

# **Zum Lehbau im Jemen**

## **unter besonderer Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTOR-INGENIEURS**

von der Fakultät für Architektur

der

Universität Karlsruhe  
(Technische Hochschule)

genehmigte

**DISSERTATION**

von

Dipl.-Ing.

Mokhtar Ali Abdulhafiz Abdo

aus

Taiz - Jemen

Tag der mündlichen Prüfung

23.07.2007

Referent

Prof. Matthias Pfeifer

Korreferent

Prof. Dr.-Ing. Klaus Dierks



## Vorwort

Ich wünsche mir, dass diese Arbeit und die Ideen in ihr einen Schritt nach vorne leisten, sodass der Baustoff Lehm immer noch als Hauptbaustoff im Jemen bleibt, wie es immer war, und Wünsche und Ideen sind es bekanntlich, die die Welt verändern.

Die Arbeit verdankt ihre Entstehung einer Anregung von Herrn Prof. Dipl.-Ing. Matthias Pfeifer. Für die fachliche Betreuung, Arbeitsmöglichkeit in Laboratorium und für die Unterstützung bei dem Überwinden von Schwierigkeiten während der gesamten Dauer sei Herrn Prof. Dipl.-Ing. Matthias Pfeifer, der Leiter des Instituts für Tragkonstruktionen Universität Karlsruhe, sehr herzlich gedankt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dierks von der Technischen Universität Berlin sage ich herzlichen Dank für die Übernahme des Korreferates und seine hilfreichen Anregungen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dipl.-Ing. Andreas Wagner, für seine Hinweise beim Gespräch im Bezug der klimatischen Messungen.

Wichtig für die Arbeit war ebenso die Mitarbeiter des Instituts für Tragkonstruktionen der Universität Karlsruhe mit ihrer freundlichen Unterstützung. Ich danke insbesondere Herrn Dr.-Ing. Hannes Eckert und dem Techniker Herrn Arnold Mager für seine immer Bereitschaft bei der Vorbereitung der Klimakammer und Ausführung der Versuche.

Danken möchte ich allen Hadhramiten, die mir bei der Ausführung der bauklimatischen Messungen ihre Häuser und Arbeitsplätze zur Verfügung gestellt haben. Mein besonderer Dank gilt hier der Alkufeil-Familie in Seiyun, Herrn Abdulrahman Al-Sakaaf, Herrn Dipl.-Ing. Abdullah Al-Sakaaf und allen Lehmbaumeistern, die meine Fragen gerne bei der Analyse der Bauweisen und ihrer Techniken geantwortet haben.

Ein unvergessenes Dankschön gilt Abdulkarim Alyeharie, Mohammed Bagnaid, Al-Scheich Ali Al-Shamie und seinen Brüdern sowie Kahtan Salem und Fathi Malek für ihren ermutigenden Zuspruch.

Ein herzlicher Dankschön mit Liebe und Entschuldigung gilt hier meiner Frau, meinen Kindern und meinen Eltern für ihre verständnisvolle Geduld und Nachsicht.



## Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen	10
Glossar	11
<b>1 Einleitung</b>	<b>13</b>
1.1 Einführung	13
1.2 Problemanalyse und Zielsetzung	16
1.2.1 Problemanalyse	16
1.2.2 Beweggründe und Zielsetzung	22
1.2.3 Methodisches Vorgehen	23
<b>2 Forschungsstand und Quellenlage</b>	<b>25</b>
2.1 Lehmbau hat eine lange Tradition im Jemen	26
2.2 Lehmbauten sind energiesparend	26
2.3 Einfluss der Strohzugabe	28
2.4 Einfluss der Zugabe von Kalk und Zement auf die Lehmfestigkeit	29
2.5 Verstärkung der gepressten Lehmsteine durch Sisalfasern bzw. eine Kombination von Sisalfasern und Zement	31
2.6 Einfluss der Materialfeuchte auf die Druckfestigkeit von Stampflehm	32
2.7 Einfluss der Trocknungsbedingungen auf die Festigkeit von Stampflehm	32
2.8 Verstärkung der Lehmsteinwände von mehrgeschossigen Lehmbauten gegen Erdbeben	35
2.9 Einfluss der Aufbereitung und Verarbeitung auf die Festigkeit von Lehm	36
2.10 Über Tone und Tonminerale	37
2.10.1 Korngröße von Tonteilchen	37
2.10.2 Kationenaustauschvermögen von Tonmineralen	37
2.10.3 Aggregation und Einordnung der Tonteilchen	39

2.10.4	Die DLVO-Theorie	41
2.10.5	Einfluss von pH-Wert und Temperatur auf die Einordnung der Tonminerale	41
2.10.6	Einfluss von Ca- und Na-Ionen auf eine Kaolinitwasser-Mischung	43
2.10.7	Einlagerung von Wasser an den Tonplättchen und Quellung von Ton	43
<b>3</b>	<b>Einflussfaktoren auf den Lehmbau im Jemen</b>	<b>47</b>
3.1	Geographische und topographische Einflüsse	47
3.2	Geologische Einflüsse	47
3.3	Klimatische Faktoren und regionale Gegebenheiten	50
3.3.1	Klimaregion der Küstengebiete	50
3.3.2	Hochlandklimaregion	51
3.3.3	Klimaregion des östlichen Plateau	51
3.3.4	Wüstenklimaregion	51
3.4	Historische und politische Faktoren	52
3.5	Migration und Binnenwanderung	53
3.6	Religiöse Einflüsse	55
3.7	Einflüsse der jemenitischen Wiedervereinigung 1990 auf dem Bausektor besonders in den Städten der östlichen und südlichen Provinzen im Jemen	58
3.8	Technische Faktoren	59
3.9	Einflüsse der Bewässerungssysteme	59
3.10	Beeinflussung durch Lebensformen	61
<b>4</b>	<b>Analyse der traditionellen Lehmbauweisen im Jemen</b>	<b>65</b>
4.1	Verwendung vom Baustoff Lehm für massive tragende Wände	65
4.1.1	Lehmsteinbau	65
4.1.1.1	Baugebiete	65
4.1.1.2	Ausführungstechniken	67
4.1.1.2.1	Herstellung der Lehmsteine	67

4.1.1.2.2	Gründung der Lehmsteinbauten	69
4.1.1.2.3	Ausführung der Lehmsteinwände	70
4.1.1.2.4	Vorteile der Lehmsteinbautechnik	78
4.1.1.2.5	Nachteile der Lehmsteinbautechnik	78
4.1.2	Zabourtechnik (Habl-Technik)	80
4.1.2.1	Baugebiete	80
4.1.2.2	Ausführungstechniken	82
4.1.2.2.1	Gründung der Zabourwände	82
4.1.2.2.2	Ausführung der Zabourwände	85
4.1.2.3	Vorteile der Zabourtechnik	86
4.1.2.4	Nachteile der Zabourtechnik	88
4.1.3	Geschützte Bauweise „Kombination aus Lehm und Naturstein“	90
4.1.3.1	Baugebiete	90
4.1.3.2	Ausführungstechniken	90
4.1.3.3	Vorteile	93
4.1.3.4	Nachteile	93
4.2	Lehm als nicht tragender Baustoff	94
4.2.1	Mit Lehm beworfenes Flechtwerk	94
4.2.1.1	Baugebiete	94
4.2.1.2	Ausführungstechniken	94
4.2.1.3	Vorteile	97
4.2.1.4	Nachteile	97
4.3	Bekannte Schutzmaßnahmen für die Lehmwände	98
4.3.1	Schutz durch Lehmputz	98
4.3.2	Schutz durch Lehmputz und Kalkanstrich	99

4.3.3	Schutz durch Kalkputz	99
4.3.4	Schutz durch Zementputz	103
4.3.5	Schutz durch Bauen des letzten Geschosses aus wasserfesten Materialien	103
4.4	Oft auftretende Schäden an den Lehmbauten und ihre Ursachen	108
4.5	Gründe für Rückgang von Lehmbau im Jemen	111
4.6	Bauklimatische Messungen in Seiyun-Palast im Wadi-Hadhramaut	113
4.6.1	Ziel der Untersuchung	113
4.6.2	Methodisches Vorgehen	113
4.6.3	Klima in Seiyun	113
4.6.3.1	Außenlufttemperatur	113
4.6.3.2	Außenluftfeuchte	114
4.6.3.3	Wind und Luftbewegung	115
4.6.4	Beschreibung von Testräumen	115
4.6.5	Messgeräte	118
4.6.6	Durchführung der Messungen	118
4.6.6.1	Messergebnisse im Sommermonat Juli 2003	120
4.6.6.2	Messergebnisse im Wintermonat Januar 2004	120
4.6.7	Vergleichsbewertung des Temperaturverlaufs innen und außen bei Testräumen	120
4.6.8	Vergleichsbewertung des Feuchteverlaufs innerhalb und außerhalb der Testräume	124
4.6.9	Bewertung der thermischen Behaglichkeit in den Testräumen	127
4.6.9.1	Bewertung der thermischen Behaglichkeit in den Testräumen nach dem Gleichgewichtsmodell	127
4.6.9.1.1	Bewertung der thermischen Behaglichkeit in den Testräumen nach dem Gleichgewichtsmodell während der Sommermessungen	129
4.6.9.1.2	Bewertung der thermischen Behaglichkeit in den Testräumen nach dem Gleichgewichtsmodell während der Winterermessungen	129

4.6.9.2	Bewertung der thermischen Behaglichkeit in den Testräumen nach dem adaptiven Modell	134
<b>5</b>	<b>Einfluss der jemenitischen Klimaverhältnisse auf die Trocknungs-Geschwindigkeit und Trockendruckfestigkeit (TDF) geschützter und nicht geschützter Versuchsreihen verschiedener Lehmmischungen</b>	<b>143</b>
5.1	Ziel der Untersuchung	143
5.2	Versuchsgeräte und Örtlichkeiten	143
5.3	Versuchsmaterialien	144
5.4	Bestimmung der Bindekraft des Ausgangsmaterials „Universallehm“ (UL)	146
5.4.1	Herstellung der Versuchskonsistenz „Normsteife“	146
5.4.2	Anfertigung des Probekörpers	149
5.4.3	Zerreiversuch	149
5.5	Quantitative und qualitative Analyse des Ausgangsmaterials „Universallehm“ (UL)	150
5.6	Sieb- und Sedimentationsanalyse von Versuchsmischungen „Sieblinien“	154
5.7	Bestimmung der Konsistenz der Versuchsmischungen durch Ausbreitmaßverfahren	160
5.8	Herstellung der Versuchsmischungen	160
5.8.1	Mischvorgang	161
5.8.2	Maukvorgang	161
5.9	Feststellung des Ausbreitmaßes	161
5.10	Bestimmung der erforderlichen Wassermenge in den Versuchsmischungen	161
5.11	Ermittlung des Trockenschwindmaßes der Versuchsmischungen nach DIN 18952	162
5.12	Ermittlung des Trockenschwindmaßes der nach dem Verarbeitungszustandsverfahren (VZV)	164
5.13	Herstellung der Probekörper	168
5.13.1	Abmessungen der Probekörper	168

5.13.2	Formen der Probewürfel	168
5.14	Einfluss der sommerlichen und winterlichen Klimabedingungen auf die Trocknungsgeschwindigkeit und Trockendruckfestigkeit verschiedener Lehmischungen	169
5.14.1	Ziel der Untersuchung	169
5.14.2	Vorgehensweise	169
5.14.2.1	Versuche zur sommerlichen Klimabedingungen	169
5.14.2.2	Versuche zur winterlichen Klimabedingungen	174
5.14.2.3	Herstellung der Referenzreihe (Versuchsreihe 11)	178
5.14.3	Zwischenauswertung	178
5.15	Einfluss der Schutzschalen auf die Trocknungsgeschwindigkeit und die Trockendruckfestigkeit bei verschiedenen Lehmischungen	183
5.15.1	Ziel der Untersuchung	183
5.15.2	Vorgehensweise	185
5.15.3	Zwischenauswertung	185
5.16	Einfluss der Schutzschalen auf die Trocknungsgeschwindigkeit und die Trockendruckfestigkeit von Versuchsreihen gleicher mineralischer Zuschläge verschiedener Tonmengen	190
5.16.1	Ziel der Untersuchung	190
5.16.2	Vorgehensweise	190
5.16.3	Zwischenauswertung	191
5.17	Auswertung der Versuche	194
5.17.1	Einfluss der sommerlichen und winterlichen Trocknungs-Bedingungen auf die Trockendruckfestigkeit verschiedener Lehmischungen	194
5.17.2	Einfluss der Schutzschalen auf die Trocknungsgeschwindigkeit und Trockendruckfestigkeit der Versuchsreihen	196
5.17.3	Einfluss der mineralischen Zuschläge auf die Trockendruck-Festigkeit TDF der Lehmischungen gleicher Tonmenge	198

5.17.3.1	Einfluss der Kornform	198
5.17.3.2	Einfluss der Korngröße	202
5.18	Bewertung der Streuung der Versuchsergebnisse	208
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>213</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>217</b>
<b>8</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>225</b>
8.1	Abbildungsverzeichnis	225
8.2	Tabellenverzeichnis	233
8.3	Literaturverzeichnis	235
	<b>Anhang</b>	<b>241</b>

## Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Bruchfläche	[m <sup>2</sup> ]
C	Die konvektiven Wärmeverluste durch die externe Kleidungsoberfläche	[W/m <sup>2</sup> ]
c	Spezifische Wärme	[J/kgK]
E <sub>diff</sub>	Die latente Wärmeabgabe infolge Dampfdiffusion durch die Haut	[W/m <sup>2</sup> ]
E <sub>rl</sub>	Der latente Wärmeverlust durch Schweißverdunstung	[W/m <sup>2</sup> ]
E <sub>rs</sub>	Der trockene Wärmeverlust infolge Atmung	[W/m <sup>2</sup> ]
E <sub>sw</sub>	Die Wärmeverluste durch Schweißverdunstung	[W/m <sup>2</sup> ]
F	Bruchlast	[N]
g	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
H	Die innere Wärmeproduktion	[W/m <sup>2</sup> ]
I <sub>cl</sub>	Die Bekleidungsisolierung	[m <sup>2</sup> .K/W]
L	Kantenlänge der Probewürfel	[mm]
m	Der hydraulische Radius	[m]
n	Porosity	[%]
n	Stichprobenumfang	
Q <sub>s</sub>	Das Wärmespeichervermögen in	[kJ/m <sup>2</sup> K]
R	Die relativen Wärmeverluste durch die externe Kleidungsoberfläche	[W/m <sup>2</sup> ]
RH	Relative Luftfeuchte	[%]
s	Bauteildicke	[m]
σ	Druckspannung	[N/mm <sup>2</sup> ]
S	Standardabweichung „positive Quadratwurzel der Varianz“	
S <sup>2</sup>	Die Varianz „durchschnittliche Abweichung vom Mittelwert“	
T	Temperatur	[°C]
T	Tonmenge	[%]
t	Zeit	[s]
T <sub>c Max</sub>	Maximale Komforttemperatur	[°C]
T <sub>c Mean</sub>	Mittlere Komforttemperatur	[°C]
T <sub>c Min</sub>	Minimale Komforttemperatur	[°C]
T <sub>o Max</sub>	Langjährige maximale Außenlufttemperatur	[°C]
T <sub>o Mean</sub>	Langjährige mittlere Außenlufttemperatur	[°C]
T <sub>o Min</sub>	Langjährige minimale Außenlufttemperatur	[°C]
V	Varianzkoeffizient „mittlere Abweichung der Messwerte“	
X <sub>m</sub>	Mittlere Kantenlänge der Probewürfel	[mm]
X <sub>max</sub>	Maximaler Messwert	
X <sub>min</sub>	Minimaler Messwert	
$\bar{X}$	Arithmetisches Mittel „Mittelwert einer Messreihe“	
X <sub>i</sub>	Messwerte	
Y <sub>m</sub>	Mittlere Kantenbreite der Probewürfel	[mm]
Z <sub>m</sub>	Mittlere Kantenhöhe der Probewürfel	[mm]
β	Sohlneigung	[%]
β <sub>D</sub>	Druckfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]
ρ	Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>R</sub>	Trockendichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
ν	Sinkgeschwindigkeit	[m/s]

## Abkürzungen:

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
AREA	Agricultural Research and Extension Authority
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
AWD	Außenwanddicke
BS	Brechsand
CeC	Zementzugabe
C-SC	Zement-Sisalzugabe
FEB	Forschungslabor für experimentelles Bauen
Gew.	Gewicht
MV	Mischungsverhältnis
OFT	Oberflächentemperatur
OFT Dach	Oberflächentemperatur vom Dach
OFT Fußb.	Oberflächentemperatur vom Fußboden
OFT NW	Oberflächentemperatur der Nordwand
OFT OW	Oberflächentemperatur der Ostwand
OFT SW	Oberflächentemperatur der Südwand
OFT WW	Oberflächentemperatur der Westwand
PEI	Primärnergieinhalt
PMV	Das voraussagte mittlere Votum (predicted mean vote)
PPD	Der voraussagte Prozentsatz an Unzufriedenheit (predicted percentage of dissatisfied)
PUCP	Catholic University of Peru
RK	Rundkies
RS	Rundsand
SC	Sisalzugabe
SKB	Sommerliche Klimabedingungen
Spl.	Splitt
SUDP	Shibam Urban Development Project
TDF	Trockendruckfestigkeit
UL	Universallehm
VZV	Verarbeitungszustandsverfahren
WKB	Winterliche Klimabedingungen

## Glossar:

<b>Wort</b>	<b>Bedeutung</b>
Busot	Schicht aus Jabourzweigen in Lehmörtel verlegt
Elb-Holz	Hellbraunes Holz aus Christudornbäumen, deren Höhe 5 m betragen kann. Sie wachsen vor allem in den süd- und südöstlichen Regionen des Jemen. Es wird auch "Sidr" genannt. Traditionell wurde es als Dach- und Deckenbalken verwendet.
Jabour	Bäume die maximal 2 m hoch sind, wachsen in den süd- und südöstlichen Regionen des Jemen. In Taiz Region werden sie "Mudhad" genannt.
Ramad	Die Asche von Kalkbrennöfen
Taneb-Holz	Hochwertiges hellrotes Holz, wächst fast in allen Regionen des Jemen außer der Küsten- und Wüstengebiete. Seine Bäume können 5-6 m hoch sein. Traditionell wurde es oft für Decken- und Dachbalken sowie Türen- und Fensterarbeiten verwendet.



# 1 Einleitung

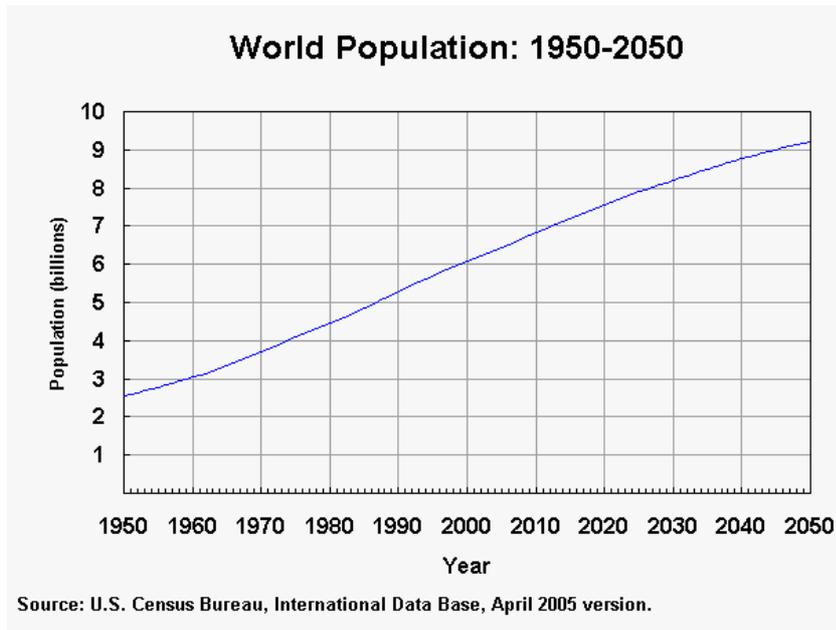
## 1.1 Einführung

Die UN-Deklarationen sprechen von einer Gesamtweltbevölkerung von über 8,11 Mrd. im Jahre 2030. Davon werden 60,3% in Städten leben [129, 130]. Nach Abb. 1.1-1 wird die Gesamtweltbevölkerung im Jahre 2050 über 9,3 Mrd. liegen. Die Baukapazitäten sind in den Gebieten, in denen dieses Wachstum hauptsächlich stattfindet, schon heute viel zu gering. Mehr als eine Milliarde Menschen, die meisten von ihnen in den Entwicklungsländern, sind obdachlos oder leben in Bauten von sehr schlechter Qualität [17]. Die Ressourcenknappheit und der weltweit steigende Bedarf an Primärenergie und an elektrischer Energie verhindern aber in diesen Gebieten wegen der hohen Energiekosten eine weitere Mechanisierung der Bauprozesse und den Einsatz von höheren Technologien, vgl. Abb. 1.1-2. Der weltweit wachsende Energieverbrauch ist mit steigender umweltschädigender Schadstoffimmission verbunden. Die Klimaveränderungen, die eine Folge davon sind, haben globale Auswirkungen. Deshalb hat die internationale Gemeinschaft die Aufgabe und zugleich die Verantwortung, die energiebedingten Schadstoffimmissionen auf ein verträgliches Maß zu reduzieren.

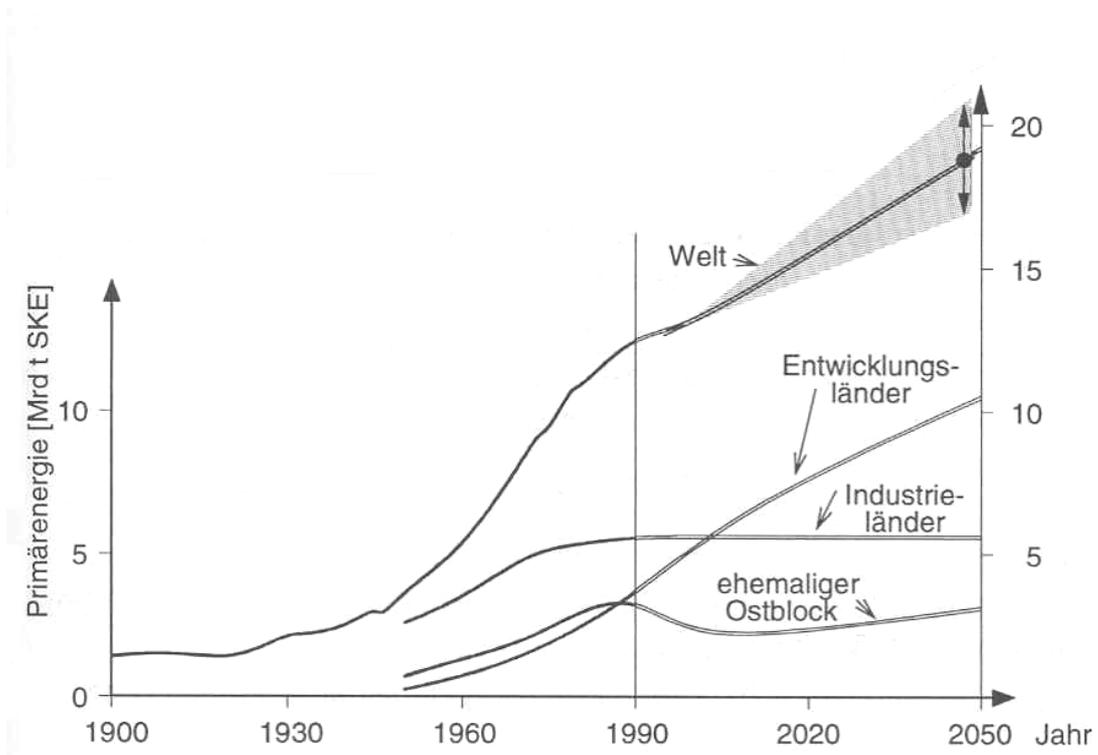
Auf dem Bausektor, bei Baustoffen und Bautechnologien, könnte man durch das Einhalten bestimmter Prinzipien bei der Baustoffauswahl und klimagerechtem Bauen einen sehr großen Beitrag leisten, um Energie zu sparen. Ein oft übersehener Aspekt des Energieverbrauchs sind die Kosten für die Herstellung vieler oft benutzter Baumaterialien, der sogenannte Primärenergieinhalt (**PEI**) von Baustoffen.

In der Zukunft werden unsere Baustoffe nicht mehr nur noch nach ihren technischen Voraussetzungen bewertet werden, sondern auch nach ihrer Ökobilanz (Life-cycle-Analyse). Wobei folgende Gesichtspunkte eine Rolle spielen:

- Umweltbelastung
- Energieverbrauch
- Recyclingmöglichkeiten
- Gesundheitsfragen



**Abb. 1.1-1 Weltbevölkerungswachstum zwischen 1950 und 2005 und Prognose bis zum Jahr 2050 [29]**



**Abb. 1.1-2 Entwicklung des weltweiten jährlichen Bedarfs an Primärenergie und elektrischer Energie (1900-2050) [60]**

Die unnötige Verwendung von Baustoffen mit höherem **PEI** vergeudet Energie. Dabei sind die Industrieländer das Vorbild und die Entwicklungsländer die Imitatoren.

Der Baustoff Lehm gehört zu den Baumaterialien, die einen niedrigen **PEI** haben. In der Tabelle 1.1-1 kann man leicht erkennen, dass 1 m<sup>3</sup> Lehm zum Transport und zur Aufbereitung nur etwa 1% der notwendigen Energie zur Herstellung von 1 m<sup>3</sup> Zementbeton benötigt.

<b>Baustoff</b>	<b>Primärenergieinhalt (PEI) in [kWh/m<sup>3</sup>] *</b>	<b>Quelle</b>
Lehm	1-5	[118]
Portlandzement	3484	[96]
Normalbeton C25/30 mit Portlandzement	345	[96]
Leichtbeton	≈ 950 - 1050	[118]
Stahlbeton	≈ 1500	[118]
Mauerziegel (Lochziegel)	≈ 861	[96]
Kalksandstein	≈ 336	[96]
Gasbetonsteine	≈ 472	[96]
Bauschnittholz	≈ 172	[96]
Holzspanplatte	≈ 417	[96]
Profilstahl	56082	[96]
Betonstabstahl	65130	[96]
Aluminium	195615	[96]

\* Die Angaben in der Literatur in [MJ/m<sup>3</sup>] wurden in [kWh/m<sup>3</sup>] umgerechnet.

**Tabelle 1.1-1 Primärenergieinhalt (PEI) einiger Baustoffe im Vergleich mit Lehm**

Bereits vor 9000 Jahren wurde der Lehm als Baustoff verwendet [112].

Es ist bekannt, dass etwa ein Drittel der Erdbevölkerung heutzutage in Lehmhäusern lebt [137]. In den Entwicklungsländern leben ca. 50% der Bevölkerung in Lehmhäusern, darunter mindestens 20% in den städtischen und vorstädtischen Gebieten und der Rest in den ländlichen Gebieten [64].

Der Lehm wurde in allen alten Kulturen als Baustoff für Wohn-, Sakral- und Befestigungsanlagen verwendet. Da sowohl die Wände der Wohn-, Herd- und Kellergruben als auch die aufgehenden Wände der Bauten aus Lehm bzw. Flechtwerk mit Lehmewurf bestanden, war der Lehm nicht nur das am häufigsten, sondern auch das am vielseitigsten verwendete Baumaterial [57].

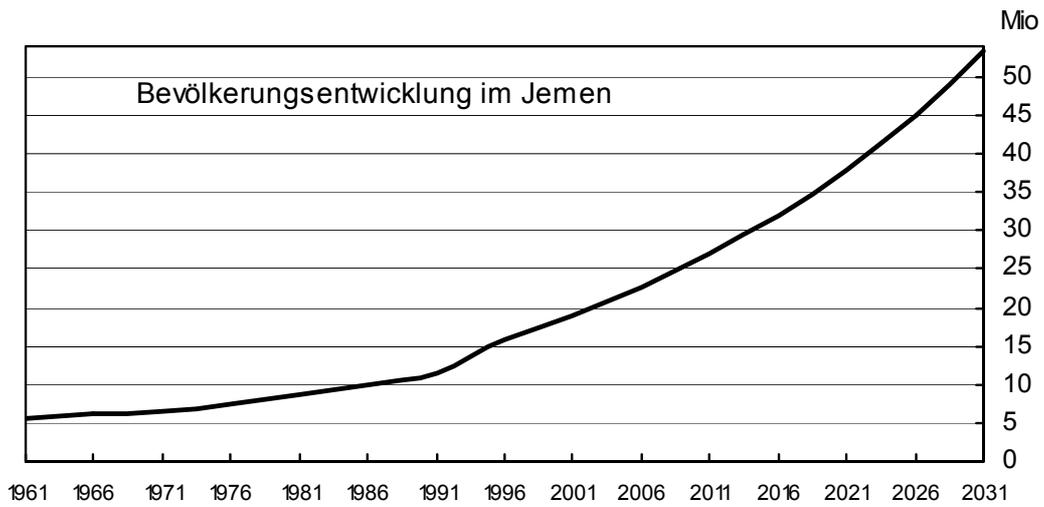
Die Lehmbauweisen bieten uns viele Antworten auf aktuelle Fragen zur Energieersparnis und Bauökologie. Der Vorrat an Lehm ist tatsächlich unbegrenzt und der Baustoff Lehm kann in irgendeiner Form fast in allen klimatischen Zonen verwendet werden. Automatisches Selbstrecyceln funktioniert bei Lehmbauten hervorragend, falls sie eines Tages vernachlässigt werden.

## **1.2 Problemanalyse und Zielsetzung**

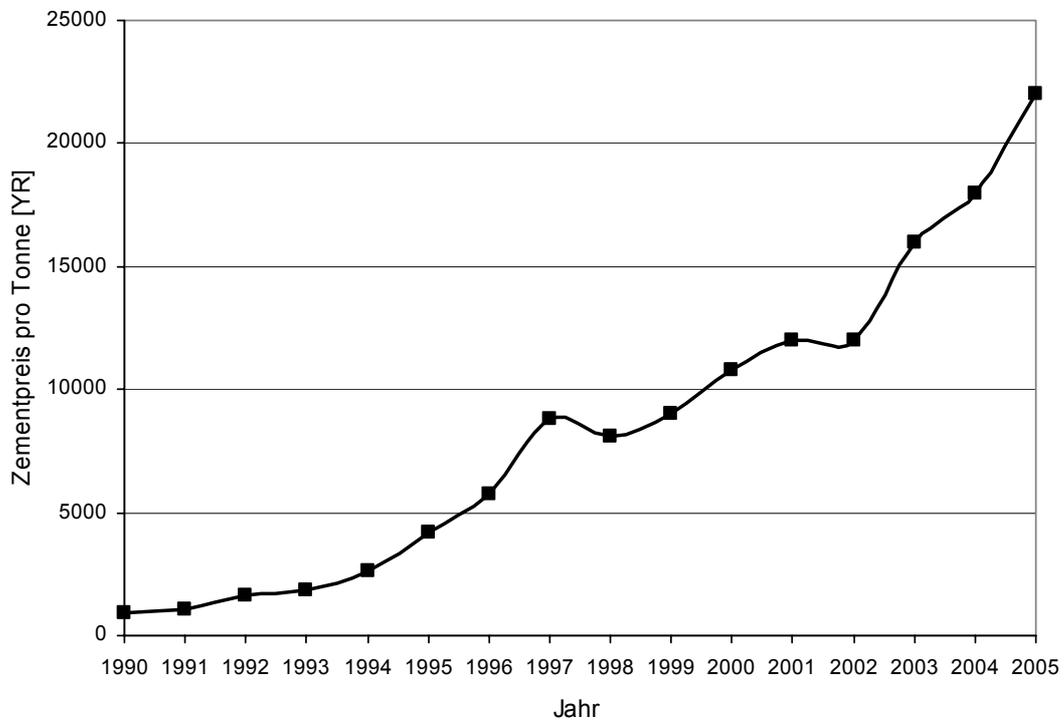
### **1.2.1 Problemanalyse**

Im Jemen vollzieht sich gegenwärtig ein enormer Verstärkerungsprozess. Der Wohnbedarf ist wie in vielen Entwicklungsländern sehr hoch. Erster Grund dafür ist das hohe Bevölkerungswachstum. Die jährliche Wachstumsrate beträgt 3,5% [85]. Das heißt, dass im Jahre 2021 ca. 38 Mio. Einwohner im Jemen leben werden, vgl. Abb. 1.2-1 und [2]. Der zweite Grund für den hohen Wohnbedarf ist die stetig abnehmende Wohnkapazität aufgrund der allgemeinen Verschlechterung der Wirtschaftslage und der hohen Inflationsrate, die die Preise von den Baustoffen drastisch steigern lassen. In der Abb. 1.2-2 kann man die Entwicklung der Zementpreise in den letzten 15 Jahren im Jemen erkennen. Hohe Energiepreise und eine immer größere Nachfrage steigern auch weltweit die Preise von Betonstahl. Der Jemen produziert nur 30-40% seines Bedarfs an Zement, und importiert Stahl aus dem Ausland, was die Preise von Beton und Stahlbeton noch weiter erhöht [11].

Bis heute finden immer noch die traditionellen Lehmbautechniken im Jemen Verwendung. Die Lehmsteintechniken sind in den südlichen und östlichen Regionen verbreitet. Die Zabourtechnik findet man in den Regionen Dhamar, Sana'a, Amran und Sa'da. In der Tihama Region sind die so genannten Tihama-Hofhäuser aus Flechtwerk mit Lehmewurf verbreitet. Im jemenitischen Gebirgsland wird Lehm, mit Naturstein kombiniert, als geschützter Kern für tragende Wände in den Gebäuden und Zisternenbauten verwendet, s. Abb. 4.1-1.



**Abb. 1.2-1 Bevölkerungswachstum im Jemen zwischen 1961 und 2003  
und Prognose bis zum Jahr 2031**  
Daten nach [85, 86, 87, 88]



**Abb. 1.2-2 Entwicklung der Zementpreise im Jemen in  
den letzten 15 Jahren**  
Daten nach [11, 56, 85, 86, 87, 88]

Leider haben die traditionellen Lehmbautechniken neben ihren Vorteilen einige Nachteile und Schwachstellen, vgl. Kap. 4.

Die schnelle Trocknung der frisch geformten Zaboutwände bzw. Jabour-Schichten bei der Lehmsteintechnik führt zur starken Rissbildung wegen der entstehenden unterschiedlichen Schwindspannungen zwischen den Oberflächen und dem Kern der Wände. Der Regen im Jemen kann plötzlich und mit außerordentlicher Intensität fallen und wird dabei meistens von starkem Wind und Hagel begleitet. Regenwasser fließt dann in die vertikalen Schwindrisse und verursacht starke Erosionen an den Wänden. Starke Sonnenstrahlung führt zur Übertrocknung der Oberflächen von nicht geputzten Lehmwänden, die dann in der Regenzeit sehr stark quellen. Dieser Mechanismus von oft auftretendem Schwinden und Quellen führt zu Abblätterung der Lehmwände, s. Abb. 4.1-25 bis 4.1-27 und Abb. 4.1-17 sowie Abschnitt 4.1.



**Abb. 1.2-3 Das Gebäude in der südwestlichen Ecke der Stadt Shibam hat seine Standsicherheit verloren aufgrund starker Regen- und Hagelfälle sowie verzögerter Restaurierung, Januar 2004**

Die relativ lange Wartezeit (mindestens ein Jahr) bei dem Austrocknungsprozess vor den Putzarbeiten führen zur Verzögerung der endgültigen Fertigstellung der Bauwerke, was zur Verspätung der Auszahlung der Kautionsbeträge der Bauunternehmer führt, und somit eine Erhöhung der Baukosten verursacht. Während dieser Wartezeiten könnten zusätzlich erhebliche Regen- und Hagelschäden auftreten. Ein verfrühter Verputz führt zu einer Verlängerung der ohnehin schon beträchtlichen Austrocknungszeit. Außerdem kommt es aufgrund des nicht abgeschlossenen Schwindens und Kriechens zur schaligen Putzablösung. Es kann zur erheblichen Durchfeuchtung der teilgeputzten Lehmwände kommen. Neben den raumklimatischen und ästhetischen Auswirkungen ist dadurch bei vielen Gebäuden sogar die Standsicherheit beeinträchtigt, vgl. Abb. 1.2-3 sowie [53, 142].

Die traditionellen Putzschichten haben bis jetzt nicht die optimale Lösung für den Schutz der Lehmwände gegen Erosion geliefert. Mangelhafte Ausführung des Verputzes, mechanische Spannungen, die aufgrund thermisch und hygriisch bedingter unterschiedlicher Längenänderungen von Putz und Putzgrund verursacht werden, und die Rissbildung in den Putzflächen führen zur Ablösung des Putzes, s. Abb. s. Abb. 1.2-4 sowie Abb. 4.3-6 bis Abb. 4.3-8.

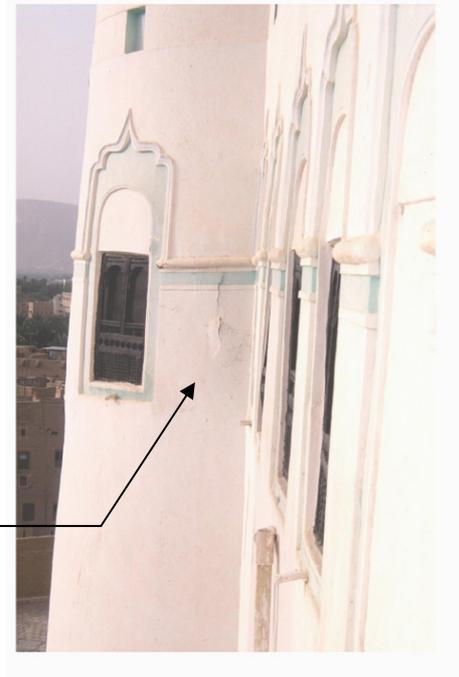
Leider haben die obengenannten Schwierigkeiten an den traditionellen Bauweisen dazu geführt, dass viele Bauherren und Bauunternehmer Bauweisen mit neuen Baustoffen (Beton, Stahlbeton, Ziegel, Stahl, Aluminium, etc.) bevorzugen. Die größten Mengen dieser Baustoffe werden vom Ausland importiert, damit steigen Importabhängigkeit und somit Baukosten an.

In der Feldstudie, Hadhramaut-Region, kann man aus der Abb. 1.2-7 ablesen, wie die Bautätigkeit zwischen 1999 und 2003 wegen der oben genannten Gründe gesunken ist. Obwohl mehr als 81% der gebauten Gebäude Wohnbauten sind, wurden durchschnittlich 50% von ihnen als Beton- und Stahlbetonbauten errichtet. Der Baustoff Lehm wird von Beton und Stahlbeton verdrängt, vgl. Abb. A-1-1 bis Abb. A-1-4. Im Jahre 1999 wurden noch 51,13% der gebauten Häuser aus Lehm errichtet, im Jahre 2003 wurden nur noch 33,10% der gesamten errichteten Gebäude aus Lehm gebaut. Die Hauptgründe dafür sind die relativ dicken Lehmwände und die steigenden Grundstückspreise sowie die hohen Pflegekosten der Lehmbauten, besonders bei Miethäusern vgl. Kapitel 3.

**Abb. 1.2-4 Beispiel für Putzabplatzungen am Seiyun-Palast, ein Jahr nach der letzten Renovierung 2002**

Die Schwindrisse in der Putzschicht lassen Wasser eindringen, wodurch der Lehm aufquillt.

Die Putzschicht wird nach außen gedrückt, dadurch werden die Schwindrisse breiter, danach dringt mehr Regenwasser ein, das zum starken Quellen der Lehmwand führt. Die beschädigte Fläche verbreitert sich, und die Putzschicht platzt ab\*.

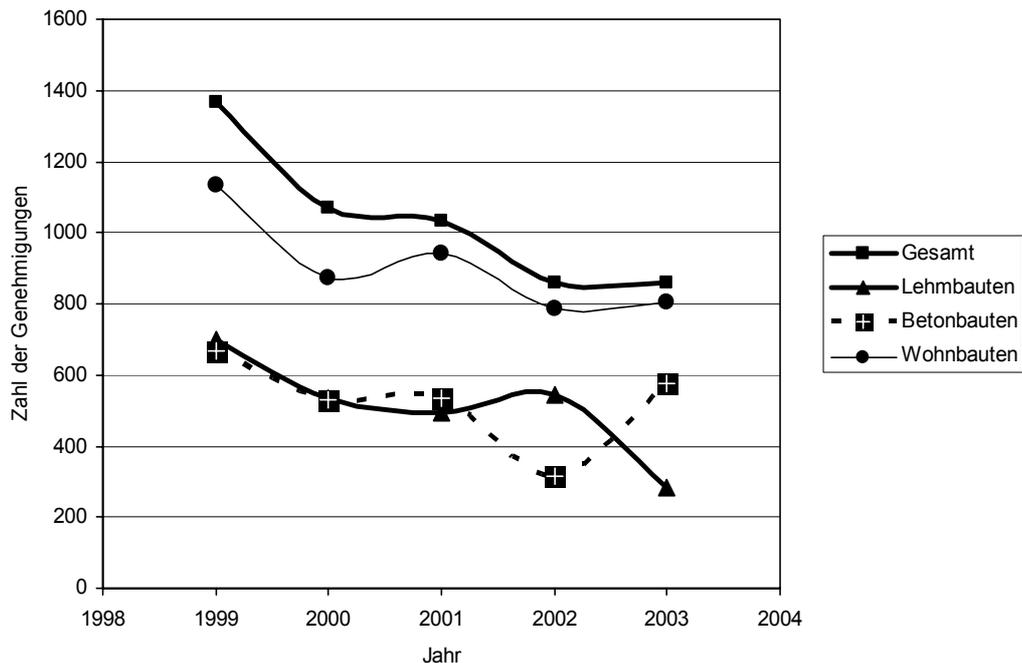


**Abb. 1.2-5 Putzschäden an den Ecken, (Anbau am Seiyun-Palast)\***



**Abb. 1.2-6 Putzschäden bei den Türrahmen, (Anbau am Seiyun-Palast)\***

\* Bildaufnahme: August 2003



**Abb. 1.2-7 Gesamtbaugenehmigungen in der Region Hadramaut von 1999 bis 2003 (umfasst Lehmbauten, Betonbauten). Die Abbildung zeigt auch die errichteten Wohnbauten in der gleichen Zeitperiode.**  
Daten nach [85, 86, 87, 88]

Anhand der Analyse der traditionellen Lehmbauweisen (s. Kapitel. 4) kann man erkennen, dass die in der Sommerzeit geformten bzw. gebauten Lehmbauteile mehr Schwindrisse und somit Erosionsanfälligkeit zeigen, als die Elemente, die in Winterzeiten geformt bzw. gebaut wurden.

Eine Beimengung von Stroh in die Lehmmischung um Rissbildungen zu verringern, führt leider gleichzeitig zur Verminderung der Druckfestigkeit des Lehmes. Deswegen müssen die Lehmwände mit Strohzusatz sehr dick gebaut werden, vgl. Kapitell 2.

Es stellen sich folgende Fragen:

- 1) Wie stark wird die Druckfestigkeit unterschiedlicher getrockneter Lehm-Mischungen unter sommerlichen bzw. winterlichen Klimabedingungen im Jemen beeinflusst?**

- 2) **In welchem Maß hat eine langsame Trocknung durch kapillar leitende Kräfte Einfluss auf die Druckfestigkeit unterschiedlicher Lehm-Mischungen?**
  
- 3) **Welche Wirkung hat eine Magerung der Lehmmischungen mit mineralischen Zuschlägen anstatt der Beimengung vom Stroh?**

Antworten auf diese Fragen sind deswegen wichtig, weil Schutzschalen für die modernen Lehmwände gegen schnelle Trocknung, zu starke Sonnenstrahlung und Regen- und Hagelfälle eine große Rolle bei der Konstruktion und dem Bauen von modernen Lehmbauten in Zukunft spielen werden, wenn eine Überdimensionierung der Lehmwände vermieden wird und somit der Anteil der Nutzfläche in den Gebäuden erhöht werden soll.

Der Bedarf besonders an Wohnungen im Jemen wird in den nächsten Jahrzehnten derart riesige Ausmaße annehmen, dass die Entwicklung von neuen Lehmbauweisen, die die Vorteile der traditionellen Bauweisen verstärken und deren Nachteile beseitigen einer der wichtigsten Wege zur Lösung des Problems sein dürfte.

### **1.2.2 Beweggründe und Zielsetzung**

Der Wunsch vieler Bauherren wegen des hohen Anteils der Wandquerschnittsflächen bei den traditionellen Lehmbautechniken und aufgrund der steigenden Grundstückspreise dünnere Lehmwände zu bauen, motivierten den Verfasser, einen Beitrag zur Lösung dieses Problems zu leisten. Weitere Beweggründe sind die hohen Pflegekosten und die Überdimensionierung der Lehmwände bei den traditionellen Lehmbauweisen wegen der Erosions- und Durchfeuchtungsgefahr.

Grundlegende Untersuchungen über die Auswirkung von Klimabedingungen im Jemen auf die Festigkeit vom Baumaterial Lehm existieren bislang nicht. Ebenfalls fehlen Studien über diese Wirkung in ähnlichen Klimaten.

