann jedoch weitgehend auf die Literatur aus dem Betonbereich Bezug genommen werden, da Schwindmechanismus, Schwindverlauf und bestimmte Einflüsse auf das Schwinden von Mauersteinen und Mauer-  
mörtel zumindest qualitativ gleichartig wie bei Beton sein werden. Es wird deshalb zunächst eine diesbezügliche Auswertung der Betonliteratur vorangestellt.

Die dazu anschließende Auswertung von Untersuchungen an Mauersteinen und Mauerwerk ergänzt diese in den behandelten Bereichen nur insoweit, als sich dabei mauerwerkspezifische Gesichtspunkte ergeben.

Da das Schwinden bei keramischen Baustoffen im Gegensatz zum chemischen Quellen sehr gering ist und deshalb kaum Bedeutung hat, wird bei diesen Baustoffen im wesentlichen nur das chemische Quellen behandelt.

Wegen der notwendigen Verknüpfung der Feuchtedehnung mit dem Feuchtigkeitsgehalt, wurde auch die diesbezügliche Literatur aus dem Beton- und Mauerwerkbereich ausgewertet.

## 4.2 Grundlegende Literatur zum Schwinden und Feuchtigkeitsverhalten aus dem Betonbereich

### 4.2.1 Ursachen des Schwindens

Die Ursachen für das Schwinden sind noch nicht vollständig zweifelsfrei geklärt. Von den bestehenden Theorien über den Schwindmechanismus ist die von Powers /P8/ am überzeugendsten /R7, C13/. Er beschreibt den Schwindmechanismus wie folgt:

Trockenes Zementgel befindet sich im gedrückten Zustand, bedingt durch die Anziehungskräfte zwischen den Partikeloberflächen (Van der Waalsche Kräfte), die etwa  $1/a^3$  (a: Oberflächenabstand) proportional und wegen des geringen Partikelabstandes (große Geloberfläche) groß sind. Zwischen diesen Druckspannungen und den inneren elastischen Reaktionskräften der verformten Gelbausteine besteht ein Gleichgewichtszustand. Dringt nun von außen Wasser ein, so werden die Wassermoleküle in einen besonderen Kondensationszustand, den adsorbierten Zustand überführt, weil zwischen den Partikeloberflächen und den Wassermolekülen eine starke Anziehung besteht. Dadurch wird die Größe der Wassermoleküle verkleinert, ihre Beweglichkeit und ihr Bestreben, sich gleichmäßig über die Partikeloberfläche zu verteilen, bleiben erhalten. Bei unbehinderter Adsorption entspricht dies bei etwa 50 % relativer Feuchtigkeit einem Wasserfilm von 2 Molekülen Dicke, d. h. einem Oberflächenabstand von mindestens 4 Moleküldurchmessern. Die Gelporen im Zementstein sind jedoch im Mittel nur etwa 5 mal so groß wie ein Wassermolekül, so daß an vielen Stellen im Zementgel kein geschlossener Wasserfilm entstehen kann. Dort werden Wassermoleküle am Zusammenschluß gehindert und erzeugen einen Quelldruck, um den Oberflächenabstand zu vergrößern. Der Quelldruck wirkt den Kohäsionskräften entgegen.

Der Quelldruck ist am größten, wenn das verdunstbare Wasser spannungslos, d. h. der Körper wassergesättigt ist. Trocknen wassergefüllte Kapillaren aus, so entstehen zusätzliche Druck-

spannungen im Gel, dies allerdings nur solange, wie flüssiges Wasser vorhanden ist, was bis zu  $U \approx 40\%$  der Fall ist. Unter  $U \approx 40\%$  ist die hydrostatische Spannung des Restwassers größer als die theoretische Zugfestigkeit von reinem Wasser, so daß kein stabiler Kapillarmeniskus mehr möglich ist. Bei  $U \approx 40\%$ , d. h. bei einer hydrostatischen Spannung gerade noch unter der Zugfestigkeit des Wassers, bleiben nahezu alle Gelporen wassergesättigt, die nicht wassergesättigten können Menisken aufweisen. Überschreitet die Spannung die Zugfestigkeit des Wassers, verschwinden die Kapillarspannungen und die Gelporen beginnen sich zu entleeren.

Mit dieser Hypothese dürfte nach /R7/ das Schwinden bei höherer Gleichgewichtsfeuchtigkeit damit erklärbar sein, daß die dann vorhandene Kapillarspannung nicht zur direkten Volumenkontraktion der festen Bestandteile des Zementsteins, sondern zu einer Abnahme des Quelldruckes des freien Wassers auf die unvollständig gesättigten Gelporen und damit zur Entwässerung besonders stark gequollener Bereiche führt (s. auch /S21, S22/). Die Benetzung und Tränkung des getrockneten Zementgels mit andern Flüssigkeiten hatte nämlich nicht zu einer Volumenvergrößerung geführt.

Der große Mangel der einfachen Kapillarspannungshypothese, daß nach Verschwinden der Kapillarspannung eine Volumenvergrößerung eintreten müßte, was den Untersuchungsergebnissen widerspricht, ist durch die Hypothese von Powers behoben, da in diesem Feuchtigkeitsbereich "Druckspannungsentlastung" des Zementgels durch den Wegfall der Kapillarspannungen von der starken Druckspannungszunahme infolge abnehmenden Quelldruckes bei weiterer Entwässerung überlagert wird /K8/.

Da Beton-, Gasbeton- und Kalksandsteine Zementstein bzw. eine mit dessen Eigenschaften vergleichbare Matrix besitzen, kann davon ausgegangen werden, daß diese Schwindhypothese auch für diese Mauersteine zutrifft.

Dagegen erscheint die Übertragbarkeit auf Mauerziegel wegen deren abweichender chemischer Zusammensetzung und Eigenschaften nicht ohne weiteres gerechtfertigt. Untersuchungen dazu sind nicht bekannt.

#### 4.2.2 Einflußgrößen auf das Schwinden

Wesentliche Einflußgrößen auf das Schwinden von Beton sind:

- Das Schwinden des Zementsteins; es vergrößert sich mit Zunahme von Wassergehalt (w/z-Wert) und Porosität.
- Der Anteil des Zementsteins; mit dessen Zunahme erhöht sich das Schwinden des Betons.
- Die Verformbarkeit des Zuschlags; das Schwinden des Betons vergrößert sich mit zunehmender Verformbarkeit des Zuschlags.
- Der Feuchtigkeitszustand des Betons bei Schwindbeginn; je größer der Feuchtigkeitsgehalt bei Schwindbeginn ist, desto höher ist unter sonst gleichen Bedingungen auch das Schwinden, wobei allerdings ein bestimmter anfänglicher Feuchtigkeitsverlust im Bereich hoher Feuchtigkeit nicht zum Schwinden führt.
- Das Alter bei Schwindbeginn bzw. Art und Dauer der Vorlagerung;  
überwiegend ergab sich mit zunehmender schwindbehindernder Vorlagerung (feucht, Wasser) eine Verringerung des nachfolgenden Schwindens. Es liegen jedoch auch gegenteilige Ergebnisse vor /M8, W5/.
- Die Bauteilgröße;  
mit zunehmender Bauteilgröße verlangsamt sich das Schwinden, die Schwindkurve ist gestreckter, der Schwindunterschied zwischen Bauteiloberfläche und -kern wächst. Inwieweit die "Endwerte" mit zunehmender Baueildicke abnehmen /3/, ist umstritten /C14, L9/.

Der Einfluß der Bauteilgröße wird meist durch das Verhältnis von Oberfläche und Volumen  $O/V$  bzw.  $V/O$  oder Querschnittsfläche/Umfang  $/3/$ , bei plattenförmigen Bauteilen (Wänden) durch die Dicke gekennzeichnet  $/H19/$ .

- Das Schwindklima;

das Schwinden nimmt mit abnehmender relativer Luftfeuchtigkeit in Größe und Geschwindigkeit zu. Der Einfluß der Temperatur ist dagegen im üblichen Bereich der Innen- und Außentemperaturen vergleichsweise gering.

- Die Schwinddauer;

mit zunehmender Schwinddauer vergrößert sich das Schwinden, wobei sich die Schwindzunahme verringert. Der Schwindverlauf ist zumeist hyperbelförmig.

Die vorgenannten Einflüsse sind grundsätzlich auch bei den nichtkeramischen Mauersteinen zu erwarten.

Zur quantitativen Abschätzung dieser Haupteinflußgrößen auf das Schwinden von Beton existieren eine ganze Reihe von empirisch und theoretisch begründeten Rechenansätzen, die teilweise auch in Normen und Richtlinien Eingang gefunden haben. Die mit den meisten dieser Ansätze erzielbare Vorhersagegenauigkeit für das Schwinden ist jedoch relativ gering, weil die benutzten Eigenschaftskenngrößen stark schwanken und selbst meist auch zeitlicher und klimabedingter Änderung unterworfen sind. Dieser Weg erscheint deshalb für Mauerwerk nicht sinnvoll, zumal bei diesem Eigenschaftsunterschiede und -schwankungen in der Regel erheblich größer als bei Beton sind.

Grundsätzlich erfolgversprechender sind hingegen die feuchtigkeitsbezogenen Ansätze, da sie vom unmittelbaren Zusammenhang zwischen Schwinden und Feuchtigkeitszustand ausgehen und zur Bestimmung des Schwindens nur das Austrocknungsverhalten und dessen Zusammenhang zum Schwinden bekannt sein müssen. Zugleich

wird die Beschreibung des Schwindens universeller, da es dann praktisch für jeden Feuchtigkeitszustand angegeben werden kann.

Am richtungsweisendsten für diese Zielsetzung erscheinen die Überlegungen in /G1/, wo das Schwinden in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt, ausgehend von einer Schwindzahl  $\beta$  analog zum Wärmedehnungskoeffizienten formuliert wird, wobei  $\beta$  jedoch im Gegensatz zu diesem nicht konstant ist, sondern vom Feuchtigkeitsgehalt abhängt:

$$\beta = \frac{d\epsilon_s}{dh_v} = f(h_v)$$

$$\epsilon_s = \int_{h_{v1}}^{h_{v2}} \beta(h_v) dh_v$$

mit  $h_{v1}$ : Betrachteter Feuchtigkeitsgehalt bei einem bestimmten Trocknungszustand,

$h_{v2}$ : Ausgangsfeuchtigkeitsgehalt.

#### 4.2.3 Untersuchungen zum Austrocknungsverhalten

Da nach Abschnitt 4.2.2 die feuchtigkeitsbezogene Ermittlung des Schwindens vorteilhaft erscheint, kommt dem Austrocknungsverhalten besondere Bedeutung zu.

Nach /K21/ kann der Trocknungsverlauf bei kapillarporösen hygroskopischen Stoffen grundsätzlich durch die folgenden 3 Trocknungsabschnitte beschrieben werden (s. Bild 4.1).

Im ersten Abschnitt, in dem die Trocknung bei hohem Feuchtigkeitsgehalt beginnt, ist die Verdunstung an der Oberfläche annähernd konstant, solange die kapillare Leitfähigkeit groß genug ist, um die verdunstende Wassermenge nachzuliefern.

Im zweiten Abschnitt verringert sich die Trocknungsgeschwindigkeit, da sich mit wachsender Feuchtigkeitsabnahme im Stoff die Feuchteleitfähigkeit stark vermindert.

Am Ende dieses Trocknungsabschnittes ist das Feuchtigkeitsgefälle so groß, daß der Feuchtigkeitstransport nur noch durch Diffusion erfolgt (der gesamte Stoff zeigt hygroskopisches Verhalten).

Im dritten Abschnitt fällt schließlich die Trocknungsgeschwindigkeit mit zunehmender Austrocknungsdauer asymptotisch auf Null.

Die stark mit dem Feuchtigkeitszustand veränderliche Austrocknungsgeschwindigkeit läßt bereits die große Schwierigkeit erkennen, den Trocknungsverlauf rechnerisch ausreichend genau zu beschreiben.

Da im allgemeinen mehrere Arten des Feuchtigkeitstransportes, zum Teil auch gleichzeitig, auftreten und Art, Anteil und Wirksamkeit der einzelnen Transportarten nicht nur vom Feuchtigkeitsgehalt, sondern auch wesentlich von der Porenstruktur des Baustoffes abhängen /G9/, ist eine getrennte Erfassung der einzelnen Transportarten kaum möglich. Ein Rechenverfahren zur Beschreibung des Austrocknungsverlaufes mit Hilfe eines Feuchteleitkoeffizienten, der den gesamten Feuchtigkeitstransport von flüssigen und dampfförmigen Wasser kennzeichnet, wurde in /K18/ entwickelt und beispielhaft für Gasbeton angewendet. Da jedoch bislang ausreichend genaue Feuchteleitkoeffizienten - sie müssen experimentell bestimmt werden - nicht vorliegen und bei anderen Rechenverfahren die Aussagesicherheit gering ist, erscheint eine vorteilhafte Anwendung der Rechenverfahren aus dem Betonbereich zur Bestimmung des Austrocknungsverlaufes bei Mauerwerk gegenwärtig nicht gegeben.

### 4.3 Feuchtedehnung und Austrocknungsverhalten von Mauermörtel, Mauersteinen und Mauerwerk

#### 4.3.1 Allgemeines

Nachfolgend werden nur die wesentlichsten Ergebnisse hinsichtlich Ursachen und Einflüsse auf die Feuchtedehnung und in Bezug auf das Austrocknungsverhalten angeführt. Die Darstellung und Auswertung der Versuchswerte aus der Literatur erfolgen in Abschnitt 6.

#### 4.3.2 Mauermörtel

Da sich Mörtel von Beton im wesentlichen nur durch das kleinere Größtkorn des Zuschlags unterscheidet, gelten grundsätzlich die Ausführungen in Abschnitt 4.2. Allerdings ist das Zementsteinvolumen bei Mörtel meist größer als bei Beton, so daß dadurch bedingt Mörtel im allgemeinen mehr als Beton schwindet. Darüberhinaus waren folgende Untersuchungsergebnisse bemerkenswert:

- Das Schwinden von Leichtmörtel kann, bedingt durch die wesentlich stärker verformbaren Leichtzuschläge, mehrfach so groß wie das Schwinden von Normalmörtel sein /K15, P1/.
- Das Karbonatisierungsschwinden kann je nach stofflicher Zusammensetzung und Lagerungsbedingungen sehr groß, unter dafür günstigen Bedingungen genau so groß wie das Schwinden sein /C17, H11, K15, K16/.
- Das Schwinden verringert sich infolge der abnehmenden Porosität deutlich mit zunehmender Verdichtung /I1/.
- Eine zunehmende Wasservorlagerung ergab zum Teil höheres /M8/, zum Teil geringeres /H19/ nachfolgendes Schwinden.
- Das Schwinden ist nach den meisten Untersuchungsergebnissen zumindest nach dem ersten Lagerungswechsel nicht vollständig umkehrbar. Der nicht umkehrbare Anteil lag bei 25 bzw. 40 % /A4, D6, H19/.



Hinsichtlich Zusammenhang zwischen Schwinden und Feuchtigkeitsabnahme ergab sich folgendes (Bild 4.2):

- Ein bestimmter anfänglicher Feuchtigkeitsverlust, der kein bzw. nur geringes Schwinden bewirkt, nimmt mit dem Anfangsfeuchtigkeitsgehalt zu. Erklärbar ist das dadurch, daß erst ab einer bestimmten Krümmung der Kapillarmenischen Schwinddehnungen auftreten. Da ein Mörtel mit größerem w/z-Wert einen höheren Anteil größerer Poren enthält, ist die kein Schwinden erzeugende Wasserabgabe größer als bei Mörteln mit geringerem w/z-Wert.
- Nach diesem Anfangsbereich ohne bzw. mit nur geringem Schwinden ergab sich überwiegend ein Bereich mit konstanter Schwindzunahme bei gleichem Feuchtigkeitsverlust /H11, M8, R6, I1/.
- Im Bereich niedriger Feuchtigkeitsgehalte (nahe der jeweiligen Ausgleichsfeuchtigkeit) steigt die Schwindzunahme meist überproportional mit weiterem Feuchtigkeitsverlust an /R6, I1, K16, L7, R7, L8/. Daß das Schwinden in Bild 4.2 im oberen Bereich der Schwindkurven mit zunehmender Prüfkörpermasse ansteigt, ist auf Karbonatisierungsschwinden zurückzuführen.

In Bezug auf den Zusammenhang zwischen Schwinden und relativer Luftfeuchtigkeit sind hauptsächlich zwei Bereiche -  $U < 40\%$  und  $U > 40\%$  - zu unterscheiden (s. auch Abschnitt 4.2.1). Für den letztgenannten Bereich ist nach /P8, R7, P9/ ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen  $\epsilon_s$  und  $-\ln U$  zu erwarten, da die Kapillarzugspannung des Restwassergehaltes proportional zu  $-\ln U$  ansteigt. Dies konnte jedoch nur zum Teil bestätigt werden, was darauf zurückzuführen sein dürfte, daß die Porenverteilung unberücksichtigt blieb.

### 4.3.3 Mauerziegel und Mauerwerk aus Mauerziegeln

#### 4.3.3.1 Formänderungen

Bei grobkeramischen Baustoffen wie Mauerziegeln sind im allgemeinen zwei feuchtigkeitsbedingte Formänderungsvorgänge zu unterscheiden:

- a) weitgehend reversibles Schwinden bzw. Quellen und
- b) das unter normalen Bedingungen irreversible chemische Quellen durch molekulare Bindung von flüssigem oder dampfkörnigem freiem Wasser.

Während der erstgenannte Vorgang wegen der in der Regel kleinen Formänderungen im Bereich von rd.  $\pm 0,1$  mm/m /B1, W2/ von untergeordnetem Interesse ist, kann das chemische Quellen zu sehr hohen Dehnungswerten führen und verdient deshalb besondere Aufmerksamkeit. Im folgenden wird aus diesem Grunde nur auf das chemische Quellen Bezug genommen.

#### 4.3.3.2 Ursachen des chemischen Quellens

Die unmittelbare Ursache für das chemische Quellen ist in der chemischen Reaktion des Wassers mit bestimmten hydratisierbaren Bestandteilen im keramischen Produkt zu suchen /H1, H2, V1, S1, W1, S2, L2/.

Als solche Bestandteile werden genannt:

Amorphe Silikate, Gläser und  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  aber auch dehydratisierte Tonminerale und andere hydratisierbare Stoffe.

In der Literaturlauswertung von /L2/ wird das chemische Quellen aber auch als ein Sorptionsvorgang dargestellt, der im wesentlichen von der spezifischen Oberfläche und der spezifischen Oberflächenenergie abhängt. Die an der Oberfläche der Silikate als Hauptbestandteil der keramischen Stoffe liegenden  $\text{Si}^{++}$  und  $\text{O}^-$ -Ionen ziehen Wassermoleküle an, so daß  $\text{Si-O}^-\text{H}$ - und dann

Si-O-H<sub>3</sub>O-Ionen gebildet werden (Chemisorption). Weiteres Wasser kann durch physikalische Bindungskräfte angelagert werden. Durch die Anlagerung von Gasphasen an der Oberfläche wird die Oberflächenenergie abgebaut, damit werden die zusammenhaltenden Oberflächenkräfte verringert, was zu einer Ausdehnung führt. Deren Größe wird von der Abnahme der Oberflächenenergie, der Zusammendrückbarkeit und der bedampfbaren inneren Oberfläche bestimmt. Da amorphes SiO<sub>2</sub> im Gegensatz zu kristallinen Phasen eine große spezifische Oberfläche und eine hohe Oberflächenenergie besitzt, beeinflusst es das chemische Quellen wesentlich. Der Glasanteil des Scherbens hat zwar zunächst eine geringe Oberfläche und Oberflächenenergie, diese vergrößern sich jedoch bei Wasserangriff infolge Hydrolyse.

#### 4.3.3.3 Einflüsse auf das chemische Quellen

Als wesentliche Einflußgrößen werden genannt:

- Die Rohstoffzusammensetzung, insbesondere der Kalkgehalt; mit dessen Zunahme verringert sich im allgemeinen das chemische Quellen /B1, C3, W1, S2, S29/, wobei offensichtlich die "Grenzbrenntemperatur", bei der maximales chemisches Quellen auftritt, mit dem Kalkgehalt zunimmt /S29/.
- Die Brenntemperatur; im allgemeinen nimmt das chemische Quellen mit Zunahme der Brenntemperatur ab /B1, W1, S2, S29/.
- Der Anteil an amorpher bzw. kristalliner Phase; mit zunehmendem Glasanteil erhöhte sich das chemische Quellen /V1, S2, W1/.
- Der Formgebungsvorgang; höheres chemisches Quellen wurde in Strangpressrichtung ermittelt, was auf die Ausrichtung der Mineralien zurückgeführt wird /B3, H3, W1/. Nach /S29/ kann höheres chemisches Quellen aber auch quer zur Strangpressrichtung auftreten.
- Die Lagerungsbedingungen; nach den nur lückenhaft vorliegenden Untersuchungsergebnissen tritt chemisches Quellen auch

bei Lagerung in Raumluft auf, es scheint bei höherem Feuchtigkeitsangebot größer zu sein /E1, H1, L1/.

- Die Porosität des Mauerziegels; mit deren Zunahme erhöhen sich Eindring- und Reaktionsgeschwindigkeit des Wassers und damit die Geschwindigkeit des chemischen Quellens /M2/. Dies konnte jedoch bei anderen Untersuchungen nicht bestätigt werden /B1, L2/.
- Die Lagerungsdauer; der zeitliche Verlauf des chemischen Quellens kann unterschiedlich sein. Es kann sehr schnell zunehmen und frühzeitig beendet sein, es kann aber auch über einen sehr langen Zeitraum mehr oder weniger stark zunehmen, meist mit  $\log t$  /C1, H2, M6, S29/. Unterschiede im zeitlichen Verlauf des chemischen Quellens an untersuchten verschiedenen hochgebrannten Steinguttonen werden wie folgt erklärt /L5, L6/:

Die schwachgebrannten Scherben besitzen hohe Anteile amorpher Reaktionsprodukte aus der Dehydratisierung der Tonminerale, die ihre freien Valenzen sehr schnell absättigen, so daß die Ausdehnung ebenfalls schnell abgeschlossen ist. Die hochgebrannten Scherben enthalten dagegen hauptsächlich Glasphase und kristalline Anteile. Die Oberfläche des energiereichen Glasanteils wird durch Auslaugung der Alkalien ständig größer und adsorptionsfähiger. Durch Bildung ständig neuer Adsorptionszentren bei weiterer Beanspruchung wird die Oberflächenenergie stetig abgebaut, die Ausdehnung nimmt zu. Bei nachfolgender Vakuumbehandlung unter gleichen Temperaturen zeigte sich, daß die Feuchtedehnung von hochgebrannten Scherben nicht reversibel ist, danach also ein großer Teil der Feuchtigkeit chemisorbiert ist. Bei niedrig gebrannten Scherben wurde eine zusätzliche Schwindung infolge physikalisch adsorbierten Wassers festgestellt.

#### 4.3.3.4 Austrocknungsverhalten

Ziegel trocknen wegen ihrer großen kapillaren Leitfähigkeit schnell aus. Die Ausgangsfeuchtigkeit vermindert sich deshalb relativ schnell und gleichmäßig über den Querschnitt, so daß eine nennenswert feuchtere Kernzone kaum auftritt. Nach /S4/ trocknen Lochziegel im Mauerwerk wahrscheinlich wegen des durch Lufträume unterbrochenen Querschnittes langsamer aus als Vollziegel.

Die vergleichsweise zu anderen Mauersteinen geringe Gleichgewichtsfeuchtigkeit wird von /K9/ auf die relativ großen Porendurchmesser von ca. 1000 nm zurückgeführt, da bei diesen keine Wasseraufnahme durch Kapillarkondensation auftritt.

#### 4.3.4 Kalksandsteine und Mauerwerk aus Kalksandsteinen

##### 4.3.4.1 Ursachen der Feuchtedehnung

Kalksandstein ist wie Beton bzw. Mörtel ein 2-Phasen-Stoff. Die beiden Phasen - Bindemittel und Zuschlag - sind denen von Beton bzw. Mörtel grundsätzlich ähnlich. So sind die "Festigkeits-träger" in beiden Fällen CSH-Verbindungen mit jedoch im allgemeinen unterschiedlicher Zusammensetzung und physikalischer Struktur. Allerdings ist beim Kalksandstein von einer festeren Einbindung des Zuschlags in die Bindemittelmatrix auszugehen. Wegen der grundsätzlichen stofflichen Ähnlichkeit dürften auch die heutigen Vorstellungen über die Schwindursachen bei Beton bzw. Mörtel für Kalksandstein zutreffen (s. Abschnitt 4.2.1).

Neben dem Schwinden kann wie bei Beton bzw. Mörtel Karbonatisierungsschwinden durch Karbonatisierung von freiem  $\text{Ca(OH)}_2$  und CSH-Verbindungen auftreten.

#### 4.3.4.2 Einflüsse auf die Feuchtedehnung

- Die Kornzusammensetzung des Sandes; meist erhöhte sich das Schwinden mit zunehmendem Feinkornanteil ( $< 0,1$  bis  $0,15$  mm), offenbar jedoch nur bis zu einem bestimmten Feinkornanteil, der unterschiedlich groß ermittelt wurde /C4, H6, P2, P3, T2/.
- Der Anteil der CSH-Reaktionsprodukte; mit dessen Zunahme nahm im allgemeinen auch das Schwinden zu /C4, P2, P3/.
- Der Anteil an Feinporen ( $< 0,1$  mm); mit dessen Zunahme vergrößerte sich das Schwinden /H6/.
- Die Härtedauer und der Härtedruck; das Schwinden erhöhte sich im allgemeinen mit Zunahme von Härtedauer und -druck bis zu einem Maximum und verringerte sich danach wieder /C5, K14, P3/.
- Die Art der gebildeten Reaktionsprodukte; das Auftreten von Tobermorit war mit hohen, die nachfolgende Bildung von Xonotlit mit niedrigen Schwinddehnungen verbunden /K14/.
- Wegen der geringen Nacherhärtung wird eine schwindverhindernde Vorlagerung das nachfolgende Schwinden kaum beeinflussen.
- Das Karbonatisierungsschwinden kann sehr hoch sein. Bei künstlicher Karbonatisierung war das Karbonatisierungsschwinden um ein mehrfaches größer als das Trocknungsschwinden. Das Schwinden karbonatisierter Proben war deutlich höher als das vor der Karbonatisierung. Es trat eine fast vollständige Karbonatisierung des Kalziumanteils verbunden mit deutlich verringerter Permeabilität auf /B4/.
- Das Schwinden ist ohne Karbonatisierungseinfluß vollständig umkehrbar /B4, P4/.

#### 4.3.4.3 Austrocknungsverhalten

Als Grenzwert für kapillaren Flüssigkeitstransport und Wasserdampfdiffusion wird in /G11/ ein Porendurchmesser von 6  $\mu\text{m}$  angegeben, bei dessen Unterschreiten Flüssigkeitstransport praktisch nur noch durch Wasserdampfdiffusion stattfinden kann. Über einem Feuchtigkeitsgehalt von etwa 10 Vol.-% steigt das kapillare Leitvermögen stark an /C20/.

#### 4.3.5 Beton- und Leichtbetonsteine und Mauerwerk aus Beton- und Leichtbetonsteinen

##### 4.3.5.1 Ursachen der Feuchtedehnung

Wegen der Stoffgleichheit gelten die Schwindtheorien für Beton (s. Abschnitt 2.4.1).

Unterschiede ergaben sich in Größe und Umkehrbarkeit des Schwindens zwischen autoklav- und nicht autoklavbehandelten Steinen. Dies ist nach /K8/ offensichtlich auf den unterschiedlichen Gehalt an Zwischenschichtwasser bzw. auf die unterschiedlichen Reaktionsprodukte zurückzuführen. Autoklavbehandelte Steine enthielten nur 70 % des Zwischenschichtwassers nicht autoklavbehandelter Steine. Dies steht offenbar im Zusammenhang mit der Art der gebildeten Reaktionsprodukte. So enthalten Tobermorit-Kristalle viel, Xonotlit-Kristalle dagegen kaum Zwischenschichtwasser /K8/. Daraus erklärt sich das im allgemeinen deutlich geringere Schwinden autoklavbehandelter Steine und vermutlich auch deren höherer umkehrbarer Schwindanteil.

##### 4.3.5.2 Einflüsse auf die Feuchtedehnung

Wegen der Stoffgleichheit sind grundsätzlich die gleichen Einflüsse wie bei Beton wirksam (s. Abschnitt 4.2.2).

Literaturergebnisse zu folgenden Einflußgrößen erscheinen erwähnenswert:

- Die Vorbehandlung der Steine vor dem Ausliefern; nennenswert unterschiedliches Schwinden von warm- und nicht warmbehandelten Steinen ergab sich im allgemeinen nicht. Bei warmbehandelten Steinen wurde zum Teil ein anfängliches Quellen festgestellt /T3, K7, S14/. Autoklavbehandelte Steine schwanden deutlich weniger als anders behandelte Steine /K7, C16/.
- Die Feuchtigkeit des Leichtzuschlags beim Herstellen des Betons; das Schwinden von Beton mit feuchtem bis nassem Zuschlag ist anfangs wesentlich geringer. Dies ist darauf zurückzuführen, daß zunächst ständig Wasser aus dem Zuschlag an den Zementstein und erst von diesem nach außen abgegeben wird. Dadurch werden dessen Austrocknung und Schwinden verzögert, seine Dichtigkeit wird durch fortgesetzte Hydratation größer. Die Schwindkurve verläuft gestreckter mit deutlicher Schwindzunahme auch nach größerer Schwinddauer. Die Endwerte sind meist größer als bei Verwendung von trockenem bzw. wenig feuchtem Zuschlag /H9, R4/.
- Das Karbonatisierungsschwinden; es kann vor allem bei nicht autoklavbehandelten Steinen erheblich sein, zum Teil war es doppelt so groß wie das Trocknungsschwinden. Bei autoklavbehandelten Steinen war das Karbonatisierungsschwinden im allgemeinen deutlich geringer. Es nahm allerdings bei höherer Luftfeuchtigkeit (über 50 %) erheblich zu. Dies wird darauf zurückgeführt, daß die Kristallstruktur autoklavbehandelter Steine gröber, dadurch die Gleichgewichtsfeuchtigkeit geringer als bei nicht autoklavbehandelten Steinen ist und sich deshalb optimale Karbonatisierungsverhältnisse erst bei höherer relativer Luftfeuchtigkeit ergeben /K6, S15/.
- Nach dem ersten Schwind-Quell-Wechsel ergab sich im allgemeinen ein nennenswerter nicht umkehrbarer Schwindanteil /T3, K7, S14, E2/.
- Bei Feuchtlagerung bzw. Lagerung von abgedichteten Proben aus Beton mit Leichtzuschlag in Raumluft trat ein erhebliches Quellen auf, welches mit dem Zementsteingehalt zunahm /R3, W3/.



In Bezug auf den Zusammenhang zwischen Schwinden und Feuchtigkeitsabnahme ergab sich folgendes:

- Ein bestimmter anfänglicher Feuchtigkeitsverlust ruft kein bzw. nur geringes Schwinden hervor /K7, M4, R4, S14, T3/. Der Feuchtigkeitsgehalt, bei dessen Unterschreiten nennenswertes Schwinden auftritt, kann bei Steinen aus Naturbimszuschlag bezogen auf den Steinscherben zu etwa 10 Vol.-% angesetzt werden /K7, T3/.

#### 4.3.5.3 Austrocknungsverhalten

Bei Naturbimszuschlag erfolgt die Austrocknung wegen des geringen Kapillarporenanteils praktisch nur durch Wasserdampfdiffusion /S4/. Für Beton mit Naturbimszuschlag wurde deshalb ein gegenüber Mauerziegeln und Kalksandsteinen sehr viel kleinerer Kapillarleitkoeffizient ermittelt /C20/. Der Grenzfeuchtigkeitsgehalt zwischen anfänglich schneller und der nachfolgend sehr viel langsameren Feuchtigkeitsabgabe ergab sich zu etwa 15 Vol.-% /T4/.

Die Austrocknungsdauer von Mauerwerkswänden aus Betonsteinen mit Naturbimszuschlag bis zur Gleichgewichtsfeuchtigkeit wird von /N3/ mit 2 Jahren, bei geringen Steinrohddichten noch darunter angegeben. Bei anderen Untersuchungen /S13/ war die Austrocknungsdauer deutlich größer.

Untersuchungen an Wänden aus haufwerkporigem Beton mit Blähtonzuschlag /K10/ - Betonrohddichte 800 bis 1000 kg/m<sup>3</sup> - ergaben eine Austrocknungsdauer wie bei anderen Baustoffen bei einer Gleichgewichtsfeuchtigkeit von maximal rd. 5 Vol.-%. Gefügedichte Blähtonbetone mit höherer Rohddichte trockneten dagegen sehr viel langsamer aus, die Feuchtigkeitsverteilung über den Wandquerschnitt war sehr ungleichmäßig, die zu erwartende Gleichgewichtsfeuchtigkeit mit ca. 13 Vol.-% sehr hoch. Dies wird im wesentlichen auf den hohen Diffusionswiderstand ( $\mu = 50...75$ ) dieser dichten Blähtonbetone zurückgeführt.

#### 4.3.6 Gasbetonsteine und Mauerwerk aus Gasbetonsteinen

Spezielle Literatur dazu wurde nicht ermittelt. Wegen der stofflichen Analogie wird auf die Abschnitte 4.2.1 und 4.3.4.1 verwiesen.

##### 4.3.6.2 Einflüsse auf die Feuchtedehnung

Wegen der grundsätzlichen stofflichen Ähnlichkeit zum Beton bzw. besser zum Mörtel und hinsichtlich des Erhärtungsvorganges zum Kalksandstein ist davon auszugehen, daß die dort genannten Einflußgrößen (s. Abschnitte 4.3.4.2 und 4.3.5.2) auch auf die Feuchtedehnung des Gasbetons wirksam sind.

Darüber hinaus wurden folgende zusätzliche oder andersartige Einflüsse ermittelt:

- Der Härtedruck; mit dessen Zunahme verringerte sich das Schwinden /C7, G12/.
- Die Härtezeit; nach einer bestimmten, von der Rohstoffzusammensetzung abhängigen Härtezeit trat ein Schwindminimum auf /C7/.
- Die Reaktionsprodukte; vermutlich tritt das Schwindmaximum bei Bildung von CSH I (C: CaO, S: SiO<sub>2</sub>, H: H<sub>2</sub>O, bei CSH I ist C/S etwa 0,8 bis 1,0), das Schwindminimum bei der nachfolgenden Bildung von Tobermorit auf. Offensichtlich besteht ein Zusammenhang zwischen Schwinden und Kristallinität (Anteil von Tobermorit). Mit deren Zunahme verringerte sich das Schwinden /C7, A8/.
- Die Art des Bindemittels; hierzu liegen gegenteilige Versuchsergebnisse vor. Gasbetone mit Kalk schwanden mehr als solche mit Zement und umgekehrt /S10, M3/.

- In Bezug auf das Karbonatisierungsschwinden liegen kaum Untersuchungsergebnisse vor. In /M3/ wird es zu 75 % des Trocknungsschwindens angesetzt.
- Das Schwinden ist nach dem ersten Schwind-Quell-Wechsel offenbar nicht vollständig umkehrbar /K6/. Der nicht umkehrbare Schwindanteil war 20 bis 30 %.

Hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen Schwinden und Feuchtigkeitsabnahme ergab sich folgendes:

- Im Bereich hoher Feuchtigkeit - etwa über 20 Vol.-% - tritt bei Feuchtigkeitsverlust nur relativ geringes Schwinden auf, was mit dem relativ hohen Anteil großer, weitgehend schwindunwirksamer Poren erklärt werden kann /D5, G1, G3, G4/. Wesentliches Schwinden tritt erst auf, wenn ein Feuchtigkeitsgehalt von etwa 10 Vol.-% unterschritten wird. Das Schwinden nimmt stark zu bei Feuchtigkeitsabnahme im Bereich kleiner Feuchtigkeitsgehalte (etwa < 3 bis 8 Vol.-%) /G1, D5, G4, D3/.

#### 4.3.6.3 Austrocknungsverhalten

Der kritische Feuchtigkeitsgehalt unter dem kein nennenswerter kapillarer Feuchtigkeitstransport mehr stattfindet, liegt bei etwa 15 bis 20 Vol.-%. Er ist relativ hoch und führt bei Austrocknung zu größeren Feuchtigkeitsunterschieden über die Bauteildicke /F4, K5, C20/. Die Herstellfeuchtigkeit von Gasbeton wird zu etwa 15 bis 20 Vol.-% angegeben /C19, K5/.

## 5. UNTERSUCHUNGEN ZUR FEUCHTEDEHNUNG VON MAUERMÖRTEL, MAUERSTEINEN UND MAUERWERK

### 5.1 Allgemeines

Im folgenden wird in zusammengefaßter Form nur auf Zielsetzung und Versuchsdurchführung der drei wesentlichen Forschungsvor-

haben eingegangen. Ansonsten wird auf die entsprechenden Versuchsberichte verwiesen. Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt in Abschnitt 6.

## 5.2 Forschungsvorhaben "Kriech- und Schwindversuche an Mauerwerk F 62" /S26/

Ziel des Forschungsvorhabens war es, neben Kriechuntersuchungen

- fehlende Endschwindwerte von Mauerwerk zu ermitteln und fragliche Werte abzusichern,
- den Einfluß der Prüfkörpergröße in Hinblick auf die Anwendbarkeit kleinerer Prüfkörper zu untersuchen und
- den Einfluß des Schwindens von Mörtel und Stein auf das Schwinden von Mauerwerk zu untersuchen.

Das Versuchsprogramm sah Schwindversuche an Mauerwerk aus Kalksandsteinen, Mauerziegeln, Gasbetonsteinen sowie Leichtbeton- und Betonsteinen, an Einzelsteinen dieser Steinsorten sowie an Mörtelprüfkörpern vor. Die Mauerwerkprüfkörper waren Wände, Pfeiler aus 7 aufeinander gemauerten Steinen sowie Pfeiler im Verband mit jeweils 2 Steinen je Schicht. Die Schwinddehnungen wurden bei den Mauerwerkprüfkörpern senkrecht zu den Lagerfugen im Stein- und im Stein-Fugenbereich sowie zusätzlich bei den Wänden parallel zu den Lagerfugen im Stein-Fugenbereich, bei den Einzelsteinen in Richtung Steinhöhe und -länge auf der Steinoberfläche, zum Teil auch in Richtung Steinlängsachse ermittelt. Bei den Mörtelprüfkörpern (Prismen 160 mm · 40 mm · 40 mm) wurde das Schwinden in Längsrichtung auf der Oberfläche und in Prismenachse bestimmt. Die Prüfkörperzahl betrug im allgemeinen jeweils 3. Als Vorbehandlung der Steine vor dem Vermauern wurde eine 48-stündige Wasserlagerung und eine anschließende 24-stündige Lagerung im Normalklima 22/55 gewählt. Die Einzelsteine wurden ebenfalls 48 h in Wasser vorgelagert. Die Mörtelprüfkörper wurden bis zum Alter von 7 d feucht gelagert. Nach der jeweiligen Vorlagerung lagerten alle

Prüfkörper im Normalklima 20/65, die Einzelsteine aus technischen und organisatorischen Gründen im Klima 20/30, die hinsichtlich des Wasserdampfteildruckes annähernd einem Klima 20/65 entspricht. Die Nullmessungen erfolgten bei den Mauerwerkprüfkörpern in der Regel im Alter von 3 bis 5 d, ansonsten unmittelbar nach der Vorlagerung. Die Versuchsdauer betrug rd. 2,5 bis 4 Jahre. Pfeilerprüfkörper, Einzelsteine und Mörtelprüfkörper wurden außerdem in bestimmten Zeitabständen gewogen, um den Austrocknungsverlauf zu bestimmen und den Zusammenhang zwischen Schwinden und Feuchtigkeitsverlust zu untersuchen. Die untersuchten Steinsorten und Mörtelgruppen sind zusammen mit der Prüfkörperart in der Tabelle 5.1 angegeben.

Eingangswerte für die hier vorgenommene Auswertung waren Mittelwerte aller gleichartigen Meßstrecken von allen im allgemeinen 3 gleichen Prüfkörpern (3 bis 18 Einzelwerte).

### 5.3 Forschungsvorhaben "Entwicklung eines Schwindprüfverfahrens zur Ermittlung des Schwindendwertes von Wandbausteinen F 74" /S7/

Für Kalksandsteine, Gasbetonsteine und Betonsteine sollte ein einfaches, gut reproduzierbares Schwindkurzprüfverfahren erarbeitet werden, dessen Versuchswerte sich in einen zufriedenstellenden Zusammenhang zu den unter Praxisbedingungen zu erwartenden Schwinddehnungen bringen lassen. Es wurden Kalksandsteine, Gasbetonsteine, Leichtbeton- und Betonsteine verschiedener Festigkeitsklassen und zum Teil mit unterschiedlichen Zuschlägen geprüft. In der Tabelle 5.2 sind die untersuchten Steinsorten angegeben. Die Steine wurden vor der Lagerung im Schwindklima 20/30 48 h in Wasser gelagert. Nach der Schwindlagerung wurden sie bei +105 °C zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend im Normalklima 20/65 gelagert, um Aussagen über den unkehrbaren Schwindanteil, die Möglichkeit eines Kurzprüfverfahrens mit Ausgangstrocknung und die Relation zwischen Schwinden im Klima

20/30 und im Klima 20/65 zu erhalten. Ermittelt wurden die Schwinddehnungen in Richtung Steinlänge, -höhe, -breite sowohl an der Steinoberfläche als auch in der jeweiligen Steinachse und der Feuchtigkeitsgehalt in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer. Geprüft wurden jeweils 5 Steine. Eingangswerte für die hier vorgenommene Auswertung waren die Mittelwerte gleichartiger Meßstrecken der jeweils 5 Steine.

#### 5.4 Tastversuche zum Einfluß der relativen Luftfeuchte und der Karbonatisierung auf das Schwinden V 156 /I6/

Wesentliches Ziel der Tastversuche war es, das Karbonatisierungsschwinden von Gasbeton und Kalksandsteinen bei verschiedenen Lagerungen zu untersuchen.

Die Tabelle 5.3 gibt eine Übersicht über das Versuchsprogramm. Je Prüfserie wurden 3 Prüfkörper untersucht. Außer den Schwinddehnungen wurden der Feuchtigkeitsgehalt der Prüfkörper und die Karbonatisierungstiefe in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer bestimmt. Die Prüfdauer betrug für die 1. Lagerung 10 bis 18 Monate, für die 2. Lagerung rd. 8 Monate. Eingangswerte für die hier vorgenommene Auswertung der Versuchsergebnisse waren die Mittelwerte der jeweils 3 gleichen Prüfkörper.

#### 5.5 Andere Schwindversuche

Dabei handelt es sich um:

- Schwindversuche an Mauerwerkswänden und -pfeilern aus hochfesten Kalksandsteinen, bei denen die Steine wie in Abschnitt 5.2 vorbehandelt wurden /I2/
- Schwindversuche an verschiedenen Kalksandsteinen /I8, I9, I10, I12/
- Schwindversuche an Mauerwerk aus Gasbetonsteinen /I14/
- Schwindversuche an Mauerziegeln /I3, I13/

- Versuche zur Bestimmung der Feuchtedehnung von Mauerwerk aus Leichtziegeln und den entsprechenden Einzelsteinen, wobei die Steine unterschiedlich vorgelagert wurden: a) 48 h Wasser und 24 h im Klima 20/65, b) getrocknet bis zur Massekonstanz und c) gelagert bis zu etwa 5 Vol.-% Feuchtigkeit. Ermittelt wurden die Feuchtedehnungen und der Feuchtigkeitsverlust der Mauerwerkprüfkörper bzw. der Feuchtigkeitsgehalt der Einzelsteine. Bei diesen wurden die Feuchtedehnungen für verschiedene Meßstellen wie in Abschnitt 5.2 bestimmt. Die Hauptlagerung erfolgte im Klima 20/65 /I4/.
- Schwindversuche an Mauerwerk aus verschiedenen Leichtbetonsteinen mit Naturbimszuschlag und an den entsprechenden Einzelsteinen. Die Steine wurden 48 h in Wasser und danach 24 h im Klima 20/65 sowie bis zu einem Feuchtigkeitsgehalt von etwa 10 Vol.-% vorgelagert. Ermittelt wurden die Schwinddehnungen und der Feuchtigkeitsverlust der Mauerwerkprüfkörper bzw. der Feuchtigkeitsgehalt der Einzelsteine. Bei diesen wurden die Schwinddehnungen für verschiedene Meßstellen wie in Abschnitt 5.2 bestimmt. Die Hauptlagerung erfolgte im Klima 20/65 /I5, I7/.

Weitere Angaben zur Versuchsdurchführung sind dem jeweiligen Versuchsbericht zu entnehmen. Eingangsdaten für die hier vorgenommene Auswertung waren stets die Mittelwerte der im allgemeinen jeweils 3 gleichen Prüfkörper.

## 6. AUSWERTUNG DER LITERATURERGEBNISSE UND DER UNTERSUCHUNGEN ZUR FEUCHTEDEHNUNG

### 6.1 Austrocknungsverhalten

#### 6.1.1 Allgemeines zur Auswertung

Nach Abschnitt 2.1 soll u. a. versucht werden, das Schwinden feuchtigkeitsbezogen darzustellen. Der Endschwindwert kann dann aus Anfangs- und Endfeuchtigkeitsgehalt (Gleichgewichtsfeuchte)

bestimmt werden. Eine Voraussetzung für diese Verfahrensweise ist somit die Kenntnis der Gleichgewichtsfeuchte bei verschiedenem Klima. Bei der Auswertung zum Austrocknungsverhalten wurden deshalb Gleichgewichtsfeuchten im wesentlichen in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte ermittelt. In den Fällen, wo der Feuchtigkeitsgehalt in Abhängigkeit von der Austrocknungsdauer bestimmt worden war, wurde die Gleichgewichtsfeuchte aus dem Austrocknungsverlauf errechnet. Dieser mußte deshalb zunächst durch einen geeigneten mathematischen Ansatz beschrieben werden. Untersucht wurden die folgenden Ansätze:

$$h(t) = \frac{t}{B \cdot t + C} \quad (6.1)$$

$$h(t) = \frac{t + A}{B \cdot t + C} \quad (6.2)$$

mit  $h_{\infty} = 1/B$

und

$$h(t) = A (1 - e^{-B \cdot t}) + h_0 \quad (6.3)$$

$$h(t) = A (1 - e^{-B \cdot t^C}) + h_0 \quad (6.4)$$

mit  $h_{\infty} = h_0 - A$ ;  $h_0$ : Anfangsfeuchtigkeitsgehalt.

Kriterien für die Wahl eines geeigneten Ansatzes waren

- bestmögliche Anpassung an die Prüfwerte;  
Beurteilung durch die Regression

$$\text{obs } h(t) = a + b \cdot \text{cal } h(t) \quad (6.5)$$

mit obs  $h(t)$ : Prüfwerte (gemessen)

cal  $h(t)$ : Aus der Ausgleichskurve für gleiches  $t$  errechneter Wert (gerechnet)

Bestmögliche Anpassung:  $a = 0$ ,  $b = 1$ .

- Anwendbarkeit eines Ansatzes für alle Auswertegruppen (Mörtel, Steine, Mauerwerk)
- möglichst geringe Anzahl von Parametern.



Sämtliche Ansätze wurden mit allen vorliegenden Versuchsergebnissen getestet. Die Parameter wurden durch Ausgleichsrechnung im linearen System ermittelt.

Mit den zweiparametrischen Ansätzen (6.1) und (6.3) konnte nur ein Teil der vorliegenden Untersuchungsergebnisse befriedigend genau beschrieben werden. Durch den auf 3 Parameter erweiterten Ansatz (6.2) ließ sich der Anteil der gut beschreibbaren Versuchsergebnisse zwar deutlich erhöhen, der verbleibende nicht ausreichend beschreibbare Anteil erschien jedoch noch zu groß. Zudem ist der Ansatz im Hinblick auf eine Vorabschätzung der Parameter sehr empfindlich.

Am besten erfüllte der Ansatz (6.4) die angegebenen Kriterien. Mit ihm ließen sich alle in Betracht kommenden Versuchsserien sehr gut beschreiben. Die Parameter der Gleichung (6.5) lagen bis auf wenige Ausnahmefälle in den Bereichen:

$$\begin{aligned} - 0,02 &\leq a \leq + 0,02 \\ 0,98 &\leq b \leq 1,02. \end{aligned}$$

Zusätzlich zur Gleichgewichtsfeuchte wurden die Halbwertzeit  $t_h$  und die Mindestversuchsdauer  $\min t$  zur Bestimmung von  $h_\infty$  errechnet. Der Kennwert  $\min t$  wurde ermittelt, indem von Versuchsbeginn an mit dem Ansatz 6.4 unter schrittweiser Hinzunahme eines weiteren (späteren) Prüfwertes  $h'_\infty$  bestimmt wurde, bis die Bedingung

$$\left| \frac{h'_\infty - h_\infty}{h_\infty} \right| \leq 0,10$$

erfüllt war, d. h. der für  $\min t$  errechnete "Endwert  $h'_\infty$ " höchstens um  $\pm 10\%$  vom mit allen Versuchswerten berechneten Endwert  $h_\infty$  abwich. Dabei wurde  $\pm 10\%$  Abweichung vom Endwert als tolerierbar angesehen und notwendigerweise vorausgesetzt, daß der mit allen Versuchswerten errechnete Endwert sich bei weiter verlängerter Versuchsdauer nicht nennenswert verändert

hätte, d. h. praktisch dem "wahren" Endwert entspricht. Die Aussagekraft von  $\min t$  wird somit von der Versuchsdauer beeinflusst.

Der Austrocknungsverlauf wurde auf den rechnerischen Endwert  $h_{\infty}$  bezogen in der Form

$$\alpha_h = \frac{h_0 - h(t)}{h_0 - h_{\infty}}$$

dargestellt.

Die errechneten Werte  $h_v$ ,  $\min t$ ,  $t_h$  und die Parameter der Gleichungen 6.4 und 6.5 wurden tabelliert und in einem gesonderten, hier nicht beigefügten Anhang zusammengestellt.

#### 6.1.2 Einfluß der Karbonatisierung auf die ermittelten Feuchtigkeitsgehalte

Bei der Karbonatisierung von Mörteln, Beton-, Gasbeton- und Kalksandsteinen reagiert die Luftkohlendure mit den kalkhaltigen Verbindungen. Dadurch ergibt sich in der Regel eine Massezunahme. Diese ist bei der Reaktion mit  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow$ , selbst wenn die entstehenden 2 Moleküle Wasser an die Außenluft abgegeben werden, nennenswert. Für einen Mörtel der Gruppe III nach DIN 1053 Teil 1 mit Portlandzement ergibt sich eine Massezunahme von rd. 1 % unter der Annahme, daß 20 %  $\text{Ca(OH)}_2$ , bezogen auf die Zementmasse, entstehen, diese vollständig karbonatisiert werden und die entstehenden 2 Moleküle Wasser abgegeben werden. Werden am Ende der Trocknungsdauer die Trockenmasse und mit dieser dann die jeweiligen Feuchtigkeitsgehalte aus

$$h_v = \frac{m(t) - m_d}{V} \cdot 100 \quad (\text{Vol.-%})$$

bestimmt, so ergibt sich für Zeitpunkte vor einer nennenswerten Karbonatisierung rechnerisch ein zu niedriger Feuchtigkeitsgehalt, im angegebenen Beispiel um ca. 2 Vol.-%.

Mit fortschreitender Karbonatisierung vergrößert sich  $m(t)$  und dadurch rechnerisch  $h_v$ . Einen derartig beeinflussten Austrocknungsverlauf zeigt Bild 6.1.

Wie sich die Karbonatisierung auf die Gleichgewichtsfeuchte auswirkt, hängt davon ab, welcher Anteil des durch die Karbonatisierung entstehenden Wassers bei den jeweiligen Austrocknungsbedingungen abgegeben werden kann. Verbleiben die bei der Karbonatisierung entstehenden 2 Moleküle Wasser bis zum Gleichgewichtszustand im Mörtel und wird davon ausgegangen, daß sie beim Trocknen abgegeben werden, so ergibt sich in diesem Falle eine höhere Gleichgewichtsfeuchtigkeit als ohne Karbonatisierung. Wird vor Versuchsbeginn die Trockenmasse des noch nicht karbonatisierten Prüfkörpers bestimmt, anschließend wassergelagert und danach ausgetrocknet, so ergeben sich infolge Karbonatisierung rechnerisch ein zu hoher Feuchtigkeitsgehalt und eine zu hohe Gleichgewichtsfeuchte.

Da dieser Einfluß der Karbonatisierung im allgemeinen nicht beachtet wird und auch schwer zu berücksichtigen ist, kann nicht ausgeschlossen werden, daß in Einzelfällen die zeitliche Änderung des Feuchtegehaltes und die Gleichgewichtsfeuchte nennenswert durch den Karbonatisierungsvorgang beeinflusst worden sind.

Die im folgenden angegebenen Auswerteergebnisse können somit mit zum Teil beträchtlichen Unsicherheiten behaftet sein.

### 6.1.3 Mörtel

Die errechneten Werte  $h_{v\infty}$ ,  $\min t$ ,  $t_h$  und die Parameter der Gleichungen 6.4 und 6.5 enthält ein hier nicht beigefügter Anhang.

### 6.1.3.1 Gleichgewichtsfeuchte

Die ermittelten Gleichgewichtsfeuchten von Mörtelprüfkörpern und die Feuchtigkeitsgehalte von Mörteln im Mauerwerk bei Desorption wurden in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und der Mörtelgruppe getrennt nach in- und ausländischen Quellen statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse enthält die Tabelle 6.1. Sie sind in Bild 6.2 dargestellt. Wie die Tabelle und das Bild zeigen, unterscheiden sich die Gleichgewichtsfeuchten für die Mörtel der Gruppen II und IIa aus deutschen und ausländischen Untersuchungen nicht wesentlich, so daß eine gemeinsame Auswertung gerechtfertigt erscheint. In der Regel deutlich höher sind die Feuchtigkeitsgehalte - bei jeweils gleicher relativer Luftfeuchtigkeit - für Mörtel der Gruppen III und IIIa. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, daß diese Mörtel einen größeren Anteil feiner Poren enthalten als die Mörtel der Gruppen II und IIa. Für relative Luftfeuchten von 45 und 65 %, die in etwa dem Luftfeuchtebereich in bewohnten Gebäuden entsprechen, ergaben sich die folgenden  $h_{\infty}$ -Werte in Vol.-%:

Versuche aus	MG	U = 45 %		U = 65 %	
		Einzel- gruppe	$h_{\infty} = a+b \cdot U$	Einzel- gruppe	$h_{\infty} = a+b \cdot U$
D	II, IIa	1,5	1,4	1,6	2,0
Ausland			1,6		2,3
D	III, IIIa	3,6	2,6	5,2	3,6
Ausland			4,3		6,3

Als Rechenwerte für die Gleichgewichtsfeuchte werden unter Berücksichtigung der großen Streuungen, der zum Teil nur wenigen Versuchswerte und unter Bezug auf die deutschen Versuchsergebnisse vorgeschlagen:

MG	U = 45 %	U = 65 %
II, IIa	1,5	2,0
III, IIIa	2,5	3,5

Wie aus Tabelle 6.1 zu ersehen ist, ist der Vertrauensbereich für diese Mittelwerte, d. h. ihr möglicher Schwankungsbereich bezogen auf den Mittelwert der Grundgesamtheit  $\mu$ , relativ groß. Als unterer Grenzwert für  $\mu$  ergibt sich in etwa  $\mu_u = h_{v_\infty} - 1,0$ . Dieser Wert wäre ggf. bei höheren Sicherheitsanforderungen anzusetzen.

Für Mörtel der Gruppe II im Mauerwerk ergab sich bei U = 65 % ein mittlerer  $h_{v_\infty}$ -Wert von rd. 1,4 Vol.-% für Mauerwerk aus Mauerziegeln und von rd. 2,0 Vol.-% für Mauerwerk aus nichtkeramischen Mauersteinen (s. Tabelle 6.1). Diese  $h_{v_\infty}$ -Werte für Mörtel im Mauerwerk entsprechen etwa denen der Mörtelprüfkörper. Der Mörtel im Kernbereich von Mauerwerk weist jedoch vor allem bei Mauerwerk aus nichtkeramischen Steinen einen deutlich höheren Feuchtigkeitsgehalt auf (s. Tabelle 6.2). Dies könnte u. a. dadurch bedingt sein, daß im Kernbereich eines Mauerwerkbauteils über längere Zeit genügend Feuchtigkeit für eine lang andauernde Nacherhärtung vorhanden ist und daraus resultierend ein größerer Anteil feiner Poren entsteht, die bei den hier betrachteten Luftfeuchten nicht entwässerbar sind. Der Einfluß der Nacherhärtung auf die Porenverteilung kann nach /R10/ erheblich sein. Der Anteil der bei U = 65 % wassergefüllten Poren mit  $r \leq 2$  nm ergab sich dort für einen Zementmörtel, der 2 d in Wasser und 258 d im Klima 20/60 lagerte, zu etwa 1,6 Vol.-%, bei 360-tägiger Wasserlagerung zu etwa 4,3 Vol.-%. Die Porenverteilung ist in Bild 6.3 dargestellt.

Angaben über den Feuchtigkeitsgehalt von Mörtel in Außenwänden bewohnter Gebäude finden sich in /S17/. Die dort untersuchten

Mörtel aus Mauerwerk mit Kalksandsteinen, Mauerziegeln und Schlackensteinen hatten einen mittleren Feuchtigkeitsgehalt von 1,2 bis 1,8 Vol.-%. Ein Einfluß der Mauersteinart auf  $h_v$  des Mörtels war nach /S17/ nicht erkennbar. Die ermittelten  $h_v$ -Werte sind im Vergleich zu denen der Mörtelprüfkörper und denen von Mörtel in Mauerwerk bei  $U = 65 \%$  niedriger. Sie würden den  $h_{v\infty}$ -Werten für Mörtelprüfkörper im Bereich  $U = 45$  bis  $65 \%$  entsprechen.

Bei der Bewertung der vorliegenden Ergebnisse aus der Literatur und aus den durchgeführten Versuchen ist zu beachten, daß die Porosität und Gleichgewichtsfeuchte des Mörtels im Mauerwerk wesentlich vom Austrocknungsverhalten der Mauersteine und den Bauteilabmessungen beeinflußt werden können. Dadurch kann die Gleichgewichtsfeuchte des Mörtels im Rand- und Kernbereich des Mauerwerkbauteils unterschiedlich hoch sein. Da Angaben über die Probenahmestelle meist nicht vorliegen, ergibt sich allein daraus ein erheblicher möglicher Schwankungsbereich der Versuchswerte.

Prüfungen des Feuchtigkeitsgehaltes von Lagerfugenmörtel in Mauerwerkswänden und -pfeilern, die rd. 4 Jahre im Klima 20/65 lagerten /S26/, ergaben zum Teil deutlich höhere  $h_v$ -Werte für den Kernbereich als im Randbereich. Die mittleren  $h_v$ -Werte sind im Bild 6.4 mit dargestellt. Sie liegen für den Randbereich bis auf eine Ausnahme zwischen 0,9 und 2,0 Vol.-%. Der Mittelwert beträgt 1,5 Vol.-%. Im Kernbereich war  $h_v = 1,2$  bis  $4,8$  Vol.-%. Vor allem bei Mauerwerk aus Gasbeton- und Betonsteinen unterscheiden sich die  $h_v$ -Werte für Rand- und Kernbereich erheblich, wenn Steine höherer Festigkeitsklasse bzw. größerer Dichtigkeit (G6, V6, Hb14, Hbn6) verwendet wurden, da diese langsamer austrocknen.

Auch bei Prüfkörpern größerer Querschnitte (Wände, Pfeiler im Verband) ergaben sich relativ große  $h_v$ -Unterschiede zwischen Kern- und Randbereich. Der Feuchtigkeitsgehalt im Kernbereich

von Wänden war sehr viel höher als bei den Pfeilern. Für Mörtel der Gruppe III ergab sich ein höherer Feuchtigkeitsgehalt als für Mörtel der Gruppe II.

Obwohl zu erwarten ist, daß sich nach 4-jähriger Austrocknungsdauer ein Feuchtegleichgewichtszustand eingestellt hat, d. h. Feuchteunterschiede zwischen Kern- und Randbereich nicht auf Baueildicke und/oder Dichtigkeit der Mauerwerkbaustoffe zurückzuführen sind, können Feuchteunterschiede als Ursache für die verschiedenen hohen  $h_v$ -Werte im Rand- und Kernbereich nicht völlig ausgeschlossen werden, da nach Bild 6.4 die Feuchtegehalte der Einzelsteine meist deutlich niedriger als bei Steinen aus dem Mauerwerk sind. Ob dies auf zum Teil noch mögliche Nacherhärtung und/oder Karbonatisierungseinfluß zurückzuführen ist, kann anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht geklärt werden.

#### 6.1.3.2 Austrocknungsverlauf

Mögliche Einflüsse auf den Austrocknungsverlauf - dargestellt als  $\alpha_h = (h_0 - h(t)) / (h_0 - h_\infty)$  - konnten anhand der vorliegenden Auswerteergebnisse nicht systematisch und mit befriedigender Aussageicherheit untersucht werden.

Bei Normalmörteln:

- der Mörtelgruppen II bis IIa,
- Vorlagerungsdauer 1 bis 7 d feucht,
- Hauptlagerung bei  $U = 50, 65 \%$  und
- Prüfkörpergröße  $d_{ef} = 12$  bis 50 mm

war ein nennenswerter Einfluß der vorgenannten Einflußgrößen auf den Austrocknungsverlauf nicht zu erkennen. Die Einzelkurven  $\alpha_h = f(t)$  wurden deshalb gemittelt.

Die Mittelwertkurve ist mit dem Vertrauensbereich für die mittleren  $\alpha_h$ -Werte in Bild 6.5 dargestellt.

Danach trocknen die Normalmörtel (Prismen, Querschnitte im allgemeinen 25 mm · 25 mm und 40 mm · 40 mm) sehr schnell aus und erreichen bereits nach 1 d Austrocknungsdauer 50 % der Gleichgewichtsfeuchte, d. h. die Halbwertzeit ist rd. 1 d. Nach rd. 50-tägigem Austrocknen wird die Gleichgewichtsfeuchte erreicht.

Im Bild ist der Austrocknungsverlauf für den einzigen Leichtmörtel mit Perlite-Zuschlag mit dargestellt. Der Mörtel trocknet wesentlich langsamer aus (Halbwertzeit rd. 50 d) und erreichte die Gleichgewichtsfeuchte erst nach 1,5 bis 2 a. Dies ist jedoch wie die zusätzlich eingezeichnete Austrocknungskurve für einen bis auf den Zuschlag gleichen Normalmörtel zeigt, bei gleichen Prüfbedingungen für beide Mörtel im wesentlichen nicht auf den Leichtzuschlag, sondern auf die andere Prüfkörpergröße (Prismenquerschnitt 140 mm · 140 mm) und Vorlagerung zurückzuführen. Es kann deshalb auch aufgrund von Untersuchungen über das Austrocknungsverhalten von Perliteschüttungen vermutet werden, daß dieses bei Leichtmörtel nicht wesentlich von dem der Normalmörtel abweicht.

Das Austrocknungsverhalten von Mörteln im Fugenrandbereich von Mauerwerk wird dem der Kurve A im Bild 6.5 ähneln.

#### 6.1.4 Mauersteine und Mauerwerk

Die errechneten Werte  $h_{v\infty}$ ,  $\min t$ ,  $t_h$  und die Parameter der Gleichungen 6.4 und 6.5 wurden tabelliert und in einem gesonderten, hier nicht beigefügten Anhang zusammengestellt.

##### 6.1.4.1 Gleichgewichtsfeuchte

Ausgewertet wurden alle Ergebnisse für Einzelsteine, Steinprüfkörper, Steine in Mauerwerkprüfkörpern und Steine in mehrere Jahre alten Außenwänden bewohnter Gebäude. Insgesamt wurden rd. 250 Prüfwerte ausgewertet. Neben einer gruppenweisen Auswertung



nach der relativen Luftfeuchte wurde eine Ausgleichsrechnung über den Bereich  $U = 30$  bis  $80\%$  durchgeführt. Nach den grafisch dargestellten Prüfwerten in der Form  $h_{v\infty} = f(U)$  erschien näherungsweise eine lineare Regression gerechtfertigt. Die zusätzliche Regression obs  $h_{v\infty} = a + b \cdot \text{cal } h_{v\infty}$  ergab Parameter  $a = 0,000$  und  $b = 1,000$ .

Die Prüfwerte streuen jedoch im allgemeinen sehr, so daß die mit Hilfe der angegebenen Regressionsgleichungen errechneten  $h_{v\infty}$ -Werte nur als Anhaltswerte angesehen werden können.

Sämtliche Auswertergebnisse enthält die Tabelle 6.2. Sie sind in Bild 6.6 dargestellt.

Beim Vergleich der im Bild angegebenen "Gruppenmittelwerte" und der Regressionsgeraden ist zu beachten, daß letztere auch die nicht dargestellten Zwischenprüfwerte mit beinhalten.

#### a) Mauerziegel

Die  $h_{v\infty}$ -Werte sind mit  $0,20$  Vol.-% für  $U = 80\%$  sehr klein. Dies war aufgrund der Porenverteilung von Mauerziegeln zu erwarten, aus der sich, wenn überhaupt, nur ein sehr geringer Anteil von Poren mit  $r < 10$  nm ergibt. Diese Poren sind jedoch erst bei  $U > 90\%$  mit Wasser gefüllt. Nach /P11, S31/ ergibt sich aus Untersuchungen an verschiedenen Ziegeln ein Anteil von Poren  $r < 10$  nm von maximal etwa  $1$  Vol.-%.

Wegen der vergleichsweise großen Durchmesser der Kapillarporen wird praktisch kaum Feuchtigkeit durch Kapillarkondensation aufgenommen /K9/ bzw. beim Austrocknen zurückgehalten (s. auch Bild 6.3).

Der für Mauerwerkswände bei  $U = 65\%$  ermittelte  $h_{v\infty}$ -Wert entspricht dem von Einzelsteinen bei  $U = 80\%$ . Etwa gleichgroß ist der  $h_{v\infty}$ -wert von Außenwänden.

b) Kalksandsteine

Die  $h_{v\infty}$ -Werte nehmen linear mit steigendem U zu (s. Bild 6.6). Der für Mauerwerkswände bei U = 65 % ermittelte  $h_{v\infty}$ -Wert liegt zwischen den  $h_{v\infty}$ -Werten der Steine für U = 65 und 80 %. Deutlich niedriger sind die  $h_{v\infty}$ -Werte für Außenwände von 2,5 Vol.-%. Nach /F9/ liegt der Anteil der Poren mit  $r < 10$  nm (wassergefüllt bei U = 90 %) bei Kalksandsteinen etwa zwischen 1,0 bis 4 Vol.-%, wenn mit einem mittleren Gesamtporenanteil von rd. 30 Vol.-% gerechnet wird. Die mittlere Porenverteilung von Kalksandsteinen ist in Bild 6.3 dargestellt.

c) Leichtbetonsteine

Die  $h_{v\infty}$ -Werte für Steine mit Zuschlag Naturbims sind im Mittel um rd. 1 Vol.-% niedriger als die der Kalksandsteine. Der für Mauerwerkswände bei U = 65 % ermittelte  $h_{v\infty}$ -Wert ist deutlich höher als derjenige der Steine bei U = 65 und 80 %. Allerdings dürfte der "Steinwert" bei U = 80 % zu niedrig sein. Die  $h_{v\infty}$ -Werte für Außenwände von 2,5 und 4 Vol.-% liegen im Bereich der "Steinwerte" für U = 65 und 80 %. Für Leichtbetonsteine mit Zuschlag Blähton (Steinrohddichte =  $1200 \text{ kg/m}^3$ ) ergeben sich  $h_{v\infty}$ -Werte (aus der Regression) die etwa denen von Kalksandstein entsprechen; in Außenwänden wurden deutlich höhere  $h_{v\infty}$ -Werte (8 bis 11 Vol.-%) ermittelt. Für Mauerwerk aus Blähtonsteinen mit niedrigerer Rohddichte (etwa  $800 \text{ kg/m}^3$ ) ergaben sich jedoch nach /K10/ Gleichgewichtsfeuchten von 3 bis 5 Vol.-%.

d) Gasbetonsteine

Die  $h_{v\infty}$ -Werte sind ebenfalls niedriger als bei Kalksandsteinen. Der für Mauerwerkswände bei U = 65 % ermittelte  $h_{v\infty}$ -Wert von 3,15 Vol.-% entspricht dem der Steine bei U = 80 %. Für Außenwände wurde mit 2,5 Vol.-% ein niedriger Wert bestimmt, der in etwa dem "Steinwert" bei U = 65 % entspricht. Die aus /K21, Bild 5.35, 5.36/ entnehmbaren Porenaneile entsprechen recht gut den ermittelten  $h_{v\infty}$ -Werten. Danach beträgt der bei U = 30 % wassergefüllte Porenanteil ca. 1 Vol.-%, bei U = 65 % 2 bis 2,5 Vol.-% und bei U = 80 % 3 Vol.-% (s. auch Bild 6.3). Die in

/R12/ angegebenen Ausgleichsfeuchten stimmen bis auf eine Ausnahme recht gut mit denen in der Tabelle 6.2 überein. Für  $U = 45 \%$  ist  $h_{v\infty}$  in /R12/ etwa gleich 1,3 Vol.-%, in der Tabelle 6.2 dagegen rd. 2,1 Vol.-%.

e) Rechenwerte  $h_{v\infty}$

Nach den Ergebnissen in Tabelle 6.2 und in Bild 6.6 liegt die häufigste (mittlere) Gleichgewichtsfeuchte in Außenwänden bewohnter Gebäude im allgemeinen zwischen den  $h_{v\infty}$ -Werten der entsprechenden Mauersteine für  $U = 65$  und  $80 \%$ . Dies ergab sich in etwa auch aus Untersuchungen in /K1/. Um hinsichtlich der Feuchtedehnung auf der sicheren Seite zu liegen, wird  $U = 65 \%$  als Bezug für Rechenwerte gewählt.

Für Innenwände bewohnter Gebäude wird  $U = 50 \%$  angesetzt.

Davon ausgehend wurden mit den Ergebnissen aus Tabelle 6.2 die folgenden Rechenwerte abgeleitet:

Steinart		Innenwände		Außenwände	
		N	H	N	H
Mauerziegel		0,1	0,05	0,1	0,05
Kalksandsteine		3	3,5	4	3
Leicht- beton- steine	NB	2	1,5	3	2,5
	BT	3	2,5	3,5	3
Gasbetonsteine		2	1,5	2,5	2

N: "Normale" Sicherheit

H: "Erhöhte" Sicherheit

#### 6.1.4.2 Austrocknungsverlauf

In den Bildern 6.7 bis 6.11 sind aus den vorliegenden Versuchsergebnissen auswertbare Austrocknungskurven  $\alpha_h = f(t)$  für Einzelsteine und Mauerwerkpfeiler dargestellt.

##### a) Mauerziegel

Wie die Bilder 6.7 und 6.11 zeigen, trocknen Einzelsteine und Mauerwerk im allgemeinen vergleichsweise schnell aus, was wegen der großen Kapillarität zu erwarten war. Allerdings bestehen auch Unterschiede im Austrocknungsverhalten. Bei den Einzelsteinen, für die in Bild 6.7 nur eine mittlere Austrocknungskurve (A) angegeben ist, trockneten die höherfesten, dichtereren Steine etwas langsamer aus als Steine niedriger Festigkeitsklassen. Deutlich unterschiedlich trockneten Mauerwerkpfeiler aus LHLz 2 und LHLz 12 aus. Wie aus Bild 6.11 zu ersehen, beginnt bei LHLz 12 die Feuchteabgabe gegenüber LHLz 2 erheblich verzögert, so daß sich Halbwertzeiten von rd. 50 bzw. 5 d ergeben. Die Gleichgewichtsfeuchte dieser LHLz wird dagegen nach etwa gleicher Austrocknungsdauer von etwa 1a erreicht. Wesentlich schneller als die Leichtziegel trockneten Mauerwerkpfeiler aus "normalen" Hochlochziegeln aus, von denen gaben wiederum die mit Mörtel der Gruppe III langsamer Feuchtigkeit ab als die mit Mörtel der Gruppe II. Die zugehörigen Austrocknungskurven waren wegen zu weniger Prüfwerte mathematisch nicht ausreichend sicher beschreibbar.

Die das Austrocknen verzögernde Wirkung einer Abdichtung - abgedichtet wurden die 4 Längsflächen - zeigt die Kurve B in Bild 6.7 für die Versuchsergebnisse aus /M19/. Die Abdichtung sollte vergleichbare Austrocknungsverhältnisse wie im Mauerwerk (Binderstein) bewirken. Die Austrocknungsdauer bis zur Gleichgewichtsfeuchte von rd. 3 mon entspricht etwa der, die in /H13/ an in gleicher Weise abgedichteten Ziegeln ermittelt wurde. In /S4/ wird für die Austrocknungsdauer  $t$  in Tagen bis zur Gleichgewichtsfeuchte aus /C15/ angegeben:

$$t = s \cdot d^2 \text{ mit}$$

s: Baustoffabhängige Kenngröße

d: Wanddicke in cm.

Mit  $s = 0,28$  für Ziegelmauerwerk errechnet sich  $t = 161 d$  für eine 240 mm dicke Wand. Die so errechnete Austrocknungsdauer ist - wie auch in /S4/ festgestellt wurde - zu kurz, zumindest für Hochlochziegelmauerwerk. Für dieses wurde in /S4/ rd. 1 Jahr ermittelt, was mit den hier vorliegenden Ergebnissen (Bild 6.11) auch für Leichtziegelmauerwerk gut übereinstimmt. Danach ist  $s = 0,6$ . Nach /S4/ trocknet Lochziegel-Mauerwerk wegen der Lufträume im Stein, die den kapillar leitenden Steinquerschnitt verringern, langsamer aus als Mauerwerk aus Vollziegeln, da Feuchtigkeit kapillar schneller transportiert werden kann als durch Diffusion. Für das Vollziegel-Mauerwerk könnte der niedrige s-Wert von 0,28 zutreffen. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß in /C15/ vermutlich von lufttrocken vermauerten Steinen ausgegangen wird, während hier ausnahmslos wasservorgelagerte Steine vermauert wurde, wodurch eine größere Ausrocknungsdauer zu erwarten ist.

#### b) Kalksandsteine

Ebenfalls vergleichsweise schnell trocknen nach den Bildern 6.8, 6.9 und 6.11 Kalksandsteine und Kalksandstein-Mauerwerk aus. Bei allerdings etwas kleinerem Prüfkörperquerschnitt ( $d_{ef} = 120$  mm) geben die Mauerwerkpfeiler aus Kalksandsteinen KSV 28 annähernd genauso schnell Feuchtigkeit ab wie die Pfeiler aus LHLz 2 ( $d_{ef} = 133$  mm). Die Halbwertzeit liegt bei rd. 10 d, die Gleichgewichtsfeuchte wird nach rd. 1 a erreicht. Auch hier ist s nach /C15/ zu klein und müßte mit rd. 2,5 doppelt so hoch sein wie angegeben.

Bild 6.9 zeigt den Einfluß der relativen Luftfeuchte auf den Austrocknungsverlauf bei Kalksandsteinprismen, die mindestens 2 d in Wasser vorgelagert wurden. Wie ersichtlich, trocknen die Prüfkörper im Klima 50/17 (Prüfklima in /6/) außerordentlich

schnell aus, was im wesentlichen auf die verringerte Viskosität des Wassers bei +50 °C zurückzuführen ist. So ist nach /K21/ die "Feuchteleitfähigkeit" bei +50 °C doppelt so groß wie bei +20 °C. Die Halbwertzeit liegt bei rd. 1 d. Fast doppelt so hoch war die Halbwertzeit bei Lagerung im Klima 20/17. Überraschend ist die sehr niedrige Halbwertzeit von 0,8 d für das Klima 20/65. Sie ist durch Karbonatisierung beeinflusst (s. Abschnitt 6.2.4.2.2) und deshalb nicht ohne weiteres vergleichbar.

Bei den Steinprüfkörpern (Bild 6.8) liegt  $t_h$  bei rd. 3 d für im Klima 20/65 gelagerte Steine KSV 28 und bei rd. 1 d für Steine gleicher Festigkeitsklasse, die im Klima 20/30 lagerten. Die Halbwertzeit für KSV 20 betrug rd. 1,5 d. Für Steine, die an den 4 Längsflächen abgedichtet waren (Klima 23/50), ergaben sich erwartungsgemäß höhere  $t_h$ -Werte. Sie betrugen rd. 20 d für KSV 20 und rd. 10 d für KSV 12 und liegen damit etwa in der Größenordnung der Halbwertzeiten für Mauerwerk vergleichbarer Dicke ( $d = 240$  mm).

### c) Leichtbetonsteine und Betonsteine

Nach den Bildern 6.10 und 6.11 trocknen Leichtbetonsteine Hbl und Hbl-Mauerwerk (Zuschlag NB, BT) deutlich schneller aus als Leichtbetonvollsteine und Mauerwerk aus V-Steinen (Zuschlag NB). Dies ist offensichtlich auf die Luftkammern in den Hbl-Steinen zurückzuführen. Wegen des geringen Kapillarleitvermögens von Bimsbeton /S4/ erfolgt die Austrocknung vor allem durch Wasserdampfdiffusion. Für den Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor  $u$  werden Werte von 5 bis 10 angegeben /7/. Die höheren Werte gelten im allgemeinen für höhere Rohdichten bzw. Festigkeiten. Durch die Luftkammern ( $u = 1$ ) ist bei Hbl-Steinen ein beschleunigter Wasserdampftransport zu erwarten. Ein Einfluß der Luftkammeranzahl auf den Austrocknungsverlauf war nicht zu erkennen. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß die Stegdicken relativ klein sind (Mindeststegdicken nach /8/ 30 bis 55 mm) und sich somit Stegdickenunterschiede bei dem

Austrocknen von Einzelsteinen kaum auswirken und das Verhältnis  $\left[ \frac{\text{Stegd\ddot{u}cke}}{\text{Kammerdicke}} \right]$  nicht wesentlich schwankt, so da\ss auch f\ur das Austrocknen der Steine im Mauerwerk ann\ddot{a}hernd gleichbleibende Verh\ddot{a}ltnisse vorliegen.

W\ddot{a}hrend bei Hbl-Steinen und Mauerwerk h\ddot{o}here Rohdichte- und Festigkeitsklasse (allerdings liegen Versuchswerte nur f\ur die Festigkeitsklassen 2 und 4 vor) das Austrocknungsverhalten praktisch nicht beeinflussen, ist dies bei Mauerwerk aus V2- und V6-Steinen der Fall (Bild 6.11). Vermutlich \u00fcberragt bei den Hbl-Steinen der Luftkammereinflu\ss, w\dd{a}hrend bei den V-Steinen der mit der Rohdichte steigende  $\mu$ -Wert entscheidend ist. Bei den Einzelsteinen treten allerdings keine nennenswerten Unterschiede im Austrocknungsverhalten auf (Bild 6.10), was mit den kleinen Steinma\ss\en erkl\dd{a}rt werden kann. Erwartungsgem\dd{a}\ss wird die Austrocknung beschleunigt, wenn statt im Klima 20/65 im Klima 20/30 gelagert wird. Bei Hbl-Steinen und V-Steinen ergab sich dadurch eine etwa auf die H\dd{a}lfte verringerte Halbwertzeit. F\ur Hbl-Steine, die an den Fl\dd{a}chen abgedichtet waren, die im Mauerwerk nicht direkt mit der Au\ss\enluft in Verbindung stehen, betrug  $t_h = 10$  bis  $14$  d und stimmt somit gut mit der Halbwertzeit f\ur Hbl-Mauerwerkpfeiler von rd.  $10$  d (s. Bild 6.11) \u00fcberein. Bei V2- und V6-Steinen waren die Halbwertzeiten f\ur die Mauerwerkpfeiler dagegen mit rd.  $70$  und  $100$  d erheblich h\dd{o}her als bei Hbl-Mauerwerk und unterschieden sich deutlich von der geringen Halbwertzeit von rd.  $10$  d f\ur abgedichtete Vollsteine. Die Gleichgewichtsfeuchte wurde bei Hbl-Mauerwerk nach rd.  $1,5$  bis  $2$  a erreicht.

Die nach /C15/ mit  $d_{ef}$  errechnete Austrocknungsdauer von  $1$  a stimmt f\ur Hbl \u00fcberein ( $s = 1,4$ ), ist jedoch mit rd.  $200$  d f\ur das Vollstein-Mauerwerk nur etwa halb so hoch wie die versuchsm\dd{a}\ssig bestimmte. Der Wert  $s$  m\dd{u}\ss\te danach f\ur Mauerwerk aus Naturbimsbetonvollsteinen auf rd.  $3$  erh\dd{o}ht werden, wobei wiederum die Wasservorlagerung der Steine beim hier untersuchten Mauerwerk zu ber\dd{u}cksichtigen ist.

Wesentliche Unterschiede zwischen Hohlblocksteinen aus Naturbims und Blähton ergaben sich nicht.

Für Betonsteine (dichter Zuschlag) liegen nur 2 Versuchsreihen an Einzelsteinen im Klima 20/30 und im Klima 20/65 vor. Verglichen mit Leichtbetonsteinen Hbl trockneten die Hbn-Steine schneller aus, was wegen des dichten Zuschlages zu erwarten war. Allerdings kann deswegen der Feuchtetransport nur durch den Zementstein und die Haufwerkporen erfolgen. Die Versuchsergebnisse für Mauerwerkpfeiler aus Hbn 6 waren nicht in Form von Austrocknungskurven auswertbar.

#### d) Gasbetonsteine

Die Auswertergebnisse sind in den Bildern 6.8, 6.9 und 6.11 dargestellt. Bei den Prismenprüfkörpern (Bild 6.9) zeigt sich der Einfluß des Klimas auf den Austrocknungsverlauf, allerdings nicht immer wie erwartet. Dies liegt sicher an der zum Teil sehr eingeschränkten Vergleichbarkeit der Auswertergebnisse. So beeinflußt die Rohdichte offensichtlich die Austrocknungsgeschwindigkeit sehr stark. Bei Lagerung im Klima 20/45 betrug die Halbwertszeit verschieden zusammengesetzter Gasbetone mit einer Rohdichte von rd.  $800 \text{ kg/m}^3$  im Mittel etwa 6 d. Für Probekörper mit  $600 \text{ kg/m}^3$  Rohdichte ergab sich  $t_h = 1 \text{ d}$ . Für im Klima 20/17 gelagerte Prismen der Rohdichte  $800 \text{ kg/m}^3$  wurde eine rd. halb so hohe Halbwertszeit von 3 d ermittelt.

Vergleichsweise überraschend klein war  $t_h$  bei Lagerung im Klima 20/30 und im Klima 20/65. Bei der letztgenannten Lagerung konnte wie auch bei Kalksandsteinen Karbonatisierung von Einfluß gewesen sein (s. Abschnitt 6.1.2).

Erwartungsgemäß wesentlich höhere Halbwertszeiten ergaben sich für Steine (Bild 6.8). Dabei waren wiederum die  $t_h$ -Werte für Steine höherer Rohdichte wesentlich größer und zwar 1,5 bis 2 mal so hoch für Rohdichten von rd.  $800 \text{ kg/m}^3$  gegenüber Rohdichten von rd.  $500$  bis  $600 \text{ kg/m}^3$ . Bei Steinen, die im Klima 20/30



austrockneten, war  $t_h$  nur etwa  $1/2$  bis  $1/3$  so groß wie bei im Klima 20/65 gelagerten Steinen. Für fünfseitig abgedichtete Würfel (Kantenlänge: 100 mm) aus G4, die etwa dem wirksamen Austrocknungsquerschnitt der Steine in den Mauerwerkpfeilern (Bild 6.11) entsprechen, ergaben sich Halbwertzeiten von 30 bis 54 d, die mit der Halbwertzeit von rd. 30 d der Mauerwerkpfeiler aus G6 recht gut übereinstimmen.

Die Pfeiler aus G6 trockneten langsamer aus als Mauerwerkpfeiler aus KSV-, Hbl- und LHz 2-Steinen, was auf den hohen Anteil größerer Kugelporen der Gasbetonsteine zurückzuführen sein dürfte. Dadurch wird Feuchtigkeit im wesentlichen durch Wasserdampfdiffusion und damit erheblich langsamer als kapillar transportiert. Der mit zunehmender Rohdichte steigende  $u$ -Wert -  $u = 3$  für G2,  $u = 6$  für G6 /R12/ - führt zu größerer Austrocknungsdauer bei dichteren Steinen.

Die Gleichgewichtsfeuchte wurde bei den Mauerwerkpfeilern G6 nach etwa 1,5 bis 2 a erreicht. Nach /C15/ errechnet sich mit  $s = 1,2$  die Austrocknungsdauer zu rd. 300 d. Der  $s$ -Wert müßte also für das hier aus wassergelagerten Steinen hergestellte Mauerwerk auf rd. 2,5 erhöht werden.

#### 6.1.5 Zusammenfassung der Auswertergebnisse

Die wesentlichen Auswertergebnisse sind:

- a) Die bei den Mörteln und nichtkeramischen Mauersteinen ermittelten Feuchtigkeitsgehalte können durch Karbonatisierung beeinflußt sein und je nach Prüfzeitpunkt und Prüfmethode zu hoch oder zu niedrig ausfallen.
- b) Der Austrocknungsverlauf ließ sich am besten durch den Ansatz

$$h(t) = A (1 - e^{-B \cdot t^C}) + h_0$$

mit  $h_0$ : Anfangsfeuchtigkeitsgehalt  
wiedergeben.

- c) Näherungsweise kann die Gleichgewichtsfeuchte bei Mörteln und Mauersteinen durch

$$h_{v\infty} = a + b \cdot U$$

im Bereich  $U = 30$  bis  $80$  % beschrieben werden.

- d) Die Gleichgewichtsfeuchte von Mörtel im Mauerwerk kann je nach Mauersteinsorte und Bauteilquerschnitt sehr unterschiedlich groß sein, vor allem auch im Rand- und Kernbereich des Bauteils. Dies ist wesentlich auf unterschiedliche Nacherhärtingsbedingungen und deren Auswirkung auf die Porenverteilung zurückzuführen.

Mörtelprüfkörper mit kleinem Querschnitt ( $25 \text{ mm} \cdot 25 \text{ mm}$ ,  $40 \text{ mm} \cdot 40 \text{ mm}$ ) trocknen sehr schnell aus ( $t_h \approx 1 \text{ d}$ ), was in etwa für Mörtel in den Bauteilrandbereichen zutrifft.

- e) Bei den Mauersteinen und dem Mauerwerk waren die Gleichgewichtsfeuchte und Austrocknungsdauer für Mauerziegel erwartungsgemäß in der Regel am kleinsten. Vergleichsweise langsamer trockneten dichtere hochfeste Ziegel und vor allem Leichtziegel - bei diesen wiederum die höherfesten - aus.

Für Gasbetonsteine und Leichtbetonsteine aus Naturbimszuschlag sowie Betonsteine mit dichtem Zuschlag ergaben sich niedrigere Gleichgewichtsfeuchten als für Kalksandsteine und Leichtbetonsteine mit Blähtonzuschlag. Bei Mauerwerk wurden überwiegend deutlich höhere Gleichgewichtsfeuchten als bei Einzelsteinen festgestellt. Die Gleichgewichtsfeuchte von Außenwänden bewohnter Gebäude entsprach der von Einzelsteinen für  $U = 65$  bis  $80$  %.

Deutlich unterschiedlich war das Austrocknungsverhalten. Kalksandsteine und Kalksandsteinmauerwerkprüfkörper trockne-

ten am schnellsten aus. Langsamer, jedoch schneller als Gasbetonsteine und Gasbetonmauerwerkprüfkörper, trockneten Mauerwerkprüfkörper aus Leichtbetonhohlblocksteinen aus. Das vergleichsweise schnelle Austrocknen des Mauerwerks aus Leichtbetonhohlblocksteinen ist offensichtlich auf die Luftkammern in den Steinen zurückzuführen. Am langsamsten trocknete Leichtbetonvollsteinmauerwerk aus.

- f) Es erscheint möglich, das Austrocknungsverhalten von Mauerwerk durch dasjenige vergleichbar abgedichteter Einzelsteine wiederzugeben.
- g) Für Mauerwerk aus wasservorgelagerten Steinen leiten sich für die Austrocknungsdauer nach /C15/

$$t = s \cdot d^2$$

mit t: Austrocknungsdauer in d

und d: Bauteildicke in cm

folgende baustoffspezifischen s-Werte ab

Steinsorte	s
Mauerziegel HLz	0,6
Kalksandsteine	2,5
Leichtbeton- steine (NB)	Hbl 1,5 V 3
Gasbetonsteine	2,5

## 6.2 Feuchtedehnung

### 6.2.1 Allgemeines zur Auswertung

Ziel der Auswertung war es, die wesentlichen Einflußgrößen auf Endwert und Verlauf der Feuchtedehnung zu untersuchen und mathematisch formulierte Zusammenhänge zu erarbeiten (s. Abschnitt 2.1). Zur mathematischen Beschreibung des Feuchtedehnungsverlaufes und zur Bestimmung des Endwertes wurden rd. 10 verschiedene Rechenansätze, die nach dem grundsätzlichen Ver-

lauf der Feuchtedehnung infrage kamen und für  $t \rightarrow \infty$  einen Endwert ergaben, mit einem Teil der vorliegenden Versuchsergebnisse vorgetestet. Als grundsätzlich geeignet erwiesen sich die bereits in Abschnitt 6.1.1 angeführten 4 Ansätze, sie wurden dann nach den dort angegebenen Kriterien geprüft.

Bei den Mörteln ließ sich die Feuchtedehnung am besten durch den Ansatz 5

$$\epsilon_h = A (1 - e^{-B \cdot t^C}) ; \text{ mit } \epsilon_{h\infty} = A \quad (6.6)$$

beschreiben.

Für Mauersteine und Mauerwerk erwies sich der Ansatz 1

$$\epsilon_h = (A + t)/(B \cdot t + C) ; \text{ mit } \epsilon_{h\infty} = 1/B \quad (6.7)$$

am geeignetsten.

Mit diesen Ansätzen wurden der Endwert, die Halbwertzeit und die Mindestversuchsdauer  $\min t$  analog Abschnitt 6.1.1 berechnet.

Für die vergleichende Bewertung des Feuchtedehnungsverlaufes und dessen Bestimmung unter Bezug auf den Endwert wurden Verhältniswerte

$$\alpha_\epsilon = \frac{\epsilon_h(t)}{\epsilon_{h\infty}}$$

analog zur Darstellung des Austrocknungsverlaufes berechnet.

#### 6.2.2 Grundsätzliche Überlegungen zum Einfluß der Porenverteilung auf den Endwert der Feuchtedehnung

Vorabauswertungen insbesondere bei Kalksand- und Gasbetonsteinen hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen Feuchtegehalt bzw. Lagerungsklima und Feuchtedehnung brachten zum Teil überraschende Ergebnisse: So war der Schwindendwert für Kalksandsteine bei

Lagerung im Klima 20/17 und 50/17 erheblich kleiner als für die Klimate 20/30 bis 20/65. Bei Gasbetonsteinen war  $\epsilon_s$  über einen bestimmten Feuchtebereich annähernd konstant. Als wesentliche Ursache dafür wurde die Porenverteilung vermutet, was die im folgenden angestellten Überlegungen bestätigen. Trocknet ein Körper mit Kapillar-Gelporen-Struktur aus, so entleeren sich zunächst die großen Kapillarporen. Deren Menisken sind nur wenig gekrümmt und verursachen deshalb höchstens geringes Schwinden. Mit fortschreitendem Austrocknen entleeren sich immer kleinere Kapillarporen und schließlich werden auch Gelporen entwässert. Verschiedentlich werden Grenzwerte zwischen Gel- und Kapillarporen genannt. Diese unterscheiden sich sehr, wahrscheinlich auch bedingt durch unterschiedliche Gesichtspunkte. Da bis etwa  $U = 40\%$  ein stabiler Meniskus möglich ist (s. Abschnitt 4.2.1), kann bis zu einem Porenradius  $r \approx 1$  nm mit kapillarer Schwindwirksamkeit der Poren gerechnet werden. Davon wird im folgenden ausgegangen. Durch das Entleeren immer kleinerer Kapillarporen nimmt die Krümmung und damit die Schwindwirksamkeit der Menisken zu, das Schwinden verstärkt sich. Nach ausreichend großer Austrocknungsdauer stellt sich bei einem bestimmten Austrocknungsklima eine Endfeuchte (Gleichgewichtsfeuchte) ein. In diesem Zustand sind alle Kapillarporen, deren Radius  $r$  kleiner oder gleich einem Grenzradius  $r_{gr}$  sind, wassergefüllt /H13/. Alle größeren Kapillaren enthalten kein Wasser mehr. Schwindwirksam sind dann somit nur die Kapillaren mit  $r \leq r_{gr}$ . Die Menisken dieser Kapillaren haben unabhängig vom Kapillarradius den gleichen Krümmungsradius, der gleich  $r_{gr}$  ist /F3/. Die Kapillarezugspannung in jeder wassergefüllten Kapillare ist dann

$$\sigma_{kap} = \frac{2 \sigma_w}{r_{gr}} \quad (6.8)$$

mit

$\sigma_w$ : Oberflächenspannung des Wassers,  
bei +20 °C ist  $\sigma_w = 7,22 \cdot 10^{-5}$  N/mm  
bei +50 °C ist  $\sigma_w = 6,78 \cdot 10^{-5}$  N/mm

$$r_{gr} = - \frac{2 \sigma_w}{\rho_w \cdot R_D \cdot T \cdot \ln U} \quad (6.9)$$

$\rho_w$  : Dichte des Wassers,  
bei +20 °C = 998,2 kg/m<sup>3</sup>  
bei +50 °C = 988,1 kg/m<sup>3</sup>

$R_D$ : Gaskonstante = 462 Nm/(kg·K)

$T$  : Absolute Temperatur der Luft = 273 K für 0 °C.

Damit wird

$$\begin{aligned} r_{gr} &= -1,07/\ln (U/100) \text{ in nm für } T = +20 \text{ °C} \\ &= -0,97/\ln (U/100) \text{ in nm für } T = +50 \text{ °C.} \end{aligned}$$

Die Größe des Schwindendwertes eines Mauermörtels oder -steines hängt außer vom Schwindklima von einer ganzen Reihe von stofflichen Eigenschaften ab. Powers /P8/ führt für die schwindwirksame Verformbarkeit des Stoffes bei Zementstein bzw. Beton einen Zusammendrückbarkeitskoeffizienten ein, der von der Zementgelkonzentration und damit vom Porenraum und der Zusammendrückbarkeit des porenfreien Zementgels bestimmt wird. Auch andere Forscher berücksichtigen bei der theoretischen Herleitung des Schwindendwertes die Porosität bzw. den Porengehalt /F3/. Betrachtungen über den Einfluß der Porenverteilungen auf den Schwindendwert fanden sich jedoch in der Literatur nicht. Dies muß als erheblicher Mangel angesehen werden, da die Größe des Schwindens bei einer bestimmten hydrostatischen Spannung in den Kapillarporen eines Baustoffes wesentlich davon abhängen muß, wie groß der Anteil der wassergefüllten Kapillaren und damit die Summe der auftretenden Kapillarezugkräfte ist. Der Schwindendwert eines Baustoffes ist deshalb im wesentlichen eine Funktion von Schwindklima (näherungsweise relative Luftfeuchte U), Anteil der bei U noch wassergefüllten Kapillaren  $p_w$ , der Kapillarezugspannung  $\sigma_{kap}$  und der Verformbarkeit des Baustoffes  $\alpha_v$  (in mm<sup>2</sup>/N)

$$\epsilon_{gr} = f (U, p_w, \sigma_{kap}, \alpha_v) \quad (6.10)$$

Wird davon ausgegangen, daß  $\alpha_v$  für denselben Baustoff bei verschiedenen U konstant ist, so kann der Zusammenhang zwischen Schwindendwert und Schwindklima (U) bzw. Feuchtegehalt näherungsweise dargestellt werden durch

$$\epsilon_s(U) = \alpha_v \cdot p_w(U) \cdot \sigma_{\text{kap}}(U). \quad (6.11)$$

Mit

$$\sigma_{\text{kap}} = -135 \cdot \ln(U/100) \text{ in N/mm}^2$$

aus den Gleichungen 6.8 und 6.9 für  $T = 273 + 20 = 293 \text{ K}$  wird

$$\epsilon_s(U) = -\alpha_v \cdot p_w(U) \cdot 135 \cdot \ln(U/100) \quad (6.12)$$

mit

$$p_w(U) = p_w(r \leq r_{\text{gr}}) \quad \text{und}$$

$$r_{\text{gr}} = -1,07/\ln(U/100) \text{ in nm.}$$

Der so formulierte Zusammenhang zwischen  $\epsilon_s$  und U wird im folgenden, wo es erforderlich erscheint, zur Erklärung des versuchsmäßig ermittelten Zusammenhanges herangezogen. Da  $\alpha_v$  nicht bekannt ist, wird

$$\epsilon'_s(U) = \frac{\epsilon_s(U)}{\alpha_v} = -p_w(r \leq r_{\text{gr}}) \cdot 135 \ln(U/100) \quad (6.13)$$

dargestellt. Häufig liegen allerdings Angaben über Porenverteilungen im interessierenden Bereich für U von etwa 30 bis 80 % ( $r_{\text{gr}} = 0,8$  bis  $4,5 \text{ nm}$ ) nicht vor. Es wurde deshalb näherungsweise davon ausgegangen, daß die Gleichgewichtsfeuchte bei der betrachteten relativen Luftfeuchte dem Porenanteil  $p_w$  gleichgesetzt werden kann. Diese Annahme wurde für die beabsichtigte grundsätzliche Darstellung des Zusammenhanges  $\epsilon_s = f(U)$  als vertretbar angesehen.