Daher ist das erste Ziel der vorliegenden Arbeit, einen Beitrag zur **Bauforschung über die traditionellen Lehmbauweisen im Jemen und ihre Vorteile, Nachteile, Ausführungstechniken, Verbreitungsgebiete und oft auftretenden Schäden sowie übliche Schutzmaßnahmen zu leisten. Es werden Lösungsansätze für die modernen Lehmbautechniken hergeleitet.**

Da viele traditionelle Kenntnisse und Regeln über die Errichtung von Lehmbauten im Jemen in den letzten 40 Jahren verloren gegangen sind, ist **eines zweites Ziel dieser Arbeit, einige Kenntnisse, die bis jetzt nicht von anderen Autoren genannt wurden, zu sammeln und durch Detailzeichnungen und ausführliche Beschreibungen zu dokumentieren.**

Die verschollenen Kenntnisse sollten gesammelt werden, nicht nur um wertvolle historische Gebäude erhalten zu können, sondern auch um neue Anwendungen und moderne Technologien zu entwickeln.

**Ein wichtiges Ziel besteht darin, die Wirkung der sommerlichen und winterlichen Klimabedingungen im Jemen auf die Festigkeit von Lehmmischungen gleicher Tonmenge und unterschiedlicher Zuschläge zu untersuchen und diese Wirkung bei der verzögerten Trocknung der Probekörper in 3 cm dicken Schutzschalen aus einem kapillar leitenden Material, bei dieser Arbeit „Ytong“ gewählt, zu prüfen.**

**Viertes Ziel dieser Arbeit ist die Feststellung des Einflusses der Lehmwandstärke auf das Raumklima in den kritischen Monaten und in der kritischen Klimaregion im Jemen „Wadi-Hadhramaut“, um klimatische Kenntnisse und Grundlagen für die Entwicklung von modernen Lehmbauweisen zu erhalten.**

### **1.2.3 Methodisches Vorgehen**

Um die oben genannten Ziele zu realisieren, wurden folgende Methoden angewandt:

- Analyse und Studie der wesentlichen Einflussfaktoren auf den Lehmbau im Jemen, um die Wirkung der historischen, religiösen, klimatischen, soziologischen, wirtschaftlichen, geologischen und geografischen Situationen auf die Entwicklung von Lehmbautechniken zu untersuchen, vgl. Kapitel 3;
- Analyse der traditionellen Lehmbautechniken (s. Kap. 4): Dabei wurden die schon vorhandenen Angaben in der Literatur durch Objektbesichtigung in Seiyun, Tarim, Shibam, Sa'da, Sana'a und Ma'bar ergänzt. Detaillierte Informationen zu Ausführungstechniken, Konstruktionen, Vorteilen, Nachteilen, Schutzmaßnahmen, oft auftretenden Schäden und Baukosten wurden durch eine insgesamt viermonatige Arbeit, in drei durchgeführten Reisen in den Jahren 2003, 2004, 2005, gesammelt. Diese Feldarbeit wurde an den Baustellen, Herstellungsstätten der

Lehmsteine und Kalkputze sowie durch Besprechungen mit erfahrenen Lehmbaumeistern in den oben genannten Gebieten durchgeführt, weil viele Besonderheiten der traditionellen Lehmbautechniken im Jemen von den anderen Autoren bis jetzt nicht behandelt wurden. Es gibt viele Ansätze bei den traditionellen Lehmbautechniken, die bei der Entwicklung moderner Lehmbautechnologien genutzt werden können, vgl. Kapitel 4.

- Durchführung von bauklimatischen Messungen in den kritischen Klimamonaten an einigen Testhäusern in Seiyun Wadi-Hadhramaut (die kritische Klimaregion im Jemen), um die Wirkung der Veränderung von Lehmwandstärken auf das Raumklima zu untersuchen, und das thermische und hygrische Verhalten von Lehmwänden verschiedener Dicken festzustellen. Daraus sollen Schlussfolgerungen hergeleitet werden, die bei der Entwicklung moderner Lehmbauweisen mit dünneren Lehmwänden nützlich sein können, vgl. Abschnitt 4.6.
- Untersuchung der Einflüsse von sommerlichen und winterlichen Klimabedingungen im Jemen auf die Druckfestigkeit von je fünf Probekörpern in insgesamt zehn Versuchsreihen und für fünf verschiedene Lehmmischungen gleicher Konsistenz und unterschiedlicher Zuschläge. Das Ausgangsmaterial „Universallehm“ (s. Kap. 5) hat eine Tonmenge von 25% vgl. Abb. 5.6-1 sowie Tab. 5.5-1. Alle anderen vier Mischungen werden mit Rundsand, Brechsand, Rundsand + Kies, und Brechsand + Splitt gemagert, sodass jede Mischung genau 10 % Tonmenge enthält, mehr dazu im Kapitel 5.
- Untersuchung der Einflüsse der langsamen Trocknung durch kapillar leitende Kräfte von Schutzschalenwänden auf die Druckfestigkeit der Versuchsreihen. Dabei werden insgesamt 18 Versuchsreihen, je fünf Probekörper, hergestellt. Es werden neun von diesen Versuchsreihen geschützt und neun nicht geschützt, um sie miteinander zu vergleichen. Bei dieser Untersuchung werden insgesamt sieben verschiedene Mischungen verwendet, davon sind die fünf oben genannten Mischungen. Bei der sechsten und der siebenten Mischung wird das Ausgangsmaterial „Universallehm“ mit Brechsand gemagert, sodass die Tonmenge einmal 15% und einmal 5% beträgt.
- Als Referenzreihe wird eine Versuchsreihe aus der Mischung (Universallehm + Brechsand mit 10% Ton) hergestellt und unter den Trocknungsbedingungen von DIN 18952 Blatt 2 (zurückgezogen) getrocknet.

## 2 Forschungsstand und Quellenlage

Der bis heute erreichte Forschungsstand im Bereich jemenitischen Lehmbaus lässt noch zahlreiche Probleme von Lehm als Baustoff offen. Bazara [18] und Damluji [31] haben sich mit den Grundlagen zum Lehmgeschossbau in Wadi-Hadhramaut beschäftigt. Beide Forschungsarbeiten haben einige Beschreibungen über Bauformen und Ausführungstechniken bzw. Aufmaßen für einige historische Lehmbauten geliefert. Detaillierte Besonderheiten in der Lehmsteintechnik, wie die Ausführung von Jabour-Schichten wurden weder bei der Beschreibungen erwähnt noch durch Detailzeichnungen dargestellt. Die Zabourtechnik wurde auch in den beiden Forschungsarbeiten nicht erwähnt.

Die bis jetzt in der Literatur gelieferten Beschreibungen über Ausführungstechniken von Zabourbauweise sind allgemein und weitgehend ähnlich. Detaillierte Angaben über Materialkonsistenz, Erosion, Armierung der Wände und eine genaue Begründung der Erhöhung von Gebäudeecken gibt es nicht.

Bis jetzt gibt es keine Publikationen, die sich mit den Schwachstellen der traditionellen jemenitischen Lehmbautechniken und ihrer zukünftigen Lösungen beschäftigen. Einflüsse der klimatischen Verhältnisse auf die Festigkeit von Baulehmen im Jemen wurden bislang nicht untersucht.

Deshalb werden in dieser Arbeit (Kap. 4) die wichtigen Besonderheiten der Ausführungstechniken, die vorher nicht bei anderen Autoren erwähnt wurden, behandelt und durch Detailzeichnungen verdeutlicht, damit die Vorteile der traditionellen Lehmbauweisen bei der Entwicklung und Verbesserung moderner Bauweisen genutzt werden können.

In diesem Kapitel werden Grundlagen und Kenntnisse von den bis jetzt durchgeführten Forschungsarbeiten, die eine direkte Beziehung mit der Entwicklung von Lehmbau im Jemen haben, dargestellt. Deshalb werden im Folgenden die wichtigsten Ergebnisse von Forschungsarbeiten aus unten erwähnten Bereichen ausgeführt:

Archäologische Untersuchungen, Energieeinsparung bei Lehmbauten, Einfluss der Zusätze auf die Festigkeit von Lehm, Einfluss der Trocknungsbedingungen auf die Lehmfestigkeit, Verstärkung der Lehmsteinwände in mehrgeschossigen Lehmbauten gegen Erdbeben, Einfluss der Aufbereitung und Verarbeitung auf die Festigkeit von Lehm aber auch Forschungsarbeiten über Tone und Tonminerale aus dem Bereich Mineralogie, die eine direkte Beziehung auf den Lehmbau haben.

## 2.1 Lehmbau hat eine lange Tradition im Jemen

Es gibt kaum einen Ort im Jemen, wo Lehm als Baustoff nicht verwendet wird. Von den zu wenig durchgeführten archäologischen Forschungsarbeiten im Jemen, sind die, die in Marib und Wadi-Hadhramaut bei der Reiboonssiedlung ausgeführt wurden, zu erwähnen. Bei Marib hat man entdeckt, dass am Anfang des sabäischen Reiches ca. (1200 v. Chr.-200 n. Chr.) die Lehmsteintechnik verwendet wurde [15]. In der historischen Reiboonssiedlung wurde einen Tempelbau gefunden, der aus ungebrannten Lehmsteinen gebaut wurde, und unter dem Baugrund der letztgebauten Gebäude existierte. Es handelt sich um einen Lehmsteinbau aus der Zeit 700 v. Chr. [5].

## 2.2 Lehmbauten sind energiesparend

Die landläufige Meinung, dass die Lehmhäuser kühl im Sommer und warm im Winter sind, wurde von Al-Shibami in Seiyun Wadi-Hadhramaut untersucht und bestätigt [13, 14]. Dabei wurde eine Umfrage unter den Bewohnern in verschiedenen Gebäudetypen durchgeführt. Die Teilnehmer wurden in drei Kategorien angeordnet, wie es in der Tabelle 2.2-1 dargestellt ist.

Kategorie der Teilnehmer in der Befragung	Winter	Sommer
Einwohner in traditionellen Lehmhäusern	75	52
Einwohner in neuen Lehmhäusern	92	76
Einwohner in modernen Stahlbetonhäusern	23	24
<b>Total</b>	<b>190</b>	<b>152</b>

Tab. 2.2-1 Alle Teilnehmer der Umfrage über die thermische Behaglichkeit der Einwohner in den traditionellen und neuen Lehmhäusern sowie in den Stahlbetonbauten in Seiyun [14]

In dieser Untersuchung wurde die so genannte „Seven point ASHRAE scale“ verwendet, um thermische Gefühle von den Teilnehmern zu beschreiben, vgl. Tab.2.2-2.

-3	-2	-1	0	1	2	3
kalt	kühl	etwas kühl	neutral	etwas warm	warm	heiß

Tab. 2.2-2 Seven Point ASHRAE scale

Das Ergebnis der Umfrage in der Winterperiode hat gezeigt, dass die Stahlbetonbauten am kältesten sind. Al-Shibami schrieb in [14]: „In general the inhabitants of concrete buildings expressed feelings that this type of building is the coldest among the all Buildings“, s. Abb. 2.2-1.

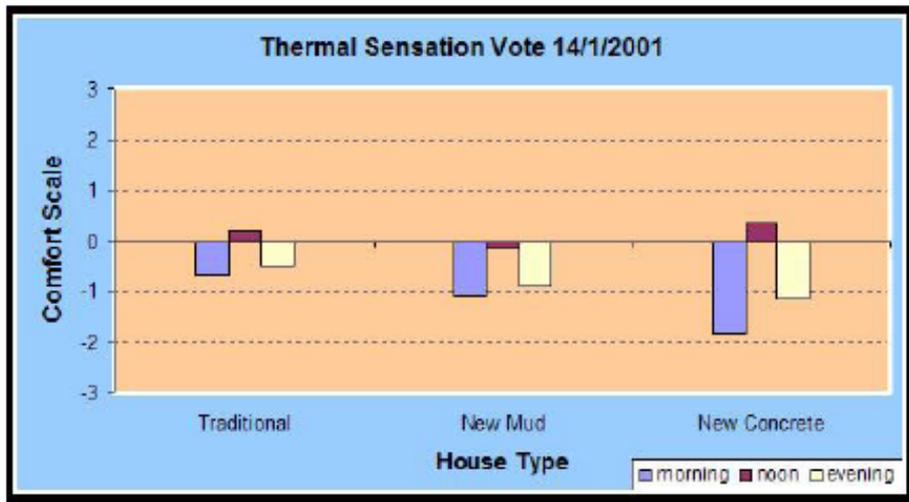


Abb. 2.2-1 Thermal Sensation Abstimmung im Wintermonat Januar 2001 in Seiyun Wadi-Hadhramaut [14]

Die Umfrage hat gezeigt, dass die Stahlbetonbauten in der Sommerperiode am heißesten sind. Al-Shibami schrieb weiter: „Concrete constructed buildings are the hottest buildings among the three types of buildings. Occupants responded that they perceive that the building is above slightly warm (+1.40) in the morning until it is almost slightly warm and close to warm during the night (+1.90) which means that people in this type of building feel that they are hot and discomforted“. Die Abbildung 2.2-2 verdeutlicht dieses Ergebnis.

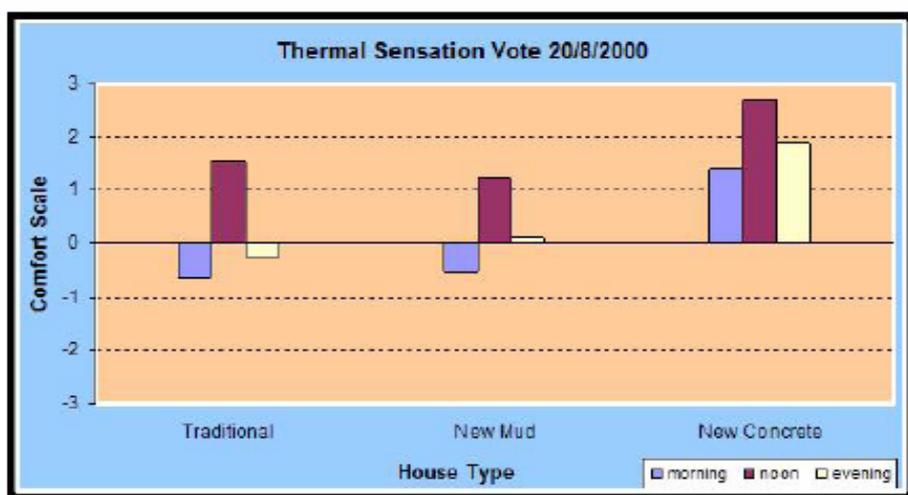


Abb. 2.2-2 Thermal Sensation Abstimmung im Sommermonat August 2000 in Seiyun Wadi-Hadhramaut [14]

Die Berechnung der durchschnittlichen Kühlungsenergie der untersuchten Wohnbauten im kritischen Sommermonat August hat gezeigt, dass die traditionellen Lehmbauten 0 kWh verbrauchen, die neuen Lehmhäuser 120 kWh für den ganzen Monat und die Stahlbetonhäuser 4312,5 kWh für die gleiche Periode. Die Tabelle 2.2-3 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse dieser Untersuchung.

	<b>Traditional Building</b>	<b>New Mud Building</b>	<b>Concrete Building</b>
<b>Number of A/C</b>	0	2	5
<b>Hours switched on in August</b>	0	24	345
<b>Total cooling load kWh</b>	0	120	4312,5

**Tab. 2.2-3 Gemessener Kühlungsenergieverbrauch im kritischen Sommermonat August in unterschiedlichen Bautypen [14]**

Die oben genannten Ergebnisse zeigen, dass die modernen Stahlbetonbauten die schlechtesten Bauten in Bezug auf thermalen Komfort und auf übermäßigen Energieverbrauch bei der Klimatisierung sind.

## 2.3 Einfluss der Strohzugabe

Untersuchungen am Forschungslabor für experimentelles Bauen (FEB)- Kassel haben gezeigt, dass die Strohzugabe zur Reduzierung der Druckfestigkeit von Massivlehm führt, vgl. Tab. 2.3-1.

<b>Strohanteil</b>	<b>Trockendichte</b>	<b>Druckfestigkeit</b>
<b>[Masse %]</b>	<b><math>\rho_R</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\beta_D</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>
0	1882	2,2
1	1701	1,4
2	1571	1,3
4	1247	1,1
8	872	0,3

**Tab. 2.3-1 Reduzierung der Druckfestigkeit von Massivlehm durch Strohhacksel (5 cm) [93]**

Bazara hat auch nachgewiesen, dass die Strohzugabe bei den untersuchten jemenitischen Lehmen aus Wadi-Hadhramaut zur Verminderung der Druckfestigkeit führt. Tabelle 2.3-2 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung mit und ohne Strohzugabe.

<b>Probebezeichnung</b>	<b>Shibam Probe Nr. 1</b>	<b>Shibam-Al-Quatan Probe Nr. 2</b>	<b>Seiyun Probe Nr. 3</b>	<b>Tarim Probe Nr. 5</b>
<b>Ohne Strohzusatz</b>				
Mittlere Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	1651	1628,2	1561,3	1536,4
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	8,38	7,08	4,64	3,73
<b>Mit 1 Gew. -% Strohzusatz</b>				
Mittlere Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	1494,25	1592,37	1416,88	1358,57
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	3,51	3,35	2,53	2

**Tab. 2.3-2 Wirkung des Strohs auf die Festigkeit der untersuchten jemenitischen Lehme [18]**

Es muss hier angemerkt werden, dass bei der Untersuchung von Bazara die Konsistenz der Lehmischungen durch Ausbreitmaßverfahren (37 cm als Zielwert) ermittelt wurde [18]. Die Probekörper wurden zunächst 7-10 Tage lang bei einem Raumklima von 23°C langsam getrocknet. Um den Trocknungsvorgang zu beschleunigen, wurden die Probewürfel danach bei 60°C im Trockenofen bis zur Massenkonstanz gelagert. Vor dem Druckversuch wurden die oberen und unteren Flächen der Prüflinge mit Tiefgrund imprägniert, danach mit Zementmörtel nach DIN 1048 Teil 1 [38] planparallel abgeglichen.

## **2.4 Einfluss der Zugabe von Kalk und Zement auf die Lehmfestigkeit**

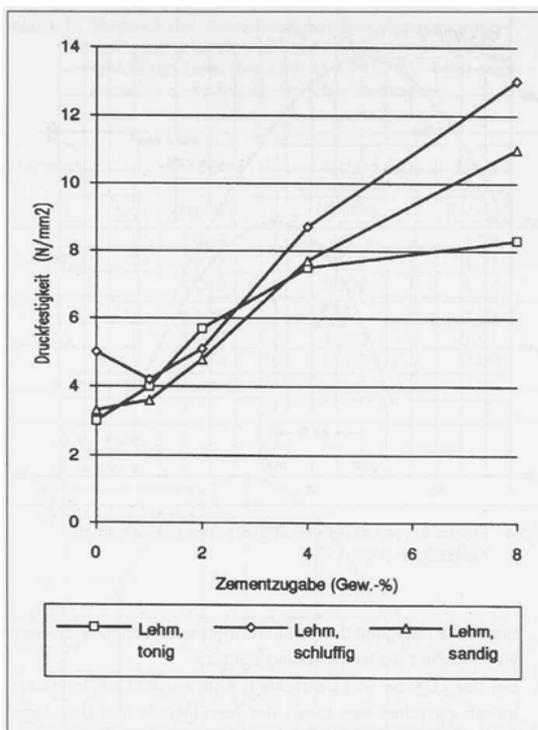
Eine Erhöhung der Druckfestigkeit von Lehmen kann durch Zusätze wie Zement und Kalk erreicht werden. Die Abbildung 2.4-1 zeigt, dass die Trockendruckfestigkeit eines stark schluffhaltigen Lehmes mit 12% Ton, 74% Schluff und 14% Sand ohne Zementzugabe etwa 5 N/mm<sup>2</sup> beträgt. Bei Zementzugabe von etwa 2% wird die ursprüngliche

Druckfestigkeit wieder erreicht. Eine weitere Erhöhung der Zementzugabe steigert die Trockendruckfestigkeit dieser Mischung [94].

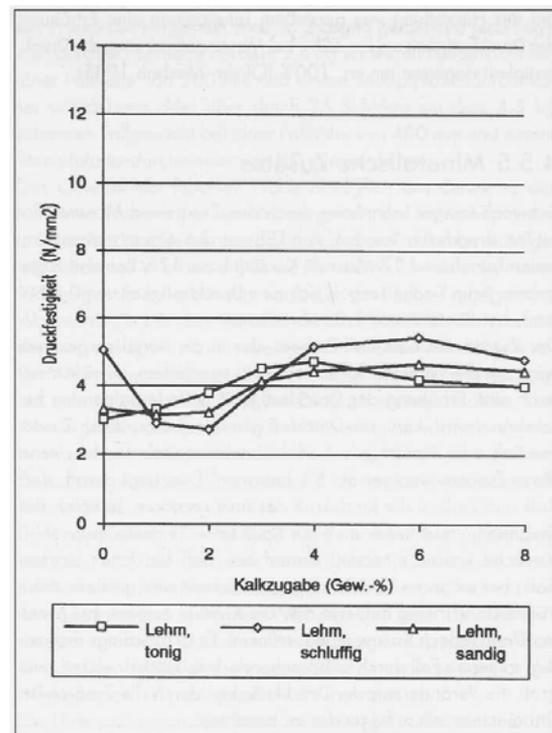
Dieser Stabilisierungseffekt der Lehmprodukte mit Zement führt zwar zur Erhöhung der Druckfestigkeit und der Witterungsbeständigkeit der Lehmteile, führt aber gleichzeitig zum Verlust einer der hervorragenden Eigenschaften von Lehm, der Wiederverwendbarkeit.

Die Abb. 2.4-2 zeigt die Veränderung der Druckfestigkeit von Lehmen durch Kalkzugabe.

Es muss hier angemerkt werden, dass die Entscheidung über das Stabilisierungsmittel von der Art und Menge der Lehmartikel abhängig ist. Minke schrieb: „Lehm mit hohem Kaolinitanteil sollte nicht mit Kalk, sondern mit Zement stabilisiert werden, und Lehm mit hohem Montmorillonitanteil nicht mit Zement, sondern mit Kalk und Zement im Verhältnis 2:1“ [94].



**Abb. 2.4-1 Veränderung der Druckfestigkeit von Lehmen durch Zementzugabe [94]**



**Abb.2.4-2 Veränderung der Druckfestigkeit von Lehmen durch Kalkzugabe [94]**

## 2.5 Verstärkung der gepressten Lehmsteine durch Sisalfasern bzw. eine Kombination von Sisalfasern und Zement

Namango hat die Wirkung der Zement- und Sisalfasernzugabe auf die Druck- und Biegezugfestigkeit von gepressten Lehmsteinen untersucht [99]. Das Ausgangsmaterial enthielt 20% Ton mit einem Größtkorn von 2 mm. Die Druckfestigkeit des Ausgangsmaterials betrug 4,798 N/mm<sup>2</sup> und ihre Biegezugfestigkeit 0,992 N/mm<sup>2</sup>.

Bei der Magerung des Ausgangsmaterials mit den Sisalfasern wurden die höchste Druck- und Biegefestigkeit bei 0,75 Gewichtsprozent Sisalfasern erhalten. Dabei hat sich die Druckfestigkeit um 90,5% und die Biegefestigkeit um 64,3% erhöht.

Bei der Zementzugabe von 12% hat sich die Druckfestigkeit um 71,5% und die Biegefestigkeit um 101% erhöht.

Die Kombination von Zementzugabe und Magerung mit Sisalfasern hat gezeigt, dass die Mischung mit 0,5% Sisalfasern und 12% Zement optimal für diese Kombination ist. Dabei erhöhte sich die Druckfestigkeit um 40,7% und die Biegefestigkeit um 37,1% im Vergleich zu den Festigkeiten des Ausgangsmaterials.

Die Zusammenfassung aller Versuchsergebnisse ist in der Tabelle 2.5-1 dargestellt.

S. NO.	Sample Name	Sisal Content, %	Cement Content, %	$\rho$ True g/cm <sup>3</sup>	$\rho$ Pract. g/cm <sup>3</sup>	Porosity n, %	Compressive Strength, 28d N/mm <sup>2</sup>	Flexural Strength, N/mm <sup>2</sup>
<b>1</b>	<b>SC-0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2.664</b>	<b>1.8</b>	<b>32.69</b>	<b>4.798</b>	<b>0.992</b>
2	SC-0.25	0.25	0	2.654	1.8	32.14	4.18	0.75
3	SC-0.5	0.5	0	2.645	1.857	29.78	6.08	1.035
<b>4</b>	<b>SC-0.75</b>	<b>0.75</b>	<b>0</b>	<b>2.641</b>	<b>1.895</b>	<b>28.22</b>	<b>9.14</b>	<b>1.63</b>
5	SC-1.0	1.0	0	2.636	1.883	28.53	8.87	1.47
6	SC-1.25	1.25	0	2.629	1.738	33.87	4.16	0.85
7	CeC-0	0	0	2.664	1.8	32.69	4.798	0.992
8	CeC-5	0	5	2.661	1.689	36.52	3.50	0.75
9	CeC-9	0	9	2.662	1.686	36.65	5.96	1.56
<b>10</b>	<b>CeC-12</b>	<b>0</b>	<b>12</b>	<b>2.659</b>	<b>1.689</b>	<b>36.45</b>	<b>8.24</b>	<b>2.00</b>
11	C-SC-0-0	0	0	2.664	1.8	32.69	4.798	0.992
12	C-SC-5-0.25	0.25	5	2.649	1.689	36.24	3.60	0.63
13	C-SC-9-0.25	0.25	9	2.650	1.666	37.13	4.60	0.95
14	C-SC-12-0.25	0.25	12	2.649	1.678	36.66	6.06	1.23
15	C-SC-5-0.5	0.5	5	2.650	1.644	37.95	2.84	0.58
16	C-SC-9-0.5	0.5	9	2.661	1.640	38.35	5.16	0.93
<b>17</b>	<b>C-SC-12-0.5</b>	<b>0.5</b>	<b>12</b>	<b>2.664</b>	<b>1.674</b>	<b>37.16</b>	<b>6.75</b>	<b>1.36</b>
18	C-SC-5-0.75	0.75	5	2.645	1.54	41.78	2.37	0.52
19	C-SC-9-0.75	0.75	9	2.612	1.621	37.94	4.51	0.91
20	C-SC-12-0.75	0.75	12	2.658	1.634	38.53	6.43	1.30
21	C-SC-5-1	1	5	-	1.611	-	2.6	0.53
22	C-SC-9-1	1	9	-	1.620	-	4.33	0.83
23	C-SC-12-1	1	12	-	1.651	-	5.99	1.22
24	C-SC-5-1.25	1.25	5	-	1.619	-	2.86	0.61
25	C-SC-9-1.25	1.25	9	-	1.612	-	4.72	1.01
26	C-SC-12-1.25	1.25	12	-	1.616	-	5.49	1.17

**Tab. 2.5-1 Einfluss der Zementzugabe bzw. Sisal-Fasern auf die Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit der gepressten Lehmsteine [99]**

## 2.6 Einfluss der Materialfeuchte auf die Druckfestigkeit von Stampflehm

Im Fachgebiet Tragwerksentwurf und Konstruktionen der TU-Berlin wurden die Einflüsse der Materialfeuchte und der relativen Feuchtigkeit auf die Druckfestigkeit von Stampflehm untersucht. Die Abbildung 2.6-1 zeigt den Abfall der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von andauernder relativer Luftfeuchtigkeit. Es wurde festgestellt, dass die Materialfeuchte in Abhängigkeit von andauernden relativen Luftfeuchten ansteigt und somit einen Abfall der Druckfestigkeit verursacht, vgl. Abb. 2.6-2 und Abb. 2.6-3.

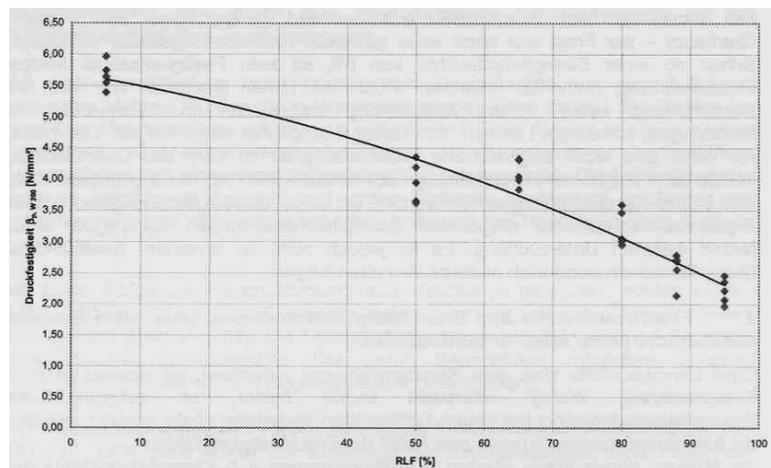


Abb. 2.6-1 Abfall der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von andauernden relativen Luftfeuchten [36]

## 2.7 Einfluss der Trocknungsbedingungen auf die Festigkeit von Stampflehm

Bei der Untersuchung des Ausgangsmaterials des Stampflehms der Kapelle der Versöhnung in Berlin hat sich gezeigt, dass die Austrocknungsbedingungen einen großen Einfluss auf die Festigkeiten von Stampflehm haben. Es ergaben sich unterschiedliche Festigkeiten bei verschiedenen, während der Austrocknung herrschenden Temperaturen und Luftfeuchten, s. Abb. 2.7-1.

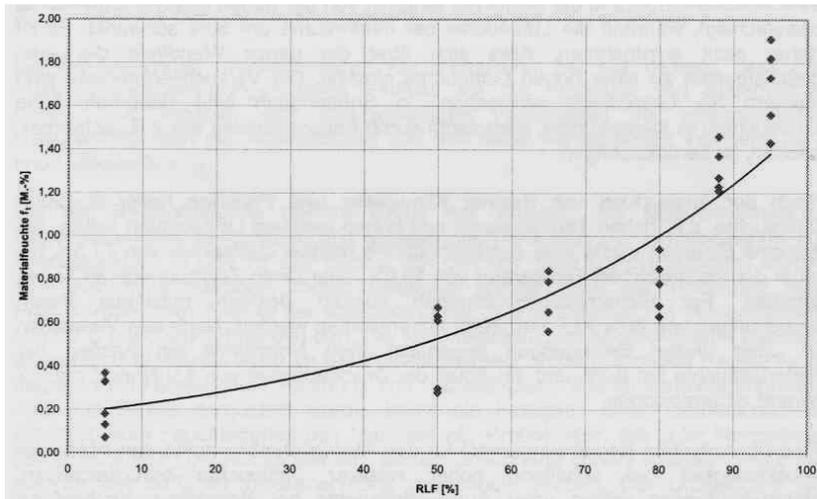


Abb. 2.6-2 Anstieg der Materialfeuchte in Abhängigkeit von andauernden relativen Luftfeuchten bei 20°C [36]

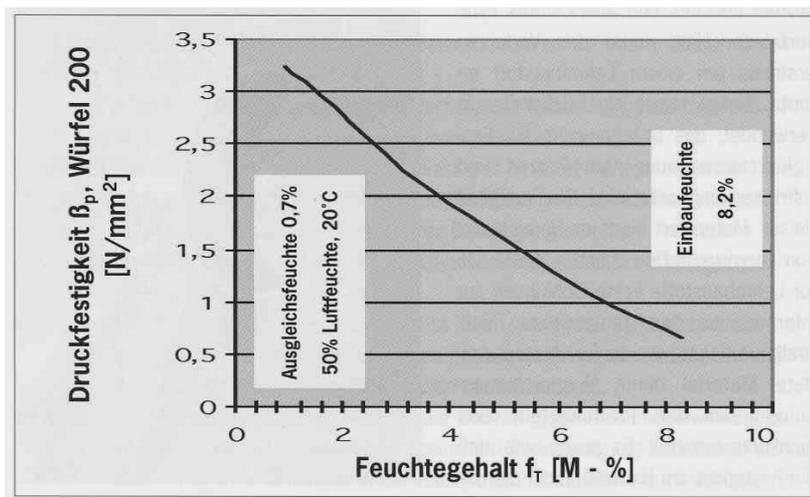
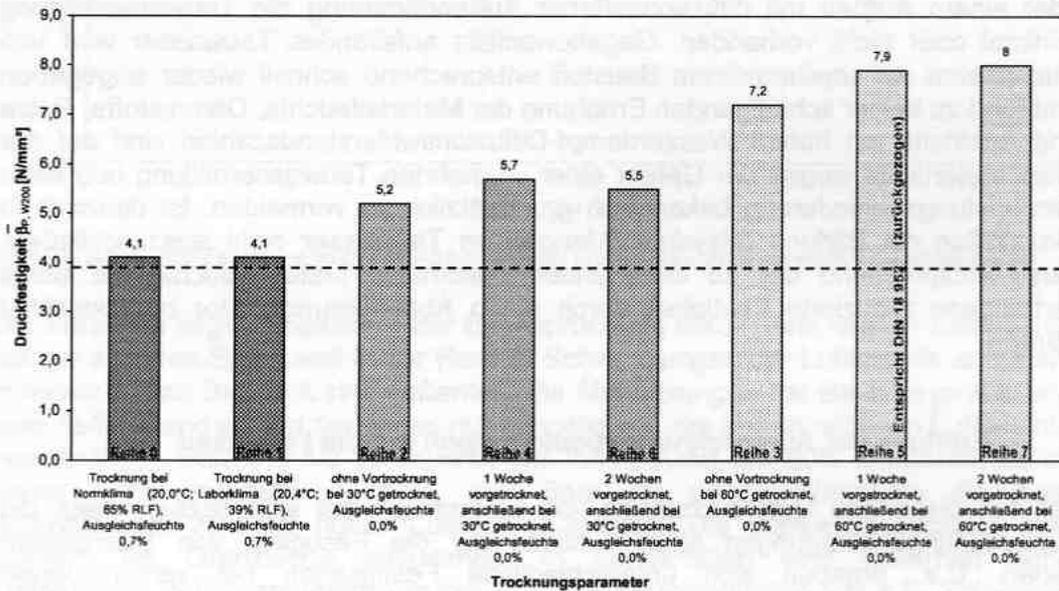
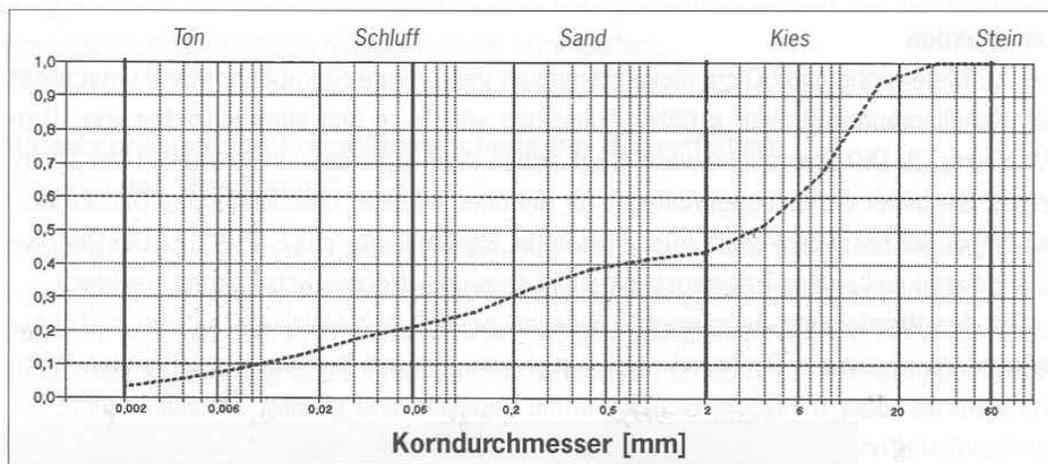


Abb. 2.6-3 Feuchteabhängige Druckfestigkeit der verwendeten Stampflehm-Mischung in der Kapelle der Versöhnung in Berlin [35]

Die Einbaufeuchte des Ausgangsmaterials war 8,1% und sein Tonanteil betrug ca. 4%. Aufgrund der niedrigen Einbaufeuchte, des geringen Tonanteils und der engen Kornverteilung ergab sich ein Schwindmaß von nur 0,15%, vgl. Abb. 2.7-2.



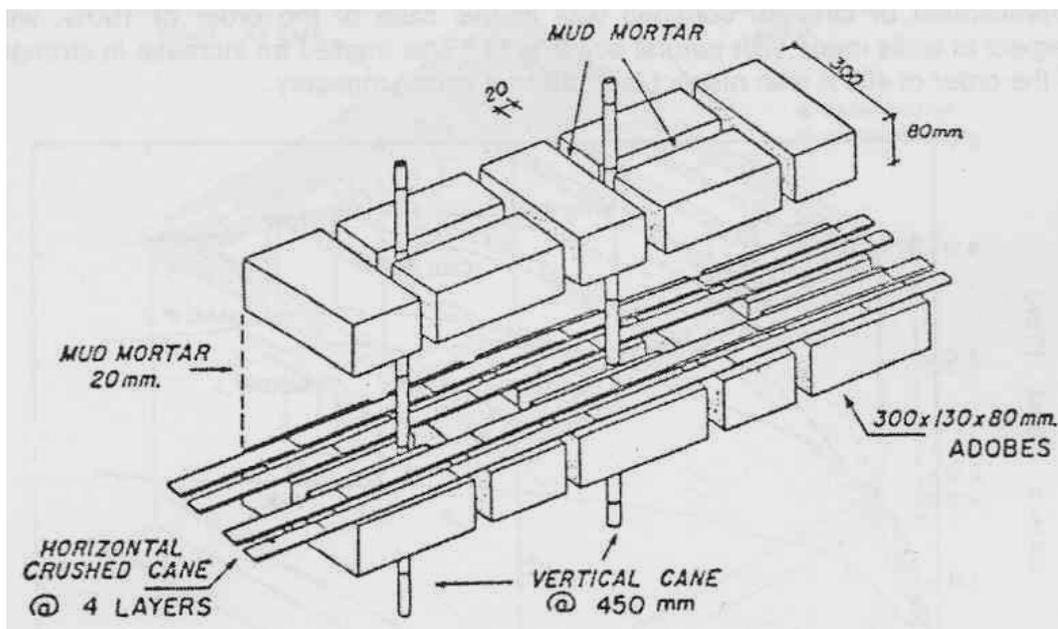
**Abb. 2.7-1** Würfeldruckfestigkeiten einer Stampflehmmischung unter verschiedenen Trocknungsbedingungen nach dem Erreichen ihrer Ausgleichfeuchte [119]



**Abb. 2.7-2** Kornverteilungskurve der verwendeten Stampflehmmischung von der Kapelle der Versöhnung – Berlin [35]

## 2.8 Verstärkung der Lehmsteinwände von mehrgeschossigen Lehmbauten gegen Erdbeben

Um stabile Lehmsteinwände bei der Erdbebenwirkung zu bekommen, wurden im Laufe der vergangenen 30 Jahre an der Universität PUCP „Catholic University of Peru“, verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Diese Untersuchungen zeigten, dass die Armierung der Lehmsteinwände mit vertikalen Schilfrohren je 45 cm und horizontalen gespaltenen Schilfrohren in jeder vierten Steinschicht eine sehr gute Verbesserung des Widerstandes der Lehmsteinwände gegen Erdbebenkräfte im Vergleich zu den nicht armierten Wänden ergibt, vgl. Abb. 2.8-1.



**Abb. 2.8-1 Eine Armierung der Lehmsteinwände mit vertikalen Schilfrohren alle 45 cm und horizontalen gespaltenen Schilfrohren in jeder vierten Steinschicht verbessert den Widerstand der Lehmsteinwände gegen Erdbebenkräfte (im Vergleich zu den nicht armierten Lehmsteinwänden) [22]**

Bei dem Versuchsaufbau „Kippende Platte“ hat sich die maximale seitliche Belastung bei den bewehrten Modellen fast verdoppelt im Vergleich zu den nicht bewehrten Modellen. Die seitliche Verformung der bewehrten Modelle betrug das 6-fache der nicht bewehrten Modelle.

Bei dem Versuchsaufbau „Rüttelnde Platte“ waren ebenfalls die bewehrten Modelle stabiler als die nicht bewehrten. Blondet und Carcia schrieben [22]:

„Reinforcement had an Crucial effect on the seismic response of the modules. All unreinforced modules were heavily damaged during the 80 mm runs. Vertical cracks developed at the corners, isolating the walls, and the structures collapsed during the following 100 mm run“.

Sie schrieben weiter:

“Reinforced modules showed a much better response, even during stronger shaking (140 mm runs). Integrity of the structure was maintained and they did not collapse“.

Blondet hat darauf hingewiesen, dass die bewehrte Konstruktionsweise im Verhältnis komplizierter als die unbewehrte ist. Er meint aber, dass die extra Arbeit, die bei der Durchführung der Bewehrung entsteht, mit der sehr guten Verbesserung des Widerstandes der Wände bei Erdbebenerstürzungen kompensiert wird, vgl. [21, 22].

## **2.9 Einfluss der Aufbereitung und Verarbeitung auf die Festigkeit von Lehm**

Im Forschungslabor für experimentelles Bauen Kassel wurden die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Verarbeitungen und Aufbereitungen von Lehmmischungen und ihren erreichten Festigkeiten untersucht [90].

Dabei wurde Folgendes festgestellt:

- Die Druckfestigkeit von den handgeformten Lehmsteinen war um durchschnittlich 19% höher als die Druckfestigkeit der gepressten Lehmsteine;
- Die Druckfestigkeit der handgestrichenen Probekörper nimmt mit zunehmender Mischdauer von 2 -15 Minuten zu.

- Die Druckfestigkeit der im erdfeuchten Zustand aufbereiteten, stark verdichteten und gestampften Proben war um durchschnittlich 38% niedriger als bei den unverdichteten handgestrichenen Proben.

Bei dieser Untersuchung wurden alle Proben von dem gleichen Material hergestellt. Die gepressten bzw. gestampften Proben wurden im erdfeuchten Zustand ihres Materials hergestellt, wobei die handgestrichenen Proben mit etwas Wasser verrührt und anschließend in dieselbe Form gestrichen wurden.

## **2.10 Über Tone und Tonminerale**

### **2.10.1 Korngröße von Tonteilchen**

Lehm ist eine Mischung aus Ton, Schluff und Sand, die doch größere Bestandteile wie Kies, Schotter, oder Steine enthalten kann [93]. Der Ton ist also das Bindemittel im Lehm. Deshalb sind die Kenntnisse über seine Eigenschaften von größerer Bedeutung für jeden, der sich mit dem Baustoff Lehm beschäftigt. Es werden hier einige Kenntnisse und Forschungsergebnisse über die Tone und Tonminerale aus dem Bereichen Tonmineralogie, Bodenmechanik und Kolloidchemie erwähnt, die dem Leser die Grundlagen vermitteln, um die Erläuterungen, Auswertungen und Interpretationen in den folgenden Kapiteln besser zu verstehen.

Als Ton werden feinste Bodenteilchen bezeichnet, deren Durchmesser weitgehend kleiner als 0,002 mm ist. Er ist ein Verwitterungsprodukt aus Feldspat und Muttergesteinen. Obwohl die Tonminerale weitgehend kleiner 0,002 mm sind, kann aber ihre Korngrößenverteilung sehr verschieden sein, vgl. Abb. 2.10-1.

### **2.10.2 Kationenaustauschvermögen von Tonmineralen**

Die Tonmineralogie konnte bisher die Struktur (den Bauplan) von Tonmineralen erfassen, die sich durch die Kombination von Tetraederschichten mit Sechseringen koordinierten  $[\text{SiO}_4]$ -Tetraedern und Oktaederschichten mit über die Kanten verknüpften  $[\text{M}(\text{O},\text{OH})_6]$ -Oktaedern erklären lässt, s. Abb. 2.10-2.