### 6.2.3 Mörtel

#### 6.2.3.1 Endwerte (Schwinden)

##### Allgemeines

Insgesamt wurden 88 in- und ausländische Prüfserien ausgewertet: Bei 35 Prüfserien (Auswertegruppe A) konnten aufgrund vorliegender zeitabhängiger Versuchswerte der Endwert  $\epsilon_{s\infty}$ , Halbwertszeit  $t_h$  und die Mindestversuchsdauer  $\min t$  berechnet werden. Die Ergebnisse enthält ein hier nicht beigefügter Anhang.

Außerdem wurden untersucht der Einfluß der Mörtelart (-gruppe (MG)), der Vorlagerung (VL), der Hauptlagerung (relative Luftfeuchte U) und der Prüfkörpergröße. Die 3 erstgenannten Einflüsse wurden mittels multipler Regression untersucht.

$$\epsilon_{s\infty} = a + b \cdot U + c \cdot t_{VL} + d \cdot \beta_{m\ddot{o}} \text{ (MG)} \quad (6.14)$$

Bei den verbleibenden 53 Prüfserien (Auswertegruppe B) war im allgemeinen nur der Schwindwert bei Versuchsende angegeben. Da diese Werte wegen der im allgemeinen ausreichend langen Versuchsdauer praktisch als Endwerte angesehen werden konnten, wurden sie in bestimmte Teilauswertungen mit einbezogen.

##### Einfluß der Mörtelart (-gruppe)

Ein eindeutiger Einfluß auf den Endwert konnte nicht festgestellt werden. Die multiple Regression mit der ersatzweise für die Mörtelgruppe eingesetzten Mörtelmindestdruckfestigkeit nach DIN 1053 Teil 1 ergab weder für die Auswertegruppen A oder B noch für beide Gruppen gemeinsam einen gesicherten Einfluß.

##### Einfluß der Vorlagerung

Untersucht wurden nur die feucht, in Wasser oder gegen Austrocknen geschützt vorgelagerten Mörtel. Aus der multiplen Regression ergab sich nur bei der Auswertegruppe A ein nennenswerter Einfluß der Vorlagerung. Danach verringert sich z. B. der Endwert um 0,07 mm/m wenn 7 d statt 1 d vorgelagert wird.



Bei der Auswertegruppe B und der gemeinsamen Auswertung beider Gruppen war dagegen der Vorlagerungseinfluß vernachlässigbar klein.

### Einfluß der Hauptlagerung

Erwartungsgemäß beeinflußt die relative Feuchte der Schwindlagerung den Endwert sehr stark. Im Bild 6.12 ist dieser Zusammenhang dargestellt. Die multiple Regression ( $25 \leq U \leq 99$ ) ergab:

Auswertegruppe A:

$$\epsilon_{S\infty} = 1,477 - 0,010 \cdot U - 0,012 \cdot t_{VL} \quad (\text{BEST: } 71 \%)$$

Auswertegruppe B:

$$\epsilon_{S\infty} = 1,567 - 0,011 \cdot U - 0,0004 \cdot t_{VL} \quad (\text{BEST: } 55 \%)$$

Auswertegruppen A und B:

$$\epsilon_{S\infty} = 1,602 - 0,012 \cdot U - 0,0003 \cdot t_{VL} \quad (\text{BEST: } 51 \%)$$

(6.15)

$$\epsilon_{S\infty} = 1,67 - 0,014 \cdot U \quad (\text{BEST: } 46 \%)$$

(6.16)

mit U in % und  $t_{VL}$  in d.

Da der Vorlagerungseinfluß bei der im allgemeinen anzunehmenden geringen Vorlagerungsdauer vernachlässigbar klein ist, wird für  $\epsilon_{S\infty} = f(U)$

$$\epsilon_{S\infty} = 1,67 - 0,014 \cdot U$$

zugrundegelegt. Der Ansatz stimmt sehr gut mit der Beziehung für Beton  $\epsilon_{S\infty} = 1,70 - 0,013 \cdot U$  überein, die aus den in /K19/ angegebenen Zahlenwerten ermittelt wurde. Zusätzlich zu der Auswertung über den gesamten durch Versuchswerte belegten U-Bereich wurden die Endwerte einzelnen U-Bereichen zugeordnet und statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse enthält die Tabelle 6.3. Im Bild 6.13 sind die Ergebnisse beider Auswertarten als Ver-

hältniswerte  $\epsilon_{S\infty}(U)/\epsilon_{S\infty}$  ( $U = 65$ ) im Vergleich zu denen aus /J3/, den CEB/FIP-Richtlinien /5/ und DIN 4227 Teil 1 /3/ dargestellt. Die Übereinstimmung war im vergleichbaren Bereich von  $U = 30$  bis  $90\%$  im allgemeinen recht gut. In /J3/ wird der Einfluß von  $U$  auf  $\epsilon_{S\infty}$  durch den Faktor  $(1-U/100)^{0,7}$  berücksichtigt. In Anbetracht dessen, daß nach Bild 6.13 die mit dem Ansatz 6.16 errechneten  $\epsilon_{S\infty}$ -Werte vermutlich bei geringer und hoher relativer Luftfeuchte etwas zu hoch sind und wegen der ansonsten guten Übereinstimmung, erscheint der einfache Ansatz nach /J3/

$$\epsilon_{S\infty} = \epsilon_{S\infty}(U=0) \cdot (1-U/100)^{0,7} \quad (6.17)$$

gut geeignet, den Zusammenhang  $\epsilon_{S\infty} = f(U)$  zu beschreiben.

#### Einfluß der Prüfkörpergröße

Der Einfluß wurde mittels der wirksamen Dicke  $d_{ef} = \frac{2A}{u}$  nach /3/ untersucht. Die Werte  $d_{ef}$  lagen zwischen  $0,6$  und  $7$  cm, im allgemeinen bei  $2$  cm. Ein erkennbarer Einfluß von  $d_{ef}$  ergab sich nicht, was vermutlich auf die vergleichsweise kleinen  $d_{ef}$ -Werte und die nicht ohne weiteres vergleichbaren Versuchsergebnisse zurückzuführen ist.

#### Einfluß der Karbonatisierung

Da die Karbonatisierung in der Regel nicht mituntersucht wurde, kann deren Einfluß nicht eindeutig nachgewiesen werden. Die in einigen Fällen zurückgehende Feuchtigkeitsabnahme (s. auch Abschnitt 6.1.2 und Bild 6.1) läßt jedoch Karbonatisierungseinfluß vermuten. Zusatzversuche an verschiedenen zusammengesetzten Mörteln ergaben bei Lagerung im Normalklima vollständige Karbonatisierung nach  $1$  bis  $5$  Jahren Lagerungsdauer (s. Tabelle 6.4). Danach ist bis auf hochfeste Mörtel auch bei kürzerer Versuchsdauer vor allem bei Mörteln der Gruppe II mit nennenswertem Karbonatisierungseinfluß und Karbonatisierungsschwinden zu rechnen.

### Mindestversuchsdauer

Nach den Auswerteergebnissen (hier nicht beigelegter Anhang) ist bis auf 2 Ausnahmen eine Mindestversuchsdauer von 0,5 a ausreichend, meist ist  $\min t$  noch deutlich geringer. Bei den Versuchen der Quellen S 2642 und S 2644 (s. Anhang) beträgt  $\min t$  dagegen rd. 1000 d. Hierbei handelt es sich um Meßstrecken in der Prismenachse. Für Meßstrecken an der Oberfläche am jeweils gleichen Prisma (S 2641 und S 2643) ergaben sich  $\min t$ -Werte von rd. 0,5 a. Die hohen  $\min t$ -Werte von rd. 1000 d sind auf eine deutliche Schwindzunahme etwa nach rd. 800 d Schwinddauer zurückzuführen, die bei den Oberflächenmeßstrecken nicht auftritt. Etwa zu diesem Zeitpunkt war vermutlich das Prisma überwiegend karbonatisiert.

### Andere Auswerteergebnisse

Für den einzigen Leichtmörtel (Perlitezuschlag, Mörtelgruppe II) ergab sich erwartungsgemäß ein höherer Endwert, der mit 4,65 mm/m rd. 4,5 mal so hoch wie der vergleichbare Endwert von Normalmörtel ist. Dabei ist zu berücksichtigen, daß der Mörtel nach der 7-tägigen Wasservorlagerung noch 21 Tage im Klima 23/50 "vorschwinden" konnte, bevor die Schwindmessungen begannen. In /K15/ war das Schwinden von Zementmörtel mit Perlite als Zuschlag - Vorlagerung 28 d feucht - rd. 2 mal so hoch wie beim Vergleichsmörtel mit Sandzuschlag. Allerdings betrug der w/z-Wert des Leichtmörtels 1,02, der des Normalmörtels nur 0,68.

#### 6.2.3.2 Schwindverlauf

##### Halbwertzeit

Die Halbwertzeit lag bei Normalmörteln unter 50 d, überwiegend unter 10 d, d. h. das Schwinden verläuft vergleichsweise schnell. Beim Leichtmörtel (Quelle P 0101, s. Anhang) betrug  $t_h = 67$  d und ist damit deutlich höher als beim vergleichbaren Normalmörtel ( $t_h = 37$  d, Quelle P 0102, s. Anhang).

In Bild 6.14 ist  $t_h$  in Abhängigkeit von  $U$  dargestellt. In der Tendenz ist die erwartete Zunahme von  $t_h$  mit steigender relativer Luftfeuchte zu erkennen.

#### Bezogener Schwindverlauf

In Bild 6.15 sind alle hierfür auswertbaren Schwindkurven der Auswertegruppe A in der "normierten" Form

$$\alpha_\epsilon = \frac{\epsilon_s(t)}{\epsilon_{s\infty}} = 1 - e^{-B \cdot t^C} \quad (6.18)$$

dargestellt.

Eindeutige und nennenswerte Einflüsse von Mörtelgruppe, Vorlagerung, Hauptlagerung und Prüfkörpergröße auf den normierten Schwindverlauf waren nicht erkennbar. Aus den Einzelkurven wurden deshalb eine mittlere Kurve und der Vertrauensbereich für diese Mittelwertkurve berechnet. Die Kurven sind im Bild 6.16 dargestellt. Vergleichend wurden in das Bild die Schwindverlaufskurven nach DIN 4227 Teil 1 /3/ miteingezeichnet. Im Gegensatz zu Beton schwinden die Mörtel wesentlich schneller, d. h. am Anfang ist das Schwinden größer und das Endschwindmaß wird praktisch schon nach 100 d Schwinddauer erreicht. Dies ist mit der sehr kleinen Prüfkörpergröße und der höheren Porosität der Mörtel zu erklären.

#### 6.2.3.3 Rechnerische Abschätzung des Schwindens

Der Endwert  $\epsilon_{s\infty}$  kann mit Hilfe der Gleichungen

$$\epsilon_{s\infty} = 1,67 - 0,014 \cdot U \quad (6.16)$$

oder

$$\epsilon_{s\infty} = 1,60 \cdot (1-U/100)^{0,7} \quad (6.19)$$

errechnet werden. Gleichung 6.19 wurde mit  $\epsilon_{s\infty}$  ( $U = 65$ ) = 0,76 mm/m aus Tabelle 6.3 und dem Ansatz 6.17 hergeleitet. Sie trifft vermutlich für kleine und große  $U$ -Werte besser zu als Gleichung 6.16. Der Schwindverlauf kann mittels der aus Bild

6.16 entnehmbaren  $\alpha_\epsilon$ -Werte bestimmt werden:

$$\epsilon_S(t) = \alpha_\epsilon \cdot \epsilon_{S\infty} \quad \text{bzw.}$$

$$\epsilon_S(t) = \alpha_\epsilon \cdot 1,60 (1-U/100)^{0,7}$$

Analog /3/ kann das Schwinden für einen bestimmten Zeitraum aus

$$\epsilon_S(t_2-t_1) = \epsilon_{S\infty} \cdot (\alpha_{\epsilon,t_2} - \alpha_{\epsilon,t_1})$$

ermittelt werden.

Grenzwertbetrachtungen sind mit Hilfe der in Tabelle 6.3 und Bild 6.16 angegebenen Vertrauensgrenzen für den Mittelwert bzw. der Fraktilewerte in Tabelle 6.3 möglich.

#### 6.2.4 Mauersteine

##### 6.2.4.1 Allgemeines

Folgende mögliche Einflußgrößen auf Verlauf und Endwert der Feuchtedehnung wurden erfaßt bzw. zumindest tastweise zusätzlich untersucht:

- a) Steinzusammensetzung, Herstellbedingungen
- b) Steinformat bzw. Prüfkörpergröße, Voll-, Lochstein
- c) Steineigenschaften (Rohdichte, Druckfestigkeit)
- d) Meßstelle
- e) Nacherhärtung, Karbonatisierung
- f) Vorlagerungsart und -dauer
- g) Hauptlagerungsart und -dauer, Wechsellagerung.

Aussagen über die Wirkung der genannten Einflußgrößen waren jedoch nur in relativ wenigen Fällen möglich, im wesentlichen deshalb, weil die Untersuchungsberichte entsprechende Angaben nicht enthielten.

Der Einfluß von Meßstelle und Hauptlagerungsart wurde für alle Steinarten untersucht. Da die meisten Versuchswerte für die Meßstelle LR (Richtung Steinlänge, Randbereich) vorlagen, wurde

mit diesen der Hauptlagerungseinfluß untersucht. Der Meßstelleneinfluß wurde, bezogen auf die Meßstelle HR (Steinhöhe, Randbereich), überprüft, um den Bezug zur Feuchtedehnung von Mauerwerk in vertikaler Richtung zu gewährleisten und weil für HR wesentlich mehr Versuchswerte vorlagen als für die Meßstelle HA (Steinhöhe, Achse).

Die Kennwerte  $\epsilon_{h\infty}$ ,  $t_h$ ,  $\min t$  und die Parameter der Gleichungen 6.6 bzw. 6.7 und 6.5 enthält ein hier nicht beigefügter Anhang.

#### 6.2.4.2 Endwerte

##### 6.2.4.2.1 Mauerziegel

###### Allgemeines

In einigen Fällen konnten rechnerische Endwerte nicht ermittelt werden, da

- die Feuchtedehnungswerte sehr klein waren und sich nach einer bestimmten, relativ kurzen Versuchsdauer offensichtlich nur infolge Klimaschwankungen und Meßeinflüssen geringfügig änderten oder
- die Feuchtedehnung über den gesamten Versuchszeitraum annähernd linear zunahm.

Der Einfluß von Steinzusammensetzung und Herstellbedingungen konnte wegen fehlender Angaben nicht untersucht werden.

###### Steineigenschaften

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen ergab sich kein Zusammenhang von  $\epsilon_{h\infty}$  zu Druckfestigkeit, Scherbenrohddichte und Wasseraufnahme.

###### Steinformat

Ein Einfluß auf  $\epsilon_{h\infty}$  war nicht zu erkennen.

### Meßstelle

Da häufig ein rechnerischer Endwert nicht bestimmbar war, wurden die Prüfwerte in allen Fällen über den Versuchszeitraum durch die Regressionsgerade

$$\epsilon_h = A + B \cdot t$$

dargestellt und der für max t aus der Gleichung errechnete  $\epsilon_h$ -Wert für diese Auswertung benutzt. Dieses Vorgehen erschien sinnvoll, um mit einem näherungsweise vertretbarem Rechenansatz möglichst alle Versuchsergebnisse heranziehen zu können und evtl. Prüffehler eines Einzelwertes durch Ausgleichsrechnung zu relativieren. Die  $\epsilon_h$ -Werte für die verschiedenen Meßstellen sind im Bild 6.17 in Abhängigkeit von  $\epsilon_h$  der Meßstelle HR dargestellt. Danach ergibt sich zu den Meßstellen HA, BA und BR kein eindeutiger Unterschied. In den meisten Fällen ist jedoch  $\epsilon_h$  der Meßstellen LA und LR kleiner als  $\epsilon_h$  der Meßstelle HR, im Mittel um etwa 10 bis 20 %.

Dies steht im Einklang mit /B3, H3, W1/ wonach größere Feuchte-dehnwerte in Strangpressrichtung (Steinhöhe) ermittelt wurden, was auf die Ausrichtung der Mineralien zurückgeführt wird.

### Vorlagerungsart und -dauer

Wegen fehlender Angaben konnten die Einflußgrößen generell nicht untersucht werden. Bei Versuchen mit Leichtziegeln im Klima 20/65 /I4/, die unterschiedlich vorgelagert wurden (bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet (T), bis zu  $h_v = 5\%$  (F) und 2 d in Wasser (W)) waren die  $\epsilon_{h, \max t}$ -Werte (max t  $\approx$  700 d) - bei gleicher Versuchsdauer - der in Wasser vorgelagerten Steine am größten, die der Steine mit  $h_v = 5\%$  am kleinsten und zwar nur etwa halb so groß (s. Bild 6.30). Zwischen den rechnerischen Endwerten ergab sich allerdings kein eindeutiger Unterschied, so daß offensichtlich nur die Geschwindigkeit der Feuchtedehnung beeinflusst wird.

### Hauptlagerungsart und -dauer

Hierzu lagen auswertbare Untersuchungsergebnisse nicht vor.

Durch die vorliegenden Untersuchungen konnte bestätigt werden, daß chemisches Quellen auch bei Raumlagerung auftritt.

Das bekanntermaßen sehr geringe Schwinden von Mauerziegeln /B1, W2/ kann, wie in Abschnitt 6.2.2 dargelegt, durch die Porenverteilung erklärt werden. So ergibt sich aus /P11/ und /S31/ ein sehr kleiner Feinstporenanteil (etwa < 1 Vol.-% Poren mit  $r < 10$  nm, s. Bild 6.3), der bei niedriger Brenntemperatur allerdings höher sein kann. Die mittlere Gleichgewichtsfeuchte beträgt nach Tabelle 6.3 bei  $U = 65$  % nur rd. 0,1 Vol.-%. Wegen des sehr geringen Porenanteils ist bei vergleichsweise hoch anzusetzendem  $\alpha_v$ -Wert nach Abschnitt 6.2.2 ein geringes Schwinden zu erwarten.

#### 6.2.4.2.2 Kalksandsteine

##### Allgemeines

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse sind Aussagen über die Einflußgrößen Prüfkörpergröße und Vorlagerung nicht möglich. Dies gilt auch für Zusammensetzung und Herstelleigenschaften, da Angaben hierzu fehlten.

##### Steineigenschaften

Ein Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Schwindendwert ergab sich erwartungsgemäß nicht, da eine bestimmte Druckfestigkeit mit verschiedener Zusammensetzung erreicht werden kann.

##### Meßstelle

Die Auswerteergebnisse enthält Bild 6.18.

Bei den Versuchen aus /S7/ im Klima 20/30 war<sup>d</sup> möglicherweise in einigen Fällen die Lagerungsdauer nicht ausreichend lang, was



sich auf die Aussagesicherheit der ermittelten Endwerte ausgewirkt haben kann. Es wurden deshalb im Bild zusätzlich die  $\epsilon_{s, \max t}$ -Werte mit dargestellt. Bis auf 2 Ausnahmen sind die  $\epsilon_s$ (HR)-Werte stets - z. T. erheblich - größer als die der anderen Meßstellen. Am meisten unterschieden sich  $\epsilon_s$ (HR) und  $\epsilon_s$ (LR, HA). Letztere sind um bis zu rd. 0,1 mm/m kleiner. Näherungsweise ergab sich  $\epsilon_s$ (LR)  $\approx$  0,8  $\epsilon_s$ (HR). Das deutlich größere Schwinden in Richtung Steinhöhe im Randbereich ist wahrscheinlich auf Verdichtungsunterschiede beim Pressen der Steine zurückzuführen. So sind nach /B14/ die Randzonen stärker verdichtet, insbesondere bei einseitiger Verdichtung. Eine Erklärung dafür, wodurch stärkeres Verdichten zu höherem Schwinden führt, wurde nicht gefunden. Möglicherweise ist dies auf einen höheren Feinstporenanteil zurückzuführen. Karbonatisierung als Ursache für das unterschiedliche Schwinden der Meßstellen kann hier weitgehend ausgeschlossen werden, da entweder Steinalter bzw. Lagerungsdauer sehr groß waren (Stein annähernd vollständig karbonatisiert) oder das Klima Karbonatisierung kaum zuließ (20/30) und zudem die großen Schwindunterschiede auch zwischen 2 Randmeßstellen auftreten.

#### Nacherhärtung, Karbonatisierung

Die im allgemeinen geringe Nacherhärtung (etwa bis 10 % Druckfestigkeitszuwachs) dürfte das Schwinden kaum beeinflussen. Untersuchungsergebnisse darüber lagen nicht vor.

In /B4/ wird daraufhingewiesen, daß das Karbonatisierungsschwinden sehr viel größer als das Trocknungsschwinden sein kann. Dazu durchgeführte Tastversuche /I6/ bestätigten dies (s. auch Abschnitt 5.3).

Die Ergebnisse sind in den Bildern 6.19 und 6.20 dargestellt.

In den Bildern, insbesondere in Bild 6.19 ist deutlich der schwinderhöhende Einfluß der Karbonatisierung zu erkennen. Nach Bild 6.19 ist das Trocknungsschwinden nach rd. 70 d beendet.

Das höhere Schwinden der Meßstelle LR ist wahrscheinlich bereits auf die Karbonatisierung randnaher Bereiche (Karbonatisierungstiefe  $d_k$  fast 8 mm) zurückzuführen. Mit zunehmender Lagerungsdauer wächst  $d_k$  annähernd linear und mit  $d_k$  auch das Karbonatisierungsschwinden. Gleichzeitig verringert sich die Masseabnahme, da die Gleichgewichtsfeuchte erreicht ist und eine Massezunahme infolge Karbonatisierung eintritt (s. auch Abschnitt 6.1.2). Die nach etwa 100-tägiger Lagerungsdauer sprunghafte Schwindzunahme für die Meßstelle LA ist vermutlich mit der Veränderung des Eigenspannungszustandes erklärbar. Nach den Versuchsergebnissen ergaben sich bei meßtechnisch vollständiger Karbonatisierung ( $d_k \approx 40$  mm) etwa 3 mal so hohe Schwindwerte (rd. 0,4 mm/m) als beim Trocknungsschwinden.

Die karbonatisierungsbedingte Massezunahme betrug etwa 80 g, d. h. etwa 1,5 M.-%. Dem entspricht, daß nach /G11/ die offene Porosität infolge Karbonatisierung sinkt. Wesentlich größere Schwindwerte von rd. 1,1 mm/m ergaben sich bei Lagerung in mit ca. 5 Vol.-%  $\text{CO}_2$  angereichertem Klima 20/65 (s. Bild 6.20). Die karbonatisierungsbedingte Massezunahme betrug rd. 130 g, d. h. etwa 2,5 M.-%. Nach der vollständigen Karbonatisierung - Lagerungsdauer etwa 100 d - nahm die Masse wieder ab. Dies könnte auf die Abgabe des bei der Karbonatisierung entstandenen Wassers zurückzuführen sein. Für den Zusammenhang zwischen Karbonatisierungstiefe  $d_k$  in mm und Lagerungsdauer  $t$  in d ergab sich:

- werksfrische Steine 2DF, Lagerung im Klima 20/65

$$d_k = 2,87 + 1,20 \cdot \sqrt{t}, \text{ BEST: } 98,6 \%$$

- werksfrische Steine 2DF, wasservorgelagert,

Lagerung im Klima 20/65, ca. 5 Vol.-%  $\text{CO}_2$ :

$$d_k = 1,93 + 5,04 \cdot \sqrt{t}, \text{ BEST: } 97,0 \%$$

Die Versuchsergebnisse stimmen mit den Angaben in /B4/ überein, wonach das Karbonatisierungsschwinden um ein Mehrfaches größer

als das Trocknungsschwinden sein kann und mit höherem  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Lagerungsluft noch zunimmt.

Die hier ermittelten Karbonatisierungsgeschwindigkeiten sind jedoch wegen ggf. abweichender Klimabedingungen und Bauteilverhältnisse (Bekleidung etc.) nicht ohne weiteres auf Praxisfälle übertragbar. Zudem ist der Schwindmechanismus infolge Karbonatisierung noch nicht geklärt, so daß Aussagen darüber, wie das Karbonatisierungsschwinden von der Steinzusammensetzung und den Herstellbedingungen beeinflusst wird, z. Z. nicht möglich sind.

Der Einfluß der Karbonatisierung ist jedoch wegen seiner möglichen Größe zu beachten, insbesondere auch bei Schwinduntersuchungen. Versuchsmäßig ermittelte Schwindwerte können einen meist unbestimmbaren karbonatisierungsbedingten Schwindanteil enthalten, so daß ein "reiner" Trocknungsschwindwert häufig nicht angebar ist.

#### Hauptlagerung

In Bild 6.21 sind die Endwerte in Abhängigkeit der relativen Feuchte dargestellt. Die Lagerungstemperatur betrug bis auf die angegebenen Ausnahmen  $+20\text{ }^\circ\text{C}$ .

Die Endwerte für das Klima 50/17 sind unerwarteterweise klein und liegen meist unter den Endwerten für höhere relative Feuchten. Dies ist vermutlich durch die Porenverteilung erklärbar. Um dies zu verdeutlichen, wird angenommen, daß die Schwindwirksamkeit auch der sehr feinen Poren unter  $r \approx 1\text{ nm}$  (Grenzzradius für  $U \approx 40\%$ ) mit Gleichung 6.13 in Abschnitt 6.2.2 dargestellt werden kann, wobei die Schwindverformung durch andere Vorgänge (Van der Waalssche Kräfte infolge Abgabe von Zwischenschichtwasser) bewirkt wird als im Bereich  $U \gtrsim 40\%$ . Da Angaben über die Porenverteilung für  $r < 10\text{ nm}$  nicht vorliegen /F1/, werden ersatz- und näherungsweise die Gleichgewichtsfeuchten herangezogen. Für das Klima 50/17 ergab sich  $n_{v\infty}$  im Mittel zu  $0,80\text{ Vol.-%}$ . In /H1/ wird  $0,30\text{ Vol.-%}$  angegeben. Mit den mitt-

leren  $h_{v\infty}$ -Werten aus Tabelle 6.2 für andere Klimate und den entsprechenden  $r_{gr}$ -Werten ergeben sich die folgenden  $\epsilon_s/\alpha_v$ -Werte (s. Abschnitt 6.2.2).

Klima	50/17	20/30	20/45	20/55	20/65
$a = \frac{\epsilon_s}{\alpha_v} = h_{v\infty} \cdot \sigma_{kap}$	2,22 0,83 <sup>1)</sup>	3,19	2,97	2,22	2,24
$\frac{a(U)}{a(U=65)}$	0,99 0,37 <sup>1)</sup>	1,42	1,32	0,99	1,0
$\epsilon_{s\infty}(U)$ 2)	-	1,43	1,25	1,13	1,0
$\epsilon_{s\infty}(U=65)$ 3)	0,90	1,40	1,33	1,0	

1) mit  $\bar{h}_{v\infty} = 0,30$  nach /H1/

2) aus Ausgleichsgerade

3) aus Prüfwerten

Deren Verhältnswerte (bezogen auf  $U = 65 \%$ ) stimmen mit den Verhältnswerten der Versuchswerte überein. Grundsätzlich ähnlich wie  $\epsilon_{s\infty} = f(U)$  in Bild 6.21 ist der Zusammenhang zwischen Volumenänderung und Spannung im verdunstbaren Wasser bei Zementstein in Bild 6.21a aus /P8/.

Die niedrigen Endschwindwerte bei Lagerung im Klima 50/17 sind vermutlich auf den sehr geringen Anteil schwindwirksamer wassergefüllter Poren zurückzuführen.

Das würde bedeuten, daß die im Klima 50/17 nach BS 187 /6/ ermittelten Schwindwerte für den baupraktischen Bereich ( $U$  etwa  $> 30 \%$ ) nicht ohne weiteres aussagekräftig sind. Der in /H1/ abgeleitete Abminderungsfaktor von 0,6 mit dem diese Schwindwerte zu multiplizieren sind, um praxisnahe Schwindwerte für  $U = 50 \%$  zu erhalten, wäre demnach falsch, da die oben genannten Gesichtspunkte nicht berücksichtigt wurden. Nach den

hier vorliegenden Untersuchungsergebnissen wäre der Schwindwert für das Klima 50/17 mit einem Faktor von etwa 1,4 zu multiplizieren, damit er dem für das Klima 20/50 entspräche. Die vorangegangenen Ausführungen beziehen sich auf die vorliegenden Angaben über Porenverteilung, Gleichgewichtsfeuchte und Endschwindwerte und gehen von einer nicht gesicherten Annahme aus. Sie können deshalb nur als wahrscheinliche Vermutung angesehen werden.

In grober Näherung kann nach Bild 6.21 für die Meßstelle LR angegeben werden:

$$\varepsilon_{s_{\infty}}(\text{LR}) = 0,538 - 0,0036 \cdot U \quad (U \text{ in } \%).$$

Die  $\varepsilon_{s_{\infty}}$ -Werte für die Meßstelle HR sind um rd. 25 % höher anzusetzen.

Die  $\varepsilon_{s_{\infty}}$ -Werte enthalten möglicherweise gewisse Karbonatisierungsschwindanteile, vor allem bei Lagerung in höherer relativer Luftfeuchte (50 bis 70 %).

Aus den in /I6/ durchgeführten Untersuchungen sind Aussagen über den Einfluß einer Wechsellagerung, d. h. den umkehrbaren Schwindanteil möglich. Kalksandsteinprismen wurden bei 105 °C getrocknet und 2 d in Wasser vorgelagert. Danach lagerten sie im Klima 20/17 bzw. 20/65 und wurden abschließend nochmals getrocknet. Bei Lagerung im Klima 20/17 ergaben sich zwischen Trocknung und Wasserlagerung jeweils annähernd gleichgroße Schwindwerte. Bei Lagerung im Klima 20/65 war der zweite Schwindwert rd. 70 % höher als der erste. Dies ist vermutlich auf Karbonatisierung zurückzuführen. Wahrscheinlich wurde das infolge Karbonatisierung entstandene Wasser bei der zweiten Trocknung vollständig abgegeben und hat zusätzliches Schwinden bewirkt. Auch in /B4/ wurde ein höheres Trocknungsschwinden karbonatisierter Proben festgestellt.

Da bei Lagerung im Klima 20/17 wegen der zu geringen Luftfeuchte nennenswerte Karbonatisierung ausgeschlossen werden kann, stimmen die Versuchsergebnisse mit /B4, P4/ überein, wonach das Schwinden ohne Karbonatisierungseinfluß vollständig umkehrbar ist.

#### 6.2.4.2.3 Leichtbetonsteine und Betonsteine

##### Steinzusammensetzung, Herstellbedingungen

Bei ausreichend langer Vorlagerung (etwa mehr als 2 Wochen) ergaben sich, wie Bild 6.25 zeigt, keine eindeutigen Unterschiede zwischen den  $\epsilon_{s\infty}$ -Werten von Steinen mit Naturbims- und Blähtonzuschlag.

Wegen des wesentlich höheren E-Moduls des dichten Zuschlages sind die Schwindendwerte der Betonsteine (s. Bild 6.26) erwartungsgemäß erheblich kleiner als die der Leichtbetonsteine. Die  $\epsilon_{s\infty}$ -Werte warmbehandelter und nicht warmbehandelter Steine unterschieden sich nicht eindeutig. Dies entspricht den Ergebnissen der Literatursichtung.

##### Steineigenschaften

Ein eindeutiger Einfluß von Rohdichte bzw. Druckfestigkeit auf die  $\epsilon_{s\infty}$ -Werte ergab sich im allgemeinen nicht (s. jedoch Abschnitt Hauptlagerungsart und -dauer).

##### Steinformat

Der Einfluß der Prüfkörpergröße konnte mit den vorliegenden Versuchsergebnissen nicht untersucht werden. Die Endschwindwerte von Hohlblocksteinen unterscheiden sich nicht grundsätzlich von denen der Vollsteine.

##### Meßstelle

Nach Bild 6.23 ist bei den Leichtbetonvollsteinen ein eindeutiger Meßstelleneinfluß im Gegensatz zu den Hohlblocksteinen aus Naturbims nicht zu erkennen. Bei letzteren (s. Bild 6.22)

ergab sich bis auf wenige Ausnahmen der kleinste Endschwindwert für die Meßstelle HR. Annähernd gleichgroß war  $\epsilon_{s\infty}$  (BR).

Die  $\epsilon_{s\infty}$ -Werte der anderen Meßstellen waren im Mittel um bis zu etwa 1/3 größer. Ein erkennbarer Einfluß von Druckfestigkeit oder Kammerzahl ergab sich nicht. Wie Bild 6.24 zeigt, ist dagegen bei Hohlblocksteinen aus Blähton und dichtem Zuschlag ein Meßstelleneinfluß nicht eindeutig festzustellen.

#### Nacherhärtung, Karbonatisierung

Werden Steine ohne Warm- oder Autoklavbehandlung in jungem Alter verwendet, so ist dem Festigkeitsverlauf bei Beton entsprechend die Nacherhärtung beträchtlich, insbesondere, wenn langsamer erhärtende Zemente verwendet werden. Das "Verwendungsalter" unbehandelter Steine wirkt sich nach den vorliegenden Versuchswerten wahrscheinlich erheblich auf die Größe des Endschwindmaßes aus. Dieses ist wesentlich höher bei jungen Steinen.

Über den Einfluß der Karbonatisierung ist keine Aussage möglich, da Versuchsangaben dazu fehlen. Es ist jedoch zu vermuten, daß das Karbonatisierungsschwinden wegen der in der Regel haufwerkporigen Steinstruktur und des somit geringeren Zementsteinanteils relativ gering ist. Die Literaturangaben über erhebliches Karbonatisierungsschwinden bei unbehandelten Betonsteinen /K6, S15/ beziehen sich auf Steine mit geschlossenem Betongefüge.

#### Vorlagerungsart und -dauer

Unmittelbar nach dem Herstellen nur kurz feucht vorgelagerte Leichtbetonsteine aus Naturbims ergaben beträchtlich höhere Endschwindwerte als längere Zeit vorgelagerte Steine. Die Auswertung für eine Hauptlagerung bei  $U = 60$  bis  $65\%$  ergab  $\epsilon_{s\infty}$ -Werte von  $0,8$  bis über  $1,5$  mm/m für kurze Vorlagerungen (Alter von  $1$  bis etwa  $14$  d, während die  $\epsilon_{s\infty}$ -werte länger vorgelagerter Steine sämtlich unter  $0,6$  im Mittel bei rd.  $0,4$  mm/m lagen.

Ähnlich sind die ersten Versuchsergebnisse aus /115/ an Naturbimsbetonprismen ( $\beta_{D28} = 2,5 \text{ N/mm}^2$ ). Bei der Versuchsserie A wurde 7 d feucht vorgelagert, danach lagerten die Prismen im Klima 20/65. Meßbeginn war im Alter von 8 d. Die Prismen der Serie B lagerten ebenfalls 7 d feucht, danach bis zum 28. Tag im Klima 20/65, anschließend 2 d in Wasser und kamen dann ins Klima 20/65. Meßbeginn war im Alter von 31 d. Die  $\epsilon_{s\infty}$ -Werte für Serie B waren um rd. 25 % niedriger als für Serie A.

Beim Vermauern sehr junger Steine ist somit mit hohem Schwinden der Mauerwerkbauteile zu rechnen, was vermutlich einige überraschend hohe  $\epsilon_{s\infty}$ -Werte in der Literatur erklärt.

Für Leichtbetonsteine aus anderem Leichtzuschlag und Betonsteine sind wegen fehlender Angaben keine Aussagen über den Einfluß von Vorlagerungsart und -dauer möglich.

#### Hauptlagerungsart und -dauer

In Bild 6.25 sind die Endschwindwerte aller Versuche mit Leichtbetonsteinen (Voll- und Hbl-Steine) aus Naturbims und Blähtonzuschlag dargestellt. Zwischen Steinen mit Naturbims und den allerdings nur 2 Steinserien mit Blähton ergibt sich kein Unterschied in den Endschwindwerten. Nach den  $\epsilon_{s\infty}$ -Werten für  $U = 65 \%$  scheinen die Hbl-Steine der Festigkeitsklasse 4 stärker zu schwinden als die der Festigkeitsklasse 2. Die jeweiligen Mittelwerte sind 0,45 bzw. 0,30 mm/m. Wegen der wenigen Versuchswerte ( $n = 3$  bzw. 4) kann dieser Unterschied jedoch nicht als gesichert gelten, zumal derartige Unterschiede bei den Vollsteinen nicht zu erkennen sind. Es wurde deshalb ein Gesamtmittelwert berechnet.

Wie bereits erwähnt, sind die  $\epsilon_{s\infty}$ -Werte für eine Feuchtvorlagerungsdauer (Alter) von etwa weniger 14 d sehr viel höher und liegen bis auf 1 Ausnahme zwischen 0,8 und 1,5 mm/m.



Erwartungsgemäß deutlich niedriger sind die  $\epsilon_{s_{\infty}}$ -Werte für Betonsteine aus dichtem Zuschlag, wie Bild 6.26 zeigt. Der Zusammenhang zwischen  $\epsilon_{s_{\infty}}$  und U wurde über den gesamten U-Bereich näherungsweise durch

$$\epsilon_{s_{\infty}} = 0,411 - 0,0028 \cdot U, \text{ BEST: } 80,7 \%$$

beschrieben. Inwieweit das vor allem für den Bereich  $U < 40 \%$  als gesichert angesehen werden kann, bedarf weiterer Untersuchungen.

#### 6.2.4.2.4 Gasbetonsteine

##### Steinzusammensetzung, Herstellbedingungen

Nach Bild 6.28 sind die  $\epsilon_{s_{\infty}}$ -Werte bei Gasbeton mit überwiegend oder ausschließlich Zement als Bindemittel meist größer als bei Gasbeton, der überwiegend oder ausschließlich Kalk enthält. Dies wurde auch in /S10/ festgestellt. In /M3/ werden dagegen etwas höhere Endschwindwerte für Gasbeton aus Kalk angegeben. Vielleicht werden die unterschiedlichen Untersuchungsergebnisse durch die Ergebnisse in /G12/ erklärlich, wo sich ein großer Einfluß der Zementart auf die Größe des Schwindens ergab.

Bei den in Bild 6.28 mit dargestellten  $\epsilon_{s_{\infty}}$ -Werten nach Trocknung bei  $105^{\circ}\text{C}$  waren jedoch die Endschwindwerte bei den Gasbetonen mit überwiegend oder ausschließlich Kalk meist wesentlich größer - etwa rd. doppelt so groß - wie bei den Gasbetonen mit überwiegend oder ausschließlich Zement. Vermutlich ist dies auf Unterschiede in den Porenverteilungen zurückzuführen.

Der Einfluß der Herstellbedingungen konnte wegen fehlender Angaben nicht untersucht werden.

##### Steineigenschaften

Ein eindeutiger Einfluß von Rohdichte bzw. Druckfestigkeit auf die  $\epsilon_{s_{\infty}}$ -werte war nicht erkennbar.

### Steinformat

Ob und ggf. wie sich die  $\epsilon_{S\infty}$ -Werte verschiedenen großer Prüfkörper unterscheiden, konnte anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht untersucht werden. In /S7/ wurden Steine G2 und G6 sowie aus diesen gesägte Prismen bei  $U = 30 \%$  auf Schwinden geprüft. Nach Bild 6.28 sind die  $\epsilon_{S\infty}$ -Werte der Steine deutlich niedriger als die der Prismen. Dies ist jedoch im wesentlichen darauf zurückzuführen, daß die Versuchsdauer zur Bestimmung von  $\epsilon_{S\infty}$  der Steine zu kurz war und die Steine bei Versuchsende einen erheblich höheren Feuchtigkeitsgehalt aufwiesen als die Prismen.

### Meßstelle

In Bild 6.27 sind außer den  $\epsilon_{S\infty}$ -Werten wegen der vermutlich zu kurzen Versuchsdauer bei den Versuchen mit  $U = 30 \%$  auch die  $\epsilon_S$ -Werte bei Versuchsende und die  $\epsilon_{S\infty}$ -Werte zugehöriger Prismen mit dargestellt. Danach ergeben sich zwischen den Endschwindwerten der Meßstellen HR, BR und LR keine eindeutigen Unterschiede. Die gegenüber  $\epsilon_{S\infty}$ (HR) kleineren Endschwindwerte der Meßstellen HA, BA und LA sind wahrscheinlich auf unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalt im Steininneren und im Randbereich zurückzuführen. Dies belegen die  $\epsilon_{S\infty}$ -Werte der Prismen. Daß diese wiederum deutlich größer als auch die  $\epsilon_{S\infty}$ -Werte der Steinrandmeßstellen sind, ist dadurch erklärbar, daß die Schwinddehnung im Steinrandbereich durch den feuchteren weniger schwindenden Kernbereich behindert wird und somit kleiner ist als das freie unbehinderte Schwinden.

Ob die durch den Treibvorgang bedingten unterschiedlichen Porositäten über die Steinlänge (Treibhöhe) und senkrecht dazu /D5, S11/ zu entsprechend unterschiedlichem Schwinden führen, kann aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen nicht sicher beantwortet werden. Nach den Ergebnissen in Bild 6.27 und den vorangegangenen Anmerkungen dazu, sind wesentliche Unterschiede der  $\epsilon_{S\infty}$ -werte innerhalb eines Steines nicht zu erwarten, wenn eine annähernd gleichmäßige Feuchtigkeitsverteilung vorliegt.

### Nacherhärtung, Karbonatisierung

In Bezug auf die Nacherhärtung liegen keine Angaben vor. Sie kann jedoch analog zu der bei Kalksandsteinen als gering angenommen werden.

Auch hinsichtlich Karbonatisierungsschwinden finden sich in der Literatur kaum Hinweise. In /M3/ wird es für Trockenrohlichten von 700 bis 900 kg/m<sup>3</sup> zu 75 % des Trocknungsschwindendwertes angesetzt. Ein wesentlicher Einfluß der Karbonatisierung auf das Schwinden wurde in /S16/ festgestellt. Das Karbonatisierungsschwinden vergrößerte sich erheblich mit Zunahme des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Luft und der Lagerungsdauer. Auch aus den Ergebnissen von Tastversuchen in /I6/ über den Einfluß des Schwindklimas auf den Zusammenhang Schwinden - Feuchtigkeitsgehalt kann auf ein hohes Karbonatisierungsschwinden geschlossen werden. Obwohl bei dieser Versuchsreihe Karbonatisierungstiefen direkt nicht gemessen wurden, ergibt sich aus Bild 6.29 durch Vergleich der  $\epsilon_s$ - und  $h_v$ -Werte für beide Lagerungsarten, daß für das Schwindklima 20/65 der Endwert des Trocknungsschwindens bei etwa 0,3 mm/m liegt (Lagerungsdauer rd. 30 d), das Schwinden anschließend bei gleichzeitig steigendem Feuchtigkeitsgehalt weiter bis auf rd. 0,5 mm/m nach insgesamt rd. 300 d Lagerungsdauer zunimmt. Die Schwinderhöhung kann - wie der Vergleich mit der Lagerung bei 20/17 zeigt - nur auf Karbonatisierung zurückgeführt werden.

Danach muß bei Gasbetonsteinen wie auch bei Kalksandsteinen bei Karbonatisierung mit erheblicher Vergrößerung des Schwindens gerechnet werden, wobei die Einflüsse auf das Karbonatisierungsschwinden im einzelnen noch zu untersuchen sind.

### Vorlagerungsart und -dauer

Der Einfluß von Vorlagerungsart und -dauer auf den Endschwindwert konnte anhand der vorliegenden Untersuchungsergebnisse nicht untersucht werden.

### Hauptlagerungsart und -dauer

Für das Trocknungsschwinden von überwiegend oder ausschließlich mit Kalk hergestelltem Gasbeton (Prüfkörper: Prismen) kann in grober Näherung der in Bild 6.28 dargestellte lineare Zusammenhang zwischen  $\epsilon_{s\infty}$  und U

$$\epsilon_{s\infty} = 0,906 - 0,0097 \cdot U, \text{ BEST: } 81,6 \%$$

angenommen werden.

Bei Betrachtung der allerdings wenigen Einzelwerte  $\epsilon_{s\infty}$  für U = 45 und 65 % ergibt sich jedoch kein wesentlicher Unterschied, so daß vermutlich  $\epsilon_{s\infty}$  (U = 65) auch für U bis 45 % angesetzt werden kann.

Über den umkehrbaren Schwindanteil bei Wechsellagerung feuchttrocken liegen außer von /K6/ keine weiteren Untersuchungsergebnisse vor. Bei /K6/ ergab sich bei Schwinden wasservorgelagerter Prüfkörper in den Klimaten 18/65, 18/45 und 50/17 und anschließender Wasserlagerung jeweils bis zum Gleichgewichtszustand ein umkehrbarer Schwindanteil von im Mittel rd. 80 %.

### 6.2.4.3 Mindestversuchsdauer zur Bestimmung des Endwertes

Die ermittelten min t-Werte streuen im allgemeinen sehr stark. Sie waren zum Teil offensichtlich durch Karbonatisierungsschwinden beeinflusst, zum Teil entsprach min t der Versuchsdauer, so daß ein Teil der min t-Werte nicht aussagekräftig und damit nicht verwertbar war. Aus den relativ wenigen verbleibenden min t-Werten konnten nur grobe Anhaltswerte für die Mindestversuchsdauer abgeleitet werden. Sie sind in der Tabelle 6.6 für Einzelsteine und zum Teil auch für Steinprismen angegeben.

Für Mauerziegel läßt sich min t generell kaum angeben, wenn chemisches Quellen auftritt, da dieses sowohl schneller als auch sehr langsam mit annähernd konstanter Dehnungszunahme je

Zeiteinheit ablaufen kann /S2, S29/. In der Regel wird  $\min t$  bei chemisch quellenden Ziegeln mit 1 bis 2 a anzusetzen sein.

Auch bei Kalksandsteinen ist eine befriedigend genaue Aussage für  $\min t$  nicht möglich. Tritt kein nennenswertes Karbonatisierungsschwinden auf, so wird der Endwert nach 2 bis 6 mon Versuchsdauer errechnet werden können. Bei Prismen ist  $\min t$  etwa 1 mon.

Für Leichtbetonhohlblocksteine und Betonhohlblocksteine kann  $\min t$  zu etwa 6 mon angesetzt werden, während bei Leichtbetonvollsteinen eine etwa doppelt so lange Versuchsdauer erforderlich ist. Dies ist darauf zurückzuführen, daß wegen der fehlenden Luftkammern Austrocknung und Schwinden deutlich langsamer verlaufen als bei den Hohlblocksteinen.

Bei Gasbetonsteinen dürfte  $\min t$  ebenfalls etwa bei 1 a liegen, wobei diese Angabe aufgrund der vorliegenden Versuchsergebnisse sehr unsicher ist. Für Prismen wird eine 1-monatige Versuchsdauer ausreichen, um sichere Endwerte errechnen zu können.

Da  $\min t$  im allgemeinen sehr stark von der Wahl und Dichte der Prüftermine abhängt, ist bei entsprechendem Prüfplan zum Teil eine erheblich geringere Mindestversuchsdauer erreichbar.

#### 6.2.4.4 Zeitlicher Verlauf der Feuchtedehnung

##### 6.2.4.4.1 Allgemeines

Die Auswertung erfolgte mit Hilfe der bezogenen rechnerischen  $\epsilon$ -Werte in der Form

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{\epsilon_h(t)}{\epsilon_{h\infty}} .$$

Im Gegensatz zu Mauerwerk ist der Feuchtedehnungsverlauf von Einzelsteinen nicht von praktischem Interesse. Aus  $\alpha_{\epsilon}$  der Einzelsteine können sich jedoch z. B. verwertbare Hinweise über stoffspezifische Einflüsse und den Einfluß des Prüfklimas erge-

ben. In dieser Hinsicht wurden die vorliegenden Versuchsergebnisse ausgewertet. Andere Auswertungen z. B. hinsichtlich Meßstelle und Steineigenschaften (Rohdichte, Festigkeit etc.) erscheinen nicht zweckmäßig bzw. waren wegen mangelnder Vergleichbarkeit nicht sinnvoll.

#### 6.2.4.4.2 Mauerziegel

In Bild 6.30 ist  $\alpha_e$  für verschieden vorbehandelte Leichtziegel - 48 h Wasser (W), bis ca. 5 Vol.-% Feuchtigkeit (F) und bis zur Massekonstanz bei 105 °C getrocknet (T) - dargestellt. Die Vorbehandlung W ergibt die größte Feuchtedehnungszunahme je Zeiteinheit, bei der Vorbehandlung F nimmt  $\epsilon_h$  am langsamsten zu. Die Endwerte aller 3 Vorbehandlungen unterscheiden sich nicht wesentlich.

Aus Bild 6.31 ist ersichtlich, wie unterschiedlich schnell Mauerziegel chemisch quellen können. Während bei einem Ziegel bereits nach 50 d 90 % des Endwertes erreicht wurden, war dies bei anderen Mauerziegeln erst nach mehreren Jahren der Fall.

#### 6.2.4.4.3 Nichtkeramische Mauersteine

In Bild 6.32 sind  $\alpha_e$ -Kurven für die Schwindklimata 20/65 und 20/30 für jeweils die gleiche Steinsorte und Festigkeitsklasse dargestellt. Wie erwartet schwinden im Klima 20/30 gelagerte Steine deutlich schneller als bei Lagerung im Klima 20/65. Dieser Unterschied ist bei den Gasbetonsteinen unerwartet groß. Nach einem gewissen Anfangsschwinden nimmt das Schwinden im Klima 20/65 während der anschließenden 10 bis 50 d kaum noch zu, während im Klima 20/30 bereits 80 bis 90 % des Endwertes erreicht sind. Das langsame Anfangsschwinden im Klima 20/65 ist auch deshalb unerklärlich, weil die entsprechenden Gasbetonsteine (s. Bild 6.30) nach 10-tägiger Schwinddauer im gleichen Klima bereits rd. 50 % des Endwertes erreicht hatten. Die Ver-

suchswerte weichen im Anfangsbereich bis 10 d (G2) bzw. bis 100 d (G6) von den berechneten Kurvenverläufen zum Teil erheblich ab. In den ersten Tagen der Hauptlagerung liegen die Versuchswerte unter den "Kurvenwerten", so daß sich dadurch der Unterschied zum Klima 20/30 noch mehr vergrößert. Da der Endwert der Einzelsteine über 1 mm/m beträgt und damit mehr als doppelt so hoch wie der des Mauerwerks ist, ist wahrscheinlich Karbonatisierungsschwinden von Einfluß gewesen.

Eine vergleichende Bewertung der Schwindverläufe der verschiedenen Steinsorten ist wegen der unterschiedlichen Formate und Lochanteile nicht möglich. Auf den Feuchtedehnungsverlauf der Mauersteine wird noch in Abschnitt 6.2.5.3.5 Bezug genommen.

#### 6.2.5 Mauerwerk

##### 6.2.5.1 Allgemeines

Folgende mögliche Einflußgrößen auf Verlauf und Endwert der Feuchtedehnung wurden erfaßt und untersucht:

- a) Steineigenschaften
- b) Prüfkörpergröße
- c) Vorlagerungsart und -dauer
- d) Hauptlagerungsart und -dauer
- e) Schwinden in horizontaler und vertikaler Richtung (parallel und senkrecht zu den Lagerfugen), Einfluß des Mörtelschwindens.

Aussagen über Vorlagerungsart und -dauer sind nur in Einzelfällen möglich, da häufig entsprechende Angaben fehlten. Deshalb ist auch vielfach keine exakte Angabe über das Mauerwerkalter bei Beginn der Feuchtedehnungsmessung möglich. Bei den im Institut durchgeführten Versuchen, wo stets 2 d in Wasser und 1 d in Raumluft vorgelagerte Steine vermauert wurden, erfolgte die 1. Messung der Feuchtedehnung im allgemeinen im Alter von 3 bis 5 d. Da diese Versuche den Hauptteil der vorliegenden Versuchs-

reihen darstellen und ansonsten entweder lufttrockene Steine /H3, F8, M1/ (langsameres Schwinden) oder sehr junge Steine bei frühem Meßbeginn /S13/ verwendet wurden, kann in der Regel von einem Mauerwerkalter von etwa 3 d bei Prüfbeginn ausgegangen werden.

Bis auf 2 Ausnahmen /I14, S13/ wurden alle Mauerwerkversuche im Klima 20/65 durchgeführt. Deshalb konnte der Einfluß des Schwindklimas auf Verlauf und Endwert nicht untersucht werden. Da es insbesondere bei Mauerwerk sinnvoll und zum Teil auch erforderlich erschien, zumindest einige Einflußgrößen für alle Steinarten gemeinsam und vergleichend auszuwerten, wurde dieser Abschnitt abweichend vom Abschnitt 6.2.4 "Mauersteine" nach Einflußgrößen unterteilt.

#### 6.2.5.2 Endwerte

##### 6.2.5.2.1 Allgemeines

Hinsichtlich der Bestimmung von Endwerten für Mauerwerk aus Mauerziegeln gelten die Anmerkungen in Abschnitt 6.2.4.2.1.

##### 6.2.5.2.2 Steineigenschaften

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse ergaben sich im allgemeinen keine Zusammenhänge zwischen Steineigenschaften und dem Endwert der Feuchtedehnung. Bei Mauerwerk aus Leichtziegeln der Festigkeitsklassen 2 und 12 waren die  $\epsilon_{h\infty}$ -Werte für die höhere Festigkeitsklasse nur etwa halb so groß wie die für die niedrigere Festigkeitsklasse. Dies ist vermutlich auf unterschiedliche Brenntemperaturen und/oder verschiedene Rohstoffzusammensetzung zurückzuführen. Eine unterschiedliche Vorbehandlung der Steine vor dem Vermauern (2 d Wasser, bzw. Trocknen bei 105 °C bzw. ein Feuchtigkeitsgehalt von 5 Vol.-%) ergab keine nennenswerten Unterschiede zwischen den  $\epsilon_{h\infty}$ -Werten. Bei Mauerwerk aus Kalksandsteinen wurde entsprechend wie bei



den Einzelsteinen erwartungsgemäß kein Zusammenhang zwischen Steindruckfestigkeit und Endschwindwert festgestellt. Ein derartiger Zusammenhang ergibt sich nach Bild 6.33 überwiegend bei Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen mit Naturbimszuschlag. Bleiben die Versuchswerte für Hbl-3K und für die Wände unberücksichtigt, so ergibt sich

$$\epsilon_{s\infty} = 0,246 + 0,027 \cdot \beta_{D,st} \quad (\text{BEST} = 55,2 \%)$$

Danach sind die  $\epsilon_{s\infty}$ -Werte der Steinfestigkeitsklassen 4 und 6 um 22 % bzw. 45 % höher als die der Festigkeitsklasse 2.

Ein Einfluß der Kammerzahl oder ein nennenswerter Unterschied zwischen Voll- und Hohlblocksteinen ergibt sich aus den vorliegenden Versuchsergebnissen nicht. Der in 2 Versuchsreihen an Mauerwerk aus Hbl 2-4K (NB) untersuchte Einfluß unterschiedlicher "Vermauerungsfeuchte" der Steine ergab für wasservorgelagerte Steine um rd. 1/3 höhere Endschwindwerte als für Steine die mit  $h_v = 10$  Vol.-% vermauert wurden. Bei den Einzelsteinen war praktisch kein Unterschied aufgetreten. Bei Leichtbetonhohlblocksteinen aus Naturbims ergaben sich unter Verwendung relativ junger, 4 Wochen alter Steine im Klima 18/55 erheblich größere und zwar rd. doppelt so hohe  $\epsilon_{s\infty}$ -Werte wie bei Mauerwerk aus älteren Steinen (s. auch Abschnitt 6.2.4.2.3).

Für Mauerwerk aus Leichtbetonhohlblocksteinen mit Blähtonzuschlag und aus Betonsteinen mit dichtem Zuschlag liegt nur jeweils 1 Versuchswert vor.

Bei Gasbetonsteinmauerwerk war bei der einzigen für den Vergleich heranziehbaren Versuchsreihe der  $\epsilon_{s\infty}$ -Wert für G2 rd. doppelt so groß wie der für G6. Tendenzmäßig ähnlich sind die Ergebnisse von 2 anderen Versuchsreihen. Inwieweit hierbei Karbonatisierungsschwinden von Einfluß war, kann anhand der Versuchangaben nicht geklärt werden.

### 6.2.5.2.3 Prüfkörpergröße

Der Einfluß der Prüfkörpergröße wurde mit Hilfe der wirksamen Dicke nach DIN 4227 Teil 1 /3/

$$d_{ef} = \frac{2A}{u}$$

untersucht. Da wie erwähnt, sämtliche Mauerwerkversuche im annähernd gleichen Klima durchgeführt wurden, kann und muß der Faktor  $k_{ef}$  (Einfluß der Feuchte des Lagerungsklimas auf  $d_{ef}$ ) zunächst unberücksichtigt bleiben. In Bild 6.34 ist  $\epsilon_{h_{\infty}}$  in Abhängigkeit von  $d_{ef}$  dargestellt. Danach nimmt  $\epsilon_{h_{\infty}}$  im Gegensatz zu DIN 4227 bis auf 1 Ausnahme mit wachsendem  $d_{ef}$  zu. Die Überprüfung des Feuchtigkeitsgehaltes der verschiedenen Prüfkörper bei Versuchsende  $h_{v,max t}$  ergab keine wesentlichen Unterschiede. Der Wert  $h_{v,max t}$  war bei den Wand- und größeren Pfeilerprüfkörpern bis auf Mauerwerk aus G6/MG II (Wand: 3,2 Vol.-%, Pfeiler: 3,7 Vol.-%) nicht kleiner als bei den kleineren Pfeilerprüfkörpern. Danach kann im allgemeinen ausgeschlossen werden, daß die höheren  $\epsilon_{h_{\infty}}$ -Werte der Prüfkörper mit größerem  $d_{ef}$ -Wert auf geringeren Feuchtigkeitsgehalt zurückzuführen sind. Ob die Schwindendwerte dickerer Bauteile tatsächlich wie in DIN 4227 deutlich kleiner sind als die von dünneren Bauteilen ist offensichtlich nicht ganz unumstritten /C14, L9/.

Als Ursachen für den unterschiedlichen Einfluß der wirksamen Dicke bei Mauerwerk und Beton kommen in Betracht:

- die im allgemeinen wesentlich stärkere Nacherhärtung bei Beton, die sich vor allem bei dickeren, im Kernbereich lange feucht bleibenden Bauteilen auf Porenverteilung, Festigkeit und Verformbarkeit und damit auf das Schwinden auswirken kann,
- Unterschiede in der Porenstruktur (Beton besitzt in der Regel einen größeren Feinporenanteil als die Mauersteine),
- Unterschiede im Austrocknungsverhalten (Kapillarität, Diffusionswiderstand),

- Unterschiede im Ablauf und in der Auswirkung der Karbonatisierung.

Um die Versuchsergebnisse in allgemeiner Form auswerten zu können, wurden die Endwerte der Feuchtedehnung einer Versuchsreihe (gleiches Mauerwerk, gleiche Versuchsbedingungen, unterschiedliche Prüfkörpergröße) jeweils auf den Endwert der 240 mm dicken Mauerwerkwand bezogen:

$$\Delta \epsilon = \left( 1 - \frac{\epsilon_{h\infty}}{\epsilon_{h\infty, 240}} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad . \quad (6.20)$$

Der daraus errechnete  $\Delta \epsilon$ -Wert wurde auf die Differenz der wirksamen Dicke

$$\Delta d_{ef} = d_{ef} - d_{ef, 240} \quad [\text{mm}]$$

bezogen:

$$a_{d_{ef}} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta d_{ef}} \quad [\%/mm] \quad \text{bzw.} \quad [10^{-2} \text{ mm}^{-1}] \quad .$$

Aus 14 Einzelwerten ergab sich ein mittlerer  $a_{d_{ef}}$ -Wert von  $0,0017 \text{ mm}^{-1}$ . Damit kann  $d_{ef}$  im Bereich von rd. 80 bis 240 mm näherungsweise durch den Ansatz

$$\epsilon'_{h\infty} = \epsilon_{h\infty} (1 - (240 - d_{ef}) 0,0017) \quad (6.21)$$

berücksichtigt werden.

Danach ergibt sich für Pfeiler mit einem Querschnitt von  $240 \text{ mm} \cdot 240 \text{ mm}$  gegenüber  $240 \text{ mm}$  dicken Wänden ein im Mittel um rd. 20 % kleinerer  $\epsilon_{h\infty}$ -Wert. Ein Einfluß von Steinart, Festigkeitsklasse oder Kammerzahl war eindeutig nicht zu erkennen.

#### 6.2.5.2.4 Vorlagerungsart und -dauer

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen war ein Einfluß von Vorlagerungsart und -dauer nicht feststellbar. Der Einfluß konnte allerdings wegen der nicht darauf ausgerichteten Untersuchungen und wegen des möglichen Karbonatisierungsschwindens

als zusätzliche Einflußgröße auch nicht systematisch untersucht werden.

#### 6.2.5.2.5 Hauptlagerungsart und -dauer

Da, wie erwähnt, die meisten Versuche im Klima 20/65 durchgeführt wurden, konnte die Einflußgröße Hauptlagerungsart allgemein nicht untersucht werden.

Bei einer Versuchsreihe mit im Freien geschützt gelagerten Mauerwerkswänden aus Leichtbetonsteinen Hbl 2 (NB) und V2 (NB) /G5/ ergaben sich  $\epsilon_s$ -Werte bei Versuchsende (in etwa  $\epsilon_{s\infty}$ -Werten gleichzusetzen), die im Vergleich zu Versuchen im Klima 20/65 meist etwas niedriger sind. Hohe  $\epsilon_{s\infty}$ -Werte wurden in /S13/ an Mauerwerk aus relativ jungen Hbl 2- und Hbl 4-Steinen mit Naturbimszuschlag im Schwindklima 18/55 ermittelt. Wie auch die Auswerteergebnisse für die Einzelsteine zeigen (s. Abschnitt 6.2.4.2.3 und Bild 6.25), wäre infolge der gegenüber 65 % niedrigeren relativen Luftfeuchte von 55 % eine wesentlich geringere Erhöhung der  $\epsilon_{s\infty}$ -Werte zu erwarten gewesen. Offensichtlich hat sich hier die Verwendung junger Steine stark schwinderhöhend ausgewirkt.

Bei Gasbetonmauerwerk ergaben sich in /I14/ bei Lagerung im Klima 20/45 erwartungsgemäß höhere  $\epsilon_{s\infty}$ -Werte als bei anderen in etwa vergleichbaren Versuchsserien im Klima 20/65. Quantitative und allgemeine Aussagen über den Einfluß des Schwindklimas auf  $\epsilon_{s\infty}$  sind aus den anfangs genannten Gründen und wegen der nicht mit dieser Zielrichtung durchgeführten und deshalb auch nicht ohne weiteres vergleichbaren Versuche nicht möglich.

### 6.2.5.2.6 Schwinden in horizontaler und vertikaler Richtung

#### 6.2.5.2.6.1 Vergleich der Endwerte $\epsilon_{h\infty}(v)$ , $\epsilon_{h\infty}(h)$

In Bild 6.35 sind die  $\epsilon_{h\infty}(v)$  - und  $\epsilon_{h\infty}(h)$  -Werte für Mauerwerk-  
wände und die verschiedenen Steinsorten dargestellt. Dabei  
wurde der im allgemeinen unterschiedliche Fugenanteil in hori-  
zontaler und vertikaler Richtung durch

$$\Delta f_a = \frac{d_f}{h_{st}}(v) - \frac{d_f}{h_{st}}(h)$$

mit erfaßt und klassenmäßig unterteilt gekennzeichnet. Ein Ein-  
fluß von  $\Delta f_a$  ist aus Bild 6.35 nicht zu erkennen. Allerdings  
liegen auch zu wenige in dieser Richtung auswertbare Versuchs-  
ergebnisse vor. Die Endwerte beider Richtungen unterscheiden  
sich um höchstens rd. 0,15 mm/m. Bei den üblicherweise auftre-  
tenden  $\epsilon_{h\infty}$  -Werten im Bereich bis zu etwa 0,6 mm/m sind  
die  $\epsilon_{h\infty}(h)$ -Werte meist größer als die  $\epsilon_{h\infty}(v)$ -Werte.

Es ergaben sich folgende mittlere Verhältniswerte

$$a_{v,h} = \frac{|\epsilon_{h\infty}(v)|}{|\epsilon_{h\infty}(h)|}$$

Mauerwerk aus	$a_{v,h}$	Anzahl der Prüfwerte
Kalksandsteinen Gasbetonsteinen	0,96	5
Leichtbetonhohlblock- steinen (NB)	1,05	9
Leichtbetonvollsteinen (NB)	0,85	4
Mauerziegel	1,00	2
Alle Versuchsergebnisse	0,98	20

Danach besteht bis auf Mauerwerk aus Leichtbetonvollsteinen  
kein oder nur ein geringer Unterschied zwischen den Feuchte-  
dehnungsendwerten in horizontaler und vertikaler Richtung. Nach  
den Versuchsergebnissen über den Einfluß der Meßstelle auf  $\epsilon_{h\infty}$   
bei den Einzelsteinen (s. Abschnitt 6.2.4.2), unterscheiden

sich die  $\epsilon_{h\infty}$ -Werte der Meßstellen HA, BA und LA bei Mauerziegeln, Kalksandsteinen und Gasbetonsteinen nicht nennenswert. Von daher war somit kein wesentlicher Unterschied zwischen  $\epsilon_{h\infty}$  in horizontaler und vertikaler Richtung bei Mauerwerk zu erwarten, was die  $a_{v,h}$ -Werte bestätigen. Wegen des im Vergleich zu Mauersteinen höheren Mörtelschwindens und des größeren Fugenan- teils in vertikaler Richtung waren etwas größere  $\epsilon_{s\infty}$ -Werte in dieser Richtung vermutet worden. Bei den Leichtbetonhohlblock- steinen sind die  $\epsilon_{h\infty}$ -Werte der Meßstelle HA stets und meist deutlich größer als die der Meßstelle LA, so daß der  $a_{v,h}$ -Wert über 1 mit diesen Ergebnissen grundsätzlich in Einklang steht.

Überraschend ist dagegen der niedrige  $a_{v,h}$ -Wert für Mauerwerk aus Leichtbetonvollsteinen, zumal sich bei den Einzelsteinen grundsätzliche Unterschiede zwischen den Meßstellen der ver- schiedenen Steinachsen nicht ergaben. Möglicherweise kann der größere  $\epsilon_{h\infty}$ -Wert in horizontaler Richtung durch unterschied- lichen Einfluß des Mörtelschwindens senkrecht und parallel zu den Lagerfugen erklärt werden. Im folgenden wird versucht, die- sen Einfluß abzuschätzen.

#### 6.2.5.2.6.2 Rechnerische Abschätzung des Einflusses des Mörtel- schwindens

##### Allgemeines

In vertikaler Richtung (senkrecht zu den Lagerfugen) kann bei Mauerwerk im Läuferverband von einer additiven Überlagerung von Mörtelschwinden der Lagerfugen und der Steinfeuchtedehnung aus- gegangen werden. Der Einfluß der Mörtelstoßfugen kann vernach- lässigt werden wegen:

- der in der Regel wesentlich höheren Steinsteifig- keit ( $d_f/l_{st} \leq 0,04$ ) und
- der im allgemeinen unvollständigen Stoßfugenvermörtelung so- wie der meist geringen Scherfestigkeit Mörtel-Stein.

Das höhere Mörtelschwinden wird bestenfalls im stoßfugennahen Bereich zu einer Steinverkürzung führen. Bei Mauerwerk im Läufer-Binder-Verband kann der Stoßfugeneinfluß dagegen nicht ohne weiteres unberücksichtigt bleiben, wenn kleinformatische Steine verwendet werden. So ist bei 2DF-Steinen in der Binderschicht  $d_f/b_{st} = 0,09$ , also rd. doppelt so hoch wie beim zuvor betrachteten Fall. Vor allem bei Steinen mit kleinem E-Modul ist eine nennenswerte Verkürzung infolge höherem Mörtelschwinden zu erwarten, die jedoch nur für jede 2. Schicht wirksam wird. Diese Verkürzung wird mit Hilfe der Steifigkeitsverhältnisse ermittelt und näherungsweise über die Steinbreite als konstant angenommen. Zu berücksichtigen wäre grundsätzlich auch der Einfluß der innen liegenden durchlaufenden Stoßfuge der Läuferschicht. Hier ist jedoch  $(d_f/2)/b_{st} \stackrel{<}{=} 0,04$  wieder sehr klein, so daß dieser Einfluß vernachlässigt wird.

In horizontaler Richtung (parallel zu den Lagerfugen) führt das höhere Schwinden der Lagerfuge zu zusätzlicher Verkürzung des Mauerwerks. Diese wird wieder aus den Steifigkeiten bestimmt und näherungsweise über die Steinhöhe als konstant angenommen. Der Einfluß der innen durchlaufenden Stoßfuge beim Läufer-Binder-Mauerwerk wird nicht berücksichtigt, weil er nur in jeder 2. Steinschicht auftritt und  $(d_f/2)/b_{st} \stackrel{<}{=} 0,04$  klein ist.

Von den im folgenden angegebenen Rechenansätzen wird am ehesten der Ansatz zutreffen, mit dem der Einfluß der Lagerfuge auf das vertikale Schwinden bestimmt wird. Mit relativ großer Aussageunsicherheit sind dagegen die Ansätze behaftet, die den Stoßfugeneinfluß berücksichtigen, da dieser u. a. von der Vollfügeigkeit und Verbundwirkung abhängt. Diese Einflüsse sind nicht erfaßbar. Erhebliche Unsicherheit besteht auch hinsichtlich der Größe der E-Moduln von Mörtel und Mauersteinen.

Rechenansätze

a) Schwinden in vertikaler Richtung

a1) Lagerfugeneinfluß

Es wird von additiver Überlagerung des Mörtelschwindens und der Feuchtedehnung des Steines ausgegangen:

$$\epsilon_{h_{\infty},mw} = \frac{\epsilon_{h_{\infty},st} \cdot h_{st} + \epsilon_{h_{\infty},m\ddot{o}} \cdot d_f}{d_f + h_{st}} \quad (6.22)$$

und mit  $\alpha_1 = d_f/h_{st}$  ergibt sich

$$\epsilon_{h_{\infty},mw} = \frac{\epsilon_{h_{\infty},st} + \epsilon_{h_{\infty},m\ddot{o}} \cdot \alpha_1}{\alpha_1 + 1} \quad (6.23)$$

bzw.

$$\epsilon_{h_{\infty},mw} = \epsilon_{h_{\infty},st} + \Delta\epsilon_{h_{\infty}} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + 1} \quad (6.24)$$

mit

$$\Delta\epsilon_{h_{\infty}} = \epsilon_{h_{\infty},m\ddot{o}} - \epsilon_{h_{\infty},st}$$

a2) Stoßfugeneinfluß (Läufer- und Binderschichten)

Es wird nur der Stoßfugenbereich in der Binderschicht berücksichtigt (s. obige Begründung dazu). Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Steifigkeiten wird

$$\epsilon_{h_{\infty},st} = \epsilon_{h_{\infty},st} + \Delta\epsilon_{h_{\infty}} \cdot \frac{A_{m\ddot{o}} \cdot E_{m\ddot{o}}}{A_{m\ddot{o}} \cdot E_{m\ddot{o}} + A_{st} \cdot E_{st}} \quad (6.25)$$

und mit

$$\alpha_2 = \frac{A_{m\ddot{o}} \cdot E_{m\ddot{o}}}{A_{st} \cdot E_{st}} = \frac{b_f}{b_{st}} \cdot \frac{E_{m\ddot{o}}}{E_{st}}$$

ergibt sich

$$\epsilon_{h_{\infty},mw} = \epsilon_{h_{\infty},st} + \Delta\epsilon_{h_{\infty}} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + 1} \quad (6.26)$$

Da dieser Einfluß nur in jeder 2. Steinschicht auftritt, wird

$$n_{h_{\infty},mw} = n_{h_{\infty},st} + 0,5 \cdot \Delta\epsilon_{h_{\infty}} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + 1} \quad (6.27)$$



Bei Mauerwerk im Läuferverband kann der Stoßfugeneinfluß im allgemeinen wegen des kleinen  $\alpha_2$ -Wertes vernachlässigt werden.

b) Schwinden in horizontaler Richtung

Es wird nur der Einfluß der Lagerfuge berücksichtigt. Dies kann analog a2) geschehen:

$$\epsilon_{h\infty, mw} = \epsilon_{h\infty, st} + \Delta\epsilon_{h\infty} \cdot \frac{\alpha_3}{\alpha_3 + 1} \quad (6.28)$$

mit

$$\alpha_3 = \frac{d_f}{h_{st}} \cdot \frac{E_{m\ddot{o}}}{E_{st}} .$$

In den Bildern 6.36 bis 6.38 ist der mit den obigen Ansätzen errechnete Anteil des Mörtelschwindens  $\Delta\epsilon_{h\infty}$  an der Feuchtedehnung des Mauerwerks

$$\epsilon_{h\infty, mw} = \epsilon_{h\infty, st} + \Delta\epsilon_{h\infty}$$

in Abhängigkeit von  $\epsilon_{h\infty, st}$  dargestellt. Dabei wurde  $\epsilon_{h\infty, m\ddot{o}} = 0,8 \text{ mm/m}$  (Klima 20/65) als mittlerer Endschwindwert nach Tabelle 6.3 angesetzt. Für den üblichen Bereich der  $\epsilon_{h\infty, st}$ -Werte von  $-0,2$  bis  $+0,5 \text{ mm/m}$  beträgt danach der Mörtelschwindanteil bezogen auf  $\epsilon_{h\infty, mw}$

in vertikaler Richtung

- 4 bis 50 % je nach Steinhöhe (52 bis 238 mm) für Mauerwerk im Läuferverband
- 8 bis 60 % je nach  $E_{m\ddot{o}}/E_{st}$  für Mauerwerk im Läufer-Binder-Verband aus 2DF-Steinen

in horizontaler Richtung

- 2 bis 70 % je nach  $E_{m\ddot{o}}/E_{st}$  und Steinhöhe (113 und 238 mm).

Die Bilder veranschaulichen den großen Einfluß der Steifigkeitsverhältnisse vor allem auf  $\epsilon_{h\infty, mw}(h)$ . So führt die Kombination von hochfestem Mörtel und niedrigfesten Steinen (z. B.

V2/MG III) zu erheblicher Vergrößerung von  $\epsilon_{h\infty, mw}$  infolge Mörtelschwinden.

c) Verhältnswert  $a_{v,h}$

Für Mauerwerk im Läuferverband ergibt sich aus a) und b)

$$a_{v,h} = \frac{\epsilon_{h\infty, st(HA)} + \Delta\epsilon_{h\infty} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_1+1}}{\epsilon_{h\infty, st(LA)} + \Delta\epsilon_{h\infty} \cdot \frac{\alpha_3}{\alpha_3+1}} \quad (6.29)$$

Für Mauerwerk mit Läufer- und Binder-Schichten wird

$$a_{v,h} = \frac{\epsilon_{h\infty, st(HA)} + \Delta\epsilon_{h\infty} \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_1+1} + 0,5 \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_2+1} \right)}{\epsilon_{h\infty, st(LA)} + \Delta\epsilon_{h\infty} \cdot \frac{\alpha_3}{\alpha_3+1}} \quad (6.30)$$

In Bild 6.39 sind  $a_{v,h}$ -Werte für beide Mauerwerkverbände und den möglichen Bereich von  $E_{m\ddot{o}}/E_{st}$  dargestellt. Der Einfachheit halber wurde  $\epsilon_{h\infty, st(HA)} = \epsilon_{h\infty, st(LA)}$  angenommen. Mit zunehmendem Verhältnswert  $E_{m\ddot{o}}/E_{st}$  vergrößert sich bei sonst gleichen Bedingungen  $\epsilon_{h\infty, mw(h)}$  gegenüber  $\epsilon_{h\infty, mw(v)}$ . Bei kleinen  $E_{m\ddot{o}}/E_{st}$ -Werten ( $\leq 1$ ) überwiegt wegen der höheren Steinsteifigkeit der additive Einfluß des Mörtelschwindens (Lagerfuge) in vertikaler Richtung und führt zu größeren  $\epsilon_{h\infty, mw(v)}$ -Werten. Der Einfluß des Mörtelschwindens macht sich natürlich vor allem bei kleinen  $\epsilon_{h\infty, st}$ -Werten bemerkbar. In Bild 6.40 schließlich ist

$$\Delta\epsilon_{h\infty, mw} = \epsilon_{h\infty, mw(h)} - \epsilon_{h\infty, mw(v)}$$

dargestellt. Danach sind bei extremen Gegebenheiten (hoher Verhältnswert  $E_{m\ddot{o}}/E_{st}$ , kleine Steinhöhe, Läuferverband) und  $\epsilon_{h\infty, st} = -0,20$  mm/m  $\Delta\epsilon_{h\infty, mw}$ -Werte von rd. +0,30 mm/m zu erwarten. Für übliche Verhältnisse ( $E_{m\ddot{o}}/E_{st} \approx 0,5$  bis 2) wird  $\Delta\epsilon_{h\infty, mw}$  im Bereich von rd. -0,05 bis rd. +0,10 mm/m liegen.

### 6.2.5.2.6.3 Vergleich der Endwerte $\epsilon_{h\infty}(v)$ , $\epsilon_{h\infty}(h)$ unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Mörtelschwindinflusses

Mit Hilfe der Rechenansätze im vorangegangenen Abschnitt wurde die durch den Einfluß des Mörtelschwindens bedingte Differenz

$$\Delta\epsilon_{h\infty,mw} = \epsilon_{h\infty,mw}(h) - \epsilon_{h\infty,mw}(v)$$

für die vorliegenden Versuchswerte berechnet und von  $\epsilon_{h\infty}(v)$  abgezogen. Damit sind  $\epsilon_{h\infty,mw}(h)$  und  $\epsilon_{h\infty,mw}(v)$  vom unterschiedlichen Einfluß des Mörtelschwindens bereinigt und müßten, abgesehen von Unterschieden zwischen den  $\epsilon_{h\infty,st}$ -Werten für HA, BA, LA gleichgroß sein.

Die "korrigierten"  $\epsilon_{h\infty}$ -Werte sind in Bild 6.41 dargestellt. Der Vergleich mit Bild 6.35 zeigt die erwartete bessere Übereinstimmung. Danach kann zumindest im Bereich üblicher Endwerte (-0,20 bis +0,50 mm/m) von gleichgroßen Feuchtedehnungsendwerten des Mauerwerks senkrecht und parallel zu den Lagerfugen ausgegangen werden, wenn nicht wesentliche Unterschiede zwischen  $\epsilon_{h\infty,st}(HA)$  und  $\epsilon_{h\infty,st}(LA)$  auftreten und  $\Delta\epsilon_{h\infty,mw}$  infolge Mörtelschwinden ausreichend klein ist. Ansonsten kann  $\epsilon_{h\infty,mw}$  einer Schwindrichtung mit Hilfe der Rechenansätze oder Diagramme für die andere Richtung errechnet werden.

### 6.2.5.2.7 Mindestversuchsdauer zur Bestimmung des Endwertes

Die min t-Werte für die Meßstelle MV sind in Bild 6.42 dargestellt. Das Bild enthält nur min t-Werte aus Versuchsreihen bei denen min t deutlich kleiner als max t war. Auf eine Darstellung der min t-Werte für die Meßstellen MH und die der Steinmeßstellen wurde wegen der im allgemeinen großen Streuung der min t-Werte verzichtet. Da min t wesentlich von der Einteilung der Prüftermine (zeitliche Staffelung und Prüfdichte) und der Konstanz der klimatischen Bedingungen abhängt, können die errechneten Werte nur Anhaltswerte sein, zumal auch das Berechnungskriterium mit der höchstzulässigen Abweichung vom Endwert

aus allen Versuchswerten von +10 % willkürlich festgelegt wurde. Die im Bild eingeklammerten min t-Werte erscheinen im Vergleich zu den anderen min t-Werten unwahrscheinlich.

Bei Mauerwerk aus Mauerziegeln ist min t wegen der vielfach fast linearen zeitlichen Zunahme der Feuchtedehnung nur in wenigen Fällen angebar. Die min t-Werte für Leichtziegel unterscheiden sich wenig. Ein Einfluß der wirksamen Dicke  $d_{ef}$  ist nicht erkennbar, allerdings ist für  $d_{ef} = 240$  auch nur ein min t-Wert vorhanden. Auch hinsichtlich Steinfestigkeitsklasse und Steinvorbehandlung zeigte sich kein Einfluß auf min t. Im Mittel beträgt min t rd. 2 a.

Beim Mauerwerk aus Kalksandsteinen nimmt min t tendenzmäßig mit wachsendem  $d_{ef}$  zu. Andere Einflußgrößen sind wegen der geringen Wertezahl nicht zu beurteilen. Für Pfeiler mit  $d_{ef} = 120$  und 160 betrug min t rd. 2 mon. Für Wände ( $d_{ef} = 240$ ) aus wasser- vorlagerten Steinen wird min t mit rd. 1 a anzusetzen sein.

Sehr stark unterscheiden sich die min t-Werte bei Mauerwerk aus Leichtbetonhohlblocksteinen mit Naturbimszuschlag. Ein Einfluß von Steinfestigkeitsklasse und Kammerzahl ist nicht erkennbar. Die min t-Werte für Wände mit  $d_{ef} = 240$  liegen zwischen 3 mon und 1,5 a, im Mittel bei rd. 1 a. Die min t-Werte von Pfeilern mit  $d_{ef} = 160$  betragen 2 mon bis rd. 1,5 a, im Mittel rd. 7 mon.

Beim Mauerwerk aus Leichtbetonvollsteinen mit Naturbims ergab sich kein deutlicher Einfluß von  $d_{ef}$  und Steinfestigkeitsklasse. Ob, wie sich nach Bild 6.42 anzudeuten scheint, die höherfesten Steine auch größere min t-Werte bewirken, bedarf weiterer Untersuchungen. Die min t-Werte liegen zwischen 5 und 12 mon, im Mittel bei 9 mon.

Die im Bild mit dargestellten insgesamt nur 4 min t-Werte für Gasbetonmauerwerk und Mauerwerk aus Blähtonbeton- und Normal-

betonsteinen erscheinen bis auf letztere zu hoch. Es ist zu vermuten, daß dafür Klimaschwankungen und ggf. Karbonatisierungsschwinden verantwortlich sind.

In der Tabelle 6.6 wurden die min t-Werte für Mauerwerk als Anhaltswerte zusammengestellt. Sie wurden aus Sicherheitsgründen und wegen der Abstimmung auf die min t-Werte der Einzelsteine meist etwas höher als zuvor angegeben angesetzt.

### 6.2.5.3 Zeitlicher Verlauf der Feuchtedehnung

#### 6.2.5.3.1 Allgemeines

Die Auswertung erfolgte mit Hilfe der bezogenen rechnerischen  $\epsilon$ -Werte in der Form

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{\epsilon_h(t)}{\epsilon_{h\infty}} .$$

#### 6.2.5.3.2 Prüfkörpergröße

In Bild 6.43 sind die  $\alpha_{\epsilon}$ -Werte in Abhängigkeit von der Schwinddauer dargestellt. Die einzelnen Kurven wurden zum Teil aus mehreren Einzelkurven für eine Steinart, gleiche wirksame Dicke  $d_{ef}$  und gleiche Versuchsbedingungen gemittelt. Vergleichsweise wurden in Bild 6.43a die Kurven aus DIN 4227 mit dargestellt. Wegen der zum Teil sehr unterschiedlich verlaufenden Feuchtedehnung bei Mauerwerk aus Mauerziegeln, wurde auf deren Darstellung verzichtet. Alle Mauerwerkkurven gelten für unverputztes Mauerwerk und ein Schwindklima von 20/65.

Die Darstellung des Schwindverlaufes von Mauerwerk in Abhängigkeit von den wesentlichen Einflußgrößen (Steinart, wirksame Dicke, Vorlagerung, Schwindklima) durch einen mathematischen Ansatz erscheint erst nach entsprechender Absicherung und Ergänzung der vorliegenden Auswerteergebnisse sinnvoll.

Nach Bild 6.43 ergibt sich zunächst erwartungsgemäß schnelleres Schwinden mit abnehmender wirksamer Dicke. Das Bild zeigt aber auch den zum Teil sehr unterschiedlichen Schwindverlauf für verschiedene Steinarten.

Der Vergleich für die in allen Fällen vorhandene wirksame Dicke von 240 mm (Wände,  $d = 240$  mm) und Mauerwerk aus wasservorge-lagerten Steinen ergibt, daß Leichtbetonmauerwerk aus Naturbimsbetonsteinen am langsamsten schwindet bei vernachlässigbarem Unterschied zwischen Hohlblock- und Vollsteinen. Dies war wegen der langsamen Feuchtigkeitsabgabe der kapillararmen Steine auch zu erwarten. Mauerwerk aus Kalksandsteinen schwindet wesentlich schneller, was auf die erheblich höhere Kapillarität zurückzuführen ist. Am schnellsten schwindet Gasbetonmauerwerk (G6).

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Steinarten entstehen im wesentlichen durch verschieden hohes und schnelles Anfangsschwinden. Sie entsprechen nicht den Unterschieden im Austrocknungsverlauf (Bild 6.11).

Deutlich langsamer schwinden Kalksandsteinmauerwerkswände aus lufttrocken vermauerten Steinen.

Der Schwindverlauf nach DIN 4227 entspricht bis auf den Anfangsbereich in etwa dem von Leichtbetonmauerwerk (Bild 6.43a).

Die dargestellten Kurven für Mauerwerk können für Kalksandsteine und insbesondere für Leichtbetonsteine aus Naturbims als relativ gut abgesichert angesehen werden. Bei Mauerwerk aus Gasbetonsteinen lag nur eine auswertbare Versuchsreihe vor.

Anhand der in Bild 6.43 dargestellten Kurven kann der Schwindanteil von Mauerwerk für einen bestimmten Zeitraum und für das Klima 20/05 unter Berücksichtigung der vorangegangenen Anmerkungen näherungsweise aus

$$\epsilon_s(t_2 - t_1) = \epsilon_{s\infty} \cdot (\alpha_{\epsilon, t_2} - \alpha_{\epsilon, t_1})$$

abgeschätzt werden.

### 6.2.5.3.3 Verlauf der Feuchtedehnung senkrecht (v) und parallel (h) zu den Lagerfugen

Die Kurven  $\alpha_{\epsilon, v}$  bzw.  $\alpha_{\epsilon, h} = f(t)$  sind in den Bildern 6.44 bis 6.48 dargestellt. Der Unterschied zwischen  $\alpha_{\epsilon, v}$  und  $\alpha_{\epsilon, h}$  war im allgemeinen gering. Häufig war  $\alpha_{\epsilon, v}$  etwas größer als  $\alpha_{\epsilon, h}$ . Aus der vergleichenden Gesamtbetrachtung aller Bilder ergibt sich:

- bis auf Mauerwerk aus lufttrocken vermauerten Kalksandsteinen und 3 Versuchsreihen mit Leichtbetonhohlblocksteinen (NB) waren die  $\alpha_{\epsilon, v}$ -Werte stets größer als die  $\alpha_{\epsilon, h}$ -Werte.
- Der Unterschied  $\Delta\alpha_{\epsilon}$  war bei dickeren Wänden größer als bei dünneren Wänden und bei Steinen V2 größer als bei V6.
- Bei Mauerwerk aus lufttrocken vermauerten Kalksandsteinen war dagegen  $\alpha_{\epsilon, h}$  größer als  $\alpha_{\epsilon, v}$ . Bei Steinen KSV war  $\Delta\alpha_{\epsilon}$  kleiner als bei KSL.

Als Ursache für die Unterschiede zwischen  $\alpha_{\epsilon, v}$  und  $\alpha_{\epsilon, h}$  kommt im wesentlichen der Einfluß der Mörtellagerfuge in Betracht.

### 6.2.5.3.4 Verlauf der Feuchtedehnung im Randbereich (Stein) und Kernbereich (Mauerwerk) senkrecht zu den Lagerfugen

#### Allgemeines

Um Unterschiede im Feuchtedehnungsverlauf von Rand- und Kernbereich darzustellen, wurden die Dehnungsdifferenz

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{mw(SH)} - \epsilon_{mw(MV)}$$

und der Verhältniswert der Dehnungen

$$\beta_{\epsilon} = \frac{\epsilon_{mw(SH)}}{\epsilon_{mw(MV)}}$$

in Abhängigkeit von der Versuchsdauer berechnet und zwar aus den rechnerisch bestimmten Kurven für den zeitlichen Verlauf der Feuchtedehnung. Der Wert  $\Delta \epsilon$  dient zur Beurteilung der absoluten Feuchtedehnungsunterschiede in Hinblick auf zu erwartende Eigenspannungen, während  $\beta_{\epsilon}$  den auf den Kernbereich bezogenen Feuchtedehnungsverlauf des Randbereiches kennzeichnet.

Die  $\Delta \epsilon$ -Werte sind in den Bildern 6.49 bis 6.60 dargestellt.

Die  $\beta_{\epsilon}$ -Werte wurden aus Platzgründen nicht angegeben.

### Mauerziegel

Bei Mauerwerk aus großformatigen Leichtziegeln ist die Feuchtedehnung - das chemische Quellen (hier Vorzeichen minus) - im Randbereich anfangs meist wesentlich größer als im Kernbereich. Dies gilt nach Bild 6.49 vor allem für LHLz 2 und bei diesen wiederum für die 48 h in Wasser und die bis 5 Vol.-% Feuchtigkeit vorgelagerten Steine, bei denen  $\Delta \epsilon$  bis zu rd.  $-0,25$  mm/m beträgt. Bei LHLz 12 ist max  $\Delta \epsilon$  rd.  $-0,15$  mm/m. Mit zunehmender Lagerungsdauer verringert sich  $\Delta \epsilon$  meist auf etwa  $\leq -0,1$  mm/m. Die  $\beta_{\epsilon}$ -Werte erreichen nach etwa 30 bis 50 d ihr Maximum und betragen bis zu rd. 4. Einflüsse von Steinvorbehandlung und -festigkeitsklasse waren allgemein nicht zu erkennen.

In Bild 6.50 sind die  $\Delta \epsilon$ -Werte für HLz-2DF und einen LHLz 12-2DF dargestellt. Bei diesem ist  $\Delta \epsilon$  bis zu etwa 200 d konstant und klein, nimmt danach jedoch noch erheblich bis auf rd.  $-0,1$  mm/m zu. Stetig zu nimmt  $\Delta \epsilon$  für die relativ stark chemisch quellenden HLz 28-Wände, während bei der steingleichen Pfeilern der Kernbereich zunehmend stärker chemisch quillt als der Randbereich. Möglicherweise ist das auf unterschiedlichen Feuchtigkeitszustand in den Wänden und den 1 Stein dicken Pfeilern zurückzuführen. Bei HLz 12 ist das chemische Quellen im Kernbereich nach 1 a annähernd konstant, bis dahin im Randbereich kleiner, später jedoch größer.



Insgesamt ergibt sich aus den Auswertergebnissen, daß bei Mauerwerk aus chemisch quellenden Ziegeln in der Regel mit einem im Randbereich deutlich größerem Quellen als im Kernbereich zu rechnen ist. Der Feuchtedehnungsunterschied kann dabei - offensichtlich stofflich bedingt - stetig mit der Lagerungsdauer zunehmen oder nach Erreichen eines Maximums wieder abnehmen.

#### Kalksandsteine

Wie die Bilder 6.51 und 6.52 zeigen, sind im wesentlichen 2 Fälle zu unterscheiden. Im ersten Fall nimmt das Schwinden im Randbereich stetig stärker zu als im Kernbereich (Bild 6.51 und KSV 28-Wände im Bild 6.52). Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Karbonatisierungsschwinden im Randbereich zurückzuführen, da sich andernfalls  $\Delta \epsilon$  mit zunehmender Lagerungsdauer verringern müßte. Im zweiten Fall treten nur geringe Feuchtedehnungsunterschiede von rd.  $+0,05$  mm/m auf. Daß bei den Pfeilern P und VP aus KSV 28 (Bild 6.52) offensichtlich kein nennenswertes Karbonatisierungsschwinden auftritt, kann vermutlich mit den unterschiedlichen Herstellzeiten von Wänden und Pfeilern erklärt werden (s. Abschnitt 6.2.6.1.1 und 6.2.6.1.3). Meist und erwartungsgemäß ist das frühe Anfangsschwinden im Randbereich sehr viel größer als im Kernbereich. Dieser anfänglich große Unterschied führt zu  $\beta_e$ -Werten bis zu rd. 4 in den ersten 20 d. Beim Mauerwerk mit offenen Stoßfugen war umgekehrt das Anfangsschwinden im Kernbereich größer als im Randbereich.

Tritt Karbonatisierungsschwinden auf, so ist nach den Auswertergebnissen mit erheblichen Schwindunterschieden, die über lange Zeiträume zunehmen können, zwischen Rand- und Kernbereich zu rechnen. Eine daraus resultierende Ablösung des Fugenmörtels vom Stein in der Randzone ist nicht auszuschließen.

#### Leichtbetonsteine

Bei Mauerwerk aus Leichtbetonhohlblocksteinen war bei den Pfeilern aus Steinen mit Naturbimszuschlag das Randschwinden in den meisten Fällen größer als das Schwinden im Kernbereich. Der Schwindunterschied  $\Delta \epsilon$  wuchs zum Teil mit zunehmender Lage-

rungsdauer erheblich (Bilder 6.53 und 6.54). Dies war auch bei Hohlblocksteinen mit Blähtonzuschlag der Fall (Bild 6.57). Der Schwindunterschied betrug bis zu rd. 0,4 mm/m. Bei den Wänden aus Steinen mit Naturbimszuschlag hingegen war nach einer bestimmten Lagerungsdauer meist das Kernschwinden größer als das Randschwinden, wobei anfangs die  $\Delta\epsilon$ -Werte sehr klein waren oder erheblich stärkeres Schwinden im Randbereich auftrat (s. Bilder 6.55 und 6.56). Die  $\Delta\epsilon$ -Werte betrugen bis zu 0,4 mm/m im Anfangsbereich und bis zu -0,17 mm/m im späteren Zeitraum. Als Ursache für dieses zum Teil sehr unterschiedliche Verhalten von Wänden und Pfeilern kommen vermutlich unterschiedliche Austrocknungs- und Eigenspannungszustände, mitbeeinflusst durch die Stoßfugen bei den Wänden, als Ursache in Betracht. Meist waren die  $\Delta\epsilon$ -Werte bei Mauerwerk aus Steinen Hbl 4 und bei diesen wiederum für 2 Kammersteine am größten, was möglicherweise auf ein größeres Feuchtigkeitsgefälle zwischen Rand- und Kernbereich bedingt durch die größere Dichtigkeit (höhere Festigkeitsklasse, kleine Kammerzahl) zurückzuführen ist. Die anfänglichen  $\beta_e$ -Werte betrugen bis zu rd. 4.

Bei Mauerwerk aus Vollsteinen mit Naturbimszuschlag war bei den Wänden und Pfeilern VP aus 2DF-Steinen das Schwinden im Randbereich anfangs stets größer als das im Kernbereich (Bild 6.58). Der Schwindunterschied betrug maximal rd. 0,3 mm/m bei den Steinen V6 und rd. 0,1 mm/m bei den Steinen V2. Das Maximum tritt zwischen ca. 20 und 100 d Lagerungsdauer auf. Danach nimmt  $\Delta\epsilon$  stetig ab und wird bei den V2-Steinen nach etwa 1,5-jähriger Lagerungsdauer negativ. Bei den V6-Steinen bleibt das Randschwinden größer als das Kernschwinden. Bei 1 Stein dicken Pfeilern aus 5DF-Steinen (Bild 6.59) war dagegen meist das Kernschwinden größer als das Randschwinden bei allerdings kleinem  $\Delta\epsilon$ . Dieses unterschiedliche Verhalten von 1 Stein dicken Mauerwerk und Verbandmauerwerk ist wahrscheinlich auf das größere Feuchtigkeitsgefälle im Verbandmauerwerk und den Stoßfugeneinfluss zurückzuführen. Im Anfangszeitraum bis zu etwa 30 d ergaben sich maximale  $\beta_e$ -Werte von 4 bis 5. Nach den vorliegenden Auswertergebnissen ist auch bei Leicht-

betonmauerwerk mit erheblichen Schwindunterschieden zwischen Rand- und Kernbereich von etwa bis 0,4 mm/m zu rechnen. Hohe Schwindunterschiede sind vor allem bei Mauerwerk aus höherfesten Steinen mit geringer Kammerzahl und großem Bauteilquerschnitt zu erwarten.

#### Betonsteine (dichter Zuschlag)

Bei der einzigen vorliegenden Versuchsserie von Mauerwerkpfel-  
lern aus Hbn 12-K (Bild 6.57) war das Randschwinden größer als  
das Kernschwinden. Der Schwindunterschied nahm mit der Ver-  
suchsdauer zu und betrug nach 2 a rd. 0,2 mm/m.

#### Gasbetonsteine

Beim Mauerwerk aus Gasbetonsteinen G2 und G6 war das Rand-  
schwinden stets größer als das Kernschwinden. Der im Bild 6.60  
dargestellte rechnerische Verlauf von  $\Delta\epsilon$  entspricht im Anfangs-  
bereich nicht den Versuchswerten. Die stetige Zunahme von  $\Delta\epsilon$   
mit der Lagerungsdauer ist wie bei den Kalksandsteinen durch  
Karbonatisierungsschwinden zu erklären. Nach 2-jähriger Lage-  
rungsdauer beträgt  $\Delta\epsilon$  maximal rd. 0,3 mm/m.

#### Zusammenfassung

Bei Mauerwerkbauteilen muß in den meisten Fällen mit erhebli-  
chen Feuchtedehnungsunterschieden zwischen Bauteilrand und  
-kern gerechnet werden. Diese sind vor allem zu erwarten

- bei dickeren Bauteilen
- bei Einbau von Steinen hoher Feuchtigkeit
- bei chemisch quellenden Mauerziegeln
- bei Mauersteinen mit geringer kapillarer Leitfähigkeit  
(Leichtbetonsteine)
- bei Mauersteinen, bei denen Karbonatisierungsschwinden auf-  
treten kann (nichtkeramische Mauersteine, vor allem  
Kalksand- und Gasbetonsteine).

Im allgemeinen ist die Feuchtedehnung im Randbereich größer als im Kernbereich. Der Unterschied kann mehr als 0,4 mm/m betragen. Unterschiede infolge ungleicher Feuchtigkeitsverteilung verringern sich mit zunehmender Austrocknungsdauer. Unterschiede infolge Karbonatisierung und chemischem Quellen können über mehrere Jahre hinweg weiter zunehmen.

#### 6.2.5.3.5 Einfluß der relativen Luftfeuchte U

Bis auf 2 Ausnahmen (/I14, S13/) liegen sämtliche Versuchsergebnisse nur für das Schwindklima 20/65 vor. Da in /S13/ relativ junge Leichtbetonsteine vermauert wurden, ist ein Vergleich dieser im Klima 18/55 durchgeführten Versuche mit Versuchen im Klima 20/65 nicht ohne weiteres möglich. Dies gilt auch für die Versuche in /I14/, die sich in Steinfestigkeitsklasse, Wanddicke und Meßstelle von denen im Klima 20/65 unterscheiden. Eine Aussage über den Einfluß von U auf  $\alpha_\epsilon$  kann somit nicht erfolgen. Es soll jedoch versucht werden, die Auswirkung einer deutlich geringeren relativen Feuchte auf  $\alpha_\epsilon$  abzuschätzen. In Abschnitt 6.2.4.4.3 wurde  $\alpha_\epsilon$  bei Mauersteinen für die Klimate 20/30 und 20/65 vergleichend dargestellt (Bild 6.32). Vergleicht man die dort erhaltenen  $\alpha_\epsilon$ -Kurven mit denen von Mauerwerk im Bild 6.43, so ergibt sich im groben Mittel, daß die Verhältnismerte  $\alpha_\epsilon$  für die Klimate 20/30 und 20/65 bei Mauersteinen etwa denen für  $d_{ef} = 120$  und 240 für das Klima 20/65 bei Mauerwerk entsprechen. In DIN 4227 Teil 1 /3/ errechnet sich aus den analogen Faktoren  $k_{ef}$

$$\frac{k_{ef}(U=50)}{k_{ef}(U=70)} = \frac{1}{1,5} = 0,67.$$

Obwohl aus den  $\alpha_\epsilon$ -Kurven von Einzelsteinen nicht direkt auf die des Mauerwerks geschlossen werden kann, dürfte näherungsweise davon auszugehen sein, daß sich Änderungen der relativen Luftfeuchte größenordnungsmäßig mit dem gleichen Faktor auswirken. Dies sieht man in DIN 4227 vorausgesetzt, daß der Faktor  $k_{ef}$  für alle wirksamen Dicken gleich ist. Es erscheint somit vertret-

bar, als Anhaltswerte für den Einfluß der relativen Luftfeuchte auf den Schwindverlauf für den Bereich  $U = 30$  bis  $65 \%$  die relativen  $k_{ef}$ -Werte nach DIN 4227 bzw. die für Mauersteine ermittelten anzusetzen.

Danach wäre

$$d_{ef} = k_{ef} \cdot \frac{2A}{u}$$

mit

$$\begin{aligned} k_{ef} &= 1,0 \text{ für } U = 65 \% \\ &\approx 0,7 \text{ für } U = 50 \% \\ &\approx 0,5 \text{ für } U = 30 \%. \end{aligned}$$

## 6.2.6 Zusammenhang zwischen der Feuchtedehnung von Einzelsteinen und der von Mauerwerk

### 6.2.6.1 Endwerte

#### 6.2.6.1.1 Allgemeines

Beim Vergleich  $\epsilon_{h\infty, st}$  mit  $\epsilon_{h\infty, mw}$  muß der  $\epsilon_{h\infty}$ -Anteil des Mörtels berücksichtigt werden. Dies erfolgt in gleicher Weise wie in Abschnitt 6.2.5.2.6 dargelegt. Weiterhin ist die bei den Versuchen in /S26/ aufgetretene zeitliche Verschiebung des Meßbeginns bei Mauerwerkwänden, -pfeilern und den Einzelsteinen zu beachten. Der Vergleich  $\epsilon_{h\infty, st}$  mit  $\epsilon_{h\infty, mw}$  kann in diesen Fällen durch unterschiedliches Karbonatisierungsschwinden beeinflusst werden, zumal hierbei eine Korrektur nicht möglich ist. Da auch  $\epsilon_{h\infty, mö}$  rechnerisch nur näherungsweise berücksichtigt werden kann, können die Auswertergebnisse zum Teil mit größeren Unsicherheiten behaftet sein. Außerdem sind beim Vergleich ggf. unterschiedliche Endfeuchtigkeitsgehalte von Einzelsteinen und Mauerwerk zu beachten.

#### 6.2.6.1.2 Mauerziegel

In /S26/ war der Versuchsbeginn für die Einzelsteine rd. 8 bis 16 mon später als bei den Mauerwerkpfeilern und -wänden. Da Endwerte nicht in allen Fällen bestimmt werden konnten, andererseits aber die Feuchtedehnung nicht immer und auch nicht ausreichend genau linear mit der Versuchsdauer zunahm, waren die vorliegenden Werte  $\epsilon_{h\infty}$  bzw.  $\epsilon_{h,max t}$  nicht ohne weiteres vergleichbar. Es wurde deshalb nur der für alle Versuche datumsgleiche Zeitraum herangezogen und die  $\epsilon_{h,max t}$ -Werte am Ende dieses Zeitraums mittels Ausgleichsrechnung (Hyperbel- oder Geradenansatz) errechnet. Mit diesen  $\epsilon_{h,max t}$ -Werten erfolgte die vergleichende Auswertung der Versuchswerte aus /S26/. Vorausgesetzt wurde bei dieser Verfahrensweise, daß der zeitliche Verlauf der Feuchtedehnung bei gleichem Bezugsdatum für alle Versuchsreihen (Einzelsteine, Wände, Pfeiler) gleich ist. Hierbei wird außer Betracht gelassen, daß die Steine bei den verschiedenen Versuchsreihen in unterschiedlichem Alter und wegen der unterschiedlichen Prüfkörpergröße über verschieden lange Zeiträume einen verschieden hohen Feuchtigkeitsgehalt aufwiesen.

Da bei den Versuchen in /I4/ alle Versuchsreihen zeitgleich durchgeführt wurden, erfolgt der Vergleich mit den Endwerten. Sämtliche vergleichbaren Versuchswerte sind in Bild 6.61 dargestellt. Danach sind die Feuchtedehnungswerte von Mauerwerk für die Meßstelle MV erwartungsgemäß meist kleiner als die der Einzelsteine für die Meßstelle HA. Für die zwei Werte der horizontalen Meßstrecken (LA-MH) trifft dies allerdings nicht zu. Wird der Einfluß des Mörtelschwindens gemäß Abschnitt 6.2.5.2.6.2 berücksichtigt (ein Einfluß der Prüfkörpergröße ergab sich für Mauerziegel nicht eindeutig), so stimmen Stein- und Mauerwerk-Feuchtedehnungswerte im allgemeinen besser überein (s. Bild 6.61). In horizontaler Richtung wird danach jedoch der Mörtel- einfluß überschätzt. Bis auf wenige Ausnahmen stimmen auch HA- und SH-Werte relativ gut überein. Bei dieser Bewertung sind die Streuung der Feuchtedehnungswerte und gewisse Auswerteunsicher-

heiten zu berücksichtigen. Die Feuchtigkeitsgehalte aller Versuchsreihen waren bei Versuchsende praktisch gleich und betragen weniger als 0,5 Vol.-%.

#### 6.2.6.1.3 Kalksandsteine

Die Auswertergebnisse sind in Bild 6.62 dargestellt.

Danach sind die  $\epsilon_{h\infty}$ -Werte für die Meßstellen HR und SH bis auf die der Mauerwerkswände gleichgroß. Wegen des zeitversetzten Versuchsbeginns bei Wänden, Pfeilern und Einzelsteinen kann der hohe  $\epsilon_{h\infty}$ -Wert für die Meßstelle SH bei den Wänden durch oberflächennahes Karbonatisierungsschwinden verursacht worden sein (s. auch Abschnitt 6.2.4.2.2). Pfeiler und Einzelsteine wurden wesentlich später als die Wände geprüft. Außerdem kann möglicherweise von Einfluß gewesen sein, daß die Wände in einem Raum lagerten, der nur mittels Umluft klimatisiert wurde und somit einen höheren CO<sub>2</sub>-Gehalt aufwies. Wesentlich größer ist der  $\epsilon_{h\infty}$ -Wert des Mauerwerks in horizontaler Richtung gegenüber dem für die Steinmeßstelle LA. Eine gesicherte Erklärung für diesen Unterschied kann zur Zeit nicht gegeben werden.

Wenn der Einfluß des Mörtelschwindens und die Prüfkörpergröße berücksichtigt werden, ergeben sich wie aus Bild 6.62 ersichtlich, gleichgroße Endwerte der Meßstellen HA und MV für Einzelstein und Stein im Mauerwerk.

Allerdings war der Feuchtigkeitsgehalt bei Versuchsende von Einzelsteinen mit rd. 2 Vol.-% und Steinen aus den Mauerwerkprüfkörpern mit rd. 5 Vol.-% sehr unterschiedlich. Daraus ergäbe sich nach Abschnitt 6.3.3.6 aus dem Zusammenhang  $\epsilon$ -h bzw. nach den Tabellen des hier nicht beigefügten Anhangs für S2620 ein  $\Delta\epsilon_{h\infty}$ -Wert von maximal rd. 0,15 mm/m, d. h. die Mauerwerkprüfkörper hätten um bis zu 0,15 mm/m weniger schwinden müssen als die Einzelsteine.

Als mögliche Ursachen für diese Diskrepanz kommen in Betracht:

- a) Eigenspannungen infolge unterschiedlicher Feuchtigkeitsverteilung. Das stärkere Schwinden der Randbereiche wird durch die weniger schwindenden Kernbereiche behindert. Den Zugspannungen im Randbereich halten Druckspannungen im Kernbereich das Gleichgewicht. Daraus resultieren Kriechverformungen im Kernbereich, die höhere Verkürzungen bewirken, als es dem feuchtigkeitsbezogenen Schwinden entspricht.
- b) Abgabe von zusätzlich durch Karbonatisierung entstandener Feuchtigkeit beim abschließenden Trocknen (105 °C) und unterschiedlicher Karbonatisierungsgrad.

Darüberhinaus können gewisse Klimaschwankungen und -unterschiede von Einfluß gewesen sein.

Zusammenfassend bewertet, kann davon ausgegangen werden, daß  $\epsilon_{h\infty}$  von Einzelsteinen und Steinen im Mauerwerk ausreichend gut übereinstimmen, wenn nennenswert unterschiedliche Karbonatisierung ausgeschlossen werden kann.

#### 6.2.6.1.4 Leichtbetonsteine und Betonsteine

In Bild 6.63 sind die Auswertergebnisse für Leichtbetonhohlblocksteine aus Naturbims- und Blähtonzuschlag sowie für Betonsteine dargestellt. Nach dem Bild sind die  $\epsilon_{h\infty}$ -Werte der Steinmeßstelle HA der Steine Hbl(NB) bis auf wenige Ausnahmen deutlich kleiner als die der Meßstellen MV im Mauerwerk. Werden wie bei den Kalksandsteinen Einfluß von Mörtelschwinden und Prüfkörpergröße berücksichtigt, so ergeben sich im Bereich der Versuchswerte bis  $\epsilon_{h\infty, st} \approx 0,4$  mm/m annähernd gleichgroße  $\epsilon_{h\infty}$ -Werte für Einzelstein und Stein im Mauerwerk:

$$\epsilon'_{h\infty, mw(MV)} = 0,035 + 0,813 \cdot \epsilon_{h\infty, st(HA)}$$

Überraschend ist der Zusammenhang zwischen den  $\epsilon_{h\infty}$ -Werten der Meßstellen HR (Einzelsteine) und SH (Steine im Mauerwerk):



$$\epsilon_{h_{\infty},mw}(SH) = 0,028 + 1,717 \cdot \epsilon_{h_{\infty},st}(HR) \text{ BEST: } 79,8 \%$$

Danach schwindet der Stein im Mauerwerk im oberflächennahen Bereich näherungsweise um rd. 70 % mehr als der Einzelstein.

Zum Teil große Unterschiede zwischen  $\epsilon_{h_{\infty}}$  von Einzelsteinen und Mauerwerk ergaben sich bei Hbl(BT)- und Hbn-Steinen, wobei allerdings jeweils nur 1 Versuchsreihe vorlag. Wie auch bei den Kalksandsteinen waren die Feuchtigkeitsgehalte der Steine bei Versuchsende im Mauerwerk deutlich höher als die der Einzelsteine. Dies hätte größere Endschwindwerte der Einzelsteine zur Folge haben müssen (s. Abschnitt 6.2.6.1.3).

Die Auswertergebnisse für die Leichtbetonvollsteine aus Naturbimszuschlag enthält Bild 6.64. Danach ergibt sich zunächst kein Zusammenhang zwischen  $\epsilon_{h_{\infty}}$  von Einzelstein und Mauerwerk bzw. Stein im Mauerwerk. Werden wieder Mörtelschwindeinfluß und Prüfkörpergröße berücksichtigt, so sind die  $\epsilon_{h_{\infty}}$ -Werte für die Meßstellen HA und MV bei den Versuchen A mit 2DF-Steinen bis auf eine Ausnahme praktisch gleichgroß. Die  $\epsilon_{h_{\infty}}$ -Werte für die Meßstelle SH sind - wie bei den Hbl-Steinen - deutlich größer als die für die Steinmeßstelle HR.

Für die Versuche B ergeben sich dagegen bis auf eine Ausnahme stets und meist wesentlich größere  $\epsilon_{h_{\infty}}$ -Werte für die Meßstellen der Einzelsteine als für die Meßstellen des Mauerwerks.

Die Feuchtigkeitsgehalte bei Versuchsende liegen nur für die Versuche B vor. Sie waren bei den Steinen aus den Mauerwerkprüfkörpern um im allgemeinen rd. 0,5 Vol.-% größer als bei den Einzelsteinen.

#### 6.2.6.1.5 Gasbetonsteine

Es liegen nur wenige Versuchswerte vor. Sie sind in Bild 6.65 dargestellt. Danach ist in allen Fällen der  $\epsilon_{h_{\infty}}$ -Wert für die Meßstellen der Mauerwerkprüfkörper deutlicher kleiner als der

für die Steinmeßstellen. Wegen der großen  $\epsilon_{h\infty}$ -Werte für die Einzelsteine ist der Schwindeinfluß des Mörtels vernachlässigbar klein. Der Unterschied von rd. 0,3 mm/m zwischen  $\epsilon_{h\infty}$  für Mauerwerk- und Steinmeßstellen ist wahrscheinlich im wesentlichen auf unterschiedlich großes Karbonatisierungsschwinden von Mauerwerk und Einzelsteinen zurückzuführen. Darauf deuten die ungewöhnlich hohen  $\epsilon_{h\infty}$ -Werte der Einzelsteine hin. Von weiterem Einfluß kann auch hier wie bei anderen Steinarten der unterschiedlich hohe Feuchtigkeitsgehalt bei Versuchsende von Einzelsteinen und Steinen in den Mauerwerkprüfkörpern gewesen sein. Er betrug bei den Einzelsteinen G2 rd. 0,8 und G6 rd. 1,4 Vol.-%, bei den entsprechenden Steinen im Mauerwerk rd. 1,2 und 3,5 Vol.-%. Bei den Mauersteinen ist der Bereich niedriger Feuchtigkeitsgehalte nicht durch Versuchswerte belegt. Wenn daher näherungsweise der  $\epsilon$ -Verlauf der Prismen zugrundegelegt wird, so ergeben sich nach Abschnitt 6.3.3.6 bzw. nach den Tabellen des hier nicht beigefügten Anhangs entsprechende  $\Delta\epsilon_{h\infty}$ -Werte von 0,10 mm/m für G2 und von 0,20 mm/m für G6.

#### 6.2.6.1.6 Zusammenfassende Bewertung der Auswerteergebnisse

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Auswerteunsicherheiten - Eigenschaftsschwankungen der Baustoffe, Umwelteinflüsse, Schwankungen der Prüfbedingungen und die für die vergleichende Bewertung erforderlichen vereinfachenden Annahmen - erscheint es mit ausreichender Genauigkeit möglich, aus dem Endwert der Feuchtedehnung des Einzelsteines den des Mauerwerks zu bestimmen. Dies bestätigen die in Bild 6.66 dargestellten zusammengefaßten Auswerteergebnisse. Unter Berücksichtigung von Mörtelschwinden und Prüfkörpergröße ergibt sich danach in vertikaler Richtung:

$$\left| \epsilon'_{h\infty, mw(MV)} \right| = 0,04 + 0,86 \left| \epsilon_{h\infty, st(HA)} \right|, \quad \text{BEST: } 74,7 \%$$

Im den üblichen Bereich der  $\epsilon_{h\infty}$ -Werte (etwa -0,2 bis +0,5 mm/m) unterscheiden sich - wie auch aus dem Bild ersichtlich - die errechneten Mauerwerk-Endwerte nur wenig von den

Stein-Endwerten, so daß unter den oben genannten Voraussetzungen beide Endwerte näherungsweise gleichgesetzt werden können. Der Feuchtedehnungsendwert des Mauerwerks in vertikaler Richtung errechnet sich dann aus  $\epsilon_{h\infty, st(HA)}$  plus Einfluß von Mörtelschwinden und Prüfkörpergröße, wenn diese von der Bezugsgröße in Bild 6.66 abweicht. Voraussetzung für die Verfahrensweise ist, daß auf jeweils etwa gleichen Feuchtigkeitsgehalt bezogen wird (s. Abschnitt 6.3) und daß nennenswerte Unterschiede zwischen Einzelstein und Mauerwerk infolge Umwelteinflüssen (z. B. Karbonatisierung) nicht auftreten. Liegt  $\epsilon_{h\infty, st(HR)}$  statt  $\epsilon_{h\infty, st(HA)}$  vor, so ist nach Bild 6.67 näherungsweise

$$\epsilon'_{h\infty, mw(MV)} = 0,13 + 0,67 \cdot \epsilon_{h\infty, st(HR)}$$

wobei allerdings mit zum Teil sehr großen Streuungen zu rechnen ist.

#### 6.2.6.2 Zeitlicher Verlauf der Feuchtedehnung

Der Vergleich von  $\epsilon_h(t)$  zwischen Einzelsteinen und Mauerwerk ist nur mit grober Näherung möglich, da er von einer ganzen Reihe von Einflußgrößen bestimmt wird, über die nur in wenigen Fällen verwertbare Angaben vorliegen. Außerdem ist eine direkte Vergleichbarkeit von Einzelsteinen und Mauerwerk selten gegeben. Abgesehen davon wird der Feuchtedehnungsverlauf stark von der Prüfkörperart - z. B. dargestellt durch die wirksame Dicke - bestimmt. Der Kennwert  $d_{ef}$  ist jedoch für Einzelsteine nicht geeignet. Bei diesen wäre ein Oberflächen/Volumen-Verhältniswert zu bevorzugen, wobei der Einfluß von Lochungen im Stein nicht ohne weiteres erfaßbar sein wird. Bei wesentlicher Änderung des Steinformates und/oder des Lochbildes wird sich auch der Verlauf der Feuchtedehnung und damit der Zusammenhang zum Feuchtedehnungsverlauf des Mauerwerks ändern.

Unter diesen Einschränkungen sind die Auswertergebnisse in den Bildern 6.68 und 6.69 zu sehen, in denen als Kenngröße für den

Feuchtedehnungsverlauf die Halbwertzeiten von Einzelsteinen und Mauerwerk verglichen wurden.

Auswertbar waren nur Versuchswerte für Leichtbetonsteine, da bei Mauerziegeln die Halbwertzeit wegen des häufig linearen Feuchtedehnungsverlaufes nicht bestimmbar war und bei Kalksandsteinen und Gasbetonsteinen zu wenig Versuchswerte vorlagen. Ausgewertet wurde mittels Nullpunktregression

$$t_{h,mw} = a \cdot t_{h,st}$$

Folgende a-Werte wurden bestimmt:

Meßstelle Stein-Mauerwerk	Wände		Pfeiler	
	Hbl	V	Hbl	V
HR - MV	7,63		4,14	2,61
HA - MV	2,26	4,00	1,42	
LA - MH	(4,67)		-	-

( ): sehr stark streuend

Der straffeste Zusammenhang ergab sich für HR-MV. Erwartungsgemäß sind die a-Werte für Wände größer - rd. 2 mal so groß - wie für Pfeiler. Vergleichsweise unerwartet klein sind dagegen die a-Werte für HA-MV. Das bedeutet, daß die Halbwertzeit der Steine für die Steinachse (HA) mehr als doppelt so groß ist wie für den Steinrand (HR). Nach den Auswertergebnissen kann die Halbwertzeit für Mauerwerk somit grob aus der an Einzelsteinen bestimmten abgeschätzt werden. Wird der Näherungsansatz aus /H16/

$$\epsilon_h = \epsilon_{h\infty} \cdot \frac{t}{t_h + t}$$

verwendet, so kann nun auch der Feuchtedehnungsverlauf des Mauerwerks abgeschätzt werden.

### 6.3 Zusammenhang zwischen Feuchtedehnung und Feuchtigkeitsgehalt

#### 6.3.1 Allgemeines

Wie die Literatursichtung zeigt (s. Abschnitt 4.2.2) ist verschiedentlich versucht worden, die Feuchtedehnung (Schwinden) rechnerisch aus Stoff- und Umwelteigenschaften zu bestimmen. Hierbei ergaben sich wertvolle Erkenntnisse über Einflußgrößen und Schwindmechanismus, die quantitative "Genauigkeit" der Rechenergebnisse verglichen mit Versuchswerten war jedoch meistens unbefriedigend. Dies ist auch nicht verwunderlich, da im allgemeinen eine ganze Reihe von Eigenschaftskenngrößen (Verformungskennwerte, Kennwerte für die Porenstruktur usw.) verwendet wurden, deren Größe nur grob angenähert abgeschätzt werden konnte. Wie bereits in Abschnitt 4.2.1 ausgeführt, erscheint u. a. deshalb eine feuchtigkeitsbezogene rechnerische Bestimmung der Feuchtedehnung zunächst erfolgversprechender. Da ein direkter Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsgehalt und chemischem Quellen bei Mauerziegeln nach Literatursichtung und Auswerteergebnissen offenichtlich nicht besteht, beziehen sich die folgenden Ausführungen nur auf Schwinden und Quellen  $\epsilon_{s,q}$ .

#### 6.3.2 Grundsätzlicher Zusammenhang zwischen $\epsilon_{s,q}$ und h

In Abschnitt 6.2.2 wird auf den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Schwinden bzw. Quellen und Kapillarspannungen im kapillarwirksamen Bereich der relativen Luftfeuchte von etwa  $\geq 40\%$  Bezug genommen, um einzelne Auswerteergebnisse zu erklären. Nach den dort angegebenen Zusammenhängen ist näherungsweise:

$$\epsilon_{s,q}(U) = \alpha_v \cdot p_w(U) \cdot \sigma_{kap}(U) \quad (6.11)$$

$\alpha_v$  : Verformungskennwert in  $1/(N/mm^2)$

$p_w$  : Anteil der wassergefüllten Poren mit  $r \leq r_{gr}(U)$

$\sigma_{\text{kap}}$ : Kapillarzugspannungen in  $\text{N/mm}^2$  aus  $\sigma_{\text{kap}} = \frac{2\sigma_w}{r_{\text{gr}}(U)}$   
 $\sigma_w$ : Oberflächenspannung des Wassers.

Da Angaben über die Porenverteilung im hier interessierenden Bereich  $r \leq 10 \text{ nm}$  meist nicht vorliegen, wird - wie bereits in Abschnitt 6.2.2 ausgeführt - stattdessen näherungsweise der Feuchtigkeitsgehalt im Gleichgewichtszustand  $h_{v\infty}$  angesetzt. Da dieser durch Trocknen bei höchstens  $105^\circ\text{C}$  bestimmt wird, kann davon ausgegangen werden, daß er im wesentlichen dem Wassergehalt der Kapillarporen entspricht.

Der Kennwert  $\alpha_v$  ist nicht bekannt. Er umfaßt die Verformbarkeit der Porenwänden infolge kurzzeitiger und langzeitiger Lasteinwirkung (sofortige Verformung und Kriechen durch Kapillarzugspannungen). Er kann aus dem Vergleich der versuchsmäßig bestimmten  $\epsilon_{s\infty}$ -Werte mit den nach Gleichung 6.11 errechneten  $\epsilon_{s\infty}$ -Werten bestimmt werden, da gilt

$$\text{obs } \epsilon_{s\infty} \stackrel{!}{=} \text{cal } \epsilon_{s\infty}.$$

Für  $\text{obs } \epsilon_{s\infty}$  ist nach Abschnitt 6.2.3 und 6.2.4 näherungsweise

$$\text{obs } \epsilon_{s\infty} = a_1 + b_1 \cdot U. \quad (6.31)$$

Mit  $h_{v\infty}$  für  $p_w$  ergibt sich nach Abschnitt 6.1.3 und 6.1.4

$$h_{v\infty} = a_2 + b_2 \cdot U \quad (6.32)$$

Damit wird entsprechend Gleichung 6.12:

$$\text{obs } \epsilon_{s\infty} = a_1 + b_1 \cdot U = \text{cal } \epsilon_{s\infty} = -135 \cdot \alpha_v (a_2 + b_2 \cdot U) \cdot \ln(U/100) \quad (6.33)$$

und

$$\alpha_v = - \frac{a_1 + b_1 \cdot U}{135 (a_2 + b_2 \cdot U)} \cdot \frac{1}{\ln(U/100)}. \quad (6.34)$$

Dimensionsbereinigt ( $\text{obs } \epsilon_{s\infty}$  in  $\text{mm/m}$  und  $h_{v\infty}$  in  $\text{Vol.-%}$ ) ist dann

$$\alpha_v = - \frac{a_1 + b_1 \cdot U}{1350 (a_2 + b_2 \cdot U)} \cdot \frac{1}{\ln(U/100)} \left( \frac{1}{\text{N/mm}^2} \right). \quad (6.35)$$

In Bild 6.70 sind die  $\alpha_v$ -Werte in Abhängigkeit von U dargestellt. Zu berücksichtigen ist, daß der gesamte dargestellte Bereich von U = 30 bis 80 % versuchsmäßig nur für die Mörtel belegt ist. Bei den Steinen ist obs  $\epsilon_{s\infty}$  höchstens für U = 30 bis 65 % und dafür auch nicht immer durch Versuchswerte belegt, so daß die  $\alpha_v$ -Werte für andere U-Werte sehr unsicher sind. Im Bild sind außer den nach Gleichung 6.31 ermittelten obs  $\epsilon_{s\infty}$ -Werten auch diejenigen mit angegeben, die jeweils einzeln für bestimmte U-Werte als Mittelwert errechnet wurden. Nach dem Bild ist  $\alpha_v$  im Bereich U = 30 bis 80 % nicht konstant, was nach Gleichung 6.35 zu erwarten war. Bis auf Gasbetonsteine steigen die  $\alpha_v$ -Werte nach U = 30 und U = 80 % hin an und sind bei U = 60 % am kleinsten. Dies könnte daran liegen, daß im Bereich U  $\approx$   $\leq$  40 % Gleichung 6.11 nicht mehr gilt und der als näherungsweise linear angenommene Zusammenhang zwischen obs  $\epsilon_{s\infty}$  und U für höhere U-Werte nicht zutrifft.

Bei den Mörteln erscheint nach Bild 6.13 der lineare Zusammenhang allerdings gerechtfertigt. Andererseits zeigen die in Bild 6.70 mit angegebenen  $\alpha_v$ -Werte aus den Einzelauswertungen die im allgemeinen große Streubreite der  $\alpha_v$ -Werte.

Bei Kalksandsteinen stimmen beide  $\alpha_v$ -Werte (s. Bild 6.70) jedoch gut überein.

Das abweichende Verhalten der Gasbetonsteine könnte darauf zurückzuführen sein, daß diese - bedingt durch das Herstellverfahren - außer Kapillarporen einen erheblichen Anteil Kugelporen enthalten. Diese verursachen keine Kapillarezugspannungen und sind deshalb praktisch schwindunwirksam. Sie sind jedoch zum Teil in  $p_w$  bzw.  $h_{v\infty}$  enthalten und bewirken damit, daß der Nenner in Gleichung 6.35 zu groß und damit  $\alpha_v$  zu klein wird. Geht man davon aus, daß  $\alpha_v$  näherungsweise für U = 30 bis 80 % konstant ist, so ergibt sich bei einem nur wenig mit U zunehmenden rechnerischen "Kapillarporenanteil" ein stark ansteigender Anteil schwindunwirksamer Kugelporen. Da über die Poren-

arten im hier infrage kommenden Feinstporenbereich Angaben nicht vorliegen, kann die angestellte Überlegung nicht überprüft werden.

Werden die vorangegangenen Einschränkungen und Erklärungen berücksichtigt, so erscheint es grundsätzlich möglich, den Zusammenhang zwischen Endschwindwert und schwindwirksamen Porenanteil bzw. Gleichgewichtsfeuchte nach Gleichung 6.11 zu beschreiben. Ob  $\alpha_v$  ausreichend genau als konstant angesehen werden kann, ggf. für einen kleineren U-Bereich, bedarf weiterer Untersuchungen. Desgleichen die Frage, inwieweit U-Werte unter 40 % durch die Gleichung mit erfaßbar sind, da dann Kapillarmeniskens und damit Kapillarezugspannungen wegen Überschreiten der Zugfestigkeit des Wassers im Meniskus /P8/ nicht mehr vorhanden sind und andere Schwindmechanismen wirksam werden. Scheinbar entsprechen diese bei Kalksandsteinen zumindest bis  $U = 30 \%$  in ihrer Wirkung den Kapillarkräften (s. Bild 6.70). Zur vergleichenden Bewertung wurden in der Tabelle 6.7 die  $\alpha_v$ -Werte zusammen mit  $E_v$ -Werten aus /S33/ angegeben. Die in der Tabelle aufgeführten  $\frac{1}{\alpha_v}$ -Werte, welche den Verformungsmodul (einschließlich Kriechanteil,  $E/(1+\phi)$ ) darstellen, sind in der Größenordnung realistisch. Bei ihrem Vergleich mit den  $E_v$ -Moduln ist zu berücksichtigen, daß sich die  $1/\alpha_v$ -Werte auf die Stoffeigenschaften der Porenwände beziehen. Die  $E_v$ -Moduln wären danach vermutlich deutlich höher anzusetzen, sind jedoch andererseits mit  $\frac{1}{1+\phi}$  abzumindern. Da die Kriechzahlen für Mörtel vergleichsweise hoch sind - in /S26/ wurde  $\phi = 9,4$  bzw. 5 für Kalk-Zement- bzw. Zementmörtel ermittelt - erscheinen die errechneten  $\frac{1}{\alpha_v}$ -Werte auch in der Rangfolge plausibel.

Die aufgezeigten Zusammenhänge machen deutlich, wie wesentlich die Größe des Endschwindwertes durch die Porenverteilung beeinflusst wird. So wäre aufgrund der unterschiedlichen  $E$ -Moduln und Kriechzahlen bei Kalk-Zement-Mörteln ein erheblich höherer Endschwindwert als bei Zementmörteln zu erwarten. Die Endschwindwerte von Kalk-Zement-Mörteln und Zementmörteln sind



jedoch nach Abschnitt 6.2.3.1 nahezu gleichgroß. Dieser scheinbare Widerspruch läßt sich nun einfach durch den deutlich geringeren Feinporenanteil der Kalk-Zement-Mörtel erklären. Die vorangegangenen Überlegungen und Auswertungen sollten dazu beitragen, die Abhängigkeit des Schwindens bzw. Schwindendwertes von relativer Luftfeuchte, schwindwirksamen Porenanteil und Verformbarkeit zu verdeutlichen und zu belegen, vor allem auch in Hinblick auf die feuchtigkeitsbezogene Bestimmung von Schwindwerten, zu der eine diesbezügliche Auswertung von Versuchsergebnissen im nächsten Abschnitt erfolgt.

### 6.3.3 Auswertung der vorliegenden Versuchsergebnisse

#### 6.3.3.1 Allgemeines

Um den Zusammenhang zwischen  $\epsilon_s$  und  $h$  bzw.  $\Delta h$  mathematisch zu beschreiben, wurden eine Reihe von Ansätzen nach den in Abschnitt 6.1.1 angegebenen Kriterien untersucht. Die in den meisten Fällen beste Anpassung an die Versuchswerte mittels Regressionsrechnung im nicht linearen System wurde mit dem Ansatz

$$\epsilon_{s,q}(h) = A \cdot e^{-h/D} + B \cdot e^{h/D} + C \quad (6.36)$$

bzw.

$$\epsilon_{s,q}(\Delta h) = A \cdot e^{-\Delta h/D} + B \cdot e^{\Delta h} + C \quad (6.36a)$$

erreicht.

Er wurde für alle Auswertegruppen (Mörtel, Steine, Mauerwerk) verwendet. Die Ausgleichsrechnungen erfolgten ohne  $\epsilon(h=0)$ , weil dieser  $\epsilon$ -Wert nach Trocknen bei 105 °C ermittelt wurde und somit nicht ohne weiteres mit den anderen üblicherweise bei +20 °C bestimmten  $\epsilon$ -Werten vergleichbar ist. Außerdem liegen im Bereich geringer Feuchtigkeitsgehalte kaum Prüfwerte vor, so daß dort der Verlauf der  $\epsilon$ -Kurve sehr unsicher ist. Gleichung 6.36 gilt somit nur für den Bereich der Versuchswerte  $\min h \leq h \leq \max h$ . Die Parameter der Gleichung 6.36 sowie die Versuchswerte  $\min h$ ,  $\epsilon(h=0)$ ,  $\max h$  bzw.  $h$  ( $\epsilon=0$ ) und die

errechneten Werte  $\epsilon(h=0)$  und  $h(\epsilon=0)$  enthält ein hier nicht beigefügter Anhang. Die dort angegebenen Tabellen enthalten auch die Parameter A und B der Gleichung  $\text{obs } \epsilon = A + B \cdot \text{cal } \epsilon$ . Wegen der 4-parametrischen Form des Ansatzes war eine direkte parameterbezogene Untersuchung von Einflußgrößen auf den Zusammenhang  $\epsilon_{s,q}$ -h nicht durchführbar. Sie erfolgte durch Vergleich von Einzelkurven oder "Kurvengruppen" mit jeweils etwa gleichen Randbedingungen und ggf. daraus errechneter mittlerer Kurven.

#### 6.3.3.2 Mörtel

Die Kurven  $\epsilon_s = f(h, \Delta h)$  sind in den Bildern 6.71 und 6.72 dargestellt. Sämtliche Mörtel der Gruppen II und IIa (Bild 6.71) waren aus 1 RT hochhydraulischem Kalk und 3 RT Sand zusammengesetzt. Der Wasser-Bindemittel-Wert lag zwischen 0,6 und 0,8.

Bei den Mörteln der Gruppe II begann nennenswertes Schwinden erst bei einem Feuchtigkeitsgehalt unter etwa 7 Vol.-%, in einem Fall bei  $h_v$  etwa unter 12 Vol.-%. Bei den höherfesten Mörteln der Gruppe IIa lag dieser Grenzfeuchtigkeitsgehalt deutlich höher und zwar überwiegend bei 10 bis 15 Vol.-%. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß diese Mörtel schneller erhärteten (höhere Druckfestigkeit) und dadurch einen höheren Feinporenanteil aufwiesen. Allerdings ist der Kurvenverlauf im Bereich höherer Feuchtigkeitsgehalte (etwa  $> 3$  Vol.-%) meist wegen fehlender Versuchswerte sehr unsicher. Dies gilt vor allem für die Mörtel der Gruppe II mit Ausnahme der Kurve 1 in Bild 6.71.

Unterhalb des Grenzfeuchtigkeitsgehaltes nimmt das Schwinden annähernd linear mit abnehmender Feuchtigkeit zu. Diese Feststellungen stimmen grundsätzlich mit den Ergebnissen aus der Literatursichtung überein, wo sich Grenzfeuchtigkeitsgehalte

von etwa 10 Vol.-% und bei weiterer Feuchtigkeitsabnahme ebenfalls eine fast lineare Schwindzunahme ergaben /H11, M8, R6, II/.

Ähnlich verhalten sich die Zementmörtel nach Bild 6.72, sieht man vom  $\epsilon$ -h-Verlauf des bei 105 °C getrockneten Mörtels ab. Der schwindunwirksame anfängliche Feuchtigkeitsverlust nimmt nach Bild 6.72 mit höherem Wassergehalt des Mörtels bzw. abnehmender Vorlagerungsdauer zu (/L8, B8/, s. auch Bild 4.2). Beim Mörtel der Kurve 3 in Bild 6.72 wurde das Schwinden an der Oberfläche gemessen. Dem "Oberflächenschwinden" entspricht jedoch ein geringerer Feuchtigkeitsgehalt als der angegebene mittlere. Die Kurvenpunkte wären deshalb nach links zu verschieben. Wegen der wesentlich anderen Trocknungsbedingung ist dieser Mörtel nicht direkt mit den anderen Mörteln vergleichbar. Die Schwindzunahme im Bereich niedrigerer Feuchtigkeitsgehalte verläuft jedoch ähnlich wie bei den anderen Mörteln.

Der Mörtel der Kurven 1, 2 in Bild 6.72 entspricht hinsichtlich seiner Zusammensetzung und Konsistenz (kellengerecht) Mauermörtel nach DIN 1053 Teil 1 /1/. Bei den Mörteln der Gruppe II trifft dies für alle in Bild 6.71 dargestellten Kurven zu.

Näherungsweise verwendbare "Standardkurven" für die Mörtel der Gruppen II und III sind in Bild 6.100 dargestellt. Sie entsprechen der Kurve für MG III und der gemittelten Kurve für MG II in Bild 6.71. Von der Angabe einer "Standardkurve" für Mörtel der Gruppe IIa oder einer gemittelten "Standardkurve" für MG II und IIa wurde abgesehen, da die 3 infrage kommenden Kurven in Bild 6.71 sehr streuen, bzw. sich zum Teil stark von denen der MG II unterscheiden. Da der Bereich für  $h_v > 3$  Vol.-% bei den Mörteln der Gruppe II, wie erwähnt, meist nicht ausreichend durch Versuchswerte belegt ist, wurde der wahrscheinliche Verlauf in diesem Bereich gestrichelt mit dargestellt.

### 6.3.3.3 Kalksandsteine

Da bei den Versuchsreihen an Prismen im Schwindklima 50/17 für den Verlauf  $\epsilon, h$  zu wenige und zu ungleichmäßig verteilte Versuchswerte  $\epsilon, h$  vorliegen, wird auf diese Versuchsergebnisse im folgenden nicht Bezug genommen. In den Bildern 6.73 bis 6.75 sind  $\epsilon$ - $h$ -Kurven für verschiedene Schwindklimata und Steinmeßstellen dargestellt. Ein eindeutiger und wesentlicher Einfluß der Meßstellen ergibt sich danach nicht. Die  $\epsilon_s$ -Werte unterscheiden sich maximal um rd. 0,10 mm/m. Sehr unterschiedlich verlaufen jedoch die  $\epsilon$ - $h$ -Kurven bei KSV 20 (Bild 6.73) und KSV 28 (Bild 6.74). Die Steine KSV 20 schwinden stetiger, während sich bei KSV 28 das Schwinden nach einem relativ geringem Anfangsschwinden bis zu  $h_v \approx 10$  Vol.-% nur wenig erhöht und erst bei weiterer Feuchtigkeitsabnahme zunehmend stärker ansteigt. Bei  $h_v = 3$  Vol.-% ist  $\epsilon_s$  der Steine KSV 20 rd. 1,5 mal so hoch wie bei KSV 28. Der unterschiedliche Verlauf  $\epsilon$ - $h$  ist wahrscheinlich auf unterschiedliche Porenverteilung zurückzuführen. Das bedeutet jedoch, daß eine einheitliche Betrachtungsweise z. B. in Form einer Standardkurve bei Kalksandsteinen nicht möglich ist. Der Verlauf  $\epsilon$ - $h$  ist bei KSV 28 für die beiden unterschiedlichen Klimata 20/30 und 20/65 in etwa gleich (Bilder 6.74 und 6.75). Das liegt wahrscheinlich daran, daß die Steine in beiden Fällen vom gleichen Herstellwerk stammen. Die  $\epsilon_s$ -Werte für gleiche Feuchtigkeitsgehalte unterscheiden sich allerdings um bis rd. 0,1 mm/m. Ob dies durch Herstellereinflüsse, unterschiedliches Verwendungsalter oder die verschiedenen Prüfklimata verursacht wurde, könnte nur durch zusätzliche Untersuchungen geklärt werden.

Ist unterschiedliches Prüfklima nicht von Einfluß, so wird es bei Steinen mit vergleichbaren schwindwirksamen Eigenschaften (Porenverteilung, Zusammensetzung) möglich sein, feuchtigkeitsbezogene Schwindwerte, die in trockenem Klima bestimmt wurden (Kurzprüfverfahren, siehe /S7/), auf feuchtere Klimata zu übertragen. Da offensichtlich kein wesentlicher Meßstelleneinfluß auftritt, werden für vergleichende Betrachtungen und

wegen des direkten Bezuges zum vertikalen Mauerwerkschwinden die Meßstellen HA bzw. HR gewählt. Die Kurven der Meßstelle HA bzw. HR sind in Bild 6.76 dargestellt.

#### 6.3.3.4 Leichtbetonsteine

Die  $\epsilon$ -h-Kurven für verschiedene Steinmeßstellen von Leichtbetonhohlblocksteinen aus Naturbims- und Blähtonzuschlag sind in den Bildern 6.77 bis 6.85 dargestellt. Danach ist  $\epsilon_{s,q}$  der Meßstellen R (Randbereich) im Bereich höherer Feuchtigkeitsgehalte meist größer als  $\epsilon_{s,q}$  der Meßstellen A (Achse). Später bei niedrigen Feuchtigkeitsgehalten kehrt sich dies im allgemeinen um. Die Ursache dafür ist in der anfangs ungleichen Feuchtigkeitsverteilung und den dadurch bedingten Eigenspannungen bzw. Kriecheffekten zu suchen. Der Feuchtigkeitsgehalt im anfangs stärker schwindenden Randbereich ist niedriger als der zugrundegelegte mittlere Feuchtigkeitsgehalt. Die Kurvenpunkte der R-Meßstellen müßten somit nach links verschoben werden. Das stärkere Schwinden der Randbereiche wird durch die weniger schwindenden Kernbereiche behindert. Den Zugspannungen in den Randzonen halten Druckspannungen im Kernbereich das Gleichgewicht. Daraus resultieren Kriechverformungen im Kernbereich und infolge Relaxation abnehmende Schwindzugspannungen im Randbereich.

Der Schwindunterschied zwischen den einzelnen Meßstellen beträgt im allgemeinen maximal rd. 0,15 mm/m, zum Teil auch mehr.

Wie die Bilder zeigen, unterscheiden sich die  $\epsilon$ -h-Kurven für verschiedene Steinsorten meist deutlich, so daß wie bei den Kalksandsteinen der Bezug auf eine Standardkurve nicht möglich ist. Aus den dort genannten Gründen sollten HA oder HR die Vergleichsmeßstellen sein. Da, wie zuvor begründet, das Schwinden für HK zu hoch bzw.  $h_v$  zu groß ermittelt wird, wurde die Meßstelle HA gewählt.

Die Kurven für die Meßstelle HA bzw., wenn nicht vorhanden, ersatzweise für HR sind in Bild 6.86 dargestellt. Danach tritt nennenswertes Schwinden erst auf, wenn der Feuchtigkeitsgehalt etwa 5 bis 8 Vol.-% unterschreitet, bei Hbl (BT) ist dieser Grenzfeuchtigkeitsgehalt zum Teil noch niedriger. Dies stimmt gut mit Literaturangaben überein, nach denen sich der Grenzfeuchtigkeitsgehalt für Naturbimsbeton zu 7 Vol.-% /T3/ bzw. 10 Vol.-% /K7/ ergibt.

Recht gut stimmten die  $\epsilon$ -Kurven der Steine Hbl-2K (NB) für die Prüfklimare 20/30 und 20/65 überein (Kurven 1 und 2), wobei sich die Versuchswerte noch weniger als die rechnerischen Kurvenwerte (Bild 6.86) unterscheiden.

Mit rd. 10 Vol.-% Feuchtigkeitsgehalt geprüfte Steine (Hbl2-4K (NB)) quollen erwartungsgemäß anfangs weniger als die gleichen in Wasser vorgelagerten Steine. Der Schwindverlauf war in beiden Fällen identisch (Kurven 5 und 6).

Der schwindunwirksame Feuchtigkeitsverlust wird in /R4/ damit erklärt, daß bei Trocknung zunächst die Poren der Zuschlagkörper über die größeren Kapillarporen des Zementsteins entwässert werden. Nach Bild 6.86 ist im Anfangsbereich der Austrocknung meist ein mehr oder weniger großes Quellen (bis zu rd. -0,15 mm/m) festzustellen, was auf diesen anfänglichen Transport von Feuchtigkeit aus den Zuschlägen in den Zementstein zurückzuführen ist.

Das Schwinden unterhalb der Grenzfeuchtigkeit nimmt sehr stark mit abnehmender Feuchtigkeit zu.

Die  $\epsilon$ -h-Kurven für Leichtbetonvollsteine enthalten die Bilder 6.87 bis 6.92. Auch hier unterschieden sich die Kurven für die einzelnen Meßstellen zum Teil erheblich. Meistens tritt der größte Unterschied zwischen den Meßstellen HA-HR und BA-BR auf, während sich LA und LR wenig unterscheiden. Möglicherweise ist

das auf Verdichtungseinflüsse beim Herstellen zurückzuführen. Wie die Bilder 6.91 und 6.92 zeigen, führte ein teilweises Abdichten der Steine zu etwas höherem und längerem Quellen. So begann das Schwinden der abgedichteten Steine erst bei  $h_v < 4$  Vol.-%, das der nicht abgedichteten Steine bereits  $< 5$  Vol.-%.

Als Bezugsmeßstelle wird wiederum HA gewählt. Die Kurven für diese Meßstelle bzw., wenn nicht vorhanden, ersatzweise für BR sind in Bild 6.93 dargestellt.

Die  $\epsilon$ -Kurven verschiedener Steinsorten unterscheiden sich im allgemeinen relativ wenig um bis zu etwa 0,1 mm/m. Nennenswertes Schwinden tritt danach erst auf, wenn der Feuchtigkeitsgehalt etwa 6 bis 10 Vol.-% unterschreitet. Der Grenzfeuchtigkeitsgehalt ist erwartungsgemäß etwas höher als bei den Hohlblocksteinen, da diese ja noch einen in der Regel etwa 25%igen Lochanteil enthalten. Wie bei diesen ist die Schwindzunahme unterhalb der Grenzfestigkeit groß. Auch die Vollsteine quellen teilweise (bis maximal -0,20 mm/m) während der anfänglichen Austrocknung.

Die  $\epsilon$ -h-Kurven der Steine V2-5DF für die Prüfklimata 20/30 und 20/65 stimmten gut überein (Kurven 2 und 3).

#### 6.3.3.5 Betonsteine

Die  $\epsilon$ -h-Kurven enthält das Bild 6.94. Unterschiede zwischen den Meßstellen ergeben sich vor allem während der anfänglichen Austrocknung und zwar insbesondere zwischen LR und HR. Das Schwinden der Meßstelle HR setzt früher ein als das der Meßstelle LR.

Auch die Betonsteine quellen anfangs (bis zu rd. -0,10 mm/m), was durch Feuchtigkeit in den Haufwerkporen und deren Abgabe nach außen über den Zementstein erklärbar wird.

Als Bezugsstelle wird wie zuvor HA gewählt. Wegen des relativ geringen Zementsteingehaltes als einzigem schwindenden Bestandteil beginnt das Schwinden erwartungsgemäß erst bei einem geringen Feuchtigkeitsgehalt von 2 bis 4 Vol.-% und nimmt bei weiterer Feuchtigkeitsabnahme stark zu. Dieser Grenzfeuchtigkeitsgehalt entspricht in etwa dem aus /K7/, der sich zu rd. 4 Vol.-% ergab.

### 6.3.3.6 Gasbetonsteine

Die  $\epsilon$ -h-Kurven sind in den Bildern 6.95 bis 6.97 dargestellt. Sie unterscheiden sich für die verschiedenen Meßstellen während der anfänglichen Austrocknung relativ wenig, im Bereich niedriger Feuchtigkeitsgehalte jedoch meist erheblich um bis zu rd. 0,2 mm/m. Das größte Schwinden tritt dann bei den Randmeßstellen auf. Zum Teil deutlich anders als bei den Steinen ist der  $\epsilon$ -h-Verlauf bei den aus diesen entnommenen Prismen. Allerdings liegt im höheren Feuchtigkeitsbereich nur 1 Versuchswert vor, so daß der errechnete Verlauf sehr unsicher ist. Bei Gasbeton G6 (Bild 6.96) schwinden die Prismen im Bereich  $h_v \approx 5$  bis 6 Vol.-% um rd. 0,15 mm/m weniger als die Steine, bei Gasbeton G2 tritt dagegen kein Unterschied auf. Eine Erklärung dafür wurde nicht gefunden. Wie auch bei den anderen Steinarten sind die  $\epsilon$ -h-Kurven für verschiedene Steinsorten unterschiedlich. Die wieder für die Meßstelle HA bzw. ersatzweise für HR, LA dargestellten Vergleichskurven enthält Bild 6.98. Der grundsätzliche Kurvenverlauf stimmt mit den Literaturangaben überein, nach denen im Bereich hoher Feuchtigkeitsgehalte bis  $h_v$  etwa 10 Vol.-% - meist sogar bis  $h_v \approx 3$  bis 5 Vol.-% - relativ geringes Schwinden auftritt, das Schwinden bei weiter abnehmendem Feuchtigkeitsgehalt jedoch sehr stark ansteigt /D3, E1, H4, G3, D5 und Bild 6.98a aus D5/. Wie aus Bild 6.98 zu ersehen, stimmen die  $\epsilon$ -h-Kurven der mit eingezeichneten Prismenprüfkörper G6, Klimate 20/65 und 20/17 recht gut mit den  $\epsilon$ -h-Kurven der Steine G6 überein (Kurven 7,8 und 4,6). Wenig unterscheiden sich auch die  $\epsilon$ -h-Kurven der Steine G2 für die Prüfkimate



20/30 und 20/65 (Kurven 1 und 3), wobei die Versuchswerte im Bereich kleiner Feuchtigkeitsgehalte enger zusammenliegen als die Kurvenwerte.

#### 6.3.3.7 Mauerwerk

Bei Mauerwerk liegen nur vereinzelt Versuchswerte für den Feuchtigkeitsverlust  $\Delta h$  in M.-% von Mauerwerkpfeilern vor. Der Feuchtigkeitsverlust konnte jedoch nicht von Beginn an bestimmt werden, da die Prüfkörper erst im Alter von 3 bis 5 d ausreichend standfest für den Wägevorgang waren. Wegen des nicht bestimmbar anfanglichen Feuchtigkeitsverlustes sind die  $\epsilon$ - $\Delta h$ -Kurven quantitativ nicht auswert- und vergleichbar. In vielen Fällen liegen auch zu wenig Versuchswerte vor, um Kurven ausreichend gut zu beschreiben.

Grundsätzlich entspricht der  $\epsilon$ - $\Delta h$ -Verlauf von Mauerwerk dem der Einzelsteine. Beispielhaft ist  $\epsilon=f(\Delta h)$  in Bild 6.99 für Mauerwerkpfeiler aus Leichtbetonhohlblocksteinen (NB) dargestellt. Wie aus dem Bild ersichtlich, hat analog zu den Steinen (Bild 6.86) ein bestimmter anfänglicher Feuchtigkeitsverlust kein Schwinden zur Folge. Wird ein gewisser Grenzfeuchtigkeitsgehalt unterschritten, so nimmt das Schwinden bei weiterer Feuchtigkeitsabnahme verstärkt zu. Wird die Pfeilermasse zum Herstellungszeitpunkt aus den Einzelsteinmassen, der Masse der Mörtelfugen und der Masse der Hebevorrichtung abgeschätzt und mit der Masse verglichen, ab der ein nennenswertes Schwinden auftritt, so beträgt der bis dahin aufgetretene Feuchtigkeitsverlust etwa 10 Vol.-%. Daraus ergibt sich der Grenzfeuchtigkeitsgehalt, unterhalb dem nennenswertes Schwinden einsetzt, zu etwa 7 bis 13 Vol.-%. Dies stimmt größenordnungsmäßig mit dem Grenzfeuchtigkeitsgehalt der Einzelsteine überein (siehe Bild 6.86).



### 6.3.3.8 Zusammenhang $\epsilon$ -h und Kapillarzugspannungen

In den Bildern 6.100 und 6.101 sind typische  $\epsilon$ -h-Kurven für Mauermörtel und Mauersteine vergleichend dargestellt, um den zum Teil sehr unterschiedlichen Zusammenhang zwischen Schwinden und Feuchtigkeitsgehalt zu veranschaulichen. Die  $\epsilon$ -h-Verläufe lassen sich in etwa mit der Porenverteilung erklären. Bild 6.102 zeigt die Zusammenhänge zwischen  $\sigma_{\text{kap}} \cdot p_w$  und  $h_v$  für Mörtel und einige Mauersteinarten. Der Anteil der wassergefüllten Poren  $p_w$  wurde anhand der Porenverteilung aus der Literatur bestimmt. Der Feuchtigkeitsgehalt  $h_v$  entspricht dem jeweiligen Kapillarporenanteil. Das Produkt  $\sigma_{\text{kap}} \cdot p_w$  stellt praktisch die Summe der Schwindspannungen dar (s. Gleichung 6.11, Abschnitt 6.3.2).

Wie der Vergleich der Bilder 6.100 und 6.101 mit Bild 6.102 zeigt, sind die  $\epsilon$ -h-Kurven den Kurven in Bild 6.102 grundsätzlich ähnlich. So nehmen bei den Mörteln sowohl  $\sigma_{\text{kap}} \cdot p_w$  wie auch  $\epsilon$  gleichzeitig zu, wenn der Feuchtigkeitsgehalt unter einen bestimmten Wert abnimmt. Da wegen der 7-tägigen Feuchtvorlagerung der Mörtel in Bild 6.100 für den Vergleich eher die Kurve b) in Bild 6.102 zutreffen wird, stimmt auch in etwa der Grenzfeuchtigkeitsgehalt, unterhalb dem nennenswertes Schwinden zu erwarten ist, überein. Aus Bild 6.102 wird auch ersichtlich, wie sehr die Feuchtvorlagerung die Größe der Schwindspannungen über eine geänderte Porenverteilung beeinflussen kann. Inwieweit sich dadurch das Schwinden erhöht, hängt davon ab, wie gleichzeitig die Verformbarkeit beeinflusst wird.

Bei den Mauersteinen verläuft die Kurve 2 für KSV 28 in Bild 6.101 ähnlich wie die obere Grenzkurve in Bild 6.102, wobei dort leider für den Bereich  $h_v < 5$  Vol.-% keine Angaben über die Porenverteilung vorliegen. Bei den Gasbetonsteinen ist die Übereinstimmung zwischen Bild 6.101 und 6.102 zunächst nicht so groß, wenn davon ausgegangen wird, daß der Gasbeton in Bild 6.102 mit einer Rohdichte von  $650 \text{ kg/m}^3$  mit G2 (Steine) in Bild

6.101 (Kurve 8) zu vergleichen ist. Sehr ähnlich ist dagegen der  $\epsilon$ -h-Verlauf der Prismen G2 (Bild 6.95). Welche Prüfkörper den eigentlichen  $\epsilon$ -h-Verlauf zutreffend darstellen, muß durch weitere Untersuchungen geklärt werden. Allerdings weisen auch die Steine G6 einen vergleichbaren  $\epsilon$ -h-Verlauf auf. Bild 6.102 verdeutlicht auch, daß bei Mauerziegeln allein aufgrund ihrer Porenverteilung nur geringes Schwinden zu erwarten ist.

Trotz der lückenhaften und zum Teil noch nicht ausreichend gesicherten Auswertergebnisse erscheint somit der Zusammenhang  $\epsilon$ -h mit den je nach Steinart auftretenden Unterschieden anhand der Porenverteilungen grundsätzlich erklärlich und belegbar.

#### 6.3.3.9 Erkenntnisse aus den Auswertergebnissen und Anwendungsmöglichkeiten

##### Beeinflussung des Schwindens

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, den Endschwindwert durch geringere Anlieferungs- bzw. Einbaufeuchtigkeit der Mauersteine zu verringern. Dies wurde bereits verschiedentlich in Erwägung gezogen und zum Teil auch untersucht /01/. Voraussetzung dafür ist, daß im Bereich höherer Feuchtigkeitsgehalte nennenswertes Schwinden auftritt, worüber bislang kaum Versuchsergebnisse, zumindest nicht quantitativ, vorliegen. Die Erfolgsaussicht derartiger Maßnahmen kann nun aufgrund der vorliegenden Auswertergebnisse beurteilt werden.

So ist nach Bild 6.101 bei Leichtbetonhohlblocksteinen der Grenzfunktigkeitsgehalt, bei dessen Unterschreiten merkliches Schwinden auftritt, sehr klein. Er beträgt zwischen rd. 4 und 10 Vol.-%. Ähnliches ergibt sich mit im Mittel etwas höherem Grenzfunktigkeitsgehalt für Leichtbetonvollsteine. Bei Kalksandsteinen liegt der Grenzfunktigkeitsgehalt bei rd. 20 Vol.-%, bei Gasbetonsteinen zwischen rd. 30 und 40 Vol.-%.

Wird als Bezug die Herstellfeuchtigkeit gewählt, so erscheint es nur bei Kalksandsteinen und Gasbetonsteinen grundsätzlich möglich, den Schwindendwert zu verringern. Die Herstellfeuchtigkeit kann bei Kalksandsteinen etwa zu rd. 10 Vol.-%, bei Gasbetonsteinen doppelt so hoch angesetzt werden /C19, K5, O1/. Dies würde gegenüber wassergelagerten Mauersteinen eine mittlere Schwindverringerung von rd. 0,10 mm/m bei Kalksandsteinen und von etwa 0,20 mm/m bei Gasbetonsteinen ergeben. Voraussetzung dafür wäre selbstverständlich, daß baustellenseits die Herstellfeuchtigkeit nicht überschritten wird.

#### Berücksichtigung besonderer Baueilverhältnisse

Liegen gesicherte  $\epsilon$ -h-Zusammenhänge vor, so kann mit deren Hilfe ermittelt werden, wie sich Endschwindwerte ändern, wenn Bauteile besonderen Feuchtigkeitsverhältnissen ausgesetzt sind. So könnte für Bauteile, die der Witterung ungeschützt ausgesetzt sind (Verblendschalen) und die deshalb einen höheren Feuchtigkeitsgehalt aufweisen als Innenwände in bewohnten Gebäuden aufgrund des  $\epsilon$ -h-Zusammenhanges der dann niedrigere zu erwartende Endschwindwert abgeschätzt werden.

#### Beurteilung der Rißsicherheit

Mit Hilfe des  $\epsilon$ -h-Zusammenhanges können, wenn Feuchtigkeitsgehalt bzw. -verteilung bekannt sind, Schwinddehnungen und Schwindspannungen sowie deren Verteilungen über Bauteilquerschnitte bestimmt werden. Damit sind detaillierte Aussagen über die Rißsicherheit möglich.

#### Versuchsmäßige Bestimmung von Endschwindwerten

Nach den Auswertergebnissen für die Mauersteine in den Abschnitten 6.3.3.3 bis 6.3.3.6 wird der Zusammenhang  $\epsilon$ -h wahrscheinlich nicht direkt von der relativen Luftfeuchte des Schwindklimas beeinflusst, zumindest nicht im Bereich  $U \geq 30$  %. Können andere Einflüsse ausgeschaltet werden - ungleiche Feuchteverteilung durch Wahl querschnittskleiner Prüfkörper -, Karbonatisierung durch Wahl niedriger relativer Luftfeuchte bzw.

Erreichen kurzer Versuchsdauer -, so wäre eine vereinfachte Versuchsdurchführung bei gleichzeitiger erweiterter Ergebnisinformation möglich. Erforderlich sind dann nur noch möglichst exakte Temperaturkonstanz und ein ausreichend niedriger End- oder Zwischenfeuchtigkeitsgehalt. Die relative Luftfeuchte braucht nicht mehr konstant gehalten zu werden, da die wasservorgelagerten Prüfkörper während des Austrocknens auf Schwinden und Feuchtigkeitsgehalt geprüft werden und der Endschwindwert aus dem Zusammenhang  $\epsilon$ -h unter Bezug auf die anzusetzende Gleichgewichtsfeuchte errechnet wird:

$$\epsilon_{h_{\infty}} = \epsilon_{h_{V_0}} - \epsilon_{h_{V_{\infty}}}$$

mit

$h_{V_0}$ : Anfangsfeuchtigkeitsgehalt, z. B. Herstellfeuchtigkeit  
 $h_{V_{\infty}}$ : Gleichgewichtsfeuchte z. B. nach Tabelle 6.2.

## 7. BESTIMMUNG VON ENDWERT UND VERLAUF DER FEUCHTEDEHNUNG VON MAUERWERK

### 7.1 Allgemeines

Im folgenden werden die verschiedenen Möglichkeiten behandelt, die sich aufgrund der vorangegangenen Literatursichtung und der Auswertung von Versuchsergebnissen ergeben, um  $\epsilon_{h_{\infty}}$  und  $\epsilon_h(t)$  von Mauerwerk zu bestimmen.

### 7.2 Aus Versuchen an Mauerwerk oder Einzelsteinen

#### 7.2.1 Allgemeines

Endwert und Verlauf der Feuchtedehnung können überwiegend versuchsmäßig (Mauerwerkwände) bestimmt werden oder kombinatorisch aus Versuchswerten (Mauerwerkpfeiler, Einzelsteinen) errechnet werden.

### 7.2.2 Bestimmungsverfahren

#### A) Versuchsmäßig

Geprüft werden repräsentative Mauerwerkprüfkörper (Wände). Verlauf und Endwert der Feuchtedehnung ergaben sich direkt aus den Versuchswerten (Langzeitversuche) oder werden bei verkürzter Versuchsdauer (Mindestversuchsdauer) rechnerisch extrapoliert. Gegebenenfalls sind die Endwerte wegen der Wasservorlagerung der Steine abzumindern (Abschnitt 7.3.2.2.7).

#### B), C) Versuchsmäßig - Rechnerisch

B1) Geprüft werden standardisierte Mauerwerkpfeller über eine Mindestversuchsdauer. Aus den Versuchswerten werden Endwert und Verlauf der Feuchtedehnung in vertikaler Richtung errechnet. Aus diesen wiederum werden  $\epsilon_{h\infty}$  und  $\epsilon_h(t)$  für andere Gegebenheiten (Bauteilgröße, Luftfeuchtigkeit, Verformungsrichtung) rechnerisch abgeleitet.

B2) Geprüft werden Einzelsteine oder Probekörper aus diesen über eine Mindestversuchsdauer. Aus den Versuchswerten werden Endwert und Verlauf der Feuchtedehnung errechnet und daraus rechnerisch  $\epsilon_{h\infty}$  und  $\epsilon_h(t)$  für Mauerwerk bestimmt.

C) Geprüft werden aus Steinen gesägte Prismen. Die Prismen werden nach einer 48-stündigen Wasservorlagerung bei gleicher Temperatur, aber niedriger relativer Luftfeuchte, die nicht genau eingehalten werden muß ( $U = 30\%$ ) gelagert. Bestimmt werden Feuchtedehnung und der jeweils zugehörige Feuchtigkeitsgehalt, so daß der Endwert feuchtigkeitsbezogen nach Abschnitt 6.3.3.9 ermittelt werden kann.

### 7.2.3 Verfahrensweise

Im folgenden wird beschrieben, wie bei den einzelnen Bestimmungsverfahren vorgegangen ist. Die Bestimmungsverfahren werden durch A, B1, B2 und C bezeichnet.

### 7.2.3.1 Versuchsdurchführung

#### Vorbehandlung der Steine oder Steinprobekörper (A bis C)

Ein ausreichend definierter und auf der sicheren Seite liegender Ausgangszustand bei vertretbarem Versuchsaufwand wird erreicht, wenn sämtliche Mauersteine bzw. Steinprobekörper 48 h in Wasser vorgelagert werden. Um temperaturbedingte Einflüsse zu vermeiden, muß die Wassertemperatur der Temperatur des Prüfklimas entsprechen. Diese soll in der Regel +20 °C betragen. Anschließend sind die Einzelsteine weitere 24 h an Raumluft bei der gleichen Temperatur zu lagern. Dies ist bei der Herstellung von Mauerwerkprüfkörpern erforderlich, um die wasservorgelagerten Steine vermauern zu können. Der Vergleichbarkeit wegen sollte auch bei den Einzelsteinprüfungen so vorgelagert werden. Bei den Steinprismen wird davon abgesehen, um einen zu großen, bei der Feuchtedehnung nicht erfaßten Feuchtigkeitsverlust zu vermeiden. Von allen zu untersuchenden Steinen sollten Steinalter, Trockenrohdichte, Druckfestigkeit und Lochanteil bekannt sein. Empfohlen wird, die Karbonatisierungstiefe mittels Phenolphthaleintest vor Versuchsbeginn und bei Versuchsende, möglichst auch während der Versuchsdauer zu bestimmen.

#### Prüfkörper

##### - Mauerwerkwände (A)

Sollen Endwert und Verlauf der Feuchtedehnung ausschließlich versuchsmäßig ermittelt werden, so sind Versuche an repräsentativen Mauerwerkprüfkörpern - in der Regel Wände - durchzuführen. Ist die Feuchtedehnung nur in vertikaler Richtung zu bestimmen (senkrecht zu den Lagerfugen), so sollte der Prüfkörper 1,25 m hoch sein, damit bei einer ausreichend langen Meßstrecke von 500 mm mit Sicherheit ein Einfluß der oberen und unteren Prüfkörperperrandzonen auf den Meßbereich ausgeschlossen werden kann. Die Prüfkörperbreite sollte  $\geq 4 d$  betragen, damit in etwa Wand- bzw. Plattenverhältnisse gegeben sind. Die wirksame Dicke nach /3/ ist dann 0,8 d. Als Mauerwerkverband ist der für die betreffende Steinsorte übliche bzw. der im Anwen-

dungsfall gegebene Verband zu wählen. Bei Blocksteinen ( $h = 240$  mm) ist das in der Regel der Läuferverband, bei Steinen kleinerer Steinhöhe wird außerdem meist der Läufer-Binder-Verband angewendet. Dieser sollte bevorzugt verwendet werden, da die Endwerte nach Abschnitt 6.2.5.2.6.2 höher als beim Läufer-Verband sind und damit auf der sicheren Seite liegen.

Ist die Feuchtedehnung auch in horizontaler Richtung zu bestimmen, so soll aus den zuvor genannten Gründen der Prüfkörper mindestens 1,25 m breit sein. Um zu gewährleisten, daß die horizontale Feuchtedehnung nicht durch die Auflagerung behindert wird /II16/, soll die Prüfkörperhöhe  $h \geq b$  sein und die Meßstrecke bei  $2/3 h$  angeordnet werden. In diesem Falle ist keine besondere (zwängungsarme) Auflagerung erforderlich.

#### - Mauerwerkpfeiler (B1)

Nach Abschnitt 6.2.5.2.6.2 beeinflussen die vertikalen Stoßfugen in den Binder-Schichten im allgemeinen die Feuchtedehnung in vertikaler Richtung, insbesondere wenn Steine geringer Steinbreite und mit kleinem E-Modul verwendet werden. Unabhängig davon sind Herstellschwierigkeiten und -mängel bei Pfeilern aus kleinformatigen Steinen mit nur jeweils einem Stein je Schicht in besonderem Maße zu erwarten (ungleiche Fugendicke, Verkrümmung der Pfeiler beim Austrocknen). Aus den genannten Gründen werden 2 "Standardprüfkörper" vorgeschlagen: Pfeiler (P) aus Steinen, die  $\geq 240$  (175) mm breit sind und Pfeiler (VP) aus Steinen mit  $b = 115$  mm. In beiden Fällen sind die Pfeiler 1,25 m hoch, um jeweils eine ausreichend lange Meßstrecke zu gewährleisten. Die Pfeiler P bestehen aus 1 Stein je Schicht (Pfeilerbreite = Steinlänge, Pfeilerdicke = Steinbreite). Bei den Pfeilern VP (Verband-Pfeiler) enthält jede Schicht 2 Steine mit dazwischenliegender Stoßfuge.

#### - Einzelsteine Probekörper aus Steinen (B2) (C)

Bei Einzelsteinen wird der ganze Stein als Prüfkörper verwendet. Zur prüftechnischen Vereinfachung (geringerer Raumbedarf,



geringere Versuchsdauer, Vermeiden meßtechnischer Schwierigkeiten bei großformatigen Steinen) wird empfohlen, kleine prismatische Probekörper zu prüfen, die aus Steinen gesägt werden /S7/. Um eine ausreichend lange Meßstrecke bei allen Steinformaten zu erhalten, sollten die Prismen in Richtung Steinlänge bei etwa halber Steinhöhe entnommen werden, bei Kammersteinen aus dem Außensteg. Die Prismen sollen  $\geq 160$  mm lang sein und einen annähernd quadratischen Querschnitt besitzen ( $d \approx b \approx 40$  mm bzw. der Stegdicke entsprechend).

### Meßeinrichtung

#### - Mauerwerkprüfkörper (A, B1)

Die Meßstrecken werden nach Bild 6.103 angeordnet. Die Meßstreckenendpunkte werden mit einem geeigneten Schnellkleber (z. B. X60 der Fa. Hottinger) befestigt. Gemessen wird vorzugsweise mit mechanischen Meßuhren - ggf. auch mit induktiven Wegaufnehmern -. Die Ablesegenauigkeit der Meßuhren soll  $10^{-3}$  mm betragen. Damit kann bei 500 mm Meßstrecke die Feuchtedehnung auf 0,002 mm/m genau bestimmt werden. Die Nullmessung soll erfolgen, wenn die Prüfkörper 3 d alt sind.

#### - Einzelsteine, Steinprobekörper (B2, C)

Die Feuchtedehnung kann am Einzelstein an den Außenflächen mittels Setzdehnungsmesser und in den Steinachsen mit Hilfe von mechanischen Meßuhren oder induktiven Wegaufnehmern gemessen werden. Die "Achsmessungen" sind bei großformatigen Steinen meßtechnisch schwierig. Die Steine müssen in einem "Meßstand" verbleiben oder es sind besonders konstruierte Meßgeräte /S7/ zu verwenden. Das Messen mit Setzdehnungsmessern ist sehr handhabungsempfindlich. Zudem ist es sinnvoll, außer der Feuchtedehnung den Feuchtigkeitsgehalt mit zu bestimmen (s. Abschnitt 6.3). Dies ist jedoch bei großformatigen Steinen schwierig. Aus den vorgenannten Gründen wird empfohlen - wie bereits im Abschnitt Prüfkörper -. an aus Steinen gesägten Prismen zu prüfen. Die Messung sollte vorzugsweise mit einer Prüfvorrichtung

entsprechend /6/ in einem feststehenden Meßrahmen oder mit einem Graf-Kaufmann-Gerät /9/ erfolgen.

Der Verfahrensablauf beim Messen sollte dem in /6/ entsprechen. Die Ablesegenauigkeit der mechanischen Meßuhr soll mindestens  $10^{-3}$  mm betragen. Die Meßzapfen werden in Metallscheiben eingeschraubt, die auf die Prismenstirnseiten geklebt werden und die Belastung aus dem Meßrahmen ausreichend verteilen sollen. Die Nullmessung erfolgt bei den Einzelsteinen nach der 72-stündigen Wasser-Luft-Vorlagerung, bei den Prismen nach der 48-stündigen Wasservorlagerung.

#### Prüfklima (A bis C)

Das Regelprüfklima ist Normalklima 20/65 nach DIN 50014. Für Kurzzeitversuche, die im wesentlichen für Steinprobekörper (Prismen) infrage kommen, wird das Klima 20/30 empfohlen /S7/.

Temperatur- und relative Luftfeuchte dürfen maximal um  $\pm 2$  K bzw.  $\pm 3$  % von den Sollwerten abweichen. Das Klima ist lückenlos über die gesamte Versuchsdauer zu registrieren. Abweichend davon soll  $U \approx 30$  % bei der Verfahrensweise nach C sein, um einen ausreichend niedrigen Feuchtigkeitsgehalt zu erreichen.

#### Prüftermine und Versuchsdauer (A bis C)

Empfohlene Prüftermine für Prismen enthält das Bild 6.103. In der Tabelle 6.6 sind Anhaltswerte für die Mindestversuchsdauer angegeben.

#### 7.2.3.2 Auswertung der Versuchsergebnisse (A bis C)

Werden Endwert und Verlauf der Feuchtedehnung nicht direkt versuchsmäßig erhalten (Langzeitversuche, A)), so sind sie aus vorliegenden Versuchswerten rechnerisch zu bestimmen. Ist nur der Endwert zu ermitteln, so kann dies mit dem Ansatz entsprechend Gleichung 6.1

$$\epsilon_h(t) = t/(B \cdot t + A)$$

(s. Abschnitt 6.1.1) erfolgen. Der Endwert  $\epsilon_{h\infty} = 1/B$  wird erhalten, in dem die Parameter A und B der Gleichung

$$t/\epsilon_h(t) = B \cdot t + A$$

mittels linearer Regression bestimmt werden. Die Regression wird dabei zunächst mit den letzten 5 Prüfwerten und anschließend mit jeweils einem zusätzlichen "jüngeren" Prüfwert durchgeführt. Mit dem Parameter B aus der Regression mit dem größten Bestimmtheitsmaß wird  $\epsilon_{h\infty}$  errechnet. Bei chemisch quellenden Mauerziegeln kann die Wahl eines anderen Ansatzes erforderlich sein.

Der Feuchtedehnungsverlauf kann nach Abschnitt 6.2.1 mit den Ansätzen entsprechend Gleichungen 6.6 und 6.7

$$\epsilon_h(t) = A (1 - e^{-B \cdot t^C})$$

$$\epsilon_h(t) = (A + t)/(B \cdot t + C)$$

beschrieben werden. Beide Ansätze sind nicht einfach zu handhaben. Ausgleichsrechnungen zur Bestimmung der jeweils 3 Parameter sind relativ aufwendig. Der Aufwand wird im wesentlichen davon bestimmt, wie zutreffend die Schätzwerte für die 3 Parameter sind, die für die Ausgleichsrechnung im linearen System benötigt werden. Ob anstelle der obigen Ansätze einfache Beziehungen wie

$$\epsilon_h(t) = t/(B \cdot t + A) \quad \text{oder}$$

$$\epsilon_h(t) = t/(A + t) \cdot \epsilon_{h\infty}$$

mit

A: Gleichungsparameter oder Halbwertzeit  $t_h$

anwendbar sind, hängt von der Form der Feuchtedehnungskurve und der erforderlichen Anpassungsgenauigkeit ab und ist im Einzelfall zu entscheiden.

Die Herleitung von Endwerten und Feuchtedehnungsverläufen für andere Gegebenheiten erfolgt nach Abschnitt 7.3.

### 7.3 Rechnerische und grafische Bestimmung

#### 7.3.1 Allgemeines

Endwert und Verlauf der Feuchtedehnung können, ausgehend von den Auswertergebnissen des Abschnittes 6.2 näherungsweise rechnerisch bzw. grafisch ermittelt werden. Mit gezielten anwendungsbezogenen Versuchen nach Abschnitt 7.2 - gleiche Baustoffe wie im Anwendungsfall - kann die Aussagesicherheit für Endwert und Feuchtedehnungsverlauf erheblich erhöht werden. Dies gilt - mit bei gegenüber Mauerwerkprüfkörpern etwas geringerer Aussagesicherheit - prinzipiell auch für die Versuche mit Steinprobekörpern (Prismen), die besonders wegen des geringen Aufwandes zu empfehlen sind.

#### 7.3.2 Rechnerische Bestimmung des Endwertes

##### 7.3.2.1 Grundgleichungen

Ausgehend von den Auswertergebnissen und Überlegungen in den Abschnitten 6.2 und 6.3 kann der Feuchtedehnungsendwert von Mauerwerk  $\epsilon_{h^\infty, mw}$  rechnerisch hergeleitet werden aus einem Grundendwert  $\epsilon_{h^\infty(o)}$  und additiven oder multiplikativen Beiwerten  $k$ , welche die wesentlichen Einflüsse berücksichtigen:

$$\epsilon_{h^\infty, mw} = f(\epsilon_{h^\infty(o)}, k_1 \text{ bis } k_n).$$

Wegen der einfacheren und schnelleren Bestimmbarkeit von Feuchtedehnungsendwerten am Mauerstein oder an Steinprüfkörpern, erschien es wünschenswert,  $\epsilon_{h^\infty, mw}$  nicht nur aus einem Grundendwert für Mauerwerk  $\epsilon_{h^\infty(o), mw}$ , sondern auch aus einem Grundendwert für Mauersteine  $\epsilon_{h^\infty(o), st}$  ermitteln zu können. Es wurden deshalb 2 verschiedene Grundgleichungen für  $\epsilon_{h^\infty, mw}$  aufgestellt.

Als wesentliche Einflußgrößen auf  $\epsilon_{h^\infty, mw}$  hatten sich nach den Abschnitten 6.2 und 6.3 ergeben:

- die relative Luftfeuchtigkeit des Schwindklimas U (Beiwert  $k_U$ ),
- die Prüfkörper- bzw. Bauteilgröße, dargestellt durch die wirksame Dicke (Beiwert  $k_d$ ),
- der Schwindeinfluß des Mörtels, der je nachdem von welchem Grundendwert ausgegangen wird, unterschiedlich zu berücksichtigen ist (Beiwerte  $k_{m\ddot{o}}(1)$ ,  $k_{m\ddot{o}}(2)$ ),
- der Einfluß unterschiedlicher  $\epsilon_{h\infty}$ -Werte innerhalb eines Steines (Meßstelle MS), der nur zu berücksichtigen ist, wenn vom Grundendwert der Mauersteine ausgegangen wird (Beiwert  $k_{MS}$ ),
- der Einfluß des Steinalters vor dem Vermauern (Beiwert  $k_{to,st}$ ) und
- der Einfluß des Steinfeuchtigkeitsgehaltes beim Vermauern (Beiwert  $k_{h,st}$ ).

Die genannten Beiwerte wurden entsprechend den Auswerteergebnissen der Abschnitte 6.2 und 6.3 additiv oder multiplikativ berücksichtigt. Damit ergaben sich die beiden folgenden Grundgleichungen:

$$\epsilon_{h\infty,mw} = (\epsilon_{h\infty(o),st} \cdot k_{MS} + k_{m\ddot{o}}(1)) \cdot k_U \cdot k_d \cdot k_{to,st} + k_{h,st} \quad (6.37)$$

$$\epsilon_{h\infty,mw} = (\epsilon_{h\infty(o),mw} + k_{m\ddot{o}}(2)) \cdot k_U \cdot k_d \cdot k_{to,st} + k_{h,st} \quad (6.38)$$

Die folgenden Abschnitte enthalten Angaben zu den Grundendwerten und Beiwerten.

### 7.3.2.2 Grundendwerte und Beiwerte

#### 7.3.2.2.1 Grundendwerte

Die  $\epsilon_{h\infty(o)}$  Werte sind in der Tabelle 6.8 angegeben.

Die Grundendwerte für Mauersteine wurden nach den Auswertergebnissen des Abschnitts 6.2.4 für die Meßstelle LR (Richtung Steinlänge) und für  $U = 65 \%$  ermittelt, weil hierfür die meisten Versuchsergebnisse vorlagen. Bis auf wenige Ausnahmen wurden Steine bzw. Steinprüfkörper (Prismen) geprüft, die mindestens 2 d im Wasser vorlagerten (s. Abschnitt 7.3.2.2.6). Soweit möglich, wurden außer dem Mittelwert Fraktilewerte mit angegeben um ggf. Grenzwertbetrachtungen anstellen zu können. Da durch Feuchtedehnungen im allgemeinen Standsicherheitsfragen nicht berührt werden, erschien es vertretbar, statt der sonst üblichen 5- bzw. 95 %-Fraktilen 10- bzw. 90 %-Fraktilen anzugeben (Aussagesicherheit 95 %). Für Mauerziegel konnte wegen der zum Teil sehr unterschiedlichen Endwerte nur ein Schätzwert angegeben werden.

Die Grundendwerte für Mauerwerk wurden nach den Auswertergebnissen des Abschnitts 6.2.5 für  $U = 65 \%$ , eine Wanddicke von 240 mm und  $\epsilon_{h\infty}$  in vertikaler Richtung ermittelt.

#### 7.3.2.2.2 Beiwert Meßstelle Mauerstein

Der Beiwert ist nur zu berücksichtigen, wenn  $\epsilon_{h\infty, mw}$  aus dem Grundendwert des Mauersteins berechnet wird. Er wurde aus den Auswertergebnissen von Abschnitt 6.2.4 abgeleitet. Die  $k_{MS}$ -Werte enthält die Tabelle 6.9. Sie sind infolge der im allgemeinen stark streuenden Versuchswerte oder wegen zu geringer Versuchswerteanzahl als grobe Anhaltswerte anzusetzen.

Der  $\epsilon_{h\infty(o)}$ -Wert für die Meßstellen HA, LA, HR ergibt sich durch Multiplikation von  $\epsilon_{h\infty(o)}$  aus Tabelle 6.9 (Meßstelle LR) mit  $k_{MS}$ .

Werden anstelle von Mauersteinen Prismen als Prüfkörper verwendet, so ist die Steinmeßstelle nach der Entnahmestelle des Prismas im Mauerstein zu bestimmen.

### 7.3.2.2.3 Beiwert Mörtel einfluß

Der Einfluß des Mörtelschwindens auf den Endwert der Feuchte-  
dehnung des Mauerwerks wird entsprechend der Auswertergebnisse  
der Abschnitte 6.2.5.2.6.2 und 6.2.5.2.6.3 additiv durch  $k_{m\ddot{o}}$   
berücksichtigt. Der Anteil  $k_{m\ddot{o}}$  kann nach den Angaben in der  
Tabelle 6.10 bestimmt werden.

Wird  $\epsilon_{h\infty, mw}$  aus dem Grundendwert der Mauersteine ermittelt, so  
ist darauf zu achten, daß  $\epsilon_{h\infty(o), st}$  für die Meßstellen HA (ver-  
tikale Feuchtedehnung) bzw. LA (horizontale Feuchtedehnung) be-  
nutzt wird. Er kann erhalten werden durch Umrechnung mit dem  
Beiwert  $k_{MS}$ . Für die Bestimmung der horizontalen Feuchtedehnung  
wurde vereinfachend grundsätzlich Meßstelle LA angesetzt, ob-  
wohl beim Läufer-Binder-Mauerwerk für die Binderschicht BA ein-  
zusetzen wäre.

Die angegebenen Diagramme für die grafische Ermittlung der  
 $k_{m\ddot{o}}$ -Werte (Bilder 6.36 bis 6.38) basieren auf  $\epsilon_{h\infty, m\ddot{o}} = 0,8 \text{ mm/m}$   
für  $U = 65 \%$ . Da der Einfluß von  $U$  auf den Endwert bei Mörtel  
im allgemeinen nicht wesentlich von dem bei Mauersteinen ab-  
weicht und  $U$  gesondert durch  $k_U$  berücksichtigt wird, können die  
Diagramme näherungsweise auch für andere  $U$ -Werte benutzt wer-  
den. Aus diesem Grunde kann auch in den Rechenformeln  
 $\epsilon_{h\infty, m\ddot{o}} = 0,8 \text{ mm/m}$  gesetzt werden.

Der Beiwert  $k_{m\ddot{o}(2), v}$  in der Tabelle 6.10 ist Null, weil der  
Mörtel einfluß für vertikale Feuchtedehnung bereits im Grundend-  
wert für Mauerwerk enthalten ist. Anhaltswerte zur Berechnung  
von  $\beta = E_{m\ddot{o}}/E_{st}$  sind in der Tabelle 6.11 angegeben.

### 7.3.2.2.4 Beiwert relative Luftfeuchte

Die  $K_U$ -Werte sind in der Tabelle 6.12 zusammengestellt. Sie  
wurden aus den Auswertergebnissen der Abschnitte 6.2.3.1 und  
6.2.4 ermittelt. Größere Unsicherheiten bestehen bei den

$k_U$ -Werten für Gasbetonsteine und Leichtbetonsteine, da hier der Bereich von  $U$  nicht ausreichend durch Prüfwerte belegt war bzw. diese stark streuten. Aber auch die  $k_U$ -Werte für die anderen Steinsorten bedürfen der weiteren Absicherung. Aus DIN 4227 /3/ ergibt sich für Beton ein Verhältniswert

$$k'_U = \frac{\epsilon_{h^\infty}(U=50)}{\epsilon_{h^\infty}(U=70)} = 1,4.$$

der mit dem Verhältniswert für Leichtbetonsteine und Mörtel aus Tabelle 6.12 übereinstimmt. Für Kalksandsteine und Betonsteine ist  $k'_U$  mit 1,3 etwas kleiner, bei Gasbetonsteinen mit 1,8 unerwartet groß.

Für Mauerziegel waren einzelne  $k_U$ -Werte aus den vorliegenden Literatur- und Versuchsergebnissen nicht ableitbar. Wegen der geringen Schwindverformungen ist der Einfluß von  $U$  vernachlässigbar. Bei chemisch quellenden Mauerziegeln ist ein wesentlicher Einfluß von  $U$  im betrachteten Bereich auf den Endwert nicht wahrscheinlich.

Wegen des hohen Steinanteils im Mauerwerk und der im allgemeinen nicht sehr großen Unterschiede der  $k_U$ -Werte zwischen Mauersteinen und Mörtel, erscheint es vertretbar, als  $k_U$ -Wert den der Mauersteine anzusetzen.

#### 7.3.2.2.5 Beiwert Prüfkörpergröße

Nach Abschnitt 6.2.5.2.3 kann für  $k_d$  näherungsweise gesetzt werden

$$k_d = 1 - (240 - d_{ef}) \cdot 0,0017$$

mit

$$d_{ef} = 2A/u \quad (\text{wirksame Dicke in mm}).$$



Die Gleichung ist im Bereich  $d_{ef} \approx 80$  bis 240 mm durch Versuchswerte belegt, jedoch nicht für Mauerwerk aus Mauerziegeln. Der Beiwert  $k_d$  ist für übliche  $d_{ef}$ -Werte in Tabelle 6.13 angegeben.

#### 7.3.2.2.6 Beiwert Alter Mauersteine

Aus der Literatursichtung und den Auswertergebnissen (s. Abschnitt 6.2.4.2.3) geht hervor, daß bei Leichtbetonsteinen der Endwert sehr junger Steine erheblich größer ist als der von Steinen, die etwa mindestens 4 Wochen alt sind. Genauere Angaben über den Alterseinfluß auf den Endwert sind erst nach weiteren Untersuchungen zu erwarten. Näherungsweise kann für Leichtbetonsteine, die höchstens 14 d alt sind

$$k_{to,st} \approx 2$$

angenommen werden.

#### 7.3.2.2.7 Beiwert Vorlagerung Mauersteine

Die Grundendwerte sind im wesentlichen aus Versuchen abgeleitet, bei denen die Mauersteine mehr als 2 d (im allgemeinen 2 d) in Wasser vorgelagert wurden. Die dadurch bedingten hohen "Einbaufeuchten" der Mauersteine bewirken nach Abschnitt 6.3.3.9 jedoch nur bei Kalksandsteinen und vor allem bei Gasbetonsteinen nennenswertes Schwinden im Bereich hoher Feuchtigkeitsgehalte, die wesentlich über der Herstellfeuchtigkeit liegen. Kann davon ausgegangen werden, daß die "Einbaufeuchte" dieser Steinsorten die Herstellfeuchte nicht wesentlich überschreitet, so ergeben sich daraus  $k_{h,st}$ -Beiwerte von etwa

- 0,10 mm/m für Kalksandsteine und
- 0,20 mm/m für Gasbetonsteine.

### 7.3.3 Bestimmung des Feuchtedehnungsverlaufes

Der Feuchtedehnungsverlauf kann aus

$$\epsilon_h(t_2 - t_1) = \epsilon_{h\infty} \cdot (\alpha_{\epsilon, t_2} - \alpha_{\epsilon, t_1})$$

mit Hilfe der in Bild 6.43 angegebenen  $\alpha_{\epsilon}$ -Werte in Abhängigkeit von der Bauteilgröße ermittelt werden. Die dargestellten  $\alpha_{\epsilon}$ -Kurven gelten für  $U = 65 \%$ .

In grober Näherung kann nach Abschnitt 6.2.5.3.5 der Einfluß anderer Austrocknungsverhältnisse analog DIN 4227 Teil 1 /3/ dadurch berücksichtigt werden, daß die wirksame Dicke  $d_{ef} = \frac{2A}{u}$  mit Faktoren  $k_{ef}(U)$  multipliziert wird. Diese können wie folgt angesetzt werden:

U in %	$k_{ef}$
30	0,5
50	0,7
65	1,0

### 8. AUSBLICK AUF WEITERE UNTERSUCHUNGEN

Aufgrund der vorangegangenen Ausführungen ist es möglich, Endwert und Verlauf der Feuchtedehnung von Mauerwerkbauteilen weitgehend rechnerisch zu bestimmen. Es bestehen jedoch dabei noch eine Reihe von Unsicherheiten und offene Fragen, zu deren Klärung ergänzende Untersuchungen notwendig sind. Diese sollten sich beziehen auf:

- a) Ergänzung und Absicherung des Zusammenhanges zwischen relativer Luftfeuchte und Endwert der Feuchtedehnung bei Mauersteinen im Bereich  $U = 30$  bis  $80 \%$ ,
- b) Ergänzung und Absicherung des Zusammenhanges zwischen Feuchtedehnung und Feuchtigkeitsgehalt bei Mauermörteln und Mauersteinen,

- c) Untersuchung, ob und inwieweit infolge Kapillarzugspannungen schwinderhöhende Kriechverformungen hervorgerufen werden und wie diese ggf. quantitativ berücksichtigt werden können,
- d) Zusammenhang zwischen Porenverteilung und Endwerten der Feuchtedehnung unter Bezug auf b),
- e) Karbonatisierungsschwinden (Ursache, Einflüsse, Größe, Verlauf),
- f) Versuchsmäßige Überprüfung des rechnerisch bestimmten Einflusses des Mörtelschwindens auf den Endwert der Feuchtedehnung von Mauerwerk,
- g) Ergänzung und Absicherung der Angaben über den Feuchtedehnungsverlauf von Mauerwerk in Abhängigkeit von Bauteilgröße und Klima,
- h) Ergänzende Untersuchungen für ein Kurzprüfverfahren zur Bestimmung des Feuchtedehnungsendwertes an Steinprismen.

## 9. ZUSAMMENFASSUNG

Formänderungen von Mauerwerk infolge Feuchtigkeitseinwirkung werden unter dem Oberbegriff Feuchtedehnung  $\epsilon_h$  zusammengefaßt. Dazu gehören das weitgehend umkehrbare Schwinden bzw. Quellen sowie das erst bei hoher Temperatur umkehrbare chemisch-physikalische Quellen einiger Mauerziegel. Die Feuchtedehnung stellt im allgemeinen einen wesentlichen Anteil der möglichen gesamten Formänderungen von Mauerwerk dar. Sie kann deshalb die Rißsicherheit von Mauerwerkkonstruktionen wesentlich bestimmen. In diesem Zusammenhang ist die Kenntnis des Feuchtedehnungsverhaltens von Mauerwerk wichtig. Bislang ist darüber nur wenig bekannt. So finden sich in der Literatur nur stark pauschalisierte Angaben über Endwerte /1, S24/. Über wesentliche Einflußgrößen auf diese sowie den zeitlichen Verlauf der Feuchtedehnung liegen quantifizierbare Aussagen nicht vor.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es deshalb, Endwert und Verlauf der Feuchtedehnung von Mauerwerk in Abhängigkeit von den wesentlichen Einflußgrößen zu ermitteln und darzustellen. Ausgangsbasis dafür waren eine umfangreiche und eingehende Literatursichtung zum Feuchtedehnungs- und Austrocknungsverhalten von Mörteln, Mauersteinen und Mauerwerk sowie eine ganze Reihe überwiegend selbständig durchgeführter Untersuchungen zu dieser Thematik.

Im einzelnen wurden ausgewertet:

- Gleichgewichtsfeuchte von Mörteln, Mauersteinen und Mauerwerk in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte,
- Endwerte der Feuchtedehnung von Mörteln und Mauersteinen in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte  $U$  - bei Mauerwerk für  $U = 65 \%$ ,
- Einflußgrößen auf den Endwert der Feuchtedehnung: Stoffliche Eigenschaften, Meßstelle, Prüfkörpergröße, Nacherhärtung, Karbonatisierung, umkehrbarer Anteil der Feuchtedehnung,
- Zusammenhang zwischen Feuchtedehnung und Feuchtigkeitsgehalt,
- Zusammenhang zwischen Porenverteilung, Kapillarzugspannungen und Feuchtedehnung,
- Einfluß von Mörtelschwinden und Bauteilgröße auf den Endwert bzw. den Verlauf der Feuchtedehnung von Mauerwerk,
- Mindestversuchsdauer zur Bestimmung des Endwertes.

Daraus wurden schließlich Verfahren zur Ermittlung des Endwertes und des Verlaufes der Feuchtedehnung von Mauerwerk hergeleitet.

Der Endwert läßt sich danach rechnerisch bzw. grafisch bestimmen aus

$$\epsilon_{h\infty, mw} = (\epsilon_{h\infty(o), st} \cdot k_{MS} + k_{m\ddot{o}(1)}) \cdot k_U \cdot k_d \cdot k_{t_o, st} + k_{h, st}$$

bzw. aus

$$\epsilon_{h\infty, mw} = (\epsilon_{h\infty(o), mw} + k_{m\ddot{o}(2)}) \cdot k_U \cdot k_d \cdot k_{to, st} + k_{h, st}$$

Es bedeuten:

- $\epsilon_{h\infty(o), st}$ ;  $\epsilon_{h\infty(o), mw}$ : Grundendwerte der Feuchtedehnung von Mauersteinen und Mauerwerk
- $k_{MS}$ : Beiwert Meßstelleneinfluß Mauerstein
- $k_{m\ddot{o}(1)}$ ,  $k_{m\ddot{o}(2)}$ : Beiwerte zum Einfluß des Mörtelschwindens
- $k_U$ : Beiwert Einfluß relative Luftfeuchte
- $k_d$ : Beiwert Bauteilgröße
- $k_{to, st}$ : Beiwert Mauersteinalter
- $k_{h, st}$ : Beiwert Vorlagerung Mauerstein.

Die Grundendwerte und Beiwerte sind in Tabellen bzw. Bildern angegeben.

Der zeitliche Verlauf der Feuchtedehnung kann analog zu DIN 4227 Teil 1 für verschiedene wirksame Dicken  $d_{ef}$  (Bauteilgröße) aus

$$\epsilon_h(t_2 - t_1) = \epsilon_{h\infty} \cdot (\alpha_{\epsilon, t_2} - \alpha_{\epsilon, t_1})$$

bestimmt werden.

Die  $\alpha_{\epsilon}$ -Werte sind in einem Diagramm für  $U = 65\%$  angegeben. Andere Austrocknungsverhältnisse können berücksichtigt werden, indem  $d_{ef}$  mit einem Faktor  $k_{ef}(U)$  multipliziert wird.

Damit können Endwert und Verlauf der Feuchtedehnung von Mauerwerk in Abhängigkeit von den wesentlichen Einflußgrößen quantitativ angegeben werden.