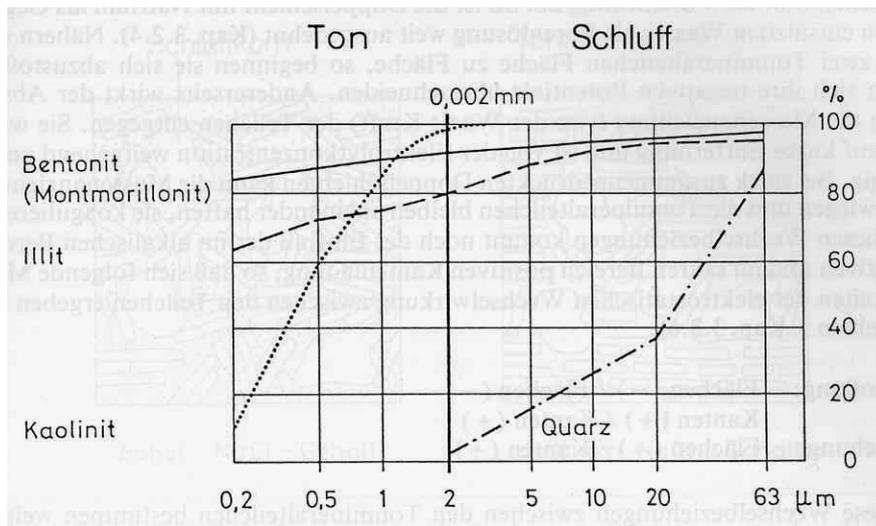


Abb. 2.10-1 Typische Korngrößenverteilungen von Quarz, Kaolinit, Illit und Montmorillonit [97]

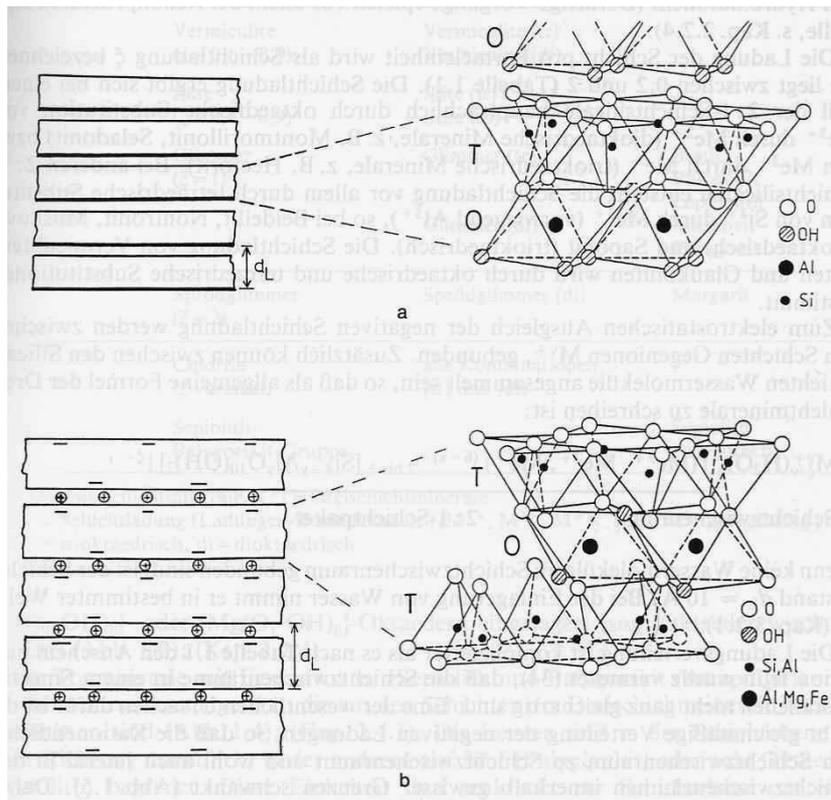
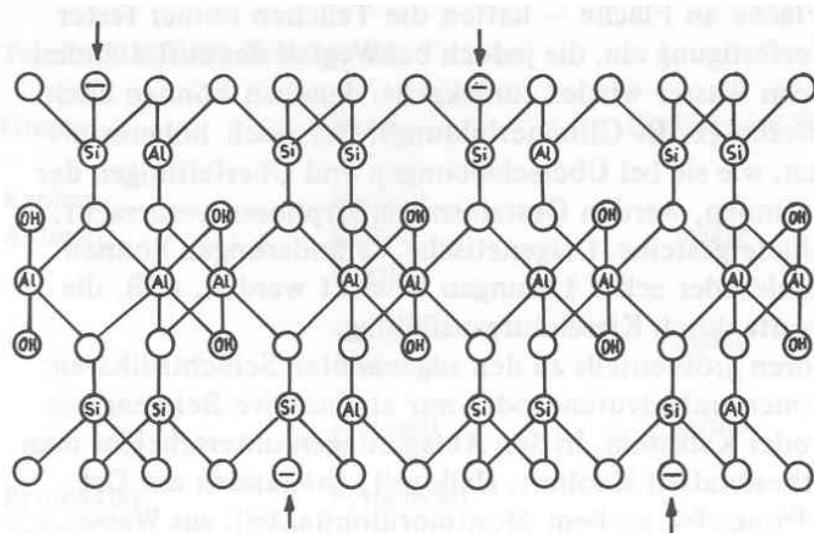


Abb. 2.10-2 Räumliche Darstellung der Schichtstruktur von Tonmineralen [79]

a) Zweischichtminerale

b) Dreischichtminerale

Die Tonminerale besitzen ein Kationenaustauschvermögen. Die Ursache liegt im Ersatz von Si-Ionen durch Al-Ionen in der  $[\text{SiO}_4]$ - Tetraederschicht. Dadurch entsteht eine negative Ladung, die durch Kationen kompensiert wird, vgl. Abb. 2.10-3.



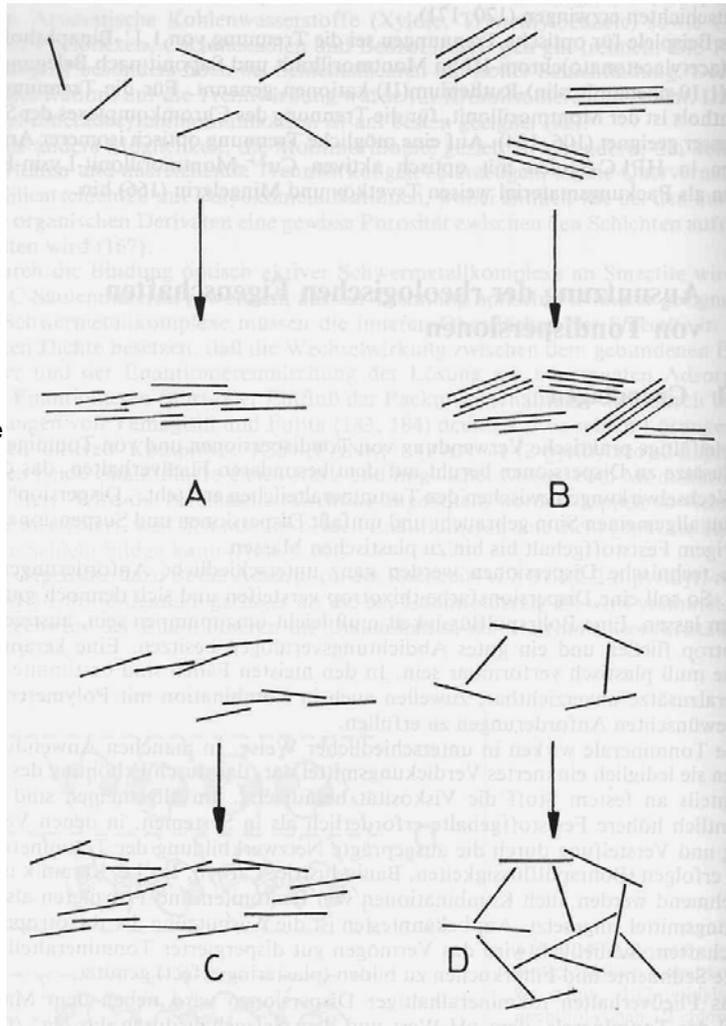
**Abb. 2.10-3 Schematische Darstellung der Struktur eines Schichtsilikates (Muskovit). An den durch einen Pfeil gekennzeichneten Stellen sitzt eine negative Ladung [132]**

Bei den Kaoliniten liegen austauschfähige Ionen nur an den äußeren Oberflächen. Dagegen wird das Austauschvermögen der Smectite und Vermiculite hauptsächlich durch die Zwischenschichtkationen bestimmt. Ihre Kationenaustauschvermögen ist wesentlich höher [79].

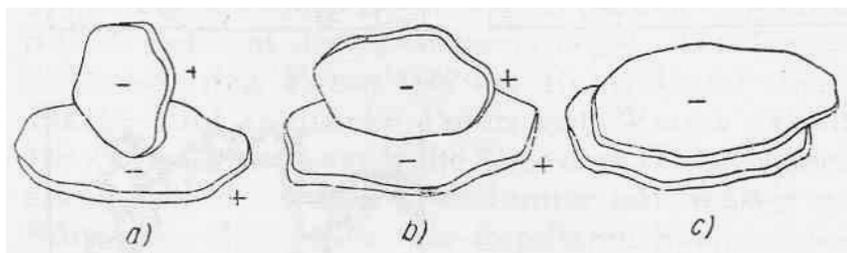
### 2.10.3 Aggregation und Einordnung der Tonteilchen

Der Endverbindungsstatus der Tonteilchen miteinander nach der Trocknung ist abhängig von ihrem Anfangszustand in der Lösung. Je nach Aggregation der Tonpartikel in der Lösung, bedingt durch pH-Wert, Temperatur, Ionenaustauschvermögen, Konzentration der Lösung (also das chemische Milieu), entstehen unterschiedliche Strukturen und Gefüge nach der Trocknung, vgl. Abb. 2.10-4. Die Verbindung der Tonteilchen miteinander kann punktförmig, linienförmig oder seitenflächig sein, s. Abb. 2.10-5.

- A) Optimale Dispergierung  
↓  
dicht, parallel gelagert
- B) Flächen- Flächen Aggregation  
dispergierter Teilchen  
↓  
gegeneinander verworfene Pakete
- C) Bänderartige Aggregation  
↓  
lockeres Sediment
- D) Kartenhausartige Aggregation  
↓  
lockeres Sediment



**Abb. 2.10-4 Die Struktur der Sedimente der plättchenförmigen Teilchen in Abhängigkeit von der Aggregation in der Lösung [78]**



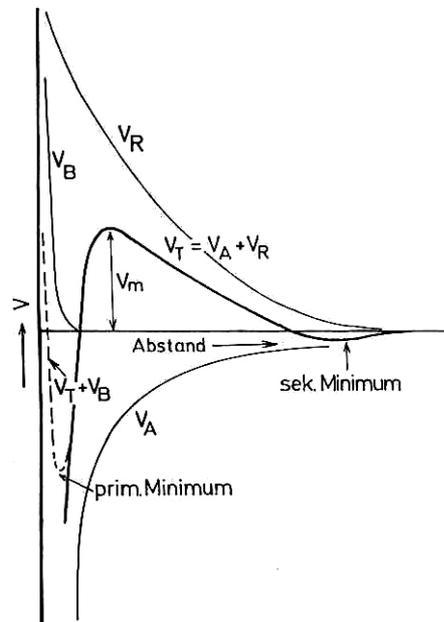
**Abb. 2.10-5 Verbindungsformen zwischen plattigen Tonteilchen [72]**

### 2.10.4 Die DLVO-Theorie

Die DLVO-Theorie beschreibt die kolloidale Dispersion mit Hilfe elektrostatischer Wechselwirkungen zwischen den Anionen der Grenzfläche und den diffus verteilten Kationen. Die diffuse Verteilung der Kationen wird von der Temperatur und der Konzentration in der Lösung bestimmt. Zwischen den Silikatschichten (Tonplättchen) kommt es zu einer elektrostatischen Abstoßung, bei direktem Teilchenkontakt zur sogenannten Bornschen Abstoßung, die den van-der-Waalschen Anziehungskräften entgegenwirken, s. Abb. 2.10-6.

**Abb. 2.10-6 Wechselwirkungen zwischen kolloidalen Teilchen nach der DLVO-Theorie [78]**

$V_R$ : elektrostatische Abstoßung  
 $V_A$ : Van-der-Waals-Wechselwirkung  
 $V_B$ : Bornsche Abstoßung  
 $V_T$ : Gesamtwechselwirkungskurve



### 2.10.5 Einfluss von pH-Wert und Temperatur auf die Einordnung der Tonminerale

Es ist bekannt geworden, dass der pH-Wert des Wassers (Anmachwasser bzw. Porenwasser bei den Lehmmischungen) abhängig von seiner Temperatur ist. Der pH-Wert steigt mit steigender Temperatur, vgl. Abb. 2.10-8.

Interessant ist, dass die Tonminerale sich dichter zueinander mit abnehmendem pH-Wert bei Flächen zu Flächen-Orientierungen einordnen, s. Abb. 2.10-7.

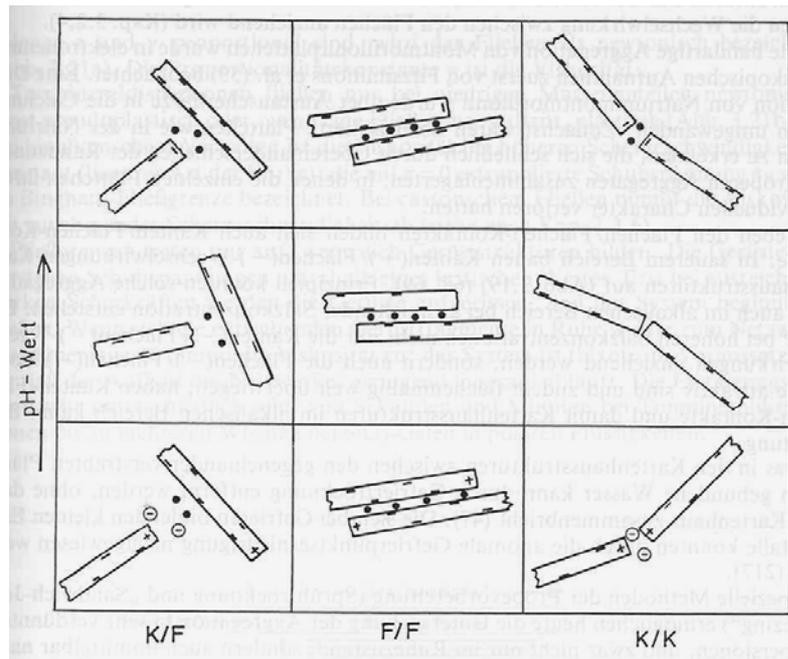


Abb. 2.10-7 Aggregationsmöglichkeiten der Tonmineralplättchen in Abhängigkeit vom pH-Wert [78]

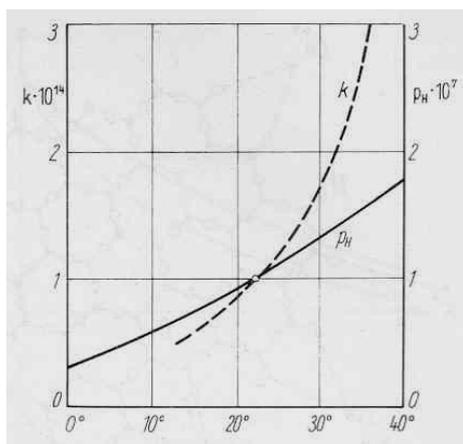


Abb. 2.10-8 Abhängigkeit des pH-Wertes des Wassers von der Temperatur [72]

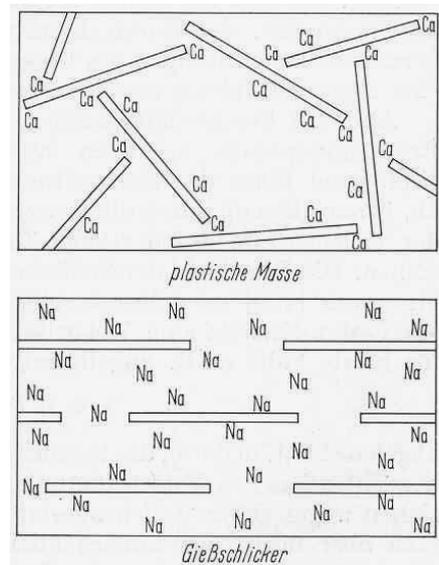


Abb. 2.10-9 Schematische Darstellung der Wirkung von Ca- und Na-Ionen auf Kaolinit-Wasser-Mischungen [115]

Mit steigender Temperatur verlässt ein immer größerer Anteil der Gegenionen (Kationen) die Tonplättchenschicht und formt die diffuse Ionenschicht. Die Tonplättchen werden dadurch ferner voneinander im Ausgangszustand gehalten, sodass sie sich bei dem Trocknungsprozess undicht einordnen. Das entstehende Material hat demzufolge niedrigere Trockenfestigkeit, vgl. Abb. 2.10-4 sowie [78] und Kapitel 5.

### **2.10.6 Einfluss von Ca- und Na-Ionen auf eine Kaolinitwassermischung**

Da beim Gründen der Lehmhochhäuser in Shibam Wadi-Hadhramaut Kochsalz zu der Lehmmischung einer der Gründungsschichten zugegeben wird (siehe Abb. 4.1-5), und da im Jemen die Baulehme oft kaolinitreich sind [9], werden hier die bis jetzt bekannten Forschungsergebnisse, die die Wirkung der Zusätze von Ca- und Na-Ionen auf Kaolinitmischungen beschreiben, erwähnt.

Es ist von der Keramik bekannt, dass bei gleichem Wassergehalt die  $\text{Ca}^{2+}$ -Form eine plastische Masse gibt, die  $\text{Na}^+$ -Form eine gießbare Dispersion. Mit Natriumionen brechen die Gerüste der Kaolinitteilchen im Wasser zusammen. Der Grund dafür liegt darin, dass bei Na-Kaolinit jeder negativen Oberflächenladung ein positives Na-Ion gegenübersteht, sodass die Oberfläche gut abgeschirmt ist.

Bei Ca-Kaolinit liegen dagegen die zweiwertigen Ca-Ionen zwischen zwei negativen Ladungen, sodass der Platz zwischen den nächsten beiden negativen Ladungen frei ist und dort ein negatives Potenzial relativ weit in die Umgebung ragt. Es entsteht eine Einrasterung zwischen den Teilchen, sodass es bei gleichem Wassergehalt zu einer Versteifung im Verarbeitungszustand kommt, vgl. Abb. 2.10-9 und [78].

Demzufolge entsteht bei Na-Kaolinitmischungen nach ihrer Trocknung eine sehr dichte Masse mit höherer Trockenfestigkeit.

### **2.10.7 Einlagerung von Wasser an den Tonplättchen und Quellung von Ton**

Die Abb. 2.10-10 zeigt, wie die Tonquellung der Lehme stattfindet. Die Ionenkonzentration  $C_1$  der Doppelschichten zwischen den beiden Flächen zu Flächen orientierten negativen Tonmineralteilchen ist viel höher als die Elektrolytkonzentration  $C_2$  der Porenlösung. Ein Konzentrationsausgleich ist nur möglich, wenn Wasser in den Raum zwischen den beiden Teilchen eindringt.

Der Ton quillt. Dieser osmotische Vorgang ist von der Ladung der Tonmineraloberflächen, den austauschbaren Kationen und der Elektrolytkonzentration der Porenlösung abhängig. Daher kann das Wasser in vier Formen an den Tonmineralen einlagern, s. Abb. 2.10-11.

**1) Als: Strukturwasser:** Das ist chemisch gebundenes Wasser.

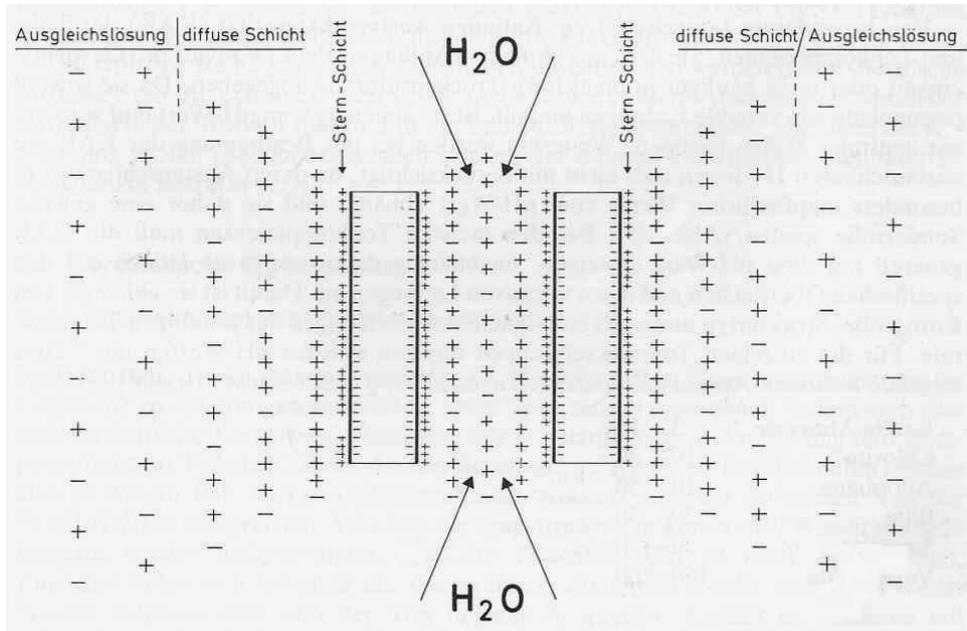
Die Chemiker teilen es wieder ein in:

- a. Das **Hydroxylwasser**, welches Anion in Kristallgitter von Tonmineralen eingebaut ist und;
- b. Das **Hydratwasser**, welches als Molekül am Aufbau des Kristallgitters der ;;- Tonminerale beteiligt ist;

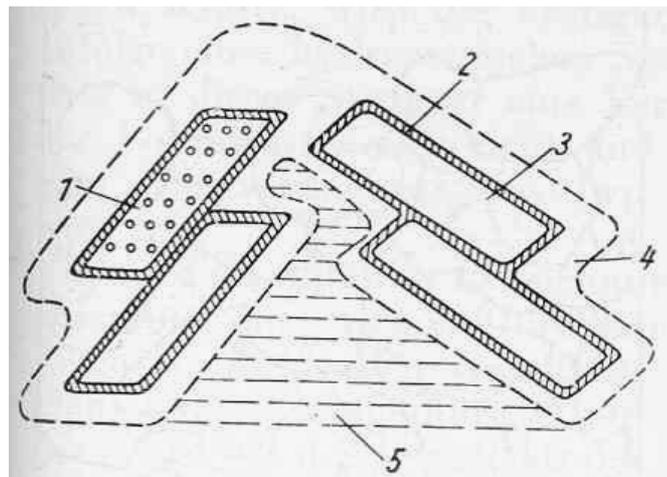
**2) Als: adsorbiertes Wasser:** Das ist ein dünner Wasserfilm, der jedes Tonplättchen umhüllt. Er verbindet die Tonkristalle miteinander;

**3) Als: Solvatwasser:** Das ist eine Wasserschicht, die dicker als die Adsorptions-Schicht ist, und umhüllt auch die Tonplättchen;

**4) Als: Porenwasser:** Es befindet sich in den Hohlräumen im Ton. In diesen Hohlräumen kann sich das Porenwasser durch Kapillarwirkung gegen die Schwerkraft bewegen. Mehr dazu in [118].



**Abb. 2.10-10 Zwei Tonteilchen mit negativen (äußeren) Oberflächenladungen und Gegenionen in einem Elektrolyt. Die zu kurze Entfernung zwischen den Teilchen verursacht eine Überlappung ihrer diffusen Schichten, folglich ein Eindringen von Wassermolekülen in die Überlappungszone und eine osmotische Quellung [59]**



**Abb. 2.10-11 Arten des Wassers im Boden [72]**

- 1 Strukturwasser;    2 Adsorbiertes Wasser;    3 Tonmineral;  
4 Solvatwasser;        5 Porenwasser



### **3 Einflussfaktoren auf den Lehmbau im Jemen**

#### **3.1 Geographische und topographische Einflüsse**

Auf der arabischen Halbinsel liegend ist Jemen flächenmäßig mit ca. 555000 km<sup>2</sup> das zweitgrößte Land der Halbinsel. Im Süden und Südosten grenzt Jemen an den Indischen Ozean und im Westen an das Rote Meer. Im Norden grenzt das Land an Saudi-Arabien und im Nordosten an Oman. Die äußersten Punkte liegen im Norden bei 20° nördlicher Breite und im Süden am Golf von Aden bei 12° 30' nördlicher Breite, im Osten bei 54° 30' östlicher Länge und im Westen bei 41° östlicher Länge. Zum Jemen gehören die Inseln Soqotra, Abdalkuri, Darsa und Samha im Arabischen Meer, die Inseln Mion in der Meerenge Bab-Almandab südlich des Roten Meeres und über 112 Inseln im Roten Meer; die Größten davon sind Kamaran, Huneisch alkubra, Huneisch assughra, Al-Tair und Al-Subeir.

Das Relief des Jemens ist geprägt durch den zentralen Gebirgszug, der im Westen des Landes parallel zum Roten Meer von Nord nach Süd verläuft, im Süden und Osten parallel zum Golf von Aden von West nach Ost. Das zentrale Hochland liegt fast überall über 2000 m Höhe. Dieser Gebirgszug erreicht die maximale Höhe von 3760 m bei Gabal Annabie Shuaeib 25 km westlich von Sana'a. Im Osten des Landes sinkt der Gebirgszug allmählich ab. In der östlichen Provinz des Landes, al-Maharah, liegen die höchsten Erhebungen bereits unter 1000 m. Parallel zum Roten Meer im Westen und zum Arabischen Meer im Süden liegt der Küstenstreifen, der eine Gesamtlänge von mehr als 2400 km und eine Gesamtbreite von 30 bis 60 km hat, vgl. [16, 133] sowie Abb. A-3-1.

#### **3.2 Geologische Einflüsse**

Noch im Mesozoikum (vor 225-65 Mio. Jahren) bildeten Afrika und die arabische Halbinsel eine zusammenhängende kontinentale Platte, die mehrheitlich aus Graniten und Gneisen des Präkambriums bestand. Es lagen einzelne Teile unter dem Meeresspiegel, sodass sich mächtige Kalk- und Sandsteinschichten, stellenweise über 500 m bzw. 300 m mächtig, bildeten, die heute als Amran Kalke und Tawila Sandsteine bezeichnet werden.

Amran-Kalksteine bilden heute die Rohstoffbasis für die Zementfabriken in Amran und Bagel.

Tektonisch gehört das Territorium zum größten vorderasiatisch-afrikanischen Grabensystem (der Rotes-Meer-Graben), dessen Entstehung in vormiozäner Zeit einsetzte und das zu einem ozeanischen Grabenspalt umgebildet wurde. Die endgültige Öffnung des Roten Meers ist nach [117] in das Miozän zu stellen. Im Pliozän und evtl. im Quartär setzte der Einbruch des im rechten Winkel zum Rotmeergraben stehenden Adengolfgrabens ein nach [140]. Diese Bewegung, die noch heute anhält, war mit dem Aufkommen basaltischen Schmelzens verbunden und führte zur Trennung der afrikanischen und der arabischen Plattform.

Zu Beginn des Tertiärs (vor 65-3 Mio. Jahren) begannen Hebungen im Westen von Arabien, sodass das Jemenitische Bergland entstand, wobei der Osten des heutigen Jemen (Shabwa, Hadhramaut, al- Maharah) noch überflutet blieb. Die harten karbonatischen Gesteinsschichten bilden heute die Tafel der Gol-Berge, die eine sehr starke Neigung zum Wadi-Hadhramaut haben, vgl. [63], [61], [24].

Deshalb findet man heute im Osten des Landes einige hundert Meter abgelagerte mächtige Dolomit- und Kalksteinschichten, die früher als Rohstoffbasis für Kalkputze, heute auch als Ausgangsmaterial für Zementfabriken in Hadhramaut dienen.

Insgesamt überdecken die Kalksteine mehr als 60% der Gesamtfläche des Jemen. Die Rohstoffreserve beträgt 13,5 Milliarden m<sup>3</sup> nach Angaben von „Ministry of Oil & Minerals“, vgl. [8] sowie Abb. A-3-2.

Dadurch enthält das Land eine geologisch-geomorphologische Großgliederung, die man wie folgt zusammenfassen kann: (Vgl. Abb. A-3-3 und [1]).

- **Die Tihama (westliche Küstenebene):** Sie läuft parallel zum Roten Meer von der saudischen Grenze im Norden bis zum Bab-Almandab im Süden. Sie ist aus jüngeren und jüngsten Meeresablagerungen zusammengesetzt. Korallenkalk und Muscheln sind die Ausgangsstoffe. An den Wadimündungen sieht man die verschiedenen aus dem Gebirge herantransportierten und sortierten Ablagerungen, Sand, Schutt, Geröll und Lehm in den Feldern. In der Nähe des Gebirgsfußes, wo sie Höhen bis zu 600 m erreichen, durchbrechen Felsstücke und Berge verschiedenen Ursprungs die Ebene, manchmal Kalkablagerungen, dann Berge vulkanischen Ursprungs [34].

- **Die südliche Küstenebene:** Sie läuft parallel zum Arabischen Meer vom Ras-Alscheich-Saeed im Westen bis zum Ras-Dharbat-Ali im Osten mit einer Gesamtlänge von 1500 km. Die Ablagerungen sind weitgehend ähnlich wie an der Tihama-Küste [16].

- **Die westlichen Gebirgshänge:** Sie sind stark zerklüftet, bilden das angeschnittene Randgebiet des Tafellandes, und bieten im morphologischen Aufbau eine Einheit.

- **Das südarabische Tafelland:** Es ist ein Teil der großen altweltlichen Wüstentafel, die sich vom Atlantik bis zum Persischen Golf erstreckt. Die vulkanischen Erscheinungen gehen auf eine sehr lange Entstehungszeit zurück.

Hier führte die Verwitterung zu Basalt-Trümmerfeldern aber auch zu fruchtbarem Ackerland (Lehm).

- **Die das Land querende Sabatayn Depression:** Sie ist die einzige großräumige geologische Struktur. Sie beginnt im Becken von Sa'da, setzt sich im Jawf-Graben fort, umfasst die eigentliche Sabatayn Senke und führt mit dem Balhaf-Graben zum Golf von Aden. Diese Bruchzone teilt Jemen in zwei Bereiche, westliches gegliedertes Bergland und östliche Hochflächen Gol-Hadhramaut [34].

Nach [54] können die wichtigsten Rohstoffe von Gesteinen und Mineralen in folgender Tabelle zusammengefasst werden, sodass verständlich wird, warum die Jemeniten traditionell Lehme, Kalke und Natursteine so intensiv in ihrer reizvollen Baukunst verwendet haben, vgl. auch [6, 8, 55].

Rohstoffart	Kalk-Gesteine	Tonminerale	Feldspat	Granit & Gabbro	Ignimbrite & Tuff	Kiesel-Erde	Quartz
Reserve in Mill. m <sup>3</sup>	13 500	20	13	1,5	345	160	13

Rohstoffart	Vulk. Schlacke	Perlite & Bims-Gesteine	Marmor-gesteine	Basalt-Gesteine	Zeolite	Schwarz-Sand	Gips
Reserve in Mill. m <sup>3</sup>	64	300	885	138	500	500	160

**Tab. 3.1-1 Die wichtigsten Rohstoffe von Gesteinen und Mineralen und ihrer Mengen im Jemen, Angaben [54]**

### 3.3 Klimatische Faktoren und regionale Gegebenheiten

Die geographische Lage des Jemen südlich des nördlichen Wendekreises und die starke vertikale Gliederung des Reliefs haben das Klima sehr stark beeinflusst. Im Jemen setzt die Trockenzeit etwa im Oktober ein und dauert bis in den März. In diesem halben Jahr bestimmen die trockenen Nordpassate, die vom Subtropenhoch südlich des persischen Golfs zum Äquator wehen, die Witterung. Trockene Luft und große Temperaturschwankungen sind die allgemeinen Hauptmerkmale dieser Zeitperiode. Die Trockenzeit endet im April durch Aufkommen der Ost- und Südostwinde und Führung der feuchten Luft vom Indischen Ozean gegen die Süd- und Westabdachung des Tafellandes des Jemen, was zu den lokalen gewittrigen Niederschlägen führt. Von Mitte Mai bis Ende Juni herrscht wieder eine kurze Trockenperiode, doch bereits im Juli beginnt die zweite stärkere Regenzeit; vgl. Abb. 3.3-1. Diese Regenperiode ist charakterisiert durch heftige, plötzliche, manchmal mit Hagel verbundene Starkniederschläge. Nach [3] sowie [16] wurde der Jemen in vier Hauptklimaregionen unterteilt, wie folgt:

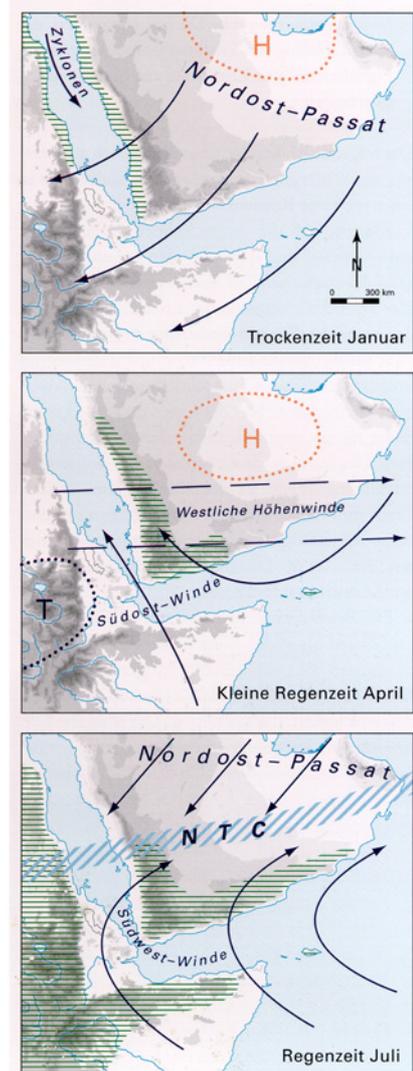


Abb. 3.3-1 Wetterkarten zu den drei Jahreszeiten im Jemen [24]

#### 3.3.1 Klimaregion der Küstengebiete

Diese Klimaregion umfasst sowohl das westliche zu dem Roten Meer parallel laufende Küstengebiet Tihama als auch den im Süden zu dem Arabischen Meer parallel liegenden Küstengürtel. Diese Klimaregion ist gekennzeichnet durch hohe Temperaturen, über 40 °C im Sommer und 25° C im Winter. Die tägliche Temperaturamplitude beträgt im Sommer 4 K und im Winter 3 K. Die relative Feuchtigkeit in dieser Region ist oft über 70% wegen seiner geografischen Lage in der Nähe von Meereswasserflächen, sodass ein unerträgliches Klima, besonders im Sommer, in dieser Region herrscht. Die Regenmenge beträgt oft weniger als 200 mm.

Die oben genannten Klimaparameter haben die Bauformen in dieser Region sehr stark beeinflusst. Das Tihama-Hofhaus hat sich als die am besten geeignete Bauweise für diese Region erwiesen, vgl. Abschnitt 4.2.2.

### **3.3.2 Hochlandklimaregion**

Diese Klimaregion umfasst die westliche Bergkette mit einer jährlichen durchschnittlichen Temperatur von 20°C bis 27°C und das südliche Bergland mit einer jährlichen durchschnittlichen Temperatur von 25°C bis 30°C. Die tägliche Temperaturamplitude beträgt im Sommer 7,6 K und im Winter 6,6 K. Die westliche Bergkette funktioniert als eigentlicher Regenfänger und ist mit einer mittleren jährlichen Niederschlagsmenge von ca. 400 bis 1200 mm die regenreichste Zone im Jemen. Das südliche Bergland hat eine mittlere jährliche Niederschlagsmenge von ca. 250 bis 400 mm, weil es parallel zu der südwestlichen Hauptwindrichtung liegt [52]. Das westliche Bergland hat eine Höhe von 500 bis 2000 m, während die südliche Bergkette eine Höhe von 1500 bis 2500 m hat. Der Jahresdurchschnitt der relativen Luftfeuchtigkeit liegt bei 61%, vgl. [108].

### **3.3.3 Klimaregion des östlichen Plateaus**

Das östliche Plateau erreicht im Allgemeinen eine Höhe von ca. 200 bis 1500 m mit Ausnahme einiger Berge, die Höhe von 2000 m überschreiten. Regen ist im gesamten Bereich des Plateaus eine Seltenheit. 200 mm pro Jahr werden kaum überstiegen. Diese Klimaregion ist gekennzeichnet durch hohe Temperaturen. Im Sommer beträgt die durchschnittliche Maximaltemperatur 42,5°C und im Winter 29°C. Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht überschreiten oft 17 K. Der Mittelwert der relativen Luftfeuchtigkeit beträgt in den Sommermonaten 23% und in den Wintermonaten 36%.

### **3.3.4 Wüstenklimaregion**

Dieses Klimagebiet liegt nördlich des östlichen Plateaus, reicht bis zur saudischen Grenze im Nordosten des Landes (ein Teil von Al-Rob-Alchali-Wüste), und erreicht eine Höhe von rund 1000 m. Ganzjährig sehr trockene Luft, täglich große Temperaturschwankungen (oft mehr als 20°C) und ein stetiger Wind prägen das Klima. Die Regen sind hier selten und übersteigen kaum 50 mm pro Jahr.

### 3.4 Historische und politische Faktoren

Der Jemen stand in der Antike in regem und engem kulturellen Austausch mit Mesopotamien und dem Mittelmeer. Wichtigste Grundlage der Wirtschaft des Jemens war seine geographische Lage, als Entrepôt zwischen den Gewürzen Indiens, die an die Südküste Arabiens verschifft und von hier auf der „Wehrauchstraße“ nach Gaza verladen wurden – und mit dem Gold und Silber zahlender Abnehmer am Mittelmeer (König Salomon, Ägypten, Rom), denn das Königreich von Saba dürfte schon vor dem 1. Jahrtausend v. Chr. als Staat bestanden haben [33]. Wichtigstes einheimisches Handelsgut waren Achate und Weihrauch, gewonnen aus dem Weihrauchbaum, der heute noch im Gebiet der jetzigen Provinz Shabwa, aber auch im Hadhramaut, in der Provinz Mahra, und vor allem in Dhofar (heute in Oman) wächst. Mehr dazu in [116].

Diese Handelswege waren der Hauptgrund für die Entstehung von Großstädten in der Antike wie Marib, Schabwa, Tamna und Schibam, vgl. Abb. A-3-4 und [10].

Neben dem erfolgreichen Handelssektor hatten die Jemeniten seit dem 3. Jt. v. Chr., wie oben beschrieben, sehr effektive und nachhaltige Bewässerungssysteme entwickelt, vgl. Abschnitt 3.9.

Da die neue Wirtschaftsweise eine stabilere Nahrungsgewinnung aus einer verbesserten Energiebilanz in der Agrarproduktion ermöglichte, konnte die Bevölkerung zunehmen“. Arbeitskräfte aus der „Urproduktion“ (Landwirtschaft) wurden frei für die Tätigkeit außerhalb dieses Sektors, vor allem in den Bau- und Handelssektoren. Dies ermöglichte die Entstehung von städtischen Kulturen, was zu technischen, wirtschaftlichen, und soziopolitischen Veränderungen führte [98].

Seit der Gründungszeit des Zeiditenstaates in Sa'da in den Jahren 910 n. Chr. bis 1962 n. Chr. (Septemberrevolution) wurde der nördliche Teil des Jemen vom Mutawakkilitischen Königreich unter einer fast vollständigen Isolation regiert. Bis dahin verhinderte in großen Maßen die isolatorische Politik der Imame das Eindringen westlicher Innovationen. Koloniale Einflüsse sind für die Modernisierung des Nordjemen ebenfalls auszuschließen [19].

Dadurch haben sich allmählich sehr eng an das Naturpotenzial des semiariden Raumes angepasst Landwirtschaft und Lehmbauweisen, die schon ihre Anfänge in der südarabischen Hochkultur hatten, weiter entwickelt, und wir können bis heute die verwendeten Lehmbautechniken finden.

Wegen seiner strategischen Lage am südlichen Tor des Roten Meeres und seiner Handelsbedeutung stand der Jemen im Spannungsfeld fremder Interessen. In der vorislamischen Ära sowie danach versuchten Perser, Römer, Abessinier, Portugiesen,

Briten, Osmanen, und indirekt Russen den Jemen unter ihren jeweiligen Machteinfluss zu stellen. Die Küstengebiete fielen dabei zuerst in die Hände der Angreifer. Im Gebirgsland, wenn überhaupt, kam es dabei nur zu einer gebietsweisen Eroberung, vgl. [47] sowie [33]. Die Festungen der Osmanen sind bis heute im ganzen Gebirgsland zu sehen. Einflüsse der persischen Architektur sieht man besonders in Kuppelbauten. Die Briten - während ihrer Kolonie im Südjemen (1839–1963) - haben Betonbauten in Aden errichtet und von dort strömte der Baustoff Beton ins ganze Land, besonders in den südlichen Teil des Landes, und langsam begann die Verdrängung traditioneller Baustoffe, insbesondere des Lehms [113].

Mit der „Septemberrevolution“ 1962 wurde die Isolation des Jemen abgebrochen. Die Aufnahme der offenen Politik durch die neuen Machthaber erlaubte im nördlichen Teil des Jemen erstmals das Eindringen und die Ausbreitung technologischer Innovationen. Im Bausektor wurden neue Baustoffe importiert, vor allem Zement und Stahl, um Stahlbetonbauten am Anfang öffentliche Bauten, später auch Wohnbauten, zu errichten. Bis jetzt wurden schon 3 Zementfabriken im Jemen errichtet, in Bajel (374,000 t/J) im Jahre 1959, in Amran (500,000 t/J) im Jahre 1982, und in Al-Barh (500,000 t/J) im Jahre 1993. Alle drei Fabriken produzieren knapp 40% des Zementbedarfs im Jemen. Der Rest wird durch Importe gedeckt [56].

### **3.5 Migration und Binnenwanderung**

Die Emigration aus dem Südwesten der arabischen Halbinsel hat bereits eine sehr lange Tradition. Hinweise auf verschiedene Wanderungsbewegungen großer Bevölkerungsgruppen, die schon in vorislamischer Zeit aus dem Jemen insbesondere nach Ostafrika hinüberzogen, finden sich in historischen Quellen, vgl. [128, 68]. Die moderne Phase der jemenitischen Migration setzte in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ein, als eine wachsende Zahl von meist jungen Männern auf der Suche nach Arbeitsmöglichkeiten in die britische Kronkolonie Aden kamen, und von dort weiter nach Ostafrika, Süd-Südostasien, Frankreich, England und USA wanderten [83].

Vor 1960 waren die Zielgebiete der Jemeniten, insbesondere der Hadhramiten, die Staaten von Ostafrika und Südostasien, sodass in den 1940er Jahren von ca. 300 000 Einwohnern in der Region Hadhramaut etwa 100 000 im Ausland lebten, davon ca. 70 000 im niederländischen Indien, vgl. Abb. A-3-5 sowie [68].

Die Wanderungsbewegungen der Bevölkerung von und nach Jemen hat die jemenitische Architektur sehr stark beeinflusst. Besonders betroffen waren die westlichen Küstengebiete, die durch die ostafrikanische Architektur beeinflusst wurden und die

Lehmarchitektur in Wadi-Hadhramaut, die auf indische und ostasiatische Einflüsse hinweist.

Beispiele für diese Einflüsse sind die Lehmpaläste der Alkaf-Familie, das Minarett der Almihdar-Moschee in Tarim und der Palast von As-Sultan Alkathiry in Seiyun, die aus den traditionellen luftgetrockneten Lehmsteinen gebaut sind. Hier sieht man in den mit Kalksandputzen durchgeführten Fassadendekorationen die indischen und südostasiatischen Einflüsse in der jemenitischen Architektur, vgl. Abb. 4.1-8 und Abb. 4.1-9 sowie Abb. 4.6-4.

Mit der Verschlechterung der wirtschaftlichen Lage der jemenitischen Gemeinschaft in den afrikanischen Ländern (Uganda, Tansania, Somalia und Kenia), die bis 1960 Zielgebiete für die jemenitischen Auslandsarbeiter waren [122], und mit dem gleichzeitigen Aufschwung der Erdöl-Ökonomie auf der arabischen Halbinsel erhielt die jemenitische Gemeinschaft, insbesondere aus Hadhramaut, in Saudi Arabien und in den Golfstaaten einen starken Zustrom, vgl. Abb. A-3-5. Allein aus der Region Hadhramaut zählt heute in Saudi Arabien mehrere Hunderttausend ihrer Gemeinschaftsmitglieder [106], trotz des Bevölkerungsschubs durch die Rückkehr von ca. 1,5 Mill. jemenitischen Gastarbeitern von den Golfstaaten nach dem Wüstensturm 1990. Diese Wanderung der Arbeitskräfte hat erhebliche Einflüsse auf den Bausektor, die man wie folgt zusammenfassen kann:

- Die Geldüberweisungen der Emigranten in den Jemen stiegen, und wurden meistens für die Errichtung von neuen Wohnungen in neuen Baustoffen, Beton und Stahlbeton, beeinflusst von der Golfarchitektur, verwendet;
- Es entstand ein großer Mangel an Arbeitskräften auf dem Markt, dadurch sind die Arbeitslöhne sehr hoch gestiegen, vgl. [75].
- Die ausländischen Baufirmen, besonders die chinesischen Baufirmen, fanden Gelegenheit, Bauaufträge im Jemen zu bekommen, und intensivierten die Verwendung von den modernen Baustoffen, besonders Beton und Stahlbeton, auf Kosten der traditionellen Baustoffe, s. [113].

Die Verstädterung im Jemen befand sich in der Mitte der 70er Jahre noch in einer frühen Phase, vgl. [84].

Seit 1990 haben sich die jemenitischen Städte besonders im Süden des Landes rasch, spontan und weitgehend ohne planende Steuerung entwickelt. Als Beispiel für diese Städte sind Seiyun, die Hauptstadt von Wadi-Hadhramaut und Mukalla, die Hauptstadt der Provinz Hadhramaut zu nennen, welche nach der jemenitischen Vereinigung in den Jahren nach 1990 einen Bauboom erlebten, der zu einer Verdreifachung der bebauten Fläche der Städte führte, vgl. [106].