10. LITERATURVERZEICHNIS

- A 1 ALBENQUE, H.  
DAS VORQUELLEN VON ZIEGELEIERZEUGNISSEN  
DOCUMENTATION 3. INTERNATIONALE MAUERWERKSKONFERENZ (1973), ESSEN,  
S.304-306  
BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN ZIEGELINDUSTRIE, BONN, (1975)
- A 2 ANDERSON, G.  
PHYSIKALISCHE UND CHEMISCHE EIGENSCHAFTEN VON DAMPFGEHAERTETEM  
PORENBETON BEI LAGERUNG UNTER WASSER  
RILEM-SYMPOSIUM LIGHT WEIGHT CONCRETE, GOETEBORG (1960), THEME I  
ABC, S.109-118
- A 3 AURICH, H.  
UEBER DAS KRIECHEN UND SCHWINDEN VON LEICHT- UND NORMALBETON  
BETON 16 (1966) H.1 S.5-14
- A 4 AL-ALUSI, H.R., BERTERO, V.V., POLIVKA, M.  
EINFLUESSE DER FEUCHTE AUF SCHWINDEN UND KRIECHEN VON BETON  
BETON- UND STAHLBETONBAU 73 (1978) H.1 S.18-23
- A 5 ALTMANN, K.  
DAS VERHALTEN DES BETONS BEI EINWIRKUNG VON FEUCHTIGKEIT  
DISSERTATION, (1968) TU BERLIN
- A 6 AHLGREN, L.  
FUKTFIXERING I PORDESA BYGGNADSMATERIAL  
DISSERTATION, UNIVERSITÄT LUND, SCHWEDEN (1972)
- A 7 ALEXANDROVSKY, S.W., DESOV, A.E.  
SOME CHARACTERISTIC PROPERTIES OF WET STRAINS IN CONCRETE  
RILEM SYMPOSIUM THE SHRINKAGE OF HYDRAULIC CONCRETES, MADRID (1968)  
PAPER III-G
- A 8 ALEXANDERSON, I.  
RELATIONS BETWEEN STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF AUTOCLAVED  
AERATED CONCRETE  
CEMENT AND CONCRETE RESEARCH 9 (1979) S.507-514
- B 1 BROCARD, J.  
ETUDES SUR LA STABILITE DE VOLUME DES TERRES CUITES  
ANNALES DE L INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS,  
PARIS 27 (1966) S.127-131
- B 2 BOUCHER, P.S., FROST, L.J., HOWDEN, M.G.  
RAPID METHOD FOR DETERMINING THE UNRESTRAINED MOISTURE EXPANSION OF  
BURNED CLAY BRICKS  
NATIONAL BUILDING RESEARCH INSTITUTE, COUNCIL FOR SCIENTIFIC AND  
INDUSTRIAL RESEARCH, CSIR RESEARCH REPORT 336, PRETORIA  
SOUTH AFRICA (1977)
- B 3 BRIESEMAN, D.  
FEUCHTELAENGENÄNDERUNG VERSCHIEDENER MAUERSTEINARTEN  
DIE BAUTECHNIK 48 (1971) S.89-93

- B 4 BESSEY,G.E.  
SCHWINDUNG UND DEHNUNG IM MAUERWERK: URSACHEN UND AUSWIRKUNGEN  
2. INTERNATIONALES SYMPOSIUM FUER DAMPFGEHAERTETE KALZIUM SILIKAT  
-BAUSTOFFE, HANNOVER 1969, VORTRAG 6
- B 5 BUTT,Y.M.  
CALCIUM HYDROSILICATES STABILITY IN VARIABLE CONDITIONS  
3. INTERNATIONALES SYMPOSIUM FUER DAMPFGEHAERTETE KALZIUM SILIKAT  
-BAUSTOFFE, UTRECHT (1973), BEITRAG 3.1
- B 6 BLAKEY,F.A.  
INFLUENCE OF WATER-CEMENT RATIO ON MORTAR IN WHICH SHRINKAGE IS  
RESTRAINED  
ACI JOURNAL 55 (1958) S.591-604
- B 7 BAZANT,Z.P., NAJJAR,L.J.  
DRYING OF CONCRETE AS A NONLINEAR DIFFUSION PROBLEM  
CEMENT AND CONCRETE RESEARCH 1 (1971) S.461-473
- B 8 BAZANT,Z.P., NAJJAR,L.J.  
NONLINEAR WATER DIFFUSION IN NONSATURATED CONCRETE  
MATERIAUX ET CONSTRUCTIONS 5 (1972) S.3-20
- B 9 BECKER,N.K., MACINNIS,C.  
A THEORETICAL METHOD FOR PREDICTING THE SHRINKAGE OF CONCRETE  
ACI-JOURNAL 70 (1973) S.652-657
- B10 BAZANT,Z.P., OSMAN,E., THONGUTHAI,W.  
PRACTICAL FORMULATION OF SHRINKAGE AND CREEP OF CONCRETE  
MATERIAUX ET CONSTRUCTIONS 9 (1976) S.395-406
- B11 BROOKS,J.J., NEVILLE,A.M.  
ESTIMATING LONG-TERM CREEP AND SHRINKAGE FROM SHORT-TERM TESTS  
MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH 27 (1975) S.3-12
- B12 BONZEL,J.  
BETON  
BETON-KALENDER (1980), TEIL I, S.5-107  
VERLAG VON WILHELM ERNST +SOHN, BERLIN, MUENCHEN, DUESSELDORF 1980
- B13 BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN KALKINDUSTRIE E.V. KOELN  
MITTEILUNGEN ZUM FORSCHUNGSBERICHT UEBER SCHWINDEN UND QUELLEN  
VON MAUERWERKSKOERPERN
- B14 BODE,G.  
SPANNUNGSOPTISCHE UNTERSUCHUNGEN FUER KALKSANDSTEINFORMLINGE  
2. INTERNATIONALES SYMPOSIUM FUER DAMPFGEHAERTETE KALZIUMSILIKAT-  
BAUSTOFFE, HANNOVER (1969), VORTRAG 8
- C 1 COLE,W.F.  
POSSIBLE SIGNIFICANCE OF LINEAR PLOTS OF MOISTURE EXPANSION  
AGAINST LOG OF A TIME FUNCTION  
NATURE 196 (1962) S.431-433
- C 2 COLE,W.F., BIRTWISTLE,R.  
KINETIC OF MOISTURE EXPANSION OF CERAMIC BODIES  
AMER. CERAMIC. SOC. BULLETIN 48 (1969) S.1128-1132

- C 3 COLE, W.F.  
SOME RELATIONSHIPS BETWEEN MINERALOGICAL AND CHEMICAL COMPOSITION  
AND MOISTURE EXPANSION OF FIRED CLAY BODIES  
JOURNAL OF THE AUSTRALIAN CERAMIC SOCIETY 4 (1968) S.5-9
- C 4 COLDREY, J.M., LEE, H.N.  
EINE STUDIE UEBER DEN EINFLUSS DER KORNVORTEILUNG VON KIESELSAEURE-  
HALTIGEN ZUSCHLAGSTOFFEN AUF DIE SCHWINDUNG VON KALZIUMSILIKAT-  
PROBEKOEPRERN  
2. INTERNATIONALES SYMPOSIUM FUER DAMPFGEHAERTETE KALZIUMSILIKAT-  
BAUSTOFFE, HANNOVER (1969), VORTRAG 17
- C 5 COLDREY, J.M.  
THE EFFECT OF AUTOCLAVING TIME AND PRESSURE ON THE STRENGTH AND  
SHRINKAGE OF CALCIUM SILICATE BRICKS, PART I AND PART II  
WELWYN HALL RESEARCH ASSOCIATION, RESEARCH REPORT 25 UND 39, (1966)
- C 6 CORDES, R., KIRTSCHIG, K.  
UNTERSUCHUNGEN UEBER DEN VERFORMUNGSZUSTAND VON MAUERWERK AUS  
KALKSANDSTEINEN BEI VERTIKALER BELASTUNG  
FORSCHUNGSBERICHT DES LEHRSTUHL UND INSTITUTS FUER BAUSTOFFKUNDE  
UND MATERIALPRUEFUNG TU HANNOVER (UNVEROEFFENTLICHT)
- C 7 CLEMENTI, E.  
DER EINFLUSS DER ROHSTOFFE UND DER HAERTEZEIT AUF DIE SCHWINDUNG  
VON GASBETON  
2. INTERNATIONALES SYMPOSIUM FUER DAMPFGEHAERTETE KALZIUMSILIKAT-  
BAUSTOFFE, HANNOVER (1969), VORTRAG 16
- C 8 COPELAND, R.E.  
SHRINKAGE AND TEMPERATURE STRESSES IN MASONRY  
ACI-JOURNAL 54 (1957) S.769-780
- C 9 COUTINHO, A.S.  
A CONTRIBUTION TO THE MECHANISM OF CONCRETE CREEP  
MATERIAUX ET CONSTRUCTIONS 10 (1977) S.3-15
- C10 CORDES, R.  
UNTERSUCHUNGEN ZUR ANALYTISCHEN DARSTELLUNG DER KRIECHVERFORMUNGEN  
VON BAUSTOFFEN - INSBESONDERE BETON  
MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FUER BAUSTOFFKUNDE,  
TU HANNOVER (1974), H. 25
- C11 CAMMERER, J.S.  
DAS VERHALTEN DER WICHTIGSTEN BAUSTOFFE GEGENUEBER FLUESSIGEM UND  
DAMPFFDERMIGEM WASSER  
TONINDUSTRIE-ZEITUNG 78 (1954) S.199-204
- C12 CHUJO, K., KONDO, M.  
A STUDY ON THE CAUSES OF VOLUME CHANGE OF CEMENT PASTE  
MATERIAUX ET CONSTRUCTIONS 2 (1969) S.23-32
- C13 CZERNIN, W.  
DAS SCHWINDEN DES BEIUNS  
BETONSTEIN-ZEITUNG 26 (1960) S.460-464
- C14 CAMPBELL-ALLEN, D., ROGERS, D.F.  
SHRINKAGE OF CONCRETE AS AFFECTED BY SIZE  
MATERIAUX ET CONSTRUCTIONS 8 (1975) S.193-202



- C15 CARDIERGUES,R.  
ISOLATION ET PROTECTION DES BATIMENTS, PARIS (1954)
- C16 COPELAND,R.E.  
PROCEDURES FOR CONTROLLING CRACKING IN CONCRETE MASONRY  
CONCRETE PRODUCTS 67 (1964) S.48-52
- C17 CZERNIN,W.  
ZEMENTCHEMIE FUER BAUINGENIEURE  
BAUVERLAG GMBH, WIESBADEN UND BERLIN, 3. AUFLAGE 1977
- C18 CHARISIUS,K.  
VERSUCHE UEBER PUTZMOERTEL,MOERTEL UND PUTZ, H.10,  
VERLAG WILHELM ERNST + SOHN, BERLIN (1958)
- C19 COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON  
BULLETIN D INFORMATION NR.122 CEB MANUAL OF AUTOCLAVED AERATED  
CONCRETE, DESIGN AND TECHNOLOGY, NOVEMBER (1977)
- C20 CAMMERER,W.F.  
UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE UEBER DIE KAPILLARE LEITFAEHIGKEIT  
VON BAUSTOFFEN  
WAERME- UND STOFFUEBERTRAGUNG 9 (1976) S.159-166
- D 1 DEKKER,W.  
SORPTION OF WATER BY CALCIUM SILICATE BRICKS  
WELWYN HALL RESEARCH ASSOCIATION, ICSPRO REPORT 22, (1968)
- D 2 DEKKER,W.  
DIE BEHERRSCHUNG DER FEUCHTIGKEITSEMPFINDLICHKEIT VON KALKSANDSTEIN  
-JETZT ERREICHBAR  
STICHTING RESEARCH CENTRUM KALKZANDSTEENINDUSTRIE, BARNEVELD, HOLLAND
- D 3 DWORJADKIN,A, MALINOWSKI,R.  
VOLUME CHANGES OF LIGHT WEIGHT CONCRETE BY REPEATED WETTING AND  
DRYING  
RILEM-SYMPIOSIUM MOISTURE PROBLEMS IN BUILDINGS, HELSINKI (1965)  
BEITRAG 2-35
- D 4 DWORJADKIN,A., WORONEZJ.  
DIE KRIECHSTAUCHUNGEN DES LEICHTBETONS BEI LANGWAEHRENDER  
EINWIRKUNG VON DRUCKBELASTUNGEN  
FORSCHUNGSBERICHT 697/4, CHALMERS TEKNISKA HOEGSKOLA,  
GOETEBORG (1965)
- D 5 DWORJADKIN,A., MALINOWSKI,R.  
POROSITY, COMPRESSIVE STRENGTH AND VOLUME CHANGES OF  
AUTOCLAVED AERATED CONCRETE  
SYMPOSIUM AUTOCLAVED CALCIUM SILICATE BUILDING PRODUCTS,  
LONDON (1965), S.171-173  
SOCIETY OF CHEMICAL INDUSTRY, LONDON (1967)
- D 6 DAVIS,R.E., TROXELL,G.E.  
VOLUMETRIC CHANGES IN PORTLAND CEMENT MORTARS AND CONCRETES  
PROCEEDINGS ACI 25 (1929) S.210-255
- E 1 ENGLAND,G.L.  
METHOD OF ESTIMATING CREEP AND SHRINKAGE STRAINS IN CONCRETE FROM  
PROPERTIES OF CONSTITUENT MATERIALS  
ACI-JOURNAL 62 (1965) S.1411-1420

- E 2 EASTERLY, H.W.  
CORRELATION OF SHRINKAGE AND CURING IN CONCRETE MASONRY UNITS  
PROCEEDINGS ACI 48 (1952) S.393-402
- F 1 FREEMAN, I.L., SMITH, R.G.  
MOISTURE EXPANSION OF STRUCTURAL CERAMICS. I. UNRESTRAINED  
EXPANSION  
TRANS. BRIT. CERAM. SOC. 66 (1967) S.13-35
- F 2 FORSCHUNGSINSTITUT FUER WAERMESCHUTZ E.V. MUENCHEN  
STATISTISCHE AUSWERTUNG DER UNTERSUCHUNGEN UEBER DEN FEUCHTIGKEITS-  
GEHALT VON AUSSENWAENDEN AUS ZIEGELN  
BERICHTE DER FORSCHUNGSSTELLE DES BUNDESVERBANDES DER DEUTSCHEN  
ZIEGELINDUSTRIE E.V., BONN (1973), H. 83, S.37-39
- F 3 FAGERLUND, G.  
GENERAL METHOD FOR CALCULATION OF EQUILIBRIUM SHRINKAGES OF  
POROUS AND BRITTLE MATERIALS  
CEMENT- OCH BETONGINSTITUTET, SWEDISH CEMENT AND CONCRETE RESEARCH  
INSTITUTE, STOCKHOLM (1975), FORSCHUNGSBERICHT 18
- F 4 FREEMAN, P.O.  
A DESIGNERS APPROACH TO MOISTURE MIGRATION  
RILEM-SYMPIOSIUM LIGHT WEIGHT CONCRETE, GOETEBORG (1960),  
THEME III A C E, S.305-317
- F 5 FORSCHUNGSINSTITUT FUER WAERMESCHUTZ E.V. MUENCHEN  
BESTIMMUNG DES PRAKTISCHEN FEUCHTEGHALTES VON AUSSENWAENDEN AUS  
LEICHTBETON MIT GESCHLOSSENEM GEFUEGE  
DOKUMENTATIONSSTELLE FUER BAUTECHNIK IN DER FRAUNHOFER  
-GESELLSCHAFT, INVENTAR NR. T 281
- F 6 FAGERLUND, G.  
GENERAL THEORY FOR SHRINKAGE AND SWELLING OF POROUS MATERIALS AT  
RELATIVE HUMIDITIES ABOVE 45% - WITH APPLICATION TO CONCRETE  
INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR STRUCTURE AND PROPERTIES OF  
MATERIALS, PRAG (1973), S.E-123 - E-148
- F 7 FINTEL, M., KHAN, F.R.  
EFFECTS OF COLUMN CREEP AND SHRINKAGE IN TALL STRUCTURES  
-PREDICTION OF INELASTIC COLUMN SHORTENING  
ACI-JOURNAL 66 (1969) S.957-967
- F 8 FRANZ, G., MOEHLER, K., MUELLER, P., PFEFFERLE, R.  
VERSUCHE MIT MAUERWERK UNTER STATISCHER UND DYNAMISCHER  
BEANSPRUCHUNG  
FORSCHUNGS-AUFTRAG FBW F504
- F 9 FORSCHUNGSVEREINIGUNG KALK-SAND E.V. HANNOVER  
PORENADIENVERTEILUNG VON KALKSANDSTEINEN  
PERSOENLICHE MITTEILUNG VOM 25.4.1977
- G 1 GERTIS, K.  
HYGRISCHE EIGENSINNUNGEN UND VERFORMUNGEN VON GASBETON-  
AUSSENBAUTEILEN  
DIE BAUTECHNIK 52 (1975) S.329-337

- G 2 GRAF, O., SCHAEFFLER, H.  
AUSGLEICHSFEUCHTIGKEIT VON DAMPFGEHAERTETEM GAS- UND SCHAUMBETON  
DAFSTB, H.121
- G 3 GRAF, O., SCHAEFFLER, H.  
VERSUCHE ZUR PRUEFUNG DER GROESSE DES SCHWINDENS UND QUELLENS  
VON GAS- UND SCHAUMBETON  
DAFSTB, H.121
- G 4 GRAF, O., SCHAEFFLER, H.  
SCHWINDEN VON GAS- UND SCHAUMBETON  
DAFSTB, H.117 S.1-23
- G 5 GRAF, O., WEISE, F.  
VERSUCHE UEBER DAS SCHWINDEN VON NATURBIMSBETON, ZIEGELN,  
IPORITBETON UND PORENBETON  
FORTSCHRITTE UND FORSCHUNGEN IM BAUWESEN, REIHE B, H.1, S.12-29
- G 6 GRAF, O.  
AUS NEUEREN FORSCHUNGSARBEITEN FUER DEN BETON- UND EISENBETONBAU  
BETON UND EISEN (1939) H.10, S.162-170
- G 7 GLUEKLICH, J., ISHAI, O.  
CREEP MECHANISM IN CEMENT MORTAR  
ACI-JOURNAL 59 (1962) S.923-948
- G 8 GERTIS, K.  
DIE WAERMELEITUNG IN FEUCHTEN STOFFEN BEI ENDO- BZW. EXOTHERMER  
PHASENAENDERUNG DER FEUCHTIGKEIT  
GESUNDHEITS INGENIEUR 93 (1972) S.354-369
- G 9 GERTIS K., WERNER, H.  
DIE PROBLEMATIK DER PORENANALYSE VON BAUSTOFFEN  
DAFSTB, H.258
- G10 GRONAU, J.  
UNTERSUCHUNGEN ZUR DEUTUNG VON WASSERDAMPFSORPTIONSISOTHERMEN  
UNTER BERUECKSICHTIGUNG DER SCHWINDUNGSERSCHEINUNGEN  
SILIKATTECHNIK 20 (1969) S.21-24
- G11 GORMANN, W.  
DER EINFLUSS KARBONATISCHER BINDUNG AUF DIE EIGENSCHAFTEN  
HYDROTHERMAL ERHAERTETER KALKKIESELSAEUREMASSEN IM SYSTEM  
CAO-SIO2-H2O-CO2  
DISSERTATION TU CLAUSTHAL, (1968)
- G12 GRAF, O.  
GASBETON, SCHAUMBETON, LEICHTKALKBETON  
VERLAG KONRAD WITTEW, STUTTGART (1949)
- G13 GRAF, O., ALBRECHT, W. SCHAEFFLER, H.  
DIE EIGENSCHAFTEN DES BETONS  
SPRINGER-VERLAG BERLIN, GOETTINGEN, HEIDELBERG, 2. AUFLAGE (1960)
- H 1 HOSKING, J.S., HUEBER, H.V.  
MOISTURE EXPANSION, MOISTURE MOVEMENT AND DRYING SHRINKAGE OF  
STRUCTURAL CLAY PRODUCTS  
TRANS. BRIT. CER. SOC. 59 (1960) S.107-115

- H 2 HOSKING, J.S., HUEBER, H.V., WATERS, E.H., LEWIS, R.E.  
THE PERMANENT MOISTURE EXPANSION OF CLAY PRODUCTS  
DIVISION OF BUILDING RESEARCH TECHNICAL PAPER NO. 6, COMMONWEALTH  
SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION, MELBOURNE (1959)
- H 3 HAGE, D.  
FORMAENDERUNGEN VON MAUERWERK  
BERICHTE AUS DER BAUFORSCHUNG (1972) H.76, S.59-107
- H 4 HARRISON, R., DINSDALE, A.  
THE EFFECT OF TEMPERATURE AND PRESSURE ON MOISTURE EXPANSION  
TRANS. BRIT. CER. SOC. 63 (1964) S.63-75
- H 5 HENS, H.  
DIE HYGRISCHEN EIGENSCHAFTEN VON ZIEGEL  
PROCEEDINGS FOURTH INTERNATIONAL BRICK-MASONRY CONFERENCE,  
BRUEGGE (1976), BEITRAG 2.A.10.
- H 6 HOCHSTETTER, R.  
DIE BEZIEHUNG ZWISCHEN EINIGEN GEFUEGEEIGENSCHAFTEN VON KALKSAND-  
STEINEN UND DER SCHWINDUNG  
FORSCHUNGSVEREINIGUNG KALK-SAND E.V.  
FORSCHUNGSBERICHT NR. 15, (1969)
- H 7 HANSON, R.  
MOISTURE IN LIGHT-WEIGHT CONCRETE ROOFS  
RILEM-SYMPIOSIUM LIGHT WEIGHT CONCRETE, GOETEBORG 1960, THEME III C  
S.405-431
- H 8 HAEUFL, P., LAUSCH, W., STOPP, H.  
DAUERFEUCHTEGEHALT IN WAENDEN AUS LEICHTZUSCHLAGSTOFFBETON  
BAUPLANUNG-BAUTECHNIK 31 (1977) S.232-233
- H 9 HEUFERS, H.  
UEBER LANGFRISTIGE SCHWIND- UND KRIECHUNTERSUCHUNGEN AN  
LEICHBETONEN HOEHERER FESTIGKEIT UND VERGLEICHBAREN NORMALBETONEN  
DYCKERHOFF ZEMENT, TECHNISCH-WISSENSCHAFTLICHE MITTEILUNGEN (1969)  
NO. 5
- H10 HEDSTROM, R.O., LITVIN, A., HANSON, J.A.  
INFLUENCE OF MORTAR AND BLOCK PROPERTIES ON SHRINKAGE CRACKING  
OF MASONRY WALLS  
JOURNAL OF THE PCA RESEARCH AND DEVELOPMENT LABORATORIES 8 (1968)  
S.34-51
- H11 HOBBS, D.W., HEARS, A.R.  
THE INFLUENCE OF SPECIMEN GEOMETRY UPON WEIGHT CHANGE AND SHRINKAGE  
OF AIR-DRIED MORTAR SPECIMENS  
MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH 23 (1971) S.89-98
- H12 HUNDT, J., KANTELBERG, H.  
SORPTIONSUNTERSUCHUNGEN AN ZEMENTSTEIN, ZEMENTMOERTEL UND BETON  
DAFSTB., H.297, S.25-39
- H13 HALLER, P.  
DER AUSTROCKNUNGSVORGANG VON BAUSTOFFEN  
EIDGENOESSISCHE MATERIALPRUEFUNGS- UND VERSUCHSANSTALT FUER  
INDUSTRIE, BAUWESEN UND GEWERBE, ZUERICH  
DISKUSSIONSBERICHT NR. 139, ZUERICH (1942)

- H14 HANSEN, T.C., NIELSEN, K.E.C.  
INFLUENCE OF AGGREGATE PROPERTIES ON CONCRETE SHRINKAGE  
ACI-JOURNAL 62 (1965) S.783-794
- H15 HANSEN, T.  
DRYING SHRINKAGE OF CONCRETE DUE TO CAPILLARY ACTION  
RILEM-SYMPIOSIUM THE SHRINKAGE OF HYDRAULIC CONCRETES, MADRID (1968)  
PAPER I-A
- H16 HANSEN, T.C., MATTOCK, A.H.  
INFLUENCE OF SIZE AND SHAPE OF MEMBER ON THE SHRINKAGE AND CREEP  
OF CONCRETE  
ACI-JOURNAL, PROCEEDINGS 63 (1966) S.267-290
- H17 HALLER, P.  
SCHWINDEN UND KRIECHEN VON MOERTEL UND BETON  
EIGENDESSISCHE MATERIALPRUEFUNGSG- UND VERSUCHSANSTALT FUER  
INDUSTRIE, BAUWESEN UND GEWERBE, ZUERICH  
DISKUSSIONSBERICHT NR. 124, ZUERICH (1940)
- H18 HILSDORF, H.K.  
AUSTROCKNUNG UND SCHWINDEN VON BETON  
STAHLBETON, BERICHTE AUS FORSCHUNG UND PRAXIS (RUESCH-FESTSCHRIFT)  
VERLAG WILHELM ERNST + SOHN, BERLIN (1969) S.17-30
- H19 HUMMEL, A.  
VOM SCHWINDEN ZEMENTGEBUNDENER MASSES, SEINER MESSUNG UND SEINEN  
AUSWIRKUNGEN  
ZEMENT-KALK-GIPS 7 (1954) S.293-302
- I 1 ISHAI, O., BAULI, N.  
SHRINKAGE AND CRACKING OF CEMENT MORTARS USED FOR EXTERIOR COATING  
ACI-JOURNAL 63 (1966) S.1247-1264
- I 2 IBAC-PRUEFBERICHT A804 (1981)
- I 3 IBAC-PRUEFBERICHT A782 (1978)
- I 4 IBAC-PRUEFBERICHT A684 (1980)
- I 5 IBAC-PRUEFBERICHT A704 (1980)
- I 6 IBAC-UNTERSUCHUNG V156  
TASTVERSUCHE AN GASBETON- UND KALKSANDSTEINEN ZUM EINFLUSS DER  
RELATIVEN LUFTFEUCHTE UND DER KARBONATISIERUNG AUF DAS  
SCHWINDEN (1980)
- I 7 IBAC-PRUEFBERICHT A705 (1980)
- I 8 IBAC-PRUEFBERICHT A670 (1977)
- I 9 IBAC-PRUEFBERICHT A93 (1970)
- I10 IBAC-PRUEFBERICHT A110 (1970)
- I11 IBAC-PRUEFBERICHT A74 (1969)

- I12 IBAC-PRUEFBERICHT A154 (1970)
- I13 IBAC-PRUEFBERICHT A887 (1979)
- I14 IBAC-FORSCHUNGSVORHABEN F38  
ENTWICKLUNG EINER VERSUCHSEINRICHTUNG ZUR BESTIMMUNG DER GROESSE  
DER FORMAENDERUNGSBEHINDERUNG BEI MAUERWERKSWAENDEN  
(NICHT ABGESCHLOSSEN)
- I15 IBAC-UNTERSUCHUNG V164  
TASTVERSUCHE ZUM SCHWINDEN VON NATURBIMSBETON
- I16 IBAC-FORSCHUNGSVORHABEN F149  
BEURTEILUNG DER RISSICHERHEIT VON MAUERWERKWAENDEN BEI BEHINDERUNG  
HORIZONTALER VERKUEZUNGEN INFOLGE SCHWINDEN UND TEMPERATURABNAHME  
(1981)
- J 1 JOUELL,P.  
DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF CAPILLARY FLOW FOR STEAM-CURED  
LIGHT-WEIGHT CONCRETE  
RILEM-SYMPOSIUM LIGHT WEIGHT CONCRETE, GOETEBORG (1960)  
THEME III C, S.433-437
- J 2 JESSEN,J.J., JANSEN,L.  
PRESTRESSED LIGHTWEIGHT CONCRETE WITH EXPANDED CLAY AGGREGATE  
TECHNICAL CONTRIBUTION, FIP VII CONGRESS, NEW YORK (1974)
- J 3 JOISEL,A.  
INFLUENCE DES RETRAITS HYDRAULIQUE ET THERMIQUE SUR LA FISSURATION  
DES BETONS  
RILEM-SYMPOSIUM OF HYDRAULIC CONCRETES, MADRID (1968), PAPER IV-B
- K 1 KUENZEL,H.  
DER HYGROSKOPISCHE WASSERGEHALT VON BAUSTOFFEN  
INSTITUT FUER BAUPHYSIK DER FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT,  
FORSCHUNGSBERICHT F1259, STUTTGART (1975)
- K 2 KRISTEN,TH., GOTTSCHALK,J.  
DIE AUSTROCKNUNG VERSCHIEDENER GASBETONARTEN UNTER BERUECKSICHTI-  
GUNG DER OBERFLAECHEENBEHANDLUNG  
BETONSTEIN-ZEITUNG 26 (1960) S.415-420
- K 3 KUENZEL,H., HEROLD,P.  
UNTERSUCHUNGEN UEBER DIE FEUCHTIGKEITSVERHAELTNISSE IN AUSSEN-  
WAENDEN AUS GASBETON  
BETONSTEIN-ZEITUNG 35 (1969) S.493-495
- K 4 KINNIBURGH,W.  
MOISTURE CONTENT AND MOISTURE MIGRATION IN AERATED CONCRETE  
SYMPOSIUM AUTOCLAVED CALCIUM SILICATE BUILDING PRODUCTS,  
LONDON (1965), S.174-181  
SOCIETY OF CHEMICAL INDUSTRY, LONDON (1967)
- K 5 KUENZEL,H.  
GASBETON, WAERME- UND FEUCHTIGKEITSVERHALTEN  
BAUVERLAG GMBH, WIESBADEN UND BERLIN 1971

- K 6 KINNIBURGH,W.  
COMPARISON OF DRYING SHRINKAGE OF AUTOCLAVE AND AIR CURED CONCRETE  
AT DIFFERENT HUMIDITIES  
RILEM-SYMPIOSIUM LIGHT WEIGHT CONCRETE, GOETEBORG (1960), THEME I C,  
S.85-98
- K 7 KALOUSEK,G.L., O HEIR,R.J., ZIEMS,K.L., SAXER,E.L.  
RELATION OF SHRINKAGE TO MOISTURE CONTENT IN CONCRETE BLOCK  
ACI-JOURNAL 50 (1953) S.225-240
- K 8 KALOUSEK,G.L.  
FUNDAMENTAL FACTORS IN THE DRYING SHRINKAGE OF CONCRETE BLOCK  
ACI-JOURNAL 51 (1954) S.233-248
- K 9 KLOPFER,H.  
WASSERTRANSPORT DURCH DIFFUSION IN FESTSTOFFEN  
BAUVERLAG GMBH, WIESBADEN UND BERLIN (1974)
- K10 KUENZEL,H.  
WAERME- UND FEUCHTIGKEITSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN AN LEICHTBETON-  
WAENDEN IN HOMOGENER BAUART  
FORSCHUNGSBERICHT F1290, INSTITUT FUER BAUPHYSIK, STUTTGART (1975)
- K11 KUENZEL,H., GERTIS,K.  
UNTERSUCHUNGEN UEBER DEN PRAKTISCHEN FEUCHTIGKEITSGEHALT VON  
WOHNUNGS-AUSSENWAENDEN AUS SCHWERBETON-HOHLBLOCKSTEINEN  
BERICHTE AUS DER BAUFORSCHUNG (1968) H.51 S.35-39
- K12 KRUML,F.  
SHORT- AND LONG-TERM DEFORMATION OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT-  
AGGREGATE CONCRETE  
PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTWEIGHT  
CONCRETE, LONDON (1968)  
LONDON, CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION FOR THE CONCRETE SOCIETY,  
1 (1968) S.99-110, SESSION B, PAPER 4
- K13 KAST,W., JOKISCH,F.  
UEBERLEGUNGEN ZUM VERLAUF VON SORPTIONSISOTHERMEN UND ZUR  
SORPTIONSKINETIK AN PORESEN FESTSTOFFEN  
CHEMIE-ING.-TECHN. 44 (1972) S.556-563
- K14 KENDEL,F.  
DAMPFHAERTUNG VON KALKSANDSTEIN BEI VERLAENGERTER HAERTEZEIT UND  
NIEDRIGEREN TEMPERATUREN-EINFLUSS AUF DIE STEINEIGENSCHAFTEN  
FORSCHUNGSVEREINIGUNG KALK-SAND E.V.  
FORSCHUNGSBERICHT NR. 46, FEBRUAR (1978)
- K15 KAMIMURA,K., SEREDA,P.J., SWENSON,F.G.  
CHANGES IN WEIGHT AND DIMENSIONS IN THE DRYING AND CARBONATION OF  
PORTLAND CEMENT MORTARS  
MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH 17 (1965) S.5-14
- K16 KROONE,B., BLAKEY,F.A.  
REACTION BETWEEN CARBON DIOXIDE GAS AND MORTAR  
ACI-JOURNAL 56 (1959) S.497-510
- K17 KUENZEL,H., POPP,W.  
EINFACHE METHODE ZUR ERMITTLUNG EINES RICHTWERTES FUER DEN  
PRAKTISCHEN FEUCHTEGEHALT VON BAUSTOFFEN  
INSTITUT FUER BAUPHYSIK DER FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT  
FORSCHUNGSBERICHT T143, STUTTGART (1976)

- K18 KIESSL,K., GERTIS,K.  
ISOTHERMER FEUCHTETRANSPORT IN PORESEN BAUSTOFFEN  
DAFSTB, H. 258
- K19 KRUEGER,W.  
UEBER SCHWINDMASSE, KRIECHZAHLEN UND KRIECHTHEORIEN VON BETON  
BAUPLANUNG-BAUTECHNIK 20 (1966) S.329-333
- K20 KENDEL,F.  
DER EINFLUSS DES BRENNGRADES DES KALKES AUF DAS SCHWINDVERHALTEN  
VON KALKSANDSTEINEN  
FORSCHUNGSVEREINIGUNG KALK-SAND E.V.  
FORSCHUNGSBERICHT NR.47,JUNI (1978)
- K21 KRISCHER,D., KAST,W.  
DIE WISSENSCHAFTLICHEN GRUNDLAGEN DER TROCKNUNGSTECHNIK  
3. AUFLAGE, SPRINGER-VERLAG, BERLIN, HEIDELBERG, NEW YORK (1978)
- K22 KRISCHER,D., MAHLER,K.  
UEBER DIE BESTIMMUNG DES DIFFUSIONSWIDERSTANDES UND DER KAPILLAREN  
FLUESSIGKEITSLITZAHLE AUS STATIONAEREN UND INSTATIONAEREN  
VORGANGEN  
VDI-FORSCHUNGSHEFT 473, BEILAGE ZU FORSCHUNG AUF DEM GEBIET DES  
INGENIEURWESENS, AUSGABE B, 25 (1959), VDI-VERLAG GMBH DUESSELDORF
- L 1 LAIRD,R.T., WICKENS,A.A.  
THE MOISTURE EXPANSION OF FULL-SIZE BRICKS  
TRANS. BRIT. CERAM. SOC. 67 (1968) S.629-638
- L 2 LEHMANN,H., ABRAHAM,D., FAROOQ,M.K.  
DIE FEUCHTIGKEITSDENUNUNG, I. KINETIK UND MECHANISMEN IN DER  
LITERATUR  
BER. DTSCH. KERAM. GES. 46 (1969) S.19-23
- L 3 LEHMANN,H., ABRAHAM,D., FAROOQ,M.K.  
UNTERSUCHUNG DER FEUCHTIGKEITSDENUNUNG EINES ZIEGELTONES MIT  
DYNAMISCHEN MESSVERFAHREN  
DIE ZIEGELINDUSTRIE 22 (1969) S.372-379
- L 4 LENCZNER,D.  
CREEP AND MOISTURE STRAINS IN STAFFORDSHIRE WALLS  
UNIVERSITY OF WALES, INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, DEPART-  
MENT OF CIVIL ENGINEERING AND BUILDING TECHNOLOGY, (1976), REPORT  
NO. 2
- L 5 LEHMANN,H., ABRAHAM,D., FAROOQ,M.K.  
DIE FEUCHTIGKEITSDENUNUNG, IV. KINETIK UND MECHANISMUS DER  
FEUCHTIGKEITSDENUNUNG VON PORESEN KERAMISCHEN SCHERBEN BEI  
NIEDRIGEN WASSERDAMPFPARTIALDRUECKEN  
BER. DTSCH. KERAM. GES. 46 (1969) S.551-554
- L 6 LEHMANN,H., ABRAHAM,D.  
DIE FEUCHTIGKEITSDENUNUNG, V. KINETIK UND MECHANISMUS DER DENUNUNG  
BEI DYNAMISCHER MESSUNG UNTER AUTOKLAVBEDINGUNGEN  
BER. DTSCH. KERAM. GES. 46 (1969) S.649-655
- L 7 LEBER,J., BLAKEY,F.A.  
SOME EFFECTS OF CARBON DIOXIDE ON MORTARS AND CONCRETE  
ACI-JOURNAL 53 (1956) S.295-308



- L 8 L HERMITE,R., MAMILLAN,M.  
DESSICATION ET RETRAIT SOUS VIDE ET A DIFFERENTES HYGROMETRIES  
RILEM-SYMPOSIUM THE SHRINKAGE OF HYDRAULIC CONCRETES, MADRID 1968  
PAPER III-B
- L 9 L HERMITE,R., MAMILLAN,M.  
INFLUENCE DE LA DIMENSION ET DE LA FORME SUR LE RETRAIT DES PIECES  
DE BETON  
RILEM-SYMPOSIUM THE SHRINKAGE OF HYDRAULIC CONCRETES, MADRID 1968  
PAPER III-A
- M 1 MEYER,H.G., GROSSKOPF,U.  
BERICHT UEBER SCHWIND- UND KRIECHVERSUCHE AN MAUERWERKSROBEN  
2. INTERNATIONALES SYMPOSIUM FUER DAMPFGEHAERTETE KALZIUMSILIKAT-  
BAUSTOFFE, BEITRAG 43, HANNOVER 1969
- M 2 MC DOWALL,I.C., BIRTWISTLE,R.  
PREDICTING THE LONG-TERM MOISTURE EXPANSION OF FIRED CLAY PRODUCTS  
PROCEEDINGS OF THE SECOND INTERNATIONAL BRICK MASONRY CONFERENCE,  
STOKE-ON-TRENT (ENGLAND) 1970, S.75-79
- M 3 MAKARICHEV,V.V.  
RECOMMENDATIONS FOR THE DESIGN OF AERATED CONCRETE MEMBERS  
OHNE QUELLENANGABE
- M 4 MC KEEN,R.G., LEDBETTER,W.B.  
SHRINKAGE-CRACKING CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT  
CONCRETE  
ACI-JOURNAL 67 (1970) S.769-777
- M 5 MUSEWALD,J.  
EIGENSCHAFTEN VON BIMS UND BIMSBAUSTOFFEN  
BETON-INFORMATIONEN 66 (1969) S.2-10
- M 6 MC BURNEY,J.W.  
MASONRY CRACKING AND DAMAGE CAUSED BY MOISTURE EXPANSION OF  
STRUCTURAL CLAY TILE  
PROC. AMER. SOC. TEST. MAT. 54 (1954) S.1219-1238
- M 7 MEYER,E.V., NIELSEN,K.E.C.  
NEUE ERKENTNISSE UEBER DAS SCHWINDEN DES BETONS  
BETONSTEIN-ZEITUNG 23 (1957) S.573-583
- M 8 MILLS,R.H.  
SHRINKAGE OF CONCRETE CONTAINING BLASTFURNACE SLAG  
RILEM-SYMPOSIUM THE SHRINKAGE OF HYDRAULIC CONCRETES, MADRID 1968  
PAPER II-J
- M 9 MEARS,A.R., HOBBS,D.W.  
THE EFFECT OF MIX PROPORTIONS UPON THE ULTIMATE AIR-DRYING OF  
MORTARS  
MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH 24 (1972) S.77-84
- M10 MAHLER,K.  
UEBER DIE BESTIMMUNG DES DIFFUSIONSWIDERSTANDES UND DER KAPILLAREN  
FLUESSIGKEITSLITZAHLE AUS STATIONAEREN UND INSTATIONAEREN VORGAENGEN  
DISSERTATION, TH DARMSTADT, (1958)

- M11 MILLS,R.H.  
DEPENDENCE OF DRYING SHRINKAGE ON DIMENSIONS OF SPECIMENS  
THE CIVIL ENGINEER IN SOUTH AFRICA (1969) S.281-289
- M12 MARTIN,I.  
DISKUSSION ZU :  
DESIGN AID FOR PREDICTING CREEP AND SHRINKAGE PROPERTIES OF  
CONCRETE  
ACI-JOURNAL 70 (1973) S.247-249
- M13 MAMILLAN,M.  
UNTERSUCHUNGEN UEBER DAS SCHWINDEN DES BETONS  
BETONSTEIN-ZEITUNG 26 (1960) S.465-469
- M14 MEYERS,B.L., BRANSON,D.E., SCHUMANN,C.G.  
PREDICTING OF CREEP AND SHRINKAGE BEHAVIOR FROM 28-DAY DATA  
SOUTH AMERICAN CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING.  
UNIVERSITY OF IOWA, IOWA CITY (1970), DEPARTMENT OF ENGINEERING  
REPORT NO. 70-8
- M15 MATERIALPRUEFUNGS- UND VERSUCHSANSTALT NEUWIED  
PRUEFUNGSBERICHT L860/70  
UNTERSUCHUNG DES SCHWINDVERHALTENS VON BIMSBETON FUER DIE  
HERSTELLUNG VON STAHLBEWEHRTEN BIMSBETON-HOHLDIELEN
- M16 MATERIALPRUEFUNGS- UND VERSUCHSANSTALT NEUWIED  
PRUEFUNGSBERICHT L309A/70  
SCHWINDMESSUNG AN MAUERWERK AUS BISOTHERM-HOHLBLOCKSTEINEN
- M17 MATERIALPRUEFUNGS- UND VERSUCHSANSTALT NEUWIED  
PRUEFUNGSBERICHT L309/70  
SCHWINDMESSUNG AN MAUERWERK AUS BISOTHERM-VOLLBLOECKEN
- M18 MATERIALPRUEFUNGS- UND VERSUCHSANSTALT NEUWIED  
PRUEFUNGSBERICHT L48/71  
VERGLEICH DER FESTIGKEITSENTWICKLUNG UND DES SCHWINDVERHALTENS  
VON DAMPF- UND LUFTGEHAERTETEN NATURBIMS-MAUERSTEINEN
- M19 MAYER,F.  
SCHWINDVERHALTEN VON WANDBAUSTEINEN  
BETONWERK + FERTIGTEILTECHNIK (1977) H.11 S.555-560
- M20 MEYERS,B.L., BRANSON,D.E.  
DESIGN AID FOR PREDICTING CREEP AND SHRINKAGE PROPERTIES OF CONCRETE  
ACI-JOURNAL 69 (1972) S.551-555
- N 1 NOORLANDER,A.  
REDUCING THE SHRINKAGE OF CALCIUM SILICATE BRICKS  
SYMPOSIUM AUTOCLAVED CALCIUM SILICATE BUILDING PRODUCTS,  
LONDON (1965), S.152-154  
SOCIETY OF CHEMICAL INDUSTRY, LONDON (1967)
- N 2 NEUNAST,A.  
BIMSBLOCKSTEINE UND LEICHTQUERTEL, ERHOEBTER WAERMESCHUTZ  
DAS BAUGEWERBE 19 (1975) S.30-36
- N 3 NEUNAST,A.  
FEUCHTIGKEITSGEHALT UND WAERMELEITFAEHIGKEIT VON WAENDEN AUS  
BIMSBASTOFFEN  
BETONSTEIN-ZEITUNG 36 (1970) S.614-619

- O 1 OPPERMANN,H.-U., HOCHSTETTER,R.  
DAS AUSTROCKNUNGSVERHALTEN VON GASBETON BEI UNTERSCHIEDLICHER  
LAGERUNGSART  
FORSCHUNGSVEREINIGUNG KALK-SAND E.V.  
FORSCHUNGSBERICHT NR. 30, (1974)
- O 2 OPPERMANN,H.-U.  
DIE GASDURCHLAESSIGKEIT VON KALZIUM-SILIKATPRODUKTEN  
2. INTERNATIONALES SYMPOSIUM FUER KALZIUM SILIKAT-BAUSTOFFE  
HANNOVER (1969), BEITRAG 53
- P 1 PLANK,A., KRETSCHMANN,G.  
UEBER DIE EIGNUNG VON LEICHTMOERTELEN ALS MAUERMOERTEL  
MITTEILUNGEN DES INSTITUT FUER BAUTECHNIK 1 (1977) S.3-10  
UND PRUEFZEUGNIS NR. I/16573 DER BUNDESANSTALT FUER MATERIAL-  
PRUEFUNG-
- P 2 PURTON,M.J.  
THE EFFECT OF SAND GRADING ON THE CALCIUM SILICATE BRICK REACTION  
CEMENT AND CONCR. RES. 4 (1974) S.13-29
- P 3 PURTON,M.J., COLDREY,J.M.  
THE EFFECT OF AUTOCLAVING CONDITIONS ON THE CONSTITUTION AND  
PROPERTIES OF CALCIUM SILICATE BRICK SPECIMENS  
TRANS. BRITISH CERAMIC SOC. 69 (1970) S.103-113
- P 4 PYLE,M.A.  
THE PROPERTIES AND BEHAVIOR OF CALCIUM SILICATE BRICKS IN BUILDINGS  
AND THE DESIGN OF STRUCTURES USING THEM IN THE UNITED KINGDOM  
SYMPOSIUM AUTOCLAVED CALCIUM SILICATE BUILDING PRODUCTS,  
LONDON (1965), S.220-229  
SOCIETY OF CHEMICAL INDUSTRY,LONDON (1967)
- P 5 PIHLAJAARA,S.E.  
A REVIEW OF SOME OF THE MAIN RESULTS OF A RESEARCH ON THE AGEING  
PHENOMENA OF CONCRETE  
CEMENT AND CONCR. RES. 4 (1974) S.761-771
- P 6 PICKETT,G.  
EFFECT OF AGGREGATE ON SHRINKAGE OF CONCRETE AND A HYPOTHESIS  
CONCERNING SHRINKAGE  
ACI-JOURNAL 53 (1956) S.581-590
- P 7 PIHLAJAARA,S.E.  
ON THE MAIN FEATURES AND METHODS OF INVESTIGATION OF DRYING AND  
RELATED PHENOMENA IN CONCRETE  
DISSERTATION, UNIVERSITAET HELSINKI (1965)
- P 8 POWERS,T.C.  
GRUNDLAGEN DES BETONSCHEINDENS  
BETONSTEIN-ZEITUNG 27 (1961) S.45-51
- P 9 POWERS,T.C.  
MECHANISM OF SHRINKAGE AND REVERSIBLE CREEP OF HARDENED CEMENT  
PASTE  
PROCEEDINGS INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURE OF CONCRETE AND  
ITS BEHAVIOR UNDER LOAD, LONDON (1965)  
CEMENT AND CONCR. ASSOCIATION, LONDON (1968)

- P10 PROBST,F., STOECKL,S.  
VERSUCHE ZUM KRIECHEN VON KONSTRUKTIONSLICHTBETON  
DEUTSCHER AUSSCHUSS FUER STAHLBETON, H.313
- P11 PILTZ,G.  
PORENGROESSENVERTEILUNG IN ZIEGELSCHERBEN UND IHRE BEDEUTUNG FUER  
DIE FROSTFESTIGKEIT  
DIE ZIEGELINDUSTRIE 23 (1970) S.327-339
- R 1 RADJY,F., RICHARDS,C.W., HANSEN,T.C.  
EINFLUSS DER KORNDIVERTILUNG UND DES C/S-VERHAELTNISSES AUF DIE  
SCHWINDUNG VON DAMPFGEHAERTETEN KALZIUM SILIKATPRODUKTEN  
2. INTERNATIONALES SYMPOSIUM FUER DAMPFGEHAERTETE KALZIUM SILIKAT-  
BAUSTOFFE, HANNOVER (1969), BEITRAG 65
- R 2 REINSDORF,S., KUEHNE,G.  
HOCHFESTE KONSTRUKTIVE LICHTBETONE  
SCHRIFTENREIHE DER BAUFORSCHUNG, REIHE STAHLBETON, H.20,  
BERLIN (1971)
- R 3 RUETLEDGE,S.E., NEVILLE,A.M.  
THE INFLUENCE OF CEMENT PASTE CONTENT ON THE CREEP OF LIGHTWEIGHT  
AGGREGATE CONCRETE  
MAG. OF CONCR. RES. 18 (1966) S.69-74
- R 4 ROSTASY,F.S., TEICHEN,K.TH., ALDA,W.  
UEBER DAS SCHWINDEN UND KRIECHEN VON LICHTBETON BEI UNTER-  
SCHIEDLICHER KORNEIGENFEUCHTIGKEIT  
VERSUCHSBERICHT DER AMTLICHEN FORSCHUNGS- UND MATERIALPRUEFUNGS-  
ANSTALT FUER DAS BAUWESEN, OTTO-GRAF-INSTITUT AN DER UNIVERSITAET  
STUTTGART, (1972)
- R 5 REINHARDT,H.-W.  
KRIECHVERSUCHE AN LICHTBETON  
BETON 29 (1979) S.88-90
- R 6 ROSTASY,F.S.  
ZUR THEORIE DER AUSTRÖCKNUNG UND DES SCHWINDENS ZEMENTGEBUNDENER  
MASSEN  
ZEMENT-KALK-GIPS 13 (1960) S.93-103
- R 7 RUETZ,W.  
DAS KRIECHEN DES ZEMENTSTEINS IM BETON UND SEINE BEEINFLUSSUNG  
DURCH GLEICHZEITIGES SCHWINDEN  
DAFSTB, H.183
- R 8 RUESCH,H., JUNGWIRTH,D., HILSDORF,H.  
KRITISCHE SICHTUNG DER VERFAHREN ZUR BERUECKSICHTIGUNG DER  
EINFLUESSE VON KRIECHEN UND SCHWINDEN DES BETONS AUF DAS  
VERHALTEN DER TRAGWERKE  
BETON- UND STAHLBETONBAU 68 (1973) S.49-60, 76-86, 152-158
- R 9 ROSTASY,F.  
THEORETISCHE UND EXPERIMENTELLE BEITRAEGE ZUR ERFORSCHUNG DES  
SCHWINDENS UND DER SCHWINDSPANNUNG DES BETONS  
DISSERTATION, STUTTGART (1957)

- R10 ROMBERG, H.  
ZEMENTSTEINPOREN UND BETONEIGENSCHAFTEN  
BETON-INFORMATIONEN (1978), H.5, S.50-55, BETON-VERLAG GMBH,  
DUESSELDORF
- R11 ROSS, A. D.  
CONCRETE CREEP DATA  
THE STRUCTURAL ENGINEER 15 (1937)
- R12 REICHEL, W.  
YTONG-HANDBUCH, 2. AUFLAGE 1974, BAUVERLAG GMBH, WIESBADEN
- S 1 SCHMIDT, H.  
UNTERSUCHUNGEN UEBER DIE LAENGENAENDERUNG VON BAUSTOFFEN DURCH  
FEUCHTEAUFNAHME, INSBESONDERE VON ZIEGELN  
BERICHTE DER FORSCHUNGSSTELLE DES BUNDESVERBANDES DER DEUTSCHEN  
ZIEGELINDUSTRIE E.V., BONN (1973), H. 78, S.5-13
- S 2 SCHELLBACH, G.  
FEUCHTEDEHNUNG BEI ZIEGELN  
DIE ZIEGELINDUSTRIE 18 (1969) S.379-383
- S 3 SCHUELE, W.  
DER FEUCHTIGKEITSGEHALT VON AUSSENMAUERN IN BEWOHNTE GEBAEUDEN  
FORTSCHRITTE UND FORSCHUNGEN IM BAUWESEN. REIHE D, H.3, (1952),  
S.38-54  
MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FUER TECHN. PHYSIK, STUTTGART
- S 4 SCHUELE, W.  
WAERME- UND FEUCHTIGKEITSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN AN AUSSENWAENDEN  
AUS VERSCHIEDENEN LOCHZIEGELN UND AUS LEICHTBETON-HOHLBLOCKSTEINEN  
BERICHTE AUS DER BAUFORSCHUNG, H.23, S.29-47
- S 5 SCHUELE, W., SCHAECKE, H.  
FEUCHTIGKEITSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN AN MASSIVEN UND ZWEI-  
SCHALIGEN KALKSANDSTEINMAUERN  
TONINDUSTRIE-ZEITUNG 76 (1952) H.19/20 S.307-313
- S 6 SCHUELE, W., HENKE, A.  
UNTERSUCHUNGEN UEBER DEN PRAKTISCHEN FEUCHTIGKEITSGEHALT VON KALK-  
SANDSTEIN-AUSSENWAENDEN  
GESUNDHEITS-INGENIEUR 72 (1951) S.219-223
- S 7 SCHUBERT, P., GLITZA, H.  
ENTWICKLUNG EINES SCHWINDPRUEFVERFAHRENS ZUR ERMITTLUNG DES  
SCHWINDENDWERTES VON WANDBAUSTEINEN  
IBAC-FORSCHUNGSBERICHT F74, (1980)
- S 8 SCHAEFFLER, H.  
DER DAMPFGEHAERTETE GASBETON UND DIE EIGENSCHAFTEN DER DARAUSS  
GEFERTIGTEN BAUTEILE  
BETONSTEIN-ZEITUNG 26 (1960) S.48-105
- S 9 SCHAEFFLER, H.  
DRUCKFESTIGKEIT VON DAMPFGEHAERTETEM GASBETON NACH VERSCHIEDENER  
LAGERUNG  
RILEM-SYMPOSIUM LIGHT WEIGHT CONCRETE, GOETEBORG (1960), THEME I A,  
S.50-52 UND DEUTSCHER AUSSCHUSS FUER STAHLBETON H.117

- S10 SCHAEFFLER, H.  
DRUCKFESTIGKEIT, ELASTIZITÄTSMODUL UND SCHWINDEN  
RILEM-SYMPIOSIUM LIGHT WEIGHT CONCRETE, GOETEBORG 1960, THEME I ABC,  
S.57-61
- S11 SCHWIETE, H.E., LUDWIG, U.  
THE POROSITY AND THE GAS PERMEABILITY OF AERATED CONCRETE  
SYMPOSIUM AUTOCLAVED CALCIUM SILICATE BUILDING PRODUCTS,  
LONDON (1965), S.188-194  
SOCIETY OF CHEMICAL INDUSTRY, LONDON (1967)
- S12 SELL, R.  
FESTIGKEIT UND VERFORMUNG VON GASBETON UNTER ZWEIAXIALER DRUCK-ZUG-  
BEANSPRUCHUNG  
DAFSTB, H.209
- S13 SCHNEIDER, H., SCHNELL, W.  
KRIECH- UND SCHWINDVERKÜRZUNGEN VON BIMSHOHLBLOCKSTEIN-MAUERWERK  
BERICHTE AUS DER BAUFORSCHUNG (1973) H.89 S.33-71
- S14 SAEMANN, J.C., WARREN, C., WASHA, G.W.  
EFFECT OF CURING ON THE PROPERTIES AFFECTING SHRINKAGE OF CONCRETE  
BLOCK  
ACI-JOURNAL 52 (1955) S.833-852
- S15 SHIDELER, J.J.  
CARBONATION SHRINKAGE OF CONCRETE MASONRY UNITS  
JOURNAL OF THE PCA RESEARCH UND DEVELOPMENT LABORATORIES  
(1963) S.36-51
- S16 SAUMANN, Z., LACH, V.  
SOME PROBLEMS OF LONG TERM CARBONATION IN POROUS CONCRETES  
3.INTERNATIONALES SYMPOSIUM FUER DAMPFGEHAERTETE KALZIUM SILIKAT-  
BAUSTOFFE, UTRECHT (1973), BEITRAG 3.4
- S17 SCHUELE, W.  
FEUCHTIGKEIT IN BAUTEILEN VON WOHNHAUSEN  
BERICHTE AUS DER BAUFORSCHUNG (1966) H.48, S.23-41
- S18 SCHNEIDER, H., STEINBACH, W., WISOTZKY, TH.  
UNTERSUCHUNGEN UND LANGZEITBEOBACHTUNGEN AN AUSSENPUTZMORTELN  
DAS STUCKGEWERBE (1972) H.11/12 UND (1973) H.1
- S19 SCHUELE, W., SCHAECKE, H.  
AUSTROCKNUNG VON AUSSENWAENDEN  
BERICHT DER FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT BAUEN UND WOHNEN, (1952), TEIL A
- S20 STOCKETT, A.L., SCHNEIDER, A.M., MARDULIER, F.J.  
AN ANALYSIS OF DRYING SHRINKAGE DATA FOR PORTLAND CEMENT MORTAR  
AND CONCRETE  
JOURNAL OF MATERIALS 2 (1967) S.829-842
- S21 SPLITTGERBER, H.  
KONTAKTDRUCK ZWISCHEN FESTKORPERN UND AUSWIRKUNGEN AUF PROBLEME IN  
DER TECHNIK  
CEMENT AND CONCRETE RESEARCH 6 (1976) S.29-36

- S22 SETZER, H. J.  
EINFLUSS DES WASSERGEHALTS AUF DIE EIGENSCHAFTEN DES ERHAERTETEN  
BETONS  
DAFSTB H.280
- S23 IBAC-UNTERSUCHUNG F38/V73
- S24 SCHUBERT, P., WESCHE, K.  
VERFORMUNG UND RISSICHERHEIT VON MAUERWERK  
MAUERWERK-KALENDER (1980), S.129-164. VERLAG WILHELM ERNST + SOHN  
BERLIN, MUENCHEN, DUESSELDORF (1980)
- S25 SUEDEDEUTSCHE KALKSTICKSTOFFWERKE TROSTBERG  
BETON- UND MOERTELVERSUCHE MIT MELMENT + F103  
VERSUCHSBERICHT MELMENT NR.2/74
- S26 SCHUBERT, P.  
SCHWIND- UND KRIECHVERSUCHE AN MAUERWERK  
IBAC-FORSCHUNGSBERICHT F62
- S27 SCHURECHT, H. G.  
METHODS OF TESTING CRAZING OF GLAZES BY INCREASE IN SIZE OF  
CERAMIC BODIES  
JOURNAL CERAMIC SOCIETY 11 (1928) S.271-277
- S28 FORTSETZUNG VERSUCHSREIHEN AUS S26
- S29 SCHMIDT, H.  
ZUR FEUCHTEDEHNUNG VON BAUKERAMISCHEN ERZEUGNISSEN  
KERAMISCHE ZEITSCHRIFT 33 (1981) S.21-26
- S30 SIRHAL, H.  
DIE BEDEUTUNG DER KENNTNIS DES PORENVOLUMENS UND DER PORENGROESSEN-  
VERTEILUNG BEI KERAMISCHEN SCHERBEN  
DIE ZIEGELINDUSTRIE 21 (1968) S.572-583
- S31 SCHWIETE, H. E., LUDWIG, U.  
UEBER DEN EINFLUSS DER POROSITAET AUF DIE EIGENSCHAFTEN VON ZIEGELN  
UND KERAMISCHEN BAUKOERPERN  
DIE ZIEGELINDUSTRIE 22 (1969) S.384-397
- S32 entfällt
- S33 SCHUBERT, P., GLITZA, H.  
E-MODUL-WERTE, QUERDEHNUNGSZAHLEN UND BRUCHDEHNUNGSWERTE VON  
MAUERWERK.  
DIE BAUTECHNIK 58 (1981) H.6 S.181-185
- T 1 THOMAS, A.  
MOISTURE EXPANSION IN BRICKWORK  
TRANS. J. BRIT. CERAM. SOC. 70 (1971) S.35-38
- T 2 THOMAS, M.  
EINFLUSS DER KORNZUSAMMENSETZUNG DES SANDES AUF DAS VERFORMUNGS-  
VERHALTEN VON KALKSANDSTEINEN  
FORSCHUNGSVEREINIGUNG KALK-SAND E.V.  
FORSCHUNGSBERICHT NR. 36, (1975)

- T 3 TISCHER, K.-H.  
SCHWINDEN UND QUELLEN VERSCHIEDENER LEICHTBETONE, VERSUCHSER-  
GEBNISSE AUS ITALIEN  
BETONSTEIN-ZEITUNG 29 (1963) S.74-78
- T 4 TRIEBEL  
LEICHTBETONE  
IN: SIEDLER, E.J. (HRSG.): BAUFORSCHUNGEN, BETON UND MOERTEL  
VERLAGSGESELLSCHAFT R. MUELLER M.B.H., EBERSWALDE - BERLIN, (1933)
- T 5 TIPPY, K.C.  
GOOD PRACTICE IN CONCRETE MASONRY WALL CONSTRUCTION.  
DISKUSSION DES BEITRAGES: ACI JOURNAL 38 (1942) S.317-328  
ACI-JOURNAL, PROCEEDING 38 (1942) S.328-1 - 328-15
- V 1 VAUGHAN, F., DINSDALE, A.  
MOISTURE EXPANSION  
TRANS. BRIT. CERAM. SOC. 61 (1962) S.1-19
- W 1 WEST, W.H.  
MOISTURE MOVEMENT OF BRICKS AND BRICKWORK  
TRANS. BRIT. CER. SOC. 66 (1967) S.137-160
- W 2 WYATT, K.J.  
DIMENSIONAL CHANGE AND ITS CONTROL IN CLAY MASONRY CONSTRUCTION  
PROCEEDINGS OF THE NORTH AMERICAN MASONRY CONFERENCE  
BOULDER, COLORADO 1978, S.89-1-89-11
- W 3 WEIGLER, H., KARL, S.  
KRIECHEN VON KONSTRUKTIONSLICHTBETON BEI FRUEHZEITIGER BELASTUNG  
BETONSTEIN-ZEITUNG 35 (1969) S.584-592
- W 4 WISSMANN, W.  
UEBER DAS VERHALTEN VON BAUSTOFFEN GEGEN FEUCHTIGKEITSEINWIRKUNGEN  
AUS DER UMGEBENDEN LUFT  
DISSERTATION TB DARMSTADT (1954)
- W 5 WEIGLER, H.  
UEBER DEN ZUSAMMENHANG ZWISCHEN REISSNEIGUNG, SCHWINDMASS UND  
FESTIGKEITSENTWICKLUNG VON ZEMENTMOERTELEN  
BETONSTEIN-ZEITUNG 29 (1963) S.366-370
- W 6 WEIGLER, H.  
UEBER DEN ZUSAMMENHANG VON FESTIGKEITSENTWICKLUNG UND SCHWINDVERLAUF  
VON MOERTEL UND BETON  
BETON 2 (1966) S.60-63
- W 7 WESCHE, K.  
BAUSTOFFE FUER TRAGENDE BAUTEILE, BD. 1  
BAUSTOFFKENNGROESSEN, MESSTECHNIK, STATISTIK  
BAUVERLAG GMBH WIESBADEN UND BERLIN (1977)
- W 8 WEIGLER, H., KARL, S.  
KONSTRUKTIONSLICHTBETON MIT ABGEMINDERTER ROHDICHTHEIT  
BETONWERK + FERTIGTEILTECHNIK (1980) H.3 S.157-166, H.4 S.230-239  
UND FORSCHUNGSBERICHT DES INSTITUTS FUER MASSIVBAU TH DARMSTADT



- W 9 WESCHE, K., SCHUBERT, P.  
ZUM VERFORMUNGSVERHALTEN VON MAUERWERK  
DER BAUINGENIEUR 46 (1971), H.12, S.439-444
- 1 DIN 1053 TEIL 1, AUSGABE NOVEMBER 1974  
MAUERWERK- BERECHNUNG UND AUSFUEHRUNG
  - 2 ACI COMMITTEE 209  
PREDICTION OF CREEP, SHRINKAGE AND TEMPERATURE EFFECTS IN CONCRETE  
STRUCTURE  
ACI, SP 27-3, 1971, S.51-93
  - 3 DIN 4227 TEIL 1, AUSGABE DEZEMBER 1979  
SPANNBETON- BAUTEILE AUS NORMALBETON MIT BESCHRAENKTER ODER  
VOLLER VORSPANNUNG
  - 4 DIN 4219 TEIL 2, AUSGABE DEZEMBER 1973  
LEICHTBETON UND STAHLLEICHTBETON MIT GESCHLOSSENEM GEFUEGE-  
BEMESSUNG UND AUSFUEHRUNG
  - 5 INTERNATIONALE RICHTLINIEN ZUR BERECHNUNG UND AUSFUEHRUNG VON  
BETONBAUWERKEN  
COMITE EUROPEEN DU BETON (CEB)-FEDERATION INTERNATIONALE DE LA  
PRECONTRAINTE (FIP)  
ZWEITE AUFLAGE, JUNI 1970
  - 6 BRITISH STANDARD 187, 1967  
SPECIFICATION FOR CALCIUM SILICATE (SANDLIME AND FLINTLIME) BRICKS
  - 7 DIN 4108 TEIL 4, AUSGABE E, OKTOBER 1979  
WAERMESCHUTZ IM HOCHBAU
  - 8 DIN 18151 AUSGABE FEBRUAR 1979  
HOHLBLOCKSTEINE AUS LEICHTBETON

Tabelle 5.1: Forschungsvorhaben F 62 /S26/  
Versuchsprogramm

Stein <sup>1)</sup> / Mörtelgruppe	Prüfkörperart <sup>2)</sup>
LHLz 12/II HLz 12/II HLz 12/III	P, ST
HLz 20/II	W, P, VP, ST
HLz 28/II HLz 28/III	P, ST
KSV 28/II	W, P, VP, ST
G 2/II	P, ST
G 6/II	W, P, ST
Hbn 6/II	
Hbl 2 (NB)/II Hbl 2 (NB,W)/II	P, ST
Hbl 4 (NB)/II	W, P, ST
Hbl 4 (BT)/II	
V2 (NB)/II V2 (NB,W)/II V4 (NB)/II V6 (NB)/II	P, ST
- /II - /III	M

1) NB, BT: Zuschlag Naturbims, Blähton; W: Warmbehandelt

2) W: Wände, P: 1 Stein dicke Pfeiler, VP: Pfeiler im  
Verband, ST: Einzelsteine, M: Mörtelprismen

Tabelle 5.2: Forschungsvorhaben F 74 /S7/  
Versuchsprogramm

Bezeichnung	Mauersteine		Druck- festigkeits- klasse	Prüfung des Schwindens bei den aufeinanderfolgenden Lagerungen		
	DIN	Abmessungen (l · b · h) mm		20/30	+105 °C	20/65
-	-		-			
G	4165	490·240·240	2	x	x	x
		160· 40· 40	2	x	x	x
KSV	106	490·240·240	6	x	x	x
		160· 40· 40	6	x	x	x
Hb1-2K (NB)	18151	240·115·113	12	x	x	x
Hb1-2K (BT)	18151	490·240·238	28	x	x	x
V(NB)	18152	490·240·238	2	x	x	x
Hbn-3K	18153	300·240·115	2	x	x	x
		365·240·175	6	x	x	x

Tabelle 5.3: Tastversuche zum Einfluß der relativen Luftfeuchte und der Karbonatisierung auf das Schwinden V156 /I6/  
Versuchsprogramm

Steinsort	Prüfkörper	Meßstellen <sup>1)</sup>	1. LAGERUNG		2. LAGERUNG	
			Vorlagerung	Hauptlagerung	Vorlagerung	Hauptlagerung
KSV 12	2 DF-Steine	LR, LA	Werkfrisch	20/65	-	-
			nach Werkentnahme 48 h in Wasser	20/65 ca.5 Vol.-% CO <sub>2</sub> 20/65 ca.5 Vol.-% CO <sub>2</sub> <sup>2)</sup>		
KSV 60	Prismen 160 mm•40 mm• 40 mm	LA	Bis Massekon-	20/65	Bis Masse-	20/65
G 6			stanz getrock-	20/17		konstanz
			net, dann	20/65	getrocknet	20/65
			48 h Wasser	20/17		20/65

1) LR, LA: In Richtung Steinlänge auf Steinoberfläche, in Steinachse

HR: In Richtung Steinhöhe auf Steinoberfläche

2) Wiederholversuch

Tabelle 6.1: Mörtel; Gleichgewichtsfeuchte

Auswertegruppe	U	n	$\bar{x}$	s	v	a	$h_{\infty} = a + b \cdot U$					
							cal $\bar{x}$	Bereich U	n	a	b	B
-	%	-	Vol.-%	Vol.-%	%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	%	%	
Kalk- und Kalkzementmörtel, deutsche, ausländische	30	5	1,08	0,43	40,0	0,41	0,92	30-80	25	0,017	0,030	23,6
	45	3	1,47	0,55	37,6	0,93	1,37					
	65	11	1,64	0,85	51,7	0,46	1,97					
Zementmörtel, deutsche	30	-	-	-	-	-	1,82	30-80	8	0,258	0,052	88,5
	45	-	-	-	-	-	2,60					
	65	-	-	-	-	-	3,64					
Zementmörtel, ausländische	30	5	3,06	0,86	28,1	0,82	2,68	30-80	24	-0,465	0,105	74,3
	45	-	-	-	-	-	4,26					
	65	-	-	-	-	-	6,36					
Zementmörtel, deutsche, ausländische	30	7	2,71	0,92	33,9	0,68	2,55					
	45	4	3,58	1,23	34,5	1,45	3,87					
	65	4	5,15	1,60	31,0	1,88	5,63	30-80	32	-0,091	0,088	55,6
	70	3	6,13	1,90	31,0	3,20	6,07					
deutsche Mörtel	80	4	6,70	2,82	42,1	3,32	6,95					
	30	-	-	-	-	-	1,26	30-80	24	0,295	0,032	17,2
	45	-	-	-	-	-	1,74					
Mörtel im Mauerwerk Mauerziegel	65	7	1,27	0,31	24,3		2,38	0,9/1,5 1,1/2,2				
		7	1,51	0,40	26,8							
		7	1,35									
nicht keramische Mauersteine	65	16	1,56	0,31	20,2	Kleinstwert/ Größtwert		1,1/2,4 1,3/5,7				
		16	2,99	1,45	48,4							
		16	2,04									

1) näherungsweise errechnet zu:  $(2 \cdot x_{\text{Randwert}} + 1 \cdot x_{\text{Kernwert}}) / 3$   
a: Vertrauensbereich von x:  $x - a = \mu = x + a$ , Aussagesicherheit: 95 %

Tabelle 6.2: Mauersteine und Mauerwerk; Gleichgewichtsfeuchte

Steinsorte	Herkunft der Quellen 2)	Kenngröße	Steine, Prüfkörper aus Steinen			U(%) =			Mauerwerk. Außenwände	h <sub>∞</sub> = a + b · U (Bereich U = 30 bis 80 %)		
			30	45	65	80	45	65		80	n	a Vol.-%
Mauerziegel	D	$\bar{x}$ s a	0,13 0,06 0,10	0,12 0,08 0,09	0,11 0,08 0,09	0,20 0,07 0,08	0,25(1,2)	20	0,069	0,001	7,7	
Kalksandsteine	D,A	$\bar{x}$ s a	1,98 0,93 0,76	2,78 0,74 0,50	3,88 1,32 0,97	4,78 1,56 1,49	2,5	47	0,362	0,050	41,8	
Leichtbetonsteine (NB)	D	$\bar{x}$ s a	1,18 0,50 0,53	1,30 0,39 0,45	2,82 1,18 0,49	2,60 0,78 1,32	2,5/4	33 32	0,539 0,030	0,032 0,040	17,7 24,5	
Leichtbetonsteine (BT)	D	-	-	-	-	-	8-11	6	0,553	0,047	25,1	
Betonsteine dichter Zuschlag	D	-	-	-	-	-	≈2,7	-	-	-	-	
Gasbetonsteine	D	$\bar{x}$ s a	1,17 0,46 0,38	2,12 0,65 0,34	2,28 1,45 1,06	3,15 0,68 0,80	2,5	48	0,373	0,034	24,4	

1)  $\rho \approx 1200 \text{ kg/m}^3$       2) D: Deutschland, A: Ausland      3) Mittlerer Feuchtigkeitsgehalt

a: Vertrauensbereich von  $\bar{x}$ :  $\bar{x} - a \leq \mu \leq \bar{x} + a$ , Aussagesicherheit: 95 %

Tabelle 6.3: Mörtel; Endschwindwerte  $\epsilon_{s\infty}$  und Halbwertzeiten  $t_h$   
Vorlagerung feucht

Statistische Kenngröße	Einheit	$\epsilon_s$ bei Trock- nung bis Masse- konstanz	U in %															
			35 (30-35)		45 (43-47)		50 (48-52)		55 (53-57)		65		75		85 (83-87)		$\geq 90$	
			$\epsilon_{s\infty}$	$t_h$	$\epsilon_{s\infty}$	$t_h$	$\epsilon_{s\infty}$	$t_h$	$\epsilon_{s\infty}$	$t_h$	$\epsilon_{s\infty}$	$t_h$	$\epsilon_{s\infty}$	$t_h$	$\epsilon_{s\infty}$	$t_h$	$\epsilon_{s\infty}$	$t_h$
n	-	4	5	7	1	17	6	11	2	20	14	7	2	4	0	5	1	
$\bar{x}$	mm/m	1,39	1,18	0,93	-	0,89	-	1,06	-	0,76	-	0,63	-	0,46	-	0,17	-	
s	d	-	-	-	9,9	-	4,2	-	8,5	-	9,0	-	13,7	-	-	-	22,3	
	mm/m	0,76	0,27	0,33	-	0,27	-	0,30	-	0,17	-	0,20	-	0,27	-	0,14	-	
v	d	-	-	-	-	-	2,8	-	-	-	9,2	-	-	-	-	-	-	
	%	54,8	23,0	35,4	-	30,4	67,2	28,1	-	22,5	109,1	31,8	-	58,6	-	84,9	-	
x <sub>95</sub> % 1)	mm/m	-	2,31	2,04	-	1,57	-	1,91	-	1,17	-	1,30	-	-	-	0,77	-	
	d	-	-	-	-	-	14,7	-	-	-	33,6	-	-	-	-	-	-	
x <sub>90</sub> % 1)	mm/m	-	2,10	1,83	-	1,44	-	1,74	-	1,09	-	1,17	-	-	-	0,66	-	
	d	-	-	-	-	-	12,7	-	-	-	28,8	-	-	-	-	-	-	
a) 1)	mm/m	0,89	0,24	0,24	-	0,12	-	0,16	-	0,07	-	0,14	-	0,29	-	0,13	-	
	d	-	-	-	-	-	2,2	-	-	-	4,7	-	-	-	-	-	-	

1) Aussagesicherheit: 95 %

a: Vertrauensbereich des Mittelwertes:  $\bar{x} - a \leq \mu \leq \bar{x} + a$

Tabelle 6.4: Mörtel; Karbonatisierung, Vorlagerung: 7 d feucht, Prüfklima: 20/65, Mörtelprismen 160 mm • 40 mm • 40 mm

Mörtelgruppe	Mischungsverhältnis Zement 1)			Sand RT	$\beta_{D28}$ N/mm <sup>2</sup>	$d_k = a + b \sqrt{t}$		$t(d_k = 20 \text{ mm})$ d
	RT	Kalk RT	RT			a mm	b mm/d <sup>0,5</sup>	
II	1 0	2 1	8 3		14 23	-1,7 -1,6	1,13 0,85	369 643
IIa	1	1	6		12	-2,1	0,79	782
III	1	-	4		20	-1,7	0,81	718
IIIa	1	-	3		35	-1,4	0,51	1761

$d_k$ : Karbonatisierungstiefe

1) HOZ 35 L



**Tabelle 6.5:** Mauersteine; Endschwindwerte  $\epsilon_{s00}$  in mm/m in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte des Schwindklimas  $x_{10}$  in %  
 Meßstelle LR, Vorlagerung  $\hat{z}$  2 d Wasser bzw. feucht

U	Kalksandsteine		Leichtbetonsteine (V, Hbl, NB, BT)		Betonsteine (dichter Zuschlag)		Gasbetonsteine	
	n	$\epsilon_{s00}$	n	$\epsilon_{s00}$	n	$\epsilon_{s00}$	n	$\epsilon_{s00}$
30	2	0,42	3	0,66	1	0,31	2	0,68
45	1	0,40	-	-	-	-	3	0,39
50	1	0,31	-	-	4	0,26	-	-
65	2	0,30	14	0,38 <sup>1)</sup>	1	(0,26)	2	0,34
$\epsilon_{s00} = a + b \cdot U \quad (30 \leq U \leq 65)$								
a	0,5380		(0,8901)		0,4107		0,9065	
b	- 0,0036		(-0,0078)		-0,0028		-0,0097	
n/BEST	6/79,6		(17/47,8)		9/80,7		8/81,6	

1) Fraktilwert  $x_{10} = 0,10$ ;  $x_{90} = 0,65$ ,  $S = 95$  %

Tabelle 1.6: Mauersteine, Mauerwerk; Anhaltswerte für die Mindestversuchsdauer min t zur Bestimmung des Feuchtedehnungsendwertes (Prüfklima 20/65)

Steinsorte	Prüfkörperart			Steinprismen 160 mm · 40 mm · 40 mm
	Wände (d = 240)	Pfeiler P, VP	Einzelsteine	
Mauerziegel	ca. 1 a bzw. ca. 2 a <sup>1)</sup>		ca. 1 a bzw. 2a <sup>1)</sup>	-
Kalksandsteine	1 a	6 mon	vermutlich 6 mon	vermutlich 1 mon
Leichtbetonsteine	Hbl (NB)	1,5 a	1 a	
	V (NB)	ca. 1 a	1 a	-
Betonsteine dichter Zuschlag	Hbl (BT)	keine Versuchsergebnisse	nicht auswertbar (6 mon)	
		vermutlich 1 bis 2 a	ca. 9 mon (6 mon)	-
Gasbetonsteine				vermutlich 1 mon

1) bei chemisch quellenden Mauerziegeln, z. T. kann min t auch erheblich höher sein

( ) : Angaben sehr unsicher

Tabelle 6.7: Mörtel, Mauersteine; Verformungskennwert  $\alpha_v$

Stein-, Mörtelsorte	U = 65 %			U = 30 bis 80 %				
	$\alpha_v$	$\frac{1}{\alpha_v}$	$E_v/S33/$	$\bar{x}$	s	v(%)	min x	max x
	$10^3 \cdot \frac{1}{N/mm^2}$	$10^3 N/mm^2$	$\frac{1}{N/mm^2}$					
Kalk-Zement-Mörtel	0,623	1,6	5	0,680	0,072	10,6	0,623	0,798
Zementmörtel	0,336	3,0	15	0,357	0,027	7,6	0,335	0,402
Kalksandsteine	0,139	7,2	10	0,135	0,077	5,7	0,128	0,147
Leichtbetonsteine (NB)	0,241	4,2	1,5 - 3,5	0,246	0,078	3,2	0,238	0,246
Leichtbetonsteine (BT)	0,175	5,7		0,182	0,092	5,1	0,174	0,197
Gasbetonsteine	0,25 <sup>1)</sup>	4,0	1 - 3	0,210	0,038	17,8	0,164	0,260

1) Wegen des abweichenden  $\alpha_v$ -Verlaufs in Abhängigkeit von U wurde  $\alpha_v$  für U = 30 bis 40 % angegeben (s. auch Abschnitt 6.3.2)

Tabelle 6.8: Grundendwerte  $\epsilon_{h^{oo}(o)}$  in mm/m von Mauersteinen, Mörtel und Mauerwerk  
 Prüfklima 20/65, Mauersteine meist  $\geq 2$  d in Wasser vorgelagert

Steinsort: / Mörtel	$\epsilon_{h^{oo}(o),st}$		(Meßstelle LR)		$\epsilon_{h^{oo}(o),mw}$		(vertikal, Wände d = 240 mm)	
	$\bar{x}$	$x_{10}$	$x_{10}$	$x_{90}$	$\bar{x}$	$x_{10}$	$x_{10}$	$x_{90}$
Mauerziegel	-0,10 <sup>1)</sup>	-	-	-	-0,10 <sup>1)</sup>	-	-	-
Kalksandsteine	0,30	-	-	-	0,40	0,11	0,69	
Leichtbetonsteine Hb1 (NB, BT, V(NB))	0,40	0,10	0,10	0,65	0,45	0,20	0,70	
Betonsteine, dichter Zuschlag	0,20	-	-	-	0,20	-	-	-
Gasbetonsteine	0,35	-	-	-	0,40	-	-	-
Mörtel	0,75	0,40	0,40	1,10	-	-	-	-

1) chemisches Quellen, mittlerer Schätzwert, in Einzelfällen sind erheblich höhere Werte möglich.

**Tabelle 6.9 : Beiwert  $k_{MS}$  (Einfluß Meßstelle Mauerstein)**  
 Vorlagerung: meist  $\geq 2$  d Wasser

Steinsorte	$k_{MS}$			
	Steinhöhe		Steinlänge	
	Achse (HA)	Rand (HR)	Achse (LA)	Rand (LR)
Mauerziegel	1,2	1,2	1,0	1,0
Kalksandsteine	1,0	1,2	1,0	1,0
Leicht- beton- steine	V(NB) 1,0	1,0		1,0
	Hbl(NB) 1,0	0,6	0,8	1,0
Betonsteine dichter Zuschlag	(1,0)	(1,0)		1,0
Gasbetonsteine	(1,0)	(1,0)		1,0

Anmerkung: Die angegebenen  $k_{MS}$ -Werte sind grobe Anhaltswerte.  
 Sie sind insbesondere bei den eingeklammerten Werten  
 sehr unsicher.

Tabelle 6.10: Beiwerte  $k_{m\ddot{o}}$  (Einfluß Mörtelschwinden)

Der Endwert $\epsilon_{f,\infty,mw}$ aus Grundendwert	soll ermittelt werden		Bestimmung des Beiwertes	grafisch
	für Richtung	Beiwert		
Mauersteine $\epsilon_{h\infty(0),st}$	vertikal	$k_{m\ddot{o}}(1),v$	$k_{m\ddot{o}}(1),v = (\epsilon_{h\infty,m\ddot{o}} - \epsilon_{h\infty,st(HA)}) \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_1+1}$	Bild 6.36
		$k_{m\ddot{o}}(1),v$	$k_{m\ddot{o}}(1),v = (\epsilon_{h\infty,m\ddot{o}} - \epsilon_{h\infty,st(HA)}) \cdot \frac{0,5\alpha_2}{\alpha_2+1}$	Bild 6.37 (Steinformat 2 DF)
	horizontal	$k_{m\ddot{o}}(1),h$	$k_{m\ddot{o}}(1),h = (\epsilon_{h\infty,m\ddot{o}} - \epsilon_{h\infty,st(LA)}) \cdot \frac{\alpha_3}{\alpha_3+1}$	Bild 6.38
Mauerwerk $\epsilon_{h\infty(0),mw}$	vertikal	$k_{m\ddot{o}}(2),v$	$k_{m\ddot{o}}(2),v = 0$	-
	horizontal	$k_{m\ddot{o}}(2),h$	nach Abschnitt 6.2.5.2.6.2	Bild 6.40

$\alpha_1 = d_f/h_{st}$  ;  $\alpha_2 = b_f/b_{st} \cdot \beta$  ,  $\beta = E_{m\ddot{o}}/E_{st}$  ;  $\alpha_3 = \alpha_1 \cdot \beta$

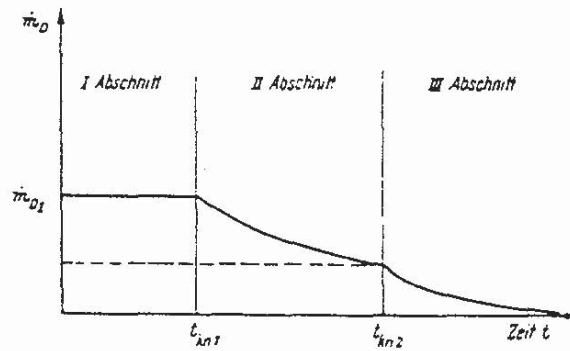


Bild 4.1: Charakteristischer zeitlicher Verlauf der Trocknungsgeschwindigkeit eines kapillarporösen Gutes mit hygroskopischem Bereich aus /K21/.

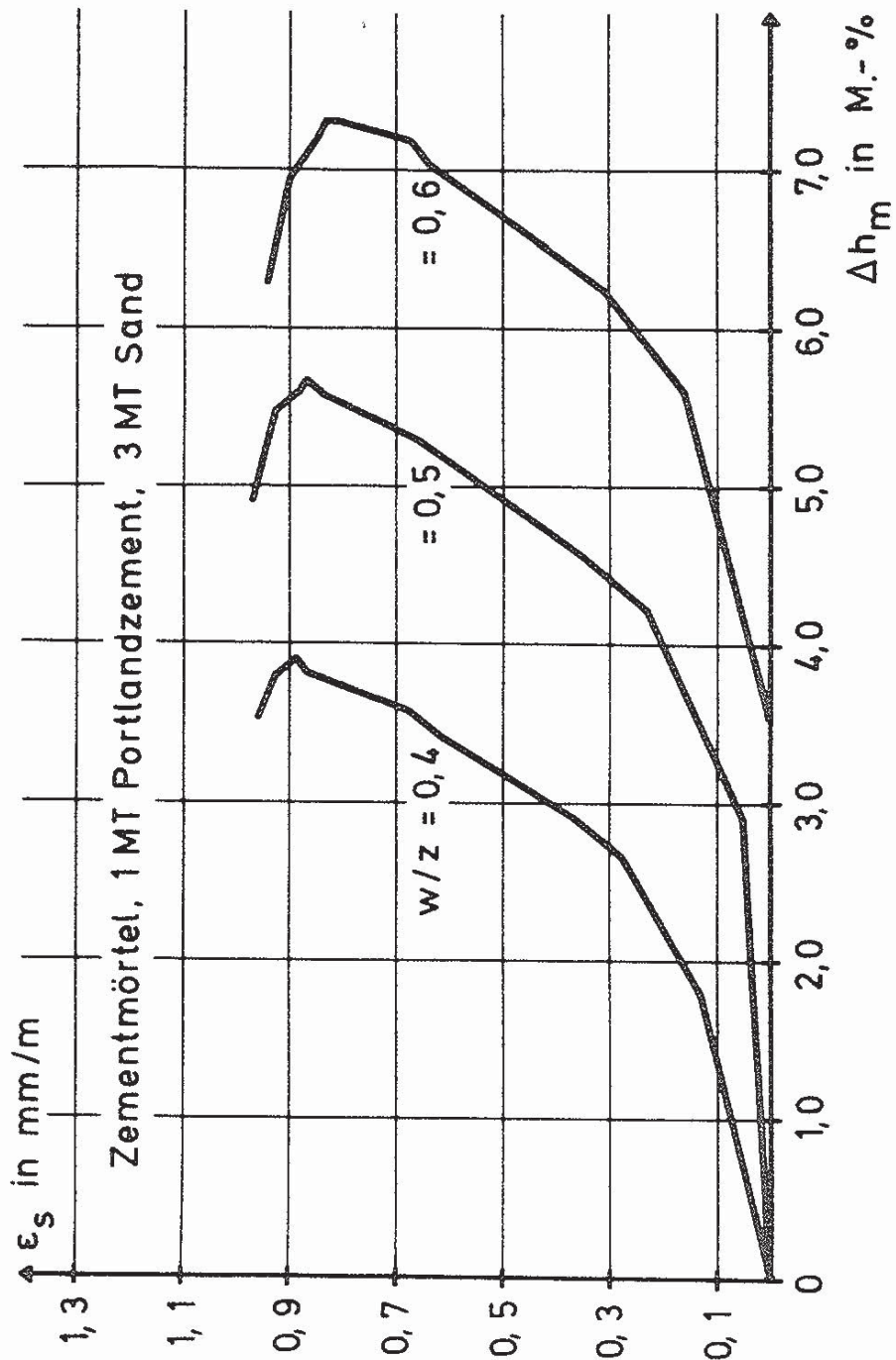


Bild 4.2: Schwinden  $\epsilon_s$  in Abhängigkeit vom Wasserverlust  $\Delta h_m$  nach Versuchsergebnissen aus /B6/



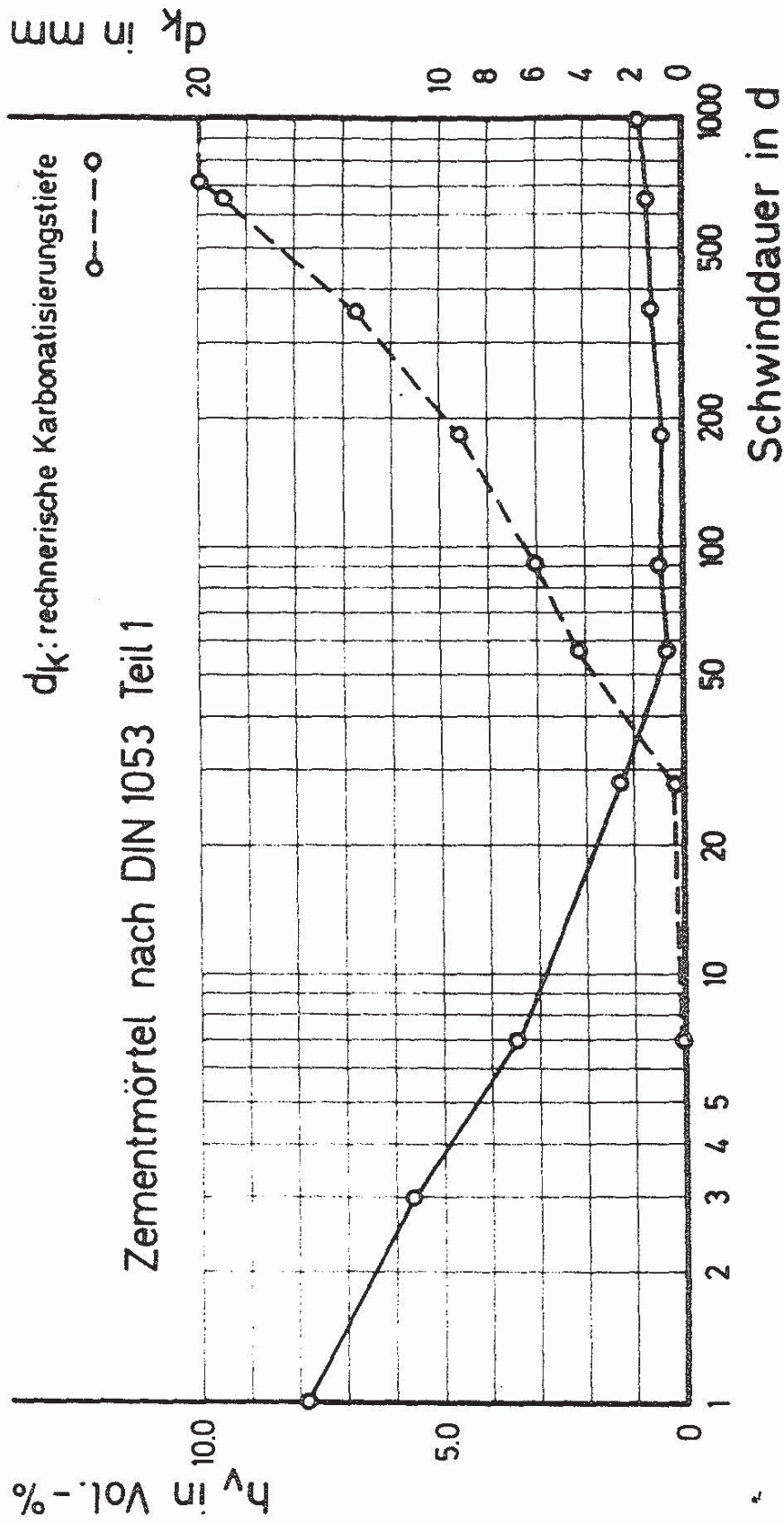


Bild 6.1: Vergrößerung des rechnerischen Feuchtigkeitsgehaltes  $h_v$  während des Austrocknens durch Karbonatisierung /S26/

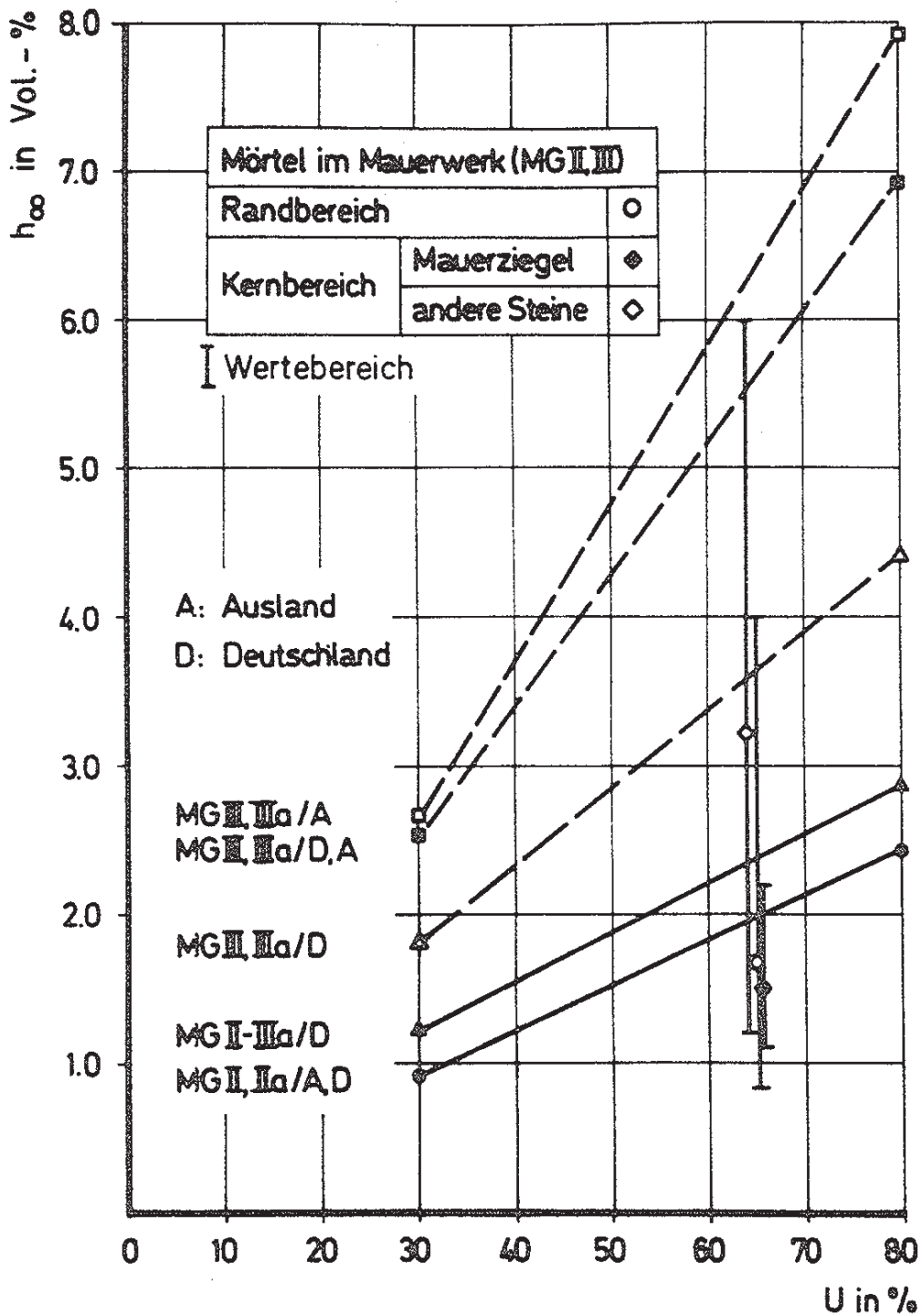


Bild 6.2: Gleichgewichtsfeuchte  $h_{\infty}$  von Mörtelprüfkörpern (Regressionsgeraden) und Mörtel im Mauerwerk in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte U

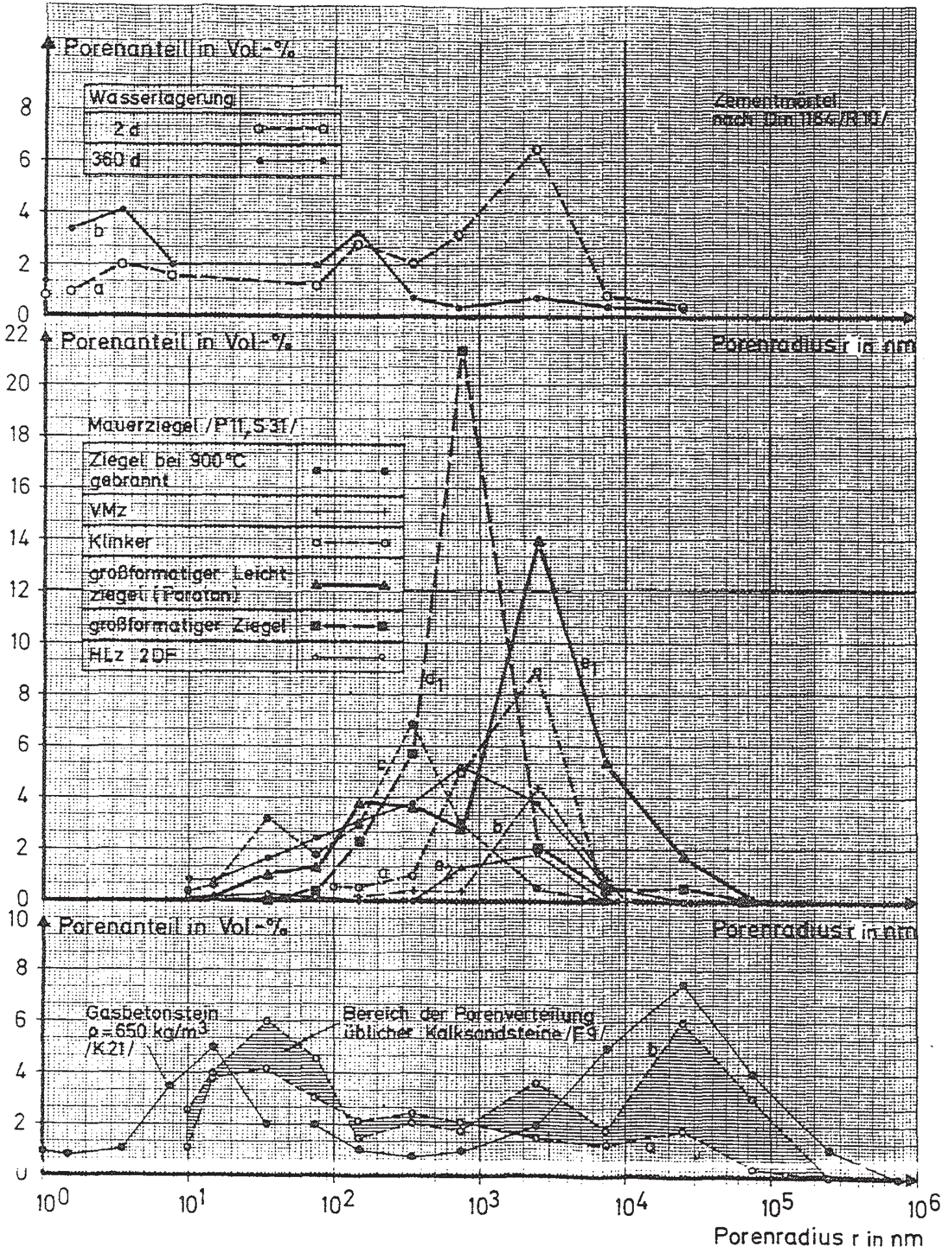


Bild 6.3: Porenverteilung von Mauersteinen und Mörtel (bis  $r = 10^6$  nm)