Das jüngste Wachstum von den jemenitischen Städten ist von folgenden Faktoren abzuleiten:

- Das sehr schnelle Bevölkerungswachstum wegen der jährlichen Wachstumsrate von ca. 3,5%, vgl. Abb. 1.2-1 sowie [85].
- Der größte Bevölkerungsschub, den die jemenitischen Städte durch die Rückkehr von ca. 1.5 Millionen Gastarbeitern erlebten, war nach dem 1. Irakkrieg 1990. Die Alliierten wollten die Bemühungen der jemenitischen Regierung, im Konflikt neutral zu bleiben, nicht sehen. Die Folgen waren katastrophal. Über 1,5 Millionen Gastarbeiter wurden von den Golfstaaten nach Hause geschickt [24]. Schnelle Lösungen wurden gesucht, um Wohnungen für die rückgekehrten Familien zu schaffen. In den Lehmgebiete konnten die traditionellen Lehm Bauweisen mit ihren sehr langen Ausführungszeiten die Aufgabe nicht bewältigen. Stahlbeton und Betonhohlblocksteine kamen intensiver zur Verwendung. In den relativ armen Gebieten hat man Blechwohnungen errichtet, in denen dann unmenschliche Klimate herrschten.
- Das Fehlen von grundsätzlicher Infrastruktur in den ländlichen Regionen führt zur Abwanderung in die Städte. 1975 lebten noch 11,1% der Gesamtbevölkerung in den Städten, und 88,9% der Bevölkerung lebten in Siedlungen mit unter 2000 Einwohnern. Im Jahre 2003 lebten in den Städten schon 26,5% und auf dem Lande 73,5%, vgl. [125] sowie [85].
- Einfluss der jemenitischen Wiedervereinigung 1990 auf den Bausektor, besonders in den Städten der östlichen und südlichen Provinzen im Jemen.

### **3.6 Religiöse Einflüsse**

In den südarabischen Kulturen, wie in anderen alten Kulturen der Welt z.B. in Altägypten oder Mesopotamien, waren die offiziellen sowie die persönlichen Beziehungen zwischen den Menschen und ihren Göttern tiefgründig [5]. In der jemenitischen Altkultur prägte das Verhältnis zum Göttlichen das gesamte öffentliche und private Leben. Die Idee des Staates wurde durch den dreifachen Begriff „Nationalgott, Herrscher, Volk“ ausgedrückt [110].

Jürgen Schmidt schrieb in [32]: „Die Südaraber waren nicht nur technisch und organisatorisch sehr begabt, nicht nur die Schöpfer eines differenzierten und gut funktionierenden Staats- und Rechtswesens, die Erbauer komplizierter und technologisch hoch entwickelter Bewässerungssysteme, sie waren vor allem sehr fromme Menschen. Ihre tiefe Religiosität durchströmte alle Bereiche des öffentlichen und privaten Lebens“. Er schrieb weiter: „Dem südarabischen Pantheon stand die Göttertrias Mond – Sonne – Venusstern voran.... In Saba wird der Mondgott Almaqah genannt und ist zum Reichgott der Sabäer auserkoren worden, in Maïen heißt er Wadd, in Hadhramaut Sin [121]. Die Religiosität fand ihren Niederschlag aber nicht nur in Anrufung, Dedikationen und Beschwörungen, sondern auch in Zeugnissen der materiellen Kultur, in Bildwerken und Bauten“.

Es gab also nicht nur klimatische oder militärische, sondern auch religiöse Einflüsse auf die altsüdarabische Architektur.

Um ihrem Mondgott (Hauptgott) näher zu kommen, wählten die Menschen hohe Lagen zum Bauen, noch dazu Hochhäuser fast in ganz Südarabien gleich, ob es in den Städten oder auf dem Lande war, vgl. [7].

Die archäologischen Forschungsarbeiten von dem französischen Team im Königspalast von Shabwa (der Hauptstadt des ehemaligen Reiches von Hadhramaut), haben anhand von Spuren aus dem Jahr 217 oder 218 n. Chr. nachgewiesen, dass schon die alten Südaraber Hochhäuser errichteten und ihre Städte wirklich so aussahen, wie heute noch Shibam, das „Chicago der Wüste“, oder auch das alte Sana'a, und so manches mächtige turmhohe Haus in den Dörfern des Jemen. Die französischen Archäologen konnten die Hochhaus-Architektur nicht nur für den Königspalast von Shabwa nachweisen, sondern auch für ein in Mashgha (südlich von Tarim) gelegenes achtstöckiges Privathaus. Inschriften bezeugen dies auch von dem sabäisch- himjaritischen Raum, vgl. [32].

Dadurch wird ersichtlich, weswegen die Jemeniten traditionell und bis heute **Hochhäuser bevorzugten**, gleich ob sie den Lehm oder andere Baumaterialien verwendeten.

Im Jahre 628 n. Chr. schloss sich der Jemen dem Islam an [33]. Der Islam als monotheistische Religion ruft zur Anbetung Gottes „Allah“ des Einzigen auf.

Die Einflüsse des Islam und seine Regeln haben dann auch die jemenitische Architektur stark beeinflusst.

Beispiele der Einflüsse:

- Das Verschwinden der Symbole des Polytheismus am Anfangsstadium des Islam. Dementsprechend werden die Hausfassaden nicht mit menschlichen bzw. tierischen Statuen, welche aus anderen Kulturen bekannt sind, gestaltet.
- Die Häuser in den Altstädten, wie in „Shibam“ als Beispiel, wurden Seite an Seite angeordnet, genauso wie die Muslime beim Gebet Schulter an Schulter stehen. Hierbei wurden Brüderlichkeit und Solidarität aller Muslime durch dichte Struktur der Städte ausgedrückt, vgl. Abb. 4.1-6 sowie Abb. 4.1-7. Es entstanden starke nachbarschaftliche Beziehungen, deren Pflege als religiöse Pflicht gilt.
- Nach der islamischen Lehre wird auch fast die gleiche Höhe der Gebäude gewählt, sodass die Privatsphäre der Familien auf den Dachterrassen erhalten bleibt.
- Man achtete auf den Schutz der Familie vor fremden Blicken, was zur Entwicklung von filigranen Fensterabschlüssen (Maschrabia) führte, s. Abb. 4.4-1. Diese Fensterart ermöglicht den Bewohnern den Blick nach außen, ohne dabei gesehen zu werden und ohne die üblichen Funktionen der Fenster zu beeinträchtigen [31].
- Bemerkenswert sind die mit einem Dach versehenen Brücken, die viele Hochhäuser in Shibam in den obersten Geschossen verbinden. Diese Brücken wurden historisch auch von den Stadtverteidigern verwendet, um ihre Bewegung in der Stadt zu erleichtern, ohne dass sie auf die Straße zu gehen brauchen. In Friedenszeiten und bis heute wurden, und werden sie bei gegenseitigen Besuchen von Frauen verwendet. Damit werden die endlosen Treppen vermieden.
- Deutliche Trennung des familiären Bereiches von dem Gästebereich (fremde Männer) bei der Planung der Wohnungen.
- In den modernen Erdgeschosswohnungen versucht man die Fensterbrüstung so hoch wie möglich zu halten, und die Fensteröffnungen klein zu wählen, so dass die Passanten nicht ins Rauminnere blicken können.

- Interessant ist auch bei der jemenitischen Architektur, das Beachten der Ehrung der Eltern und der Großeltern, die ein sehr beachtliches Recht im Islam haben. Ihre Zimmer werden meistens ganz oben gewählt, sodass niemand über ihnen sitzt oder schläft. Normalerweise sind ihre Zimmer in der Nähe der Dachterrasse gebaut, damit können sie sich ohne große Mühe dort erholen.

### **3.7 Einfluss der jemenitischen Wiedervereinigung 1990 auf dem Bausektor besonders in den Städten der östlichen und südlichen Provinzen im Jemen**

Nach dem Rückgang im privaten Wohnungsbau während des sozialistischen Regimes (1967-1990) durch die Bekanntgabe des „Wohngesetzes“ (Qanun al-Iskan) von 1972, welches durch die Beschlagnahme oder Enteignung von Wohnhäusern das Vertrauen potenzieller Bauherren erschütterte, erlebten die jemenitischen Städte in den südlichen und östlichen Jemen-Provinzen nach der jemenitischen Wiedervereinigung 1990 einen Bauboom. Die in der Folge der Vereinigung aufgetretenen Umstände wie Landverteilung durch die Regierung, Ölfunde in der Region und die Aktivitäten der Emigranten (al-Mughtrabin) führte insbesondere in der Hadhramaut- Region zur Kommerzialisierung von Landtiteln und zur Entstehung eines dynamischen Boden- und Immobilienmarktes. Innerhalb von nur fünf Jahren erweiterte sich die bebaute Fläche der Regionshauptstadt Mukallah um das Dreifache [106]. Der Immobilienmarkt wird zusätzlich durch entdeckte Ölvorkommen aufgeheizt [75].

Die Erwartungen, die auf die Zukunft der mutmaßlichen „Ölregion Hadhramaut“ gesetzt werden, veranlassen heute Migranten, spekulativ in Grund und Boden zu investieren.

Durch die starke Nachfrage nach Land erreichen die Grundstückspreise Rekordwerte. Von 1990 bis 1995 sind die Grundstückspreise in den meisten Städten von Wadi-Hadhramaut um 300% gestiegen [106].

Aufgrund der hohen Grundstückspreise und der großen Konstruktionsflächen bei den Lehmbauten werden die meisten neu errichteten Häuser als mit Betonhohlblocksteinen ausgefachte Stahlbetonskelette gebaut. Oft kommt Naturstein als Fassadendekorationselement zur Verwendung. Es entstehen Häuser, die ganz ähnlich der Bauweise in den nördlichen Regionen sind und keinen Bezug zu den bauklimatischen Gegebenheiten in der Region haben. Folge davon sind höhere Kosten bei der Anschaffung, Wartung und Einsatz von Klimaanlage, vgl. Abschnitt 2.2.

### **3.8 Technische Faktoren**

Fast alle Bauherren wünschen Grundstücke im so genannten geplanten Stadtteil zu kaufen, weil am Rand der Städte Anschlussleitungen und Zufahrtswege fehlen. Manche Straßen besitzen keine Befestigung, die in der Regenzeit für den Baustellenverkehr ausreichend wäre. Die Bedingungen an den Rändern der jemenitischen Städte sind ähnlich wie auf dem Land. Es sind Gebiete, wo keine ausreichende Erschließung, wie Wasserver- und Entsorgung, Elektro- und Telefonanschlüsse und Müllabfuhr gegeben sind, sodass man eigene Anlagen mit erheblichen Kosten und Platzbedarf braucht. Deshalb ist die Nachfrage an den Baugrundstücken in der Stadt, wo teilweise bessere Infrastruktur vorhanden ist, sehr groß. Als Folge fehlender Mittel für die Erschließung und meist viel zu geringer Ausnutzung der einzelnen Grundstücke gibt es inzwischen eine ausgesprochene Baulandverknappung in den Städten. Dadurch steigen die Grundstückspreise weiter.

Aus verkehrstechnischen und hygienischen Gründen kann man die Gebäude nicht mehr so nahe aneinanderstellen. Feuerschutzmaßnahmen, Lärm, Abgasegestank und vor allem der Bedarf an breiteren Straßen als in den Altstädten sind ein Hindernis dafür.

### **3.9 Einflüsse der Bewässerungssysteme**

Die Technik der Bewässerungssysteme im Jemen ist sehr alt und mit der Entwicklung der jemenitischen Kultur eng verknüpft.

Im Jemen sieht man besonders deutlich den Erfolg der jemenitischen Bewässerungssysteme, der darin begründet liegt, dass es der Mensch über Jahrtausende verstanden hat, sich den Gegebenheiten in der Natur anzupassen, sie sich nutzbar zu machen. Mit einem ausgeklügelten, im Laufe der Zeit ständig verbesserten System von Dämmen, Schleusen, Kanälen und Wasserverteilern wurden die in den großen Tälern stoßweise ankommenden Wassermassen großflächig verteilt (Sayl-Bewässerung).

Brunner schrieb in [24]: „Hier deuten die Erkenntnisse, die in mehreren Wadis schon seit zwanzig Jahren gewonnen werden konnten, darauf hin, dass eine geregelte Bewässerung spätestens im 3. Jt. v. Chr. begann und ohne substantielle Änderungen ihrer Technik auch noch während der ganzen südarabischen Periode weitergeführt wurde. Die einzige Neuerung, welche die eingewanderten Sabäer einführten, war die rechtwinklige Anordnung des Kanalsystems mit fest gebauten Auslässen“, vgl. auch [25].

Dabei waren und sind immer noch bis heute überall im Jemen zwei Hauptbewässerungssysteme der „Sayl-Bewässerung“ wegen der Topographie und der Klimaverhältnisse des Landes bekannt, die „Terrassenbewässerung“ im Gebirgsland und die „Wadibewässerung“ in den relativ flachen Ebenen (Wadis).

Im Gebirgsland vom Jemen wurde durch die Terrassierung des steilen Geländes die Landnutzung erst ermöglicht. Das Wasser wurde mit Hilfe der Schwerkraft von den oberen Feldern nach unten geleitet (Terrassenbewässerung).

In den Wadis wird das stark fließende Wasser nach einem plötzlichen heftigen Regen anhand von Ablenkkanälen, die ein Gefälle von 1-2% haben, beruhigt. Dadurch wird die Fließgeschwindigkeit des Wassers reduziert und die Felder gegen Erodieren geschützt. Ein weiterer Vorteil ist, dass das grobe Geröll und der Kies im Wadi liegen bleiben, und nur die Feinteilchen gelangen wegen ihrer geringeren Dichte ins Kanalsystem (Wadibewässerung), vgl. Abb. A-3-6 und Abb. A-3-7 sowie Abb. A.3-8.

Es ist bekannt nach [50], dass für fluviatile Suspensionstransporte mit einer Sohlneigung  $\beta$  klastische Sedimentkörner in Suspension transportiert werden, wenn ihre Sinkgeschwindigkeit der Ungleichung:

$$v \leq 0,375 \cdot \sqrt{m \cdot \operatorname{tg} \beta}$$

genügt ( $m$  = der hydraulische Radius. Bei breiten flachen Rinnen entspricht er annäherungsweise der mittleren Wassertiefe, wie in jemenitischen Bewässerungskanälen der Fall ist).

Da die Sinkgeschwindigkeit im Wasser für die größten Tonkörner zum Beispiel bei 17 °C etwa  $3,55 \cdot 10^{-4}$  cm/sec. (ca. 1,28 cm/h) beträgt [59], sind bereits für die traditionellen Bewässerungskanäle die Voraussetzungen für einen Suspensionstransport gegeben. Dies entspricht der Erfahrung, dass eine Tonsedimentation nur aus strömungsfreien Gewässern erfolgt. Die transportierenden Strömungen müssen also zuvor praktisch vollständig zum Erliegen kommen.

Deshalb sind beide Bewässerungssysteme sehr eng verbunden mit dem Lehm- und Ziegelbau. Diese Bewässerungssysteme liefern sowohl das notwendige Wasser für die Agrarflächen, als auch die Feinteilchen (Fein- und Mittelfeinsand, Schluff und Ton), die mit dem stark fließenden Regenwasser (Sayl) schwimmen und dann langsam in den bewässerten Bergterrassen und Feldern in den Wadis, wenn das Wasser zur Ruhe kommt, sedimentieren.

Untersuchungen haben gezeigt, dass das Saylwasser, das in den bewässerten Feldern zur Ruhe kommt, ca. 1% dieser Feinteilchen enthält, deren Durchmesser kleiner als 0,4 mm ist [24]. Durch dieses System hat jährlich um ca. 1 cm die Bodenhöhe (gebrauchter

Baulehm) zugenommen, und damit war der Baustofflehm für den Bau der umliegenden Siedlungen kostenlos vorhanden.

Deshalb sind die meisten jemenitische Baulehme fast fette bis sehr fette Lehme [18].

Untersuchungen von Al-Mashreki in AREA in Dhamar an insgesamt 498 Lehmproben aus insgesamt 15 Untersuchungsgebieten, bei denen er nach dem Entfernen aller Fraktionen größer als 2 mm qualitative und quantitative Analysen durchgeführt hat, haben gezeigt, dass die jemenitischen Lehme einen sehr hohen Anteil an Ton, durchschnittlich 22,5 Massenprozent, enthalten, vgl. [9].

In der Umgebung der Stadt Marib findet man heute stellenweise mehr als 30 m mächtige Lehmablagerungen der antiken Bewässerung.

Bis heute und allgemein im Jemen freuen sich die Bauern sehr, wenn jemand einen Teil des Felderlehms nimmt, sodass das Niveau der Felder nicht über die Niveauflächen der Ablenkanäle und Wadibett kommt.

Daraus kann man schließen, dass die traditionellen Bewässerungssysteme den Lehmabbau benötigen, um die Felderflächen in dem richtigen Niveau zu erhalten, und umgekehrt der Lehmabbau braucht die traditionellen Bewässerungssysteme, um den regenerierbaren Baustoff Lehm zu bekommen.

In den letzten vier Jahrzehnten, in denen die modernen Baumaterialien, vor allem Stahlbeton, den Baustoff Lehm im Jemen verdrängten, ist das oben beschriebene, ökologische und nachhaltige System gestört. Sand und Kies werden für Betonarbeiten von Wadibetten gefördert und die Nutzung des Baustoffes Lehm nimmt ab.

Dadurch sind die Feldflächenniveaus höher geworden als das Wadibett, und die Felder in vielen Wadis können nicht mehr durch traditionelle Bewässerungssysteme bewässert werden. Die Folge davon sind Konflikte und Streitigkeiten zwischen Betonfirmen, die Sand und Kies vom Wadibett fördern und den Bauern, die ihre Felder nicht mehr durch kostenlose Saylwasser bewässern können. Ein Beispiel dafür ist Wadi-Al-Schauaifa südlich von Al-Rahidah- Stadt in der Provinz Taiz, vgl. Abb. A-3-8.

### **3.10 Beeinflussung durch Lebensformen**

Die allgemeine gegenseitige Beeinflussung von Lebensform und Architektur wurde von vielen Forschern und Wissenschaftlern schon behandelt. Diese Wechselwirkung stellt auch im islamischen und arabischen Raum keine Ausnahme dar. Die Ausbildung und der Bestand eines gebauten Lebensrahmens hängen eng mit den Lebensformen zusammen,

die sich darin abspielen. Diese suchen gewissermaßen ihren Ausdruck und ihre Verfestigung im Medium Architektur, wie die Architektur ihrerseits die Lebensformen prägt und stützen kann [20]. Diese Tatsache kann man erkennen in der jemenitischen Architektur und Lebensform der Jemeniten, vgl. Abb. A-4-1 bis A-4-5 sowie Abb. 4-2-5. Bis vor vierzig Jahren waren noch in jedem traditionellen jemenitischen Haus, meistens im Erdgeschoss und im ersten Obergeschoss sowie im Hofbereich, Viehräume und Lager für Viehfutter und Holz, Lagerflächen für Lebensmittel und Produktionsflächen vorhanden, sodass in Krisenzeiten die Bedürfnisse der Familie an Lebensmitteln für mindestens ein Jahr lang erfüllt wurden.

Ein zweiter Bereich ist der Gästebereich, der in den Südgebieten des Landes meistens im zweiten Obergeschoss angeordnet ist, in Nordgebieten des Jemen im letzten Geschoss. Dieser Bereich wird oft in Frauenzone und Männerzone geteilt. In jeder Zone befindet sich ein Empfangszimmer mit Nasszelle.

Der dritte Bereich ist der Ort der Familie d. h. der Frauen, Kinder und des Hausherrn.

Es muss hier darauf hingewiesen werden, dass die Räume im zweiten und dritten Bereich nicht immer eine eigene Bezeichnung und sichtbare Grenzen haben. Sie erhalten ihre Funktion durch die anwesenden Personen. Es sind die Menschen und ihre Handlungen, die einem Raum einen bestimmten Charakter verleihen [104, 12].

Ein vierter Bereich ist die Dachterrasse als ein Teil des Flachdaches, wo mehrere Aktivitäten ausgeübt werden. Sie wird als Schlafplatz in den Sommernächten, als Trocknungsfläche für Getreide und andere Landschaftsprodukte in den Erntenzeiten und als Ess- und Feierplatz bei Festen und Hochzeiten genutzt. Neben dieser funktionellen Aufgabe von Flachdächern war es auch statisch gesehen die beste Lösung für die Lehmhäuser. Ihr Materialverbrauch und die Windangriffsflächen sind geringer als bei anderen Dachlösungen. Somit bringt das Flachdach die geringsten Wind- und Schubkräfte in das Gebäude, was sehr erwünscht ist, besonders bei Lehmhäusern. Deshalb ist das Flachdach und die damit verbundenen Terrassen zur Hauptkomponente des Wohngebäudes im Jemen geworden.

Aus Sicherheitsgründen und um die private Sphäre nicht zu stören, konnte man die Fußgängerzone von der Hausterrasse kontrollieren, ohne dabei gesehen zu werden. Dafür wurden aus der Fassadenflucht hervorstehende Erker gebaut.

Traditionell werden beim Bauen der Häuser gegenseitige Rechte und Pflichten der Menschen durch die sich im Laufe der Geschichte entwickelten „Gewohnheitsgesetze“ vorbestimmt, um die private Sphäre der Nachbarn nicht zu stören. Dachterrassen und Gebäudehöhen sowie Größe, Richtung, Form und Abstand der Öffnungen zum

Nachbarhaus werden so durchgeführt, dass der Blick in das Rauminnere des benachbarten bzw. gegenüberliegenden Wohnhauses vermieden wird, vgl. Abb. 4.1-6 sowie Abb. 4.1-7.

Weil in einem Haus, traditionell und religiös bedingt (Betreuung von Eltern und Großeltern), eine Großfamilie lebt, die typisch für die jemenitische Gesellschaft ist, stellt dies eine gewisse Notwendigkeit für die Errichtung eines turmartigen Bauwerks dar.

Nach der September-Revolution 1962 wurde vieles in der Lebensform der Jemeniten geändert. Das Land wurde dem Weltmarkt geöffnet. Viele lokale Produkte wurden durch Importwaren ersetzt und eine „Konsumkultur“ hat sich im Lande verbreitet. Als Konsequenz davon verschwanden die Lager- und Produktionsflächen von dem Konzept des Wohnhauses. Stattdessen werden jetzt Läden und Geschäfte im Erdgeschoss gebaut, die zur Straße geöffnet sind.

Die völlig neuen Räumlichkeiten im Erdgeschoss verlangten größere Stützweiten und breitere Öffnungen für Ladeneingänge und ihre Schaufenster. Der Lehm-bau ist ein direkt betroffener Teil dieser Veränderung. Der Baustoff Lehm konnte mit den traditionellen Lehm-bautechniken die neuen Aufgaben nicht mehr erfüllen, deshalb wurde er durch druck- und zugfestere Materialien wie Beton und Stahlbeton verdrängt oder nur noch zur Ausfachung verwendet. Dadurch verlor er langsam seine Stelle als Hauptbaumaterial im Jemen, vgl. Abb. A-1-2.

Ein weiteres Phänomen, was die heutige Architektur und ihre Bauformen im Jemen sehr stark beeinflusst, ist der steigende Bedarf an Tageslicht. Im traditionellen bäuerlichen Leben verbrachte der Mensch den großen Teil seiner Tageszeit beim Arbeiten auf den Feldern. Heutzutage verbringt der Mensch den größten Teil seiner Tageszeit in Gebäuden, sodass der Bedarf an größeren Fensteröffnungen, um kostenloses Tageslicht in den Arbeitsräumen zu gewährleisten, stieg. Als Konsequenz davon werden die Lasten an den Außenwänden nicht gleichmäßig verteilt, was wieder ungünstig für die traditionellen Lehmwände ist. Die Verdrängung des Baustoffs Lehm durch festere Materialien geht weiter.

Mit der Binnenwanderung der jungen Familien vom Land in die Großstädte entstehen Familien mit relativ kleiner Anzahl von Familienmitgliedern im Vergleich zu der traditionellen Mehrgenerationenfamilie, sodass immer mehr Villenbauten und separate kleine Häuser für diese Familien gebaut werden. Diese Bauten haben relativ große Außenflächen im Vergleich zu den traditionellen Hochhäusern und es fehlt einfach in diesem Zusammenhang der gegenseitige Schutz vor Schlagregen und Sandstürmen. Deshalb bevorzugt man die wetterbeständigen Baumaterialien vor dem wasserlöslichen Baustoff Lehm.



## **4 Analyse der traditionellen Lehmbauweisen im Jemen**

In diesem Kapitel werden die traditionellen Lehmbautechniken anhand ihrer Baugebiete, Ausführungstechniken, Vorteile und Nachteile analysiert, vgl. Abb. 4.1-1. Mit Hilfe dieser Analyse und der Analyse von Einflussfaktoren auf den Lehmbau im Jemen (Kapitel 3) werden die oft auftretenden Schäden in den traditionellen Lehmbauten und die traditionellen Schutzmaßnahmen sowie die Gründe für den Rückgang von Lehmbau in den letzten vier Jahrzehnten im Jemen aufgezeigt. Darüber hinaus werden bauklimatische Messungen im kritischen Sommermonat Juli sowie im kritischen Wintermonat Januar im Untersuchungsgebiet Seiyun Wadi-Hadhramaut, das zur kritischen Klimazone im Jemen gehört, durchgeführt, sodass das thermische Verhalten von den Lehmsteinwänden verschiedener Dicken erfasst wird.

Die Verwendung von Lehmbaustoffen umfasst im Jemen hauptsächlich zwei Bauweisen: Lehm für massive tragende Wände und Lehm als nicht tragenden Baustoff zum Bewurf von Flechtwerkwänden.

### **4.1 Verwendung vom Baustoff Lehm für massive tragende Wände**

Die Verwendung vom Baustoff Lehm für massive tragende Wände im Jemen umfasst drei Hauptbauweisen: der Lehmsteinbau, die Zaboutertechnik und die geschützte Bauweise „Kombination vom Lehm und Naturstein“ in den regenreichen Gebieten.

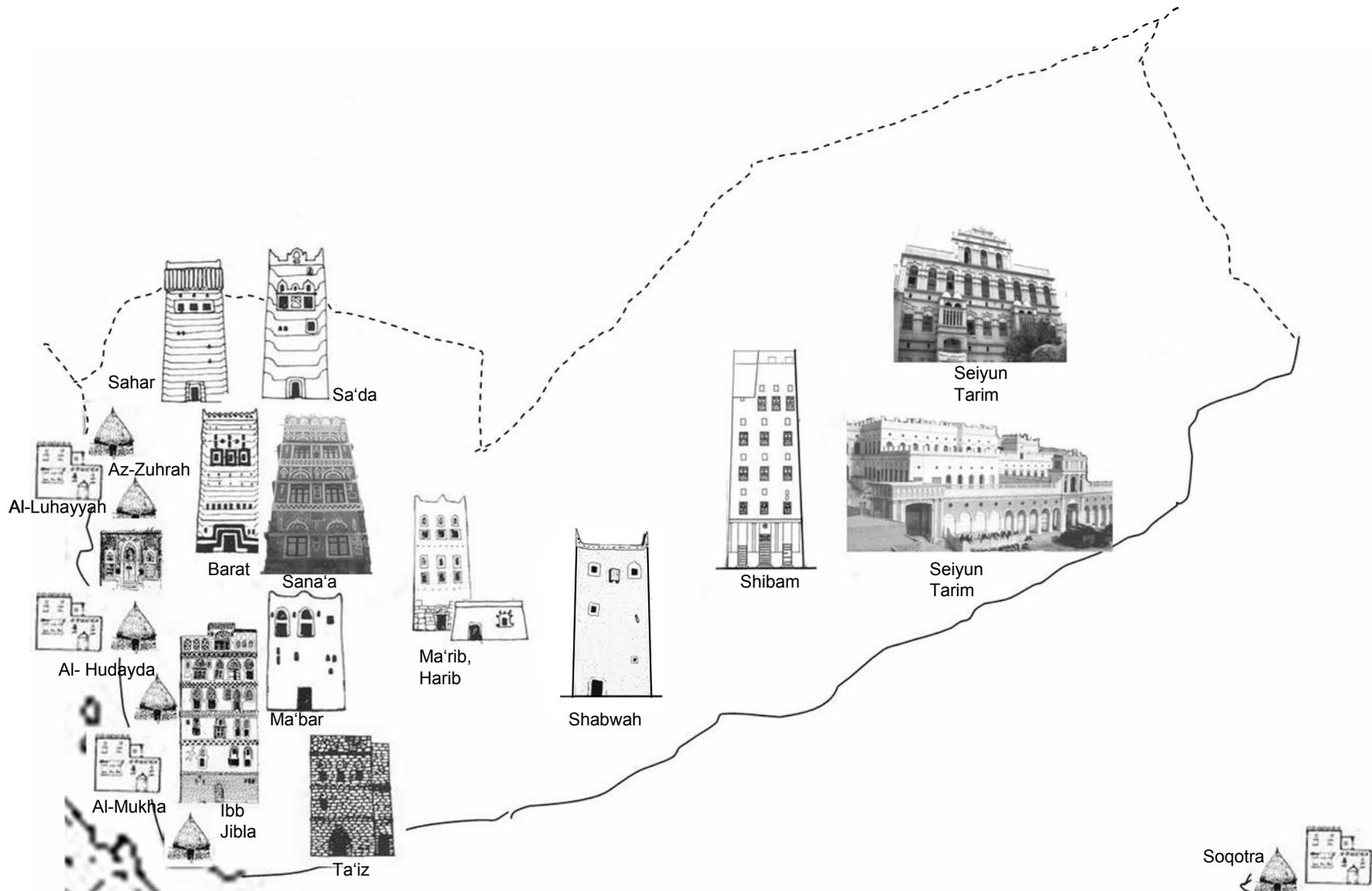
Im Folgenden werden sie detailliert behandelt:

#### **4.1.1 Lehmsteinbau**

##### **4.1.1.1 Baugebiete**

Die Hauptlehmsteinbaugebiete sind in der Region Hadhramaut die Städte Shibam, Seiyun und Tarim in Wadi-Hadhramaut. In der Nachbarregion Shabwa gibt es ebenfalls Lehmsteinbauten mit der gleichen Technik. In der Region Lahj 300 km südlich der jemenitischen Hauptstadt Sana'a ist diese Technik auch verbreitet, vgl. [30, 31]. In den nördlichen Regionen, wo die Zaboutertechnik vorherrscht, findet man nur einige Häuser oder deren obere Geschosse, die in Lehmsteintechnik gebaut sind. Allerdings sind die Abmessungen der Steine hier kleiner als in der Region Hadhramaut, vgl. Tab. 4.1-1.

Die üblichen Maße für die Lehmsteine, die in Sa'da, Ma'bar und A'mran Verwendung finden, sind 20 x 32 x 8 cm.



**Abb. 4.1-1 Allgemeine Hauptbauformen der traditionellen Bauweisen, in denen Lehm als Baustoff verwendet wird im Jemen**

## 4.1.1.2 Ausführungstechniken

### 4.1.1.2.1 Herstellung der Lehmsteine

- Das Rohmaterial wird von den Feldern zum Mischplatz transportiert. Die für die Herstellung von Lehmbausteinen verwendeten Lehme sollen mittelfett bis fett sein und dürfen keine Bestandteile mit einer Korngröße über 5 mm enthalten.
- Der Lehmhaufen, der bei jeder neuen Mischung ca. 3 m<sup>3</sup> Rohmaterial beträgt, wird mit einer Schaufel planiert, sodass seine Höhe ca. 50 cm beträgt. Die Ränder werden ca. 20 cm hochgezogen, dann wird Mischwasser in dieses „Lehmbecken“ gegossen.
- Nach einigen Stunden wird die Lehmmasse mit einem Holzpfahl an mehreren Stellen angestochen, oder einfach mit den Füßen getreten. Es wird wieder Wasser gegossen, falls es notwendig ist, sodass das Mischwasser die unteren Bereiche des Lehmhaufens erreicht.
- Um eine gleichmäßige Feuchteverteilung zu gewährleisten, wird die Lehmmasse mit einer Plastikfolie ein bis zwei Tage abgedeckt (Maukzeit). Dieser Prozess nennt sich im Jemen „Tachmir Al Tien“: Das lange Liegenlassen (Ziehenlassen unter Feuchtigkeitseinfluss) des aufbereiteten Lehmes.
- Die Lehmmasse wird mit ca. 1% Stroh vermengt [18] und danach im plastischen Zustand verarbeitet, als Lehmklumpen mit beiden Händen in eine Holzform hineingeworfen, und glatt abgestrichen. Der Lehm muss so plastisch sein, dass er beim Einwerfen aus 30 bis 40 cm Entfernung in die Form alle Ecken leicht ausfüllt. Die Herstellung geschieht in Doppelformen. Entformt wird unmittelbar danach, vgl. Abb. 4.1-2 und Abb. 4.1-3.
- Diese Lehmsteine legt man einige Zoll weit auseinander mit der breiten Seite auf die Erde zum Trocknen, nach einigen Tagen werden sie auf die hohe Kante gestellt, damit auch die andere Seite getrocknet wird. Die Trocknung dauert im Sommer mindestens eine Woche und im Winter mindestens 10 Tage, bevor sie zu der Baustelle geliefert werden, s. Abb. 4.1-4.
- Die Lehmsteine werden in verschiedenen Formaten nach den einheimischen Maßeinheiten Elle „Dher'a“, Spanne „Schebr“ und Finger „Asb'a“ hergestellt, so dass sie den Bedarf an den sich vom Erdgeschoss bis zum letzten Obergeschoss verjüngenden Lehmwänden decken können.

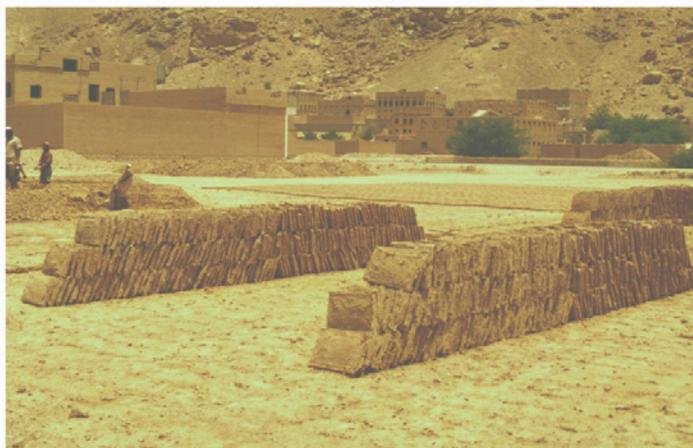
**Abb. 4.1-2** Nach dem 2- 3 Tage lang dauernden Maukprozess wird die Lehmmasse mit den Füßen getreten, mit Stroh vermischt, bis sie die erforderliche Homogenität erreicht hat, und dann transportiert



**Abb. 4.1-3** Die plastische Lehmmasse wird mit dem Handstrichverfahren in die Holzformen aus einer Höhe 30-40 cm hineingeworfen und glatt abgestrichen. Entformt wird unmittelbar danach



**Abb. 4.1-4** Nach 1-2 Tagen werden die Lehmziegel hochkantig gestellt, und dann im Sommer sieben Tage lang bzw. im Winter zehn Tage lang sonnen- und luftgetrocknet



In der Tabelle 4.1-1 sind die verschiedenen Lehmsteinformate zusammengefasst in ihren einheimischen Benennungen. Ihre Maße sind in cm umgerechnet und abgerundet.

einheimische Benennung Lehmsteine	von	abgerundete Maße in [cm]
Abbadi		50,6 x 32,5 x 5
Al-Garai		46 x 30,5 x 5
Don- al- Garai		41 x 27,3 x 5
Dher'a Ella-Rub'a		34,5 x 23 x 5
Shibr		23 x 23 x 5
Sahbul		23 x 11,5 x 5

**Tab. 4.1-1 Lehmsteinformate, Benennungen und abgerundete Maße in cm in Wadi-Hadhramaut**

- Im Durchschnitt liegt die Arbeitsleistung von einem Team aus acht Arbeitern bei ca. 3000 Lehmsteinen pro Tag, wobei ein Team aus acht Arbeitern nur ca. 1000 Lehmsteine pro Tag vermauern kann [31].

#### **4.1.1.2.2 Gründung der Lehmsteinbauten**

- Die Breite und Tiefe der Gründung der Lehmhäuser in Wadi-Hadhramaut variiert je nach Baugrundart, Anzahl der Stockwerke und Lage der Gebäude.
- Die Hinweise in der Literatur auf die Art, Breite, und Tiefe der Gründungen von Lehmsteinhäusern in Wadi-Hadhramaut sind rar und manchmal ungenau.
- Die Detailzeichnungen in dieser Arbeit sind vom Verfasser gezeichnet und beruhen auf den Beschreibungen von Damluji in [31], Ramudhah, Mubarak und Hanschur in [107], ergänzt durch Besprechungen mit den erfahrenen Lehmbaumeistern, wie Saeed Basueitin in Shibam, Ali Qavzan und Ali Tharuan in Seiyun, sowie Auad Bukeir in Tarim.

#### **Gründung der Lehmsteinhäuser in Shibam:**

Es wird hier als Beispiel die Gründung der Lehmsteinhäuser in Shibam bei 8-geschossigen Häusern detailliert beschrieben, weil sie den Schritten der Gründung der Häuser in Seiyun und Tarim ähnelt und noch einige Besonderheiten enthält, s. Abb. 4.1-5:

Nach Erreichen der erforderlichen Gründungstiefe von ca. 1,50 - 2,00 m und der notwendigen Breite von ca. 1,50 - 1,80 m führt man die erste Schicht aus, die aus 4 cm Tier-Dung besteht.

Als zweite Schicht, deren Dicke ca. 30 cm ist, legt man 4 bis 5 Rundhölzer mit 15 bis 20 cm Durchmesser aus Elbholz entlang der Gründungsgrube, in eine Lehmkochsalzmischung. Diese Hölzer gleichen Unregelmäßigkeiten des Baugrundes aus und dienen der gleichmäßigen Lastverteilung in der Gründungssohle.

Die Erfahrung zeigt, dass die Kombination aus Tierdungschicht und Lehmkochsalzmischung ein bewährtes Mittel gegen Termitenbefall ist.

Die dritte Schicht gilt als Sperrschicht. Sie besteht aus einer Kalk-Ramad-Mischung im Mischungsverhältnis 1:1 und hat eine Dicke von 5 cm.

Die Außenwände und die tragenden Innenwände erhalten ein Fundament aus Bruchsteinmauerwerk (meistens Basaltsteine mit Kalkmörtel vermauert). Der Sockel ist 50 bis 100 cm hoch, und wird auch als Bruchsteinmauerwerk ausgeführt. Das Fundament- und Sockelmauerwerk wird mit Kalkputz von innen und von außen verputzt.

Die Sockelwände werden nach oben auf die Dicke der Lehmsteinwand des Erdgeschosses (90-110 cm) verjüngt, vgl. Abb. 4.1-5.

#### **Gründung der Lehmsteinhäuser in Tarim und Seiyun:**

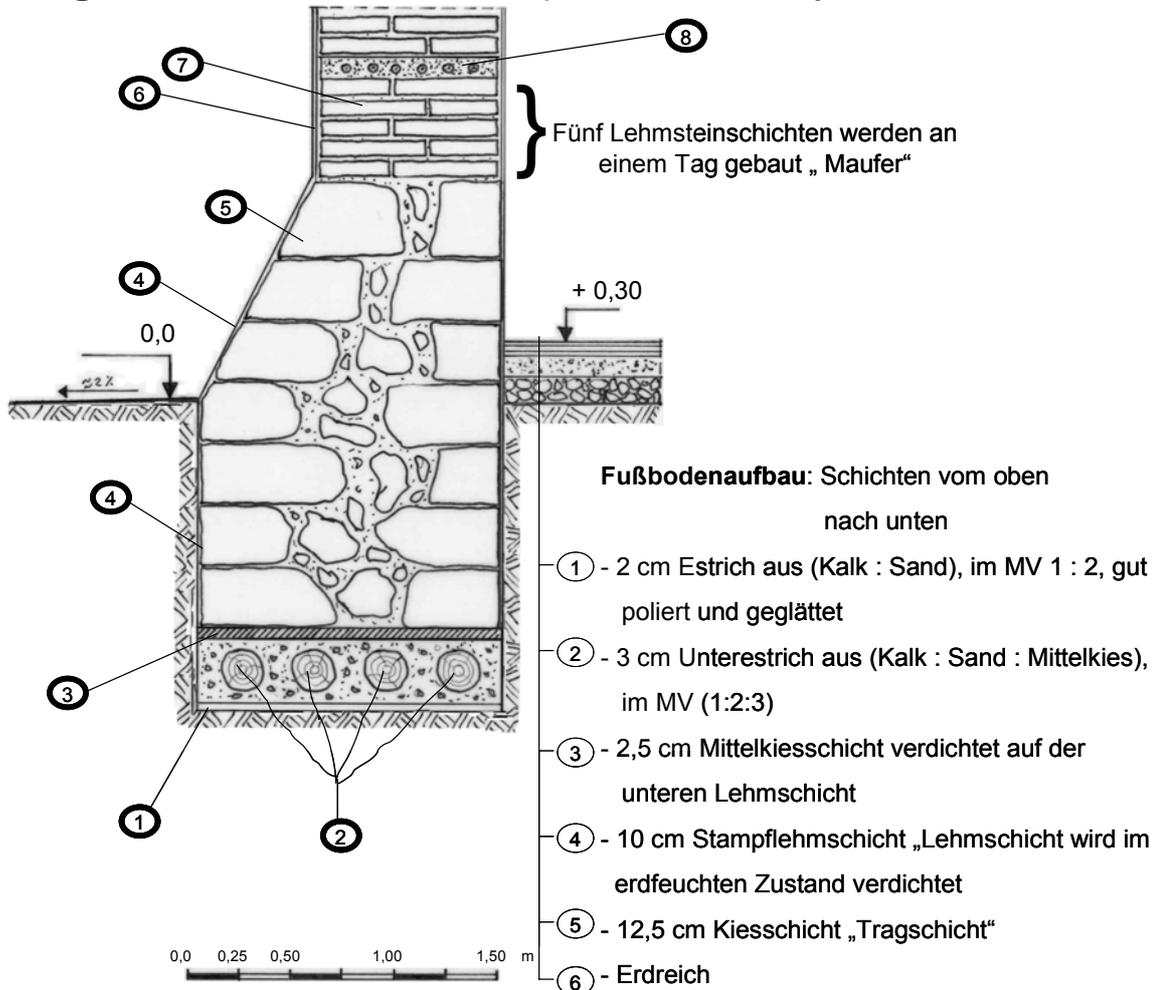
Bei der Gründung der Häuser in Tarim und Seiyun wird auf die Tierdungschicht und die Rundhölzer verzichtet. Stattdessen führt man eine Schicht aus Kalk, Sand, Mittelsplitt, (Mischungsverhältnisse 1:1:1) aus, die eine Dicke von ca. 10-15 cm hat. Unter diese Schicht legt man eine kapillar brechende Schicht aus Geröll, deren Dicke ca. 15 cm beträgt. Die Breite der Fundamente der Außenwände für die maximal viergeschossigen Lehmhäuser beträgt 100 – 120 cm, ihre Höhe ca. 100 cm.

#### **4.1.1.2.3 Ausführung der Lehmsteinwände**

Mit der Lehmsteintechnik konnten Lehmbauten in Shibam Wadi-Hadhramaut mit bis acht Geschossen errichtet werden, s. Abb. 4.1-6.