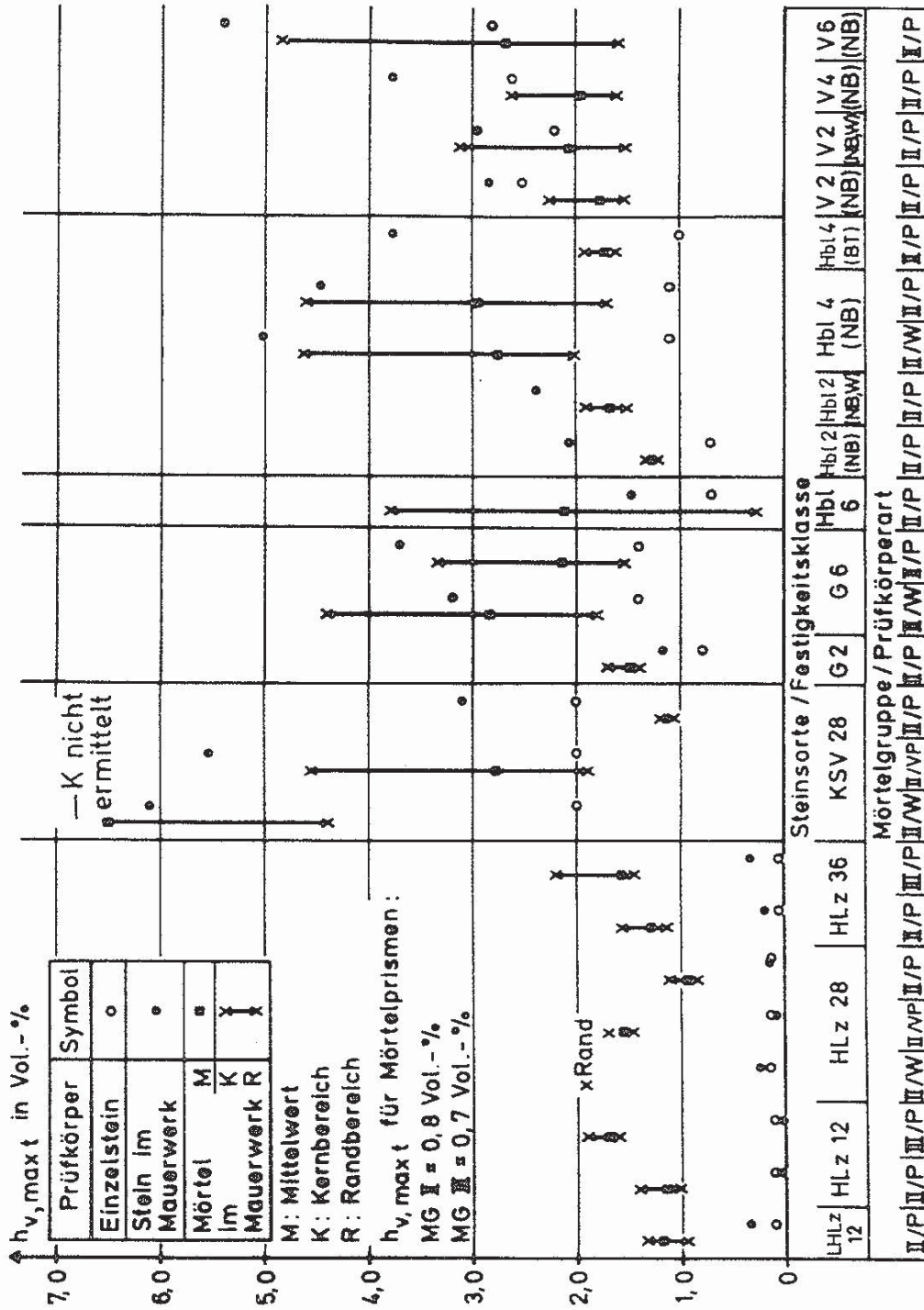


Bild 6.4: Feuchtigkeitsgehalt von Einzelsteinen, Steinen und Mörtel im Mauerwerk bei Versuchsende (max t = 1000 bis 1500 d, Klima 20/65) aus /S26/

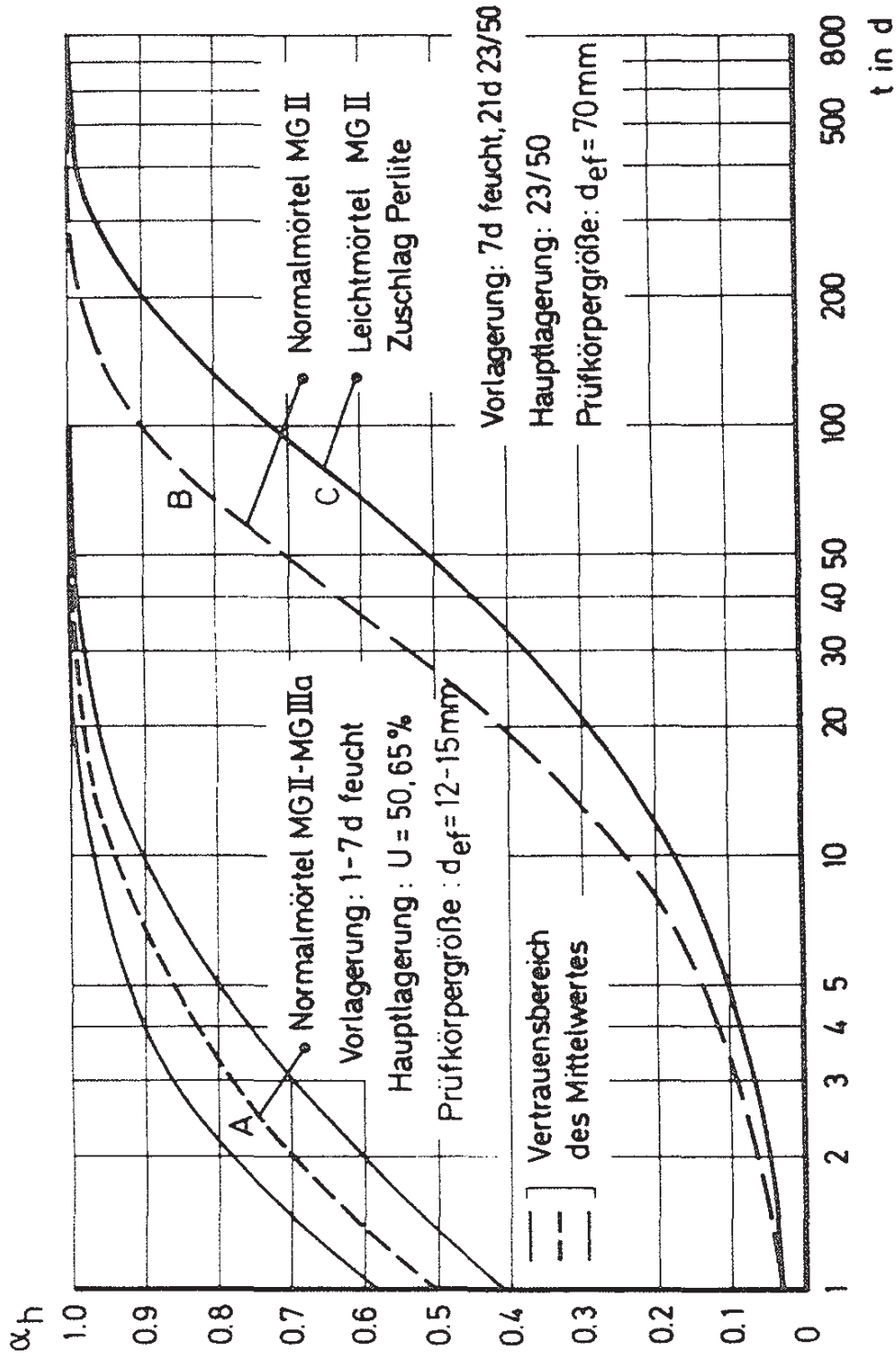


Bild 6.5: Austrocknungsverlauf  
Mörtel

Mauersteine	●	I	Vertrauensbereich des Mittelwertes
Mauerwerk	○		
Außenwände	▽ □	—	$h_{v\infty} = a + b \cdot U$

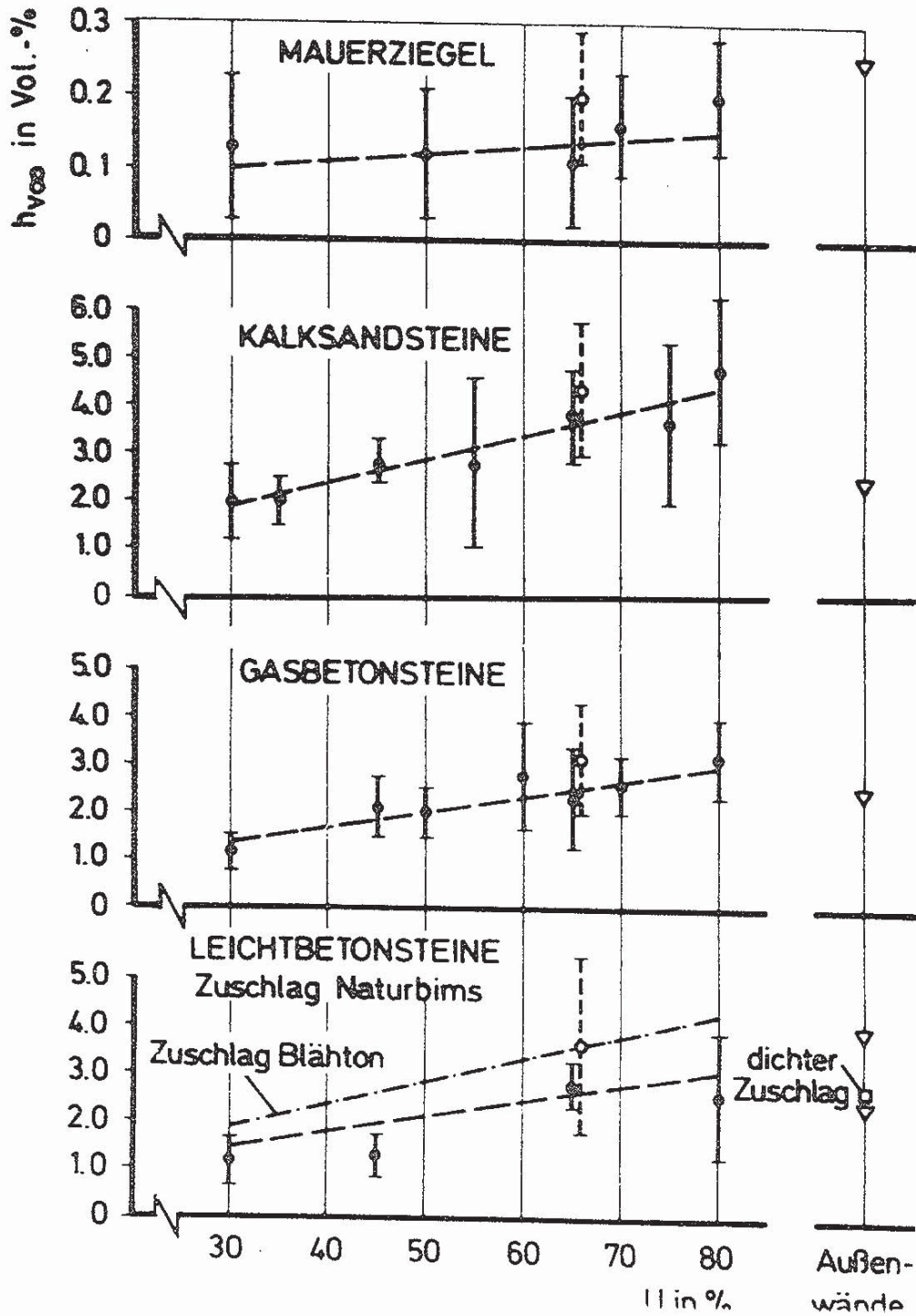


Bild 6.6: Gleichgewichtsfeuchte  $h_{v\infty}$  von Mauersteinen und Mauerwerk

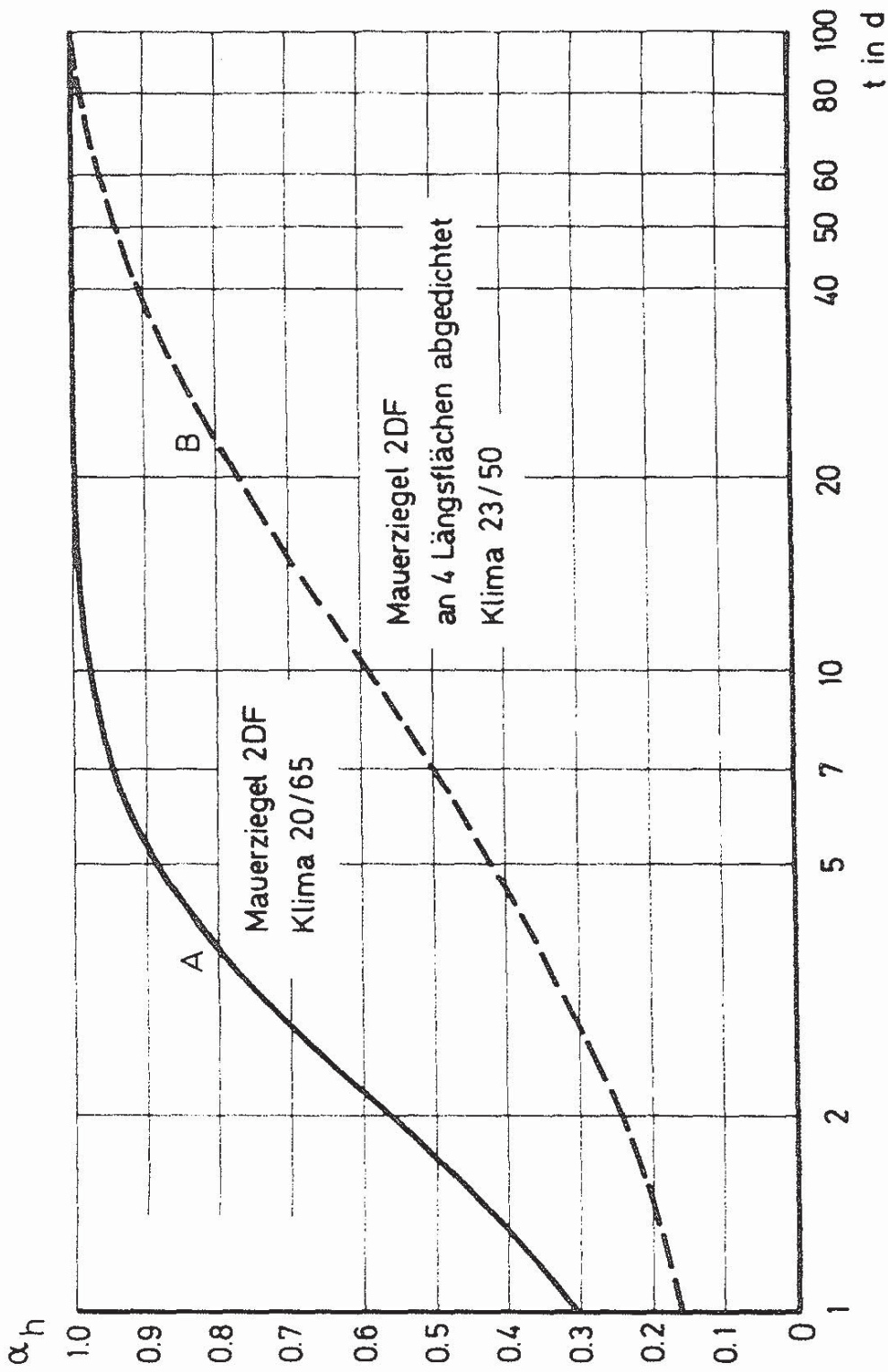


Bild 6.7: Austrocknungsverlauf  
Mauerziegel

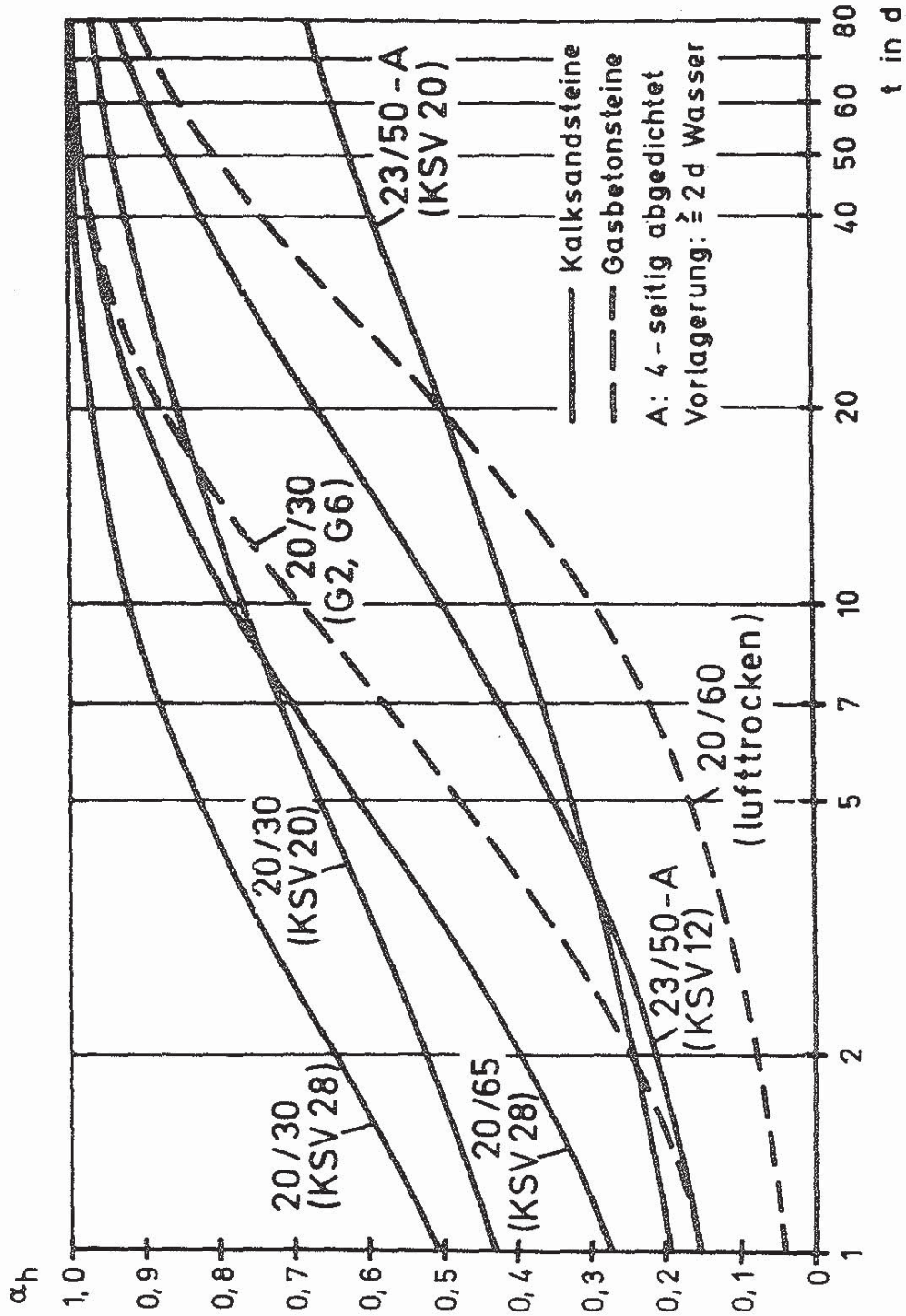


Bild 6.8: Ausstrochnungsverlauf

Kalksandsteine, Gasbetonsteine



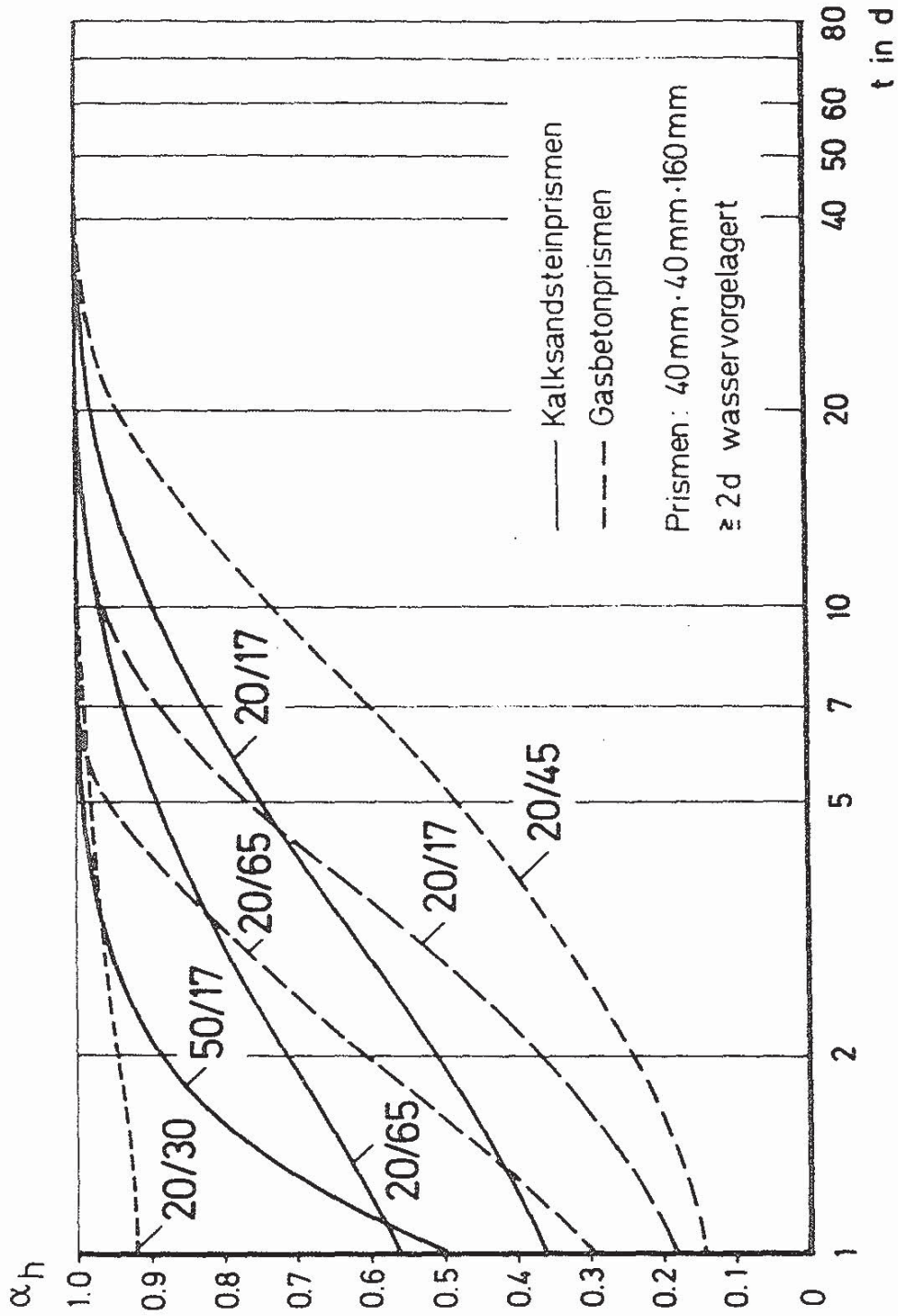


Bild 6.9: Austrocknungsverlauf  
Kalksandsteinprismen, Gasbetonprismen

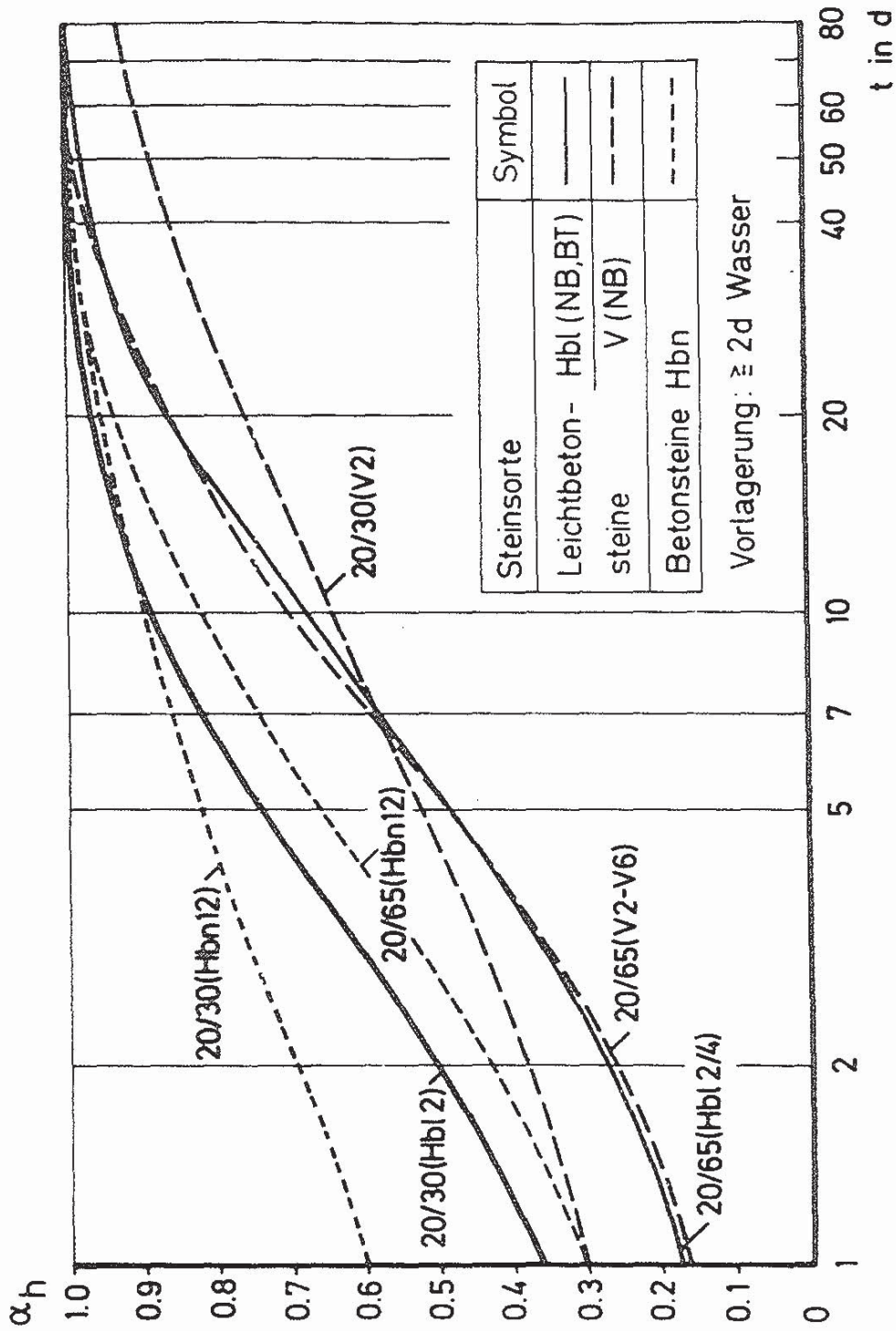


Bild 6.10: Austrocknungsverlauf  
Leichtbetonsteine, Betonsteine

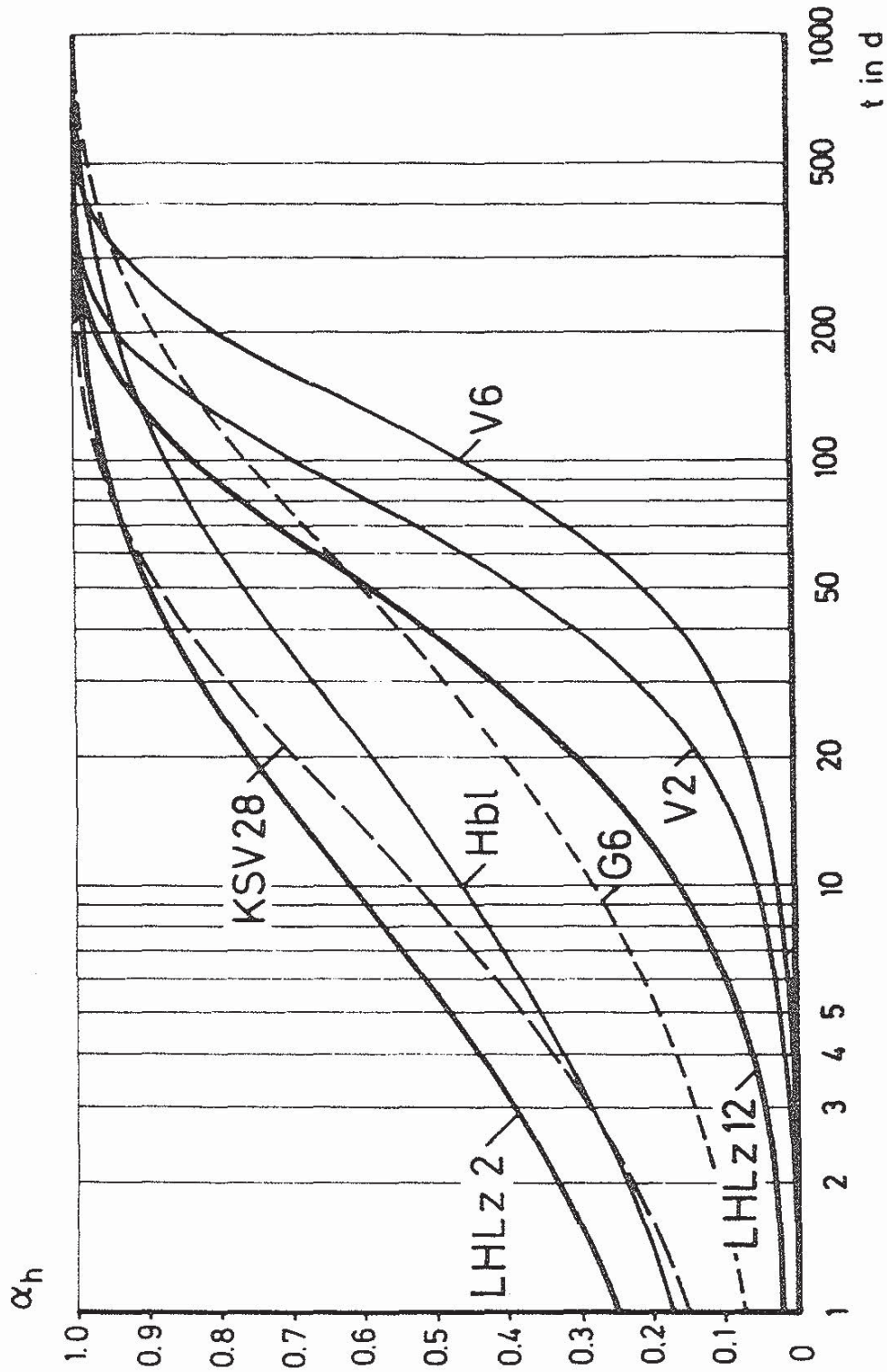


Bild 6.11: Austrocknungsverlauf von Mauerwerkpfelern ( $d_{ef} = 120$  bis  $161$  mm)  
(Klima 20/65, Steine 2 d in Wasser und 1 d an Raumluft vorgelagert,  
Mörtel der Gruppe II)

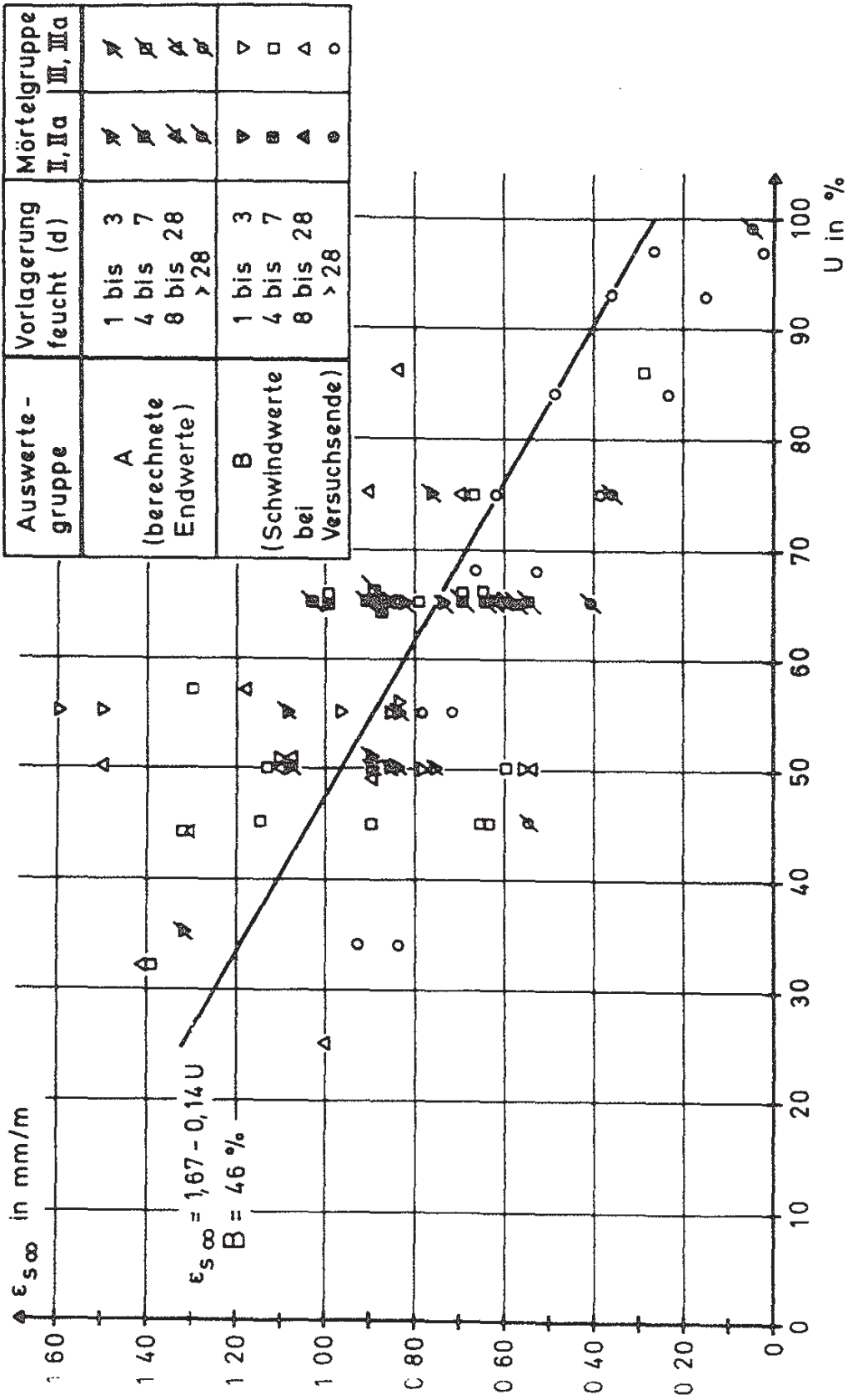


Bild 6.12: Mörtel; Endschwindwert  $\epsilon_{s\infty}$  in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte  $U$  des Schwindklimas

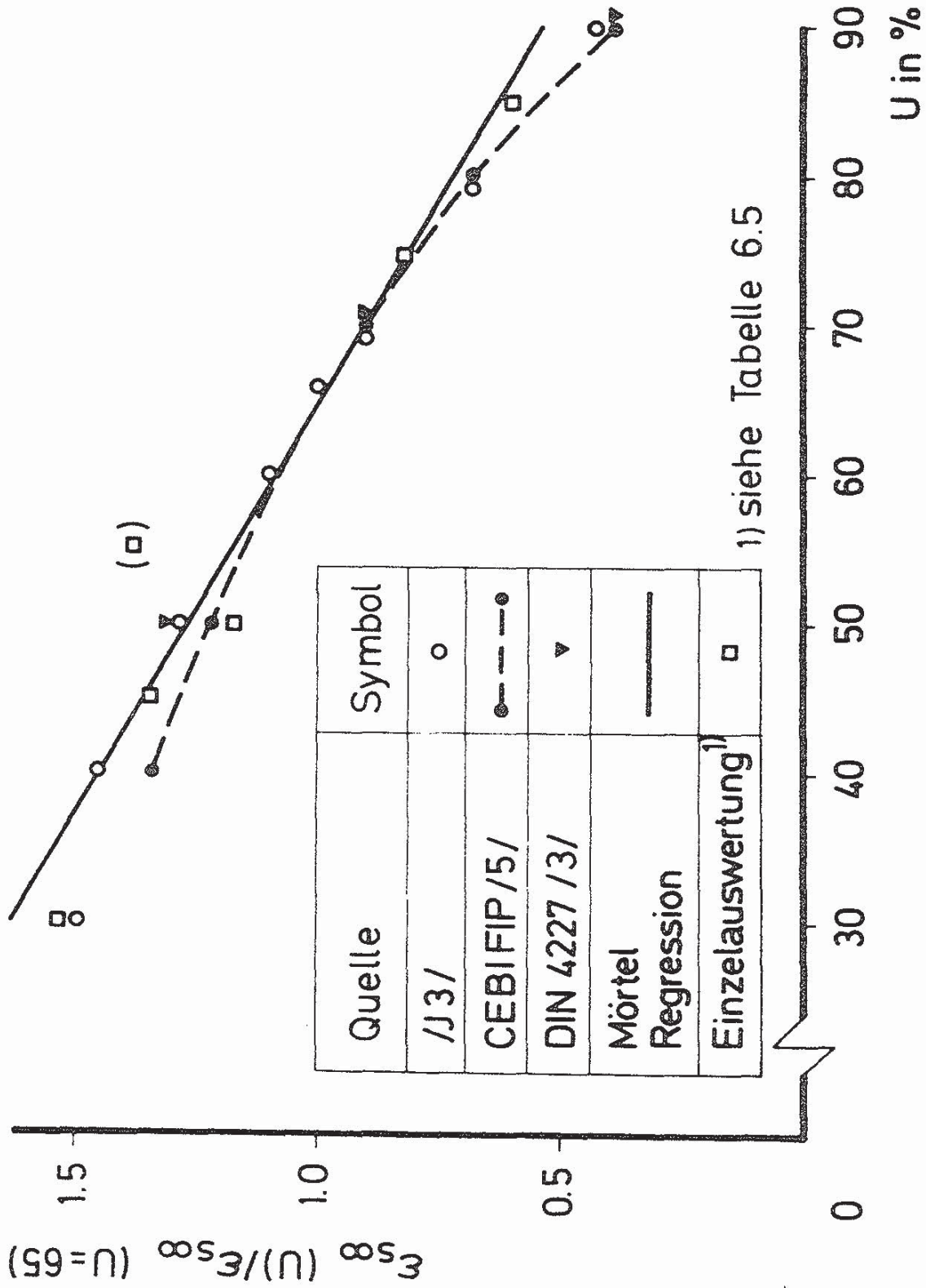


Bild 6.13: Mörtel; Endschwindwerte in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte U  $\epsilon_{s\infty}(U)$  bezogen auf U = 65 %

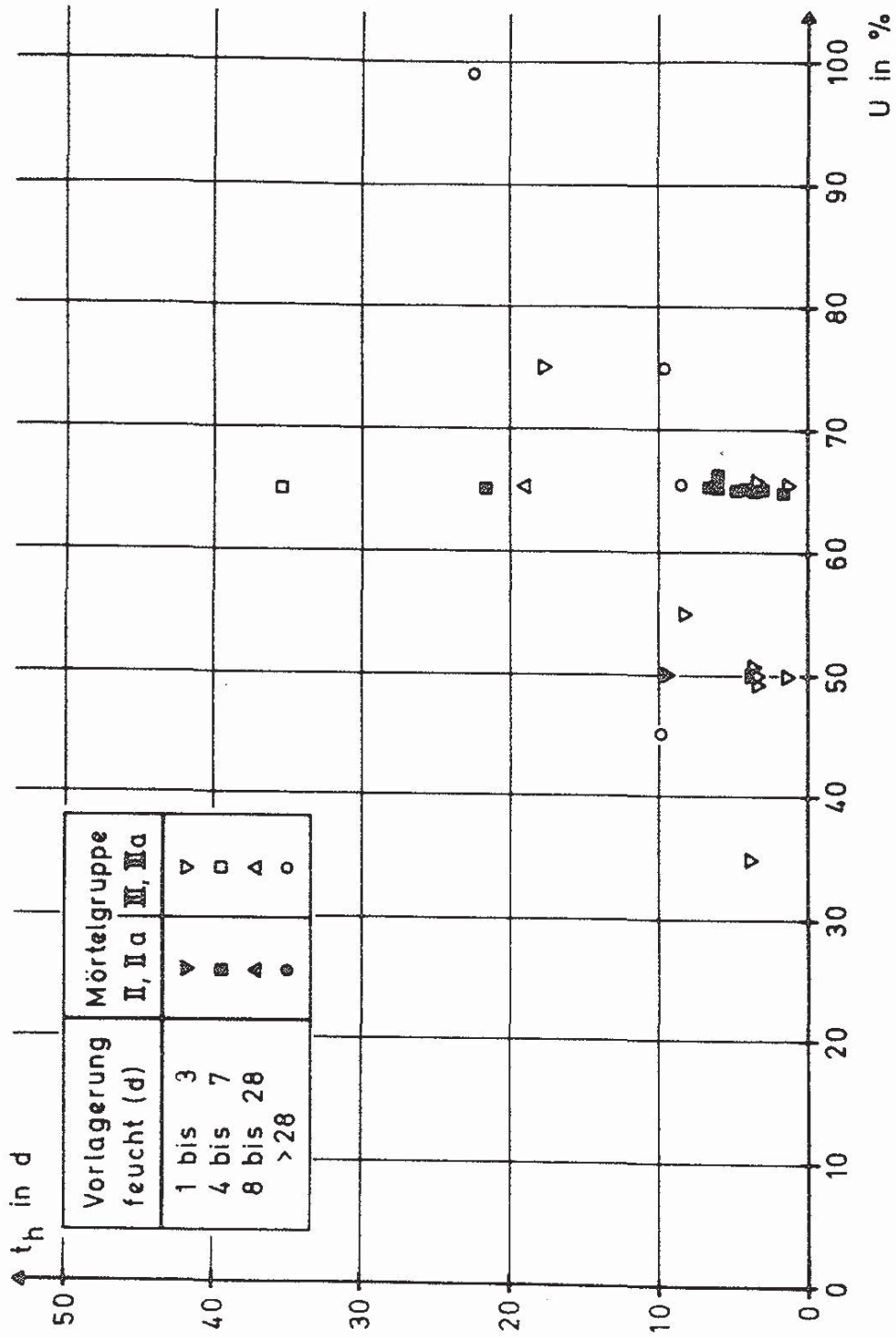


Bild 6.14: Mörtel; Halbwertszeit  $t_h$  in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte U des Schwindklimas

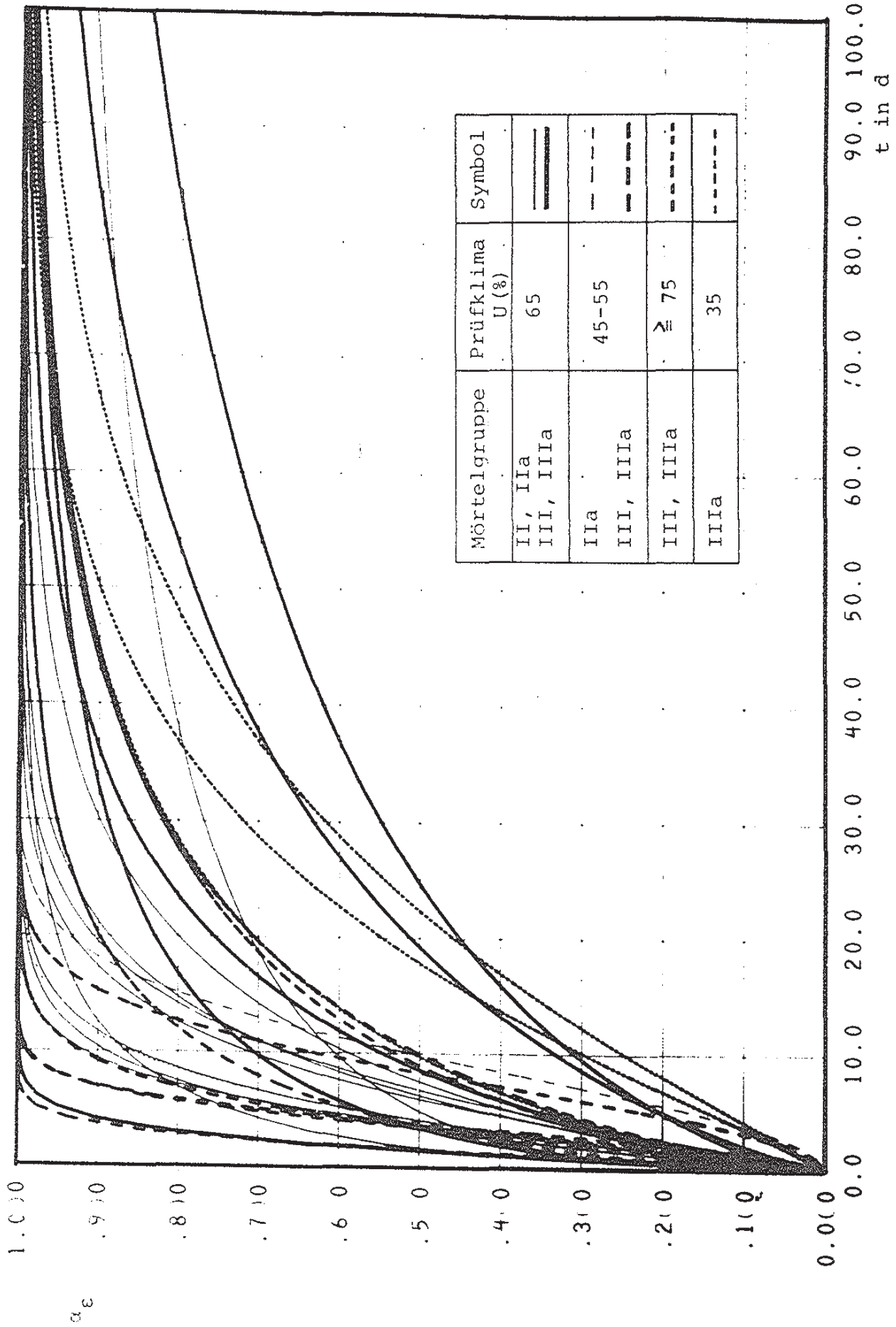


Bild 6.15 : schwindverlauf von Mörteln

Bild 6.15

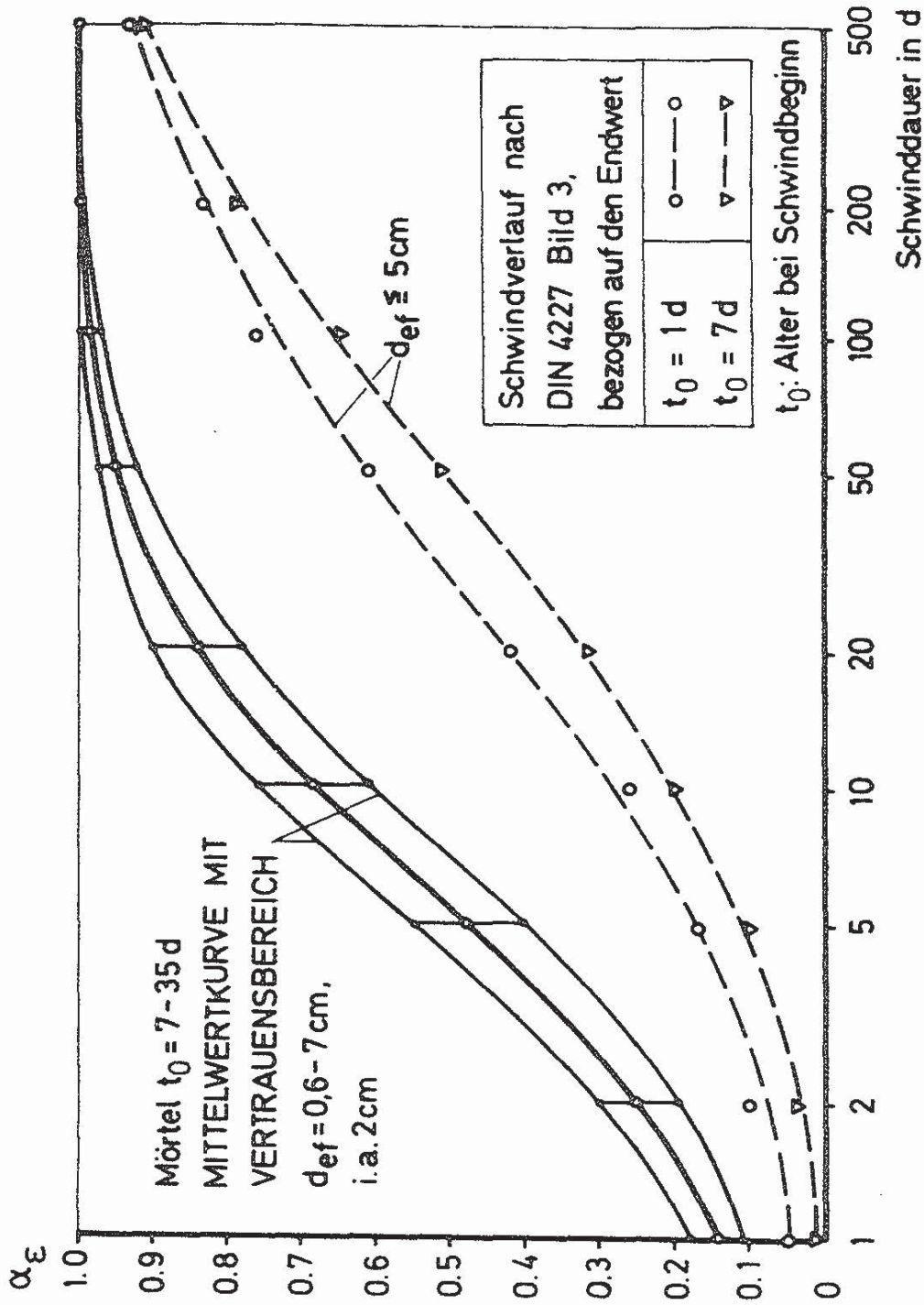


Bild 6.16: Schwindverlauf  
Mörtel



Meßstelle	Symbol
HA	●
BA	■
BR	□
LA	▲
LR	△

W,F,T: Vorlagerung

Wasser

feucht ( $h_v \approx 5 \text{ Vol.-%}$ )  
getrocknet ( $105^\circ\text{C}$ )

$\epsilon_{h,max t}$  wurde aus der

Regressionsgleichung

$\epsilon_h(t) = a + b \cdot t$  errechnet.

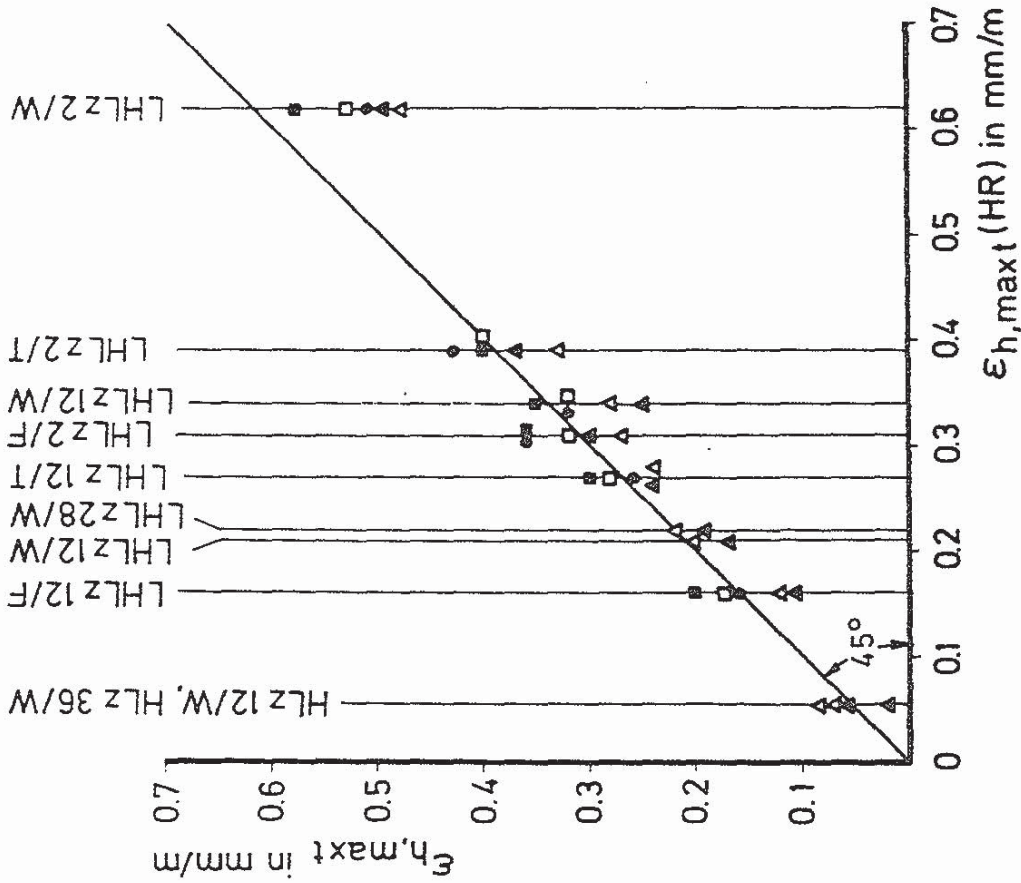


Bild 6.17: Feuchtedehnung bei Versuchsende  $\epsilon_{h,max t}$  in Abhängigkeit von der Meßstelle

Mauerziegel

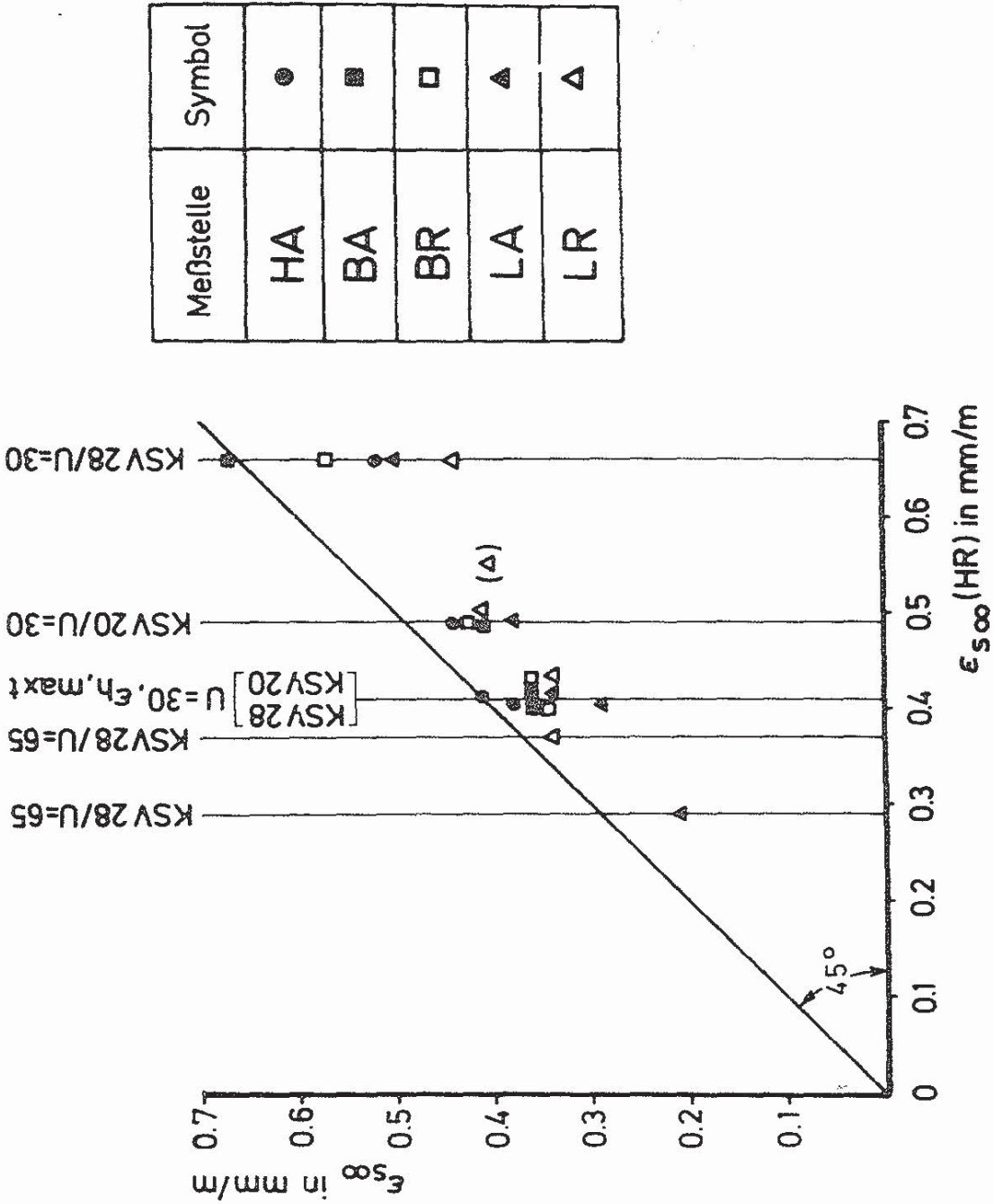


Bild 6.18: Endschwindwert  $\epsilon_{s\infty}$  in Abhängigkeit von der Meßstelle  
Kalksandsteine

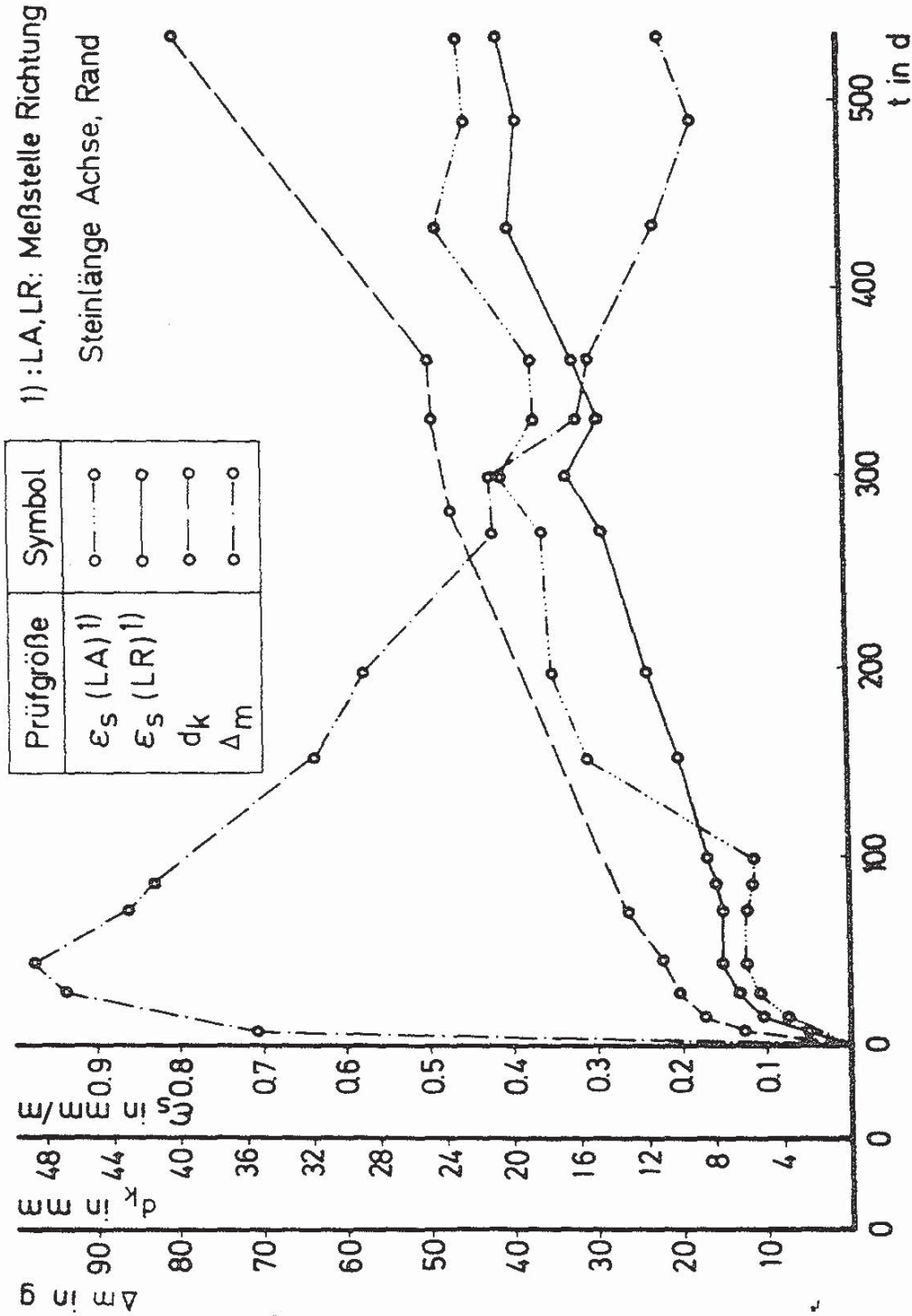


Bild 6.19: Schwinddehnung  $\epsilon_s$ , Karbonatisierungstiefe  $d_k$  und Massenabnahme  $\Delta m$  von werksfrischen Kalksandsteinen KSV 12-2 DF in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer  $t$   
Schwindklima 20/65

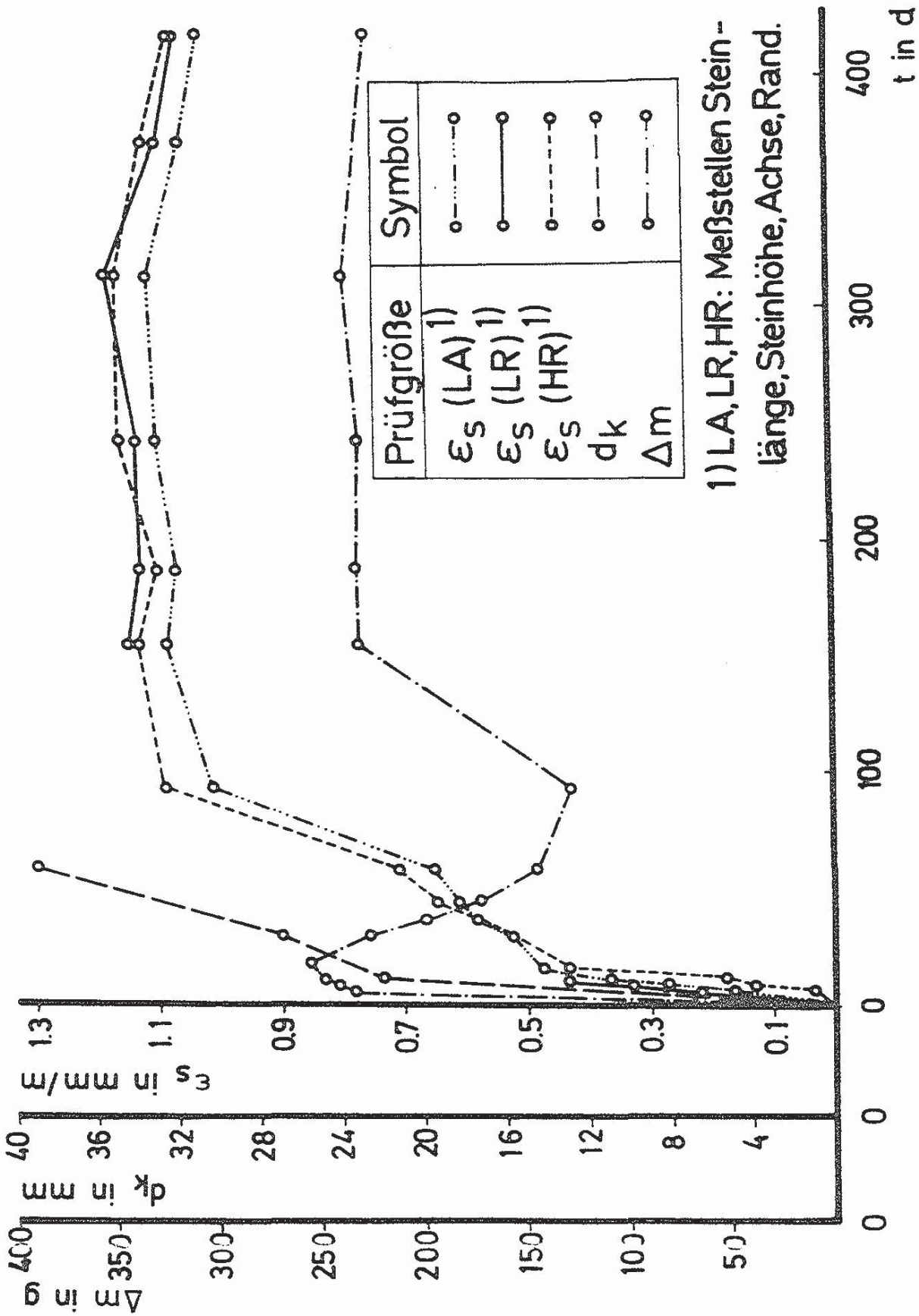


Bild 6.20: Schwinddehnung  $\epsilon_s$ , Karbonatisierungstiefe  $d_k$  und Massenabnahme  $\Delta m$  von werksfrischen Kalksandsteinen KSV 12-2 DF in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer t  
Schwindklima 20/65, ca. 5 Vol.-%  $CO_2$ , Vorlagerung: 48 h Wasser

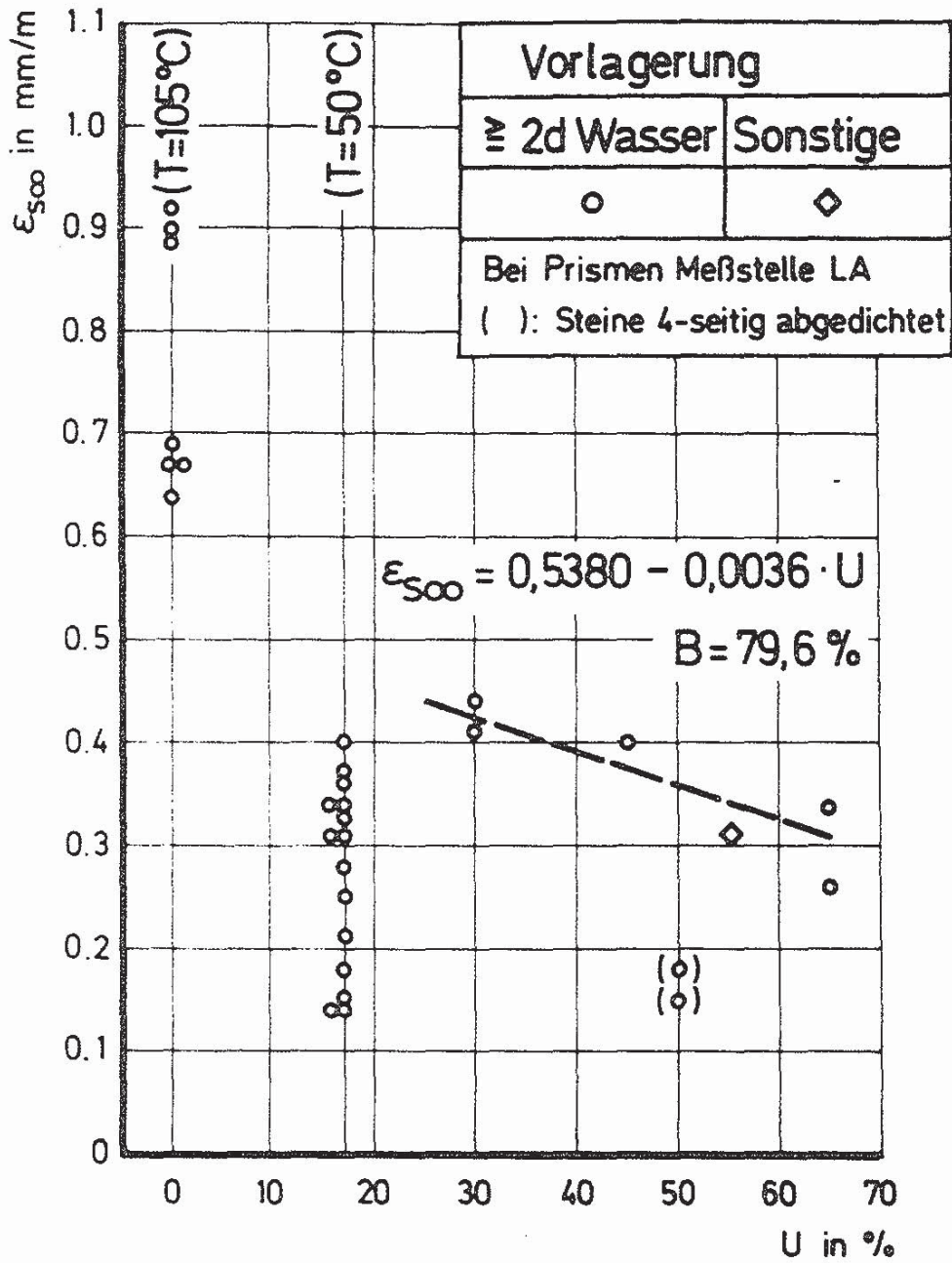


Bild 6.21: Endschwindwert  $\epsilon_{S\infty}$  in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte  $U$  des Schwindklimas Kalksandsteine, Meßstelle LR

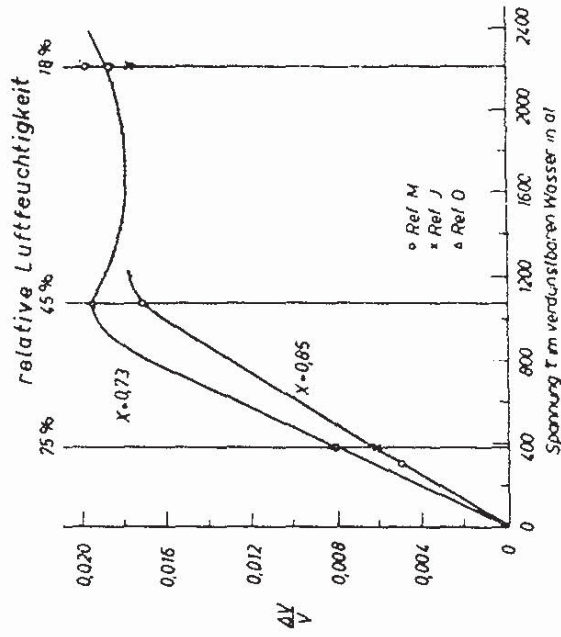
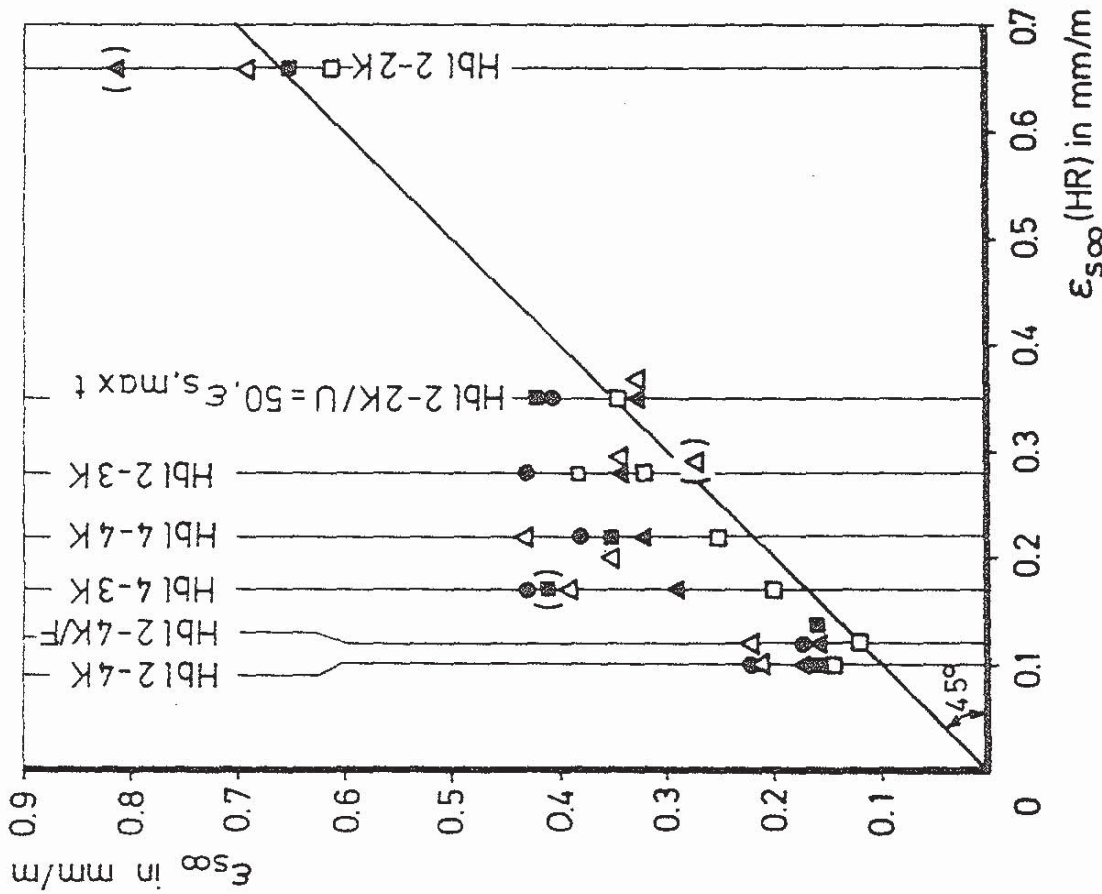


Bild 6.21 a: Beziehung zwischen Volumenänderung und Spannung im verdunstbaren Wasser von vollhydratisiertem Zementstein nach einer ersten Trocknung bei verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten,  $X$  = Zementgelkonzentration (aus /P8/)



Meßstelle	Symbol
HA	●
BA	■
BR	□
LA	▲
LR	△

K: Kammerzähl  
 F: h ≈ 10 Vol.-%

( ) Endwerte unsicher

Bild 6.22: Endschwundwert  $\epsilon_{s\infty}$  in Abhängigkeit von der Meßstelle  
 Leichtbetonsteine Hbl (NB)

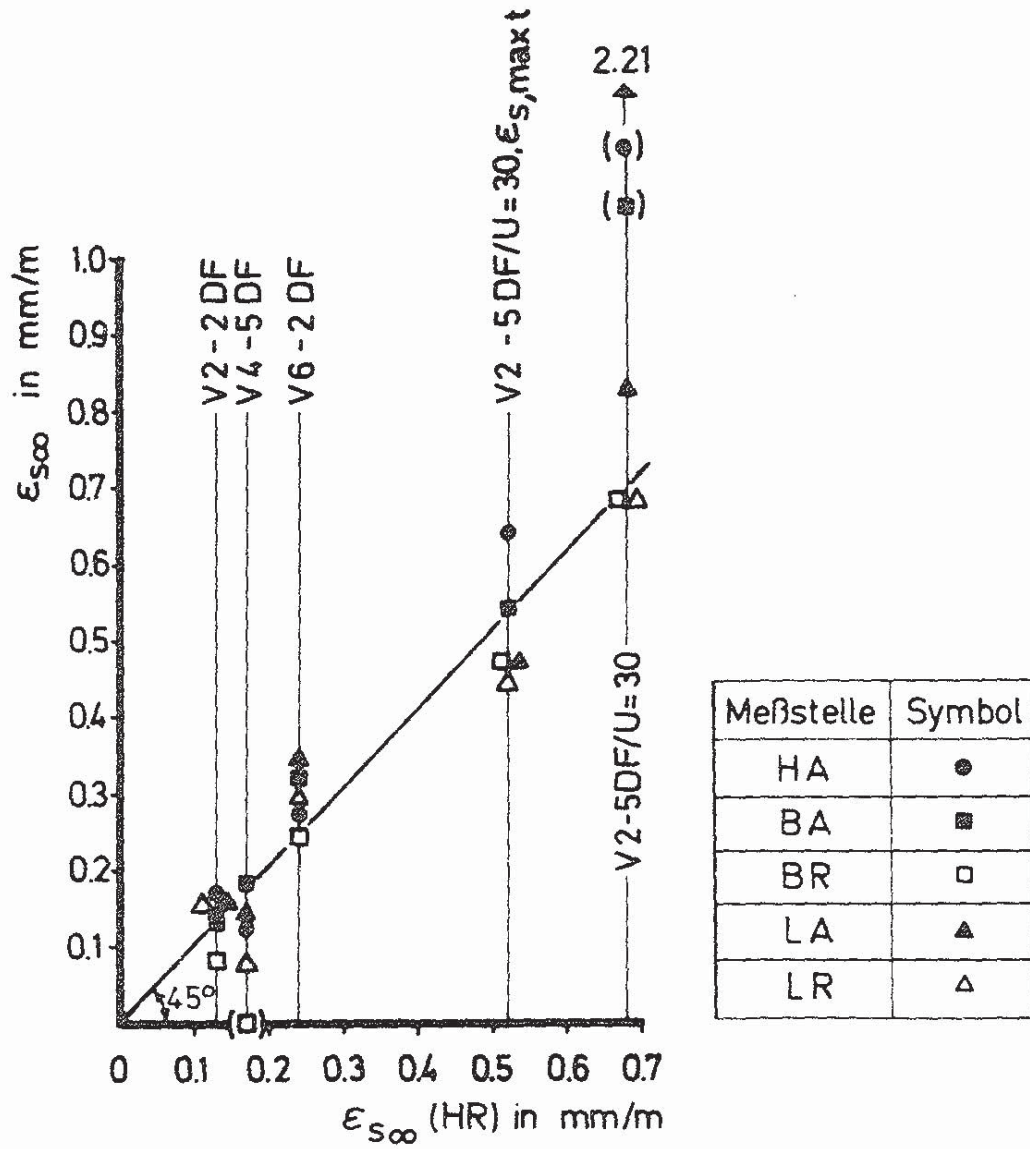


Bild 6.23: Endschwindwert  $\epsilon_{s\infty}$  in Abhängigkeit von der Meßstelle

Leichtbetonsteine V (NB)



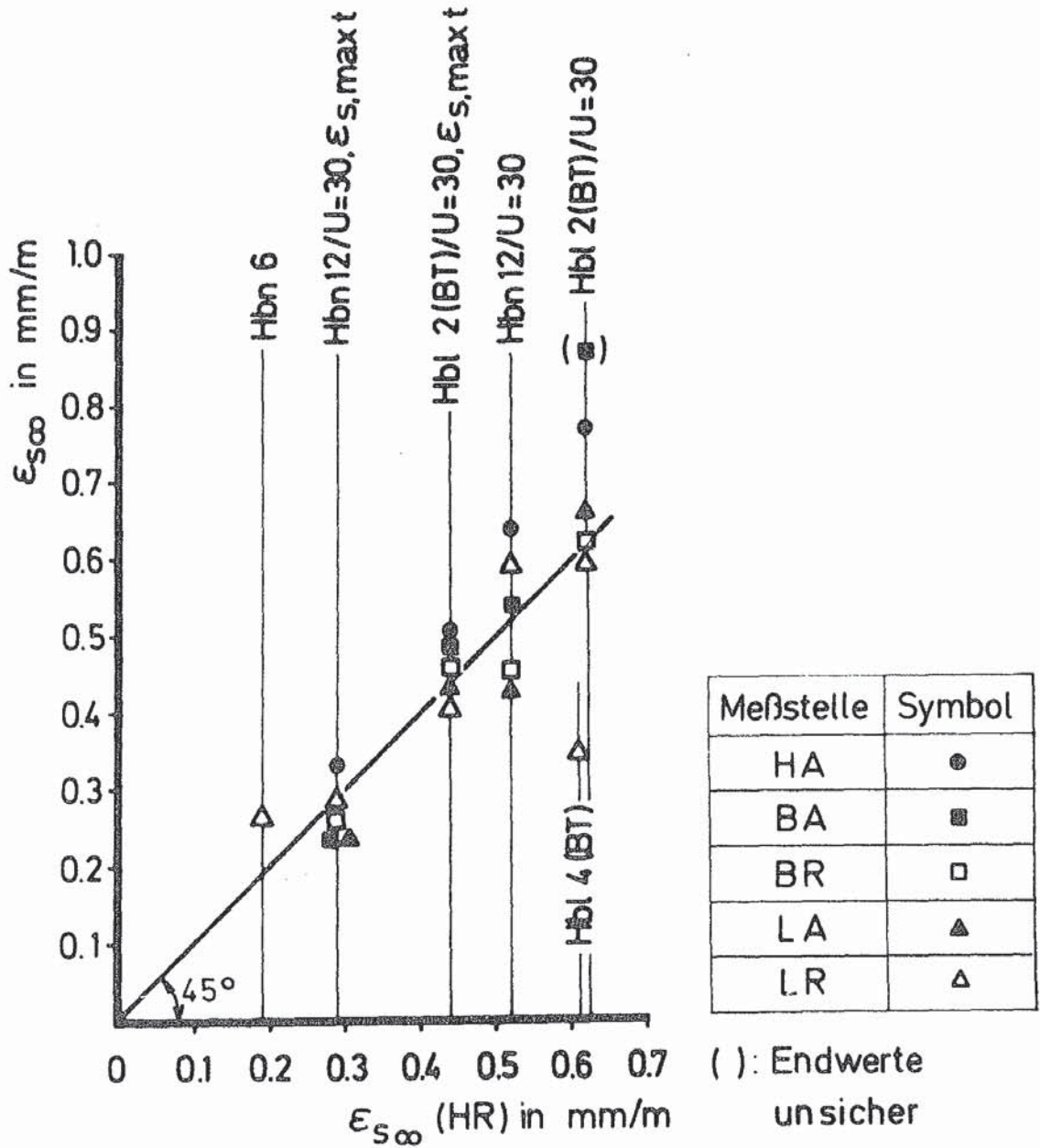


Bild 6.24: Endschwindwert  $\epsilon_{s\infty}$  in Abhängigkeit von der Meßstelle  
 Leichtbetonsteine Hbl (BT),  
 Betonsteine Hbn

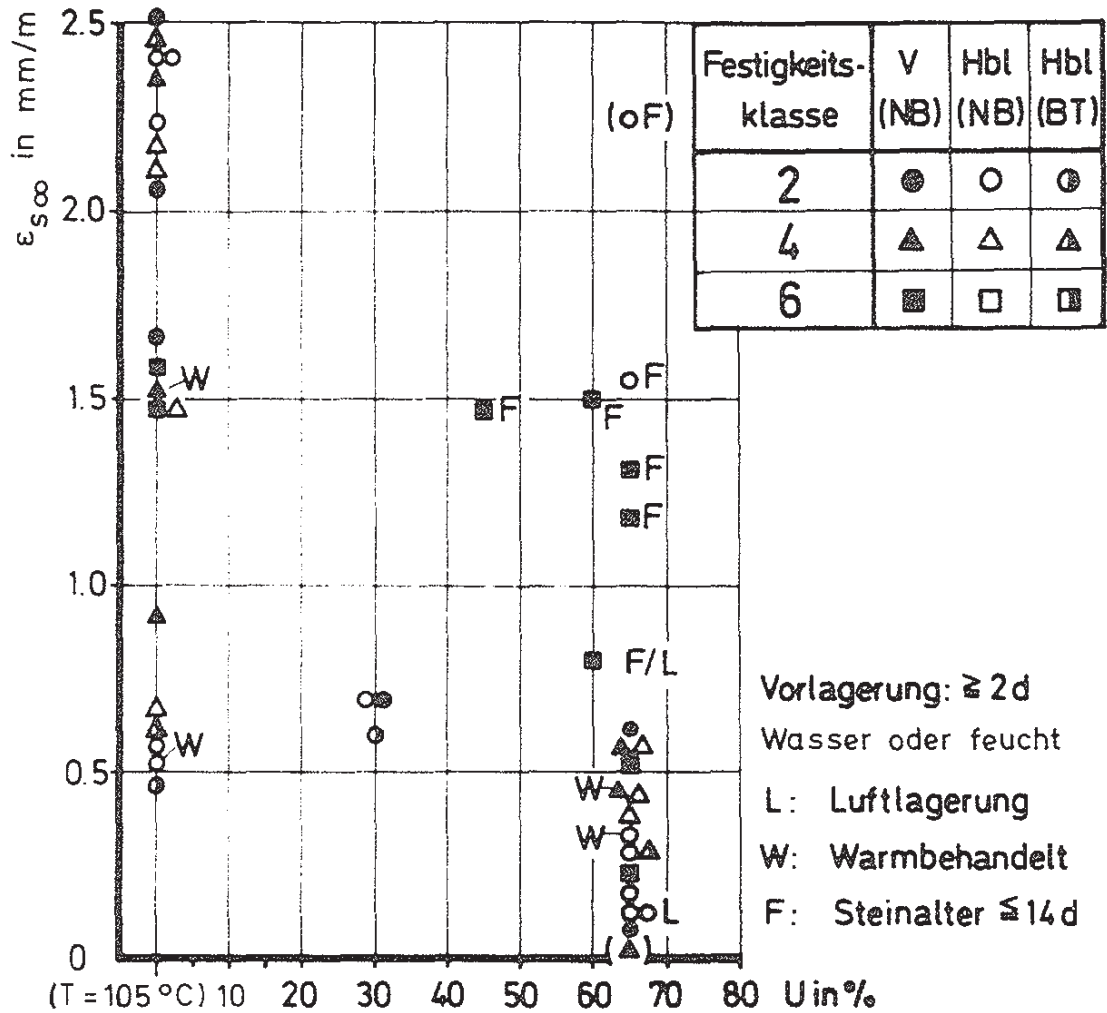


Bild 6.25: Endschwindwert  $\epsilon_{s\infty}$  in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte  $U$  des Schwindklimas  
 Leichtbetonvoll- und -hohlblocksteine V, Hbl, Meßstelle LR

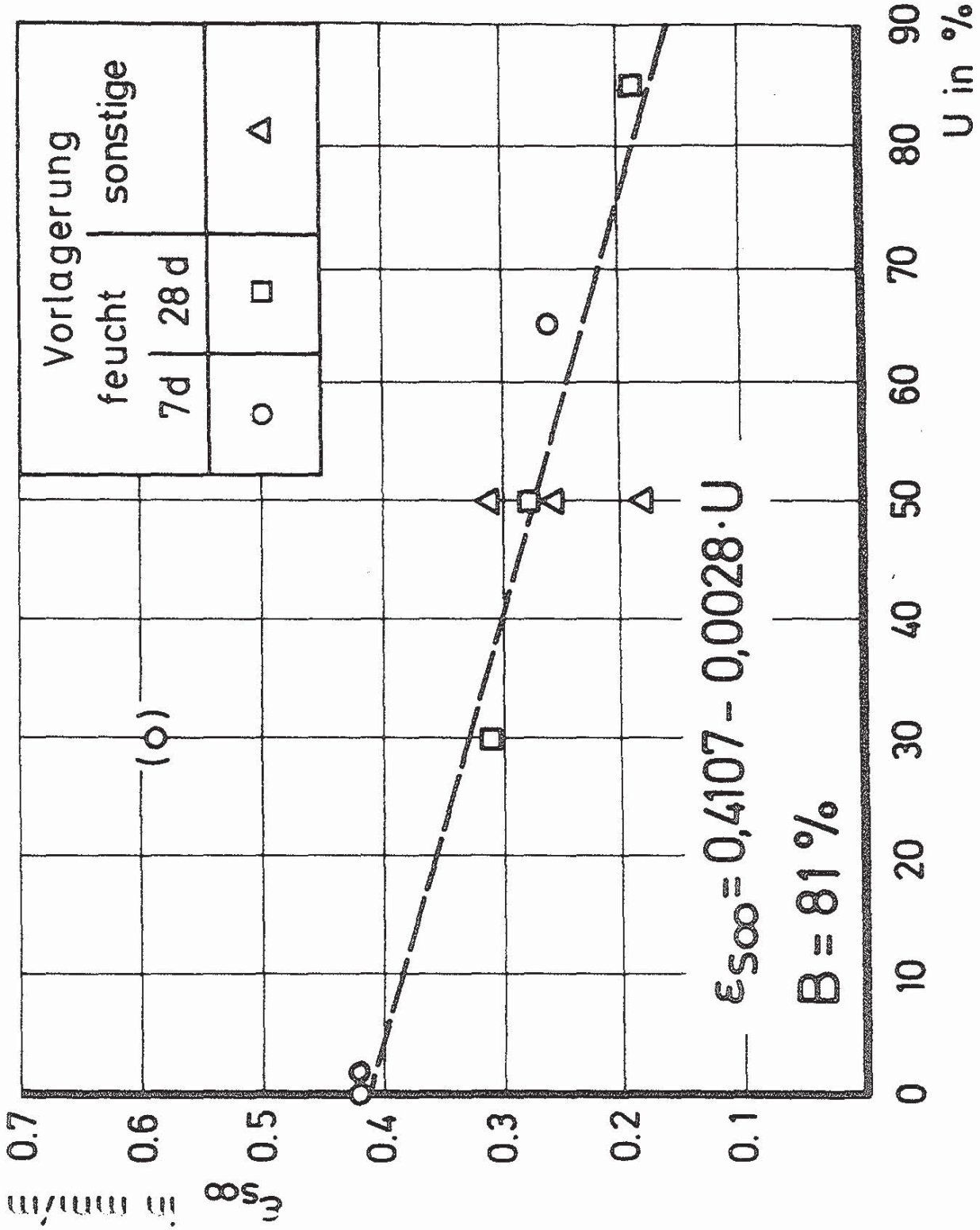


Bild 6.26: Endschwindwert  $\epsilon_{s\infty}$  in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte  $U$  des Schwindklimas  
 Betonsteine ( $\beta_D \leq 25 \text{ N/mm}^2$ ), Meßstelle LR

1) aus Steinen gesägte Prismen

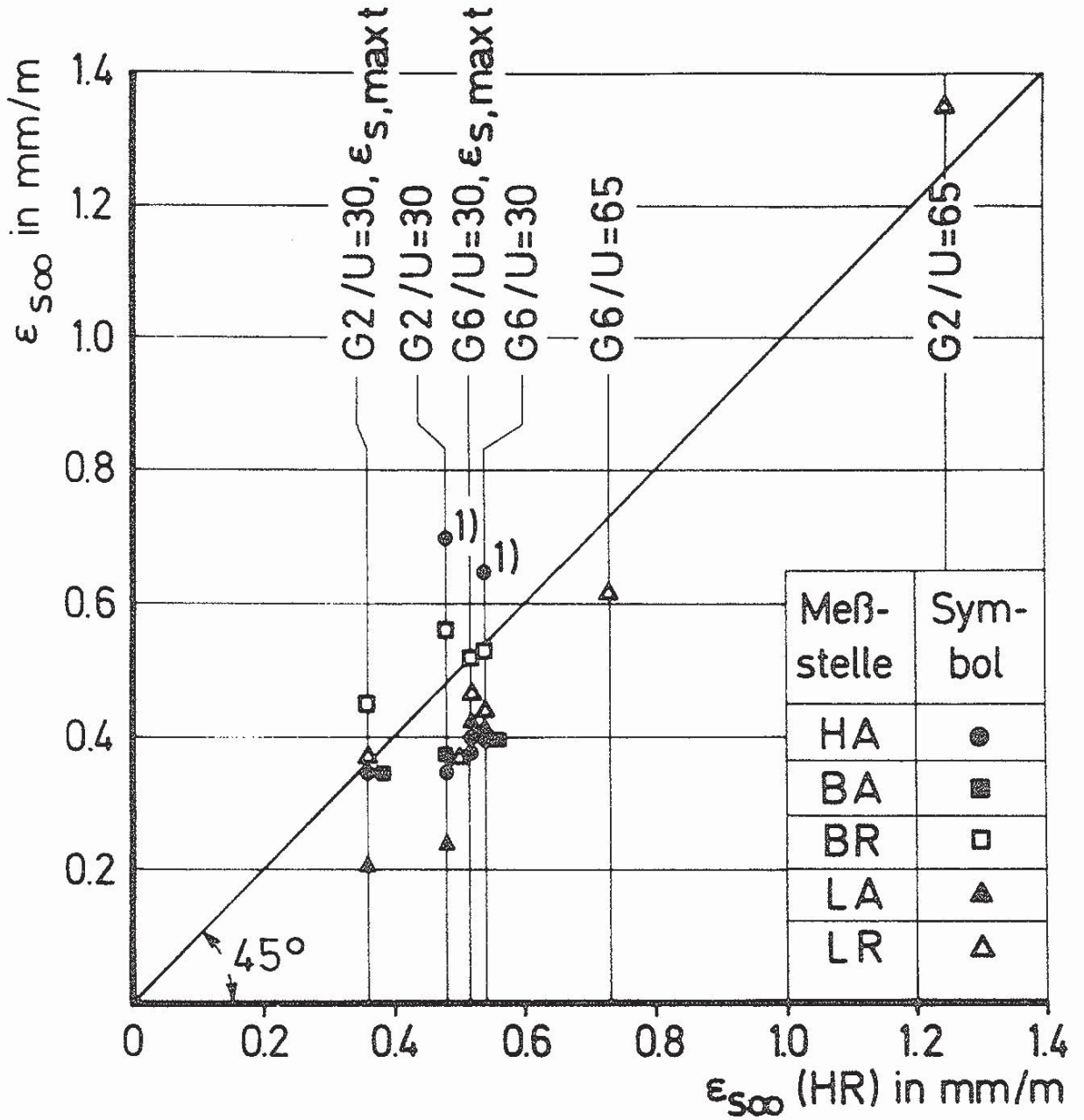


Bild 6.27: Endschwindwert  $\epsilon_{s\infty}$  in Abhängigkeit von der Meßstelle

Gasbetonsteine G

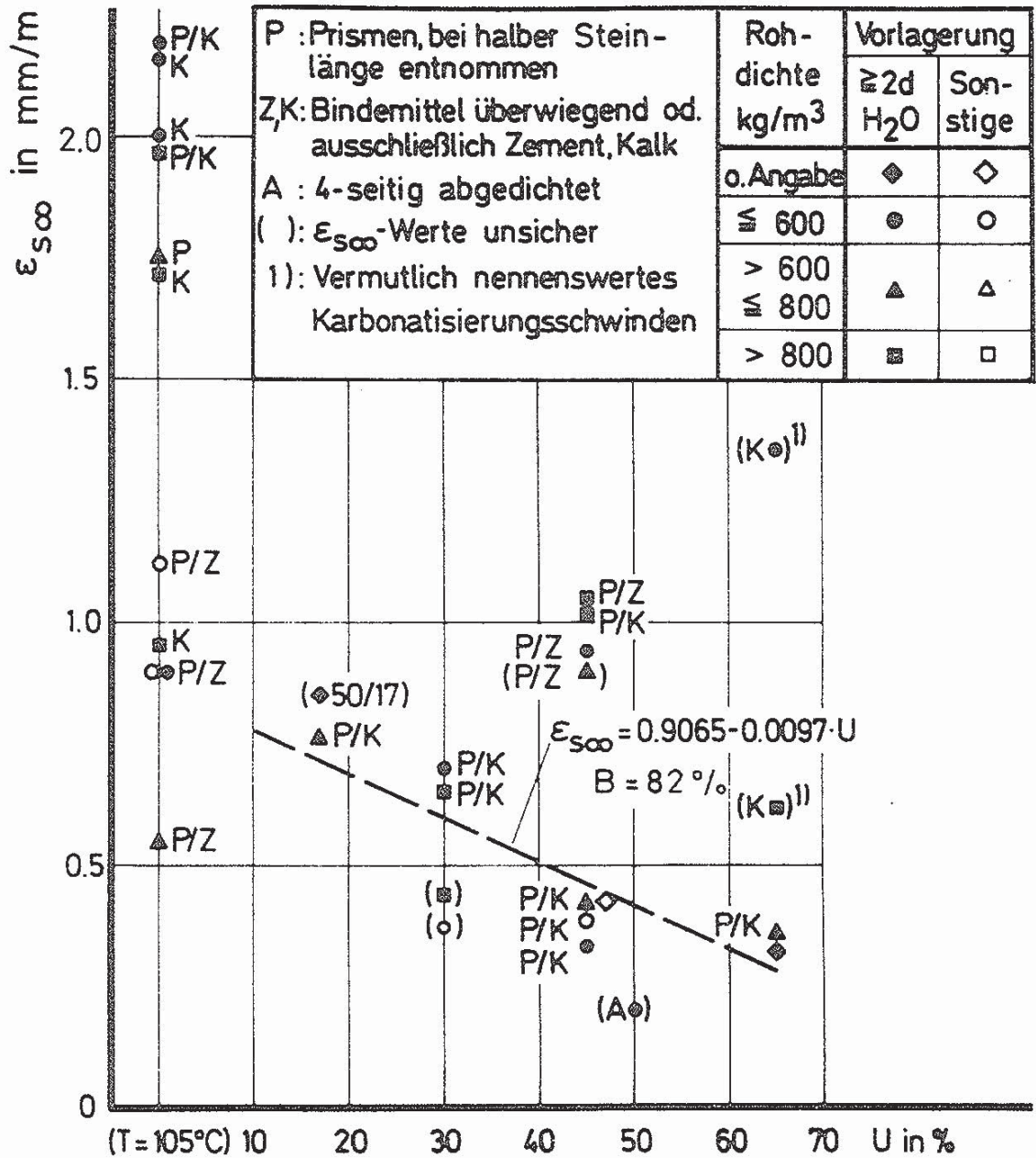


Bild 6.28: Endschwindwert  $\epsilon_{S\infty}$  in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte U des Schwindklimas Gasbetonsteine, Meßstelle LR