**Legende:**

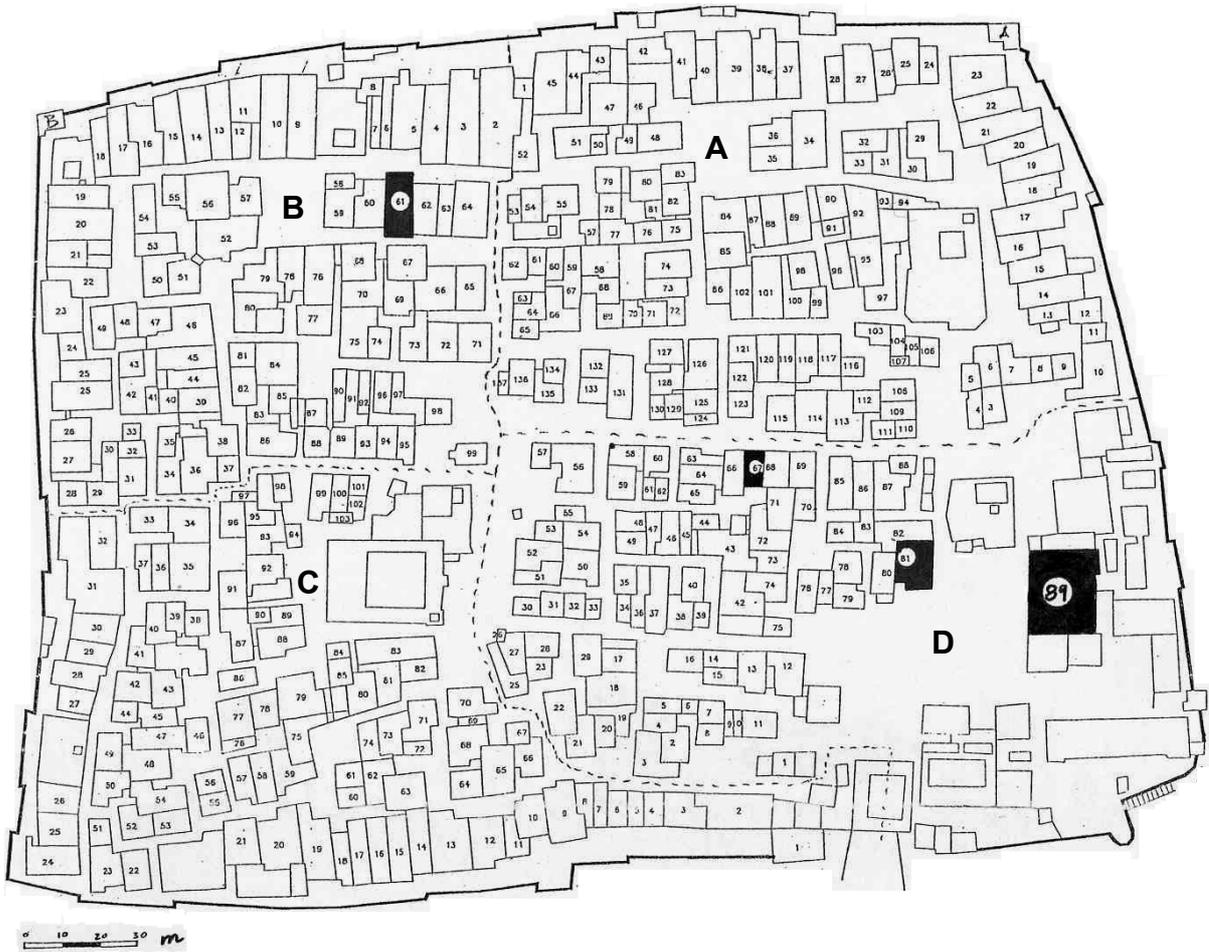
- ① - 4 cm Tierdungschicht
- ② - ca. 30 cm Rundhölzer aus Elbbäumen (Durchmesser 15-20 cm) in Lehm- Kochsalzmischung gelegt (Termitenschutz!)
- ③ - 5 cm Sperrschicht aus einer Kalk- *Ramad*- Mischung
- ④ - Kalk- *Ramad*- Putz in zwei Lagen durchgeführt
- ⑤ - Gründung und Sockel aus Bruchsteinmauerwerk (meistens Basaltsteine mit Kalk- *Ramad*- Mörtel vermauert)
- ⑥ - Kalkputz zweilagig durchgeführt, die erste Lage auf Mahdhaschicht nass in nass ausgeführt
- ⑦ - Lehmsteinmauerwerk in Läufer (*Marudhah*) und Binder (*Sabya*)- Technik (Blockverband) ausgeführt
- ⑧ - 10 cm Busot- Schicht aus Jabourzweigen in Lehmmörtel verlegt.



**Abb. 4.1-5 Typischer Schichtenaufbau bei der Gründung der achtgeschossigen Lehmsteinbauten in Shibam- Wadi- Hadhramaut**



**Abb. 4.1- 6 Südansicht der Stadt Shibam Wadi-Hadhramaut**  
Bildaufnahme Januar 2003



**Abb. 4.1-7 Plan der Stadt Shibam nach Archivunterlagen**  
der SUDP, ergänzt und weiterbearbeitet vom Autor

Das höchste Lehmbauwerk im Jemen, das noch bis heute existiert, ist das Almihdhar-Moscheeminarett in Tarim, welches eine Höhe von ca. 38,10 m erreicht und 1914 gebaut wurde, vgl. Abb. 4.1-8 und [95].

In Shibam haben die Wände im Erdgeschoss bei den sechs- bis achtgeschossigen Bauten eine Dicke von 90 bis 110 cm. Sie verjüngen sich von unten nach oben mit einer leichten Neigung nach innen, auf eine Dicke von etwa 23 cm im obersten Geschoss, vgl. Abb. A-4-1 sowie Abb. A-4-2.

In der Tab. 4.1-2 werden dargestellt:

die Geschosshöhen, Anzahl der „Maufer“ in jedem Geschoss und die üblichen Dicken der Wände in den achtgeschossigen Lehmbauten in Shibam. Die Zahlen stammen aus Archivunterlagen von „Shibam Historic Houses Program“ und mündlichen Auskünften erfahrener Lehmbaumeister aus Shibam.

<b>Geschossnummer</b>	<b>Anzahl der „Maufer“</b>	<b>Geschosshöhe [m]</b>	<b>Wanddicke [cm]</b>
Erdgeschoss	7-8	3,5 ... 4	90 ... 110
1. Obergeschoss	6	3	85
2. Obergeschoss	7	3,5	70
3. Obergeschoss	6,5	3,25	51
4. Obergeschoss	7	3,5	46
5. Obergeschoss	6	3	41
6. Obergeschoss	6	3	34,5
7. Obergeschoss	6	3	23

**Tab. 4.1-2 Übliche Geschosshöhen, Anzahl der „Maufer“ und Wanddicken in den sechs- bis achtgeschossigen Lehmsteinbauten in Shibam, Wadi-Hadhramaut**

**Abb. 4.1-8 Das Minarett der Al-Mihdar- Moschee in Tarim, 38,1 m hoch, höchstes Lehmbauwerk im Jemen [95], von Saijed Al-Sakaf 1914 aus handgefertigten Lehmsteinen gebaut.**



**Abb. 4.1-9 Lehmteilchen werden von den Putzabplatzungsstellen durch Regenwasser abgespült und verfärben stellenweise die weißen Kalkputzflächen mit Lehmfarbe. (ästhetisches Problem). Dar- U'schah in Tarim von Frau Omar al-Kaf, gebaut 1952**

Bei der Errichtung der Lehmsteinwände in Wadi-Hadhramaut gibt es zwei Verband-Systeme:

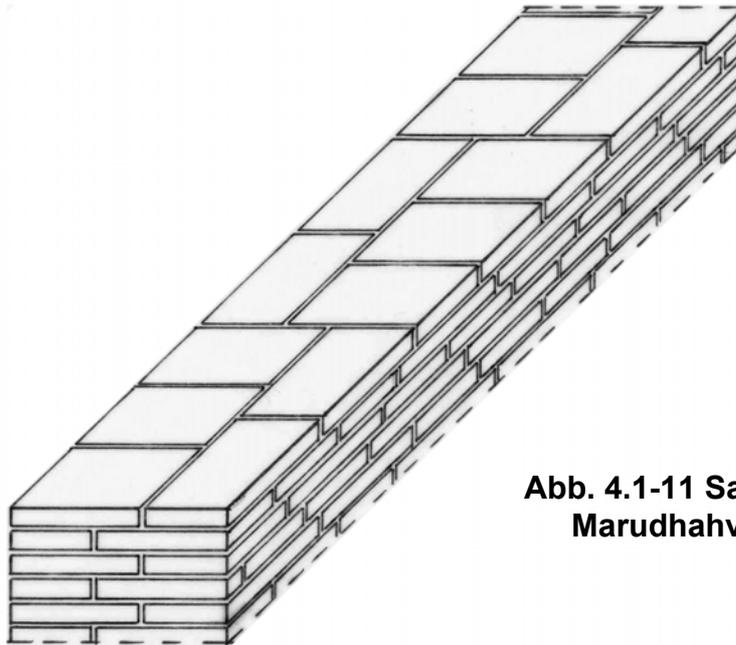
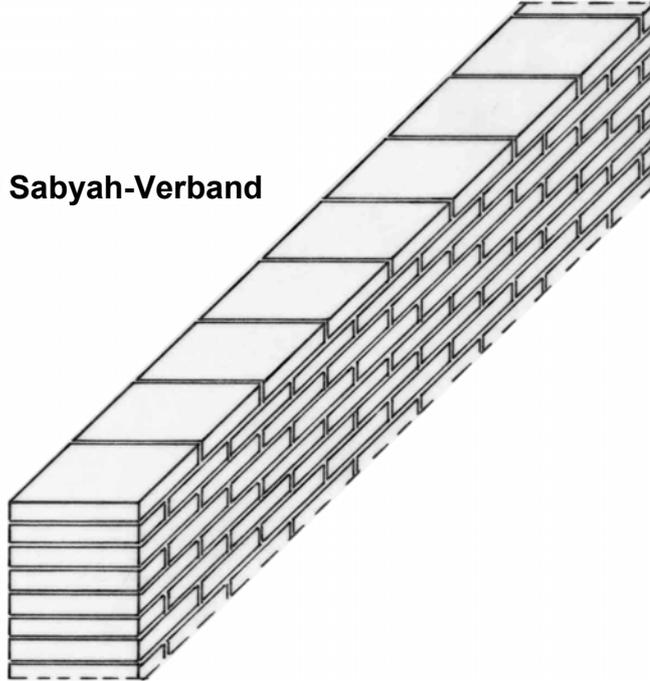
- **Sabyah- und Ma'rudhah- Verband.**

Dieses Verbandsystem hat folgende Merkmale:

- Der Mauerverband der Lehmsteine wird in Binder „Sabyah“- und Läufer „M'arudhah“- Technik hergestellt. Die Lage von Sabyah und M'arudhah wird von der unteren Schicht zu der darüberliegenden Schicht gewechselt, vgl. Abb. 4.1-11. Die Versetzung von Stoßfugen der übereinander liegenden Lehmsteinschichten beträgt mindestens 7,5 cm und ist damit größer als die Steindicke von 5 cm.
- Durch den Mörtel der Lagerfuge werden die Unebenheiten in der Lehmziegelschicht ausgeglichen. Der Mörtel ist aus dem gleichen Material, aus dem die Lehmsteine hergestellt werden.
- Bei den 8-geschossigen Lehmhäusern in Shibam wurde zusätzlich eine so genannte „Busot“, eine Jabour-Schicht, die 10 cm dick ist, ausgeführt. In dieser Schicht werden Rundhölzer im Lehmmörtel verlegt, deren Durchmesser 2-3 cm beträgt. Diese Busot-Schicht wird alle 50 cm (ein „Maufer“), fünf Lehmsteinschichten der Wandhöhe, vorgesehen, s. Abb. 4.1-5. Die Schicht wird auch unmittelbar unter den Deckenbalken in jedem Geschoss sowie unter den Flachdachbalken angeordnet, vgl. Abb. 4.1-12 und Abb. 4.1-13. Sie dient einer gleichmäßigen Lastverteilung und zur Überbrückung von entstehenden Schwindrissen.

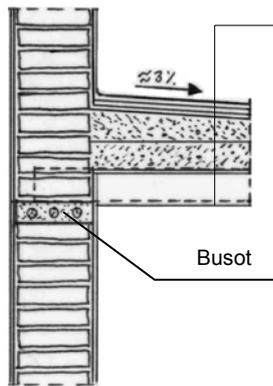
Durch die oben genannten Maßnahmen wird die Rissbildung in diesem Verbandsystem weitgehend eingeschränkt. Mit dem Verbandsystem werden die Außenwände der ersten drei Geschosse, die tragenden Innenwände und der Aussteifungskern im Treppenhaus aufgemauert. In Tarim und Seiyun hat man diese Verbandregel nur bei der Errichtung der Außenwände und des Treppenpfeilers angewendet, weil die Häuser dort eine geringere maximale Höhe von vier Geschossen haben. Für die anderen Wände verwendet man den sogenannten Sabyah-Verband.

**Abb. 4.1-10 Sabyah-Verband**



**Abb. 4.1-11 Sabyah- und  
Marudhahverband**

**Dachaufbau: Schichten von oben nach unten**

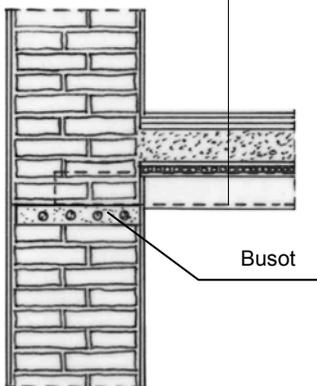


**Abb. 4.1-12 Dach- Wand- Detail**



- ① - 1 mm Kalk- roter Zucker- Leim „Es wird auf die Oberfläche gegossen, nach dem Austrocknen poliert und abgerieben mit der Putzkelle und Putzlappen, um die entstehenden Putzrisse zu schließen
- ② - 2 cm Kalkestrich „Thany Tarkah“ aus Kalk – Sand- Mischung, im MV 1:2
- ③ - 3 cm Kalkestrich „Awal Tarkah“ aus Kalk- Sand- Mittelkies- Mischung im MV 1 : 1 : 1, naß in naß auf die Mahdhahschicht durchgeführt
- ④ - 2 cm Lehmstroschicht „Mahdhah“, um die Unebenheiten zu beseitigen
- ⑤ - 5 bis 12 cm Lehmstroschicht ins Gefälle (ca. 2-3%) gebracht
- ⑥ - 6 bis 8 cm Lehmstroschicht im plastischen Zustand verarbeitet
- ⑦ - Matte aus gewebten Palmblättern
- ⑧ - Tragschicht aus Zweigen und Ästen „Jabour“ gedeckt mit Palmwedeln
- ⑨ - Tragbalken aus Rundholz (Elb- oder Taneb-Holz), Durchmesser 15-20 cm je 30 bis 45 cm Abstand
- ⑩ - 1 cm Kalkputz in zwei Schichten durchgeführt

**Deckenaufbau: Schichten von oben nach unten**



**Abb. 4.1-13 Decke- Wand- Detail**

- ① - 2 cm Kalkestrich „Thany Tarkah“ aus Kalk – Sand Mischung, im MV 1:2, gut poliert und abgerieben, bis eine glatte und glänzende Oberfläche entsteht
- ② - 3 cm Kalkestrich „Awal Tarkah“ aus Kalk- Sand- Mittelkies- Mischung im MV 1 : 1 : 1, naß in naß auf die Mahdhahschicht durchgeführt
- ③ - 2 cm Lehmstroschicht „Mahdhah“, um die Unebenheiten zu beseitigen
- ④ - 15 cm Lehmschicht ohne Stroh im plastischen Zustand verarbeitet
- ⑤ - Matte aus gewebten Palmblättern
- ⑥ - Tragschicht aus Zweigen und Ästen „Jabour“ gedeckt mit Palmwedeln
- ⑦ - Tragbalken aus Rundholz (Elb- oder Taneb-Holz), Durchmesser 15-20 cm je 30 bis 45 cm Abstand
- ⑧ - 1 cm Kalkputz in zwei Schichten durchgeführt

### ▪ **Sabyah-Verband**

Aus rein wirtschaftlichen Gründen und weil die errichteten Häuser maximal vier geschossig sind, wird heutzutage in Seiyun, Tarim und in der Umgebung von Shibam oft auf Sabyah- und Ma'rudhah- Verband verzichtet. Stattdessen verwendet man nur den Sabyah-Verband. Bei dieser Verbandregel nimmt die Wand ihre Dicke aus der Steinlänge auf, s. Abb. 4.1-10.

#### **4.1.1.2.4 Vorteile der Lehmsteinbautechnik**

- Die Strohzugabe vermindert die Schwind- und Haarrissbildung.
- Durch die Strohzugabe wird eine gewisse Kantenfestigkeit erreicht, damit die Steine beim Transportieren, Stapeln und Vermauern nicht so leicht an den Kanten beschädigt werden.
- Durch die vorzeitige Herstellung der Lehmsteine wird ein Teil der Trocknung gleichmäßig abgeschlossen und damit ein Teil von nachteiligen Auswirkungen des Schwind-Phänomens umgangen.
- Durch die geringe Dicke der Lehmsteine (5-7,5 cm) sind die Formsteine in feuchtem Zustand relativ formstabil, sie können sofort ausgeschalt werden.
- Die Strohhalme bilden belüftende Hohlräume, welche die Trocknung beschleunigen.
- Solange man keine Jabour-Schichten eingebaut hat, kann man eine Maufer (fünf Lehmsteinschichten) pro Tag bauen. Wenn die Wandhöhe ca. 1,5 m erreicht, tritt die erste obligatorische Trocknungspause ein. Im Vergleich zu der Zabourtechnik, mit der man nur 60 cm pro Woche im Sommer bzw. 60 cm pro zwei Wochen im Winter die Wand hochziehen kann, ist diese Bauweise von Vorteil.

#### **4.1.1.2.5 Nachteile der Lehmsteinbautechnik**

- Die Verletzung der Oberfläche durch herausragende Strohteile verursacht stärkere Erosionen als eine glatte Oberfläche [89]. Das Innere des Bauteils kann dadurch leichter durchfeuchtet werden, was zur Abnahme der Druckfestigkeit führt.
- Die Strohzugabe verringert die Rohdichte und die Druckfestigkeit, vgl. Abschnitt 2.3 sowie [18] und [93].

- Heftige Regen- und Hagelfälle während des Trocknungsprozesses können die frisch geformten Lehmsteine stark beschädigen. Durch plötzliche Regengüsse kann eine ganze Tagesarbeit und mehr vernichtet werden. Die frisch gebauten oder nicht geputzten Gebäudewände können auch dadurch beschädigt werden. Daher wurden traditionell Lehmsteinherstellung und der Bauprozess meistens in den Trockenperioden betrieben, meistens im Winter, vgl. [111].
- Im Gegensatz zu anderen Lehmbautechniken (z.B. Stampflehmtechnik) muss der verwendete Lehm steinfrei sein, sonst entstehen Fingererletzungen beim Formen.
- Ein weiterer Nachteil dieser Bauweise ist ihre sehr lange Trocknungsdauer, weil:
  - die Lehmsteine im Sommer **sieben Tage** lang bzw. im Winter **zehn Tage** lang sonnen- und luftgetrocknet werden, denn sie müssen beim Vermauern völlig trocken sein.
  - jedes Geschoss zwecks Trocknung in drei Abschnitten gebaut wird. Im ersten Abschnitt baut man die Wände ca. 1,5 m hoch, dann wird eine Trocknungspause von **ca. 4-8 Wochen** angeordnet. Die zweite Trocknungspause von **ca. 4-6 Wochen** wird vorgenommen, wenn die Wandhöhe 2,5 m erreicht hat. Die dritte Trocknungspause von **ca. 4-6 Wochen** ist nach dem Fertigstellen der Wände von jedem Geschoss anzuordnen. Danach kann man mit den Deckenarbeiten anfangen.
  - vor dem Errichten des nachfolgenden Geschosses eine Trocknungspause von mindestens **drei Monaten** angeordnet wird, um das Trocknen aller Elemente sicherzustellen. Dazu kommt noch die Zwangspause in der Regenperiode zur Rechnung. Daher könnte man traditionell an einem Haus nur ein Geschoss pro Jahr bauen. Deshalb haben immer die Lehmbaumeister und ihre Handwerker in mehreren Baustellen gleichzeitig gearbeitet, sodass sie während der Trocknungszeiten einiger Objekte an anderen Objekten weitergebaut haben [111].
- Die Lehmsteine werden beim Transportieren, Stapeln und Vermauern leicht an den Kanten beschädigt. Als Folge davon sind Unebenheiten an der Wandoberfläche und höherer Verbrauch an Mahdhahmörtel hinzunehmen.
- Zur Anfertigung von Lehmsteinen braucht man größere vom Humus freigelegte Flächen;
- Wegen der Gefährdung durch Feuchtigkeit müssen die Sicherheiten höher liegen als bei wasserfesten Baustoffen. Dadurch entstehen dickere Wände,

als es statisch erforderlich wäre „Angstzuschlag“. Nach DIN 18954 [42] und Lehmbau Regeln [134] ist der Sicherheitsfaktor bei Lehmbauteilen ca. 7 und die zulässige Druckspannung wurde zwischen 0,3 und 0,5 N/mm<sup>2</sup> festgelegt, vgl. Tab. A-5-23.

## **4.1.2 Zabourtechnik (Habl-Technik)**

### **4.1.2.1 Baugebiete**

Die Zabourtechnik ist in den nördlichen Regionen vom Jemen verbreitet, insbesondere in Sa'da-, Amran-, Barat-, Al-Gauf-, Marib-, und Dhamarregion. In den südlichen Regionen, wie Hadhramaut-, Schabwa-, Almaharah-, Lahj-, Taiz-, Ibbregion findet man kaum Zabourbauten. Die wichtigsten Zabour-Siedlungen sind die Altstadt Sa'da, Barat-Suq-Al'inan und die Altstadt M'abar in Dhamar-Region 100 km südlich der Hauptstadt Sana'a, vgl. Abb. A-4-6, Abb. 4.1-14 und Abb. 4.1-15.

Um umfassende Kenntnisse über die Zabourtechnik, ihre Vorteile, Nachteile und traditionelle Schutzmaßnahmen zu bekommen, wurden einige Zabourbauten in Sa'da analysiert. In der Zeit der Analyse begann gerade eine Restaurierung der historischen Stadtmauer, die in Zabourtechnik im 16. Jh. errichtet wurde. Dabei konnte der Zustand der Mauer vor der Restaurierung aber auch die Vorgehensweise bei der Restaurierung anhand von Aufnahmen dokumentiert werden. An dem Vorort Rahban konnten einige Zabourhäuser während der Bauphase untersucht werden. Auskünfte von den Zabourmeistern und erfahrenen Handwerkern wurden eingeholt. Im Sommer 2004 brach der Krieg zwischen Regierungstruppen und Rebellen in Sa'da aus, deshalb hat der Autor Zabourbauten in Ma'bar weiteranalysiert, und auf weitere Analysen in der Altstadt von Sa'da verzichtet.

In ihrer heutigen Ummauerung besteht Sa'da seit dem 16. Jahrhundert, als unter dem Imam al-Mutawakkil Yahya Sharaf ad-Din bin Shams ad-Din (1506-1557) die Stadtmauer erbaut wurde. Es ist anzunehmen, dass einige Teile der Stadt vor der islamischen Zeit, in der himyaritischen Zeit, gebaut wurden. Nach der Beschreibung von Ibn al-Mughawir 1291 zog sich die Altstadt Sa'da vom Bab al-yaman im Süden bis zum Bab al-Mansurah im Westen hin, mit der Moschee al-Hadi im Zentrum der südöstlichen der heutigen Altstadtfläche, vgl. [67, 103]. Die nördlichen Stadtviertel einschließlich ad-Darb und al-Girba wurden später gebaut. Nach [103] sollen die ältesten Häuser in diesen Stadtvierteln ca. 500 Jahre alt sein.



**Abb. 4.1-14 Suq al-Ienan in Barat in Zaborotechnik gebaut [131]**



**Abb. 4.1-15 Sa'da 1975 Luftaufnahme [32]**

Die Stadtmauer von Sa'da ist unter dem Imam al-Mutawakkil von einem seiner Söhne gebaut worden. Sie ist ein durchschnittlich 3,50 m breiter Wall, auf beiden Seiten von schwach zur Mitte hin geneigten Lehmmauern gestützt und mit Erdreich gefüllt. Sie besitzt zahlreiche, nach außen vorgebaute Türme, Vorsprünge oder auch nur Ausbuchtungen. Die äußere Mauerhöhe beträgt durchschnittlich 6 m, innen schwankt sie zwischen 5 und 3 m. Überwiegend ist die Stadtmauer in Zabourtechnik errichtet. Nur bei den Vierteln al-Qasr und Ad-Dawar finden sich auch Teile aus Stein. Die Fundamente sind aus Bruchstein, vgl. Abb. A-4-6.

## **4.1.2.2 Ausführungstechniken**

### **4.1.2.2.1 Gründung der Zabourwände**

Mit der Zabourtechnik hat man Gebäude errichtet, die normalerweise drei- bis viergeschossig sind, vgl. Abb. A-4-4 sowie Abb. A-4-5. Deshalb sind Gründungstiefe und Fundamentbreite geringer als bei der Lehmsteintechnik im Hadhramaut, vgl. Abb. 4.1-5 und Abb. 4.1-16. Die Gründungstiefe bei Zabourbauten beträgt normalerweise 70-80 cm, ihre Fundamentbreite ebenfalls 70-80 cm. Als erste Schicht der Gründung, die 40-50 cm hoch ist, führt man die sogenannte „Go'am-Schicht“ aus, eine Schicht aus Geröll im Lehmmörtel.

Die zweite Schicht ist ca. 5 cm dick aus Kalkestrich (als horizontale Sperrschicht und Ausgleichschicht), die gut verdichtet wird. Auf der Ausgleichschicht baut man das Sockelmauerwerk aus Basaltsteinen mit Kalkmörtel. Es wird mit einer 1-2 cm dicken Kalkmörtelschicht, die gut verdichtet und geglättet wird, ausgeglichen.

Beim Errichten des Gebäudesockels erhalten die Ecken Erhöhungen, die in beiden Richtungen ab den Innenfluchtflächen der Außenwände in Richtung der gegenüberliegenden Ecke allmählich nach unten abgestuft werden. Die Ecken erhalten dadurch eine Erhöhung über der Gesamtsockelhöhe von 30-60 cm. Alle darauf errichtete Zabourschichten erhalten in den Gebäudeecken die gleiche Erhöhung, vgl. Abb. 4.1-19 und Abb. 4.1-21.

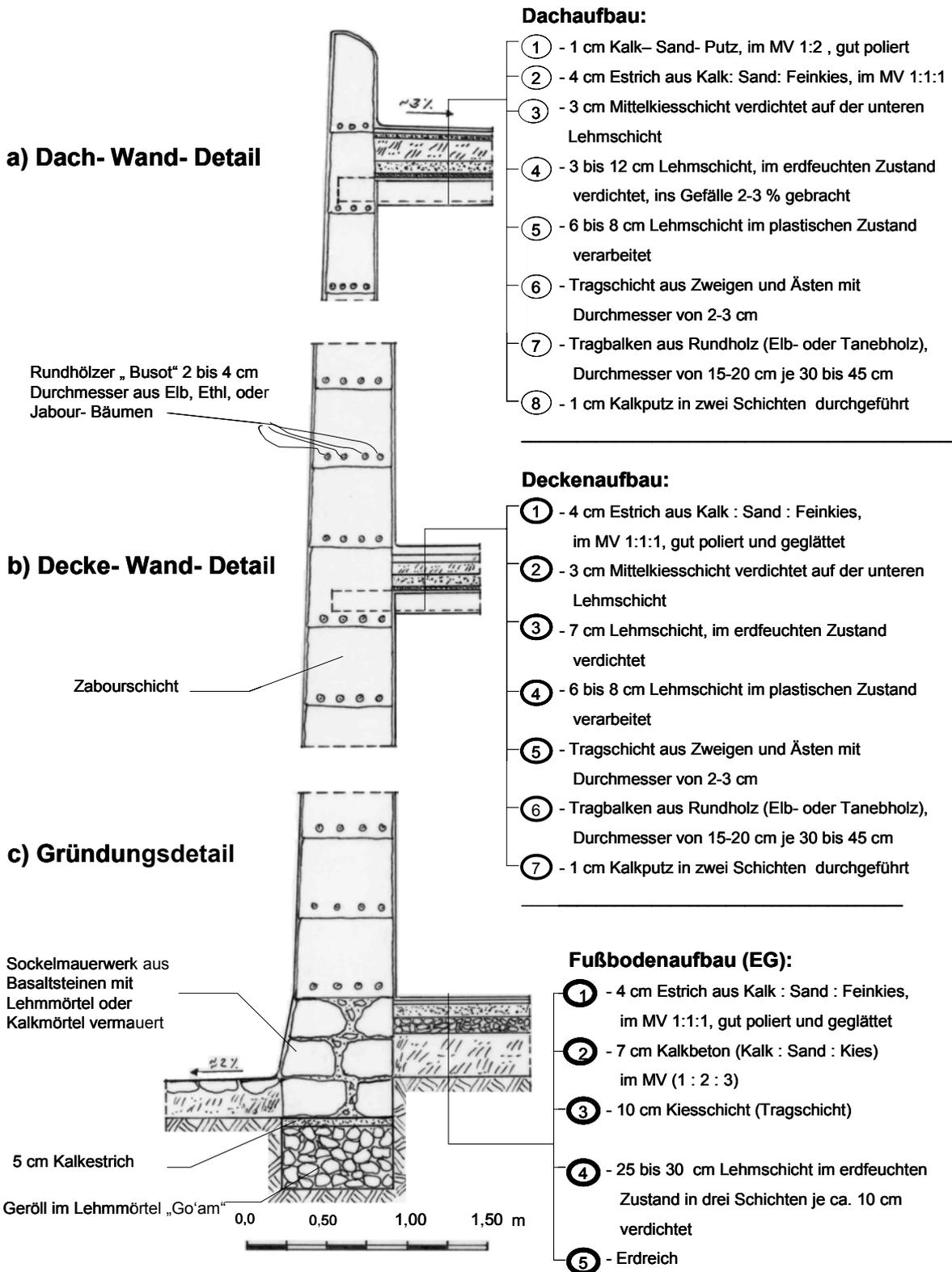


Abb. 4.1-16 a), b), und c) Details bei der Errichtung der Zabourbauten



**Abb.4.1-17** Schwindrisse in Zabourwänden, die im Sommer gebaut sind. Mugahid- Haus, Rahban – Sa'da\*



**Abb.4.1-18** Gründungen der Zabourwände. Rahban – Sa'da\*



**Abb.4.1-19** Bei der Errichtung von Zabourwänden. Mugahid- Haus. Rahban- Sa'da\*



**Abb.4.1-20** Zabourhaus in Ma'bar wurde in den Sommermonaten gebaut, zeigt starke Schwindrisse und muss abgerissen werden\*



**Abb.4.1-21** Zabourhaus in Rahban – Sa'da wurde in den Wintermonaten gebaut und es zeigt weniger Schwindrisse\*

#### 4.1.2.2 Ausführung der Zabouturwände

- Die Vorbereitung der Lehmmischung für Zabouturwände erfolgt ähnlich wie die Vorbereitung der Lehmmischung für Lehmsteintechnik im Hadhramaut, vgl. Abschnitt 4.1.1. Der Hauptunterschied liegt bei den Magerungszusätzen. Während bei der Lehmsteintechnik nur Strohhäcksel zwecks Magerung zugemischt wird, wurde früher bei der Zabouturtechnik Strohhäcksel oder Saiela-Sand verwendet. Heutzutage verwendet man aus wirtschaftlichen Gründen fast immer Saiela-Sand.
- Bei der Zabouturtechnik wird der Baustoff Lehm im plastischen Zustand ohne Vortrocknung verwendet (Nasslehmverfahren). Die Lehmmasse wird zwischen den Händen zu Lehmklumpen geformt und dann von oben auf die Wand heruntergeworfen. Es entsteht dadurch eine gut verdichtete und homogene Lehmmasse, vgl. Abb. 4.1-19 und [92].
- Die Konsistenz vom Lehm soll so gewählt werden, dass die Lehmmasse sich zu Klumpen leicht verformen lässt, und bis zu einer Höhe von 1,50-2,50 m von den Hilfsarbeitern geworfen werden kann, ohne ihre Bindekraft zu verlieren oder zwischen den Fingern zu verfließen. Die Lehmkonsistenz in der Zabouturtechnik hat fast die gleiche Lehmkonsistenz wie die der Lehmsteintechnik im Hadhramaut.
- Ein Satz pro Tag in Höhe von 50-60 cm wird an den Innen- und Außenwänden gleichzeitig fertig gestellt. An diesem Prozess sind zwei Arbeitsgruppen beteiligt. Eine errichtet die Innenwände und die andere die Außenwände. In jeder Gruppe beschäftigen sich meistens 7 Arbeiter: einer holt Wasser und streut Sand bei Bedarf, zwei bereiten die Lehmmischung, drei formen die Lehmklumpen und werfen sie zum Lehmmeister, der sie kräftig auf die Wand herunterwirft. Am nächsten Tag wird die Zabouturschicht mit einem Schlagbrett verfestigt und geglättet. Die nächste Zabouturschicht wird nach mindestens einer Woche im Sommer und nach zwei Wochen im Winter errichtet.
- Die aussteifenden Querwände müssen wegen unterschiedlicher Setzungen gleichzeitig mit den auszustreifenden Wänden hoch geführt werden.

Die oft eingelegten Rundhölzer in den Zabourschichten verbinden die Innenwände mit den Außenwänden und funktionieren als Zuganker, s. Abb. 4.1-24.

- Nach der Fertigstellung der Wände eines Geschosses muss man die Wände sechs Monate, besser ein Jahr, trocknen lassen. Bei einer Geschosshöhe von 3 m wird eine Setzung von 15-20 cm erwartet.

Es muss hier darauf hingewiesen werden, dass in jeder Zabourschicht 3-5 Rundhölzer, die einen Querschnitt von 2-3 cm haben, horizontal eingelegt werden s. Abb. 4.1-16. Im idealen Fall hat man diese Hölzer entlang allen Zabourschichten ausgeführt. Manchmal beschränkt sich die Einlage dieser Hölzer auf das Überbrücken von Schwindrissen, auf die Gebäudeecken und auf das Verbinden von Querwänden mit den Längswänden, vgl. Abb. s. Abb. 4.1-24. In einigen historischen Bauwerken hat man Rundhölzer eingelegt, die einen größeren Durchmesser (5-10 cm) haben. Dadurch werden weniger Hölzer benötigt, s. Abb. 4.1-23.

#### **4.1.2.3 Vorteile der Zabouttechnik**

- Durch die Erhöhung der Ecken ist Folgendes gewährleistet:
  - Das frische Ende jeder Schicht wird bei der Ecke nicht nach außen gedrückt. Dadurch kommt es zu keinem unerwünschten Kippen oder Verformen bei diesem Mauerteil.
  - Da die Gebäudefassaden unterschiedlich durch Sonnenstrahlung belastet werden, sind ihre Trocknungsgeschwindigkeit und Trocknungsdauer ungleich. Durch diese ungleichmäßige Trocknung und somit unterschiedlichen Setzungen entstehen große Schwindspannungen, besonders an den Gebäudenecken, sodass die Ecken sehr anfällig gegen Schwindrisse sind. Deshalb hat man traditionell die Gebäudenecken erhöht und abgestuft, sodass die Haftung der oberen Schicht mit der darunter liegenden Schicht verbessert wird und die Reibungskräfte erhöht werden.

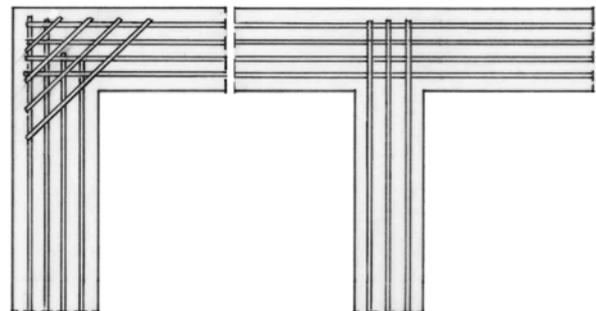
**Abb. 4.1-22 Horizontale Rundhölzer in Zabourschichten an den renovierten Teilen der historischen Stadtmauer der Altstadt von Sana'a. Wegen Regenwassererosion und hoher Feuchtigkeit sind einige Rundhölzer verfault\***



**Abb. 4.1-23 Reststück der historischen Stadtmauer von Sana'a. Man erkennt das horizontal eingelegte Rundholz mit 7 cm Durchmesser, und das Verzichten auf mehrere Hölzer\***



**Abb. 4.1-24 Prinzipskizze für das Einlegen von Rundhölzern in den Zabourschichten. Sie wirken als Zuganker zwischen Quer- und Längswänden**



\* Bildaufnahme August 2003

Schwindspannungen und demzufolge Schwindrisse in den Ecken werden dadurch weitgehend verringert.

- Man spart Trocknungsplätze und Transportkosten, die bei der Lehmsteintechnik notwendig sind.
- Im Vergleich zum Lehmsteintechnik entfällt bei der Zaboutechnik der Mörtel.
- Die Zaboutwände kosten nur 75% der Gesamtkosten der Lehmsteinwände. Daher sind die Zaboutwände preiswerter als die Lehmsteinwände.
- Schalungsarbeiten werden im Vergleich zu dem Stampflehm gespart.

#### **4.1.2.4 Nachteile der Zaboutechnik**

- Die frisch gepatzten Zaboutwände sind sehr empfindlich gegen Regen- und Hagelfälle. Deshalb könnten sie nur in der Trockenperiode gebaut werden.
- Schnelle Trocknung durch hohe Umgebungstemperaturen, starke Sonneneinstrahlung und hohe Luftgeschwindigkeiten wirken negativ auf die frisch gebauten Zaboutwände. Wenn die Oberfläche schneller trocknet, als die Feuchtigkeit aus der Wand entweichen kann, entstehen zusätzliche Schwindspannungen in Querrichtung der Wand, die eine Rissbildung begünstigen. Es entstehen also mehr Schwind- und Haarrisse, die die Festigkeit und den Regenerationswiderstand der Wände herabsetzen. Nach einigen Jahren wird die durch Haar- und Schwindrisse angegriffene Oberfläche ausgewaschen, s. Abb. 4.1-25, Abb. 4.1-26 und Abb. 4.1-27.
- Arbeitsverzögerung durch die relativ lange Trocknungszeit.



**Abb. 4.1-25 Die Erosion von Zabourwänden ist stärker an den Flächen, die direkt unter den geputzten Flächen liegen und an den früh entstandenen vertikalen Schwindrissen.  
Maswarah – Marib, Juli 2003**



**Abb. 4.1-26 Die obersten Geschosse verlieren ihre Standsicherheit schneller, weil sie am stärksten von Regen- und Hagelfällen betroffen sind, und ihre Wände dünner sind.  
Maswarah – Marib, Juli 2003**

**Abb. 4.1-27 Abplatzung von Putzschichten und abgebröckelten Teilen von Zabourschichten an einem Zabourhaus in Barat. Bild nach [131]**



### **4.1.3 Geschützte Bauweise „Kombination aus Lehm und Naturstein“**

#### **4.1.3.1 Baugebiete**

Das Hauptgebiet dieser Bauweise ist das zentrale Hochland, das als regenreiches Gebiet im Jemen gilt und wirtschaftliche Vorkommen an Naturstein besitzt. Taiz-, Hajjah-, Ibb-, ad-Dhali-, al-Mahwit-, Abyan-, al-Bayda-, und Dhamarregion sind die berühmten Gebiete dieser Bauweise. Mit dieser Technik wurden Gebäude bis zu sieben Geschossen errichtet, vgl. Abb. 4.1-28.

#### **4.1.3.2 Ausführungstechniken**

Die Wände dieser Technik bestehen aus Innen- und Außenschalen in Naturstein und einem Kern aus meistens kiesigem Lehm. Der Bauprozess kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Außenschale, die 15 bis 25 cm dick ist, wird zuerst aus meistens roh behauenen unregelmäßigen Steinen mit einer Höhe von 20-30 cm errichtet. Sie werden mit Lehmmörtel verfugt.
- Anschließend baut man die Innenschale aus relativ kleinen leicht bearbeiteten unregelmäßigen Steinen, (Reststeine) aus der Verarbeitung der Steine der Außenschale. Man führt diese Schale in 2-3 Schichten aus, bis man die Höhe der Außenschale an jedem Satz erreicht hat. Hier wird auch Lehmmörtel verwendet. Die Dicke dieser Schale beträgt 12 bis 25 cm
- Der Raum zwischen den beiden Schalen, der eine Dicke von 20-40 cm hat, wird mit kiesigem Lehm im plastischen Zustand ausgefüllt, der gut verdichtet wird.
- Mit dieser Technik baut man sowohl Zisternen als auch normale Gebäude. Bei den Zisternenbauten werden die Putzarbeiten nach einem Jahr durchgeführt um den Abschluss von Setzungen zu garantieren, und dadurch Risse an den später aufgetragenen Putzschichten zu vermeiden vgl. Abb. 4.1-29 und Abb. 4.1-30.



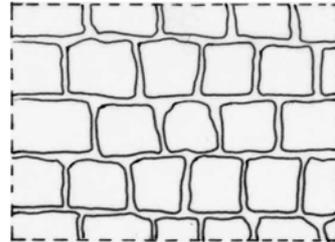
**Abb. 4.1-28 Hajarah, etwa 100 km südwestlich von Sana'a. nach [135]**



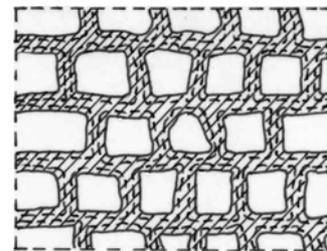
**Abb. 4.1-29 Zisterne im Bauzustand in Al-Arouq in Taiz, Aufnahme August 2003**

**Legende:**

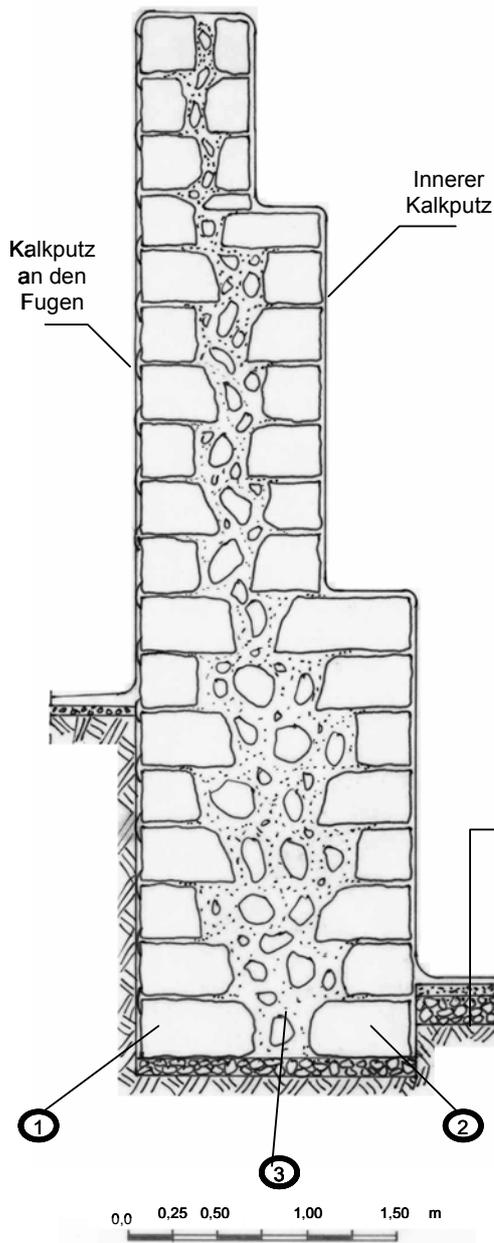
- ① - Äußere Mauerwerksschale meistens aus Basaltsteinen mit Verputzung der Fugen und Fugenrandflächen
- ② - Innere Mauerwerksschale mit verputzter Oberfläche
- ③ - Kern aus kiesigem Lehm oder Lehm mit kleinen Steinen



**Mauerwerk vor dem Verputzen**



**Mauerwerk nach dem Verputzen der Fugen von Außen**



**Fußbodenaufbau:**

- ① - Die Oberfläche wird mit Kalkleim behandelt, abgerieben und poliert bis alle entstehenden Haarrisse in der Oberfläche geschlossen sind
- ② - 1cm zweite Kalkputzschicht aus (Kalk : Sand) im MV (1:2)
- ③ - 2 cm erste Kalkputzschicht aus (Kalk: Sand: Feinsplitt) im MV (1: 1: 1)
- ④ - ca. 7,5 cm Kalkbeton aus (Kalk: Sand: Mittelsplitt) im MV (1: 1: 1)
- ⑤ - ca. 15 cm Kiesschicht
- ⑥ - Erdreich

**Abb. 4.1-30** Prinzipskizze für eine Zisternenwand in Al- Arouk – Taiz in der geschützten Bauweise „Kombination von Lehm und Naturstein“

#### **4.1.3.3 Vorteile**

In Bezug auf ihre Verbreitungsgebiete hat diese Technik folgende Vorteile:

- Durch die Verwendung von unregelmäßigen Natursteinen entstehen sowohl in der Außenschale als auch in der Innenschale offene Fugen zwischen den Bausteinen, die eine langsame Trocknung und somit höhere Festigkeiten für den lehmigen Kern garantieren.
- Es entsteht ein sehr guter Schutz für den lehmigen Kern und dadurch werden die Schäden durch Erosion und Abblätterung vermieden.
- Es können Lehme mit sehr geringem Tongehalt verwendet werden, die üblicherweise in den Gebirgsgebieten vorhanden sind, da Abspülungsgefahr nicht vorhanden ist.
- Bei dieser Bauweise werden oft die Stoßfugen zwischen den Steinen offen gelassen, um etwaige unkontrollierte Rissbildungen zu vermeiden und die Dampfdiffusion des Mauerwerks zu fördern.

#### **4.1.3.4 Nachteile**

- Die Wände dieser Technik sind bedingt durch die Dreischaligkeit sehr dick, mindestens 45 cm und führen daher zur Verringerung der Nutzfläche. Bei den sechsgeschossigen Bauten haben sie im Erdgeschoss eine Dicke von ca. 100 cm.
- Diese Ausführungstechnik ist im Vergleich zu den üblichen Bautechniken im Jemen am teuersten. Sie kostet das ca. 3,5- fache der Kosten der Zabourtechnik, das 2,6- fache der Kosten von Lehmsteinbau und das 1,3- fache der Kosten von Stahlbetonskelettbauten mit Ausfachungen aus Hohlblocksteinen. Dieser Vergleich bezieht sich auf Rohbauobjekte, die der Verfasser während seiner Tätigkeit in „Arraz for Engineering“ 1994 -2002 in Ibb - Jemen überwacht hat.