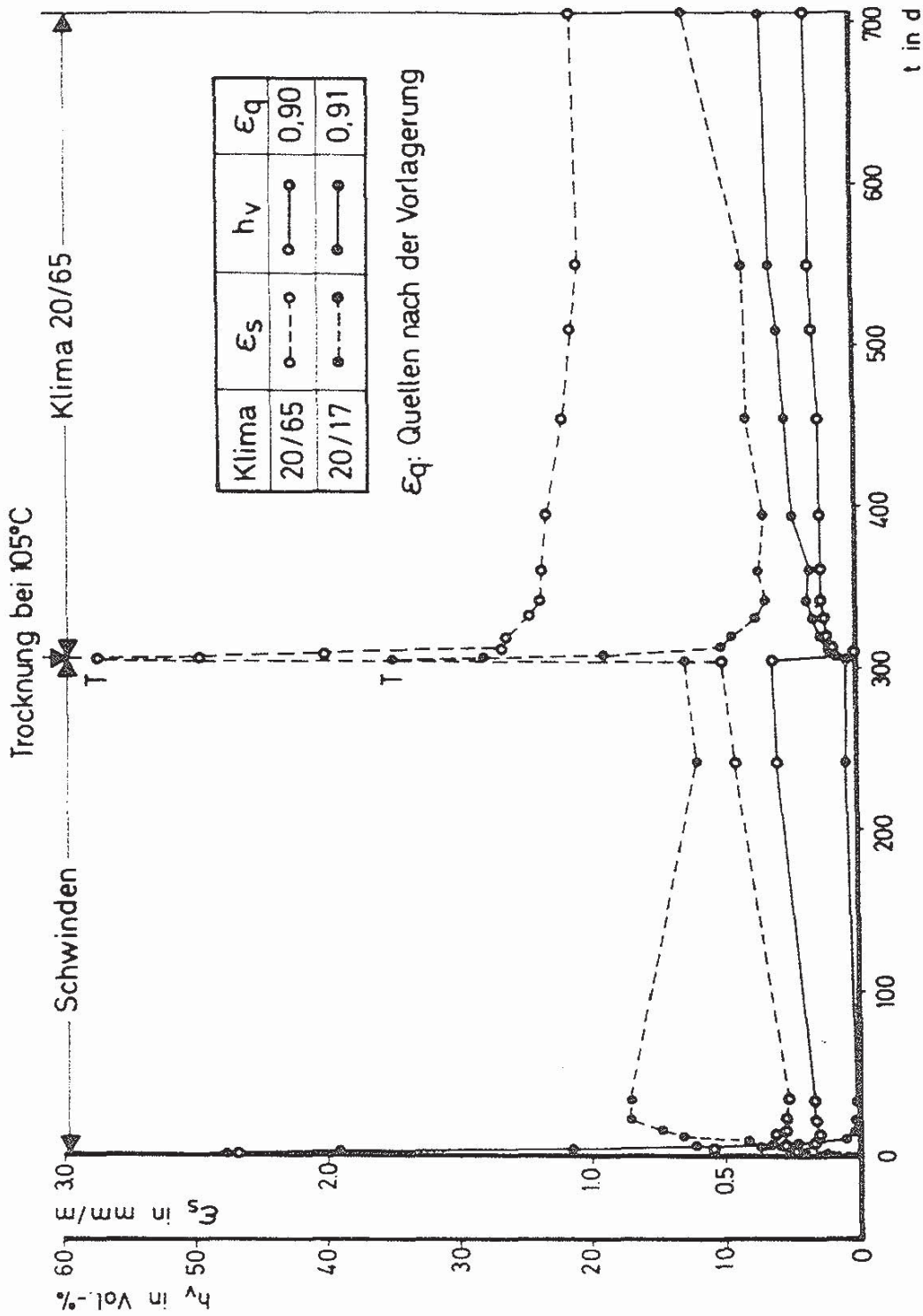


Bild 6.29: Schwinddehnung  $\epsilon_s$  und Feuchtigkeitsgehalt  $h_v$  in Abhängigkeit von Lagerungsart und -dauer  $t$   
 Gasbetonprismen G 6 (160 mm · 40 mm · 40 mm), Vorlagerung: bei 105 °C getrocknet, 48 h Wasser

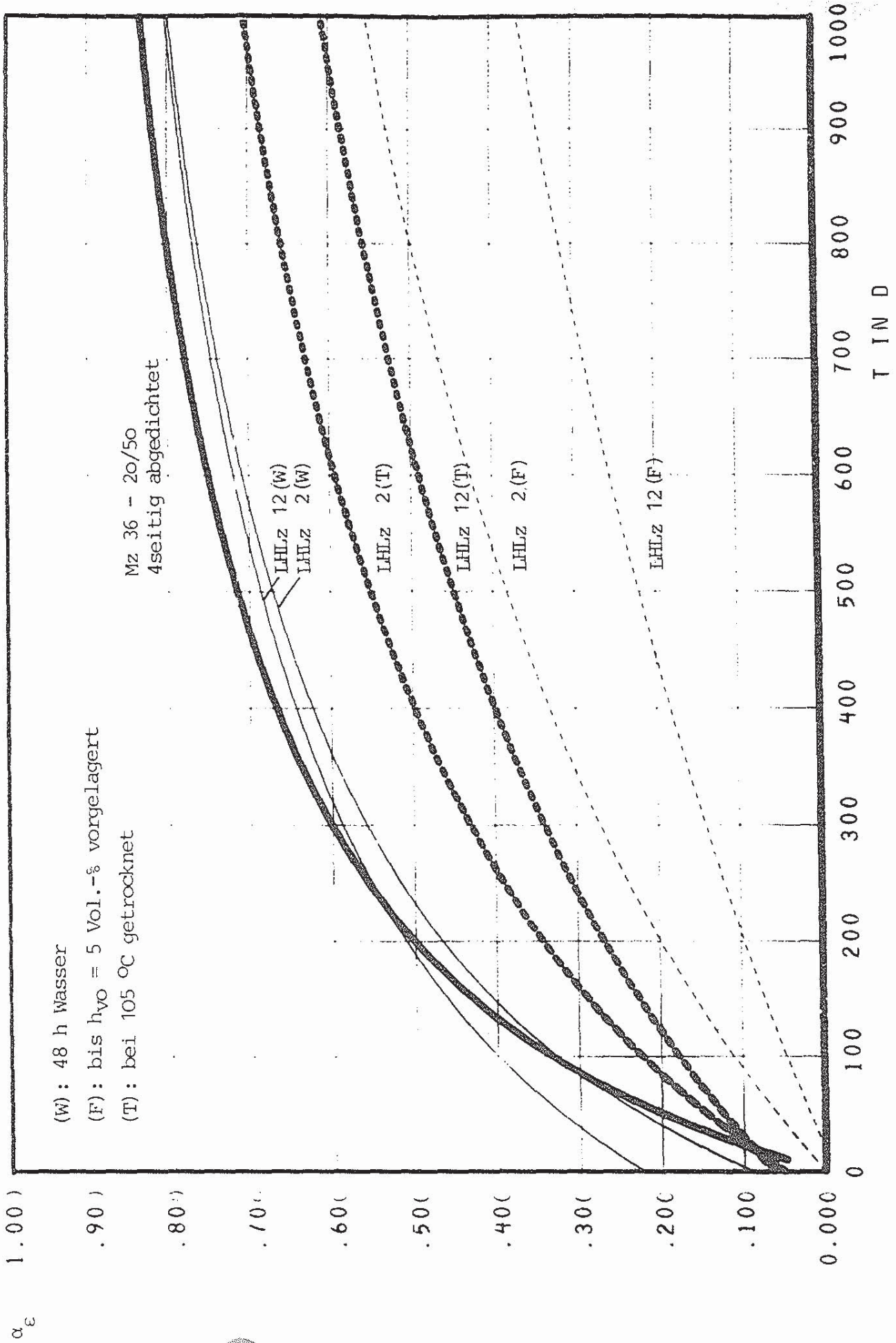


Bild 6.30 Fechtdehnungsverlauf von Mauersteinen  
Mauerziegel; Einfluß verschiedener Vorbehandlung, Prüfklima 20/65

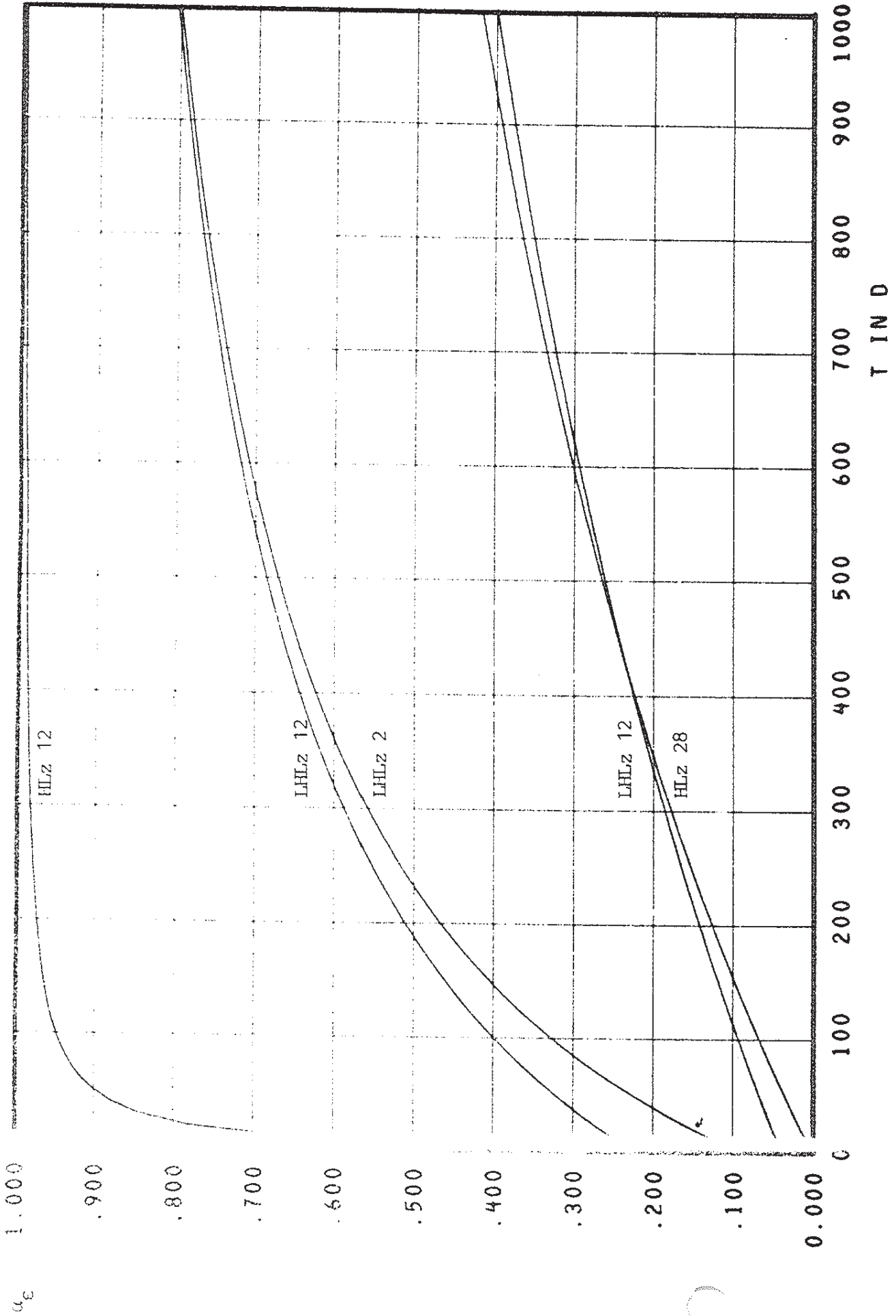


Bild 6.31 Feuchtegedehnungsverlauf von Mauersteinen  
Mauerziegel; Einfluß Steinsorte, Vorlagerung: 48 h Wasser, Prüfklima 20/65



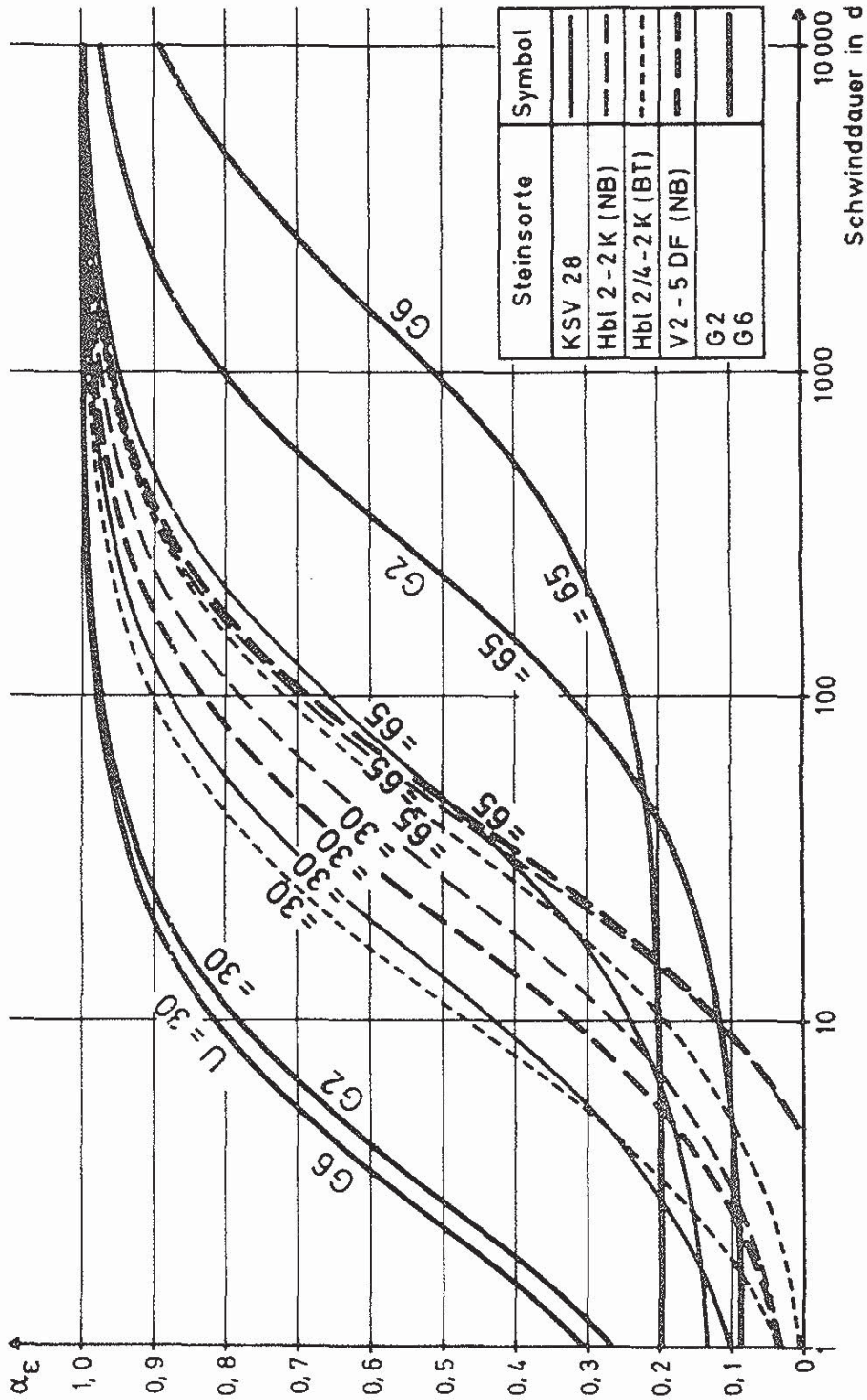


Bild 6.32: Zeitlicher Verlauf des Schwindens von nicht keramischen Mauersteinen  
Schwindklima 20/65 und 20/30, Meßstelle LR

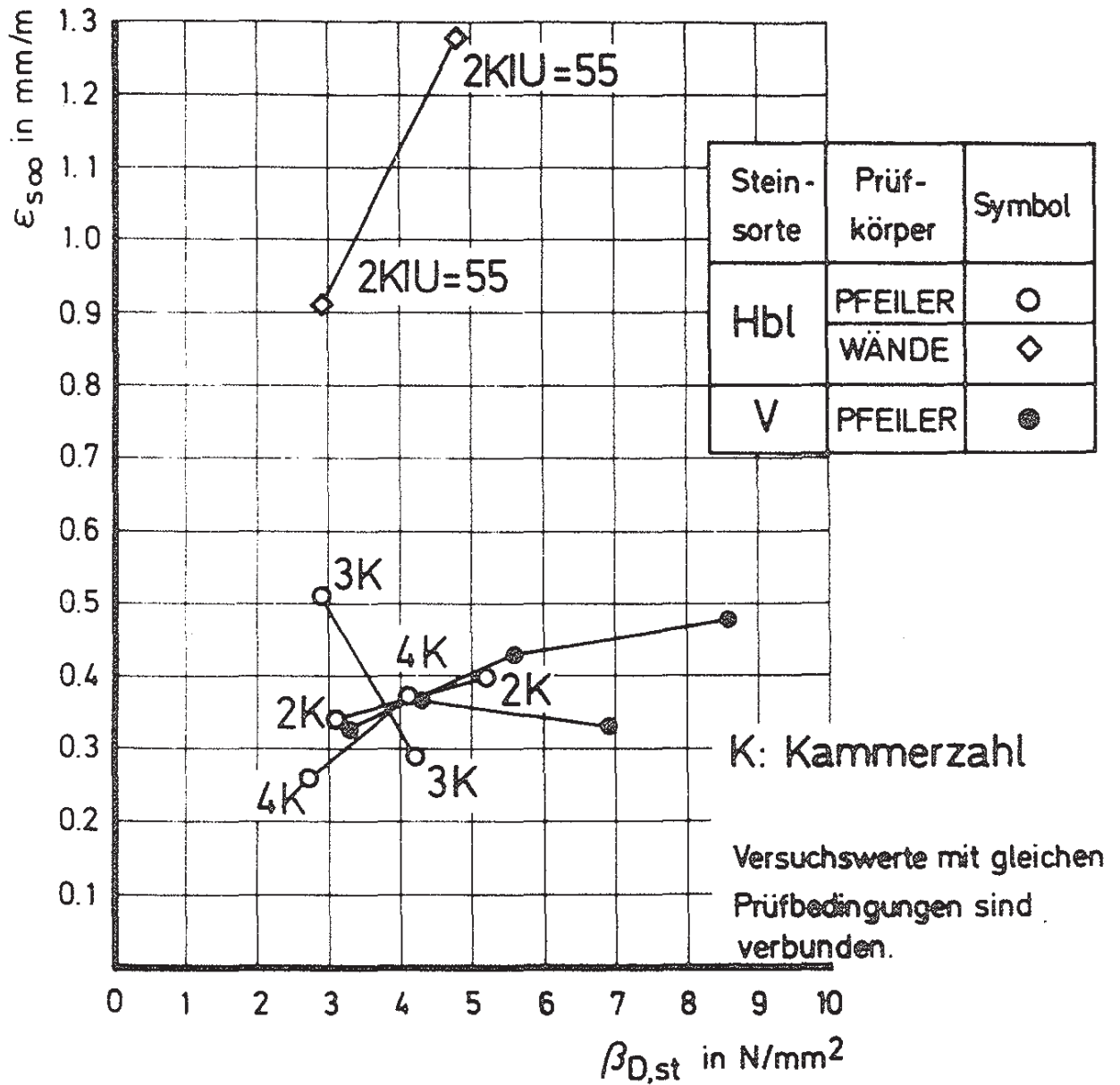


Bild 6.33: Endschwindwerte von Mauerwerk aus Leichtbetonsteinen mit Naturbimszuschlag in Abhängigkeit von der Steindruckfestigkeit (Meßstelle MV)

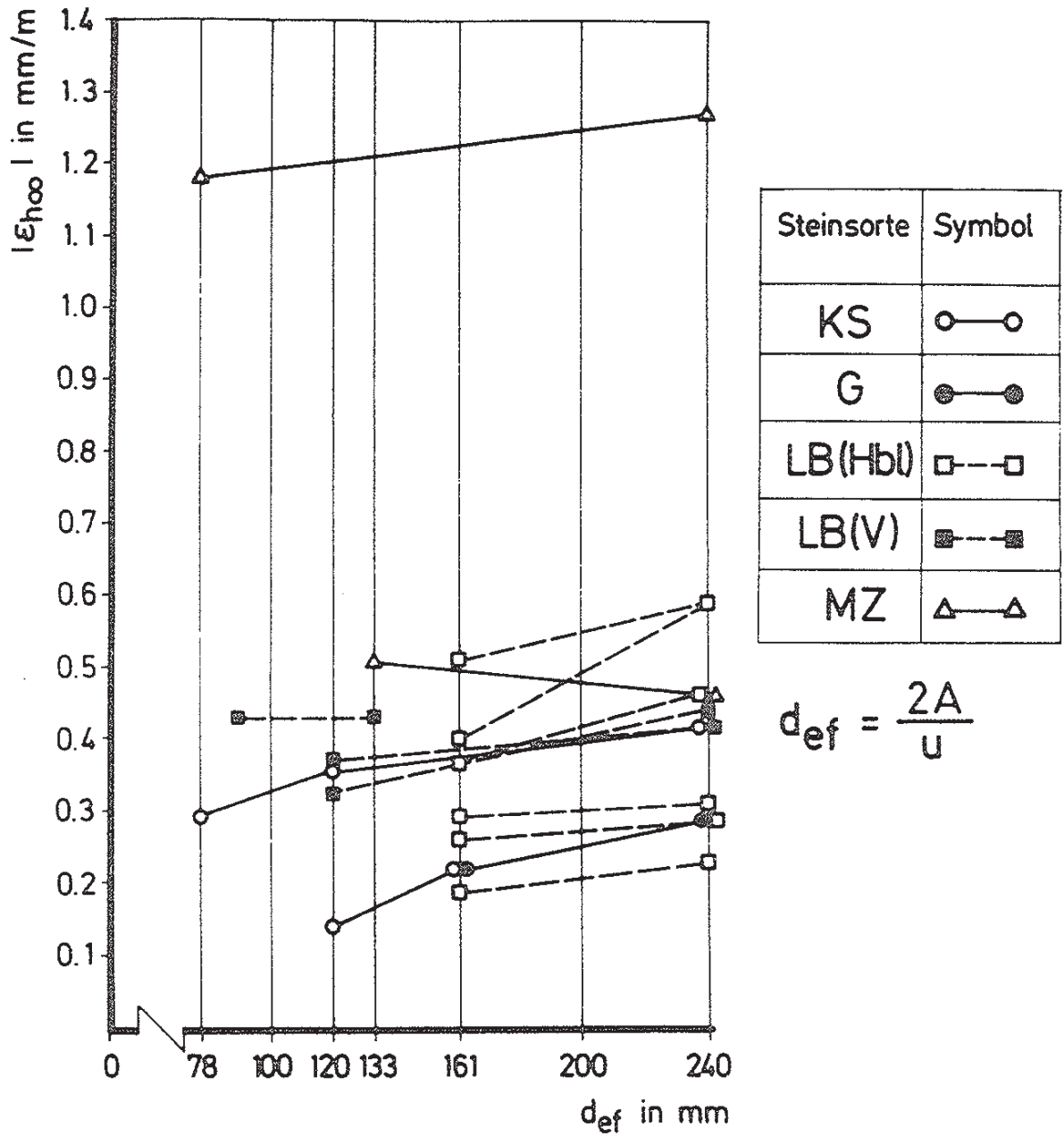


Bild 6.34: Einfluß der Prüfkörpergröße (Kennwert  $d_{ef}$ ) auf den Endwert der Feuchtedehnung Mauerwerk

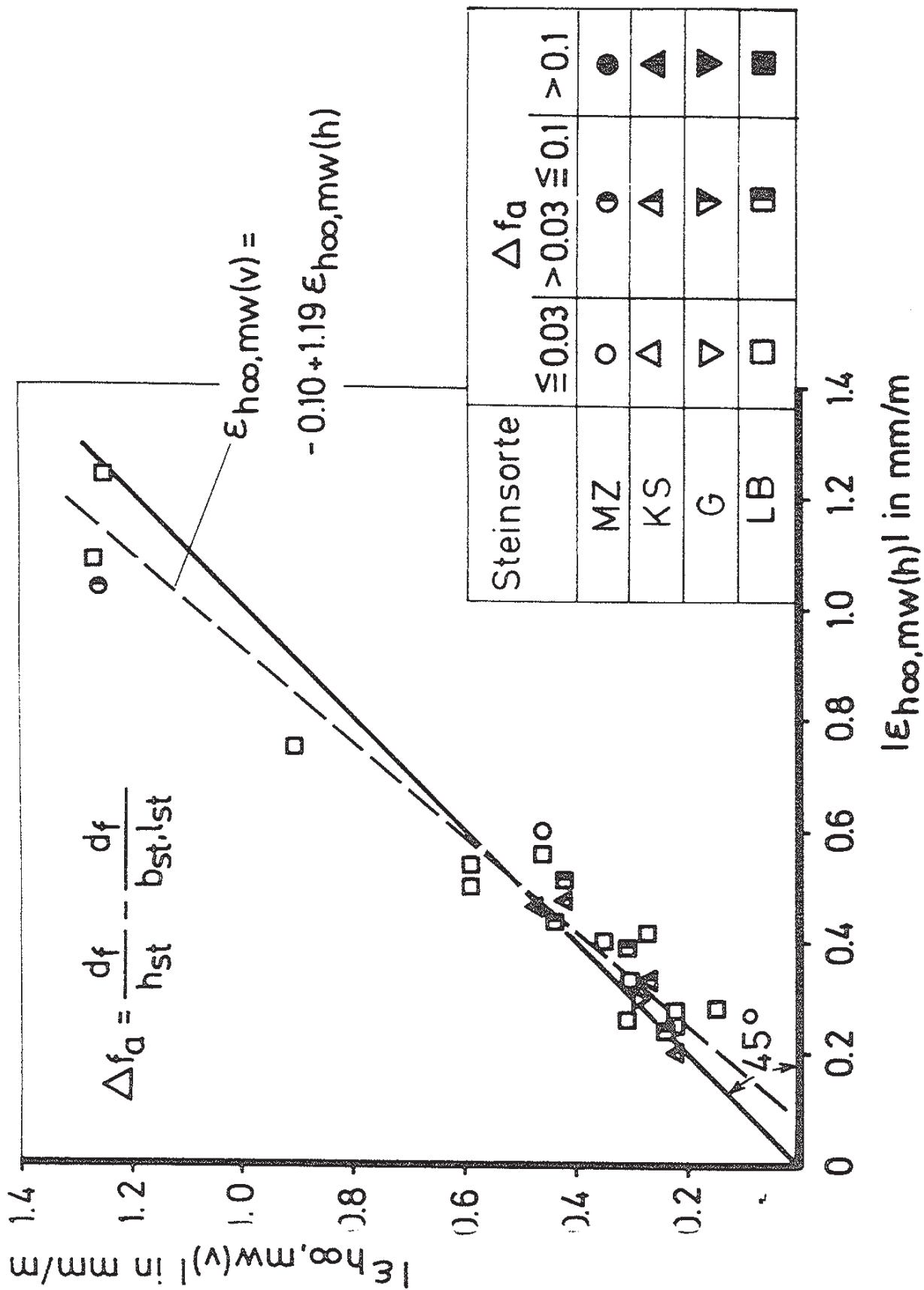


Bild 6.35: Zusammenhang zwischen den Feuchtedehnungswerten bei Mauerwerk in horizontaler und vertikaler Richtung

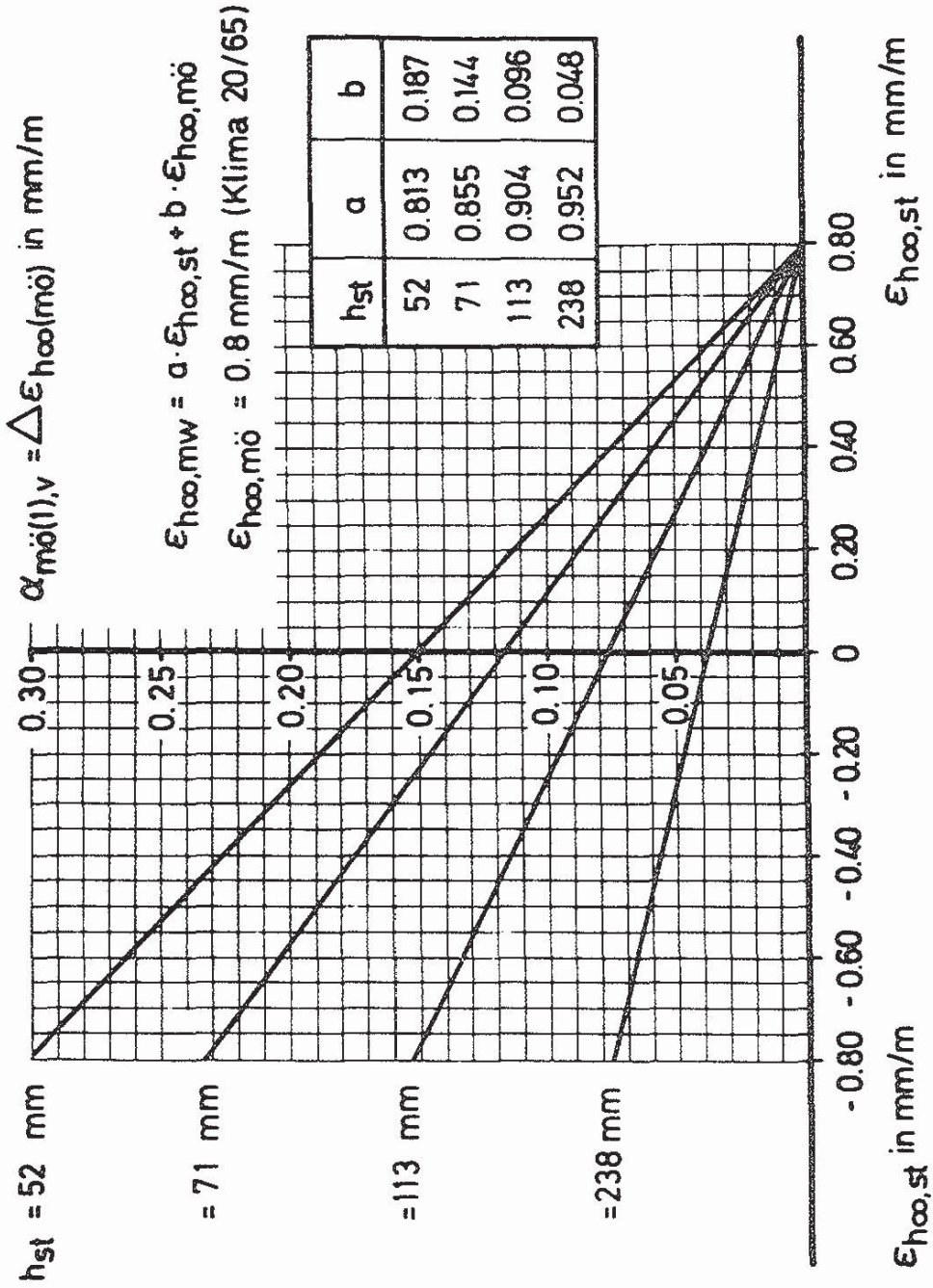


Bild 6.36: Rechnerischer Anteil des Mörtels am Endwert der Feuchtedehnung des Mauerwerks in vertikaler Richtung  
Mauerwerk im Läuferverband

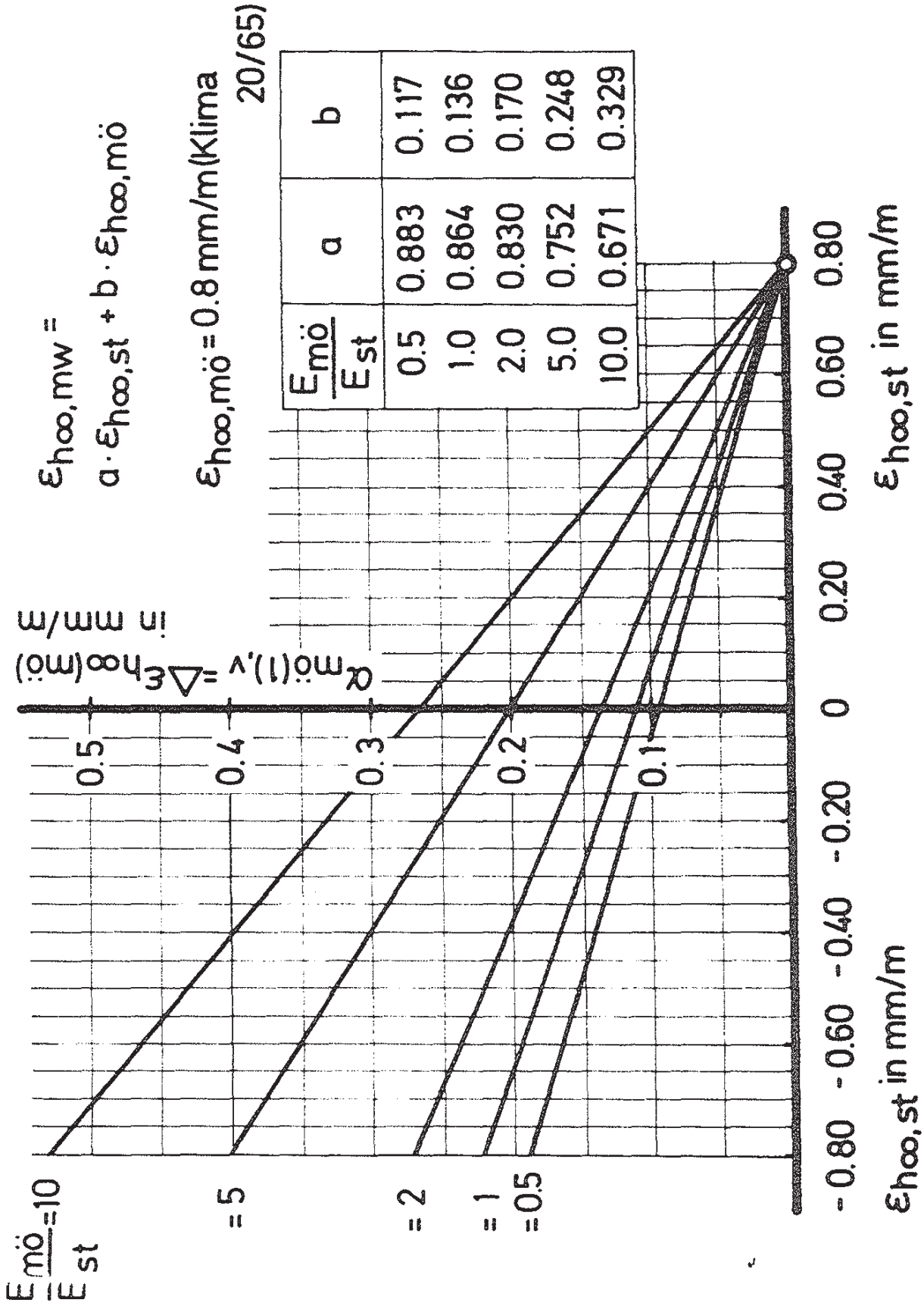


Bild 6.37: Rechnerischer Anteil des Mörtels am Endwert der Feuchtedehnung des Mauerwerks in vertikaler Richtung  
 Mauerwerk im Läufer-Binder-Verband, Steinformat 2 DF

$$\epsilon_{h00,mw} = \epsilon_{h00,st} + (\epsilon_{h00,m0} - \epsilon_{h00,st}) \left( \frac{\alpha_1 \beta}{\alpha_1 \beta + 1} \right)$$

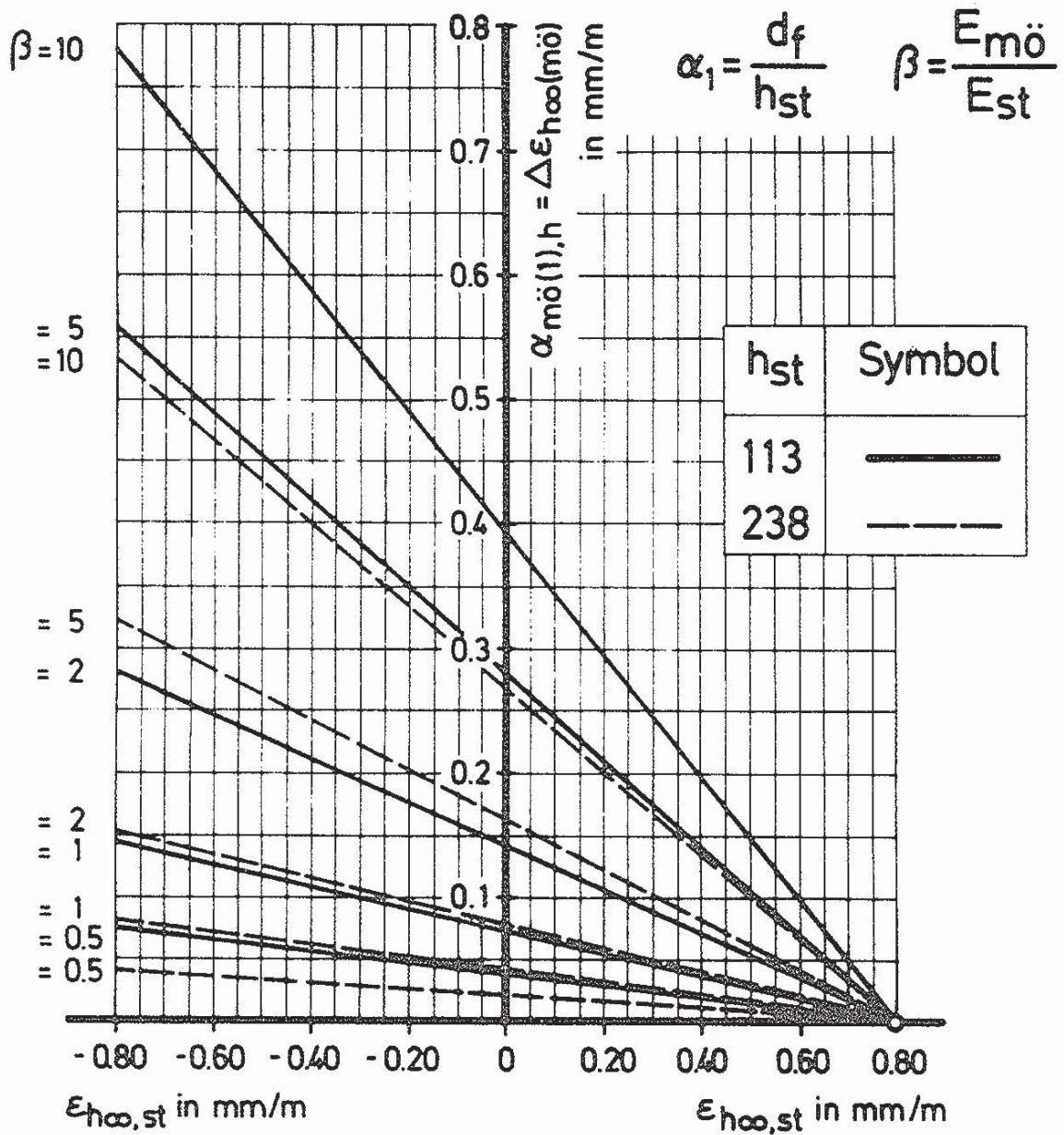


Bild 6.38: Rechnerischer Anteil des Mörtels am Endwert der Feuchtedehnung des Mauerwerks in horizontaler Richtung

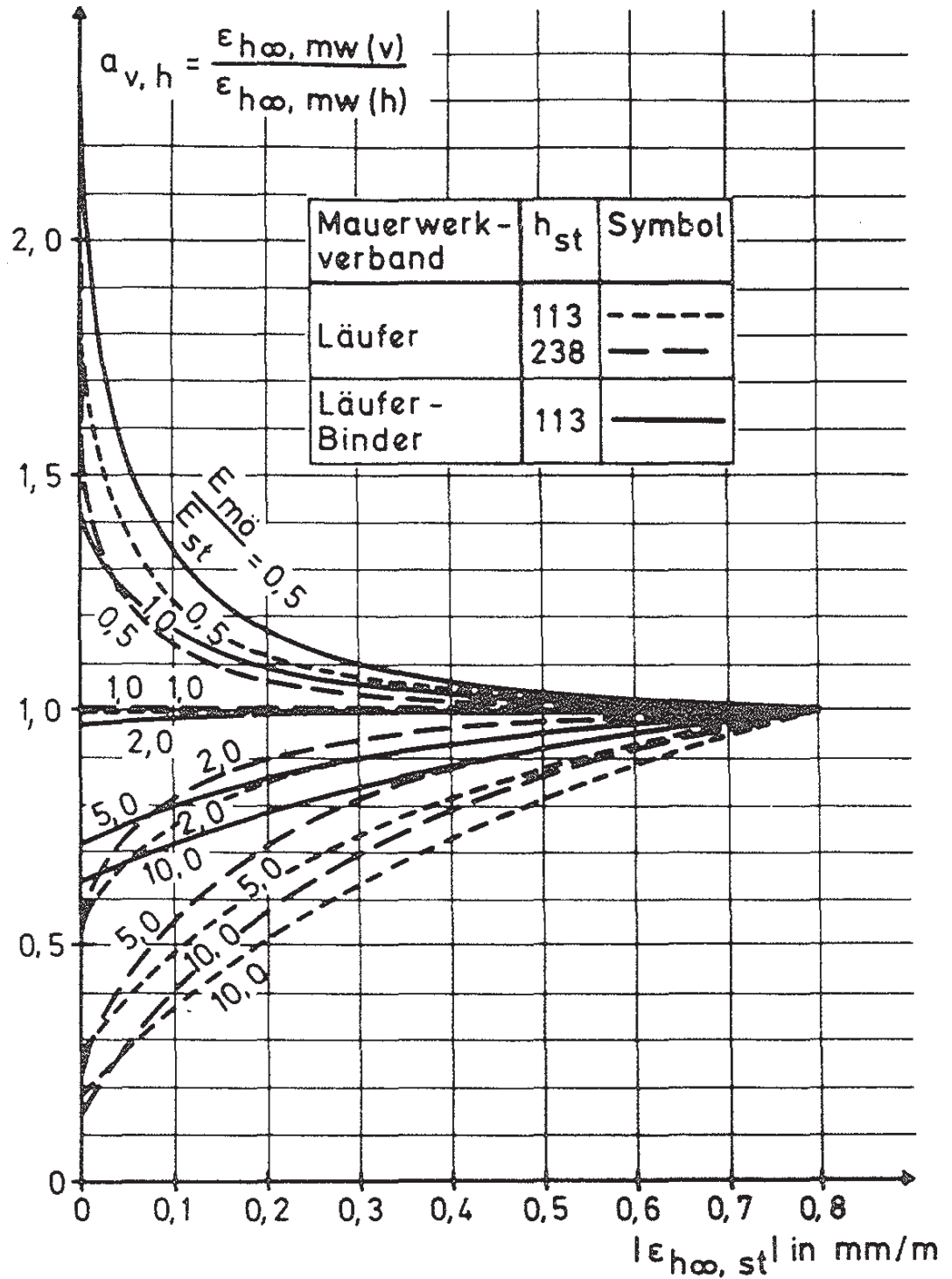


Bild 6.39: Verhältniswert der Feuchtedehnungsendwerte von Mauerwerk in vertikaler und horizontaler Richtung in Abhängigkeit vom Feuchtedehnungsendwert der Mauersteine



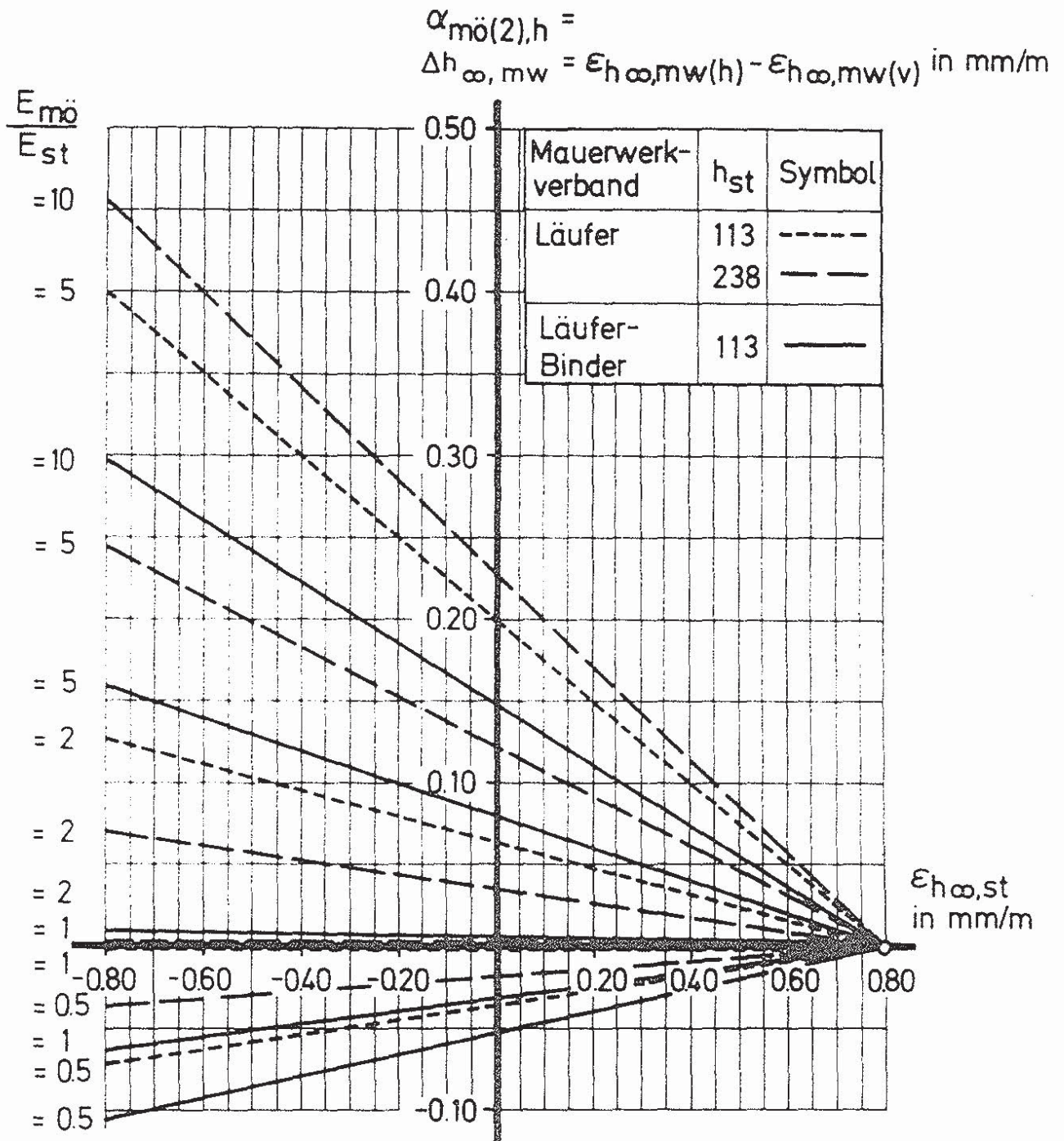


Bild 6.40: Rechnerische Differenz der Feuchtedehnungsendwerte von Mauerwerk in horizontaler und vertikaler Richtung infolge Mörtelschwinden

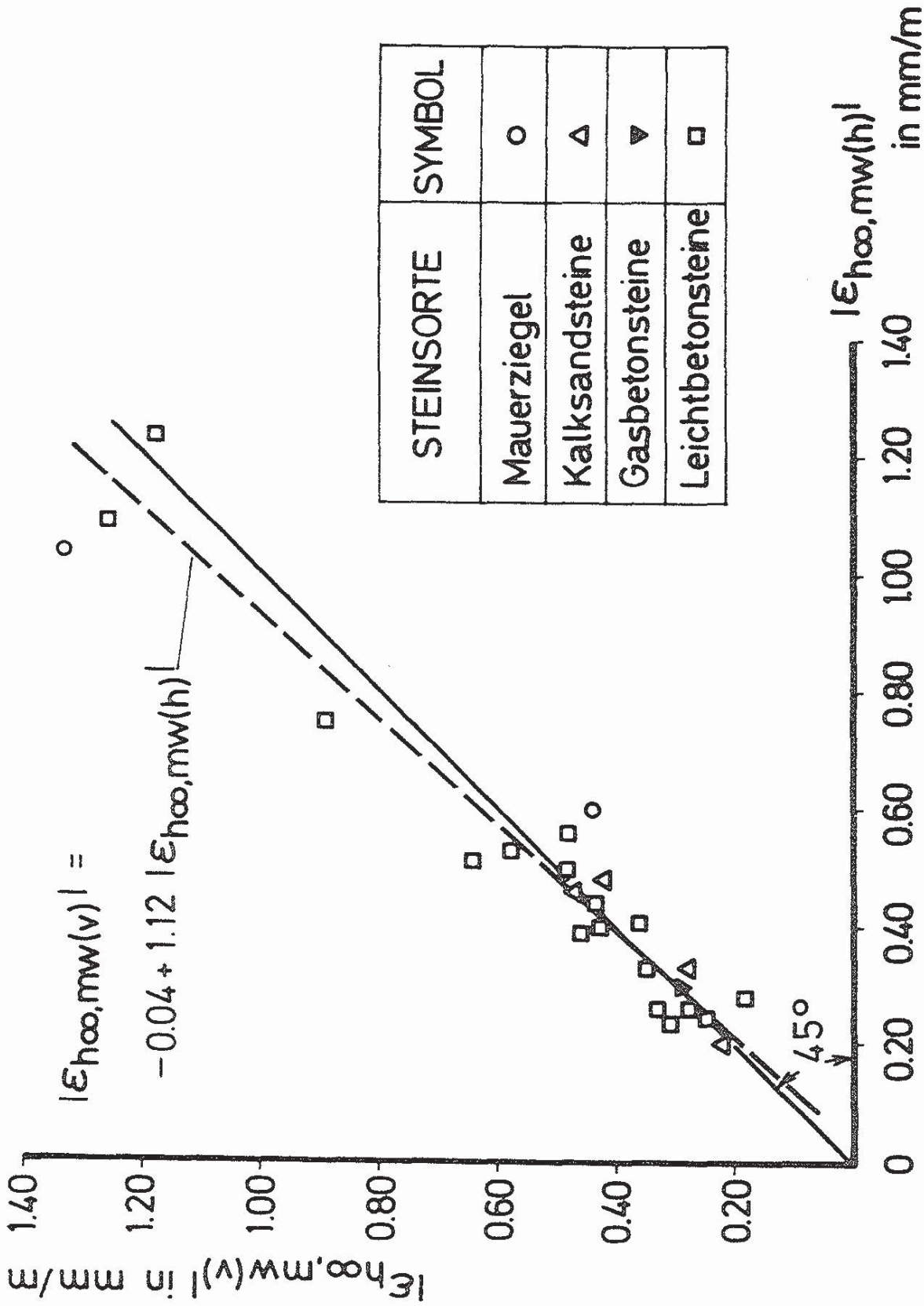


Bild 6.41: Zusammenhang zwischen den Feuchtedehnungswerten von Mauerwerk in horizontaler und vertikaler Richtung unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Mörtelschwindeneinflusses

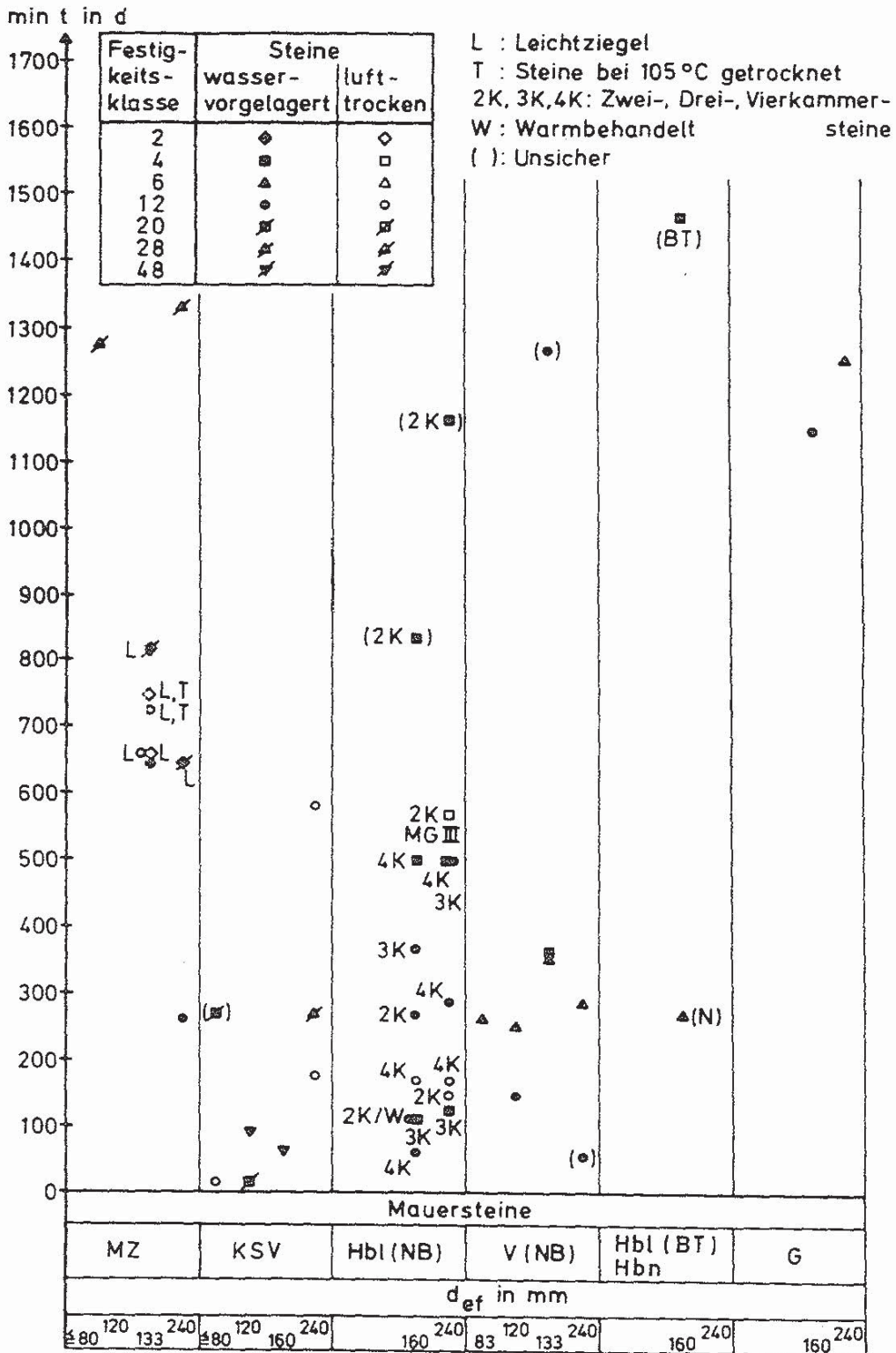
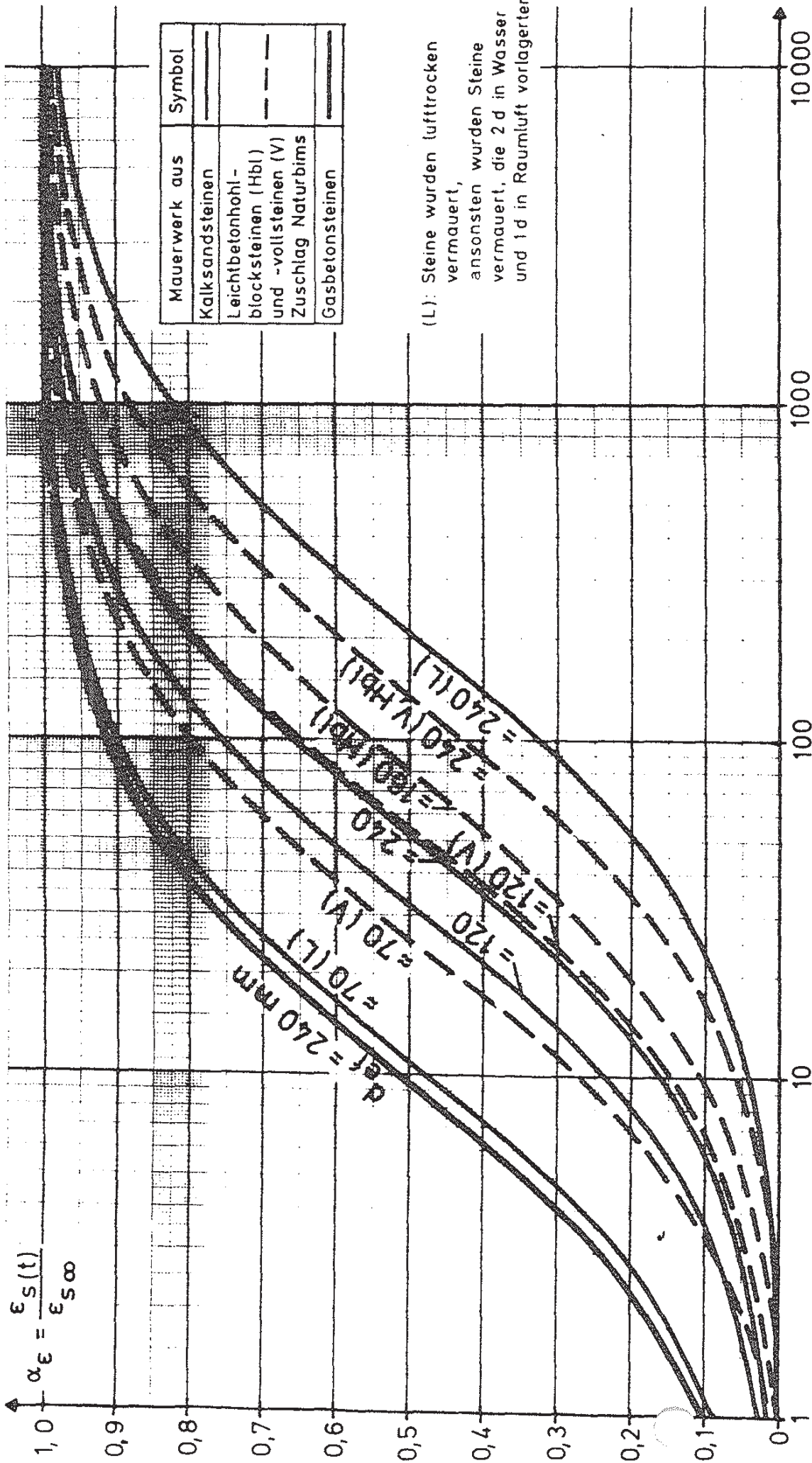


Bild 6.42: Mindestversuchsdauer min t, bei der  $\epsilon'_{h\infty} = \epsilon_{h\infty} \pm 10\%$  ist Mauerwerk



(L): Steine wurden lufttrocken  
vermauert,  
ansonsten wurden Steine  
vermauert, die 2 d in Wasser  
und 1 d in Raumluft vorlagerten

Zeitlicher Verlauf des Schwindens von Mauerwerk aus nichtkeramischen  
Mauersteinen (Mauerwerkalter bei Schwindbeginn im allgemeinen 3 bis 7 d)

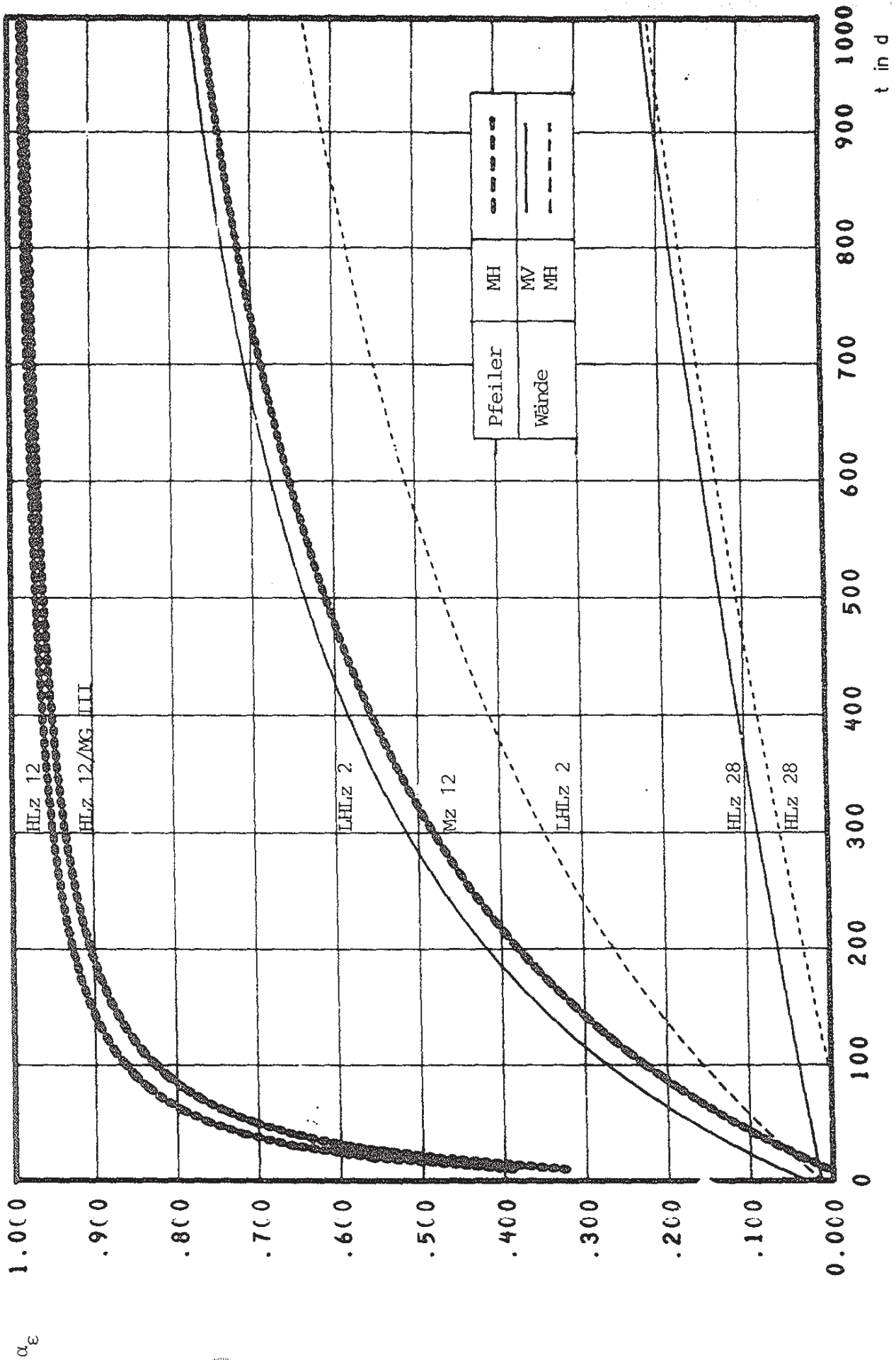


Bild 6.44 F uchtdehnungsverlauf von Mauerwerk in vertikaler (MV) und horizontaler Richtung (MH)  
N verziegel; wasservorgelagert, Wände, Pfeiler, Prüfklima 20/65

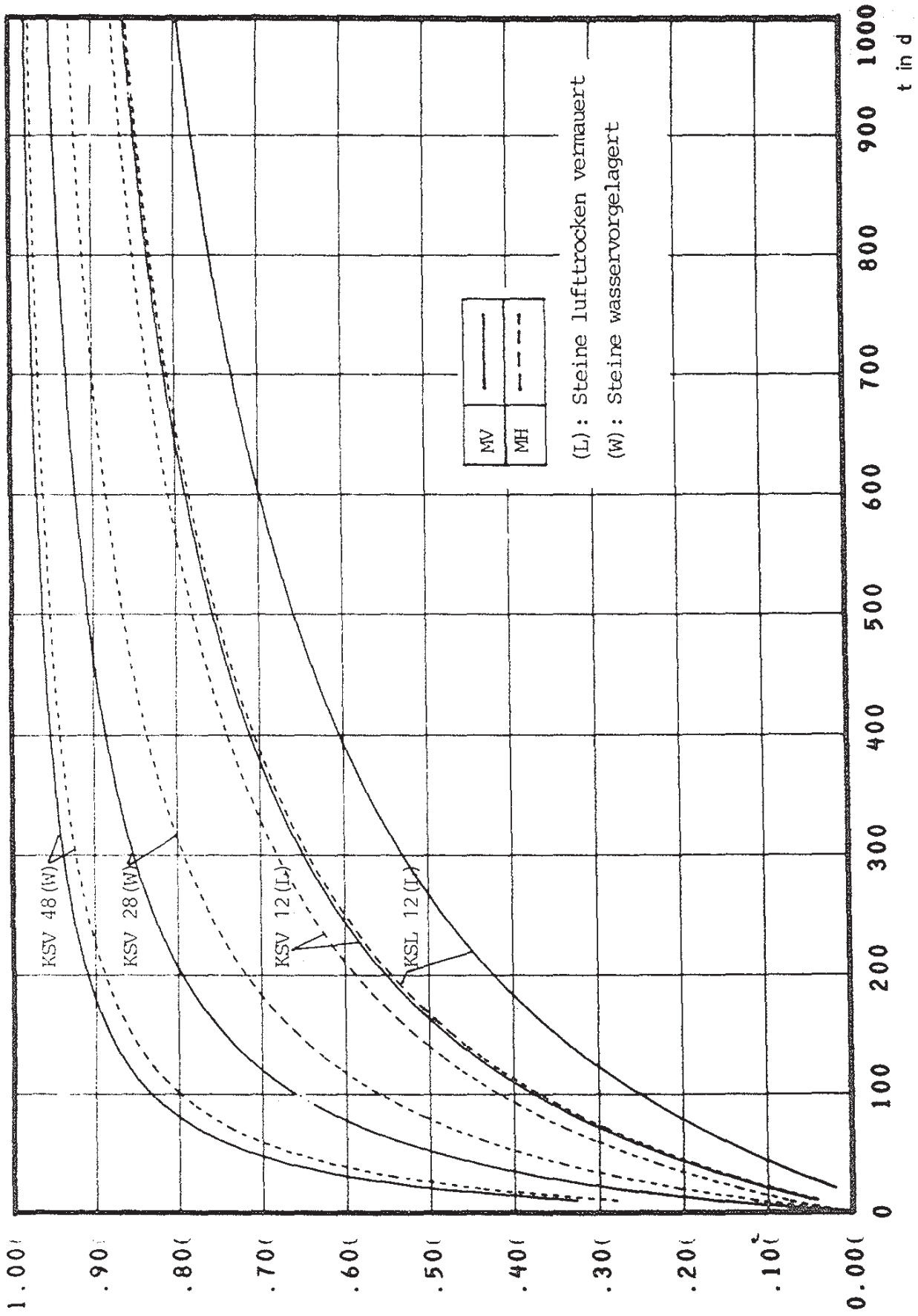
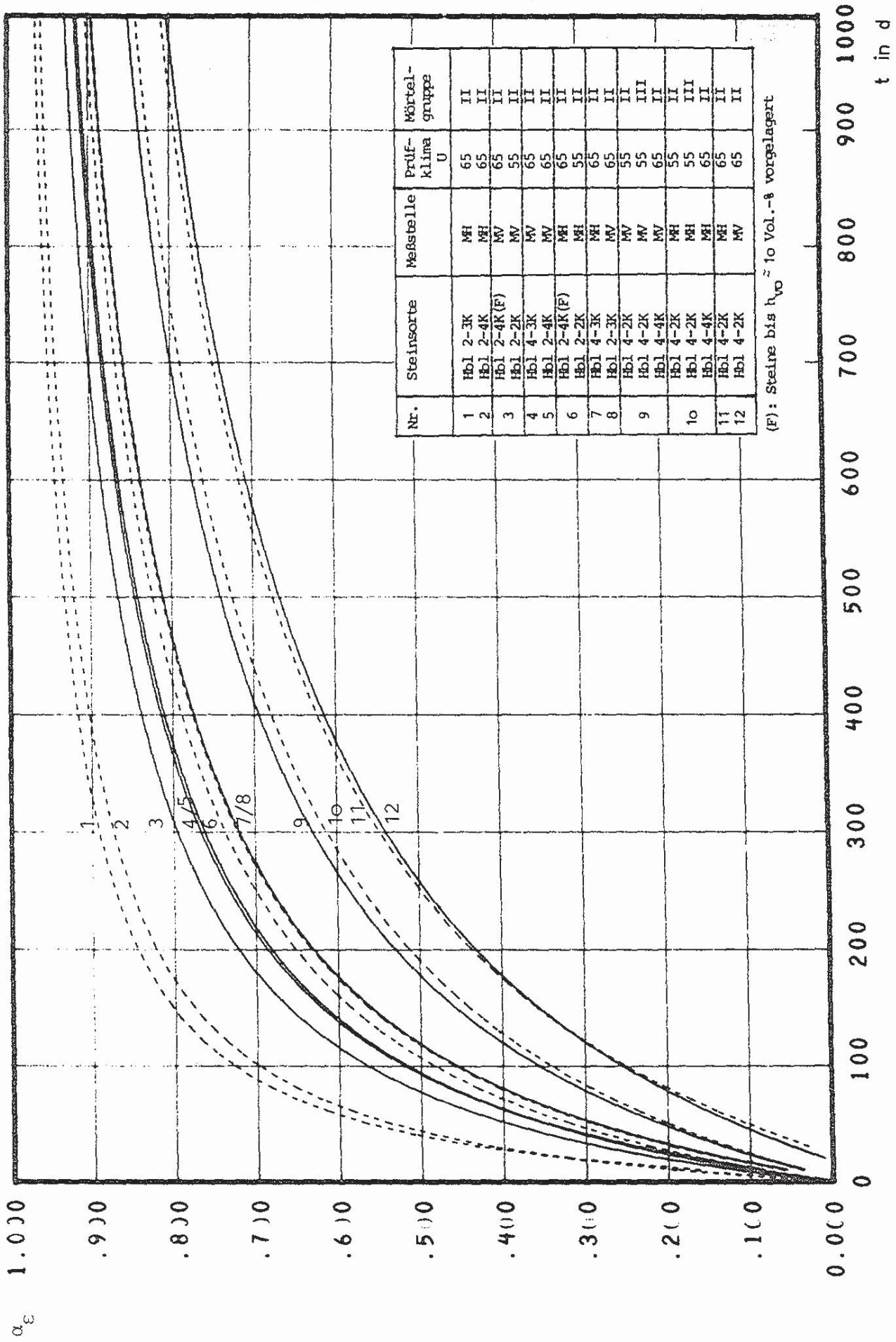
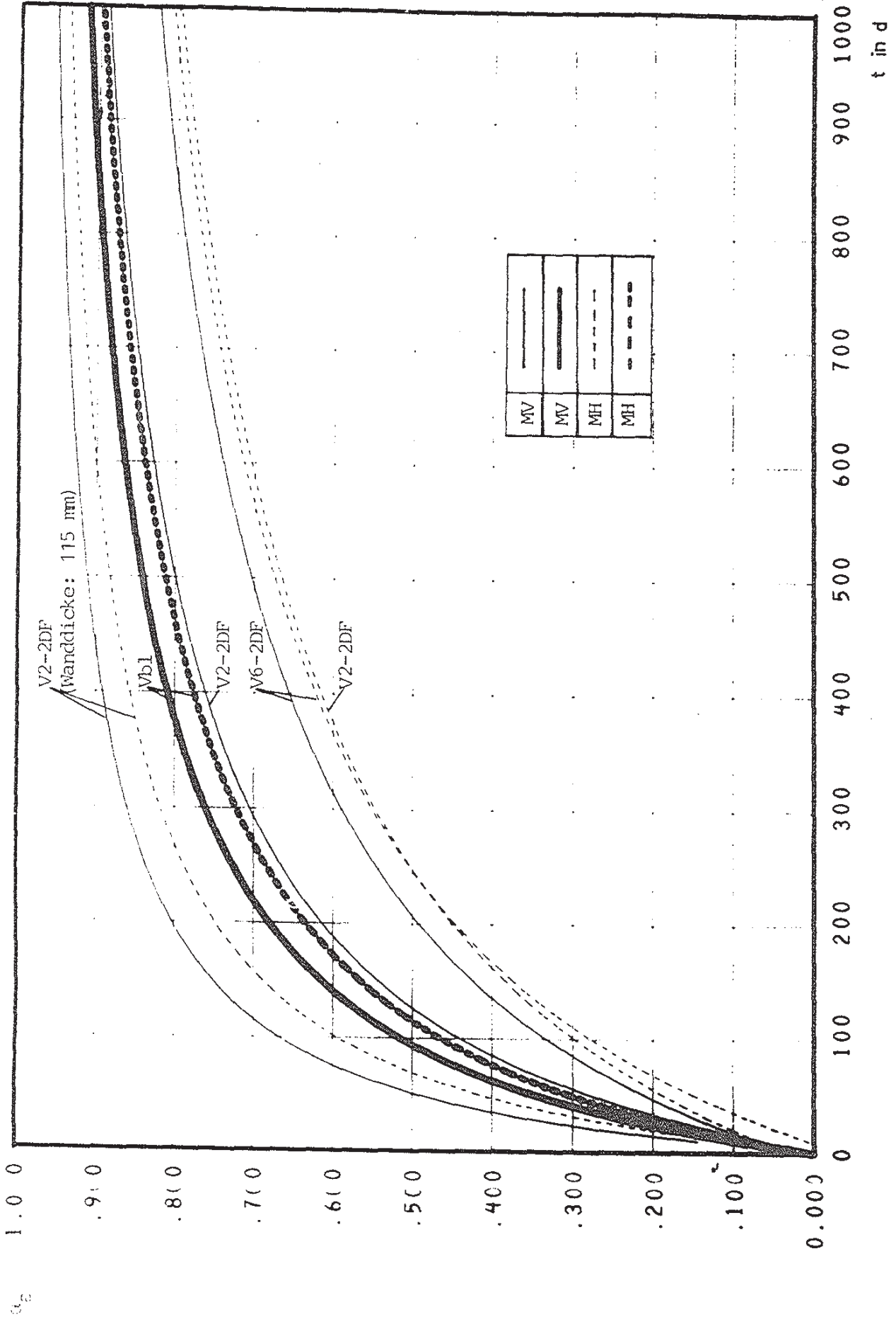


Bild 6.45 Feuchteverlauf von Mauerwerk in vertikaler (MV) und horizontaler Richtung (MH)  
K: Kalksandsteine; Wände, Prüfklima 20/65

Bild 6.45



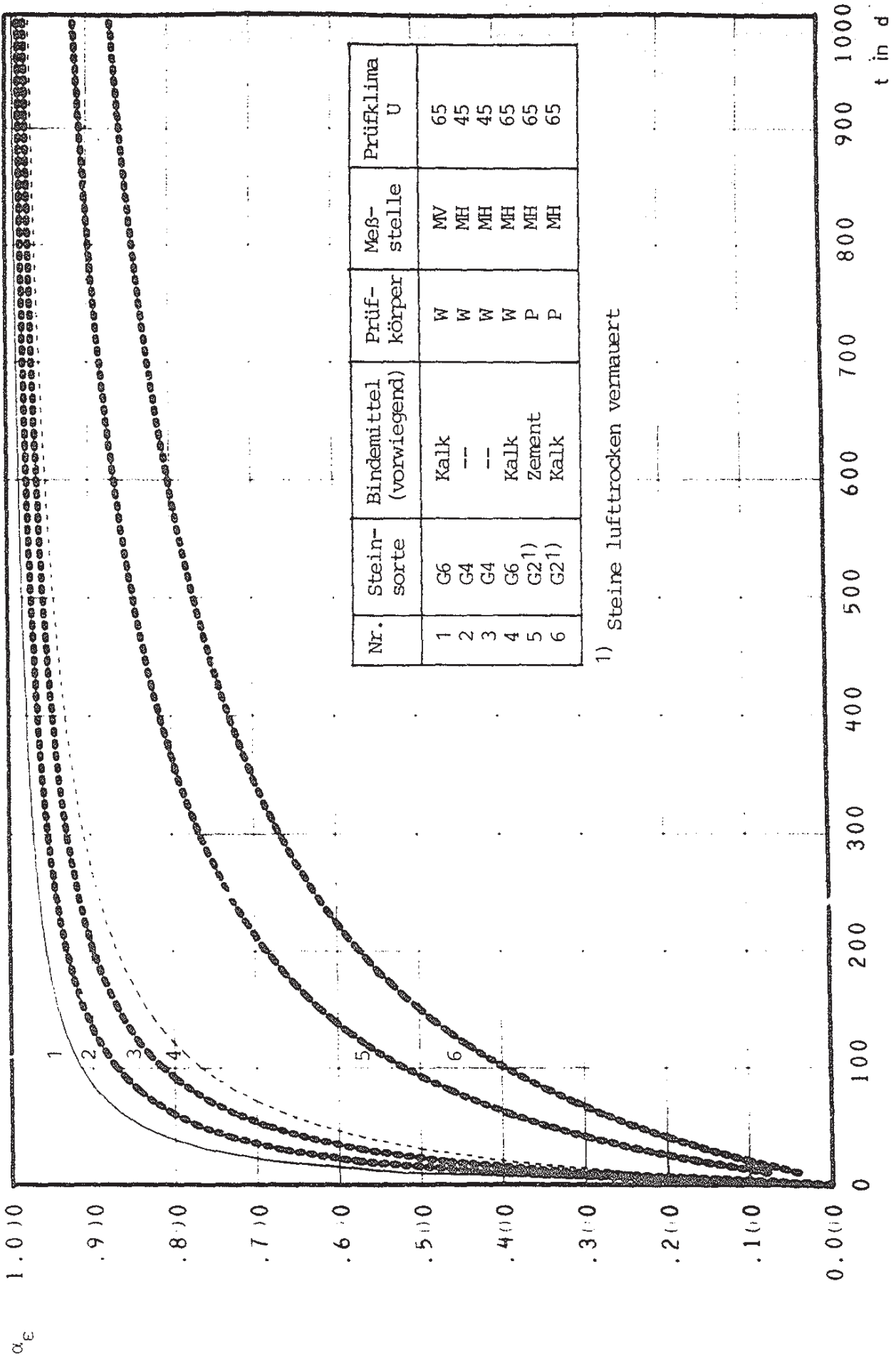
Leuchtedehnungsverlauf von Mauerwerk in vertikaler (MV) und horizontaler Richtung (MH)  
 Leichtbetonhohlblocksteine (NB); wasservorgelagert, Wände



Feuchtedehnungsverlauf von Mauerwerk in vertikaler (MV) und horizontaler Richtung (MH)  
 Leichtbetonvollsteine (NB); wasservorgelagert, Wände

Bild 6.47





1) Steine lufttrocken vermauert

Bild 6.48 Durchdringungsverlauf von Mauerwerk in vertikaler (MV) und horizontaler Richtung (MH) (Isobetonsteine; Wände, Pfeiler)

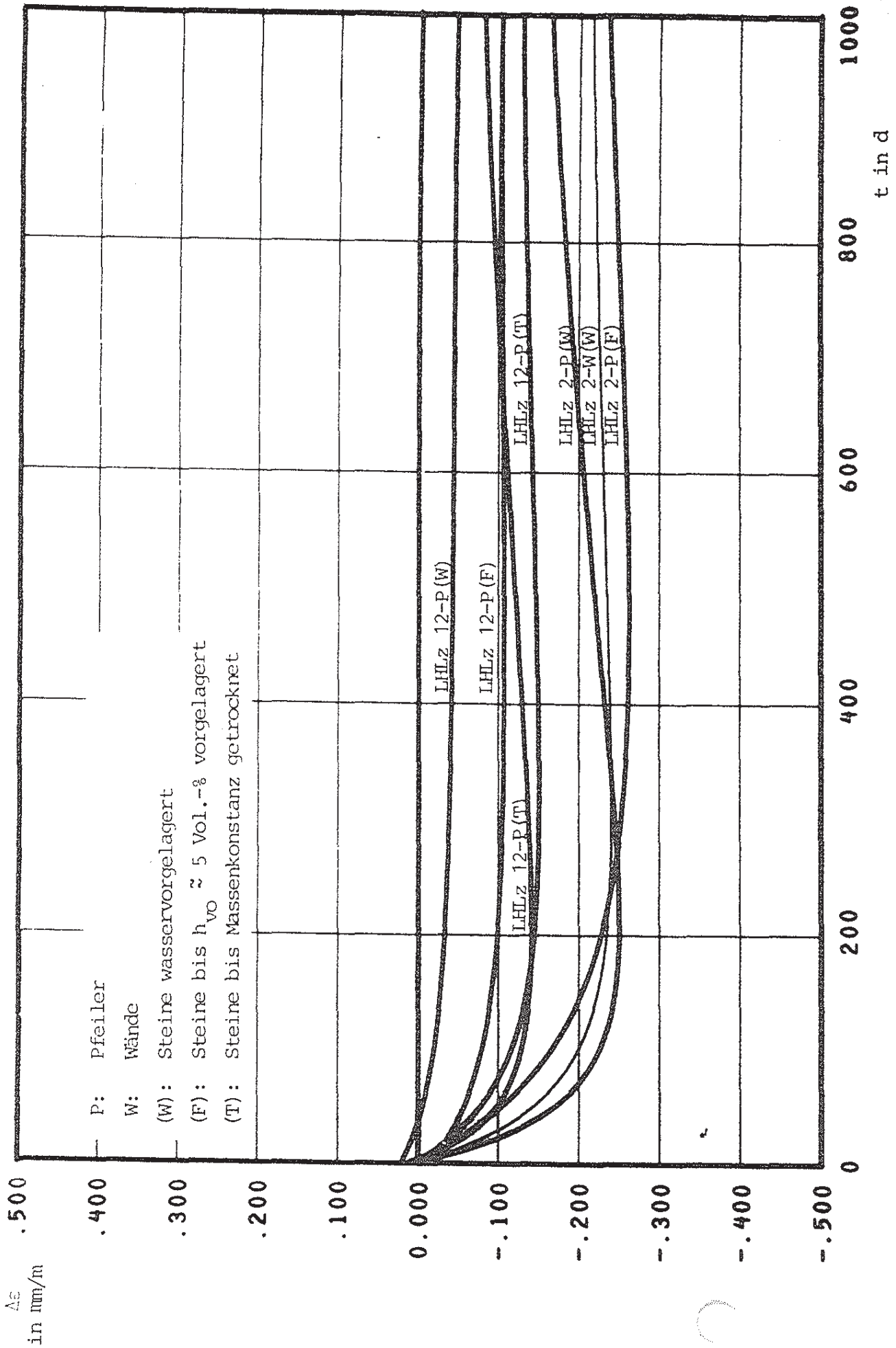
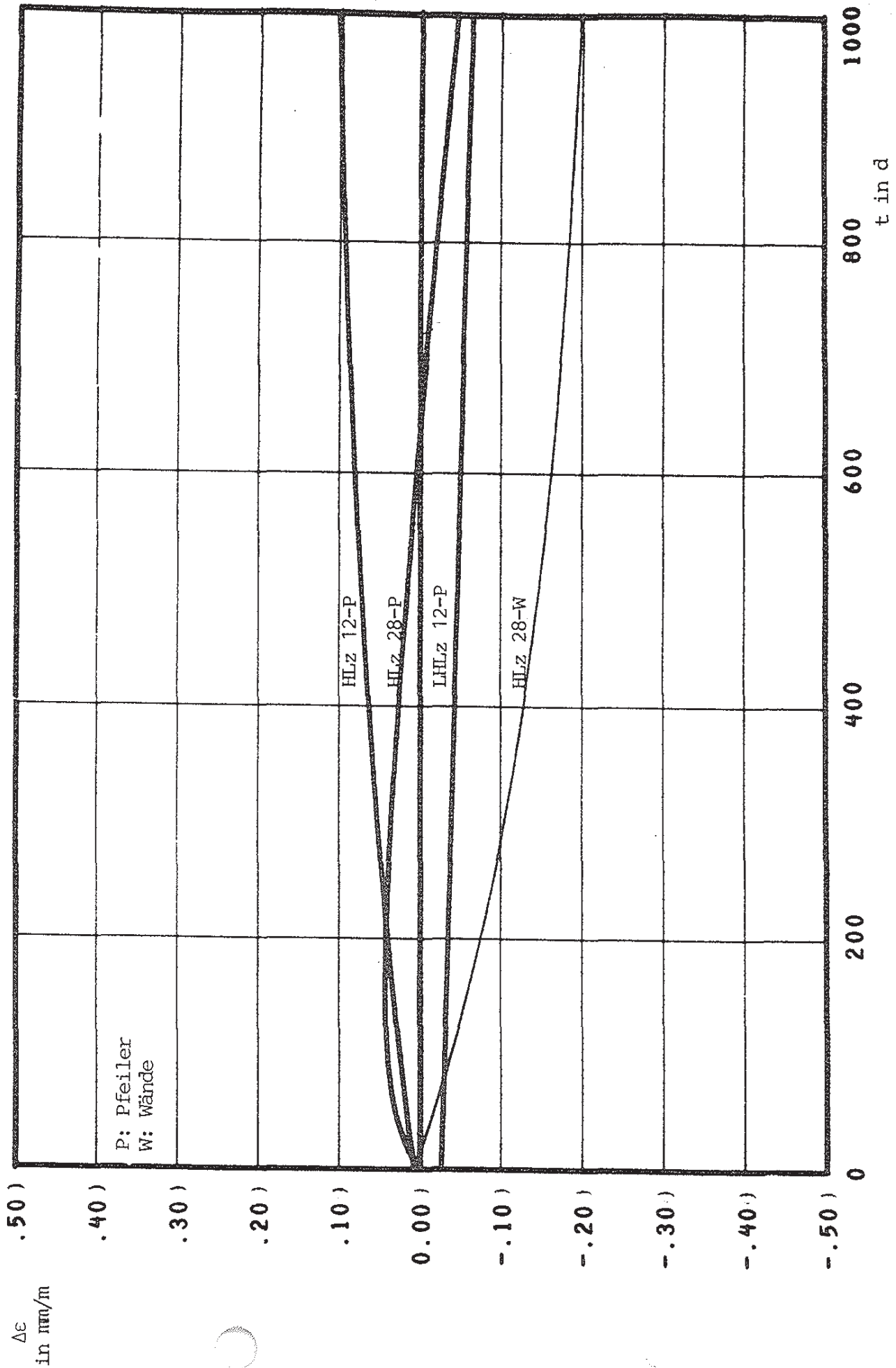


Bild 6.49 Feuertedeungsunterschied zwischen Steinoberfläche (SH) und Kernbereich Mauerwerk (MW) Leichtziegel; verschieden vorbehandelt, Wände, Pfeiler, Prüfklima 20/65



Fe chtdehnungsunterschied zwischen Steinoberfläche (SH) und Kernbereich Mauerwerk (MV)  
Ma erzielt; wasservorgelagert, Wände, Pfeiler, Prüfklima 20/65

Bild 6.50

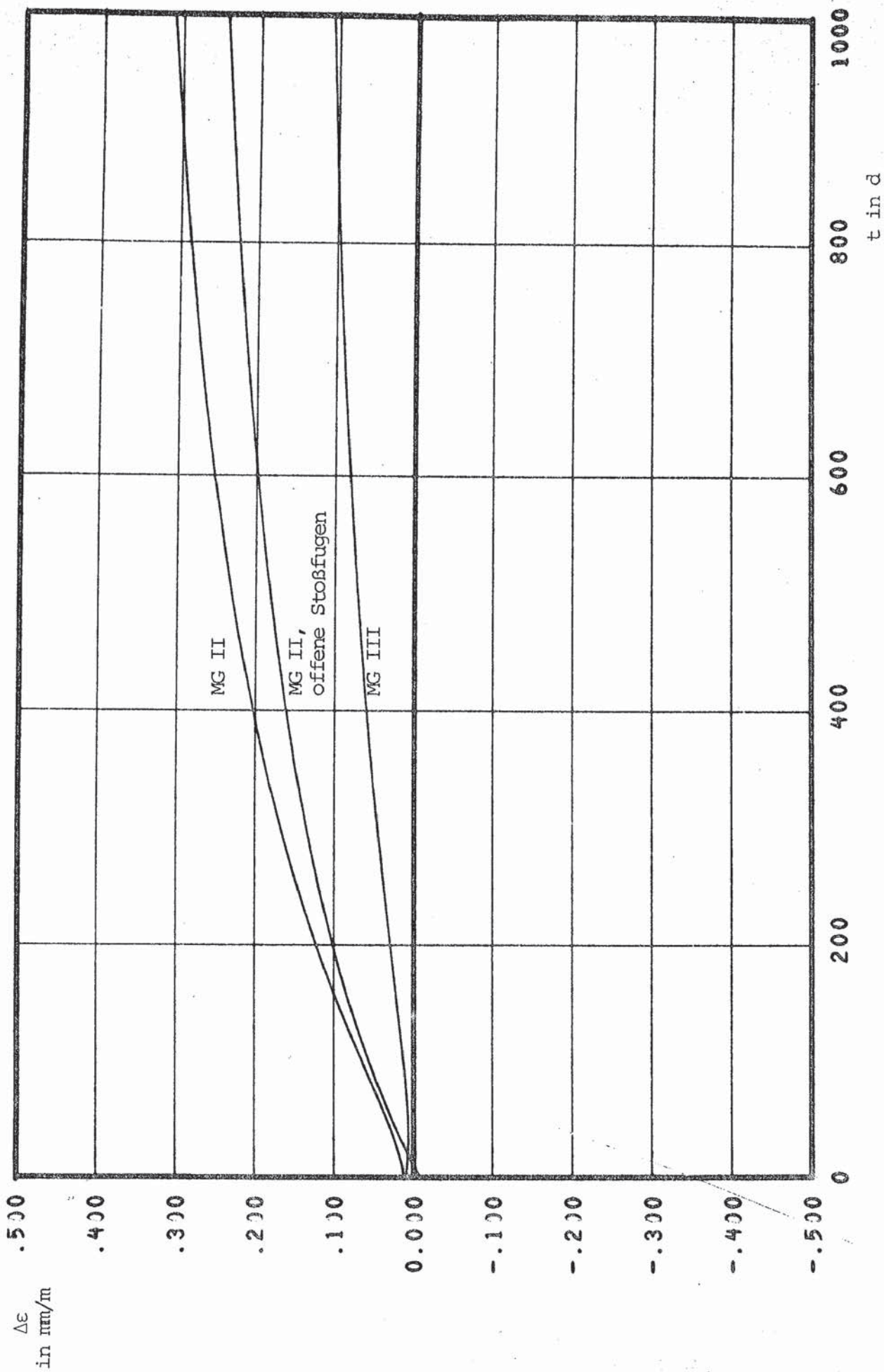
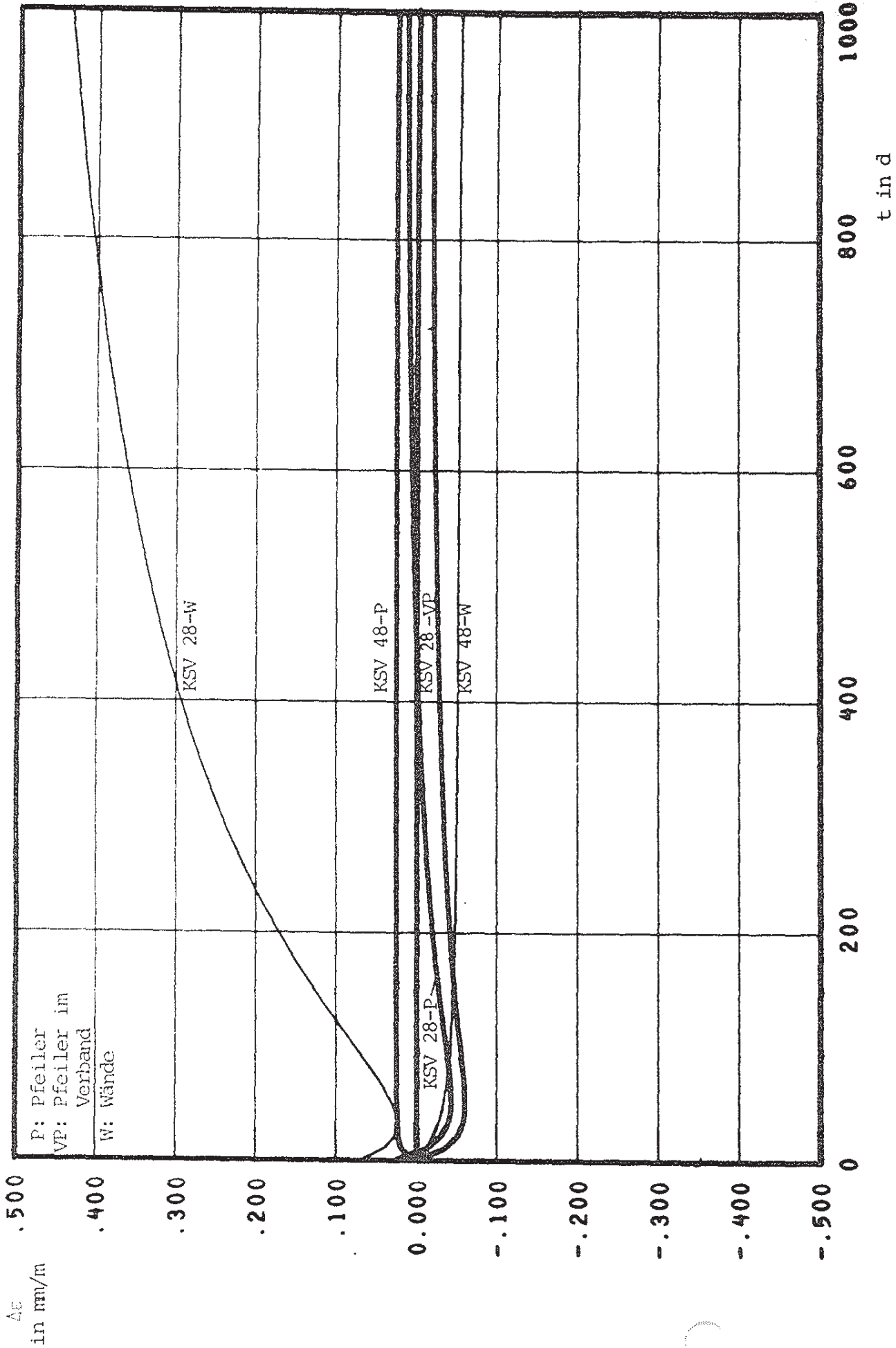
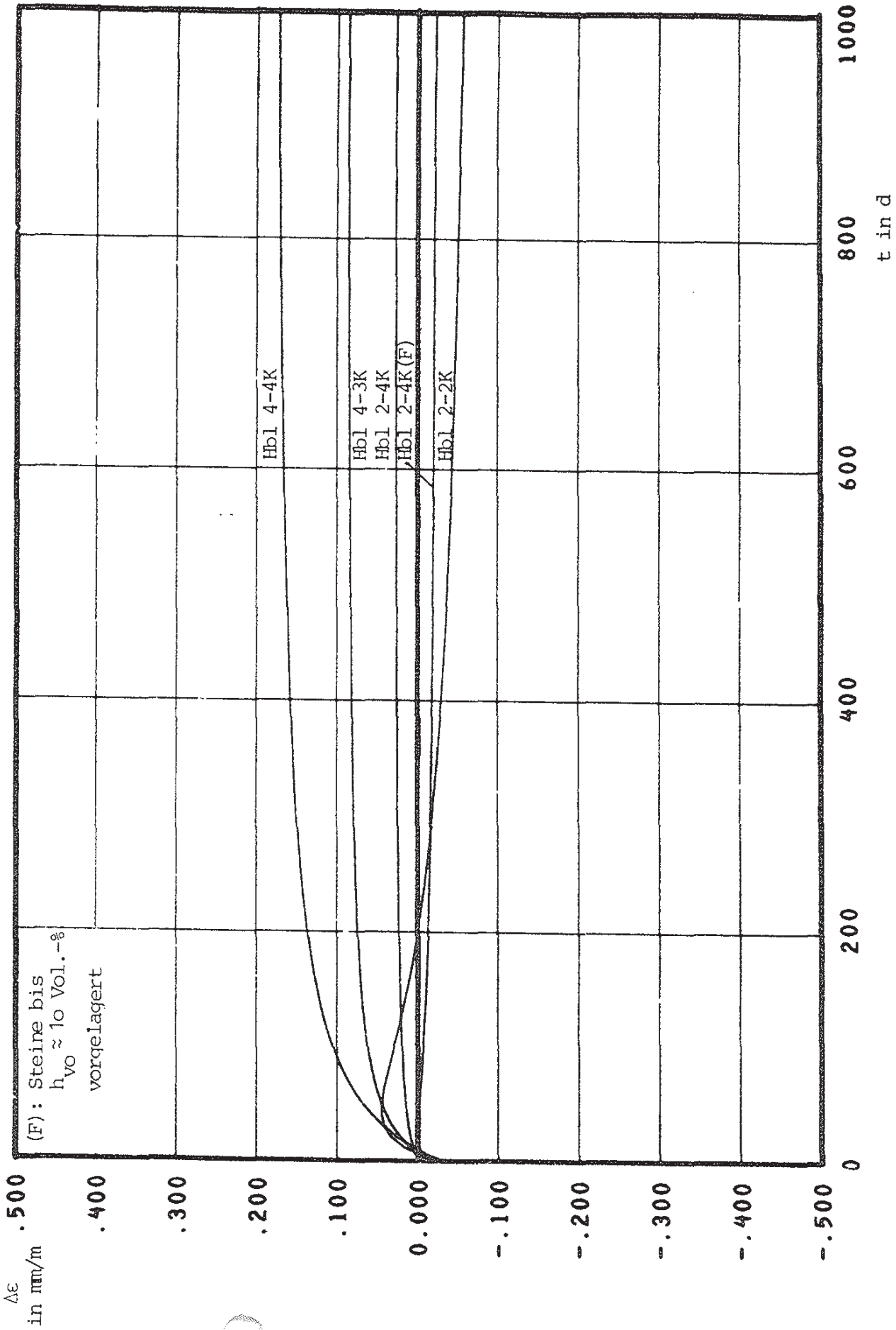