## 4.2 Lehm als nicht tragender Baustoff

### 4.2.1 Mit Lehm beworfenes Flechtwerk

#### 4.2.1.1 Baugebiete

Die Wurzeln dieser Bauweise liegen in der Rundbau-Tradition, einst überall der ursprüngliche Baustil der mesolithischen und frühen neolithischen Periode [141]. Der Rundbau von Tehama ist ein aus Afrika importierter Baustil. Dieser Baustil hat sich noch in Afrika südlich der Sahara erhalten, wie im Fall des heutigen Kamerun, vgl. Abb. 4.2-1.

Diese Bauweise ist an der westlichen jemenitischen Küste in der Tehama-Region als auch auf einigen jemenitischen Inseln wie Soqotra verbreitet. Sie ist also in den warmfeuchten Gebieten, wo die Wärmespeicherung der Bauwerke so gering wie möglich gehalten werden muss, und der Bedarf an dünnen Wänden für die Bauwerke dringend ist, vgl. 4.1-1.

#### 4.2.1.2 Ausführungstechniken

Die Baumaterialien sind im Allgemeinen Unterholzweige oder Schilf, Äste, Gras oder Blätter sowie Seile zur Fixierung und Lehm.

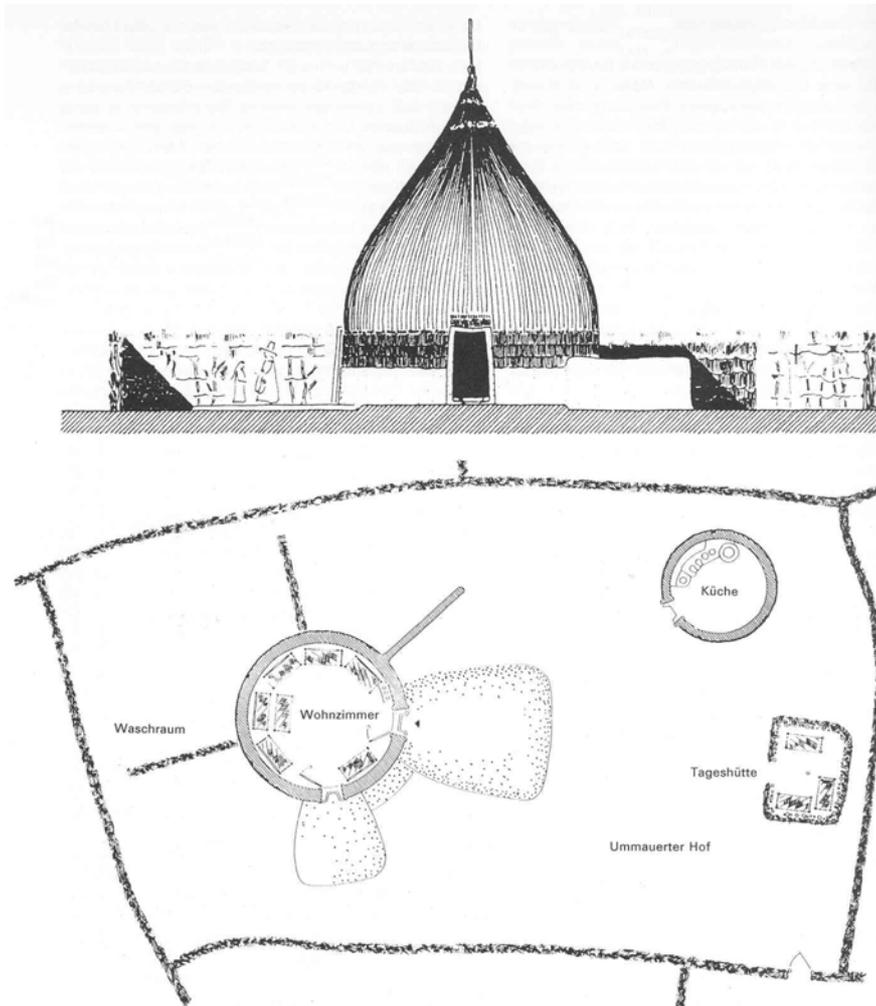
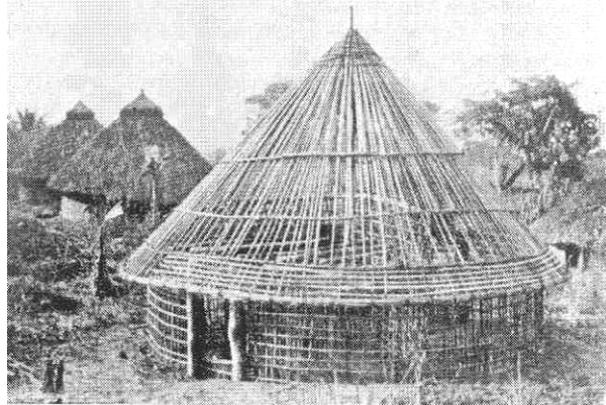
Der Lehm wird hier als Lehmbewurf oder Verputz für die gesamte innere Oberfläche, sowie für die senkrechten Teile der Außenwände etwa 2 m hoch verwendet.

Obwohl diese Bauweise nur an einigen westlichen Küstengebieten und auf Inseln wie Soqotra verbreitet ist, weist sie doch einige Besonderheiten auf. Ihre Konstruktion hat folgende Merkmale:

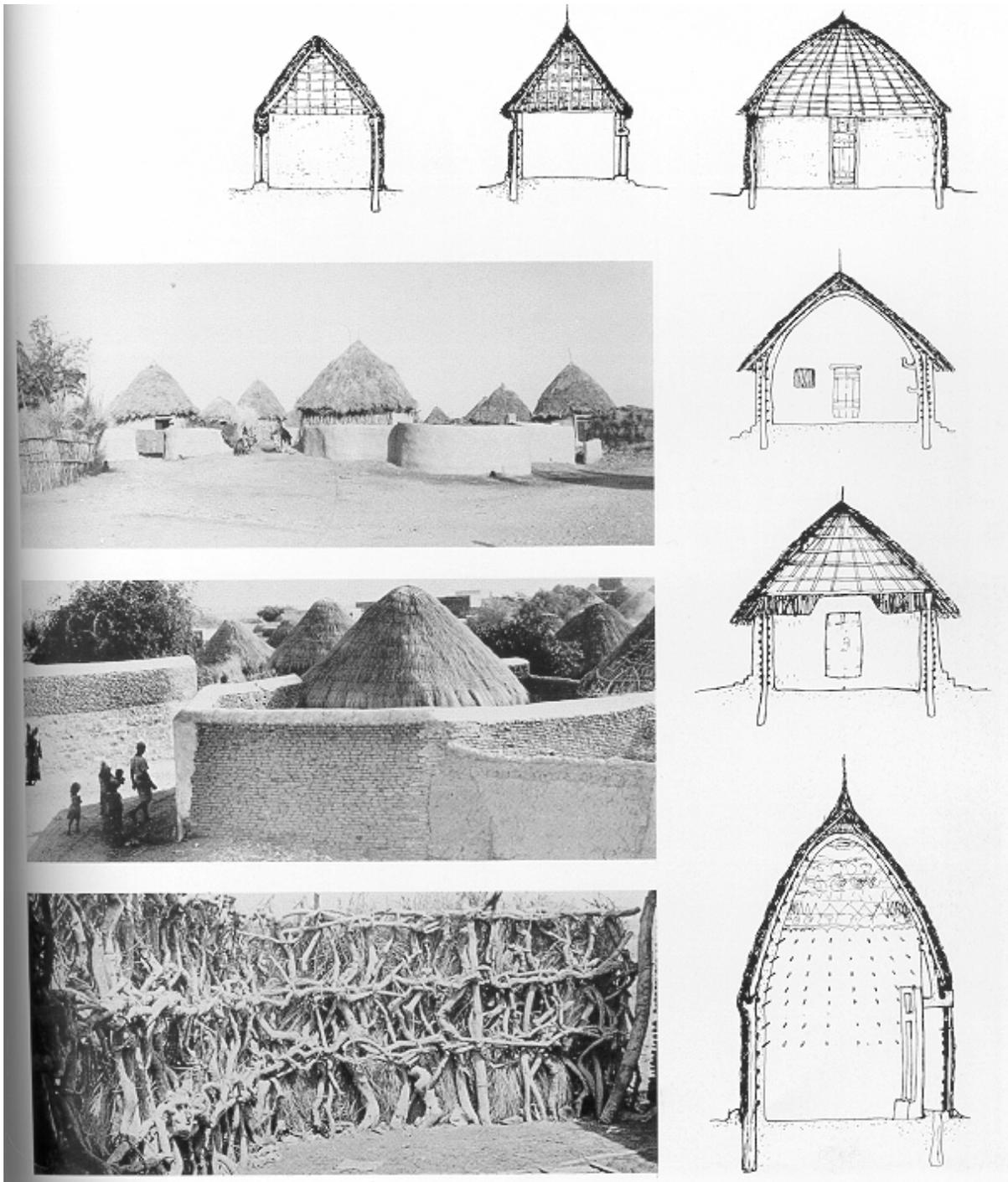
**Der Hauptrahmen:** Es handelt sich um eine tragende Rahmen-Konstruktion aus vertikalen Holz- oder Schilfstangen bzw. Ästen, die so gebogen werden, dass ihre Spitzen zusammentreffen und die Grundkonstruktion an der Spitze mit Seilen zusammengebunden werden kann, s. Abb. 4.2-3.

**Der Sekundärrahmen:** Er ist ein Gitterrahmen aus Ästen, Zweigen oder Schilfrohren oder einem Gemisch davon, der mit Seilen, meistens aus Palmblättern gemacht, verflochten wird. Dieser in sich stabile Rahmen bildet den Untergrund für den **Lehmbewurf**, der im optimalen Fall von außen und von innen durchgeführt wird. Die Gesamtwanddicke beträgt hier 12-20 cm, je nachdem, wie dick die Holzkonstruktion und der Lehmbewurf sind. In der Regel wird der Lehmbewurf komplett auf der inneren Oberfläche durchgeführt. An der Außenseite werden meistens die Wände der Hütte auf ihren vertikalen Oberflächen (ca. 2 m hoch) mit Lehmbewurf vorgesehen.

**Abb. 4.2-1 Wohnhäuser der Tikar in Kamerun, als Skelettbauten errichtet, deren Wandzone oft mit Lehm verputzt wird [80]**



**Abb. 4.2-2 Grundriss und Schnitt eines Hofes mit Rundbauten in Tehama nach [48] zitiert in [139]**



**Abb. 4.2-3 Bauweise im heiß-feuchten Klima (Tehama) [131]**

Mit Lehm beworfenes Flechtwerk  
Es wird ein hölzernes Gerüst aus Stangen, Stöcken und kleineren Zweigen  
zusammengeflochten und dann mit Lehm verputzt

Manchmal findet man Hütten mit voll geputzten äußeren Oberflächen, je nach den finanziellen Möglichkeiten des Besitzers. Ventilationsöffnungen werden über den vertikalen Wänden ausgespart, sodass eine Durchlüftung stattfinden kann.

#### 4.2.1.3 Vorteile

Runde Bauten dieser Art besitzen eine natürliche Zweckmäßigkeit sowie besondere Vorteile in Bezug auf ihre Anlage und Ausführung, vgl. Abb. 4.2-2 und Abb. 4.2-3.

- Durch Fehlen von Ecken und Winkeln herrscht in diesen Räumen ein Gefühl der Ruhe und Gelassenheit.
- Dieser Bautyp bietet den größten Nutzraum im Verhältnis zu der überdachten Fläche wegen seiner dünnen Wände und seiner Form.
- Der Grundriss eines solchen Baus lässt sich einfach mit einer Schnur und einem Pflock erstellen.
- Sie haben eine gute Lastverteilung und keine konstruktiven Schwachstellen, die ihre Statik und Stabilität in Frage stellen.
- Die große Höhe von 4,7 m verstärkt den Effekt des thermischen Auftriebes, bei dem die warme Luft nach oben steigt.
- Die freistehende Hausanlage ermöglicht Luftströmung aus mehreren Seiten, was in einem warmfeuchten Klima, wie in der Tehama-Region der Fall, positiv ist.
- Die kleine Speichermasse dieser Bauweise im Vergleich zu den massiven Bauweisen ist sehr gut geeignet in einem warmfeuchten Klima, wie in der Tehama-Region der Fall ist. Mehr dazu in [12].

#### 4.2.1.4 Nachteile

- **Erhöhte Brandgefahr:** Wenn die äußere und innere Oberfläche der Bauten nicht komplett von Lehmewurf geschützt ist, ist die Brandgefahr sehr groß, besonders in einem Gebiet, wo Brandschutzbekämpfungsmittel meistens nicht existieren.
- **Der Bedarf an relativ großen Grundstücken,** weil bei dieser Bauweise nur horizontale und keine vertikalen Ausdehnungen möglich sind.
- **Hochwassergefahr:** Die Türschwelle dieser Bauten ist meistens sehr niedrig ausgeführt, was bei heftigem Regen und schlechter Entwässerung des Hofbereichs zum Eintreten des Wasserstroms „Sayl“ zum Inneren der Bauten führt. Das Ergebnis ist eine Beschädigung des Lehmewurfs im Innen- und Außenbereich sowie des Lehmfußbodens der Hütte. Durchfeuchtung der ganzen tragenden

Konstruktion verursacht Holzfäulnis, welche zur Gefährdung der Standsicherheit der Bauten führt.

- **Schäden im Sockelbereich:** Diese Bauweise wird oft ohne Sockel aus festem Material wie Stein durchgeführt, was Schäden bei Regen verursacht. Die Sockelzone ist eine Stoßzone beim Spielen von Kindern und ist stets gefährdet beim Alltagsleben im Hof. So ist die Lehmschicht im Sockelbereich oft beschädigt.

### **4.3 Bekannte Schutzmaßnahmen für die Lehmwände**

Das größte Problem hinsichtlich der traditionellen Lehmbauten ist ihre Anfälligkeit gegen Regen- und Hagelfälle. In der Regenperiode, besonders im Juli und August, fällt Schlagregen. „Hochhäuser“, die aus mehr als drei Geschossen bestehen, haben eine lange Tradition im Jemen. Dachüberstände bleiben wirkungslos, deshalb sind sie fast nicht vorhanden in der jemenitischen Architektur. Neben den hohen Gebäudesockeln, Magerung von fetten Lehen und guter Verdichtung für die Oberflächen der Zaboutwände, versuchte man die Lehmhäuser mit unterschiedlichen Methoden und Vorgehensweisen zu schützen:

#### **4.3.1 Schutz durch Lehmputz**

Diese Schutzmaßnahme ist am einfachsten, und wurde bei knappen finanziellen Möglichkeiten durchgeführt. Dabei führt man eine Lehmputzschicht aus, die aus zwei Schichten besteht, der Mahdhah- Schicht, die gleich Maufer für Maufer durchgeführt wird, und dem Oberputz, s. Abb. 4.3-1 und Abb. 4.3-2. Der Putzmörtel besteht aus fettem Lehm und ca. 1,5% zerkleinerten Strohhäckseln. Trotz der vorgesehenen Haftmöglichkeiten, bei Mahdhah- Schicht durch die Fugen zwischen den einzelnen Lehmsteinschichten und bei dem Oberputz durch die Fingerrillen in der Mahdhah- Schicht, muss die Putzschicht regelmäßig saniert und erneuert werden. Diese Maßnahme ist nicht nur eine bautechnische Notwendigkeit, sondern wird auch aus ästhetischen Gründen vorgenommen.

**Abb. 4.3-1 Mahdhah- Schicht, gleich nach jeder Maufer (fünf Schichten) an den unten erwähnten tragenden Lehmstein-Wänden ausgeführt\***



\* Bildaufnahme: Januar 2004

**Abb. 4.3-2 Tragende Lehmstein-Wände, etwa (52)cm breit beim Ausführungs-Zustand in Sabyah-Verband durchgeführt, gegenüber Dar-Asalam in Tarim\***



#### **4.3.2 Schutz durch Lehmputz und Kalkanstrich**

Die zweite Möglichkeit zum Schutz der Lehmwände ist ein zweilagiger Lehmputz, wie im Abschnitt 4.3.1 erwähnt wurde, und darauf ein Kalkanstrich als wasserabweisende Schicht. Dieser Kalkanstrich muss mindestens jährlich erneuert werden. Diese Schicht schützt leider nicht vor Hagelschlag.

#### **4.3.3 Schutz durch Kalkputz**

Die bessere aber aufwendigere Schutzmöglichkeit ist der traditionelle Kalkputz. Im Folgenden wird er detailliert, nach den Besprechungen des Verfassers mit den erfahrenen Kalkputzmeistern in Shibam, Seiyun und Tarim, beschrieben.

### **Vorbereitung des Kalkputzes:**

- Die Kalksteine werden in den traditionellen Öfen drei Tage gebrannt, s. Abb. 4.3-3. Früher hat man Brennholz verwendet, heutzutage benutzt man alte Reifen.
- Die gebrannten Kalksteine werden mit Wasser gelöscht und dann mit Holzstangen geschlagen, bis sie zu einem Kalkpulver werden. Dieser Prozess nennt sich „Sebatah“, vgl. Abb. 4.3-4 (links).
- Das Kalkpulver wird in besonderen Becken mit Wasser weiter gelöscht, bis es zu einer Kalkpaste wird, vgl. Abb. 4.3-5 (rechts).

### **Vorbereitung der Wände durch „Mahdhah“ Ausführung:**

- Die Wände werden gewaschen, dann wird gleich die so genannte „Mahdhah“ ausgeführt. Mahdhah ist eine Lehmputzschicht aus einer Lehm-Stroh-Mischung (ca. 1,5 Gewichtsprozent Stroh). Die Mahdhah-Schicht gleicht die Unebenheiten der rohen Wandoberflächen aus. Die Trocknungszeit für die Mahdhah-Schicht, welche 1-2 cm dick ist, beträgt ein bis zwei Monate. In Tarim führt man die Mahdhah-Schicht an demselben Tag der Ausführung des „Maufers“ durch.
- Die Oberfläche von der Mahdhah-Schicht wird nass gemacht und „nass in nass“ wird die erste Schicht von Kalkputz „Aual-Tarka“ aufgebracht. Ihre Mischung enthält drei Elemente Kalk, Sand und Mittelsplitt im Mischungsverhältnis 1:1:1. Diese Schicht hat eine Dicke von ca. 5-12 mm.
- Nach einer Trocknungszeit von etwa 2 Tagen wird die zweite Schicht vom Kalkputz „Thani-Tarka“ aufgebracht. Ihre Mischung besteht nur aus Kalk und Sand im Mischungsverhältnis 1:1. Sie enthält keine Splittkörner und hat eine Dicke von 3-5 mm, vgl. Abb. 4.3-5.
- Der gelöschte Kalkbrei wird in baumwollenen Säcken geliefert, die auf Sandhaufen gelegt werden, sodass das überschüssige Wasser vom Sand aufgesaugt wird. Es bleibt dann in den Säcken ein cremiger Kalk, der in einer ganz dünnen Schicht (dritte Schicht) bis zu maximal 1 mm dick auf der letzten Putzschicht „Thani-Tarka“ aufgetragen wird.

**Abb. 4.3-3 Kalkbrennöfen bei Shibam**



**Abb. 4.3-4 Verarbeitung und Sumpfen von Kalk vor der Verwendung**



**Abb. 4.3-5 Kalkputze unterschiedlicher Dicke in Tarim, Vor- und Rückseite**

### **Rauk-Prozess:**

Die dritte Schicht wird nach zwei Tagen mit einem besonderen Stein, dem sogenannten „Hira“ poliert, mit einem Putzlappen abgerieben und gewaschen, sodass die entstandenen Schwindrisse geschlossen werden. Diesen Prozess wiederholt man nach einer Woche. Nach zwei Wochen wird die Oberfläche unter Verwendung von Putzlappen und Seife glänzend poliert.

Es muss hier darauf hingewiesen werden, dass diese Verputztechnik für den Innenputz und vor allem bis zu einer Höhe von ca. zwei Meter angewendet wird, weil sie wasserabweisend und waschfest ist. Sie heißt „Malas“, wie etwa „glänzend“ auf Deutsch. Wegen ihrer aufwendigen Verarbeitung (Raukprozess) ist sie aber ca. 30 % teurer als ein normaler Kalkaußenputz (Nora-Adi). Bei einem normalen Kalkaußenputz verzichtet man auf den Rauk-Prozess. Stattdessen reibt man die zweite Schicht des Außenputzes in einem Tag mit der Putzkelle ab, sodass die erscheinenden Schwindrisse geschlossen werden. Danach wird ein Kalkanstrich ausgeführt.

Es muss aber auch hier angemerkt werden, dass trotz dieser sorgfältigen und aufwendigen Ausführung von Kalkaußenputzen eine Anfälligkeit für Risse bleibt. Für eine Rissbildung in der Putzschicht gibt es, neben mangelhafter Ausführung des Verputzes, drei Ursachen:

- Der Putz schwindet als Folge der Volumenverminderung durch die Erhärtungsreaktion bzw. durch Austrocknung nach der Verarbeitung.
- Unterschiedlich thermisch und hygriisch bedingte Längenänderungen von Kalkputz und Putzgrund (Lehmwand) führen zu mechanischen Spannungen, die neben einer Rissbildung in den Putzflächen auch zur Ablösung des Putzes führen können. Nach [23] liegt die hygriische Längenänderung bei 20°C und bei der Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit von 30% auf 60% für Kalkputz bei  $\Delta L = 0,40 \text{ mm/m}$ , bei Lehm liegt sie bei 10 M- % Tonfraktion  $\Delta L = 1,03 \text{ mm/m}$ .
- Durch schnelle Austrocknung wegen der klimatischen Verhältnisse vor allem bei hohen Lufttemperaturen.

Das Regenwasser dringt an den Stellen ein, wo es zu Schwindrissen an Kalkputz kommt. Die Lehmoberfläche quillt dahinter und presst die Kalkputzschicht weiter nach außen, was zur Vergrößerung der Rissbreite führt und das Eindringen von mehr Regenwasser begünstigt.

Das Ergebnis ist eine Ablösung der Kalkputzfläche von der Fassade (s. Abb. 1.2-4 sowie Abb. 4.3-6 bis Abb. 4.3-8). Ein weiteres Problem bei den Kalkputzen ist ihre lange Erhärtungszeit, sodass die Gefahr besteht, dass sich die Putzschale bei starken Regenfällen mit Hagel wegen der noch nicht durchcarbonatisierten tieferen Putzschichten vom Untergrund ablöst. Diese Gefahr ist umso größer, je stärker die Außenputzschicht ist, weil sich dadurch die Belastung des Haftverbundes vergrößert und gleichzeitig die Zeit der Carbonatisierung verlängert wird.

#### **4.3.4 Schutz durch Zementputz**

Seit knapp 60 Jahren finden die Zementprodukte immer mehr Verwendung im Bausektor im Jemen. Seitdem versucht man die Lehmwände, besonders im Sockelbereich, mit Zementputzen zu schützen, vgl. Abb. 4.3-10. Ein solcher Schutz ist aber auch nicht von Dauer. Es kommt nach einiger Zeit zur Putzabplatzung. Es entstehen wegen Volumenverminderung, Erhärtungsreaktionen, schneller Austrocknung und unterschiedlicher thermisch und hygrysch bedingten Längenänderungen zwischen Putzschicht und Untergrund Risse im Zementputz, von denen Regenwasser eintritt, und eine Quellung der Lehmoberfläche hinter der Putzschicht verursacht, was zur Putzabplatzung führt, s. Abb. 4.3-12.

#### **4.3.5 Schutz durch Bauen des letzten Geschosses aus wasserfesten Materialien**

Diese Schutzmöglichkeit hat man traditionell verwendet, indem man das letzte Geschoss aus gebrannten Lehmsteinen gebaut hat, s. Abb. 4.3-17. Heutzutage versucht man das letzte Geschoss an den historischen Bauten der Altstadt von Sa'da und Ma'bar aus Hohlblocksteinen zu errichten, um die Regen- und Hagelbelastung an den Gebäuden zu verringern. Es entstehen dadurch architektonisch und ästhetisch unbefriedigende Lösungskonzepte, vgl. Abb. 4.3-15 und Abb. 4.3-16.



**Abb. 4.3-6 Kalkputzschäden am Lehmsteingebäude Nr. 81-D in Shibam beeinträchtigen die ästhetische Wirkung, vgl. Abb. 4.1-7\***



**Abb. 4.3-7 Kalkputzabplatzung am Al-Rinad-Palast in Tarim. Gebaut von Mohamad Al-Kathierie 1931, mit Lehmsteintechnik, oft renoviert\***



**Abb. 4.3-8 Hantut-Palast in Tarim: Putzrisse wegen Schwinden und unterschiedlicher Ausdehnungs-Koeffizienten zwischen der Putz-Schicht und dem Untergrund, sowie Mängel bei der Ausführung führen zu Putzabplatzungen. Die Durchfeuchtung von Bauteilen kann ihre Standsicherheit beträchtlich gefährden\*.**

\* Bildaufnahme: Januar/04

**Abb. 4.3-9 Durch aufsteigende Feuchte geschwächte Zabourwände. Die geschädigte Zone wurde zusätzlich im Querschnitt durch den Gangbau von Ratten und Hasen geschwächt. Ras'a Haus / Khazanstr. / Ma'bar\***



**Abb. 4.3-10 Bei zahlreichen historischen Zabourbauten werden Schadenbereiche mit Naturstein verkleidet und dann mit Zementputzen versehen. Al-Anisy- Haus/ Khazanstr. /Ma'bar\***



**Abb. 4.3-11 Die schlechte Ableitung des Regenwassers ist eine direkte Ursache für Feuchtigkeit. Salzbelastungen der unteren Zabourschichten sind außerdem eine zusätzliche Querschnittsschwächung an den tragenden Wänden. Shirian- Haus, Wasita / Ma'bar\***



\* Bildaufnahme: Januar/04

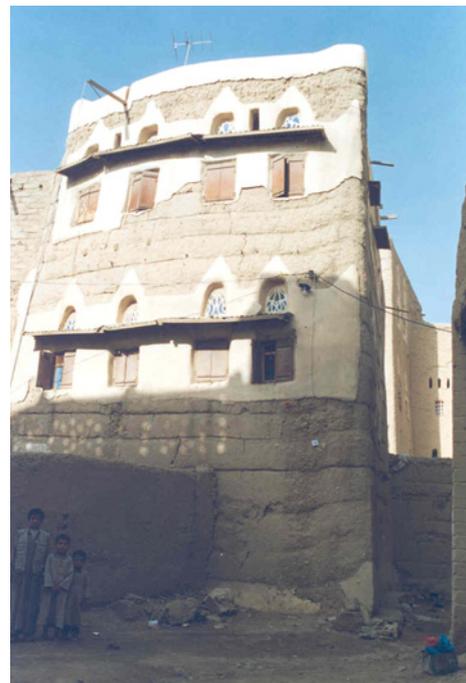
**Abb. 4.3-12 Haus von Mura'd / Ma'bar, Abplatzung des Zement-  
Putzes im Erdgeschoss.  
Zweites Geschoss ist aus Beton-  
Blocksteinen gebaut\***



**Abb. 4.3-13 Lagerhaus in Harat  
Ad- Dawar / Altstadt Sa'da.  
Kalk-Putzabplatzungen  
benachteiligen das ästhetische  
Aussehen\***



**Abb. 4.3-14 Kalkputzabplatzungen an  
einem Wohnhaus in Harat Al-Girba /  
Altstadt Sa'da. Direkt unter den geputzten  
Flächen an der Fassade machen sich die  
erodierenden Wetteinflüsse bemerkbar\***



\* Bildaufnahme: August /04

**Abb. 4.3-15 Blick ins Harat-as-Suq von der Dachterrasse der Mädchenschule Richtung Südosten. Die oberen Geschosse der meisten Zabourhäuser wurden mit Betonhohlblocksteinen gebaut (Als Schutz für die unteren Geschosse)\***



**Abb. 4.3-16 Das Obergeschoss aus Betonhohlblocksteinen, mit Zementputz und Kalkanstrich versehen. Man betrachtet das obere Geschoss als Schutz für die zwei unteren Zabour-Geschosse, Rahban / Sa'da\***



**Abb. 4.3-17 Traditionell hat man die Zabourhäuser mit dem Errichten des letzten Geschosses aus gebrannten Lehmziegeln geschützt. Bait Madaga, Harat-al-Zaidan, Sa'da ca. 1952 gebaut\***

\* Bildaufnahme: Januar/04

#### 4.4 Oft auftretende Schäden an den Lehmbauten und ihre Ursachen

- Oberflächenabspülungen und Verletzungen an den Außenwandflächen durch Regen oder Regen-Hagelfälle bei den nicht geputzten Lehmwänden, vgl. Abb. 4.1-25 bis 4.1-27. Besonders anfällig sind die horizontalen Flächen, wie äußere Fensterbänke und die freistehenden Lehmwände, wie Terrassenbrüstungs-Wände, s. Abb. 4.4-1.

**Abb. 4.4-1 Durch Regenwasser beschädigte Fensterbank an einem Lehmsteinhaus in Shibam**



- Gefährdung der Standsicherheit des Gebäudes durch Abwasserrohrbruch oder Verstopfung der Regenwasserleitungen sowie durch schlechte Entwässerung für die gebäudeumgebenden Flächen, s. Abb. 4.3-11.
- Schäden wegen aufsteigender Feuchte: Da viele historische Gebäude auf ebenen Böden gegründet sind, die das Baumaterial lieferten, und weil die bindigen Böden ein großes Wasserrückhaltvermögen besitzen, ist die Bildung von Schichtenwasser möglich, und somit sind die Bedingungen für die Entstehung von aufsteigender Feuchte gegeben, vgl. Abb. 4.3-9 und 4.3-10.
- Putzabplatzungen bei den geputzten Lehmwänden wegen unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten zwischen Putzschicht und Untergrund (Lehmwand) sowie wegen rascher Trocknung der Putzfläche oder Ausführungsmangel. Das geschieht sowie an den Lehmsteinbauten (vgl. Abb. 4.3-6 bis 4.3-8) als auch an den Zabourbauten, vgl. Abb. 4.3-12 bis 4.3-14.
- Bauschädliche Salze: Die Massivlehmbauten unterliegen häufig einer zusätzlichen Belastung:

Durch Tierhaltung und Einleitung von Abwässern in gebäudenahe Sickergruben werden große Mengen an Nitraten in den Boden eingetragen. Diese Salze können in hohen Konzentrationen mit der aufsteigenden Feuchte in das Bauwerk transportiert und dort angereichert werden. Salzlösungen können in Abhängigkeit von Salzart und Temperatur hohe Übersättigungskonzentrationen entwickeln. Wenn die übersättigte Lösung die Poren voll ausfüllt, entstehen durch Kristallisation Interndrücke, die je nach Salzart erhebliche Werte annehmen können und die Materialfestigkeit beträchtlich überschreiten. Hydratationsdrücke und Anbinden von Feuchte sind weitere Salzbelastungen an den Lehmbauten. Mehr dazu in [71].

- Im Gegensatz zu den anderen Lehmbauweisen, bei denen die Lehmwände nicht tragend sind, ist bei massiven Lehmwänden auch die Tragfähigkeit des ungeschädigten Restquerschnittes wegen eines hohen Feuchtegehaltes des Materials stark eingeschränkt, vgl. Abb. 4.3-9 und Abb. 2.6-3.
- Da der Baustoff Lehm eine relativ geringe Zugfestigkeit hat, treten oft Schäden an den Fenster- und Türrahmen auf, bedingt durch starkes Öffnen und Schließen der Tür- bzw. Fensterflügel, vgl. Abb. 1.2-6.
- Da der Lehm in den jemenitischen traditionellen Lehmbautechniken im plastischen Zustand verarbeitet wird, treten oft Schwindrisse auf, besonders wenn die Bearbeitung in der Sommerperiode ist, vgl. Abb. 4.1-17. Bei der Zabourtechnik sind die Flächen, die ein hohes Ausmaß an Schwindrissen zeigen, sehr anfällig für Regenfälle und daher zeigen sie höhere Erosionsgrade, s. Abb. 4.1-20.

Die historischen Stadtmauern der Altstadt von Sa'da und der Altstadt von Sana'a sind die wichtigsten „Datenspeicher“ für die Zabourtechnik und ihrer Beschädigung. Hier kann man deutlich die Erosionsgrade in den übereinander liegenden verschiedenen Zabour-Schichten erkennen, die vermutlich wegen ihren unterschiedlichen Ausführungszeiten, bedingt durch die Länge und Höhe der Stadtmauer, unterschiedliche Schwindrisse und Festigkeiten aufwiesen. Dadurch war ihre Empfindlichkeit für Regen- und Hagelfälle unterschiedlich. Aus der Abb.4.4-2 erkennt man dieses Phänomen ganz deutlich. Die ersten zwei Schichten weisen stärkere Erosionsschäden als die fünf darauf liegenden Schichten auf. Die letzten drei bis fünf Schichten sind weniger erodiert als die fünf darunter liegenden Schichten, obwohl sie wegen ihrer obersten Lage mehr betroffen von Regen- und Hagelfällen als die unteren Schichten sind. Diesen Effekt findet man auch bei der restaurierten historischen Mauer der Altstadt von Sana'a.



**Abb. 4.4-2 Bab Nagran an der historischen Stadtmauer in Sa'da, 16. Jh. erbaut. Entlang der Mauer zeigen die übereinander liegenden Schichten verschiedene Erosionsgrade. Die ersten zwei Schichten sind mehr erodiert als die darüber liegenden fünf Schichten. Dann folgen fünf Schichten mit sehr großem Erosionsgrad. Danach folgen drei bis fünf Schichten, die weniger erodiert sind.**



**Abb. 4.4-3 Erhöhte Sockelbildung. Man vermutete, dass Spritzwasser eine Schadenursache ist. Das Resultat der Bemühungen war unbefriedigend. Es wurde nur eine Verschiebung der Problemzone erreicht. Die drei bzw. vier letzten Zauberschichten entlang der historischen Stadtmauer zeigen mehr Schwindrisse als die unteren sechs Schichten.**

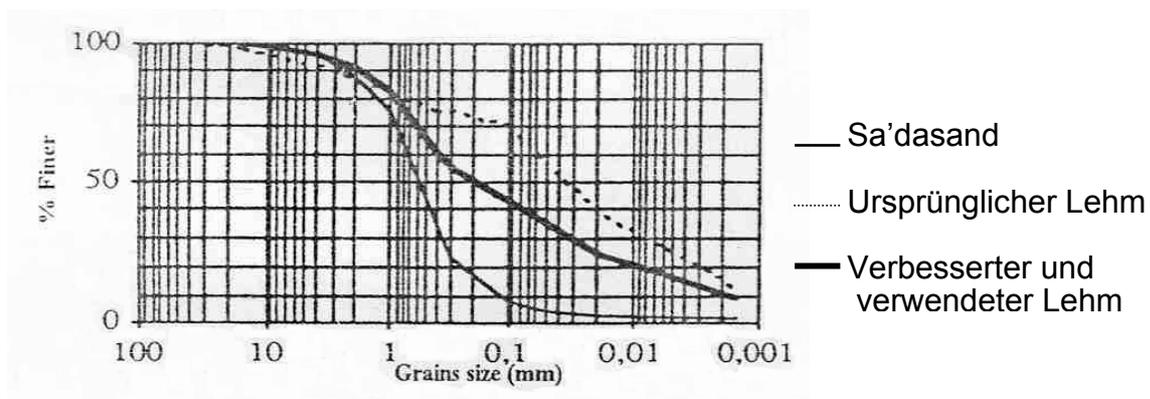
Aus der Abb. 4.4-3 vom südlichen Teil der historischen Stadtmauer in Sana'a erkennt man, dass die drei bzw. vier letzten Zabourschichten entlang der Stadtmauer mehr Schwindrisse zeigen als die unteren sechs Schichten. Diese Stadtmauer wurde 1991/1992 von spezialisierten Bauingenieuren überwacht, und das Rohmaterial gut kontrolliert, sodass die Eigenschaften, wie Tonmenge und Zuschläge etwa konstant geblieben sind, vgl. Abb. 4.4-4. Es ist zu vermuten, dass die unterschiedlichen Schichten auch in unterschiedlichen Jahreszeiten, also unter unterschiedlichen Klimabedingungen, durchgeführt wurden, deshalb zeigen sie unterschiedliche Witterungsempfindlichkeit.

#### **4.5 Gründe für Rückgang von Lehmbau im Jemen**

Sowohl aus der Analyse der traditionellen Lehmbautechniken als auch aus der Studie der Einflussfaktoren auf den Lehmbau im Jemen kann man folgende Gründe für den Rückgang vom Lehmbau im Jemen herleiten:

- Die langen Trocknungszeiten nach den Bauabschnitten und vor den Putzarbeiten führen zur Verzögerung des Bauprozesses und zu wirtschaftlichen Nachteilen sowohl für Bauherren als auch für die Baufirmen im Vergleich zu den modernen Baustoffen.
- Die Herstellung von Lehmbauten ist von der Jahreszeit abhängig. Sie werden meistens in den Jahrestrockenperioden gebaut.
- Abplatzung der Putzschichten von den Lehmfassaden durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten der Putzschicht und des Untergrundes (Lehmwand).
- Die sehr hohe Empfindlichkeit des Lehmes gegenüber Feuchtigkeit, so dass die Standsicherheit der Gebäude gefährdet wird. Die Verwendung von starkem Wasserstrahl von Feuerwehranlagen gegen eine Lehmfassade ist fraglich. Eine Lehmfassade braucht einen guten Schutz während des Feuerlöschens, um die Standsicherheit der Gebäude nicht zu gefährden.
- Die modernen Anforderungen an ein städtebauliches Konzept und an die Gebäudeplanung insbesondere aus verkehrstechnischer Sicht sowie die Feuerwehranforderungen bedingen die Planung „selbstschützender“ Gebäude. Es fehlt der traditionelle gegenseitige Schutz der Gebäude, was bei Lehmbauten sehr beeinflussend ist.
- Die traditionellen Lehmbautechniken können die heutigen Anforderungen an größere Spannweiten und Öffnungen in bestimmten Bauwerken nicht erfüllen, weil hohe Punktlasten und ungleichmäßige Lastverteilungen von großem Nachteil für die Lehmwände sind.

- Die sehr großen Konstruktionsflächen bei den traditionellen Lehmbauweisen im Vergleich zu den Bauweisen mit modernen Baustoffen sind ein Hindernis für die weitere Verwendung von dem Baustoff Lehm besonders in den Gebieten mit steigenden Grundstückspreisen.
- Fehlende Pflege und Pflegekosten für die Lehmbauten wegen starker gesellschaftlicher Veränderungen (Binnenwanderung, Lebensart, Migration) und Verschlechterung der wirtschaftlichen Lage im Lande, sind weitere Hindernisse für das Bauen mit Lehm.
- Der größte Teil der Neubauten sind Wohnbauten, die von Migranten gebaut und vermietet sind [106]. Daher fehlt die traditionelle Beziehung zwischen den Lehmbauten und ihren Einwohnern, die auch Hausbesitzer waren, und sehr schnell anfallende Reparaturen der auftretenden Bauschäden angingen.
- Fehlende Flexibilität bei den traditionellen Lehmbautechniken wegen ihrer tragenden Außen- und Innenwände im Vergleich zu den Stahlbetonskelettbauten.
- Das traditionelle Wissen im Umgang mit dem Baustoff Lehm ist in den letzten vier Jahrzehnten im Allgemeinen drastisch verloren gegangen. Die Anzahl der Handwerker und Lehmbaumeister wird immer geringer.
- Das Öffnen der Märkte des Landes für Baustoffe aus dem Ausland hat den Lehmbau negativ beeinflusst.
- Es gibt keine Normen für den Baustoff Lehm im Vergleich zu den anderen Baustoffen.
- Fehlende Forschung und Verbesserung für die traditionellen Lehmbauweisen.



**Abb. 4.4-4 Kornverteilungskurve der verwendeten Zabourlehmischung bei der Restaurierung der historischen Altstadtmauer in Sana'a [114]**

## **4.6 Bauklimatische Messungen in Seiyun-Palast im Wadi-Hadhramaut**

### **4.6.1 Ziel der Untersuchung**

Das Hauptziel der Untersuchung in diesem Abschnitt besteht darin, den Einfluss von verschiedenen Lehmwandstärken in der kritischen Klimaregion (Wadi-Hadhramaut) auf das Innenraumklima und thermische Behaglichkeit festzustellen, um bauklimatische Kenntnisse und Grundlagen für die Entwicklung von modernen Lehmbauweisen und Lehmbautechniken zu erhalten, und Verbesserungsmaßnahmen vornehmen zu können.

### **4.6.2 Methodisches Vorgehen**

Um das oben genannte Ziel zu erreichen, wurden bauklimatische Messungen (Innenraumtemperatur, Außenlufttemperatur, Oberflächentemperatur, Luftgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit in Innenräumen sowie im Außenraum) in mehreren Testhäusern durchgeführt. Als Beispiel werden hier die bauklimatischen Messungen im Seiyun-Palast „Kasr-al-Sultan“ dargestellt und ausgewertet.

Die Bewertung der thermischen Behaglichkeit in den Testräumen wird sowohl nach dem thermischen Gleichgewichtsmodell (Fangerdiagramme) [51] als auch nach dem adaptiven Modell von Nicol und Humphreys [65, 66] vorgenommen.

### **4.6.3 Klima in Seiyun**

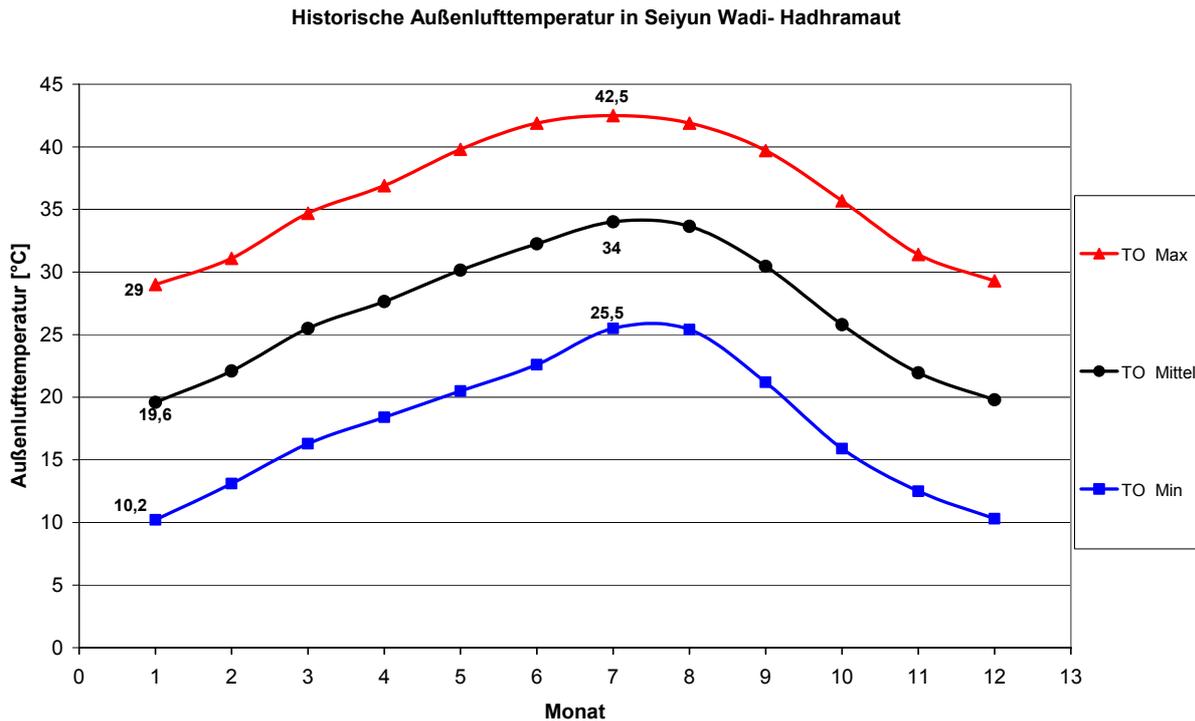
Für das Klima in Seiyun ist die Lage im östlichen Plateau im Wadi-Hadhramaut ausschlaggebend. Die Stadt Seiyun liegt in einer Höhe von ca. 600 m über dem Meeresspiegel, 15° 56' nördlicher Breite und 48° 56' östlicher Länge.

#### **4.6.3.1 Außenlufttemperatur**

In der Abbildung 4.6-1 sind die historischen Außenlufttemperaturen von Seiyun nach den Klimadaten der Klimastation der Flughafen Seiyun und der „Agricultural Research Station –Seiyun“ abgebildet. Dabei sind die maximalen, minimalen und mittleren monatlichen Mittelwerte dargestellt.

Aus der Abb. 4.6-1 kann Folgendes abgeleitet werden:

- Der höchste Wert der durchschnittlichen maximalen Außenlufttemperatur wurde im kritischen Sommermonat Juli registriert und erreichte einen Wert von 42,5°C.