Bild 6.51 Feuchteexpansionsunterschied zwischen Steinoberfläche (SH) und Kernbereich Mauerwerk (MW) Falksandsteine; KSV 12, lufttrocken vermauert, Wände, Prüfklima 20/65



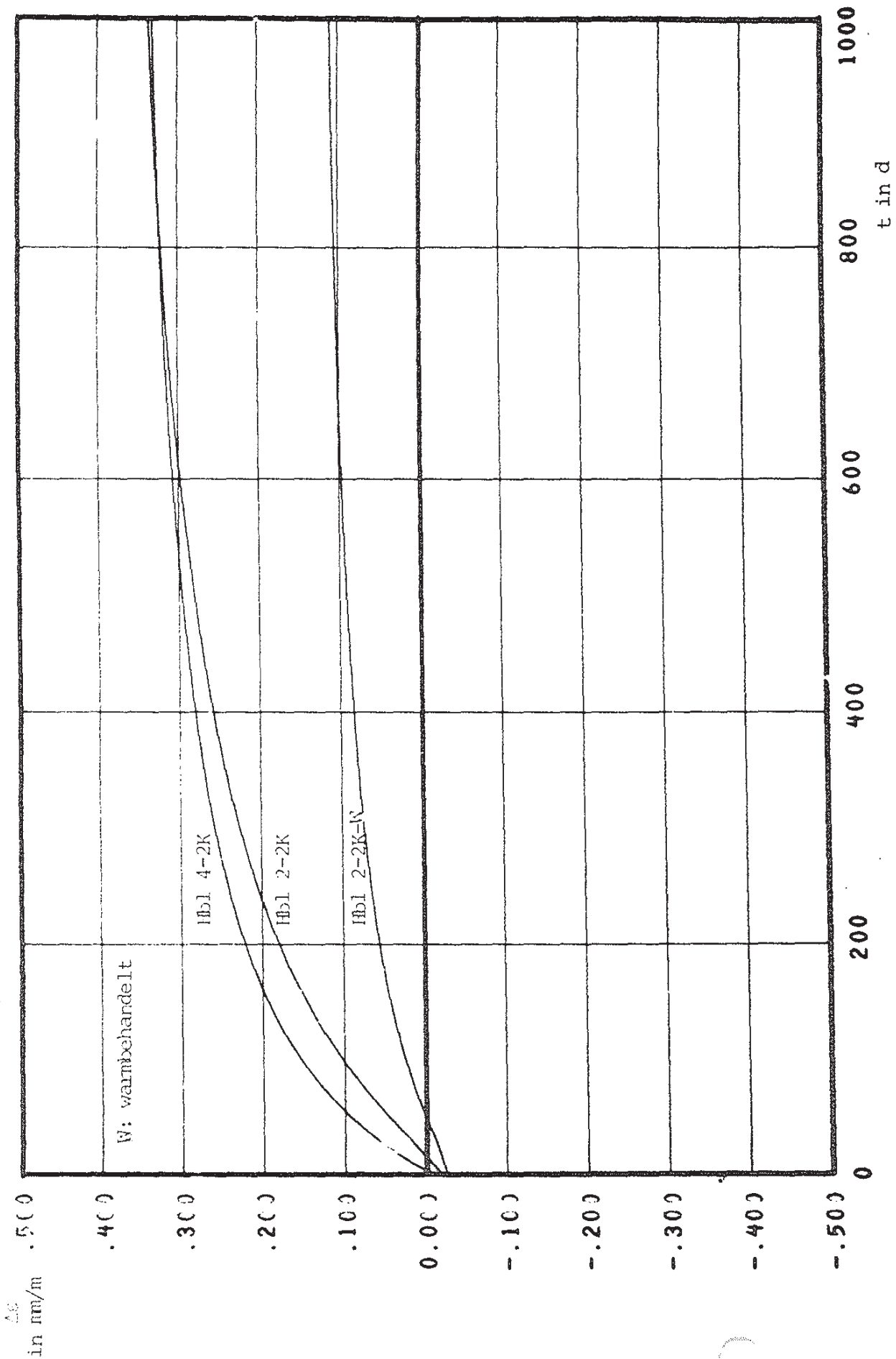
Feuertehungsunterschied zwischen Steinoberfläche (SH) und Kernbereich Mauerwerk (MV)  
Kal. sandsteine; wasservorgelagert, Wände, Pfeiler, Prüfklima 20/65

Bild 6.52



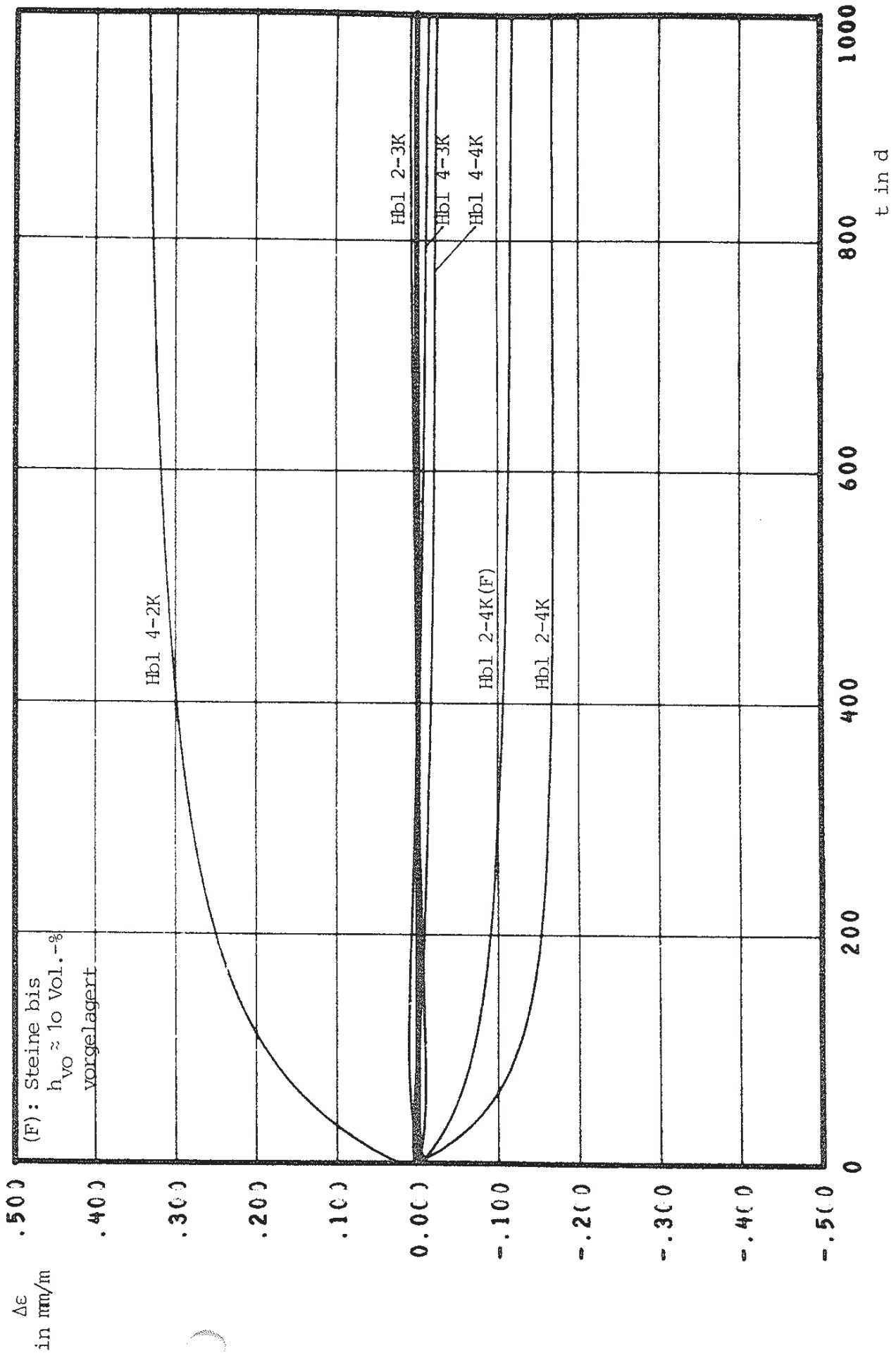
Feuchteunterschied zwischen Steinoberfläche (SH) und Kernbereich Mauerwerk (MV)  
Leichtbetonhohlblocksteine (NB); wasservorgelagert, Pfeiler, Prüfklima 20/65

Bild 6.53



Fuchtedehnungsunterschied zwischen Steinoberfläche (SH) und Kernbereich Mauerwerk (MV)  
Lichtbetonhohlblocksteine (NB); wasservorgelagert, Pfeiler, Prüfklima 20/65

Bild 6.54



Fruchtdehnungsunterschied zwischen Steinoberfläche (SH) und Kernbereich Mauerwerk (MV)  
 Leichtbetonhohlblocksteine (NB); wasservorgelagert, Wände, Prüfklima 20/65

Bild 6.55



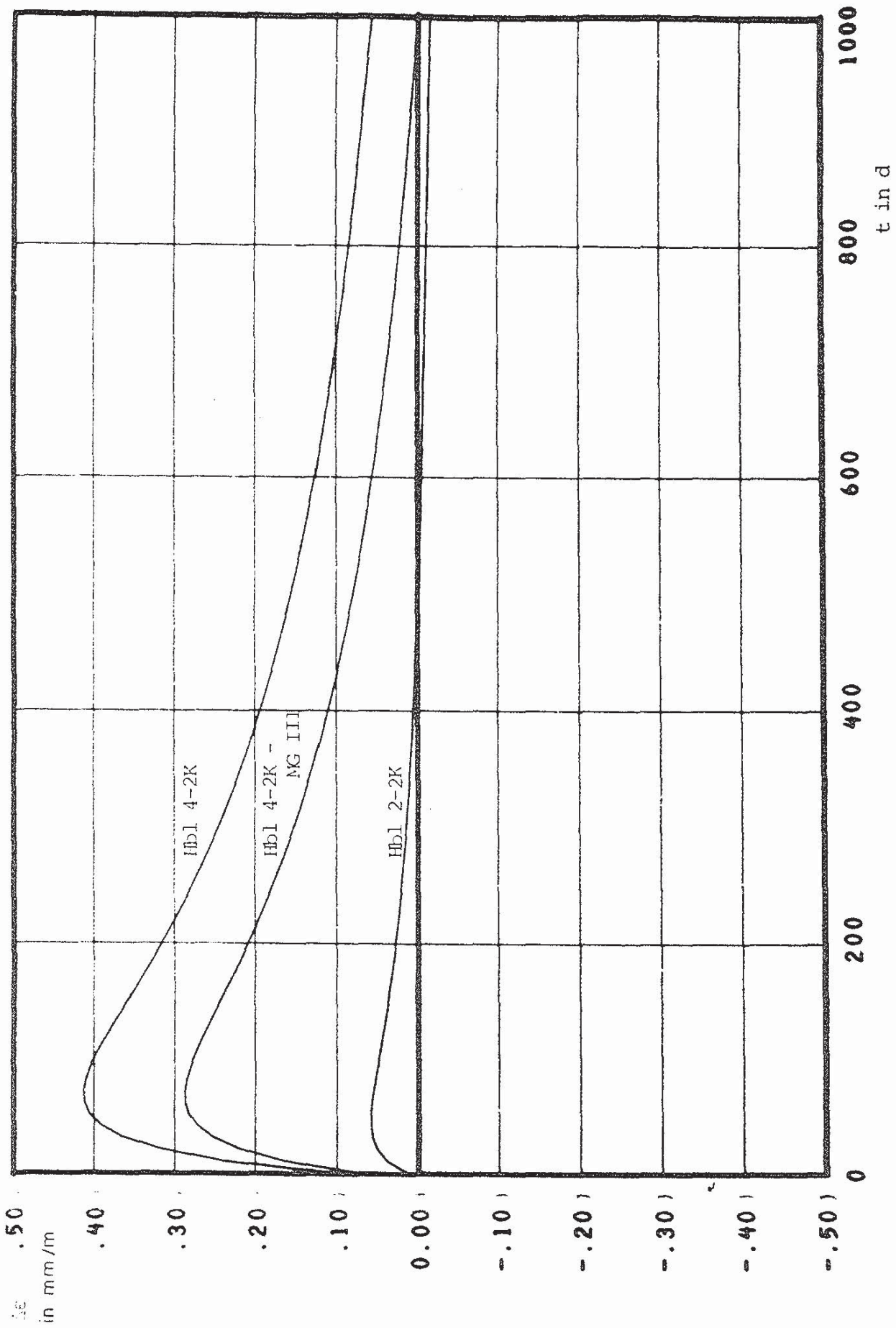


Bild 6.56 Feuchteunterschied zwischen Steinoberfläche (SH) und Kernbereich Mauerwerk (MW) Leichtbetonhohlblocksteine (NB); lufttrocken vermauert, Wände, Prüfklima 18/55

Bild 6.56

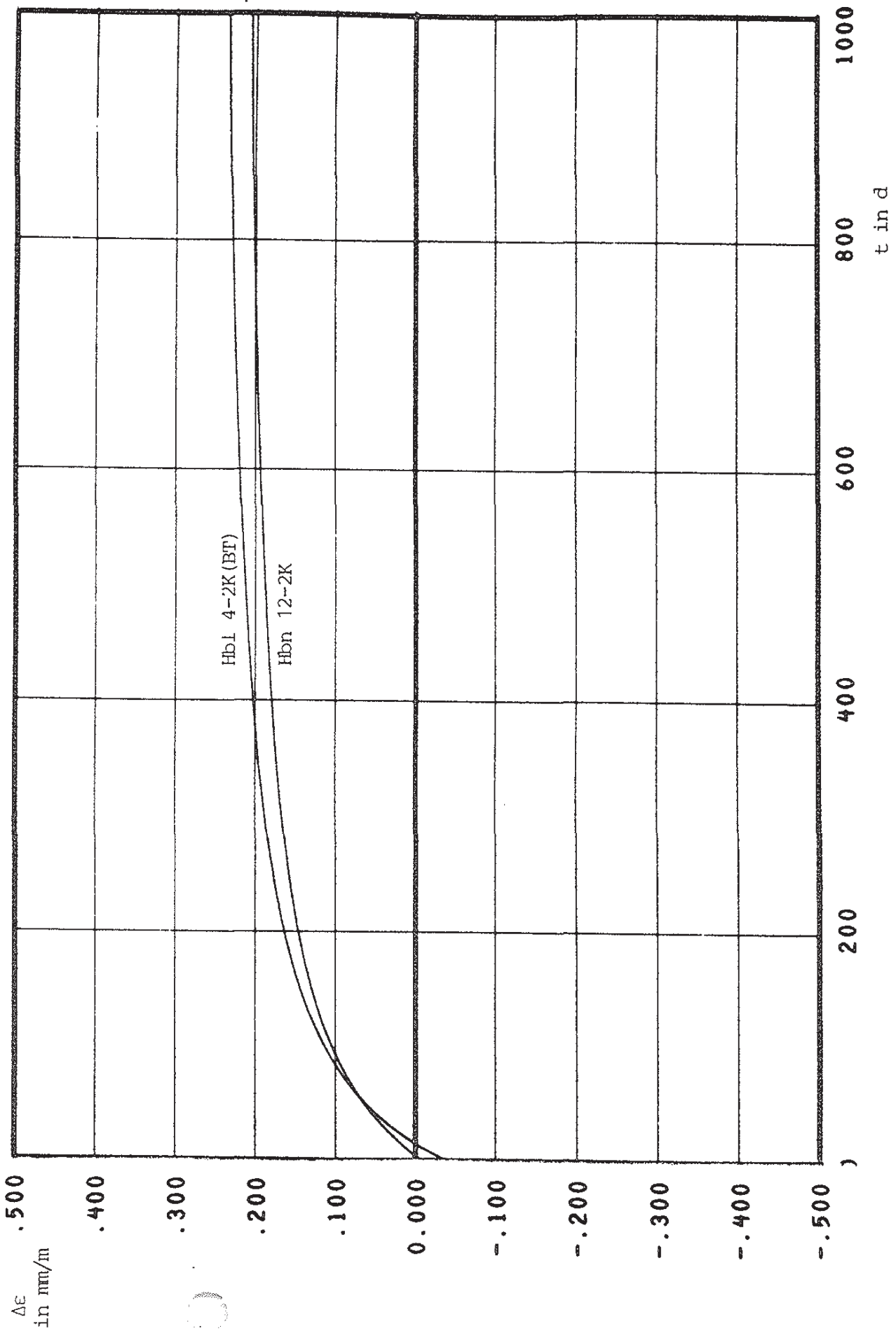


Bild 6.57 Feuchtdehnungsunterschied zwischen Steinoberfläche (SH) und Kernbereich Mauerwerk (MV) Leichtbetonhohlblocksteine (BT) und Betonsteine; wasservorgelagert, Pfeiler, Prüfklima 20/65

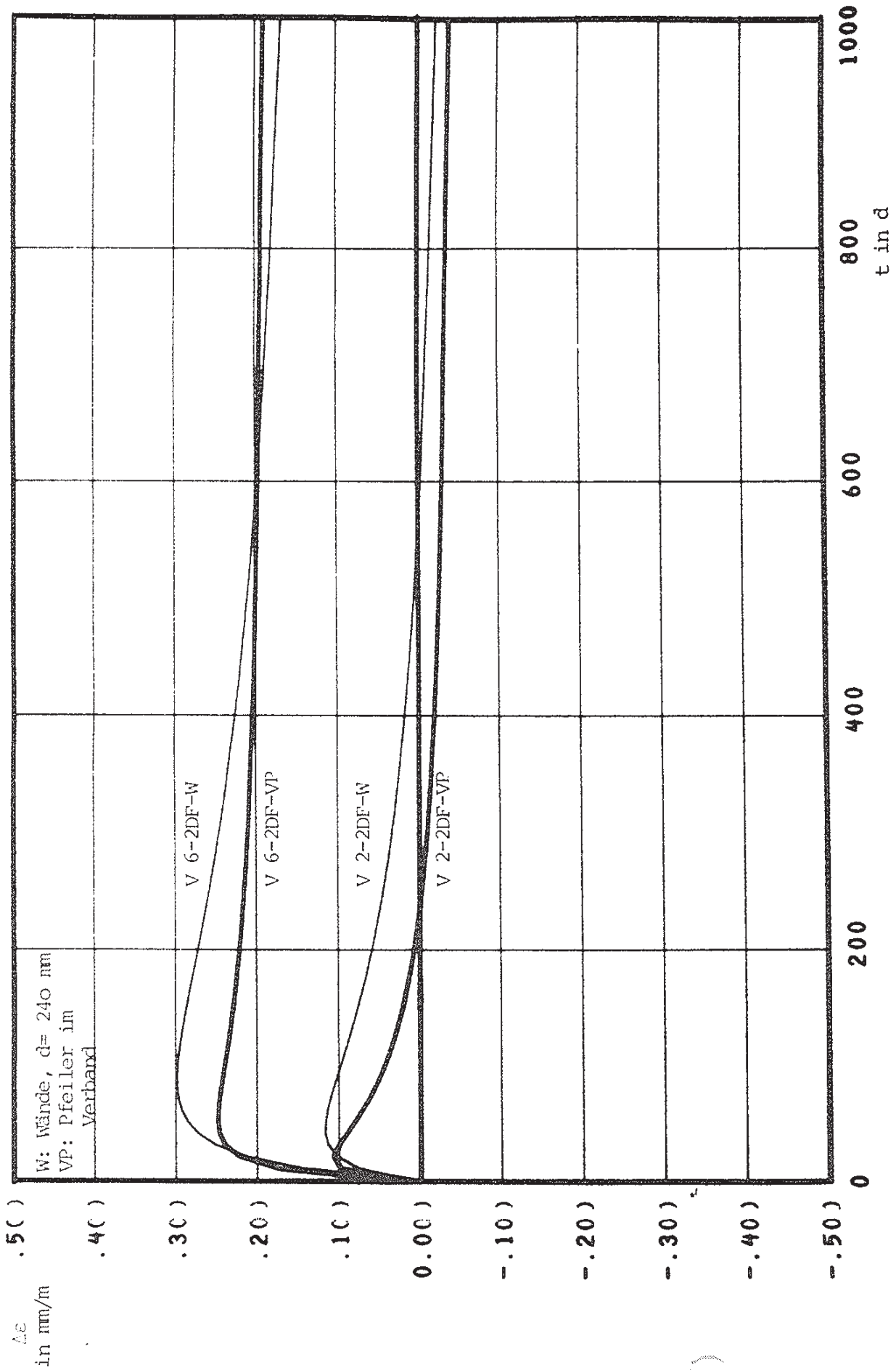


Bild 6.58 F. Uchtedehnungsunterschied zwischen Steinoberfläche (SH) und Kernbereich Mauerwerk (MV)  
I. Lichtbetonvollsteine (NB); 2 DF, wasservorgelagert, Wände, Pfeiler, Prüfklima 20/65

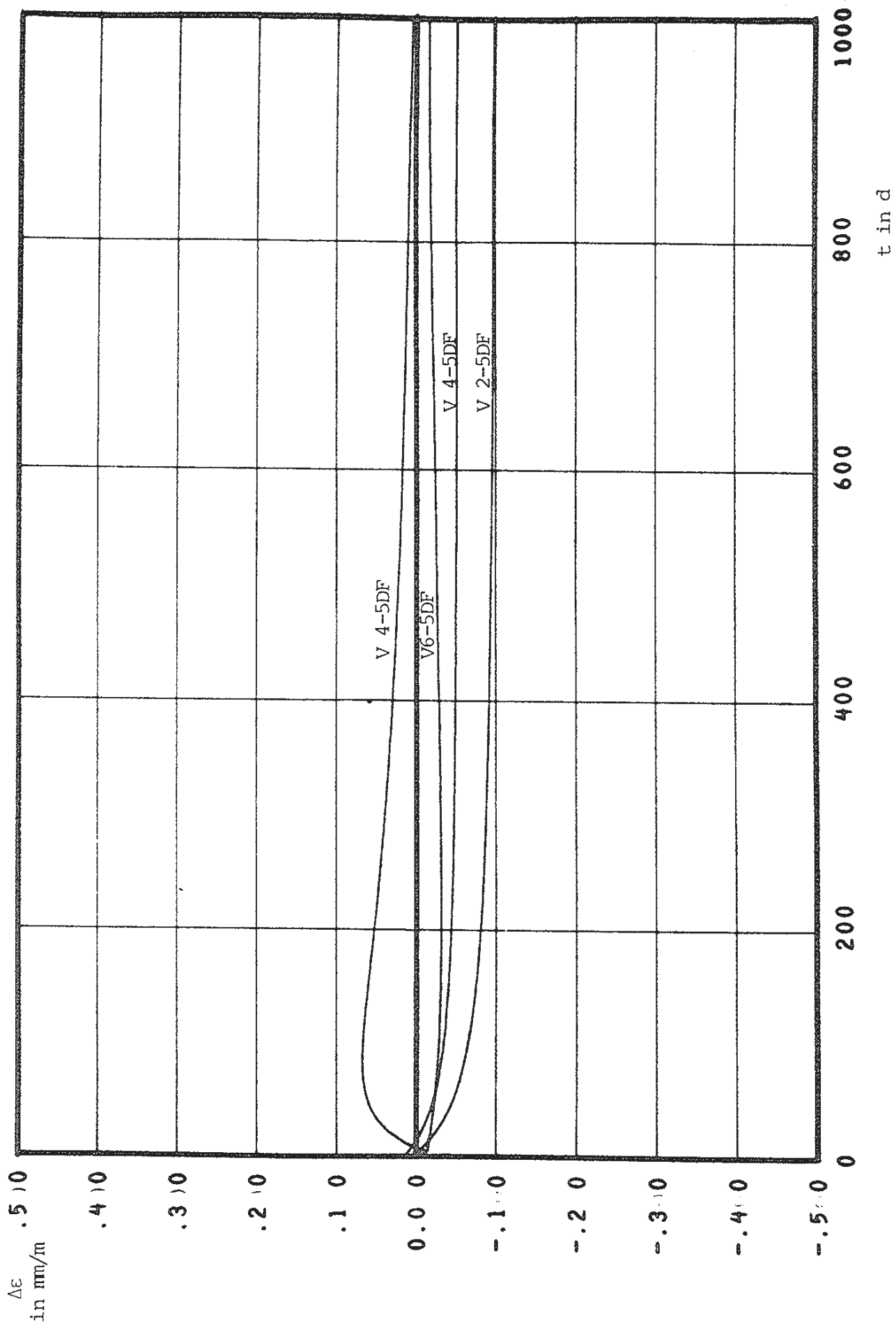
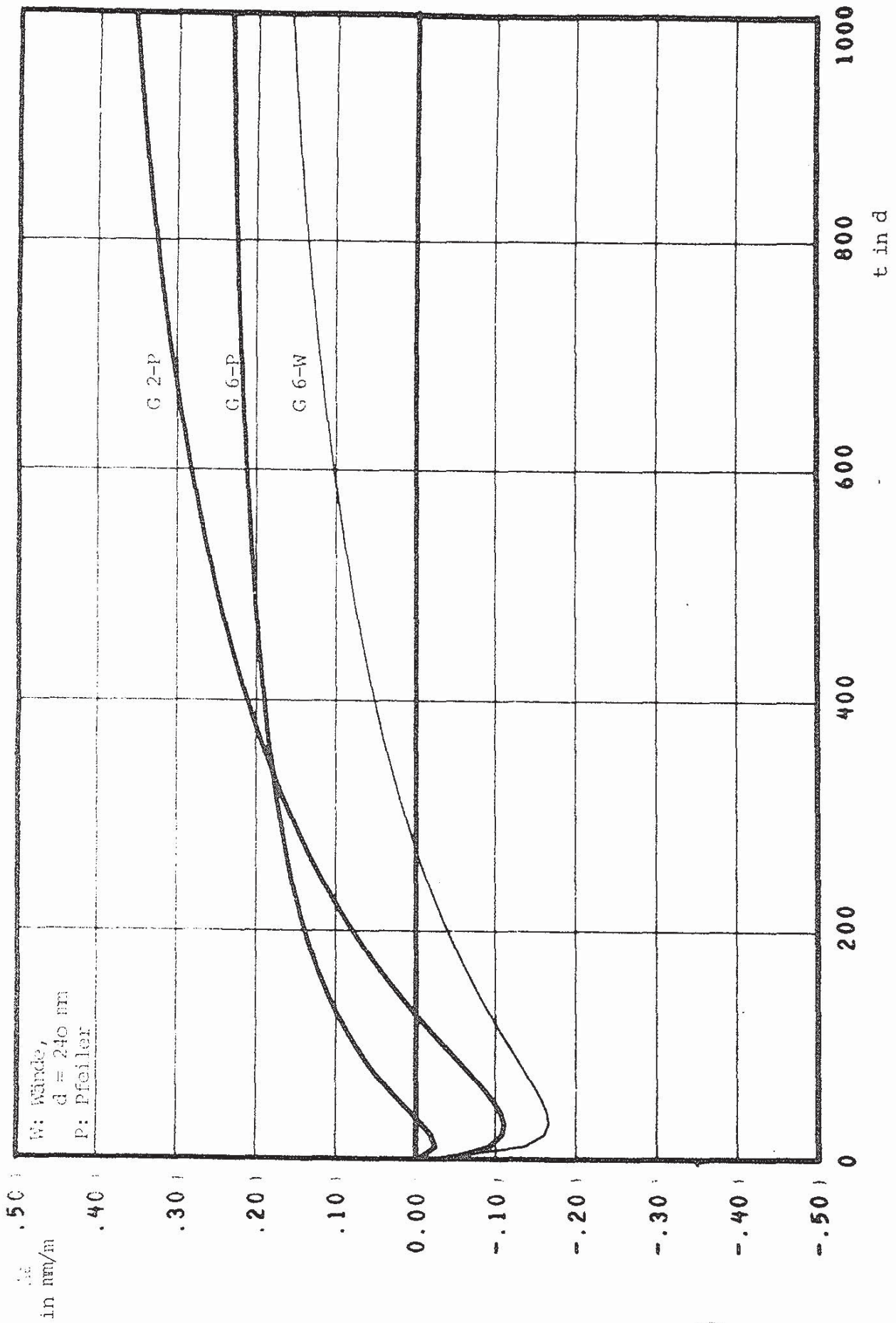


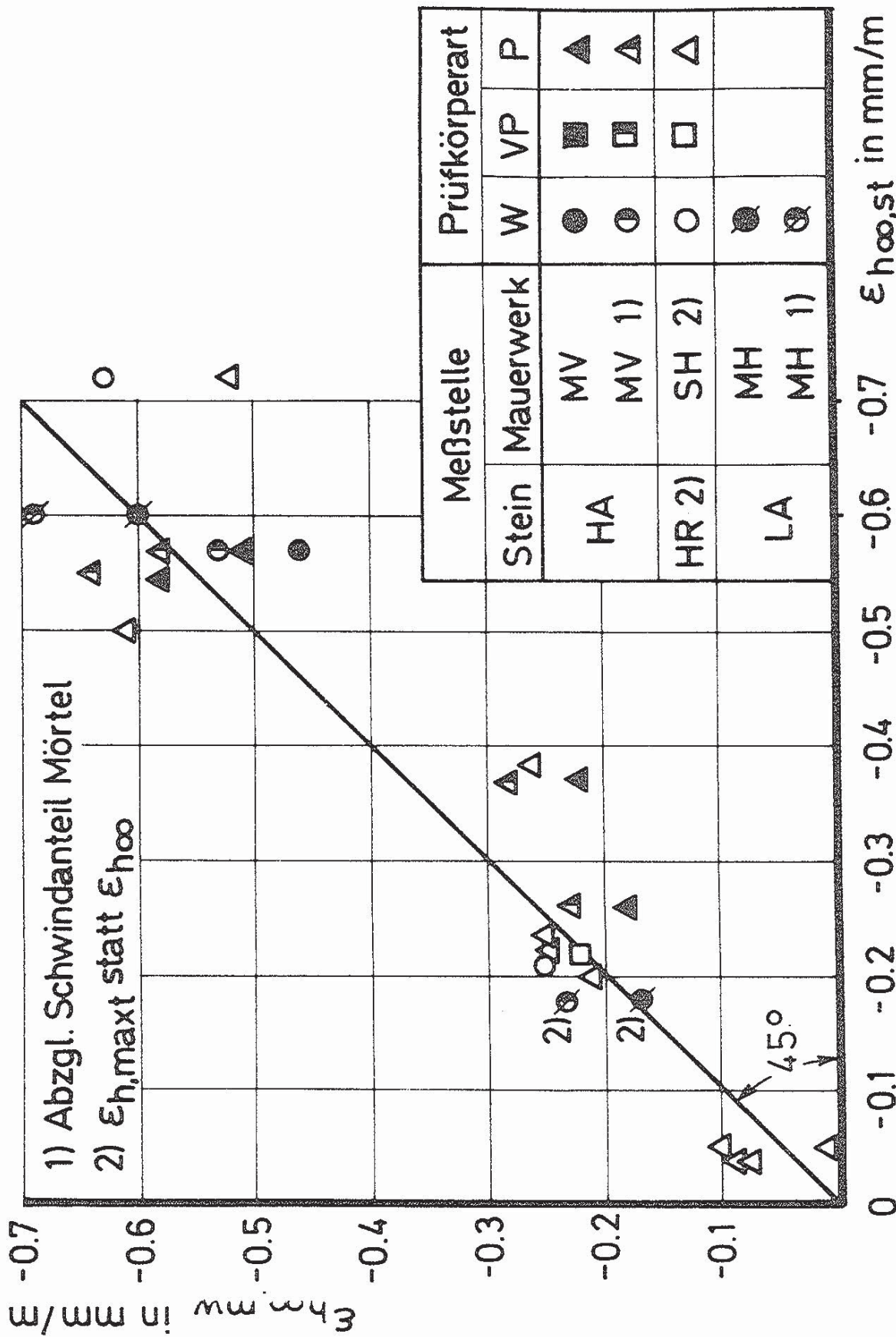
Bild 6.59 Tauchtedehnungsunterschied zwischen Steinoberfläche (SH) und Kernbereich Mauerwerk (MV) Leichtbetonvollsteine (NB); 5 DF, wärbehandelt, wasservorgelagert, Pfeiler, Prüfklima 20/65

Bild 6.59



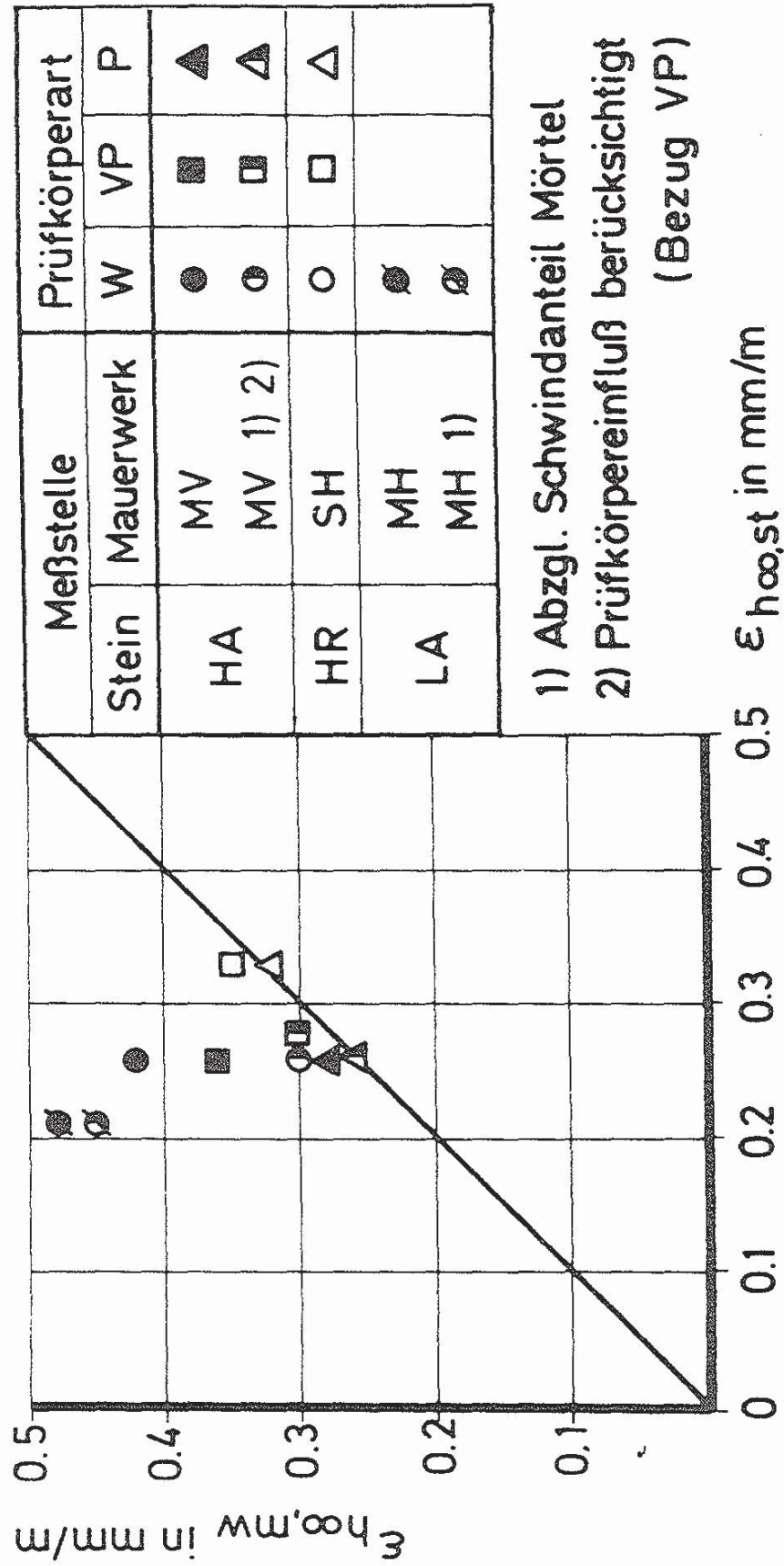
Feuchteunterschied zwischen Steinoberfläche (SH) und Kernbereich Mauerwerk (MV)  
Ga: betonsteine; wasservorgelagert, Wände, Pfeiler, Prüfklima 20/65

Bild 6.60



B ld 6.61: Zusammenhang zwischen der Feuchtedehnung von Einzelsteinen und der des zugehörigen Mauerwerks  
Mauerziegel

(o)



Bil 6.62: Zusammenhang zwischen der Feuchtedehnung von Einzelsteinen und der des zugehörigen Mauerwerks  
Kalksandsteine

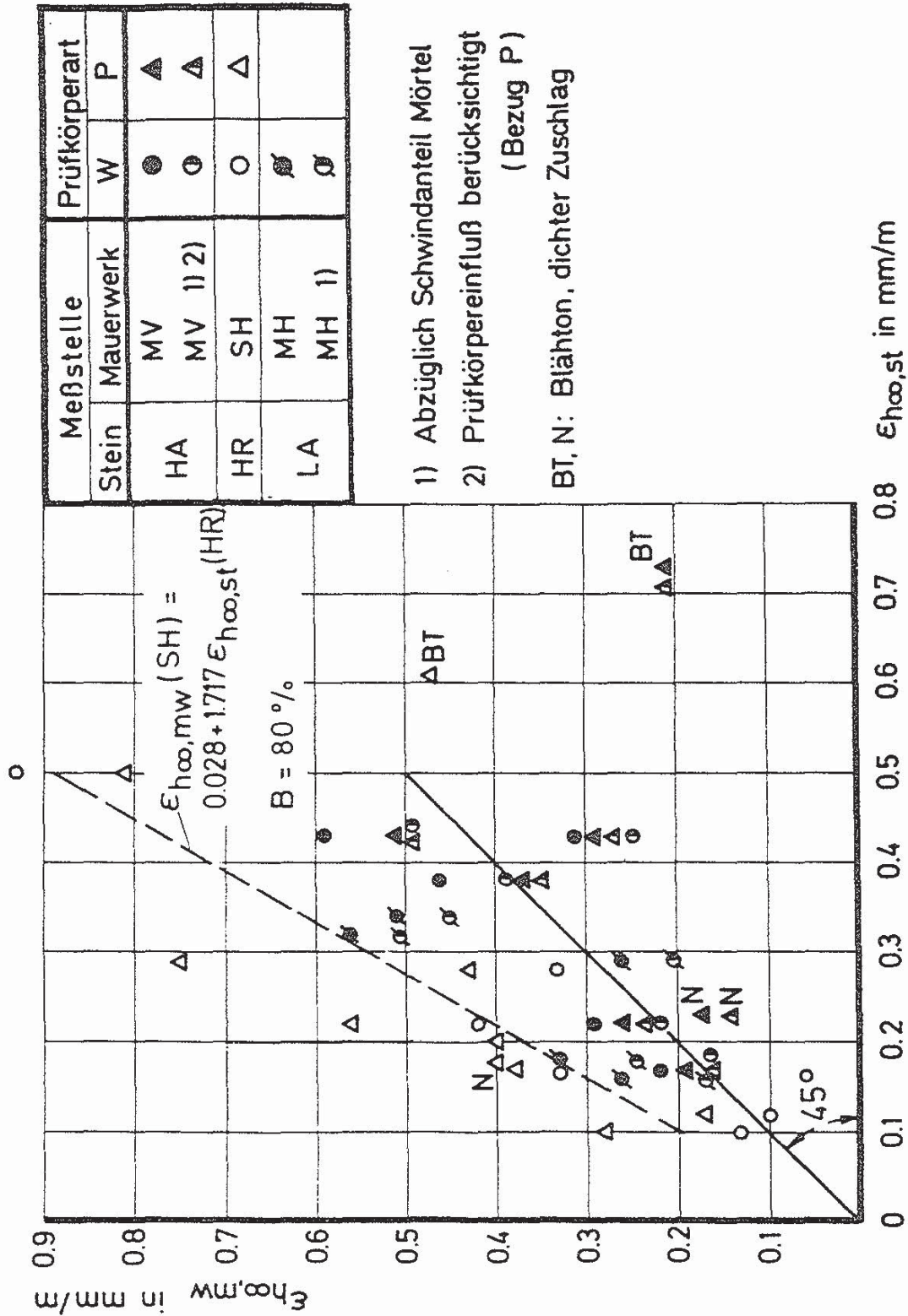


Bild 6.63: Zusammenhang zwischen der Feuchtedehnung von Einzelsteinen und der des zugehörigen Mauerwerks  
 Leichtbetonhohlblocksteine aus Naturblähton und Blähton (BT) und Betonsteine (N)



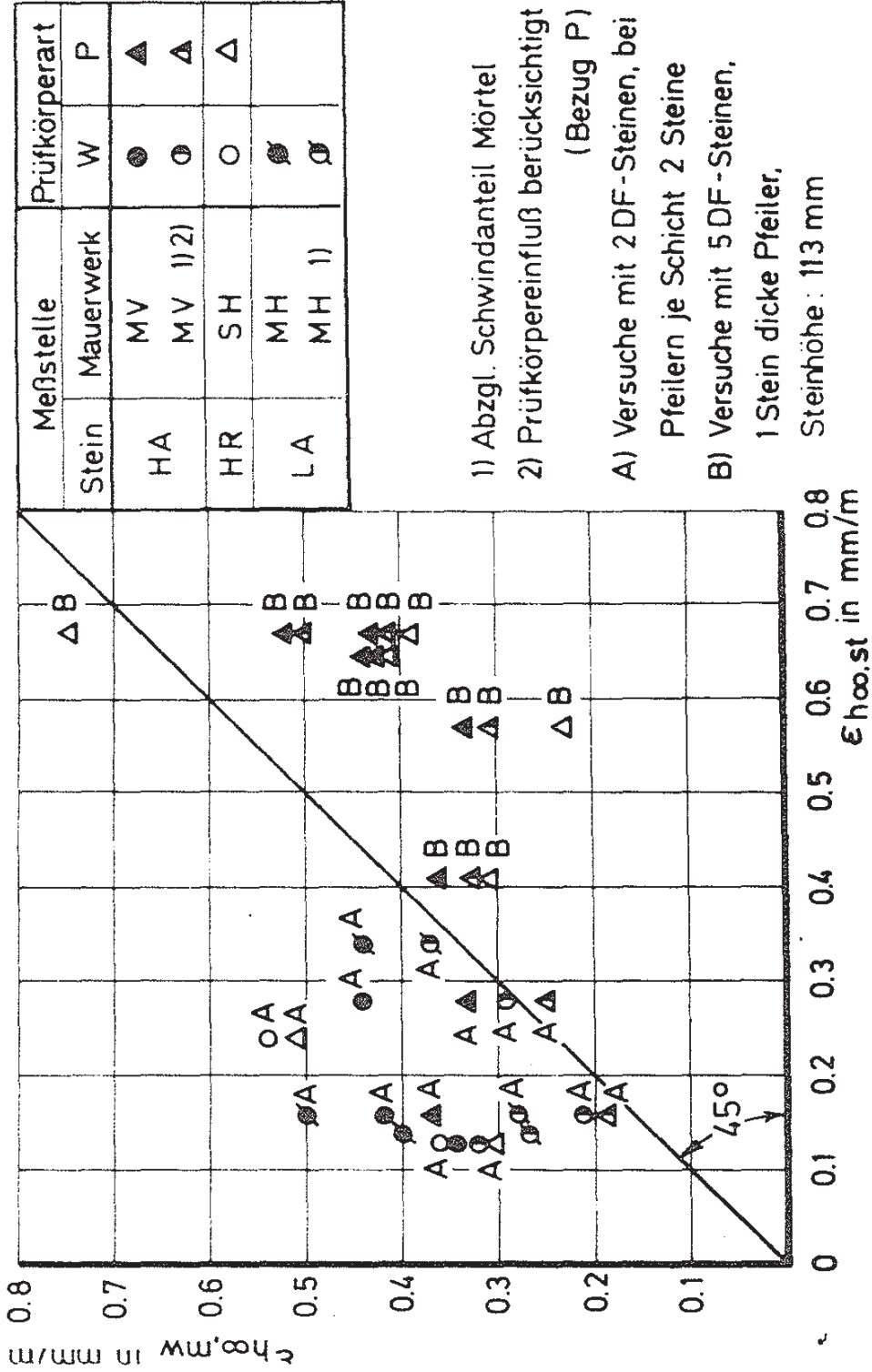
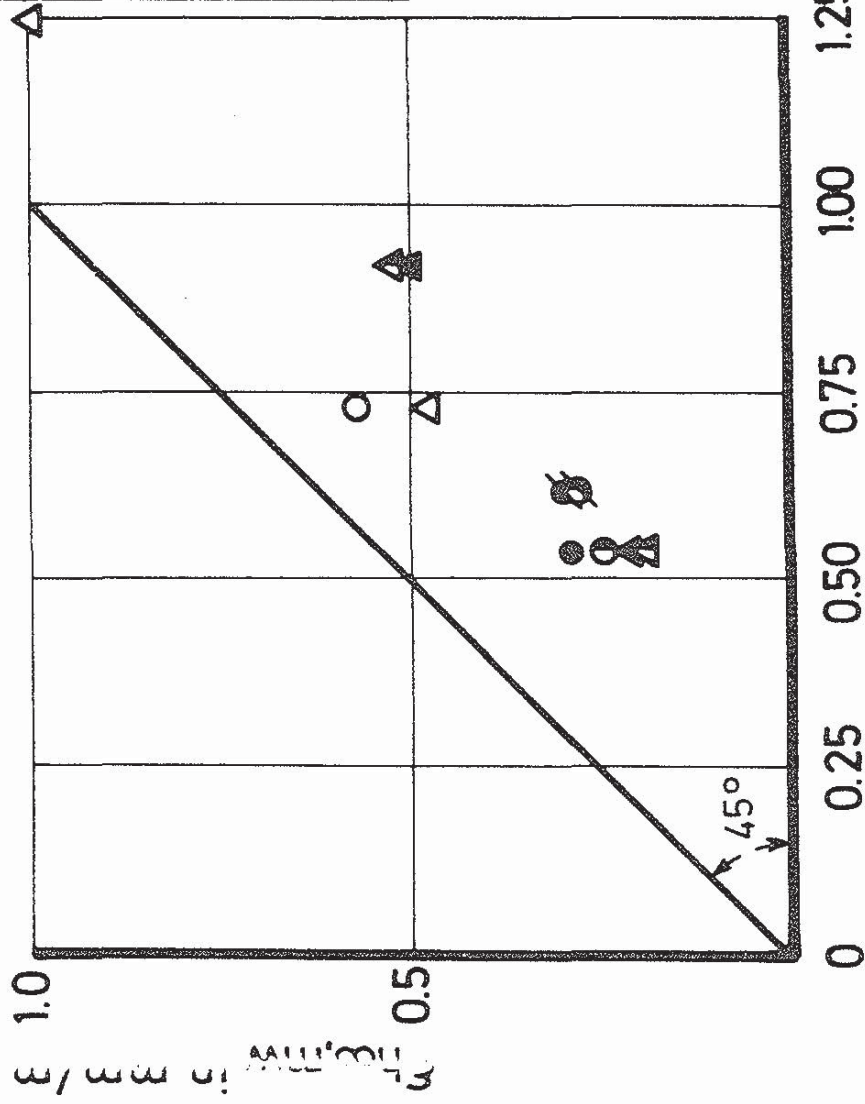


Bild 6.64: Zusammenhang zwischen der Feuchtedehnung von Einzelsteinen und der des zugehörigen Mauerwerks Leichtbetonvollsteine (NB)



Meßstelle		Prüfkörperart	
Stein	Mauerwerk	W	P
HA	MV	●	▲
	MV 1) 2)	○	△
HR	SH	○	△
LA	MH	○	△
	MH 1)	○	△

1) Abzüglich Schwindanteil Mörtel

2) Prüfkörpergröße berücksichtigt (Bezug P)

B ld 6.65: Zusammenhang zwischen der Feuchtedehnung von Einzelsteinen und der des zugehörigen Mauerwerks  
Gasbetonsteine

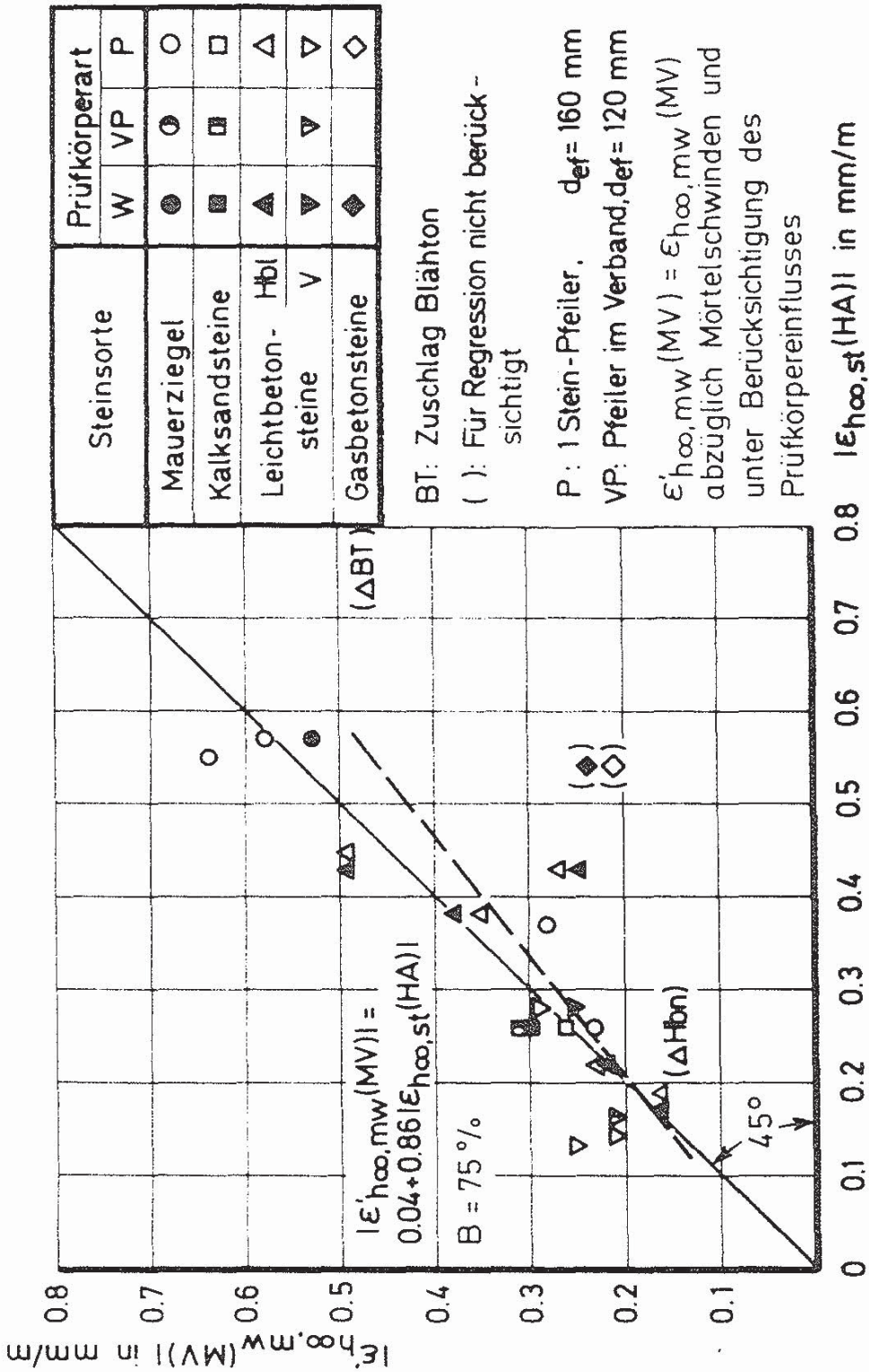


Bild 6.66: Endwert der Feuchte dehnung von Mauerwerk in vertikaler Richtung abzüglich Mörtelschwindanteil und bezogen auf Prüfkörperart VP (2 DF-Steine) bzw. P (Blocksteine) in Abhängigkeit vom Endwert der Einzelsteine (Messstelle II<sub>A</sub>)

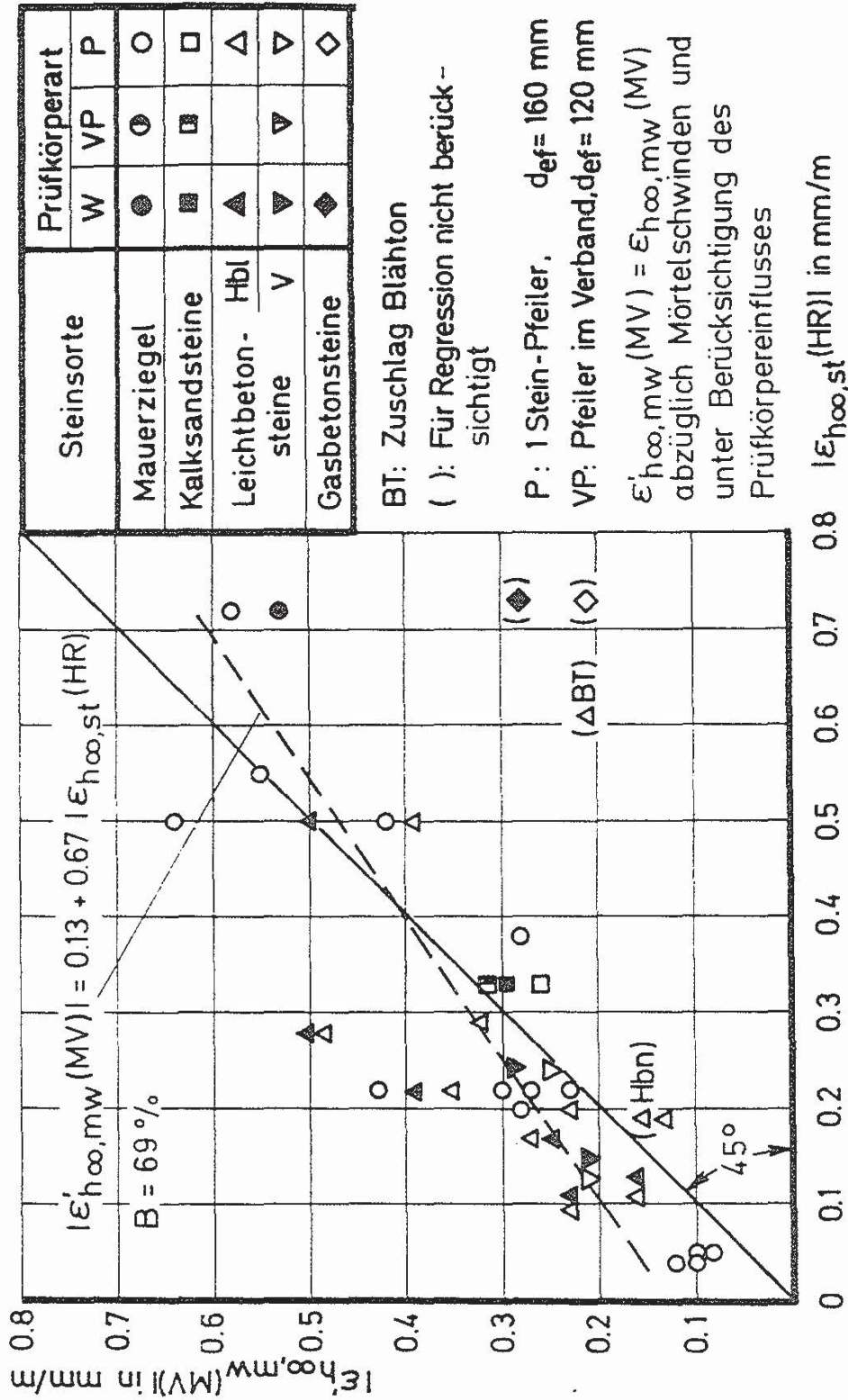


Bild 6.67: Endwert der Feuchtedehnung von Mauerwerk in vertikaler Richtung abzüglich Mörtelschwindanteil und bezogen auf Prüfkörperart VP (2 DF-Steine) bzw. P (Blocksteine) in Abhängigkeit vom Endwert der Einzelsteine (Meßstelle HR)

W : warmbehandelt  
 BT : Blähtonzuschlag

Stein- sorte	Meßstelle	
	HR-MV	HA-MV
Hbl	□	■
V	○	●

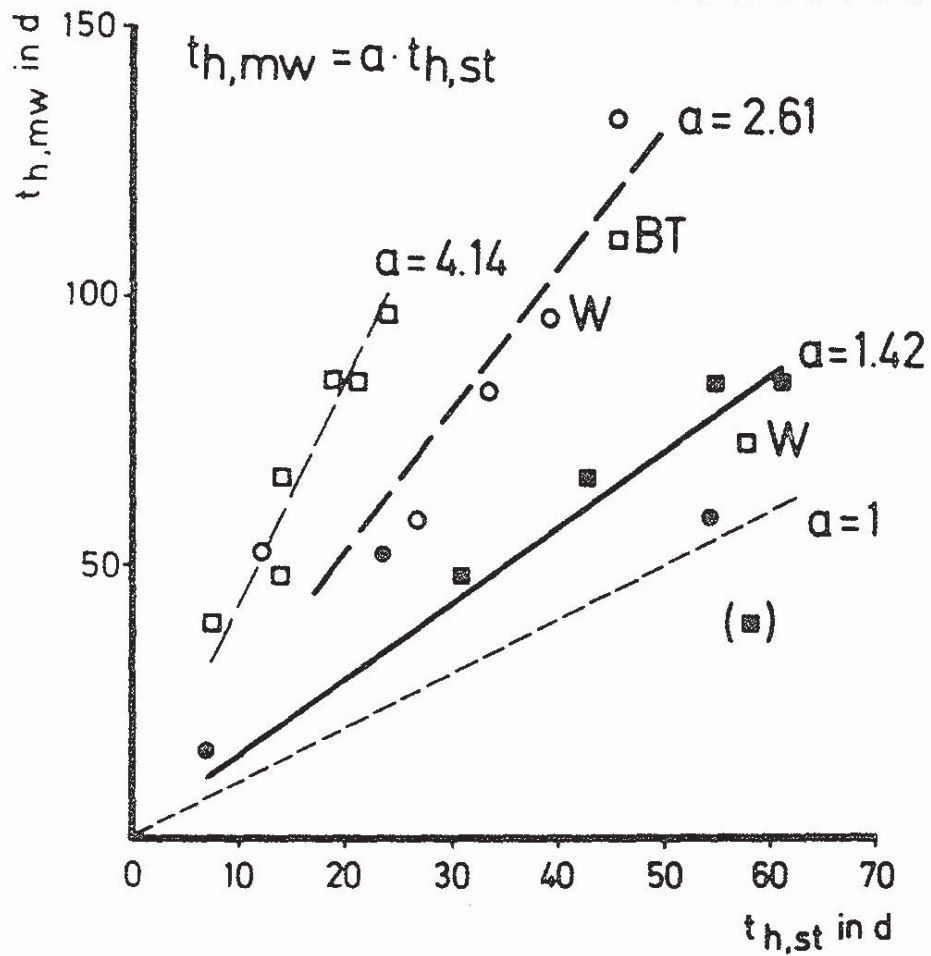


Bild 6.68: Zusammenhang zwischen den Halbwertzeiten von Einzelsteinen und Mauerwerk  
 Leichtbetonsteine, Pfeiler

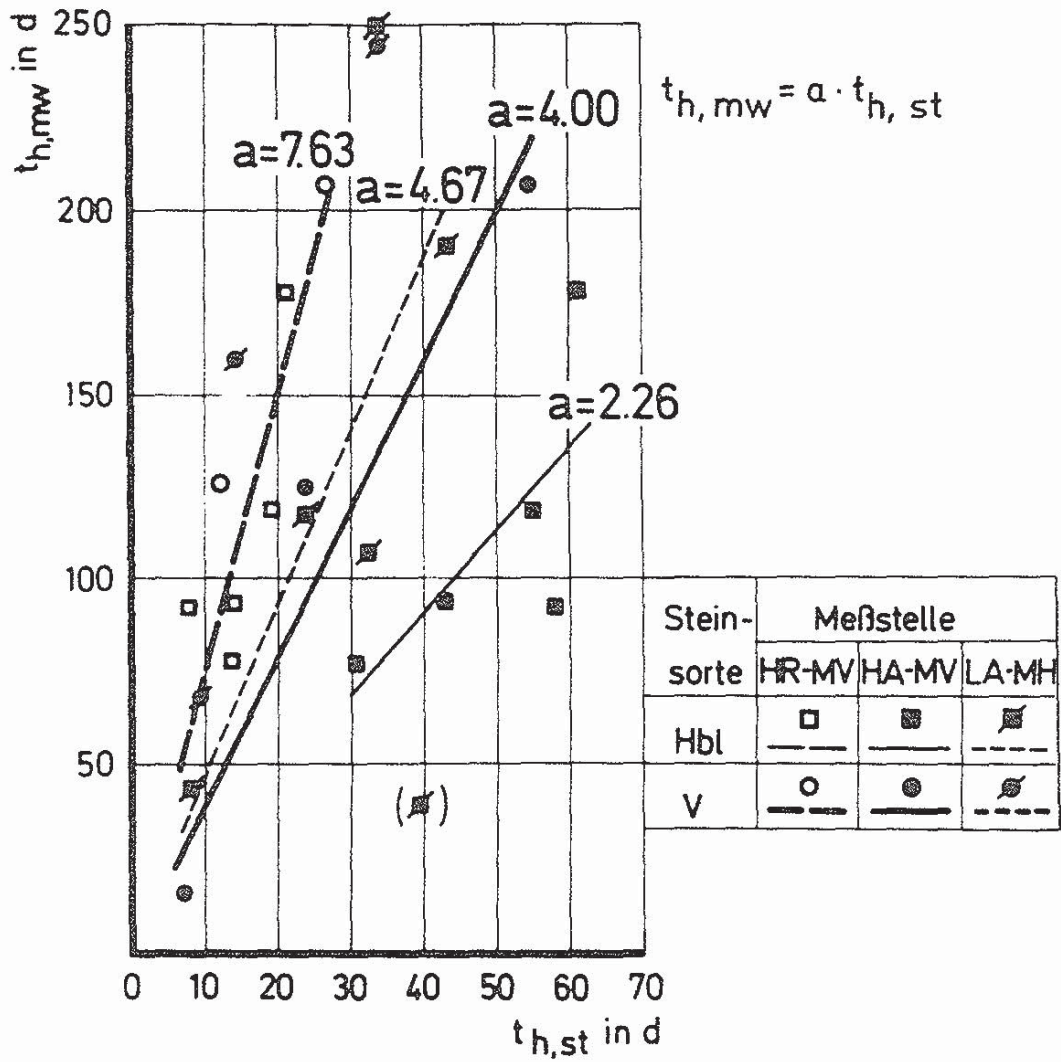
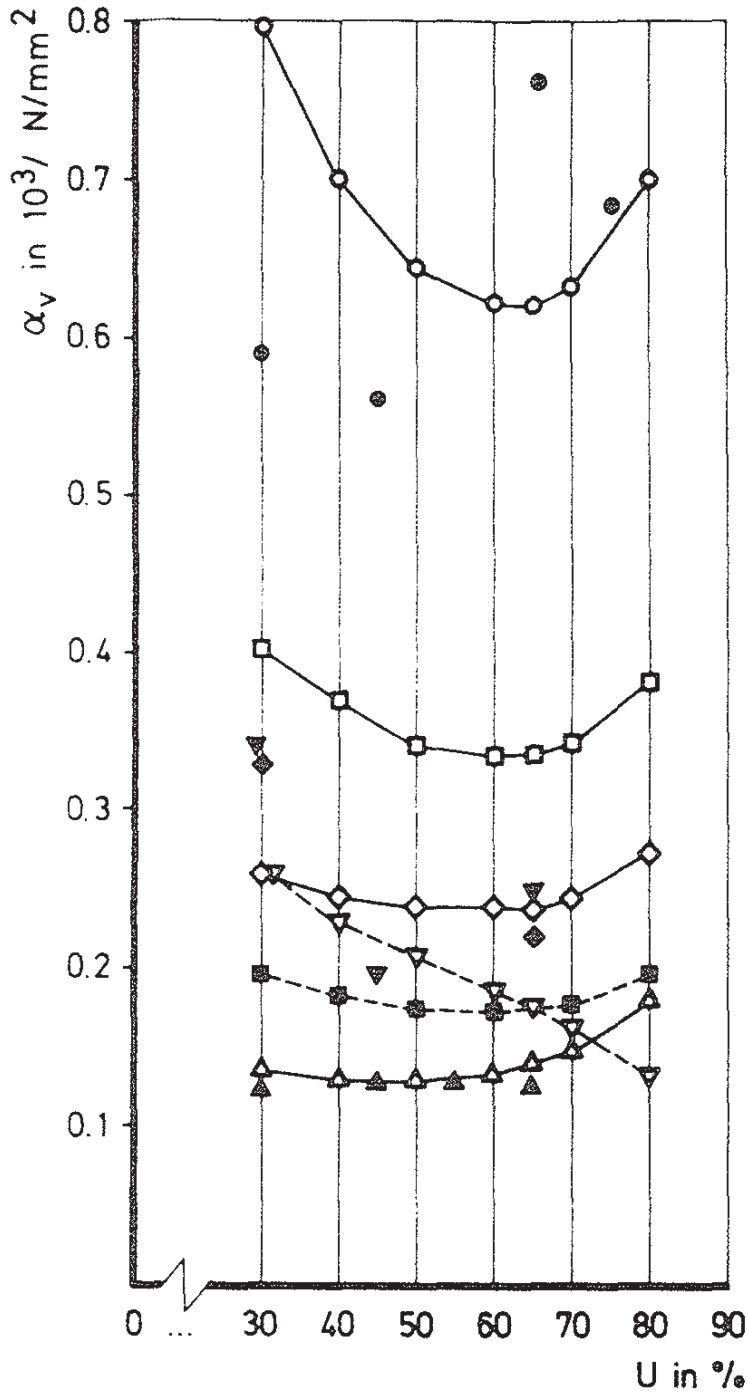


Bild 6.69: Zusammenhang zwischen den Halbwertzeiten von Einzelsteinen und Mauerwerk  
Leichtbetonsteine, Wände

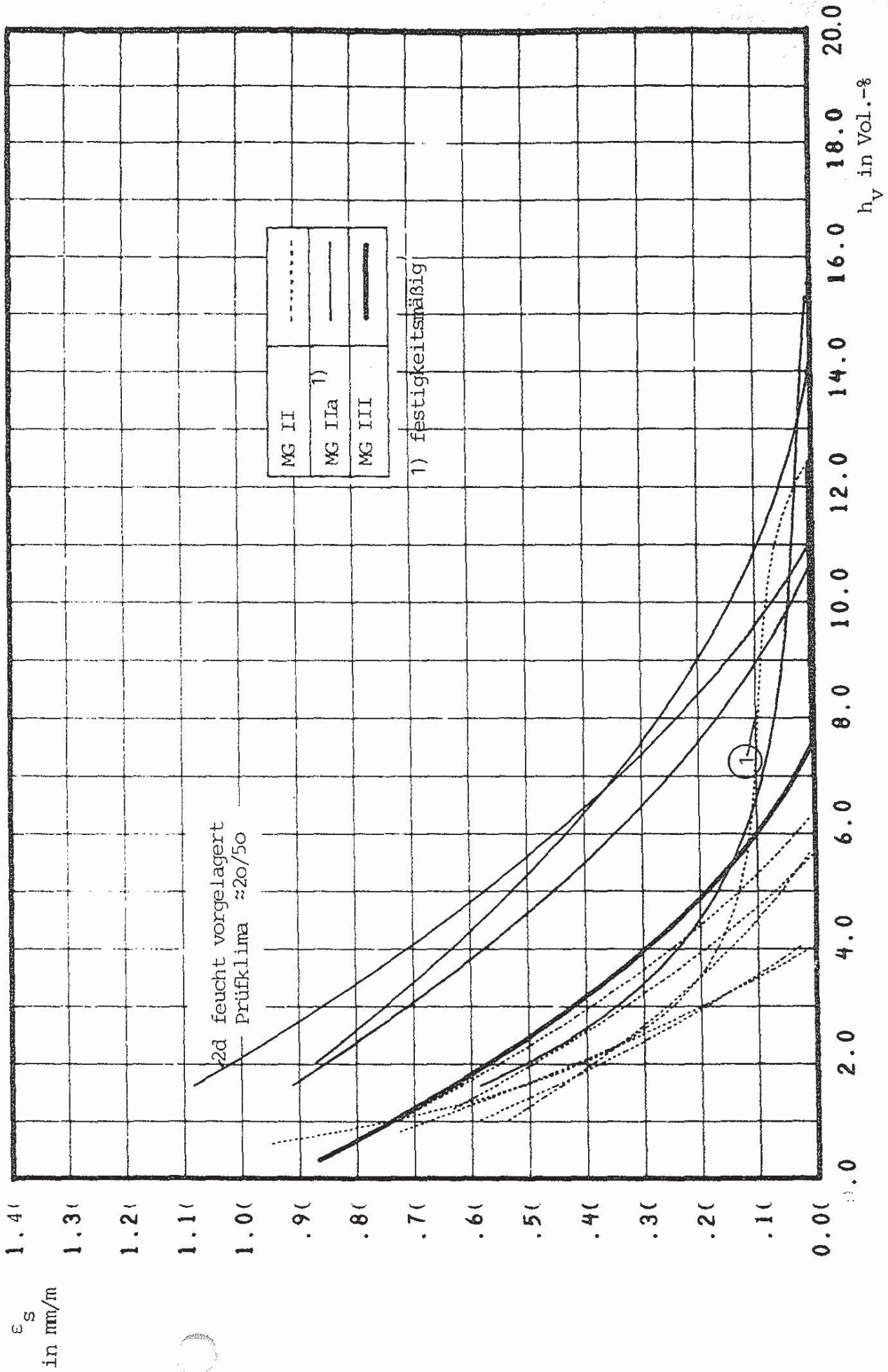


STEIN- MÖRTELSORTE	SYMBOL	
	(1)	(2)
Kalk-Zement-Mörtel	○	●
Zementmörtel	□	
Kalksandsteine	△	▲
Leichtbeton (NB)	◇	◆
Steine (BT)	■	
Gasbetonsteine	▽	▼

(1): aus  $\epsilon_{300} = a + b \cdot U$

(2): aus Einzelauswertung  
für U

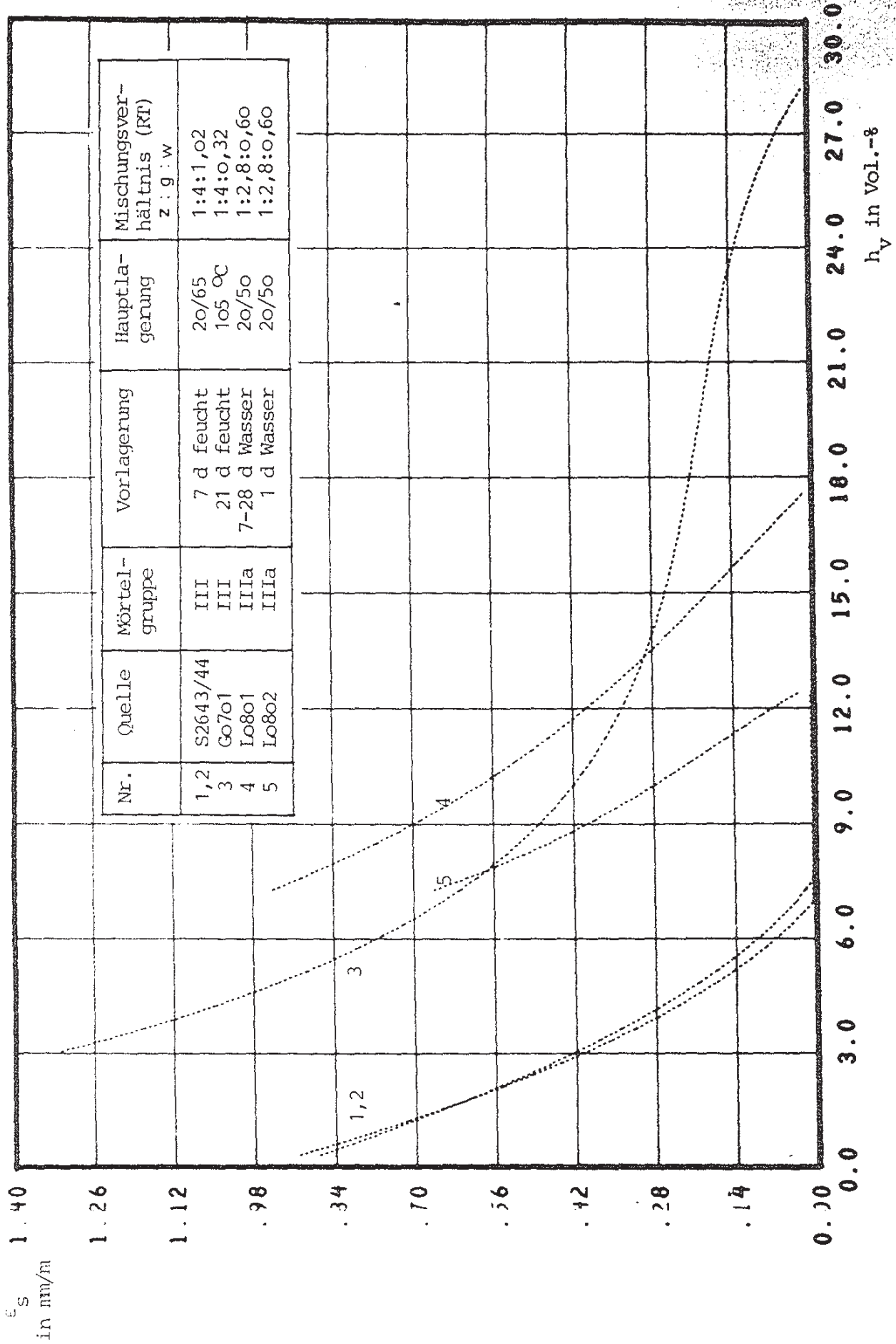
Bild 6.70: Verformungskennwert  $\alpha_v$  in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte des Schwindklimas



Schwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
Mörtel; Mörtelgruppen II, IIa, III, 7 d feucht vorgelagert, Prüfklima 20/65

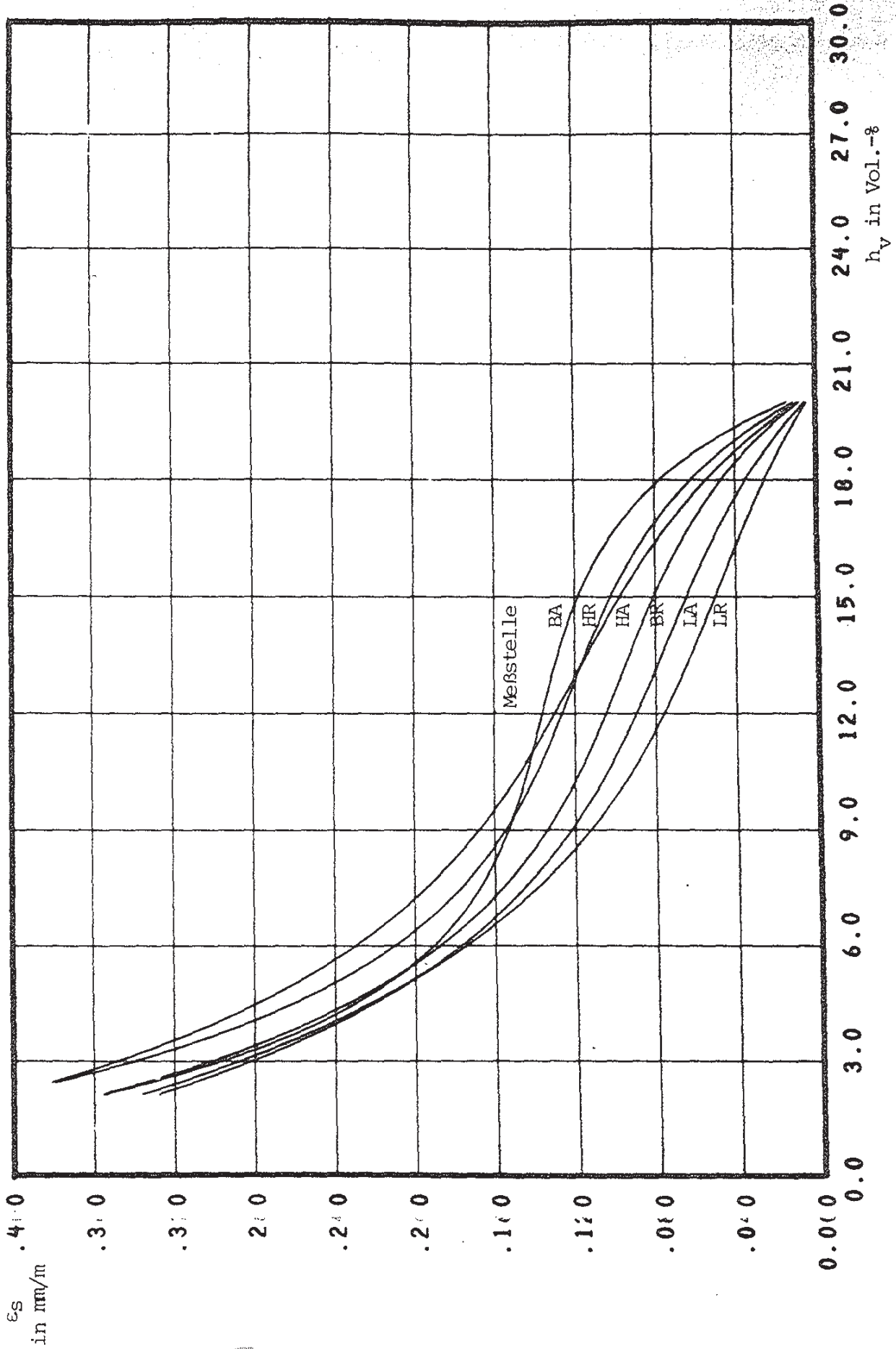
Bild 6.71





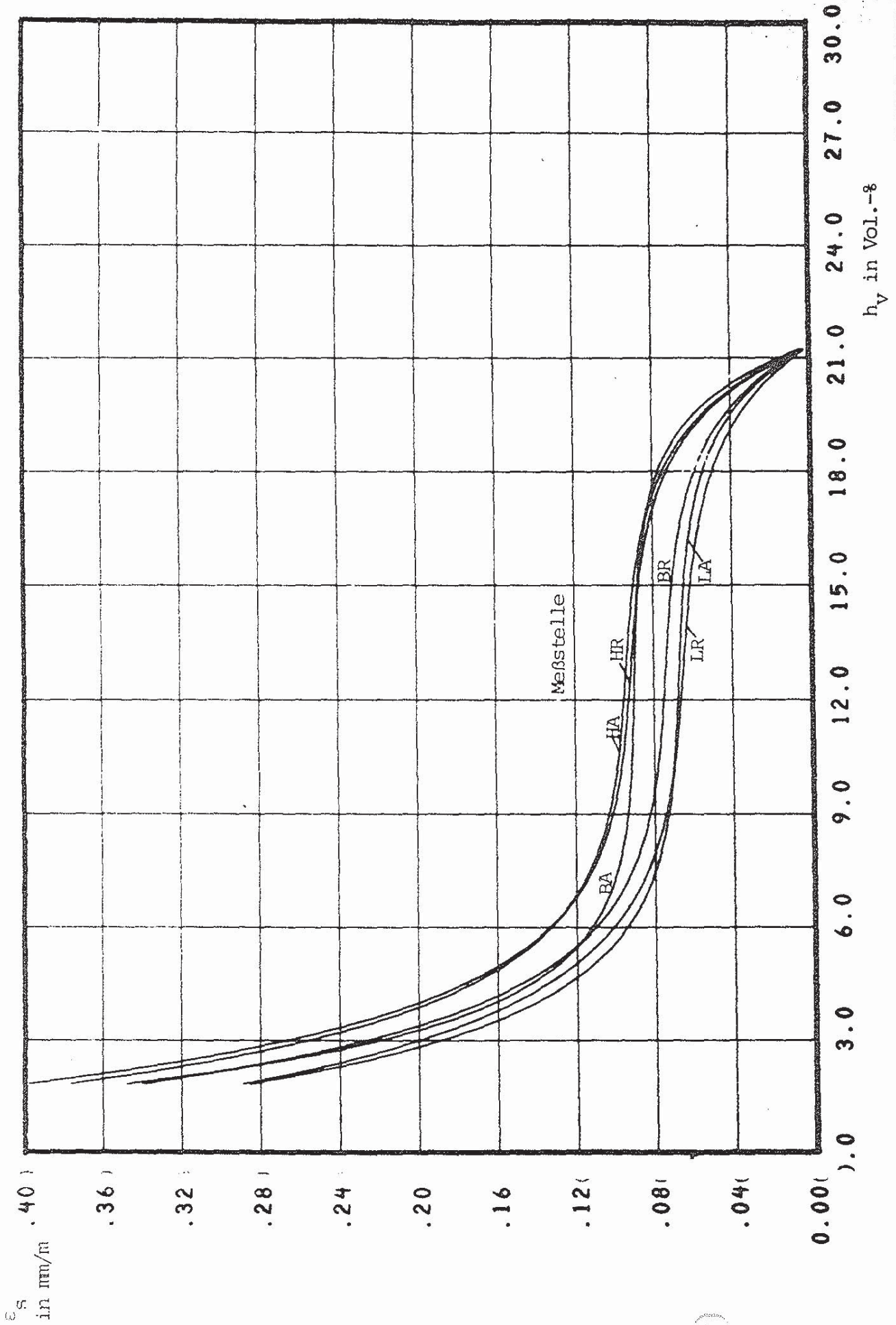
Schwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
Mörtel; Mörtelgruppen III, IIIa

Bild 6.72



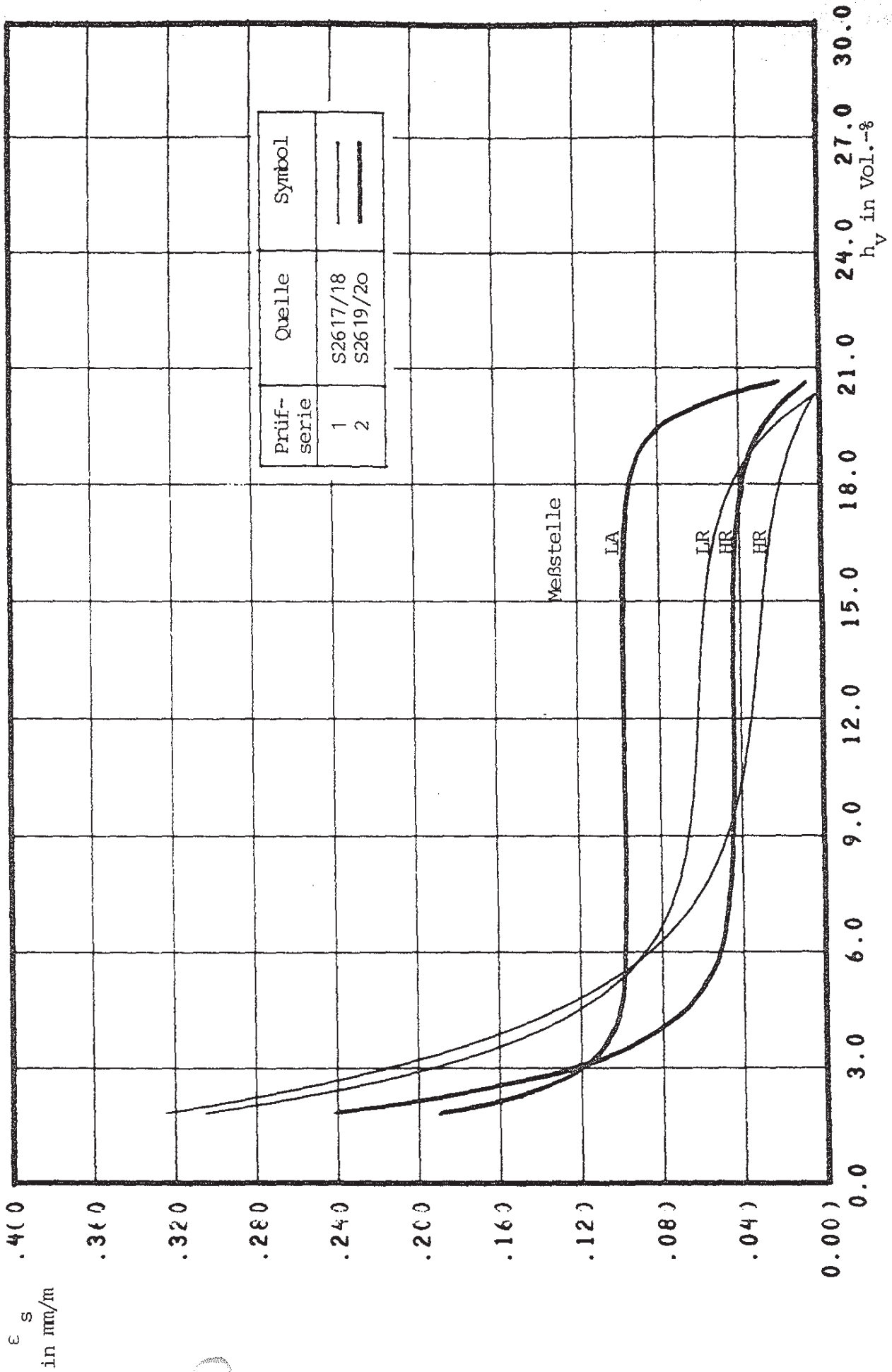
Schwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
K Iksandsteine; KSV 20, wasservorgelagert, Prüfklima 20/30

Bild 6.73



Scwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
Kalksandsteine; KSV 28, wasservorgelagert, Prüfklima 20/30

Bild 6.74



Schwirnen bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
Kalksandsteine; KSV 28, wasservorgelagert, Prüfklima 20/65

Bild 6.75

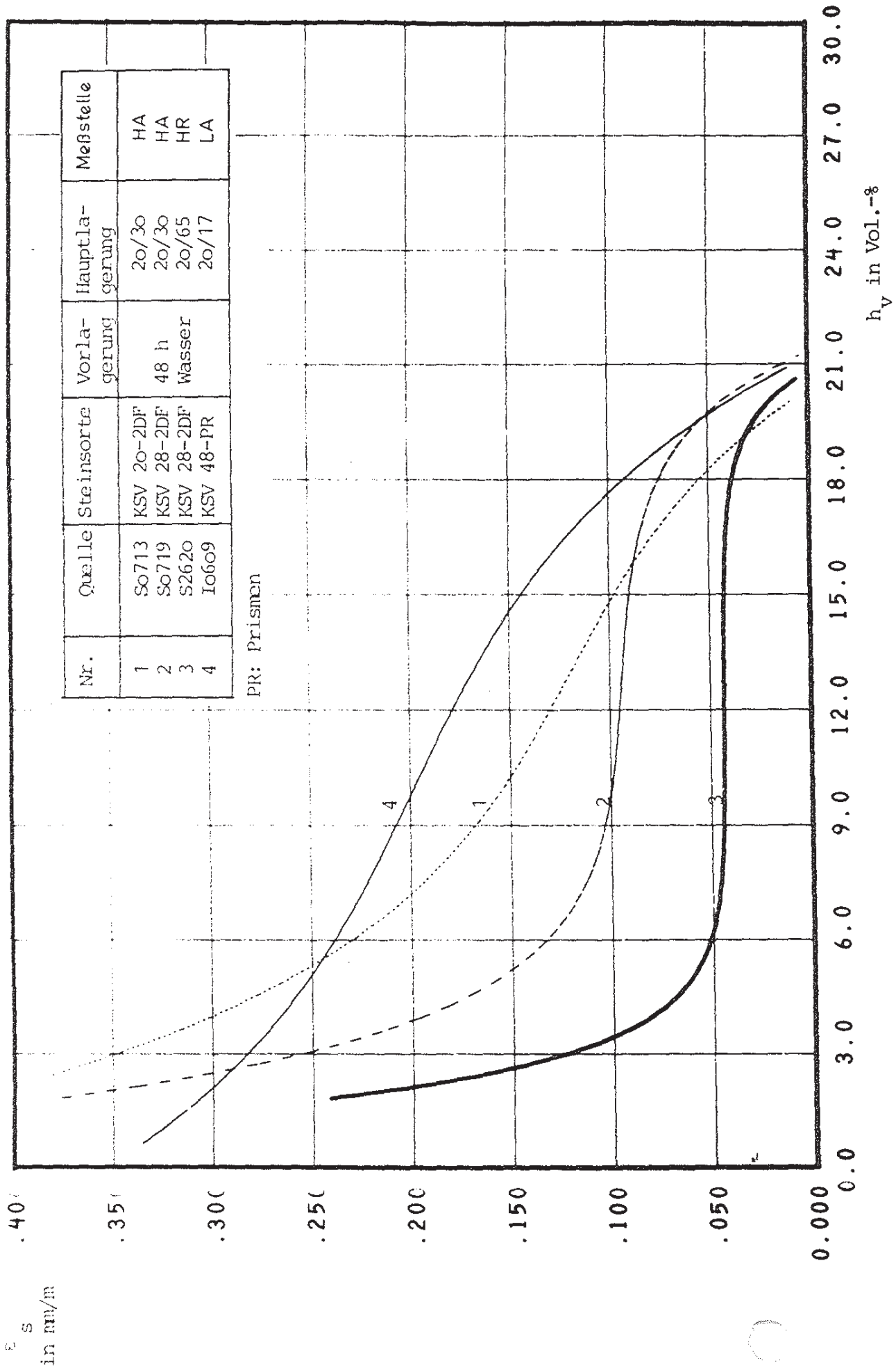
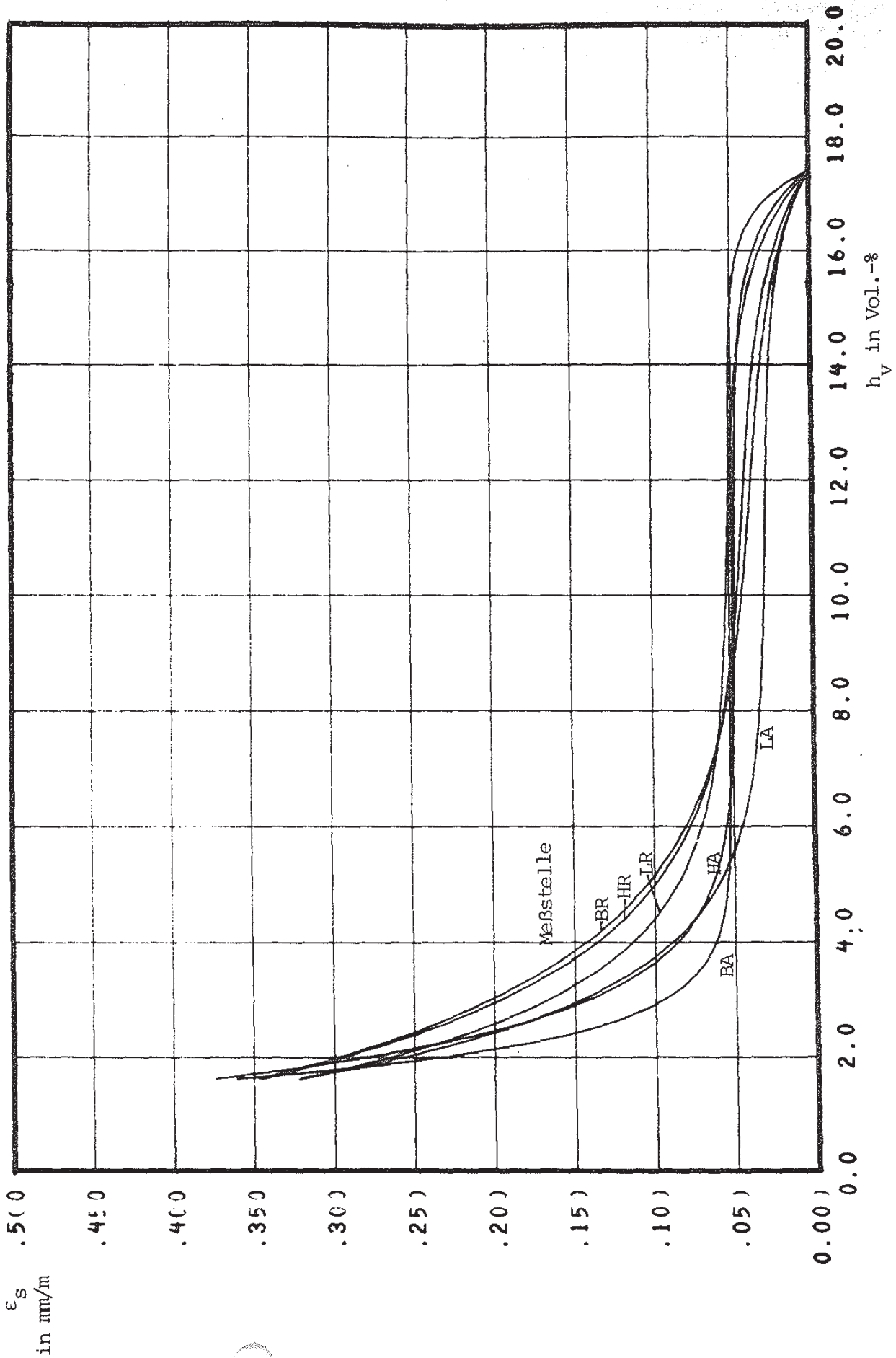
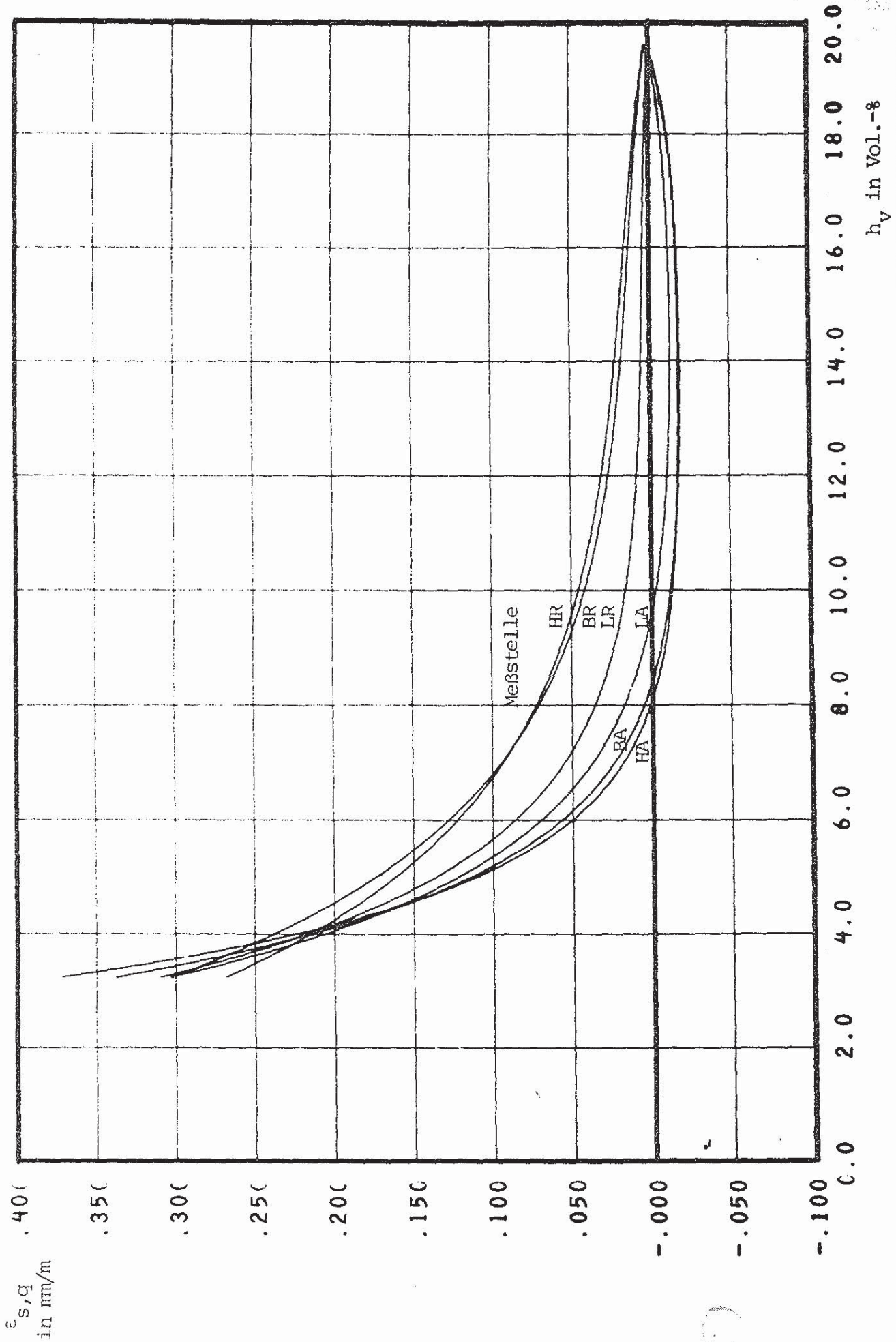


Bild 6.76  
 Schwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
 Kaltsandsteine; wasservorgelagert