**Abb. 4.6-1 Langjährige Außenlufttemperatur in Seiyun als Mittelwerte für maximale, minimale und mittlere monatliche Werte**

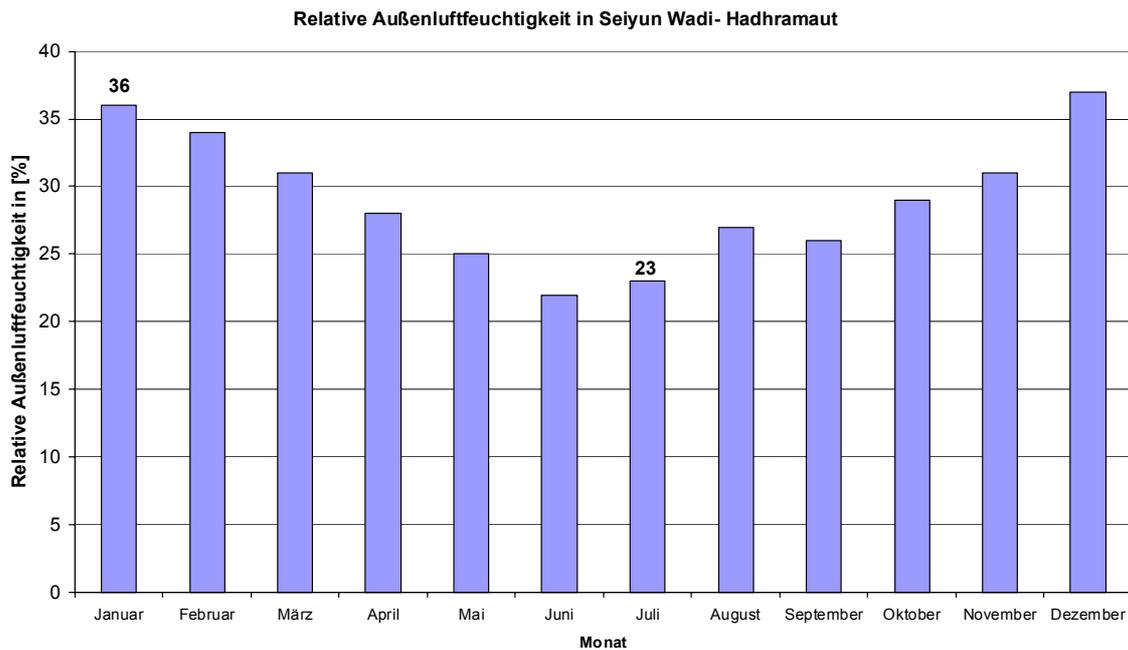
- Der kleinste Wert der durchschnittlichen maximalen Außenlufttemperatur wurde im Wintermonat Januar registriert und betrug 29°C.
- Der höchste Wert der durchschnittlichen minimalen Außenlufttemperatur im Sommermonat Juli erreichte einen Wert von 25,5°C. Dagegen wurde der niedrigste Wert der durchschnittlichen minimalen Außenlufttemperatur im Wintermonat Januar gemessen und erreichte einen Wert von 10,2°C.
- Der Mittelwert der Außenlufttemperatur beträgt im Wintermonat Januar 19,6°C und im Sommermonat Juli 34°C.
- Die Temperaturdifferenz zwischen Tag und Nacht ist groß und kann 20 K betragen.

#### **4.6.3.2 Außenluftfeuchte**

Die mittlere relative Außenluftfeuchtigkeit beträgt im kritischen Wintermonat Januar 36% und im kritischen Sommermonat Juli 23%.

Der kleinste Wert der durchschnittlichen relativen Außenluftfeuchtigkeit wurde im Sommermonat Juni gemessen und erreichte einen Wert von 22%.

Dagegen wurde der höchste Wert der durchschnittlichen relativen Außenluftfeuchtigkeit im Wintermonat Dezember registriert und betrug 37%, vgl. Abb. 4.6-2.



**Abb. 4.6-2 Langjährige relative Außenluftfeuchtigkeit in Seiyun, Wadi-Hadhramaut**

#### **4.6.3.3 Wind und Luftbewegung**

Die Abb. 4.6-3 stellt die Hauptwindrichtung im Laufe des Jahres in Seiyun dar. Daraus kann man ableiten, dass die Hauptwindrichtung meistens vom Osten ist. Während die Hauptwindrichtung im Wintermonat Januar vom Südosten ist, ist sie im kritischen Sommermonat Juli vom Südwesten.

#### **4.6.4 Beschreibung von Testräumen**

Die bauklimatischen Messungen wurden im Seiyun-Palast „Kasr-al-Sultan“ durchgeführt. Dieser Palast wurde 1873 in Lehmsteintechnik gebaut, s. Abb. 4.6-4. Der Seiyun-Palast liegt im Seiyun – Zentrum auf einem Hügel, ca. 35 m höher als seine Umgebungsstraßen, vgl. Abb. 4.6-5. Daher war er optimal als Testhaus für den Vergleichszweck zwischen den verschiedenen Geschossen, ohne Verschattungsunterschiede wie z. B. bei den Shibambauten der Fall ist, zu wählen. Außerdem dient die Verjüngung der Außenwanddicke von 75 cm im Erdgeschoss bis zu 32 cm im obersten Geschoss dem Untersuchungsziel, den Einfluss der Veränderung der Außenwanddicke auf das Innenraumklima festzustellen.

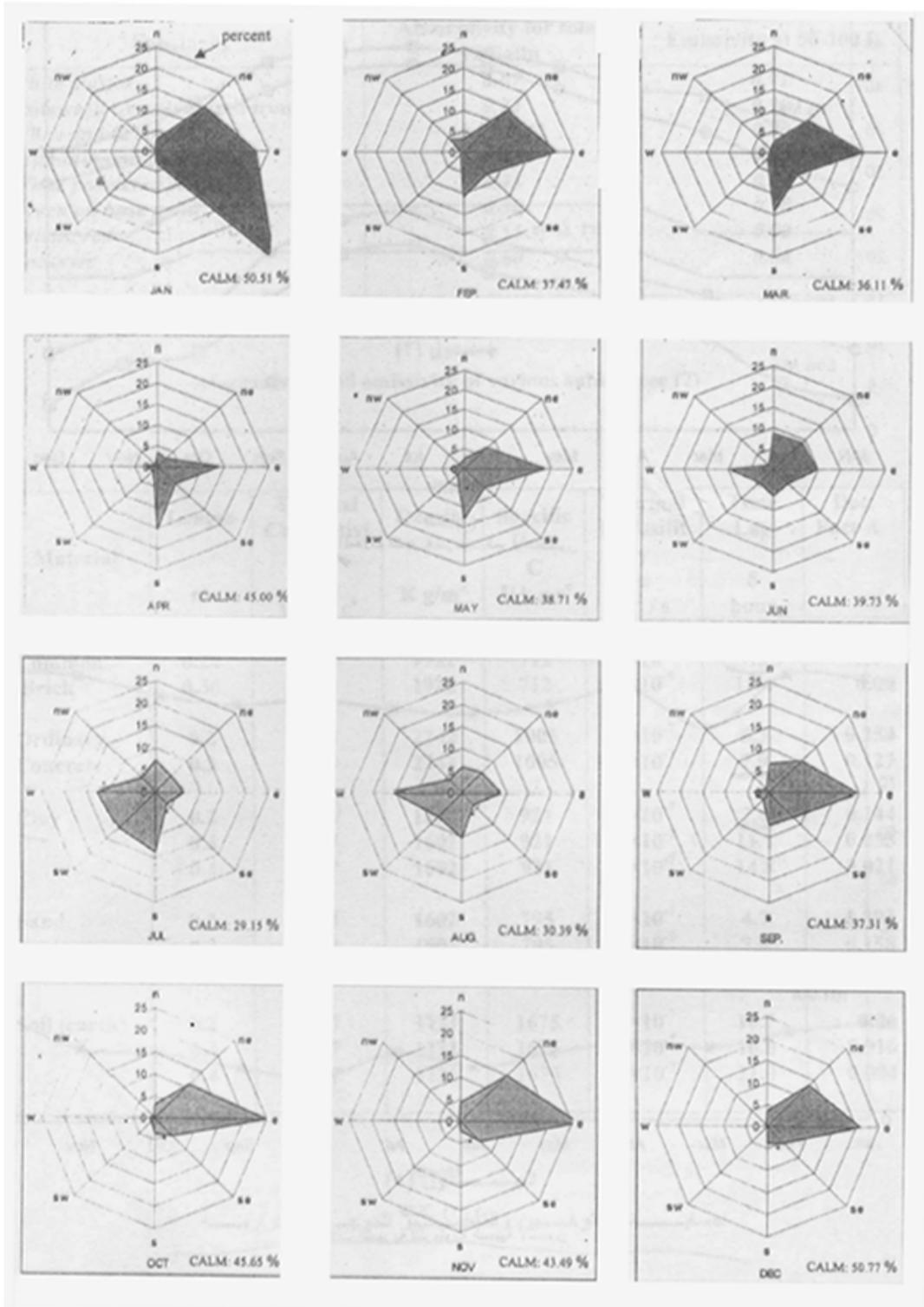
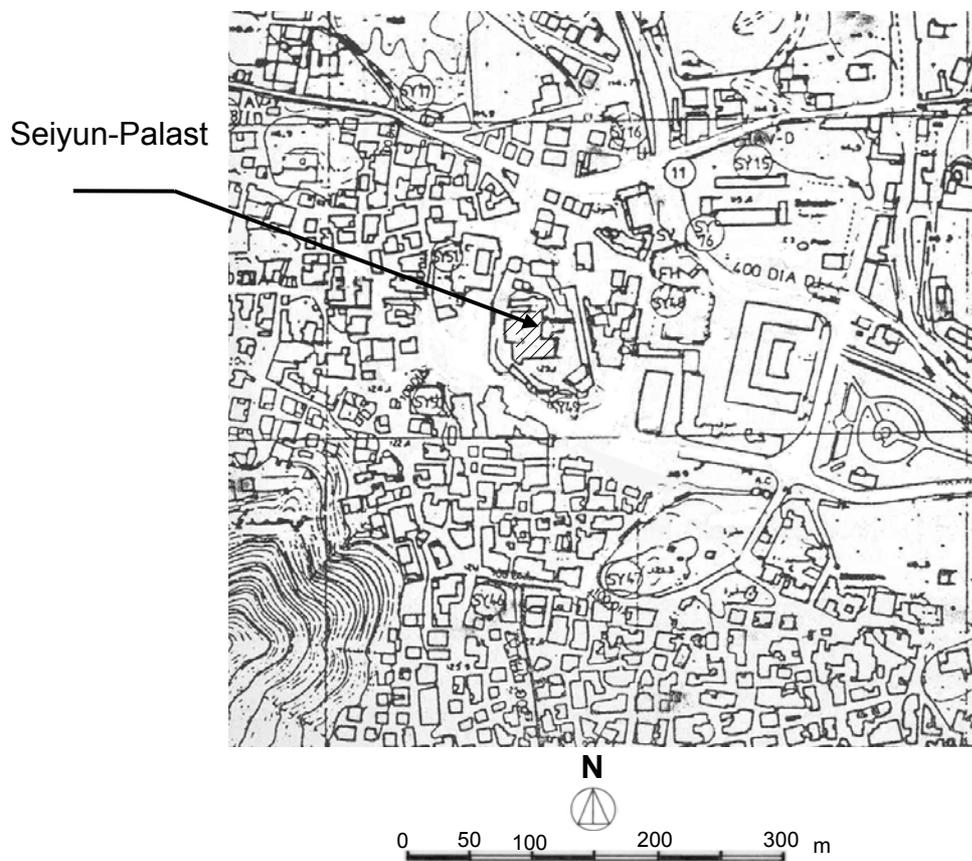


Abb. 4.6-3 Hauptwindrichtung im Laufe des Jahres in Seiyun, Wadi-Hadramaut [123]



**Abb. 4.6-4 Seiyun-Palast 1873 gebaut, 1936 ergänzt und mit Kalkputz geschützt, oft renoviert, letzte Renovierung 2002, Bildaufnahme Januar 2004**



**Abb. 4.6-5 Lageplan des Seiyun-Palastes im Zentrum der Stadt Seiyun**

Der viergeschossige südöstliche Wachturm wurde als Messobjekt gewählt, da seine Räume in allen vier Geschossen gleich groß sind. Sie unterscheiden sich durch ihre Außenwanddicke. Dabei beträgt die Außenwanddicke im Erdgeschoss 75 cm, im 1. Obergeschoss 55 cm, im 2. Obergeschoss 50 cm und im 3. Obergeschoss 32 cm, vgl. Abb. 4.6-6. Alle Außenwände und Innenwände sind mit 1,5 cm dickem Kalkputz versehen außer den Innenwänden im Erdgeschoss, die mit 2 cm dickem Lehmputz versehen sind.

#### 4.6.5 Messgeräte

Die Kenntnis über die in den Testräumen herrschenden Klimafaktoren ist erforderlich, um das Raumklima in diesen Räumen bewerten zu können. Die Tab. 4.6-1 stellt die gemessenen Klimafaktoren und die verwendeten Messgeräte dar.

<b>Nr.</b>	<b>gemessener Klimafaktor</b>	<b>Messgerät</b>
1	trockene Innenraumtemperatur	s. Abb. A-4-7
2	Feuchttemperatur	s. Abb. A-4-7
3	relative Luftfeuchte	s. Abb. A-4-7
4	absolute Luftfeuchte	s. Abb. A-4-7
5	Luftgeschwindigkeit	s. Abb. A-4-9
6	Oberflächentemperatur von Decken, Fußböden und umgebenden Wänden	s. Abb. A-4-10

**Tab. 4.6-1 Gemessene Klimafaktoren und die verwendeten Messgeräte**

#### 4.6.6 Durchführung der Messungen

Die Messungen wurden gleichzeitig in allen vier Testräumen im Sommermonat Juli/03 und im Wintermonat Januar/04 stündlich durchgeführt.

In der Mitte jeden Messraumes und in einer Höhe von 80 cm wurden die Messgeräte für Lufttemperatur und relative bzw. absolute Luftfeuchte sowie das Messgerät für die Luftgeschwindigkeit stationiert, s. Abb. A-4-8.

Die Oberflächentemperaturen der Innenwände wurden in der Mitte der Wände und in einer Höhe von 80 cm über dem Fußboden gemessen. Die Oberflächentemperatur von Fußboden und Decken der Messräume wurde an der Mitte gemessen.

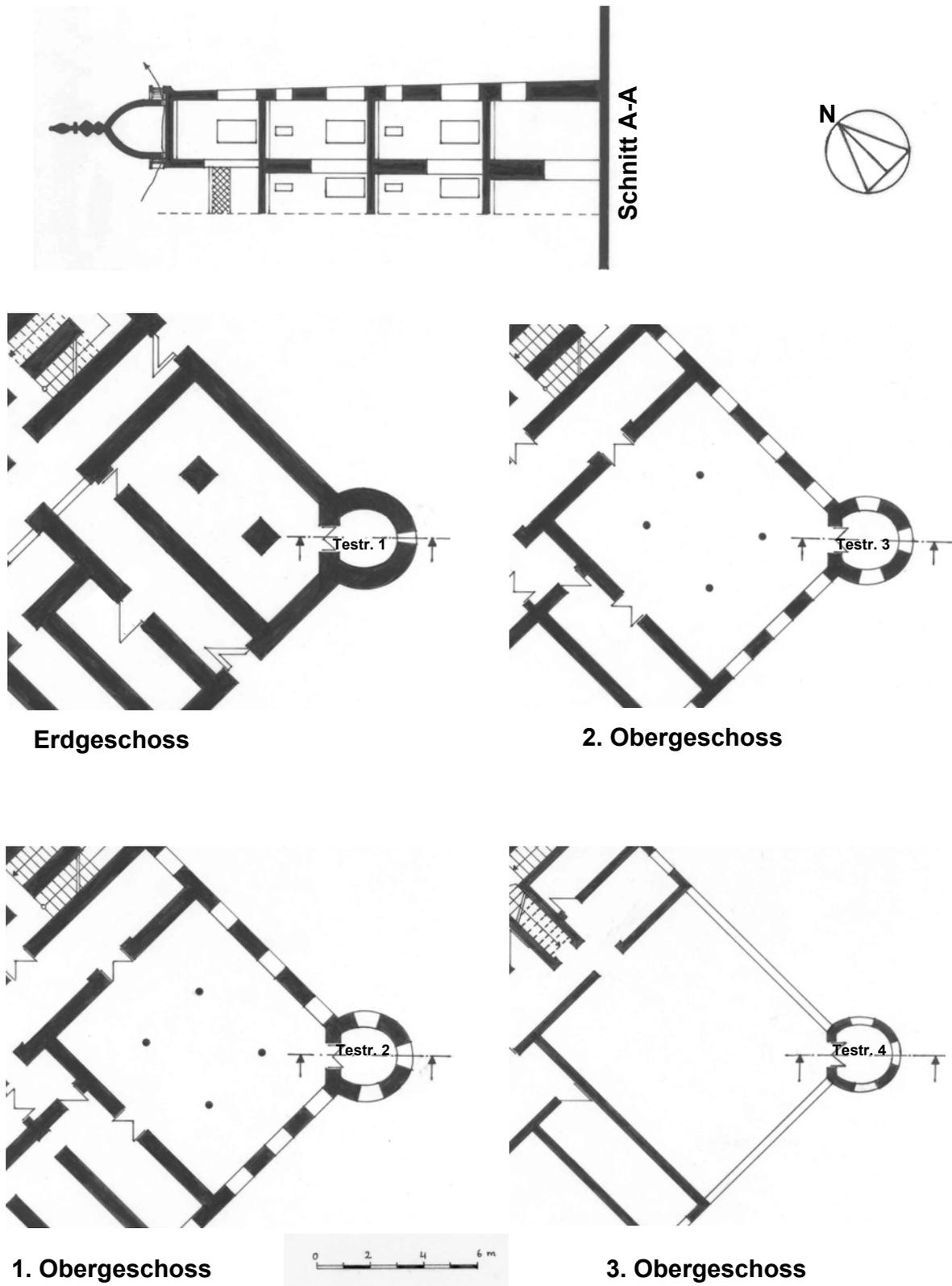


Abb. 4.6-6 Grundrisse und Schnitt der Testräume im Seiyun-Palast

#### **4.6.6.1 Messergebnisse im Sommermonat Juli 2003**

Die Abb. A-4-11 bis Abb. A-4-14 stellen den Tagesverlauf der Messwerte (Luftgeschwindigkeit, relative Luftfeuchte, absolute Luftfeuchte und Innentemperatur) aller vier Testräume im Seiyun-Palast während der stündlichen Messungen im Juli 2003 dar. Die Abb. A-4-15 stellt die stündlich gemessenen Oberflächentemperaturen der umgebenden Flächen in den Testräumen dar.

Die Messergebnisse sind in den Tab. A-4-1 bis Tab. A-4-4 zusammengefasst.

#### **4.6.6.2 Messergebnisse im Wintermonat Januar 2004**

Die Abb. A-4-16 bis Abb. A-4-19 stellen den Tagesverlauf der Messwerte (Luftgeschwindigkeit, relative Luftfeuchte, absolute Luftfeuchte und Innentemperatur) aller vier Testräume im Seiyun-Palast während der stündlichen Messungen im Januar 2004 dar. Die Abb. A-4-20 stellt die stündlich gemessenen Oberflächentemperaturen der umgebenden Flächen in den Testräumen dar.

Die Messergebnisse sind in den Tab. A-4-5 bis Tab. A-4-8 zusammengefasst.

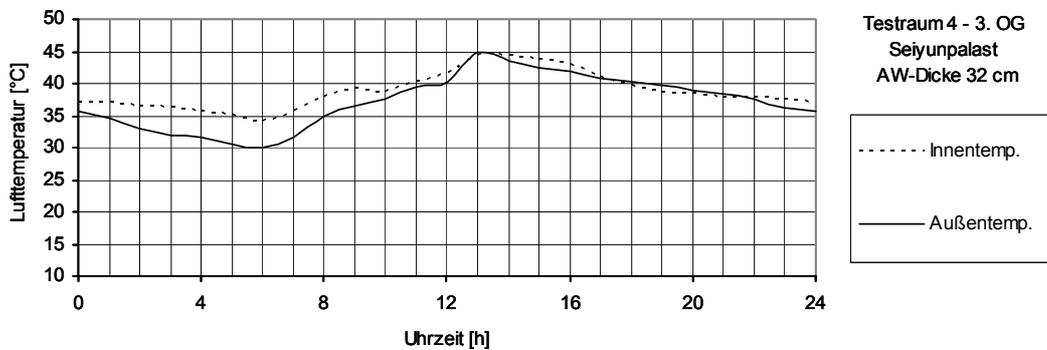
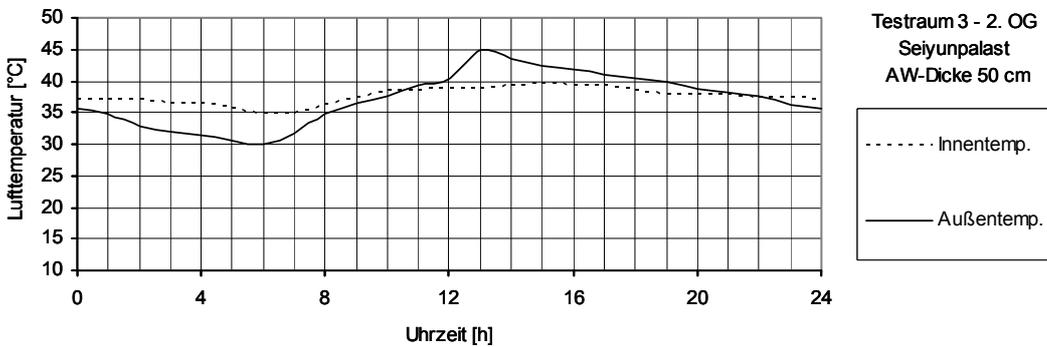
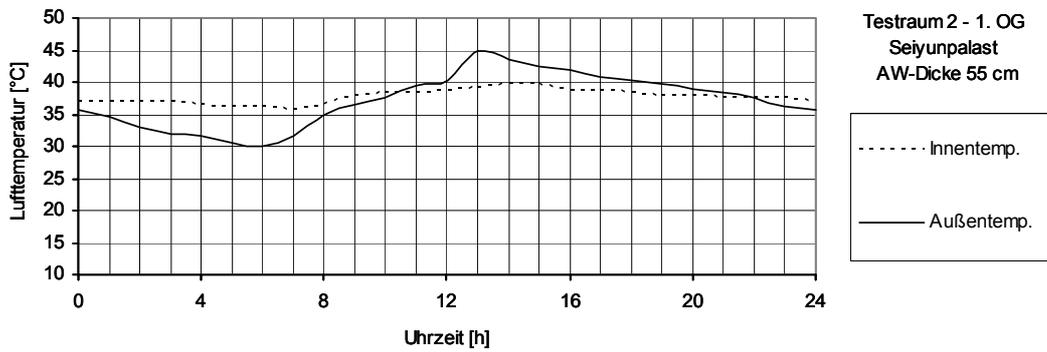
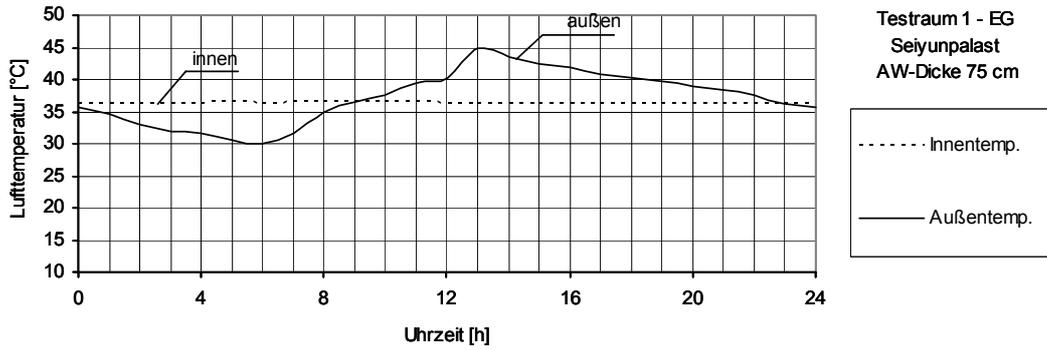
#### **4.6.7 Vergleichsbewertung des Temperaturverlaufs innen und außen bei Testräumen**

Im Folgenden werden die in den Testräumen gemessenen Temperaturen mit den Außenwerten verglichen, um das thermische Verhalten des Innenklimas gegenüber dem Außenklima beschreiben zu können und den Einfluss der Veränderung der Außenwanddicke dabei zu erfassen.

##### **Sommermessungen:**

Aus der Abb. 4.6-7 sowie Tab. A-4-1 bis Tab. A-4-4 ist Folgendes anzumerken:

- Im Testraum 1 (Außenwanddicke=75 cm) ist die Wirkung des Wärmespeichereffektes der Wände anzumerken. Die Innentemperatur blieb fast konstant bei ca. 36°C und schwankte um weniger als 0,5°C, obwohl die Außentemperatur vom minimalen Wert bei 30°C um 6:00 Uhr am Morgen bis zum maximalen Wert bei 45°C um 13:00 Uhr am Nachmittag schwankte.
- Bei der Verringerung der Außenwanddicke um 20 cm bei dem Testraum 2 war der Maximalwert der Innenlufttemperatur um ca. 3 K höher als im Testraum 1.



**Abb. 4.6-7 Vergleich Innen- und Außentemperatur in den Testräumen 1, 2, 3 und 4 im Seiyun-Palast an einem Sommertag, Juli 2003**

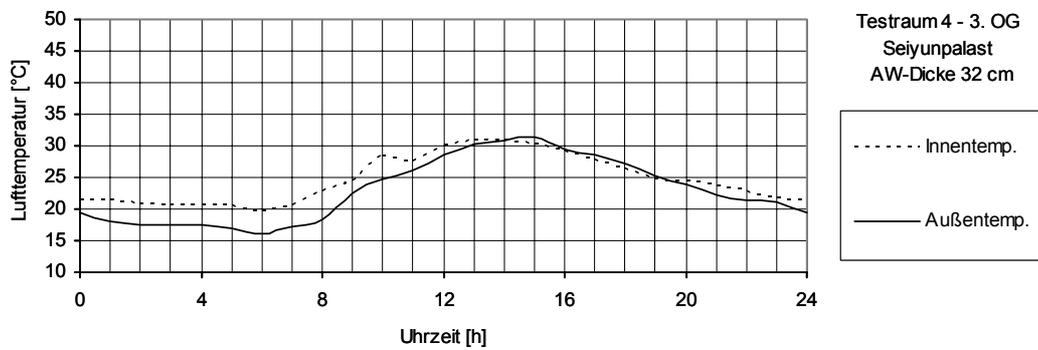
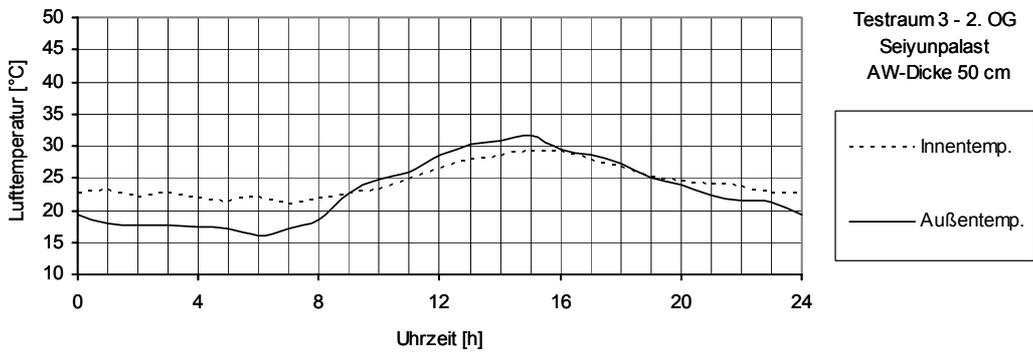
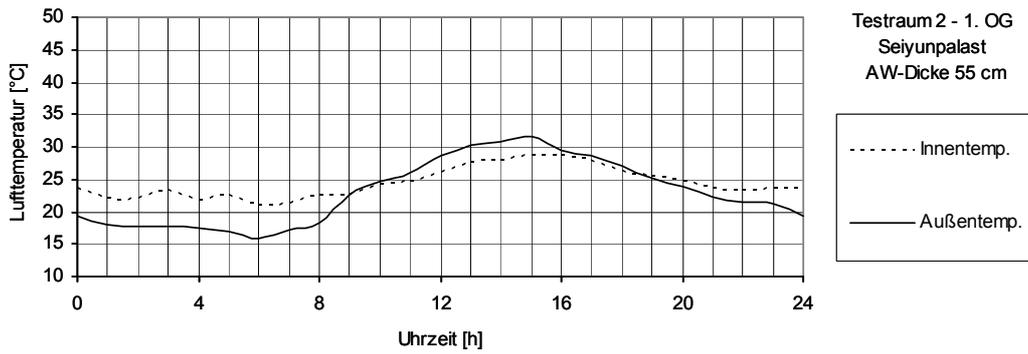
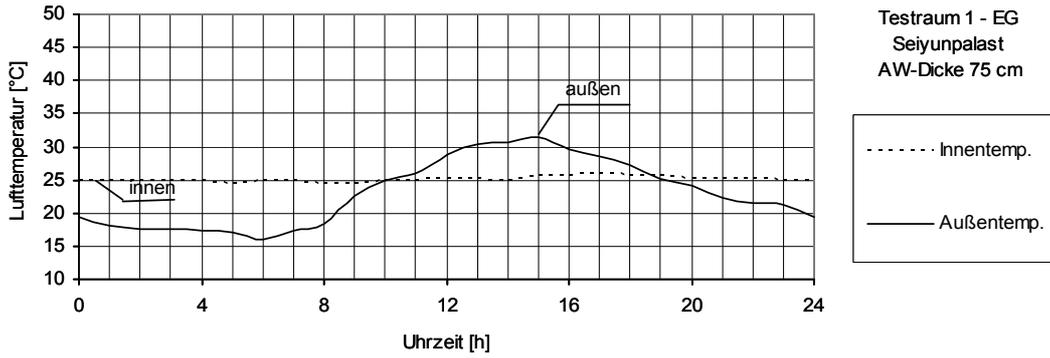
Der gleiche Effekt trat auch bei dem Testraum 3 auf, der eine Außenwanddicke von 50 cm hat.

- Interessanter ist es noch bei dem Testraum 4, dessen Außenwanddicke 32 cm beträgt. Die Innentemperaturen waren in diesem Testraum meistens höher als die Außentemperaturen. Der Maximalwert der Innentemperatur betrug  $44,40^{\circ}\text{C}$  um 13:00 Uhr bzw. 14:00 Uhr, der Minimalwert hatte einen Wert von  $34,01^{\circ}\text{C}$  um 6:00 Uhr. Der Grund dafür liegt an dem niedrigeren Wärmespeichervermögen der Außenwände im Testraum 4 im Vergleich zu den Testräumen 1, 2, 3.

### **Wintermessungen:**

Aus der Abb. 4.6-8 sowie Tab. A-4-5 bis Tab. A-4-8 ist Folgendes anzumerken:

- Im Testraum 1 blieb die Innenlufttemperatur fast konstant. Der Maximalwert der Innentemperatur betrug  $25,95^{\circ}\text{C}$  um 17:00 Uhr, wobei der Minimalwert  $24,40^{\circ}\text{C}$  um 8:00 Uhr bzw. 9:00 Uhr betrug, obwohl die Außentemperatur einen maximalen Wert von  $31,52^{\circ}\text{C}$  um 15:00 Uhr und einen minimalen Wert von  $16^{\circ}\text{C}$  um 6:00 Uhr erreichte.
- Im Testraum 2 (Außenwanddicke=55 cm) erreichte die Innentemperatur einen Maximalwert von  $28,70^{\circ}\text{C}$  um 15:00 Uhr bzw. 16:00 Uhr, 3 K höher als der Maximalwert der Innentemperatur im Testraum 1.
- Im Testraum 3 (Außenwanddicke=50 cm) erreichte der Maximalwert der Innentemperatur einen Wert von  $29,10^{\circ}\text{C}$  um 15:00 Uhr bzw. 16:00 Uhr. Der Minimalwert der Innentemperatur betrug  $20,95^{\circ}\text{C}$  um 7:00 Uhr, ca. 4 K höher als im Testraum 1.
- Im Testraum 4 (Außenwanddicke=32 cm) ist die Wirkung des niedrigeren Wärmespeichervermögens der Außenwände deutlich geworden. Dabei erreichten die Innentemperaturen höhere Werte als die Außenlufttemperaturwerte bzw. annähernd gleiche. Der Maximalwert der Innenlufttemperatur betrug  $30,71^{\circ}\text{C}$  um 13:00 Uhr bzw. 14:00 Uhr, der Minimalwert erreichte einen Wert von  $19,81^{\circ}\text{C}$  um 6:00 Uhr.



**Abb. 4.6-8 Vergleich Innen- und Außentemperatur in den Testräumen 1, 2, 3 und 4 im Seiyun-Palast an einem Wintertag, Januar 2004**

#### **4.6.8 Vergleichsbewertung des Feuchteverlaufs innerhalb und außerhalb der Testräume**

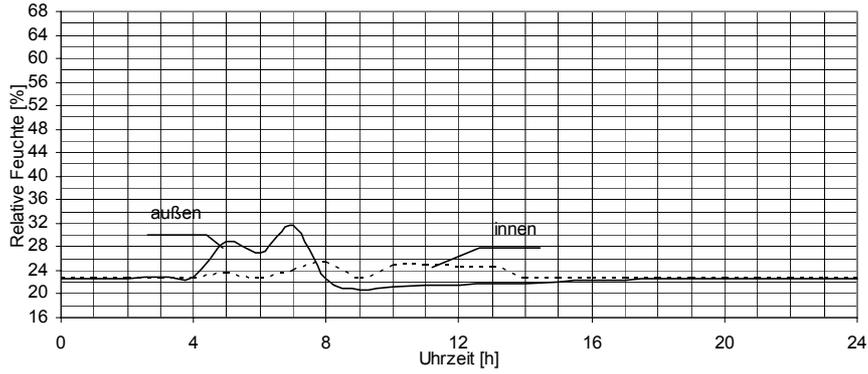
Im Folgenden werden die in den Testräumen gemessenen Luftfeuchten mit den gemessenen Außenluftfeuchten verglichen, um das hygrische Verhalten des Innenklimas gegenüber dem Außenklima beschreiben zu können.

Anhand des Feuchteverlaufs in den Abb. 4.6-9 und Abb. 4.6-10 sowie aus der Tab. A-4-1 bis Tab. A-4-8 ist Folgendes anzumerken:

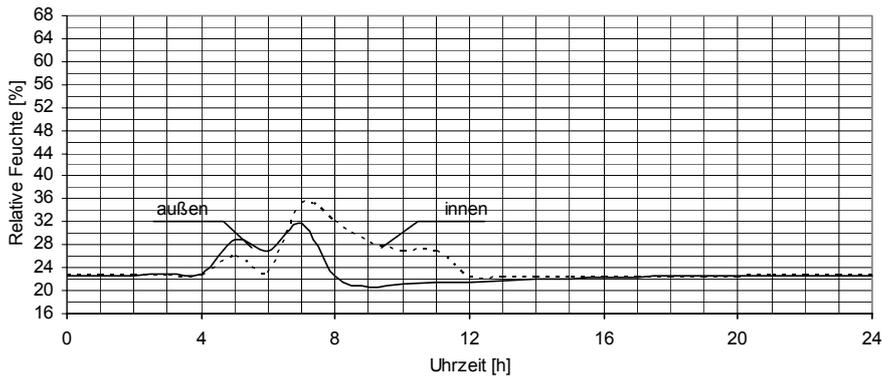
- Sowohl in den Sommermessungen als auch in den Wintermessungen sind die Luftfeuchten außen niedriger am Tag als in der Nacht.
- Das Klima ist deutlich trockener in der Sommerperiode als in der Winterperiode, vgl. Abb. 4.6-2. Während die maximale gemessene Außenluftfeuchte während der Sommermessungen 31,80% um 7:00 Uhr betrug, erreichte sie einen Wert von 68,10% um 6:00 Uhr während der Wintermessungen. Die minimale gemessene Außenluftfeuchte während der Wintermessungen betrug 27,40% um 13:00 Uhr, wobei sie nur noch 20,60% um 9:00 Uhr erreichte während der Sommermessungen.
- Sowohl während der Wintermessungen als auch während der Sommermessungen war der Feuchteverlauf ähnlich in den Testräumen 2,3 und 4, deren Wände mit ca. 1,5 cm dickem Kalkputz von innen und von außen versehen sind.
- Die innere Luftfeuchte war deutlich höher als die Außenluftfeuchte in den Öffnungszeiten von 7:00 Uhr bis 16:00 Uhr. Dieses Phänomen ist sowohl während der Sommermessungen als auch während der Wintermessungen aufgetreten.
- Interessant ist dabei die feuchteregulierende Wirkung der mit Lehmputzen versehenen Lehmwände im Erdgeschoss. Dort ist die Innenfeuchteschwankung deutlich geringer als in allen anderen drei Testräumen, deren Wände mit Kalkputzen von innen und von außen versehen waren.

#### **Daraus kann Folgendes abgeleitet werden:**

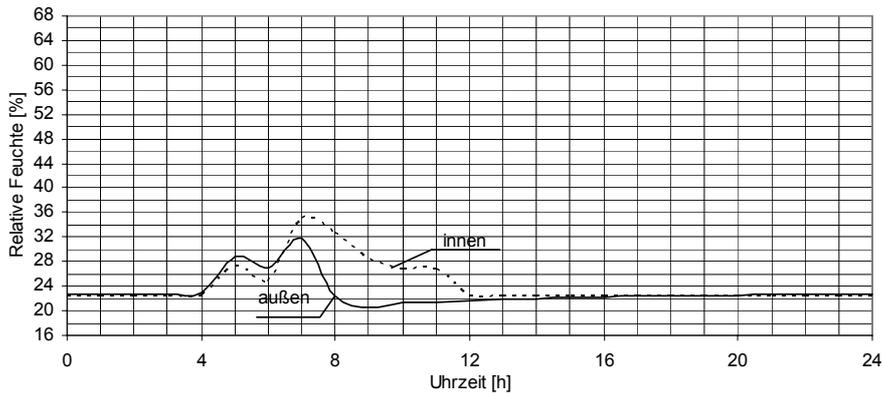
- Trotz der herrschenden klimatischen Bedingungen im Wadi-Hadhramaut (warmes trockenes Klima) ist die Wirkung der Lehmputze und der Lehmwände bei der Feuchteregulierung deutlich.



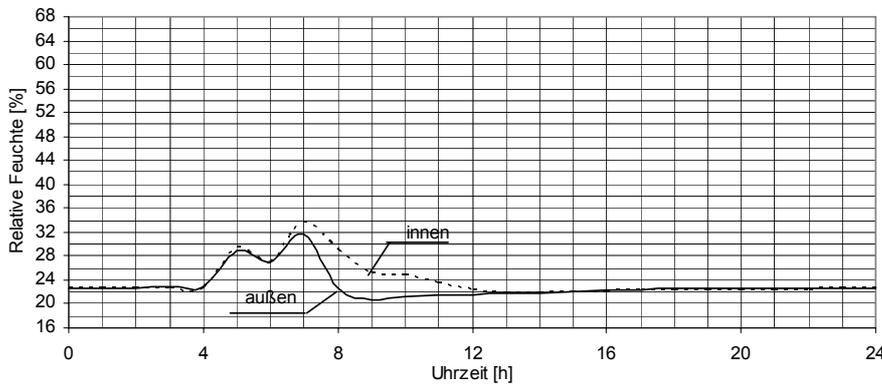
Testraum 1 - EG  
Seiyunpalast  
AW-Dicke 75 cm



Testraum 2 - 1.OG  
Seiyunpalast  
AW-Dicke 55 cm

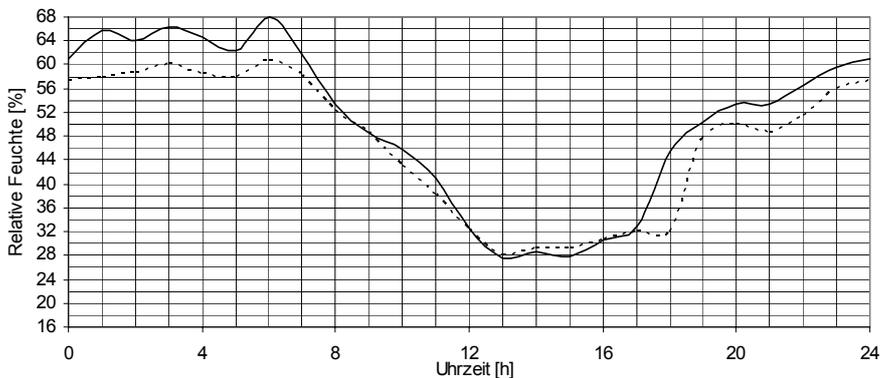
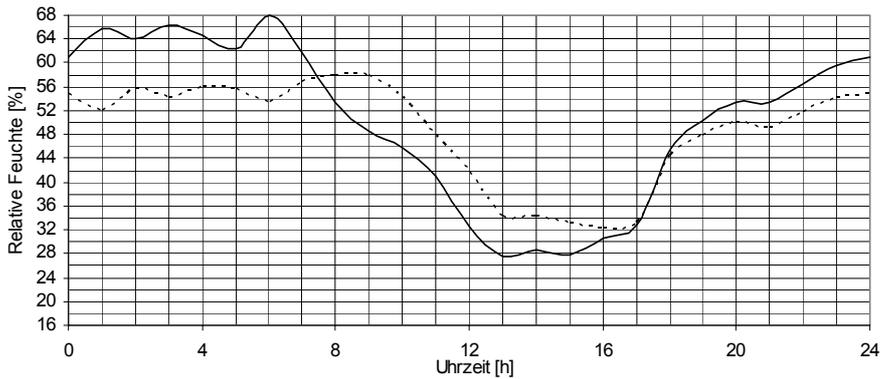
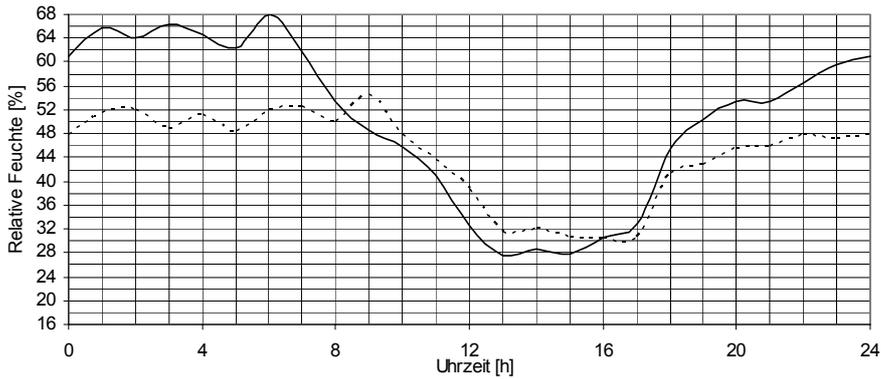
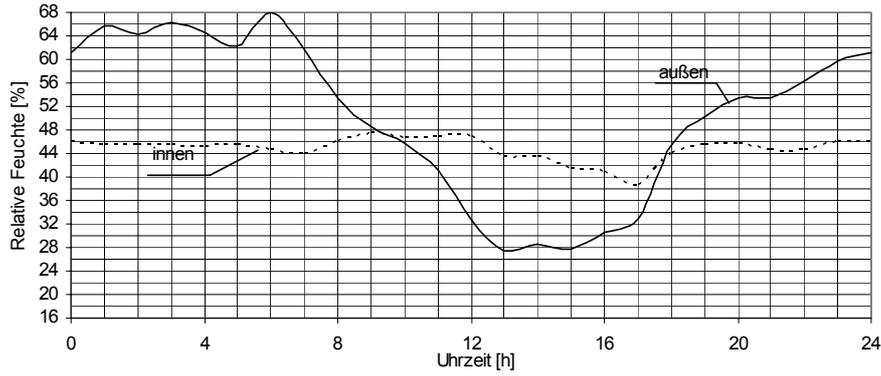


Testraum 3 - 2.OG  
Seiyunpalast  
AW-Dicke 50 cm



Testraum 4 - 3.OG  
Seiyunpalast  
AW-Dicke 32 cm

**Abb. 4.6-9 Vergleich der inneren und äußeren relativen Luftfeuchtigkeit in den Testräumen 1, 2, 3 und 4 im Seiyun-Palast an einem Sommertag, Juli 2003**



**Abb. 4.6-10 Vergleich der inneren und äußeren relativen Luftfeuchtigkeit in den Testräumen 1, 2, 3 und 4 im Seiyun-Palast an einem Wintertag, Januar 2004**

- Bei der Entwicklung von modernen Lehmbauweisen sollte darauf geachtet werden, dass ausreichende Flächen von Lehmwänden und Lehmputzen die Innenräume umschließen, insbesondere die Feuchträume wie Küchen und Bäder, um die feuchteregulierende Wirkung des Baustoffes Lehm auszunutzen.
- Bei dieser Untersuchung ist deutlich geworden, dass die traditionellen Kalkputze die feuchteregulierende Wirkung der geputzten Lehmwände verringern (im Vergleich zu den Lehmputzen).