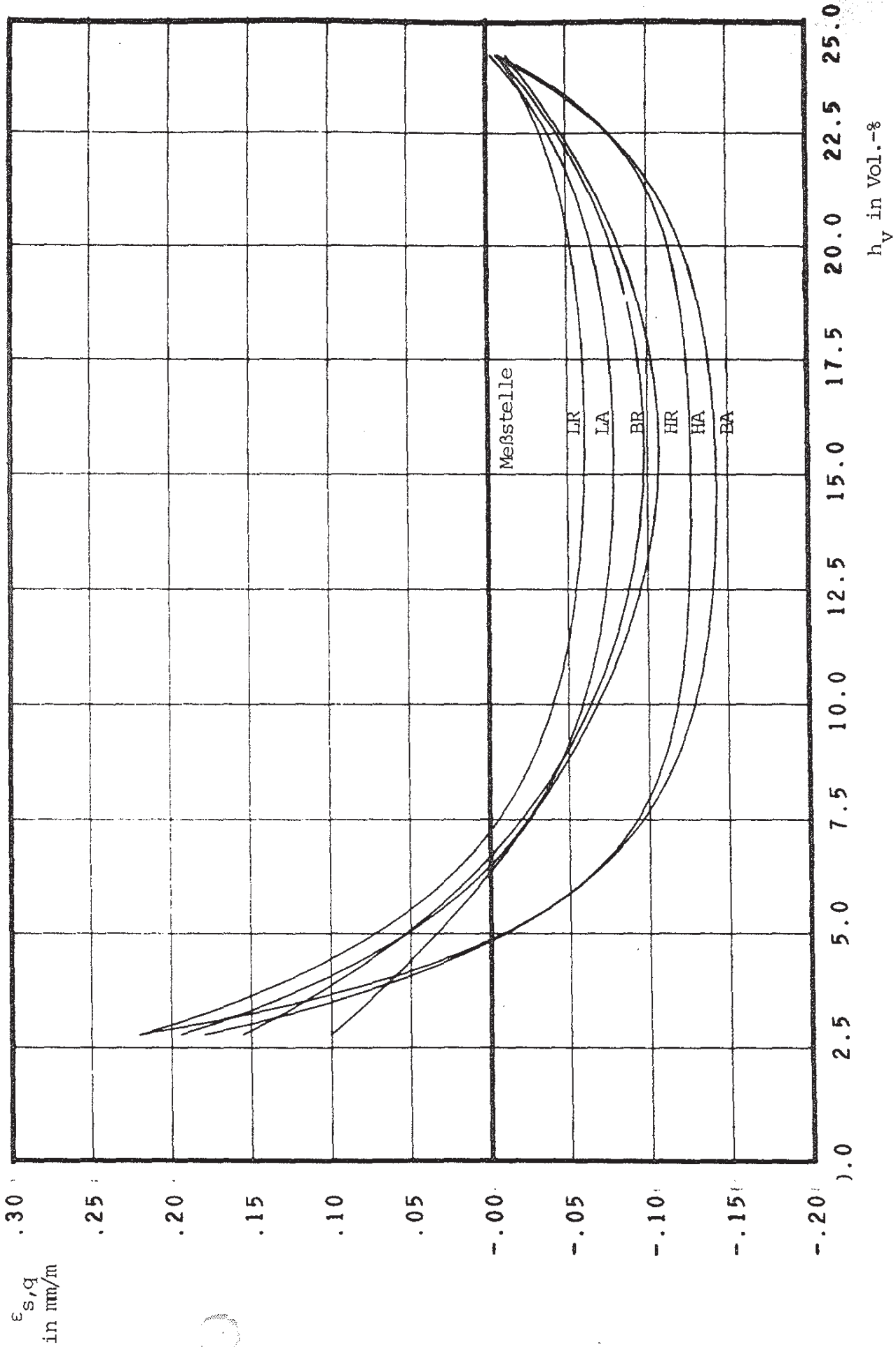
Sc werden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
Le chtbetonhohlblocksteine (NB); Fbl 2-2K, wasservorgelagert, Prüfklima 20/30

Bild 6.77



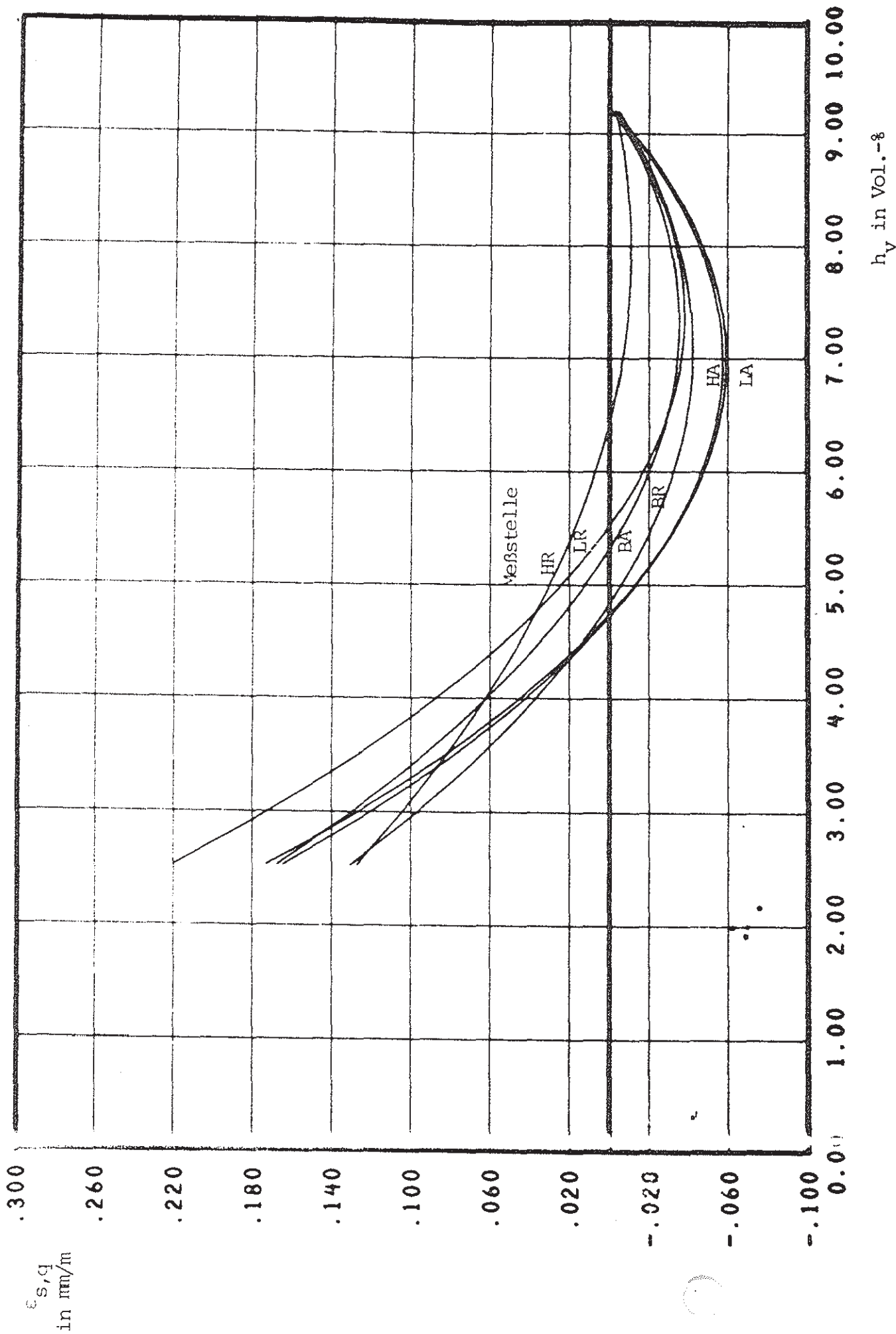
Schichten bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
Leichtbetonhohlblocksteine (NB); Hbl 2-3K, wasservorgelagert, Prüfklima 20/65

Bild 6.78



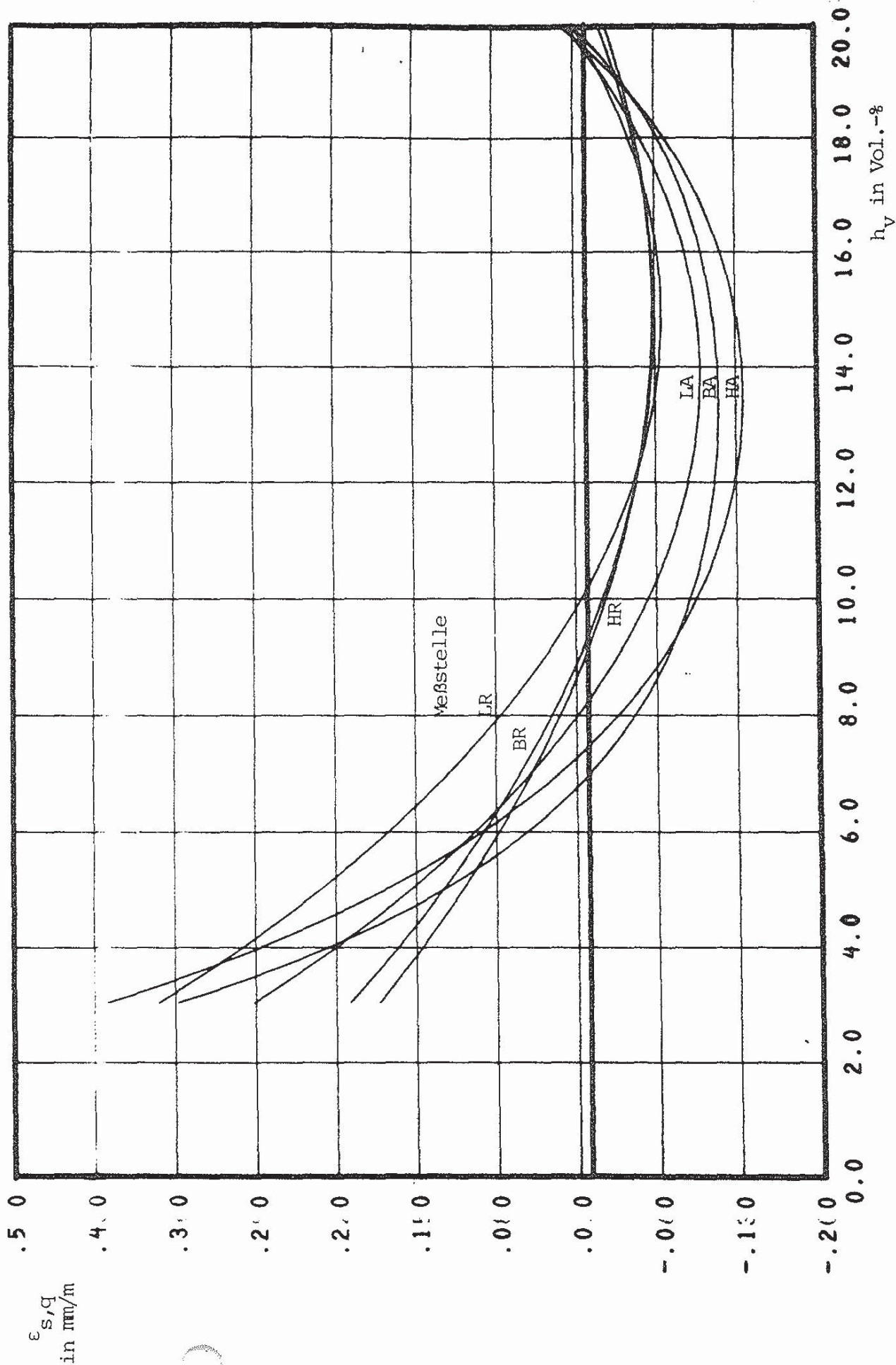
Scwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
Leichtbetonhohlblocksteine (NB); Hbl 2-4K, wasservorgelagert, Prüfklima 20/65





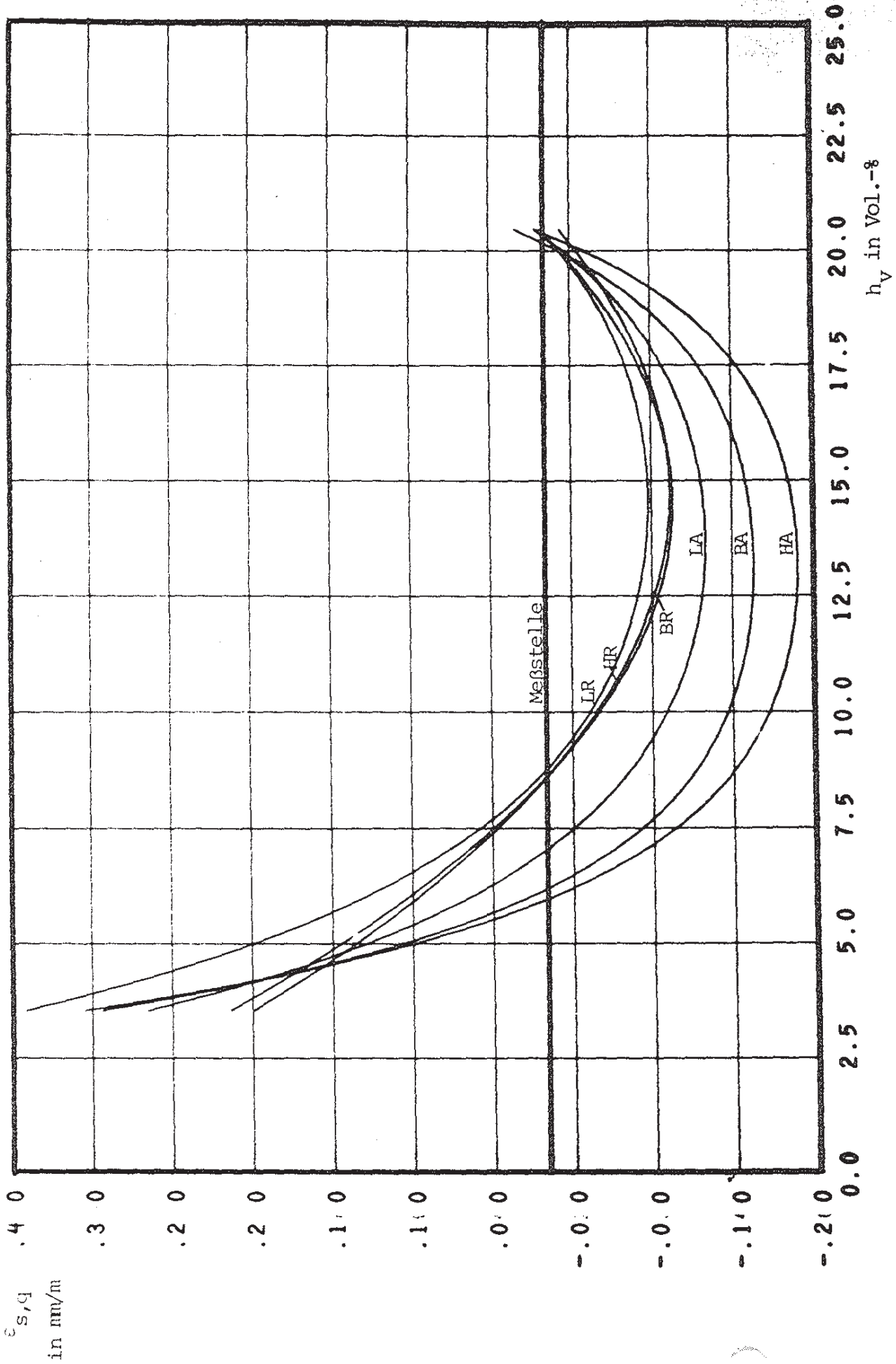
Scwi den bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt Leicht betonhohlblocksteine (NB); Hbl 2-4K, bis  $h_{vo} \approx 10$  Vol.-% vorgelagert, Prüfklima 20/65

Bild 6.80



chwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt Leichtbetonhohlblocksteine (NB); Hbl 4-3K, wasservorgelagert, Prüfklima 20/65

Bild 6.81



Schwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
von Leichtbetonhohlblocksteinen (NB); Hbl 4-4K, wasservorgelagert, Prüfklima 20/65

Bild 6.82

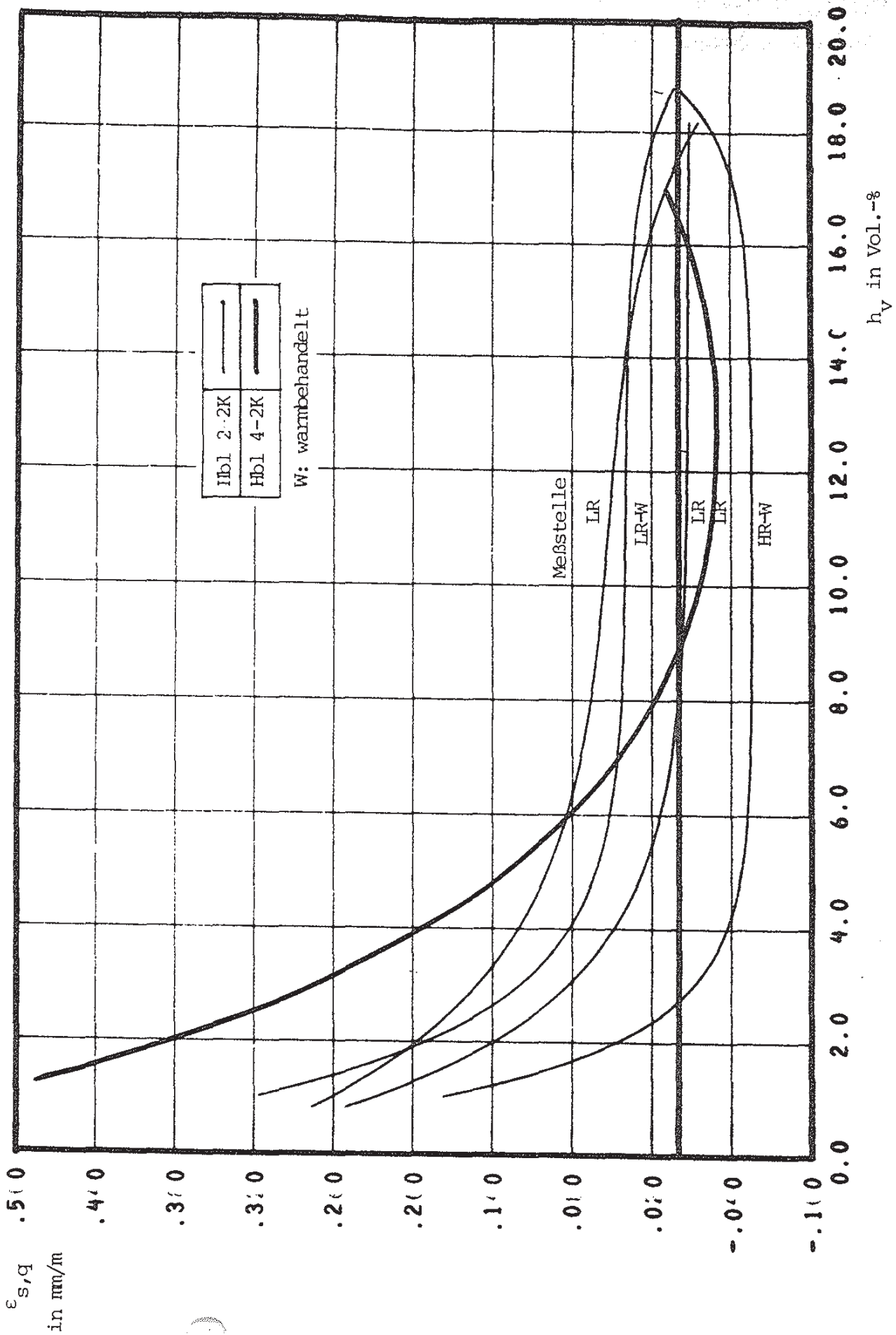
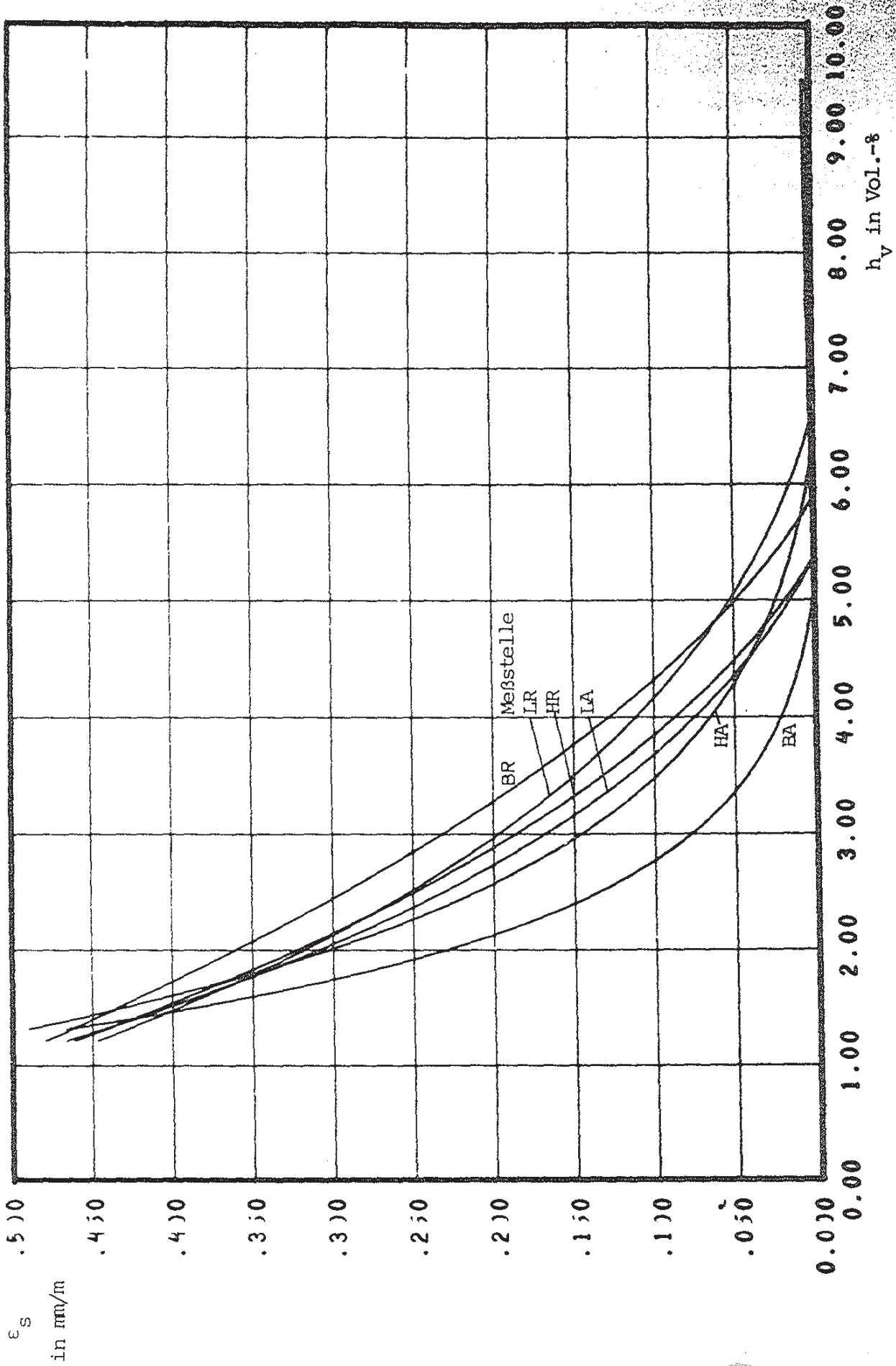


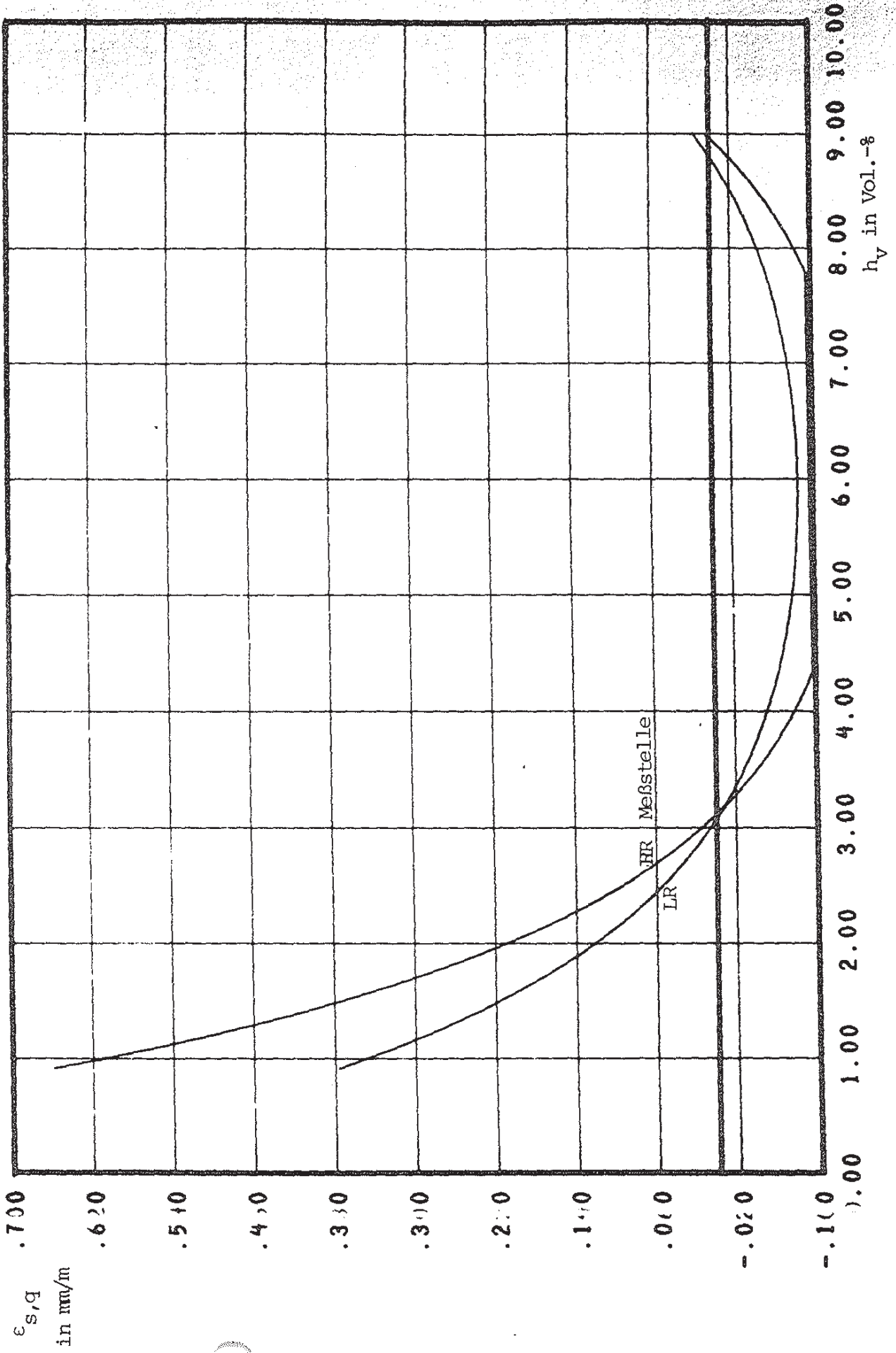
Bild 6.83 Schwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
 1 Leichtbetonhohlblocksteine (NB); Hbl 2-2K, Hbl 4-2K, wasservorgelagert, Prüfklima 20/65



F 90

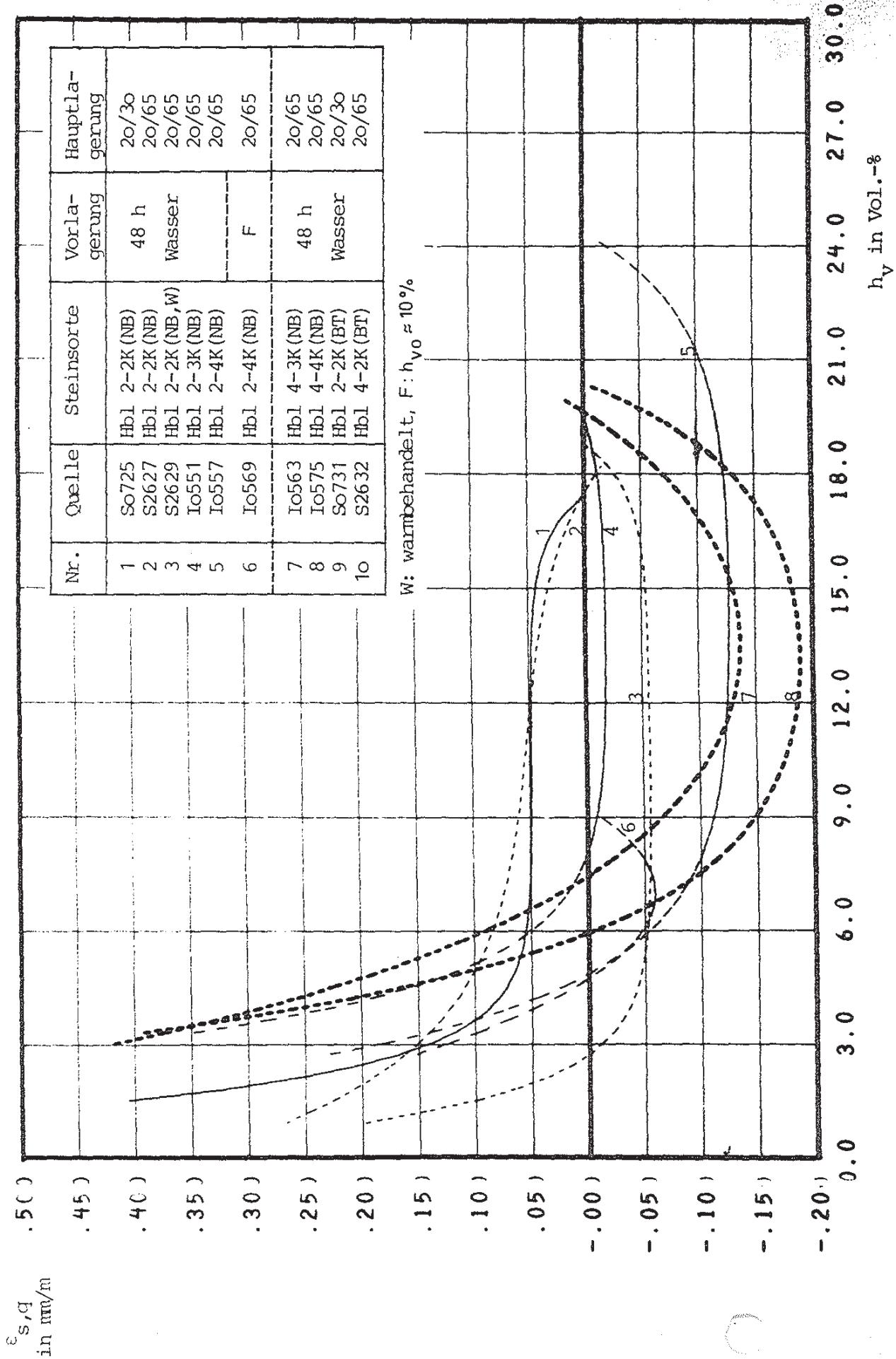
schwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt Leichtbetonhohlblocksteine (BT); Hbl 2-2K, wasservorgelagert, Prüfklima 20/30

Bild 6.84



Schwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
Lichtbetonhohlblocksteine (BT); Hbl 4-2K, wasservorgelagert, Prüfklima 20/65

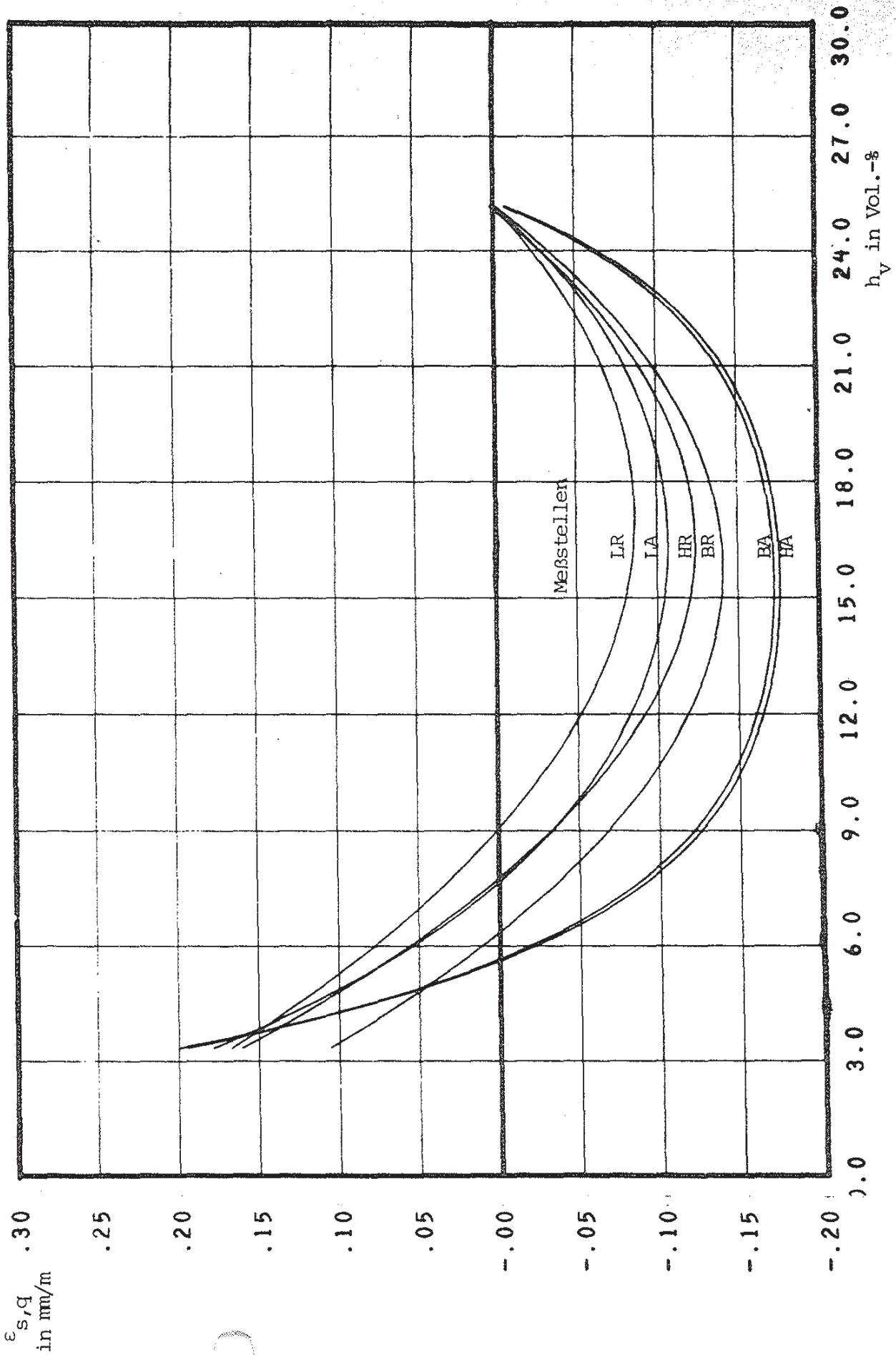
Bild 6.85



Nr.	Quelle	Steinsorte	Vorlagung	Hauptlagung
1	So725	Hb1 2-2K (NB)	48 h	20/30
2	S2627	Hb1 2-2K (NB)	Wasser	20/65
3	S2629	Hb1 2-2K (NB, W)		20/65
4	Io551	Hb1 2-3K (NB)		20/65
5	Io557	Hb1 2-4K (NB)	F	20/65
6	Io569	Hb1 2-4K (NB)		20/65
7	Io563	Hb1 4-3K (NB)	48 h	20/65
8	Io575	Hb1 4-4K (NB)	Wasser	20/65
9	So731	Hb1 2-2K (BT)		20/30
10	S2632	Hb1 4-2K (BT)		20/65

Schwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt bei hohblocksteinen; Meßstellen HA bzw. HR

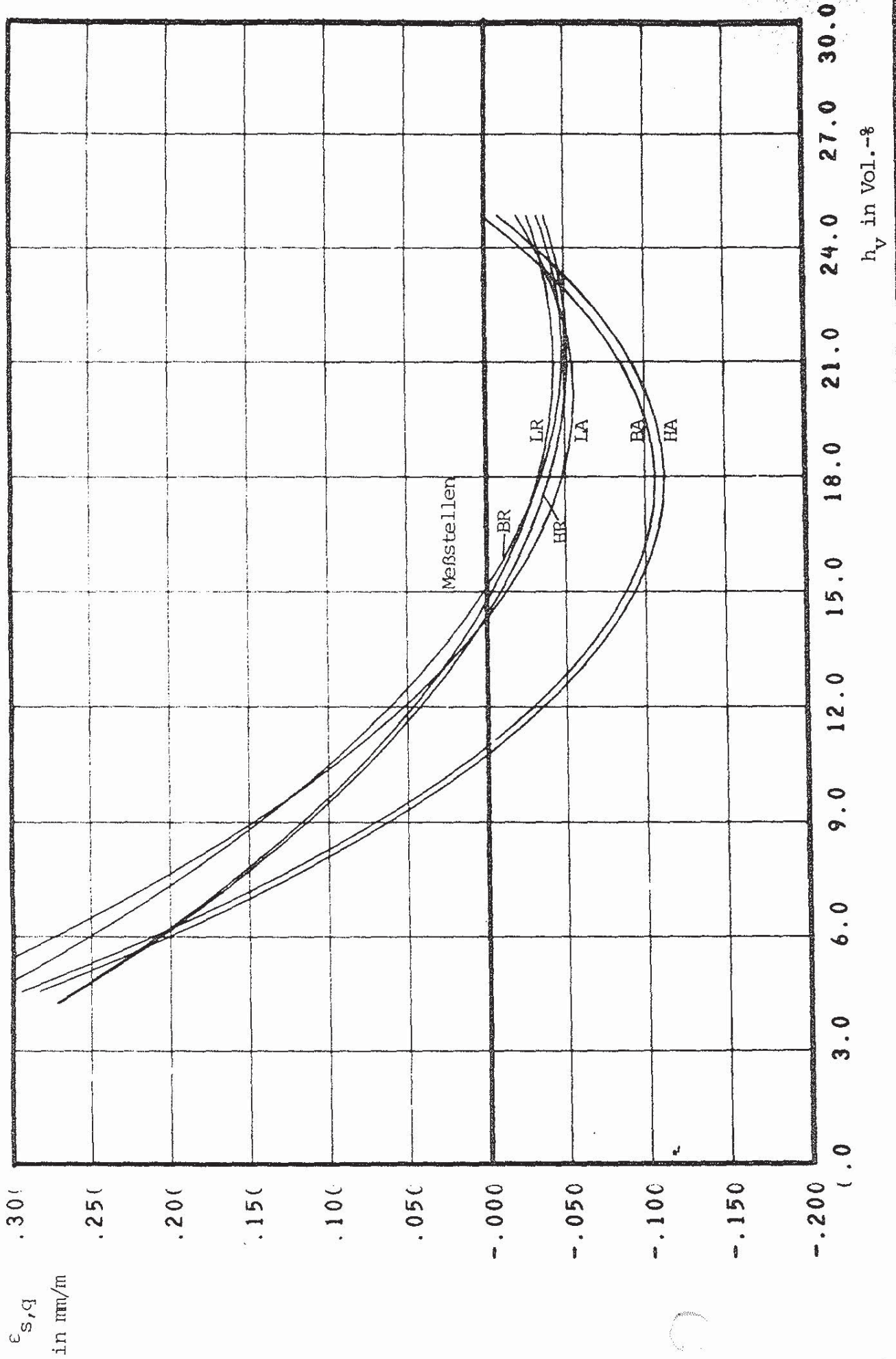
Bild 6.86



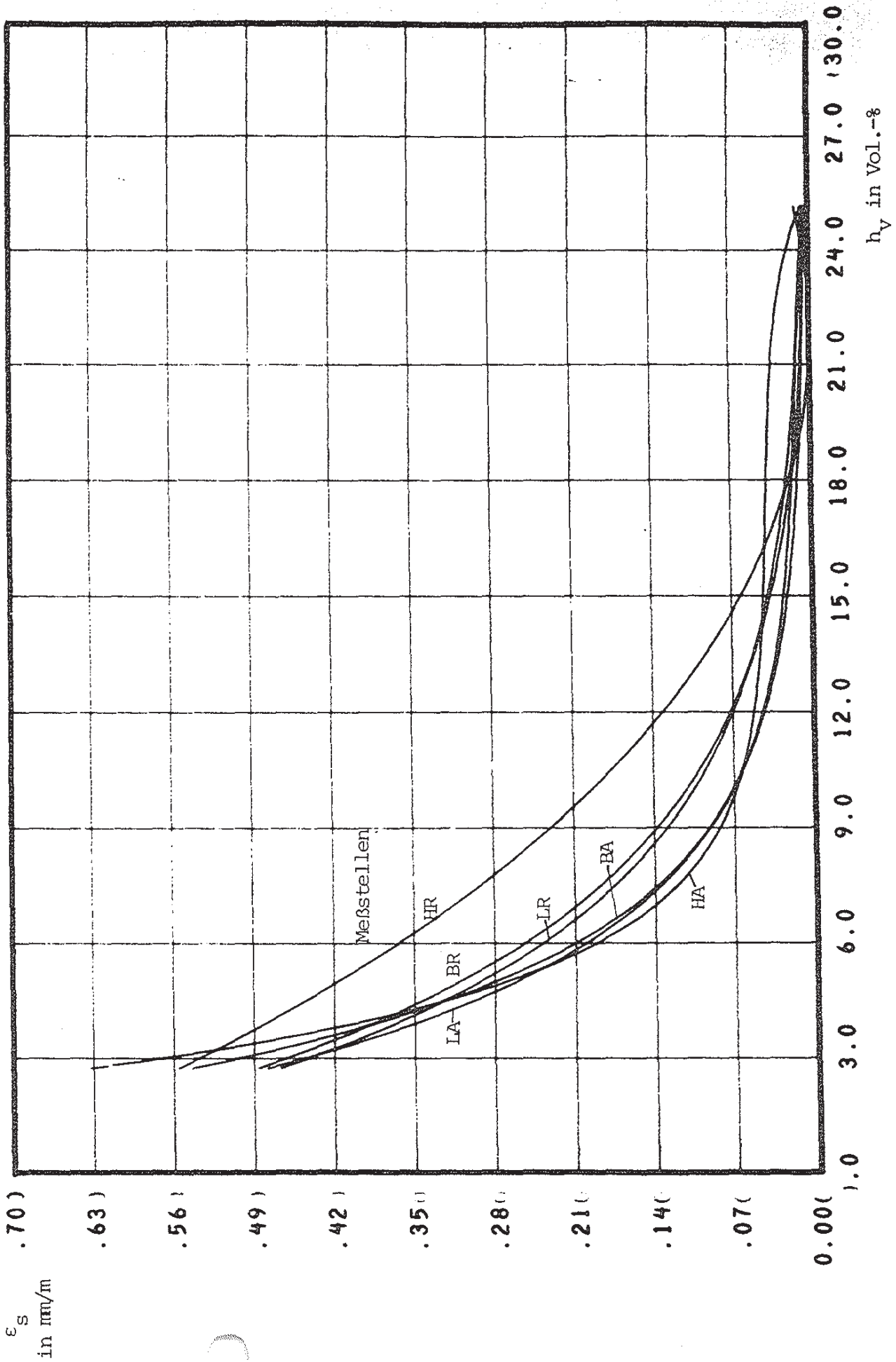
Schwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
Lichtbetonvollsteine (NB); V 2-2DF, wasservorgelagert, Prüfklima 20/65

Bild 6.87



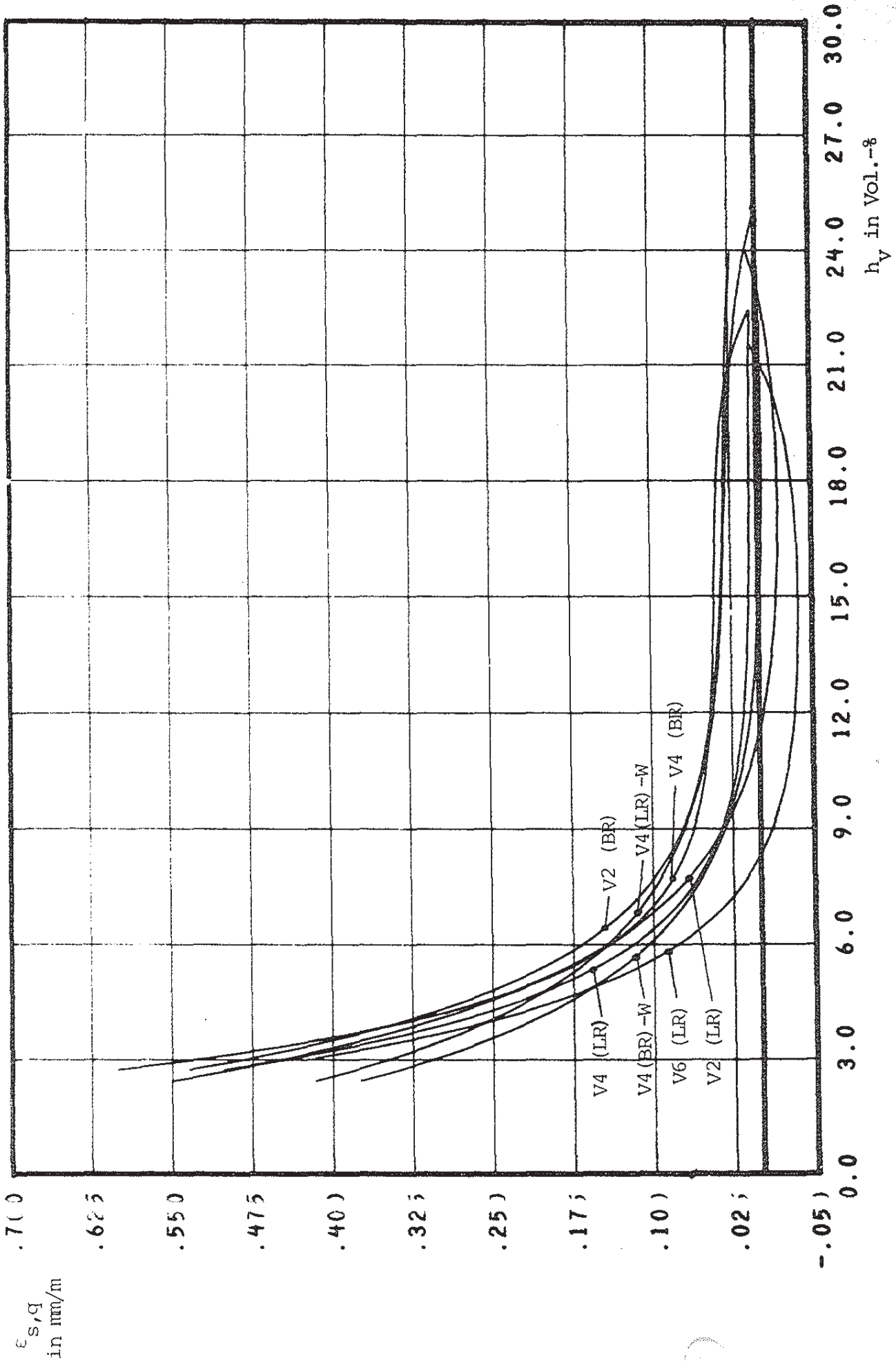


Schwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt



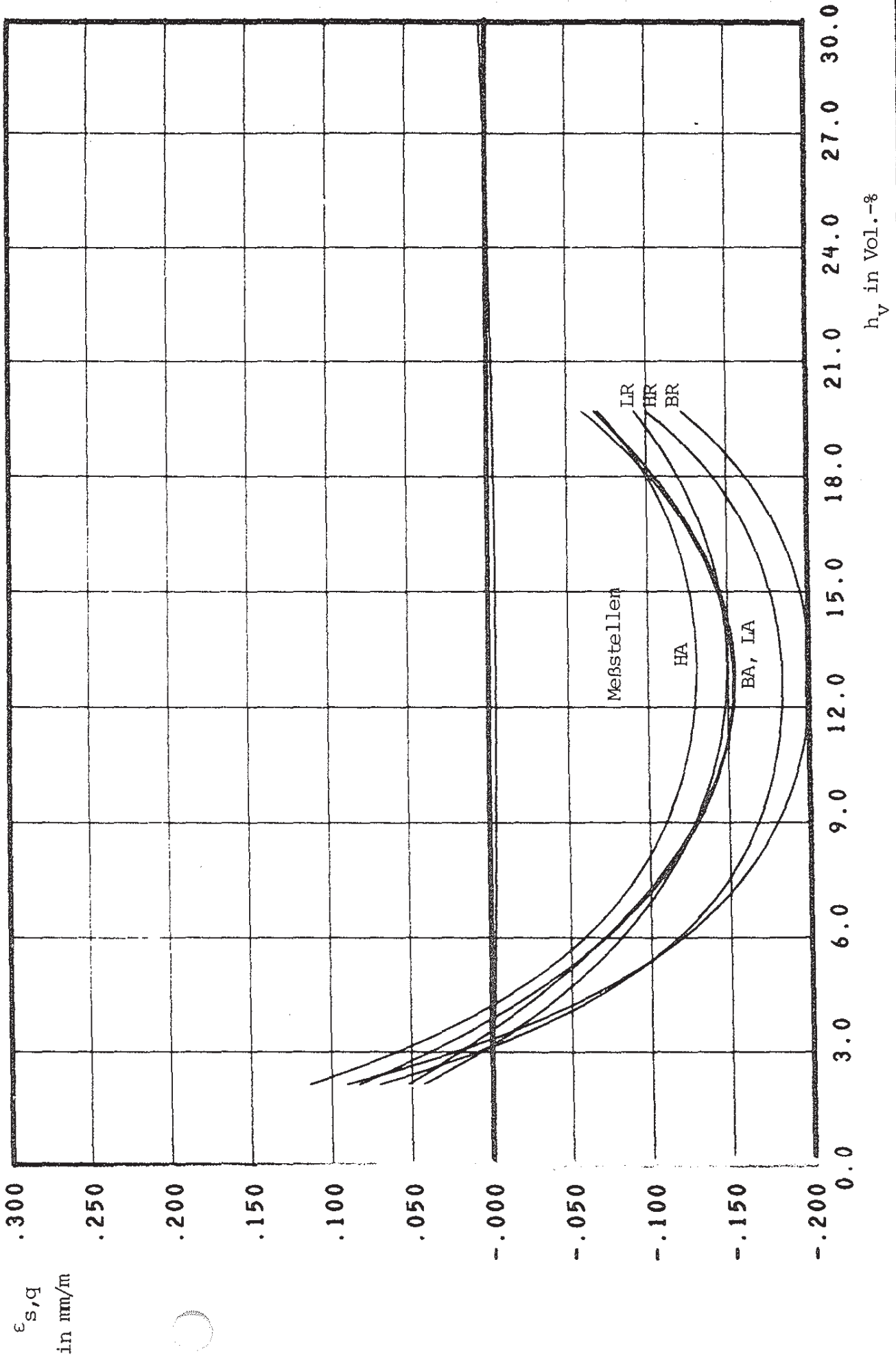
Sc winden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
Lc chtbetonvollsteine (NB); V 2-5DF, wasservorgelagert, Prüfklima 20/30

Bild 6.89



Sc winden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
Lechtbetonvollsteine (NB); V 2, V 4, V 6, Format 5 DF, Meißtellen BR, LR, wasservorgelagert,

Bild 6.90



Schwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
Leichtbetonvollsteine (NB); V 4-5DF, wasservorgelagert, an 4 Schmalseiten abgedichtet,  
Prüfung im 20/65

Bild 6.91

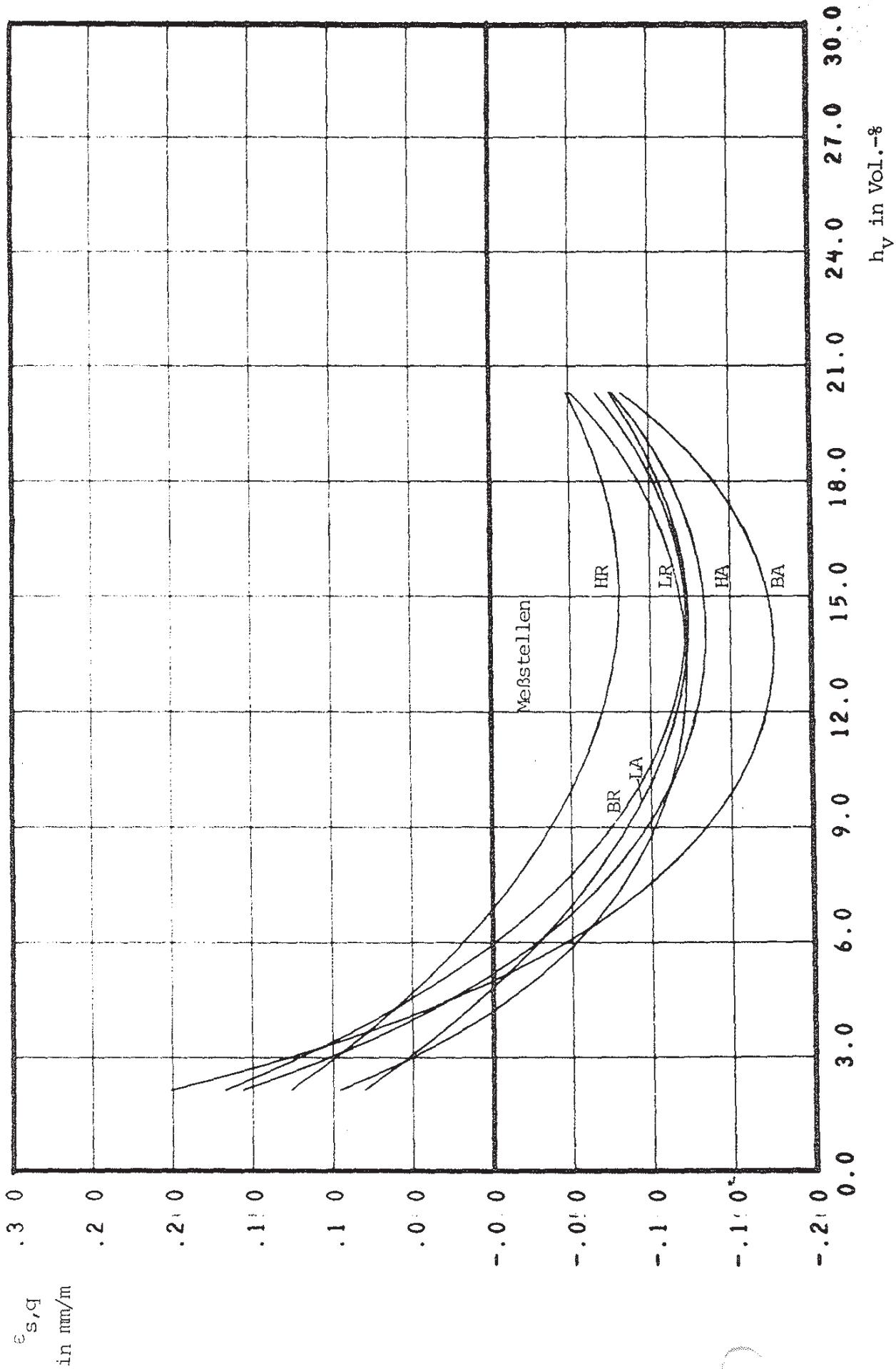
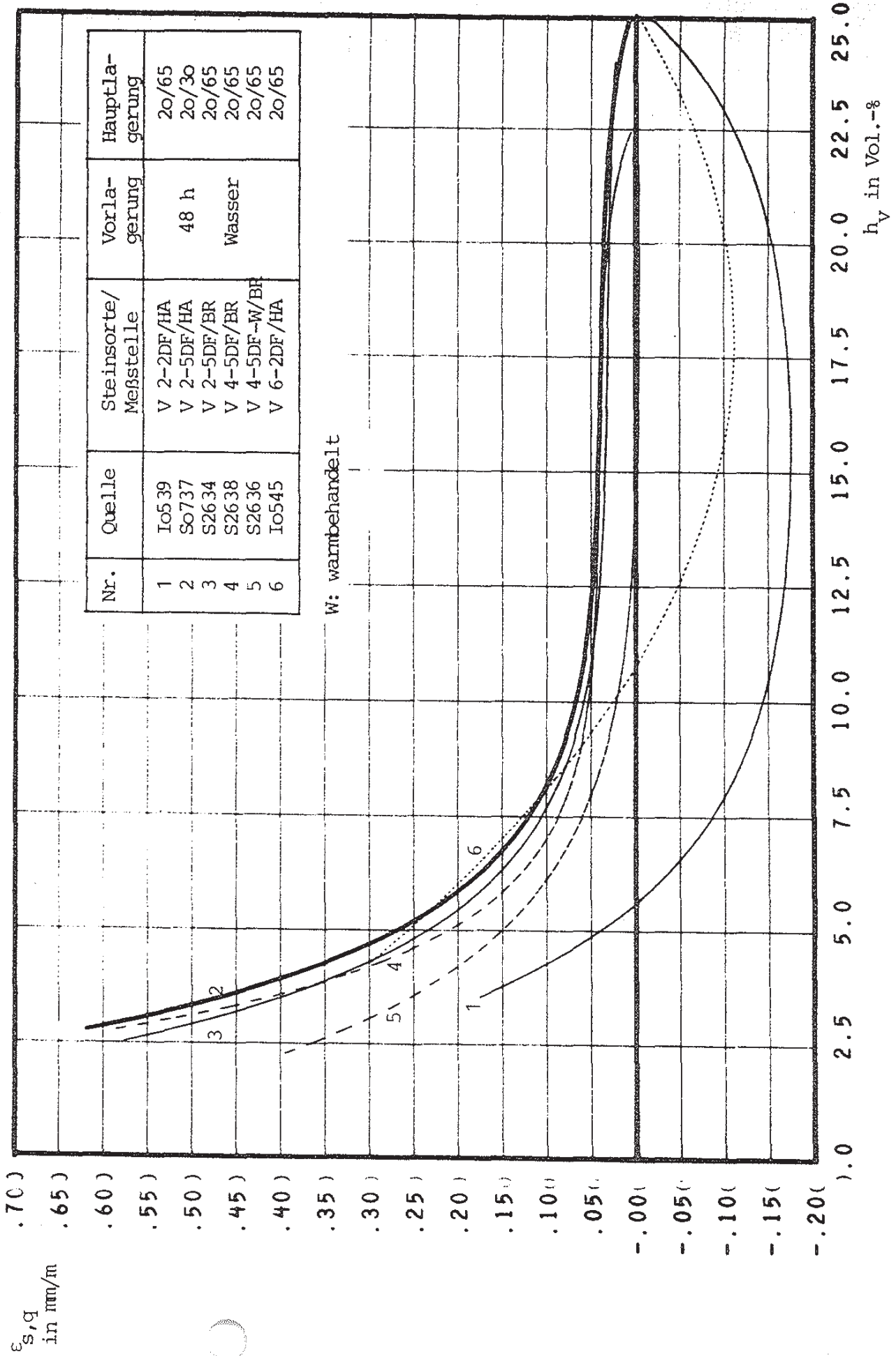
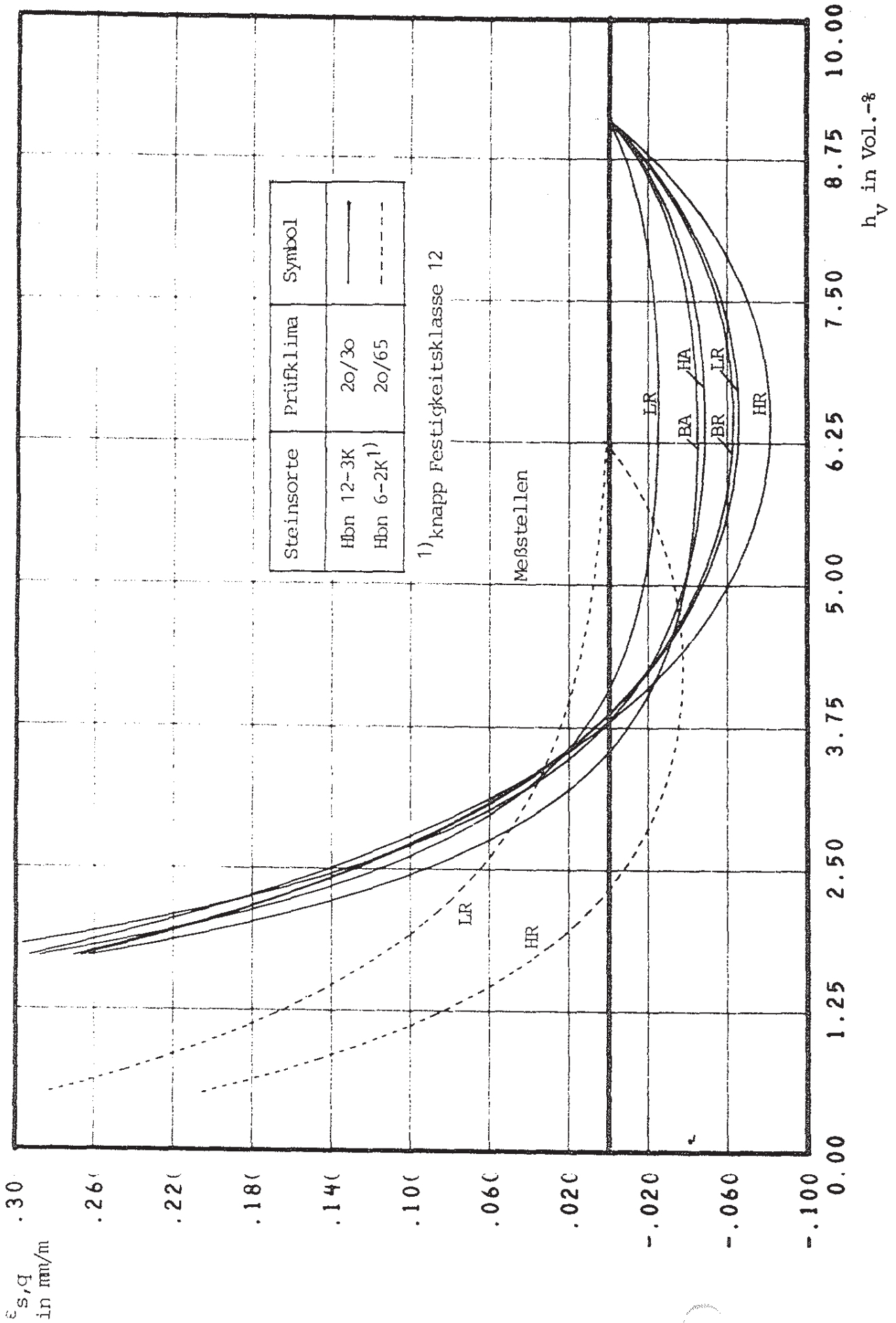


Bild 6.92 Schwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt Leichtbetonvollsteine (NB); V 4-5DF, wasservorgelagert, Prüfklima 20/65



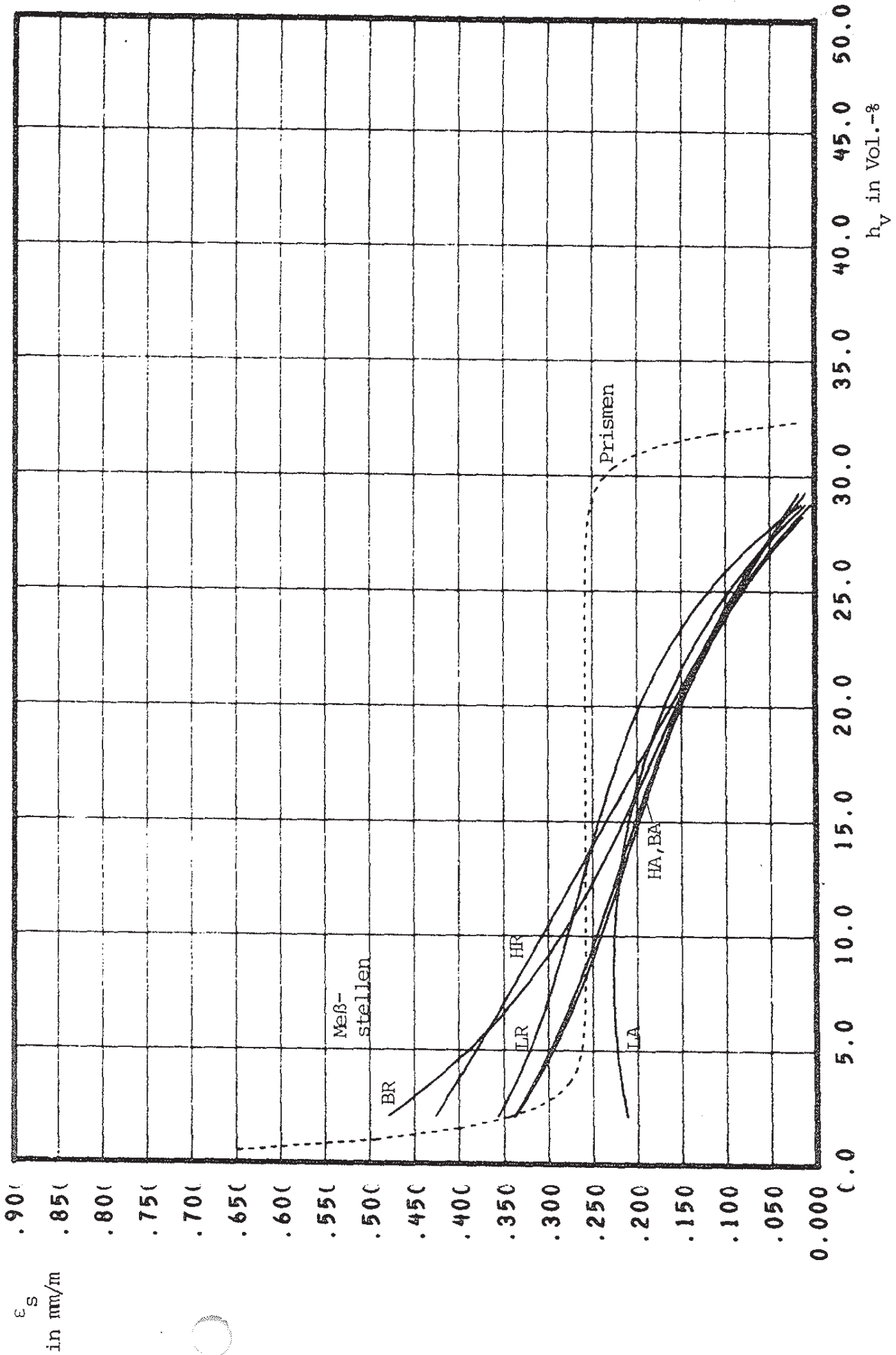
Siehe auch Bild 6.93. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
 Leichtbetonvollsteine (NB); wasservorgelagert, Messstellen HA bzw. HR

Bild 6.93



Sc winden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
Be onsteine; wasservorgelagert

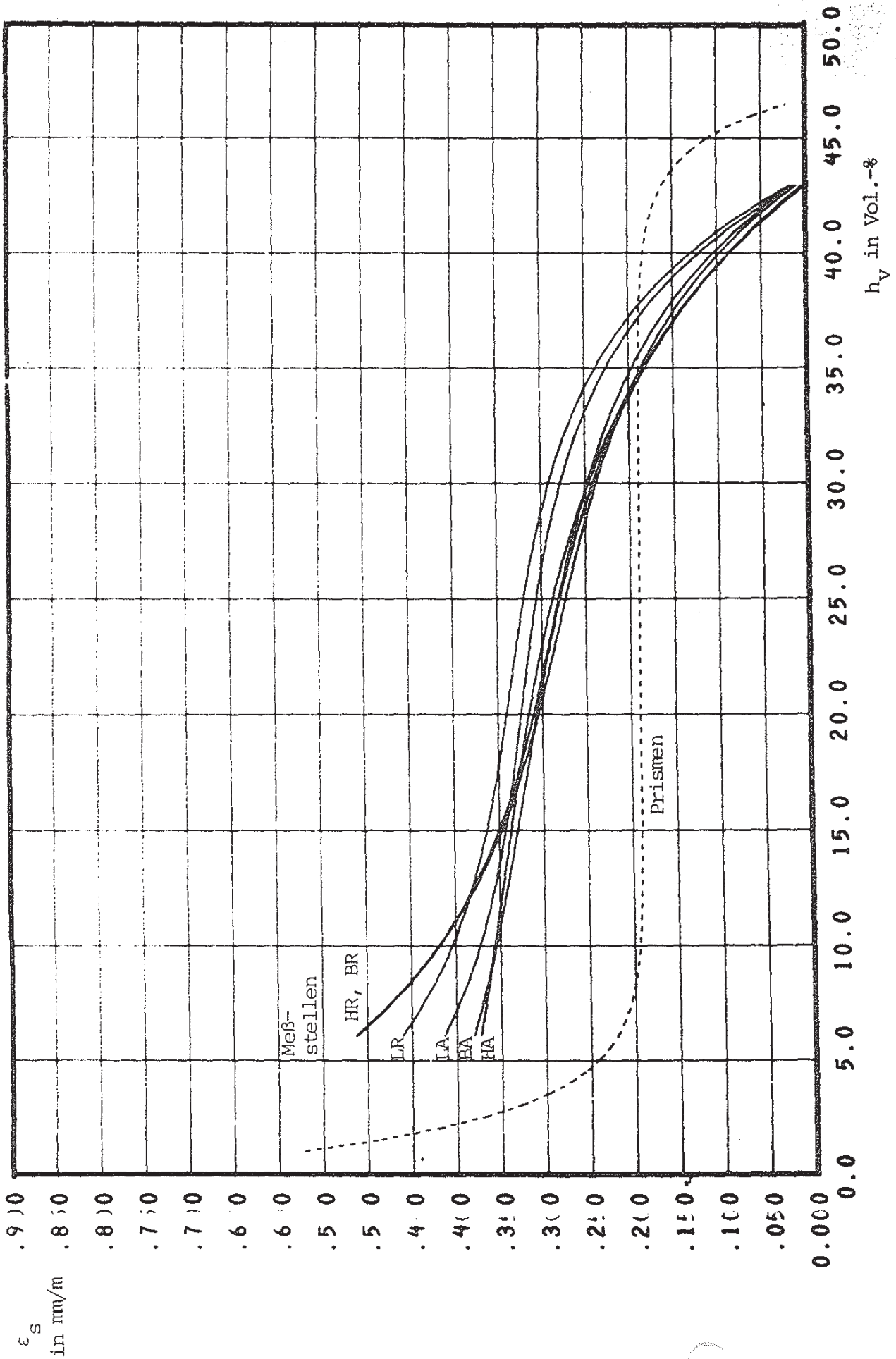
Bild 6.94



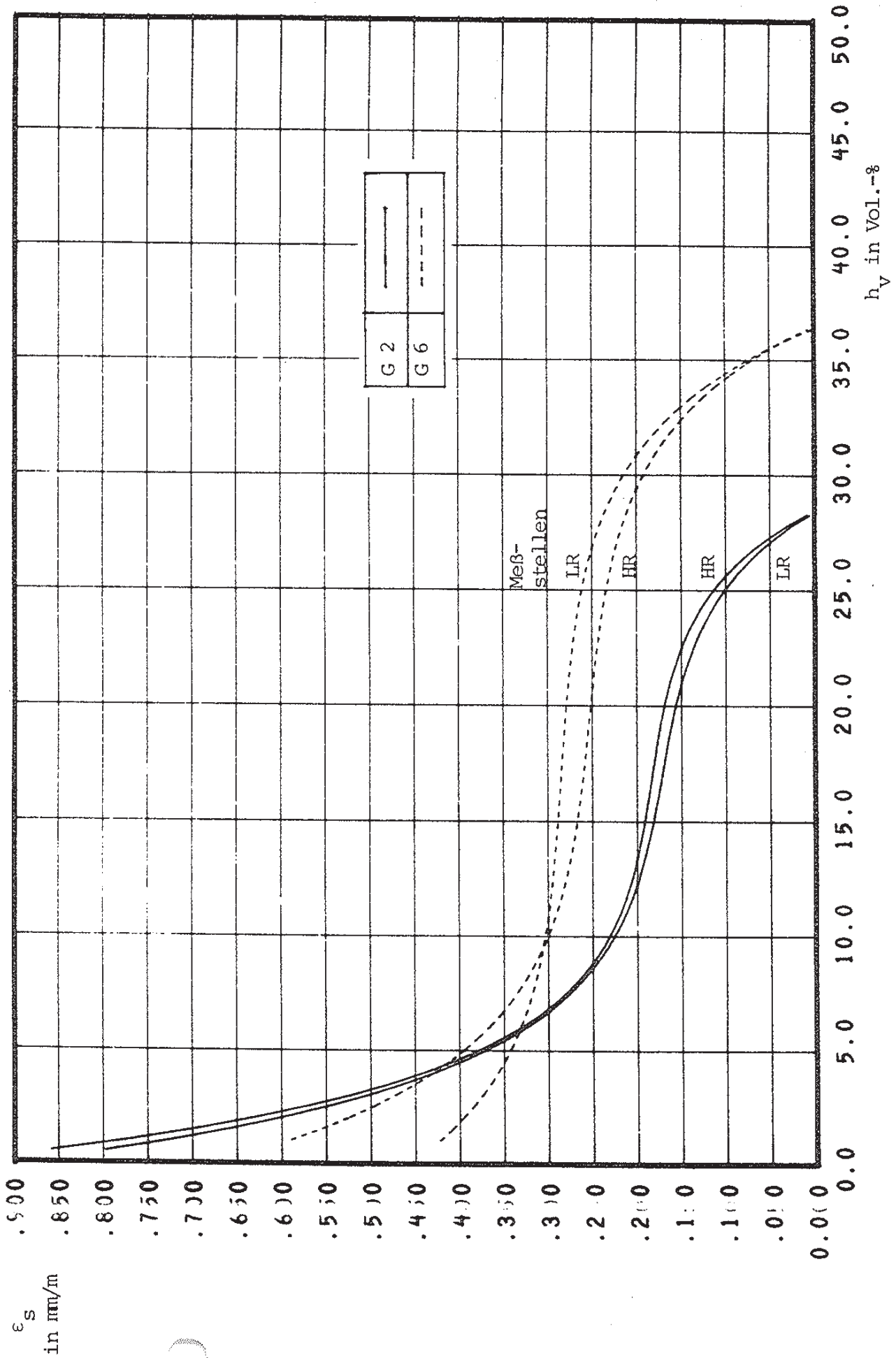
Schindeln bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
Gasatonsteine; G2, wasservorgelagert, Prüfklima 20/30

Bild 6.95



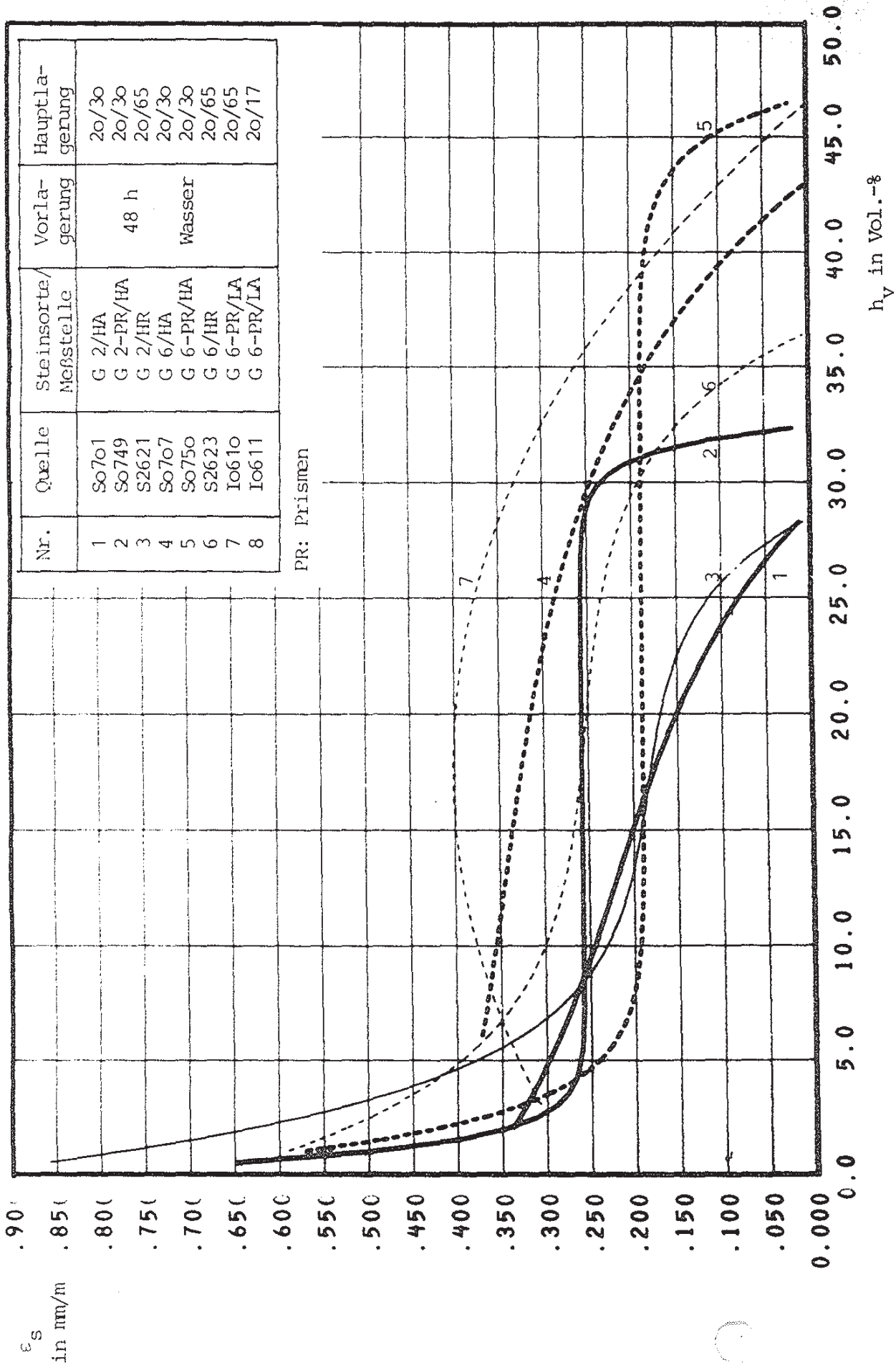


Scwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt



Abwinden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
 (Isbetonsteine; wasservorgelagert; Prüfklima 20/65)

Bild 6.97



Sc winden bzw. Quellen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  
 G: betonsteine; wasservorgelagert, Meßstellen HA, HR bzw. LA

Bild 6.98

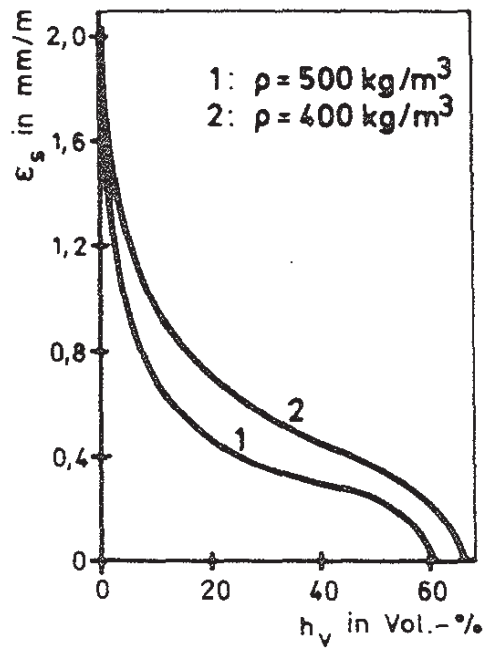
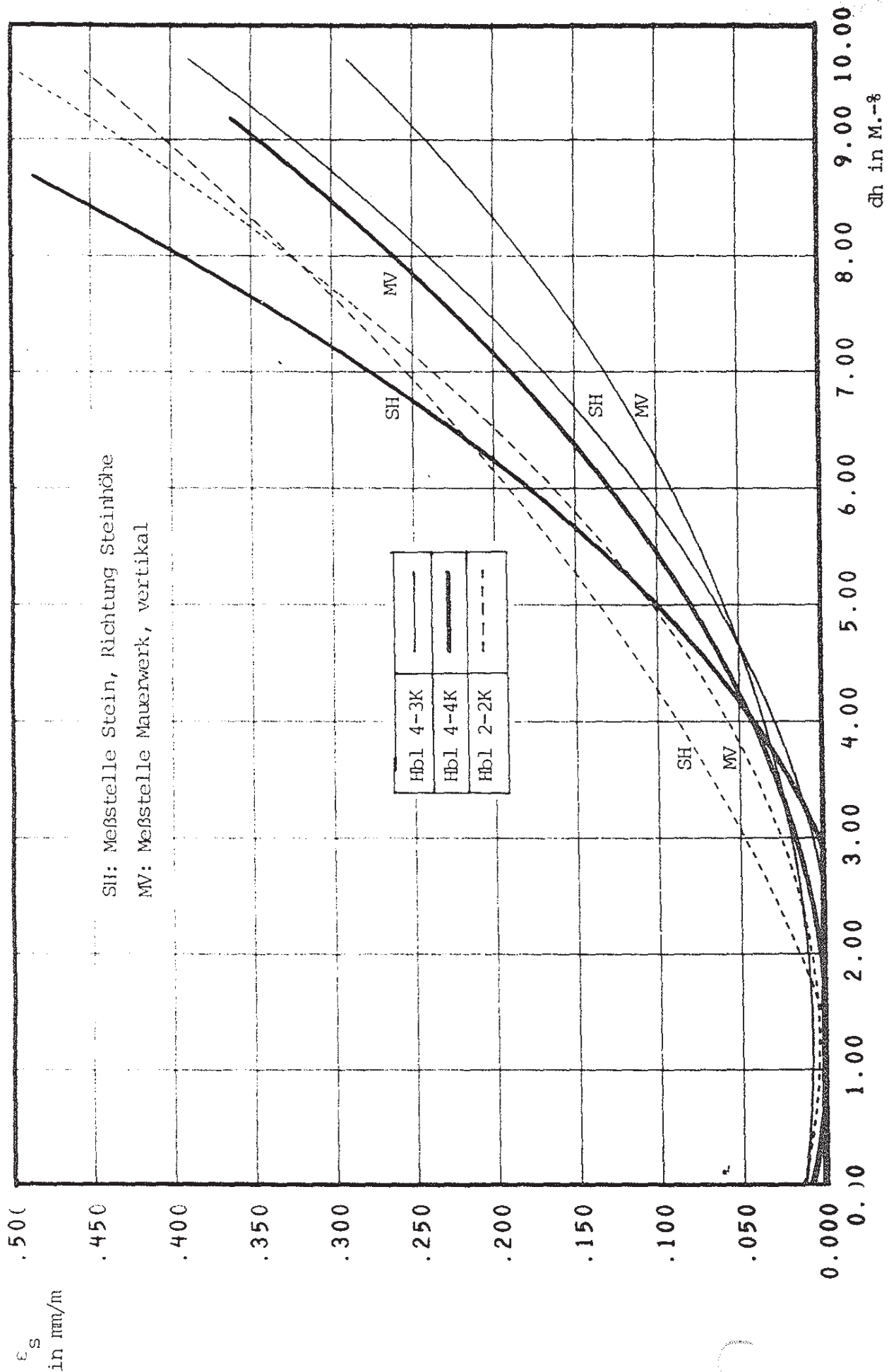
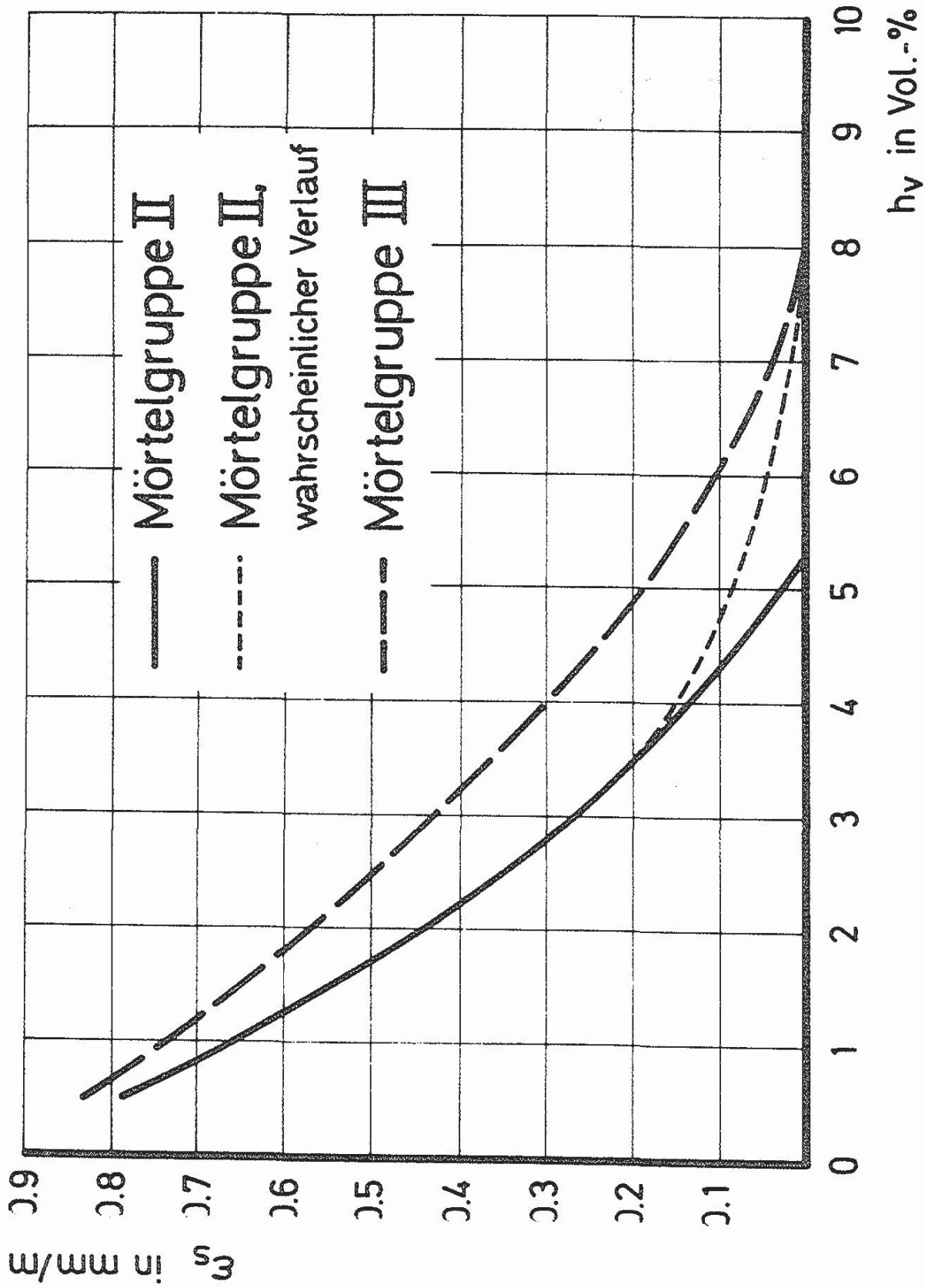


Bild 6.98a: Schwinden  $\epsilon_s$  von Gasbeton  
in Abhängigkeit vom Feuchtig-  
keitsgehalt  $h_v$  (aus /D5/, ohne  
Einzelwerte)



Schwidelen bzw. Quellen in Abhängigkeit von der Feuchtigkeitsänderung dh  
Mauerwerk aus wasservorgelagerten Leichtbetonhohlblocksteinen (NB); Prüfklima 20/65

Bild 6.99



Bil 6.100: Mauermörtel; Schwinden  $\epsilon_s$  in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  $h_v$   
Standardkurven

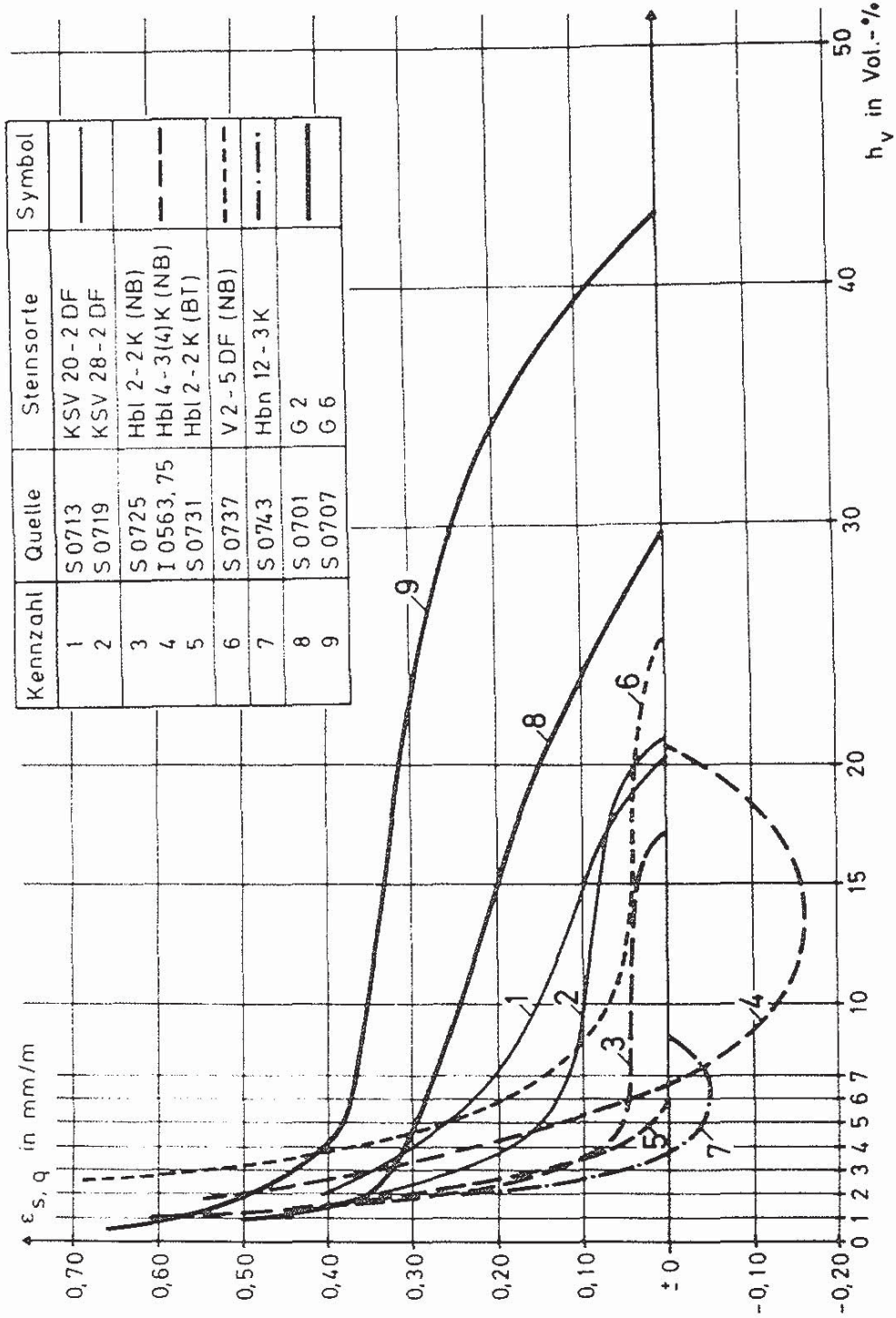


Bild 6.101: Schwinden bzw. Quellen  $\epsilon_{s,q}$  in Abhängigkeit von Feuchtigkeitsgehalt  $h_v$  Mauersteine, 48 h wasservorgelagert

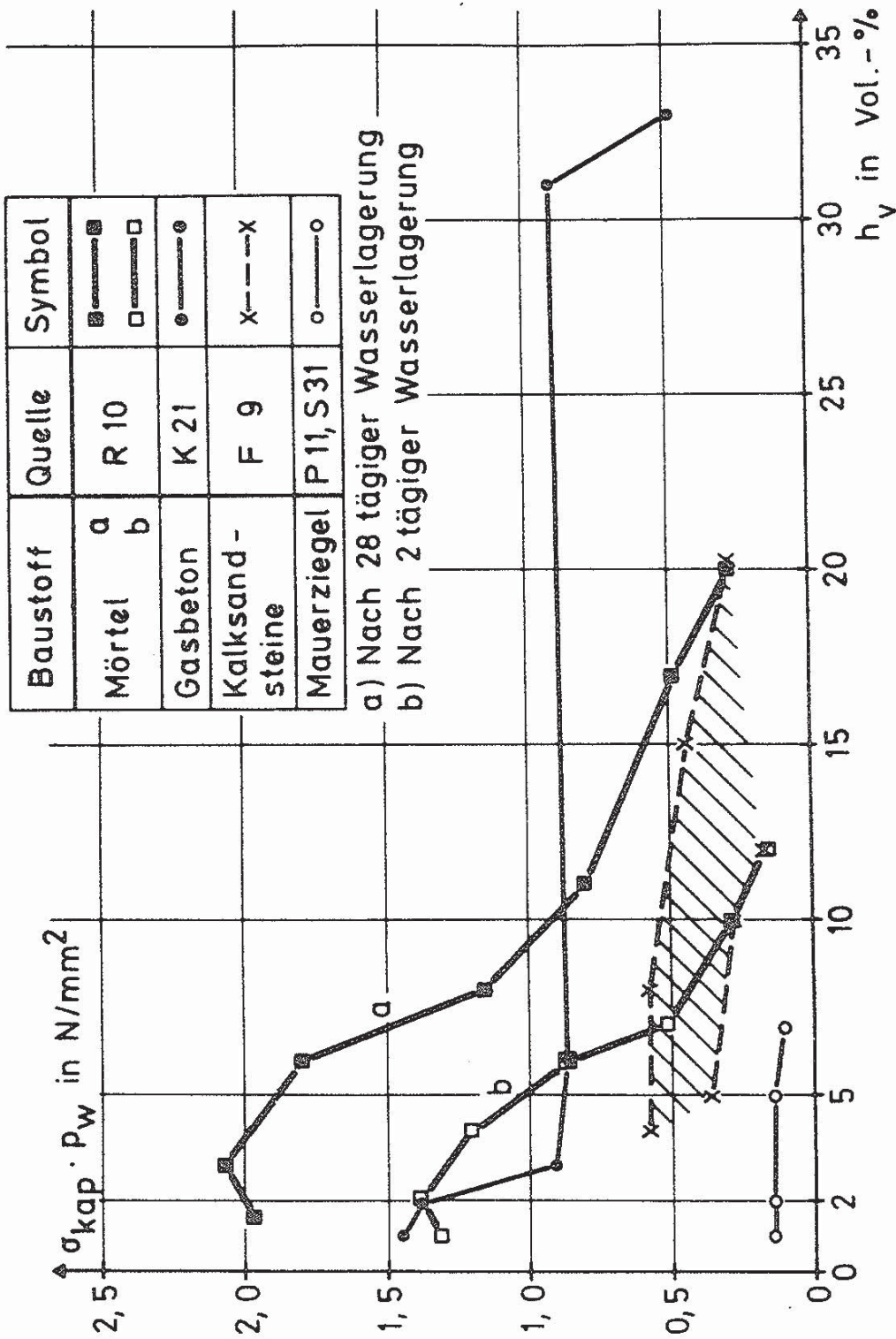
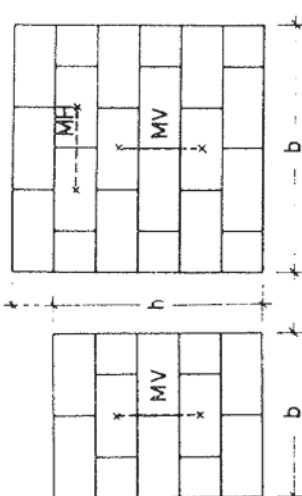
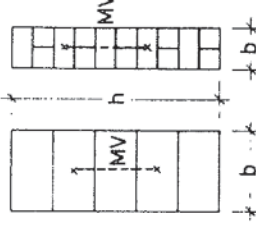
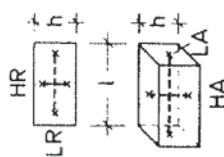


Bild 6.102: Mit dem Porenanteil  $P_w$  multiplizierte Kapillarzugschpannung  $\sigma_{kap}$  in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt  $h_v$



Angaben	Bestimmungsverfahren		
	versuchsmäßig	B1	versuchsmäßig - rechnerisch B2
Prüfrichtung	A	B1	B2
Prüfkörper	vertikal	vertikal	Steinlänge, Rand(LR)
Maße h (mm) b(l) (mm) d (mm)	Wände (Beispiel) 	Pfeiler P Pfeiler VP Steinbreite 	wahlweise Einzelstein 
	1250 $\geq 4d$ $\geq b$ $\geq 1250$ im allgemeinen: 240	Steinlänge Steinlänge Steinbreite Steinlänge	Steinlänge $\approx d$ $\geq 160$ $\approx 40$ bzw. Stegdicke
Vorbehandlung Mauersteine, Prismen	48 h Wasser (+20°C). 24 h Prüfklima	48 h Wasser (+20°C)	48 h Wasser (+20°C)
Meßeinrichtung	Meßstrecke: $\geq 500$ mm, mechanische Meßführen, Ablesegenauigkeit 10 <sup>-3</sup> mm, Meßpunkte geklebt	Meßpunkte je $\geq 20$ mm vom Steinrand, Ab- lesegenauigkeit mind. 10 <sup>-3</sup> mm	Meßstrecke: $\geq 160$ mm mechanische Meßführen, Ablesegenauigkeit 10 <sup>-3</sup> mm
Prüfklima	Temperatur: 20 °C $\pm$ 2K, relative Luftfeuchte: 65 % $\pm$ 5% (in der Regel)	Temperatur: 20 °C, U=30%	Temperatur: 20 °C, U=30%
Prüftermine [d]	siehe Tabelle 6.8.	siehe Tabelle 6.8.	0, 1, 2, 3, 5, 7, 10, 14, 21, 28, 56
Mindest- versuchsdauer	siehe Tabelle 6.8.	siehe Tabelle 6.8.	
Prüfgrößen	Feuchtedehnung	Feuchtedehnung	Feuchtedehnung, Feuchtigkeitsgehalt
Auswertung	siehe Abschnitt 7.2.3.2.	siehe Abschnitt 7.2.3.2.	siehe Abschnitt 7.2.3.2.

**Bild 6.103:** Verfahrensweise bei versuchsmäßig-rechnerischer Bestimmung von Endwert und Verlauf der Feuchtedehnung von Mauerwerk