#### **4.6.9 Bewertung der thermischen Behaglichkeit in den Testräumen**

Thermische Behaglichkeit wird definiert als das Gefühl, das Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima ausdrückt, vgl. DIN EN ISO 7730 [46]. Ein Modell für die Stadt Seiyun (Untersuchungsgebiet) wurde bis jetzt nicht entwickelt.

##### **Modelle für thermische Behaglichkeit:**

Es wurden mehrere Modelle, die die thermische Behaglichkeit beschreiben, entwickelt. Man kann sie in zwei Kategorien zusammenfassen:

- a) Das thermische Gleichgewichtsmodell.
- b) Das adaptive Modell

##### **4.6.9.1 Bewertung der thermischen Behaglichkeit in den Testräumen nach dem Gleichgewichtsmodell**

Dieses Modell geht davon aus, dass das menschliche Wärmeempfinden im Wesentlichen vom thermischen Gleichgewicht (Wärmebilanz) des Körpers als Ganzem abhängt. Dieses Gleichgewicht wird durch körperliche Tätigkeit und Bekleidung sowie durch die Parameter des Umgebungsklimas, das sind Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte, beeinflusst.

Fanger analysierte 1970 [51] die Einflussfaktoren der thermischen Behaglichkeit des menschlichen Körpers und bekam dafür die so genannte „heat balance equation“:

$$H - E_{\text{diff}} - E_{\text{rl}} - E_{\text{rs}} - E_{\text{sw}} = R + C$$

Hierin bedeuten:

- **H** : die innere Wärmeproduktion des Körpers,
- **E<sub>diff</sub>** : die latente Wärmeabgabe infolge Dampfdiffusion durch die Haut,
- **E<sub>rl</sub>** : die latenten Wärmeverluste infolge Atmung,
- **E<sub>rs</sub>** : die trockenen Wärmeverluste infolge Atmung,
- **E<sub>sw</sub>** : die Wärmeverluste durch Schweißverdunstung,
- **R** : die relativen Wärmeverluste durch die externe Kleidungsoberfläche,
- **C** : die konvektiven Wärmeverluste durch die externe Kleidungsoberfläche.

Das Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger, s. Abb. 4.6-11 bis Abb. 4.6-18, berücksichtigt folgende Faktoren:

- Trockentemperatur,
- Feuchttemperatur,
- Relative Luftfeuchte,
- Die erforderliche Luftgeschwindigkeit, um ein behagliches Raumklima zu schaffen,
- Art der Bekleidung (unbekleidet, leichte Bekleidung, warme Bekleidung),
- Aktivitätsgrad (ruhend, mittelschwer, schwer).

Fanger meint, dass dieses Diagramm auf tropische Gebiete anwendbar ist. Er schreibt in [51] „Comparison between results from field studies in the tropics and the comfort equation suggests that the equation can also be used under these conditions. No seasonal variation in comfort conditions seems to exist”.

Nach dem Fangerdiagramm muss bei einer bestimmten Tätigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt eine bestimmte Raumlufttemperatur bei der im Raum vorhandenen relativen Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit vorhanden sein, um sich zu diesem Zeitpunkt behaglich zu fühlen.

Die Abhängigkeit der Wärmedämmung von der Bekleidungsart wurde nach DIN EN ISO 7730 [46] ermittelt mit und 0,5 clo angenommen. Die traditionelle Bekleidungsart in Seiyun ist bei Männern ein leichtes, knielanges Wickeltuch für den Unterkörper und ein leichtes Oberhemd mit kurzen Ärmeln, oft auch eine Kopfbedeckung (Mütze mit Löchern oder leichtes Tuch). Die Frauen tragen leichte lange Kleider mit einer langen leichten Unterhose und eine leichte Kopfbedeckung.

#### **4.6.9.1.1 Bewertung der thermischen Behaglichkeit von den Testräumen nach dem Gleichgewichtsmodell während der Sommermessungen**

In den Abb. 4.6-11 bis 4.6-14 wurden die Messwerte, die im Juli 2003 in den Testräumen 1 bis 4 gemessen wurden, auf dem Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger eingetragen. Ohne Ausnahme lagen alle eingetragenen Messpunkte auf dem Behaglichkeits-Diagramm für alle vier Testräume außerhalb des Behaglichkeitsbereiches. Die gemessenen Innenlufttemperaturen in den Testräumen sind sehr hoch und stellen den Hauptgrund für die Unbehaglichkeit in den vier Testräumen dar, vgl. Abschnitt 4.6-7.

Wie die Luftgeschwindigkeitsmessungen in den Testräumen 1 bis 4 gezeigt haben, ist in keinem Testraum eine höhere Strömungsgeschwindigkeit als 1,1 m/s erreicht worden. Meistens lagen die Messwerte zwischen 0,15 m/s bis 0,4 m/s. Die Diagramme brechen die Variation des Geschwindigkeitsparameters bei 1,5 m/s ab, weil eine höhere Luftgeschwindigkeit wegen der dann auftretenden Zugbelastung nicht wünschenswert wäre. Die Messwerte lagen in allen Testräumen zu allen Zeitpunkten weit unterhalb dieses Grenzwertes.

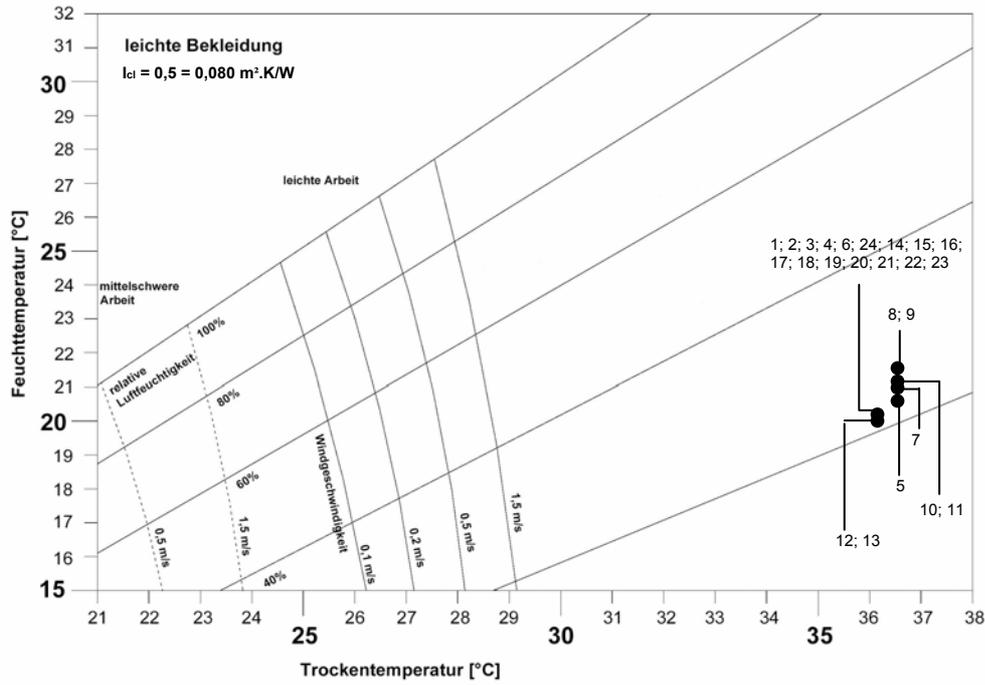
Die relative Feuchtigkeit ist niedrig in allen vier Testräumen. In keinem Testraum wurde eine relative Feuchte höher als 35,2% erreicht. In den meisten Zeiten lagen die Messwerte der relativen Feuchte zwischen 22% und 25%, vgl. Abschnitt 4.6-8.

#### **4.6.9.1.2 Bewertung der thermischen Behaglichkeit von den Testräumen nach dem Gleichgewichtsmodell während der Wintermessungen**

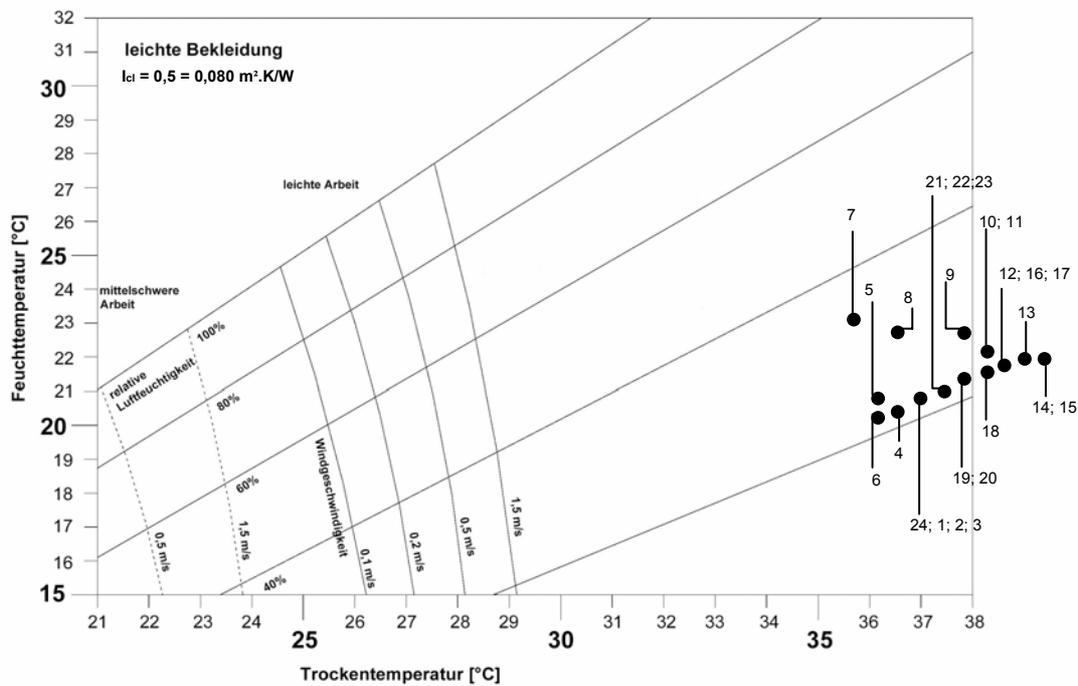
In den Abb. 4.6-15 bis 4.6-18 wurden die Messwerte, die im Januar 04 in den Testräumen 1 bis 4 gemessen wurden, auf dem Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger eingetragen. Trotz der Verbesserung der klimatischen Verhältnisse in der Winterperiode im Vergleich zu der Sommerperiode sind die eingetragenen Messwerte von 13:00 Uhr bis 16:00 Uhr im Testraum 4 (Außenwanddicke=32 cm) außerhalb des Behaglichkeitsbereiches.

Im Testraum 1 (Außenwanddicke=75 cm) lagen alle eingetragenen Messwerte dicht am Behaglichkeitsbereich.

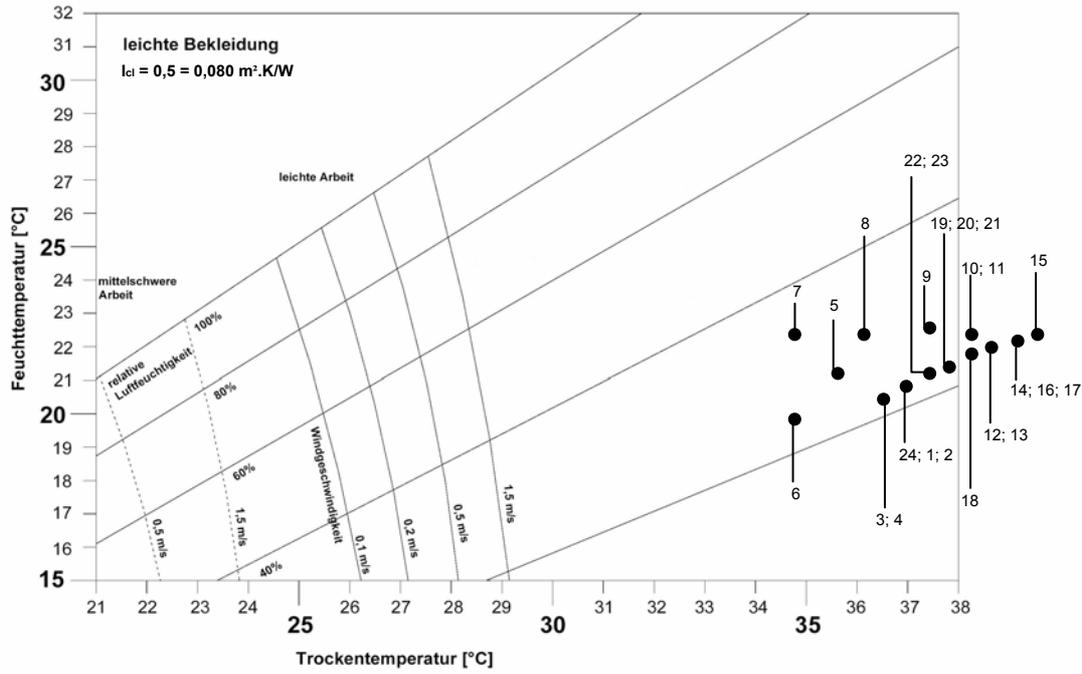
In den Testräumen 2 (Außenwanddicke=55 cm) und Testraum 3 (Außenwanddicke=50 cm) lagen fast alle Messwerte innerhalb des Behaglichkeitsbereiches mit Ausnahme von den Messwerten um 15:00 Uhr und 16:00 Uhr im Testraum 3, die außerhalb des Behaglichkeitsbereiches lagen.



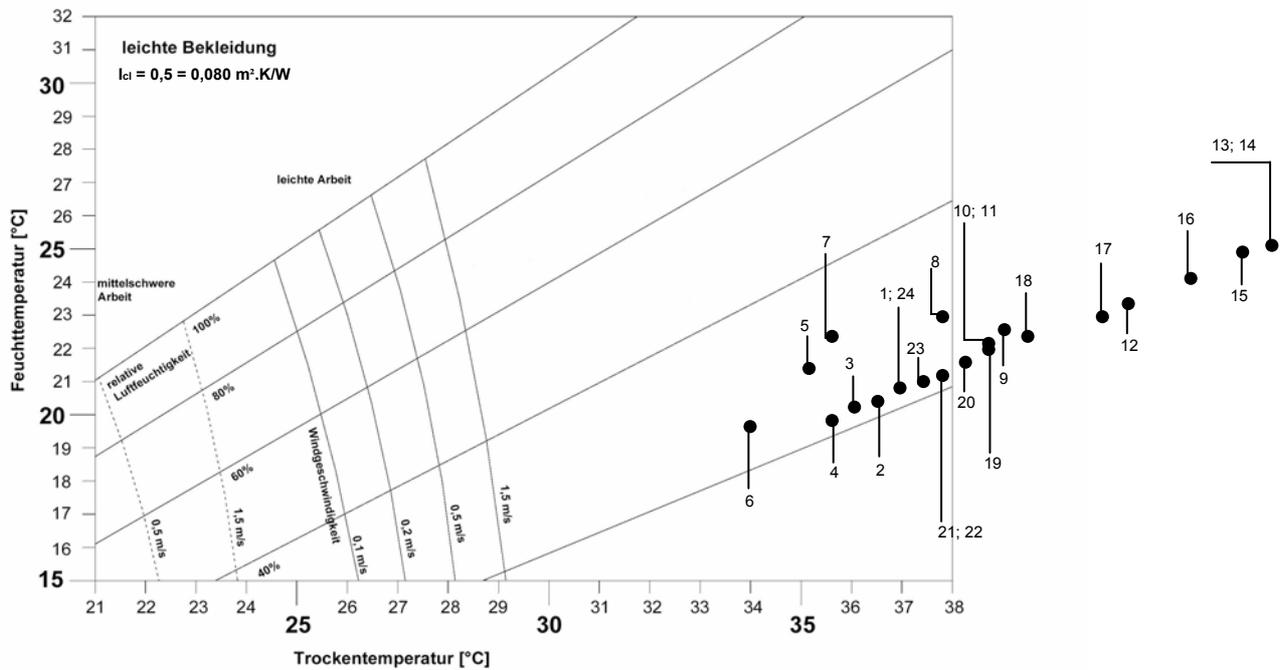
**Abb. 4.6-11 Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 1 im Erdgeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Sommermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 75 cm.**



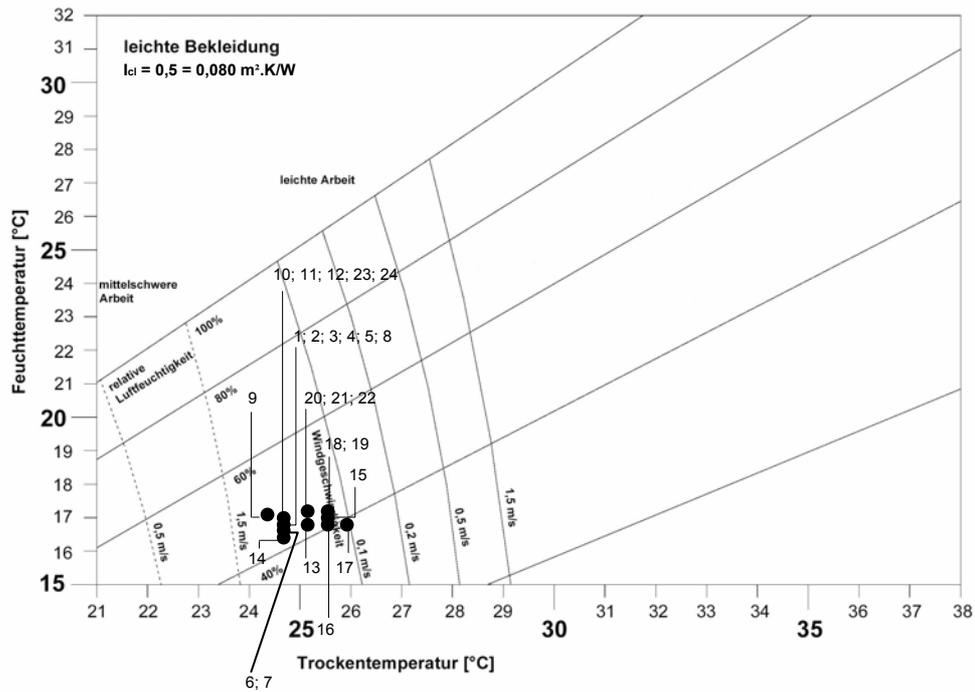
**Abb. 4.6-12 Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 2 im 1. Obergeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Sommermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 55 cm.**



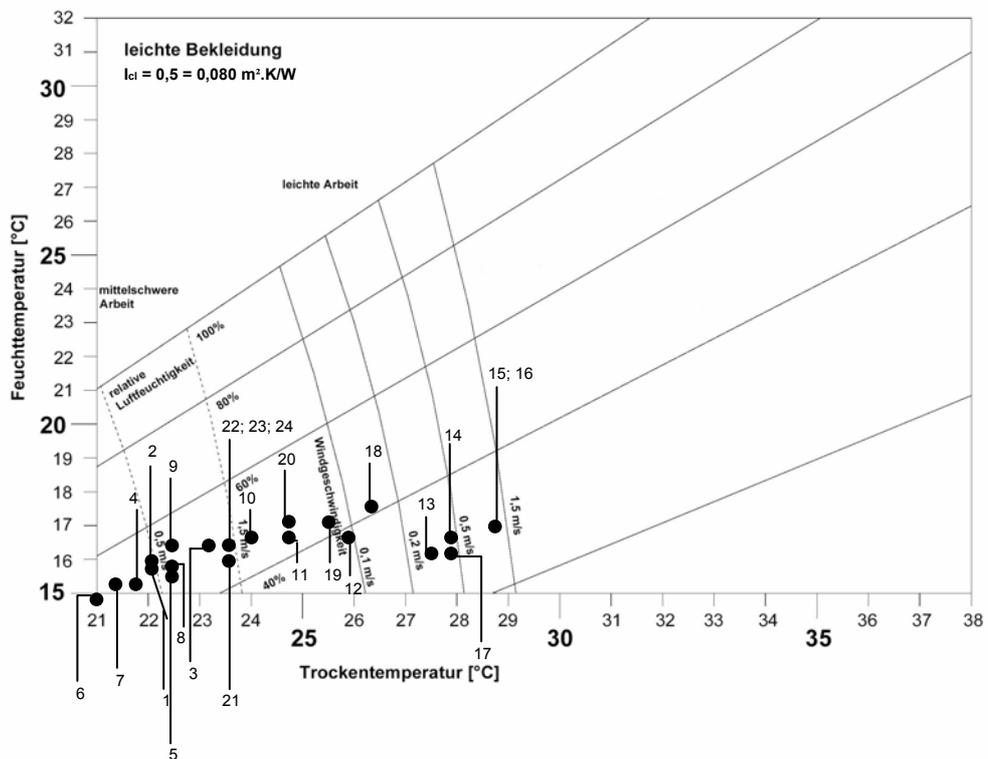
**Abb. 4.6-13 Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 3 im 2. Obergeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Sommermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 50 cm.**



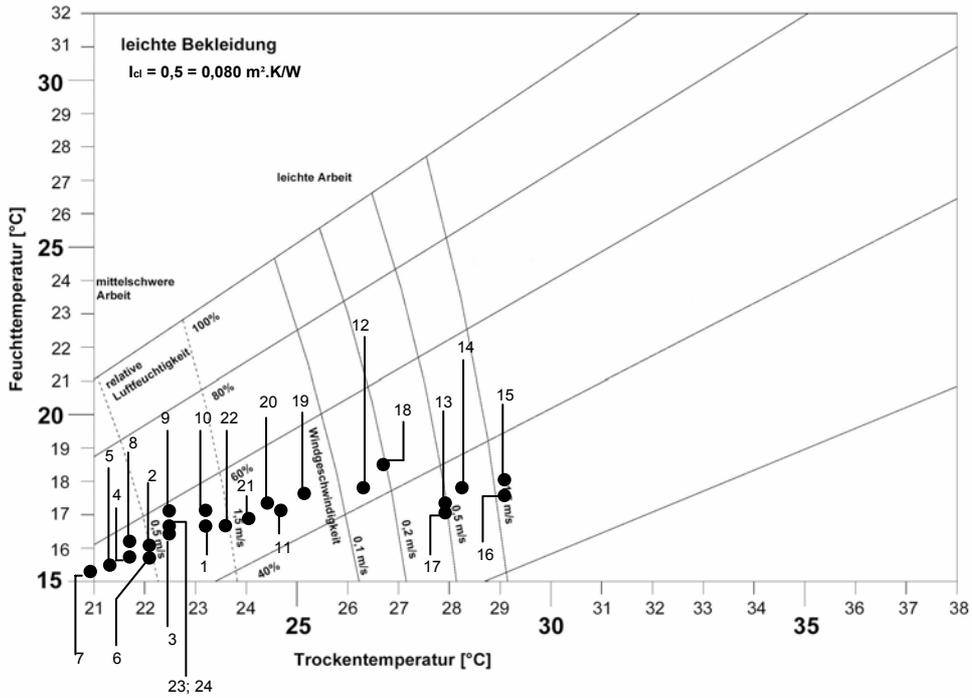
**Abb. 4.6-14 Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 4 im 3. Obergeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Sommermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 32 cm**



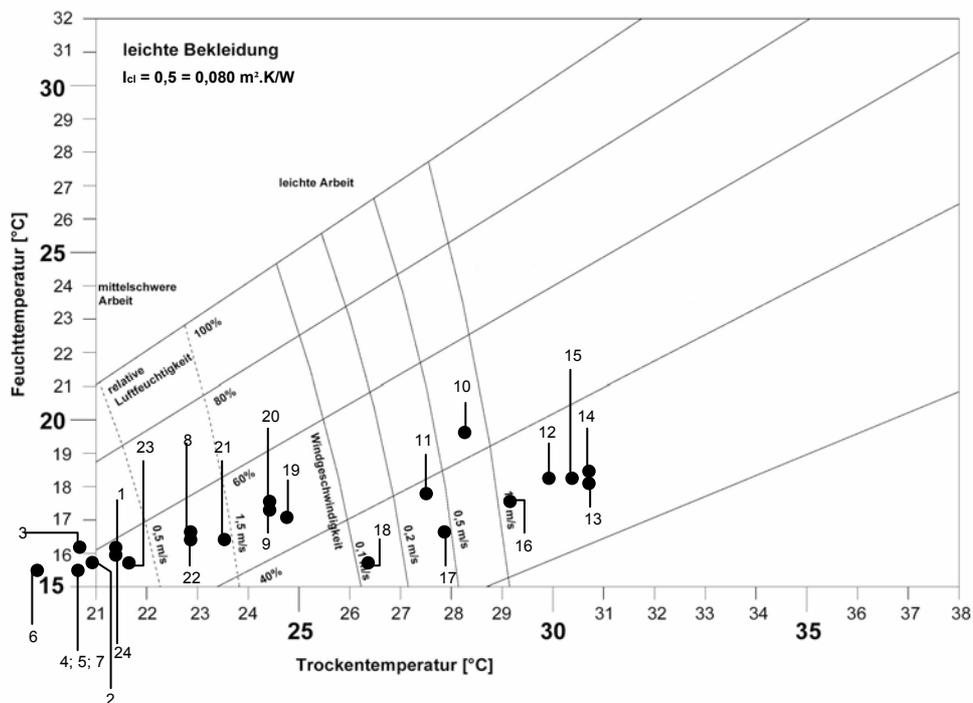
**Abb. 4.6-15 Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 1 im Erdgeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Wintermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 75 cm.**



**Abb. 4.6-16 Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 2 im 1. Obergeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Wintermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 55 cm.**



**Abb. 4.6-17 Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 3 im 2. Obergeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Wintermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 50 cm.**



**Abb. 4.6-18 Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 4 im 3. Obergeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Wintermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 32 cm**

Daher zeigt sich die positive Wirkung des Wärmespeichervermögens der Außenwände durch die Dämpfung der Temperaturamplitude besonders beim Testraum 1.

Die Luftgeschwindigkeitsmessungen in den Testräumen haben gezeigt, dass in keinem Testraum eine Strömungsgeschwindigkeit höher als 1,37 m/s erreicht wurde. Meistens lagen die Messwerte zwischen 0,2 m/s und 0,6 m/s.

Die Schwankungen der gemessenen relativen Feuchtigkeit sind in der Winterperiode größer als in der Sommerperiode.

In den Testräumen 2, 3 und 4 ist der Tagesverlauf der relativen Feuchtigkeit ähnlich, vgl. Abschnitt 4.6-8. Dabei waren die gemessenen relativen Feuchten während der Nachtstunden relativ höher als die relativen Feuchten während des Tages. In den meisten Zeiten in der Nacht lagen die Messwerte zwischen 44% und 60%. Im Laufe des Tages, und besonders während der Nachmittagsstunden zwischen 13:00 Uhr bis 17:00 Uhr, haben die relativen Feuchten die niedrigsten Werte erreicht. Sie lagen meistens zwischen 28% bis 34%. Die regulierende Wirkung der mit Lehmputzen versehenen Lehmwände wird deutlich im Testraum 1. Dort schwankte die relative Feuchte deutlich weniger als in allen drei anderen Testräumen. Meistens lag die relative Feuchte zwischen 44% und 48%.

#### **4.6.9.2 Bewertung der thermischen Behaglichkeit von den Testräumen nach dem adaptiven Modell**

Anders als bei dem thermischen Gleichgewichtsverfahren nach Fanger [51] wurde bei dieser Methode bewiesen, dass ein gewisser Anpassungsprozess der Menschen mit dem herrschenden Klima stattfindet. Humphreys und Nicol [66, 101] sind der Auffassung, dass der Mensch andauernd versucht, einen Zustand thermischer Behaglichkeit zu erreichen, in dem er zum Teil bewusst, zum Teil unbewusst seine Umwelt (Fenster öffnen oder schließen, Verschattung, usw.) oder sich selbst (Bekleidung, Tätigkeitsgrad, Position im Raum, usw.) ändert oder zu ändern versucht. Das heißt, der Mensch passt sich oder die Umgebung an die geänderten Bedingungen seines klimatischen Umfeldes an.

Im Gegensatz zu der Untersuchungsmethode von Fanger, bei der die Testpersonen im Inneren einer Klimakammer bestimmten atmosphärischen Bedingungen ausgesetzt werden, wird das Raumklima nach Adaptionmethode an verschiedenen Stellen im Raum ohne die jeweils vorgefundenen Klimabedingungen abzuändern, gemessen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen von Humphreys und Nicol können in zwei Thesen zusammengefasst:

- Die Komforttemperatur kann aus der mittleren Temperatur während des Beobachtungszeitraums abgeschätzt werden, vgl. Abb. 4.6-19a.
- Sie hängt außerdem von Monatsmittelwerten der Außentemperatur ab, und zwar in unterschiedlicher Art für klimatisierte und nicht klimatisierte Bauten, vgl. Abb. 4.6-19b und [66].

Bei nicht klimatisierten Bauten:

$$T_c = 11,9 + 0,534 T_o \text{ [C}^\circ\text{]}$$

Gleichung 4-2

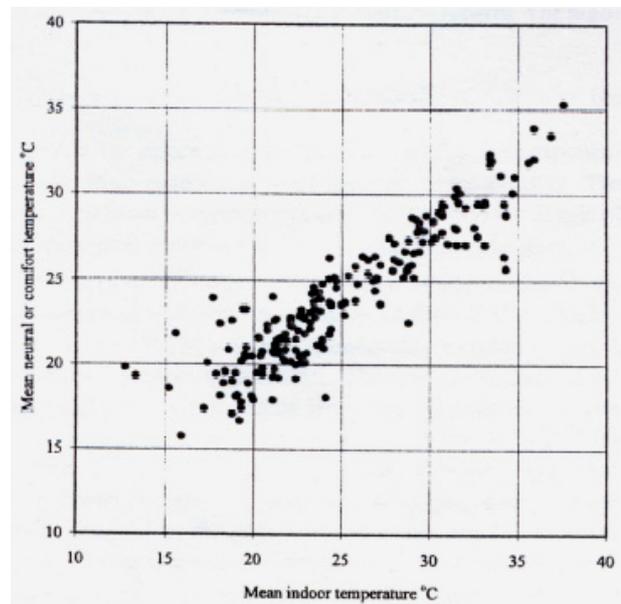
Wobei:  $T_c$  : Behaglichkeitstemperatur in [C°]

$T_o$  : Außenlufttemperatur in [C°]

Bei klimatisierten Bauten:

$$T_c = 23,9 + 0,295(T_o - 22) \exp \left( -\left[ \frac{T_o - 22}{24\sqrt{2}} \right]^2 \right) \text{ [C}^\circ\text{]}$$

Gleichung 4-3



**Abb. 4.6-19a Korrelation zwischen mittlerer Raumtemperatur und Komforttemperatur [66]**

Daher sind die Komfortbedingungen in den warmen Klimagebieten und in den warmen Jahreszeiten anders als in den gemäßigten Klimazonen bzw. in den kalten Jahreszeiten. Es wurden mehrere Felduntersuchungen in verschiedenen warmen Klimazonen durchgeführt. Es ergaben sich verschiedene Komforttemperaturen.

1962 wurde eine Untersuchung in Bagdad durchgeführt. Sie hat ergeben, dass die Komforttemperatur im Sommer  $32^{\circ}\text{C}$  ist [100].

In Bangkok, der Hauptstadt von Thailand, hat die Untersuchung ergeben, dass in den nicht klimatisierten Gebäuden die Komforttemperatur  $27,4^{\circ}\text{C}$  ET ist, und in den klimatisierten Bauten  $24^{\circ}\text{C}$  ET, vgl. [26, 27, 28].

Heidari führte eine Untersuchung in Ilam (Iran) durch, um die Behaglichkeitsparameter zu bestimmen. Dabei hat er festgestellt, dass die Komforttemperatur im Sommer  $28,1^{\circ}\text{C}$  und im Winter  $20,8^{\circ}\text{C}$  beträgt [58].

Bei der in einem warmtrockenen Klima in Nord-West Pakistan (ähnlich wie in Seiyun) im Juli 1993 und im Januar 1994 durchgeführten Untersuchung von Humphreys und Nicol [65, 66] wurde das adaptive Modell verwendet. Dabei fühlten sich 90% der befragten bei einer Innenlufttemperatur zwischen  $21,2$  und  $30,2$  behaglich [66].

Aus der Abb. 4.6-19b kann Folgendes abgeleitet werden:

Bei dieser Untersuchung betrug die höchste mittlere Außenlufttemperatur  $34^{\circ}\text{C}$ . Die entsprechende Innenkomforttemperatur betrug bei den nicht klimatisierten Bauten ca.  $30^{\circ}\text{C}$ .

Die mittlere Außenlufttemperatur in Seiyun beträgt ca.  $33,9^{\circ}\text{C}$  im kritischen Sommermonat Juli, vgl. Tab. 4.6-2. Nach der Gleichung 4-2 ist die entsprechende innere Komforttemperatur  $30^{\circ}\text{C}$ .

Deshalb wird in diesem Abschnitt die thermische Behaglichkeit in den Testräumen 1 bis 4 während der Sommermessungen und Wintermessungen nach dem Modell von Nicol und Humphreys bewertet.

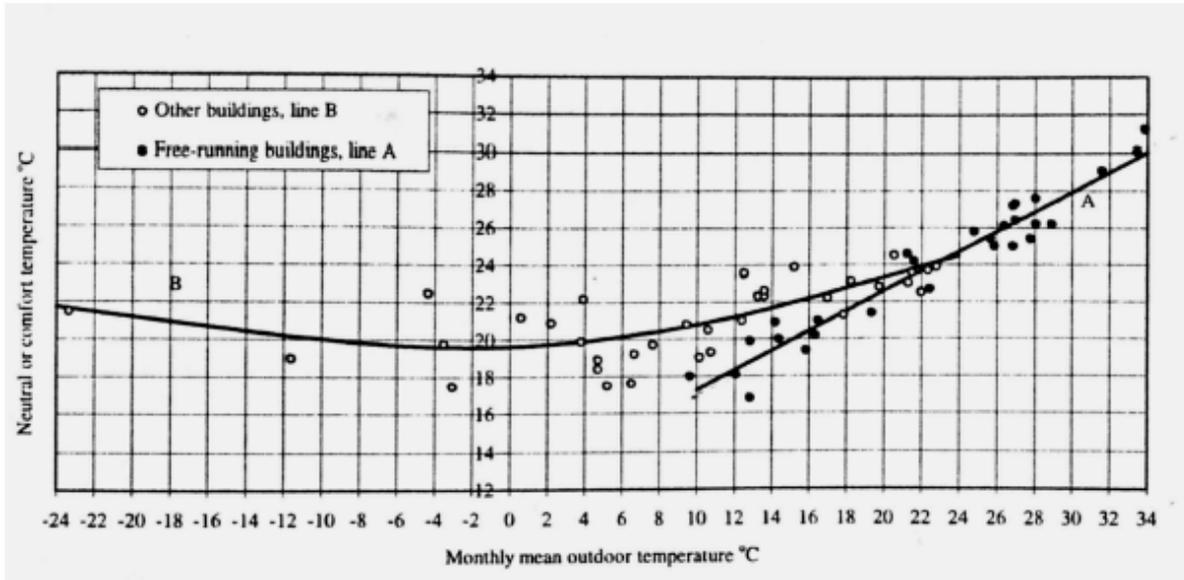


Abb. 4.6-19b Die Beziehung zwischen der monatlichen mittleren Außenlufttemperatur und der Komforttemperatur nach [66]

Monat	$T_o$ Max	$T_o$ Mean	$T_o$ Min	$T_c$ Max	$T_c$ Mean	$T_c$ Min
Januar	<b>29</b>	<b>19,5</b>	<b>10,2</b>	<b>27,386</b>	<b>22,313</b>	<b>17,3468</b>
Februar	31,1	22,3	13,1	28,5074	23,8082	18,8954
März	34,7	25,2	16,3	30,4298	25,3568	20,6042
April	36,9	27,6	18,4	31,6046	26,6384	21,7256
Mai	39,8	30	20,5	33,1532	27,92	22,847
Juni	41,9	32	22,6	34,2746	28,988	23,9684
Juli	<b>42,5</b>	<b>33,9</b>	<b>25,5</b>	<b>34,595</b>	<b>30,0026</b>	<b>25,517</b>
August	41,9	33,6	25,4	34,2746	29,8424	25,4636
September	39,7	30,4	21,2	33,0998	28,1336	23,2208
Oktober	35,7	25,7	15,9	30,9638	25,6238	20,3906
November	31,4	22	12,5	28,6676	23,648	18,575
Dezember	29,3	19,7	10,3	27,5462	22,4198	17,4002

Tab. 4.6-2 Maximale, minimale und mittlere Außenlufttemperatur sowie maximale, minimale und mittlere Komforttemperatur für die Stadt Seiyun, ermittelt vom Autor nach der Adaptionsgleichung 4-2

## **Sommermessungen**

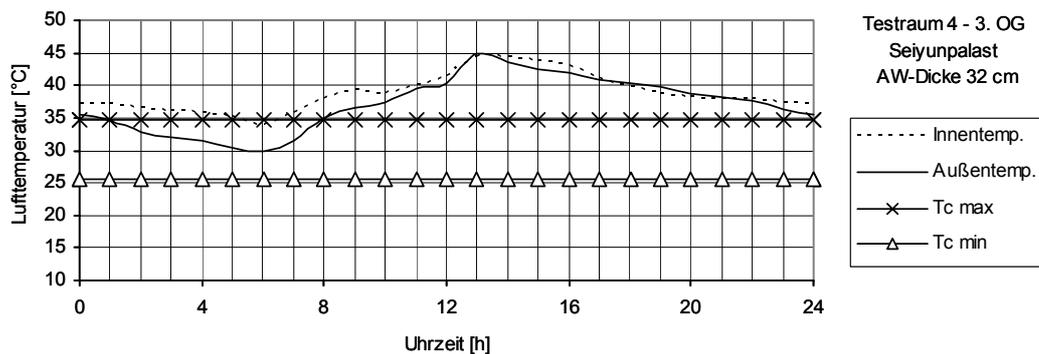
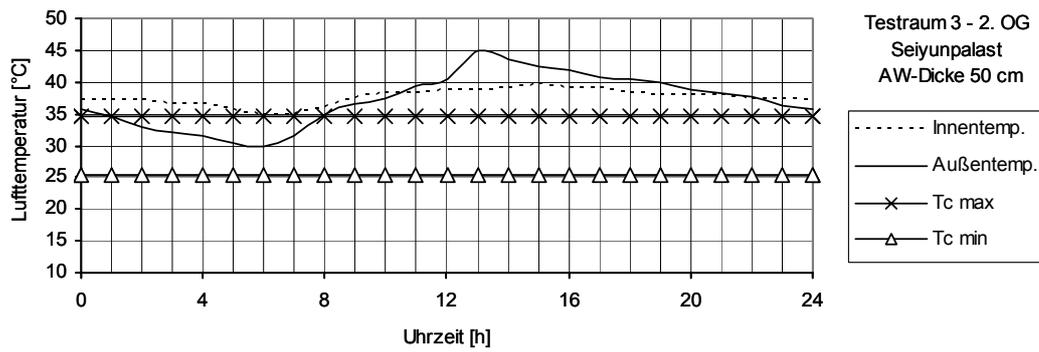
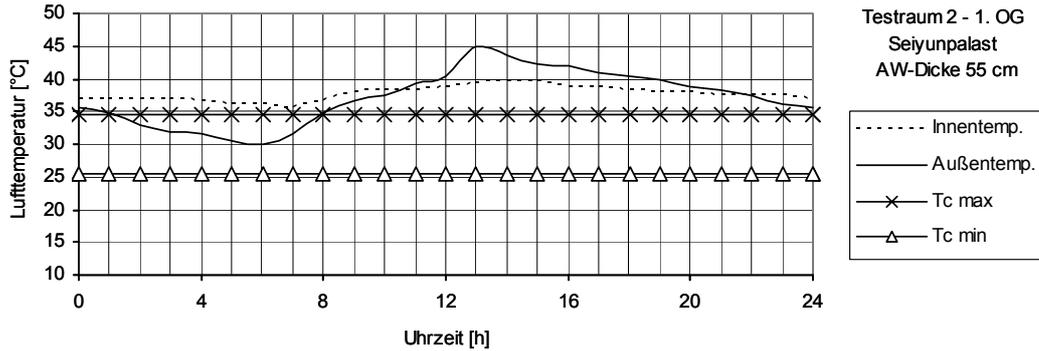
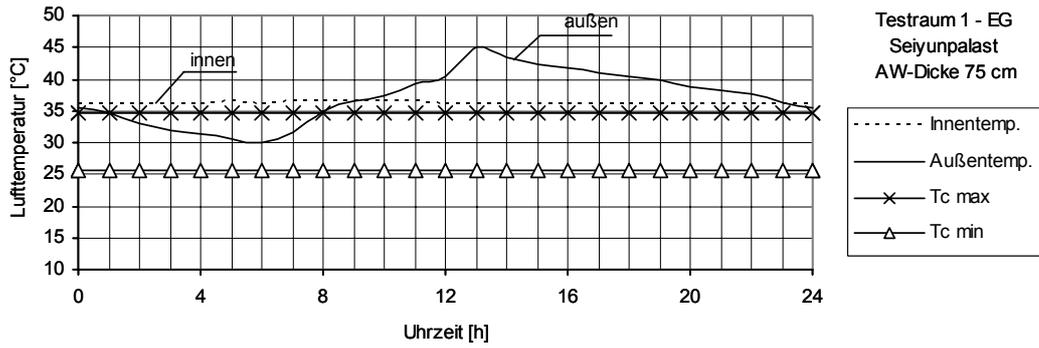
In der Abb. 4.6-20 wurden der Behaglichkeitsbereich (Maximal- und Minimalkomforttemperatur) sowie die Innenlufttemperatur und Außenlufttemperatur in den Testräumen während der klimatischen Messungen im Sommermonat Juli 2003, dargestellt.

Daraus kann Folgendes abgeleitet werden:

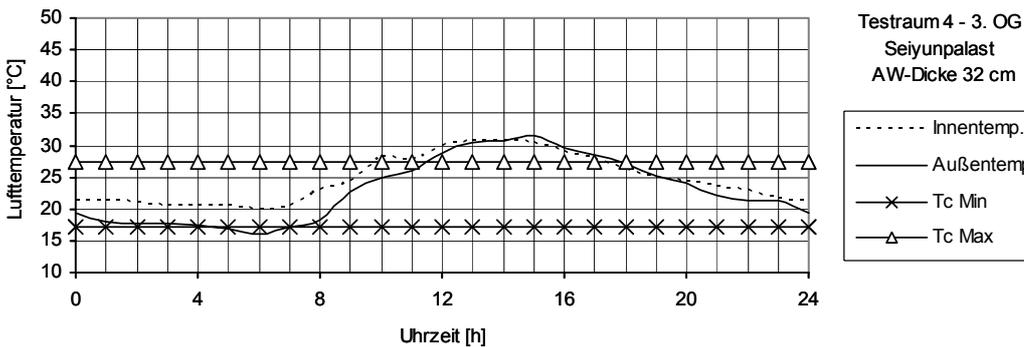
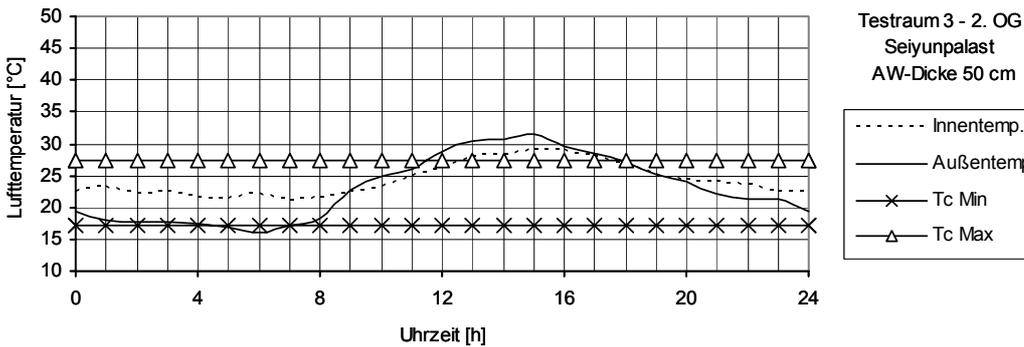
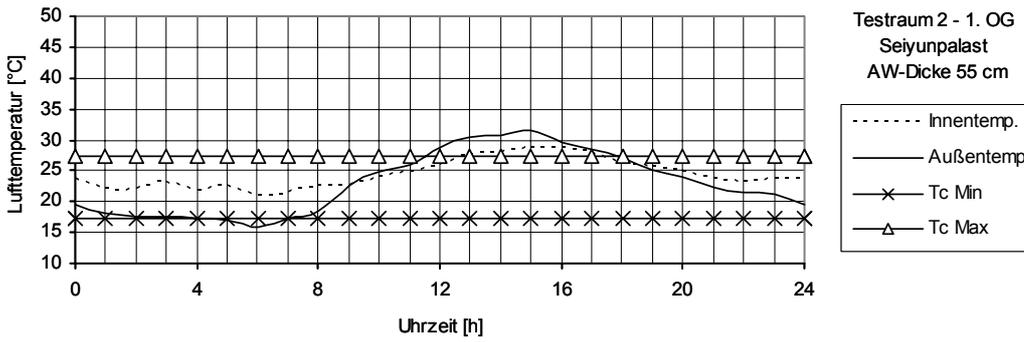
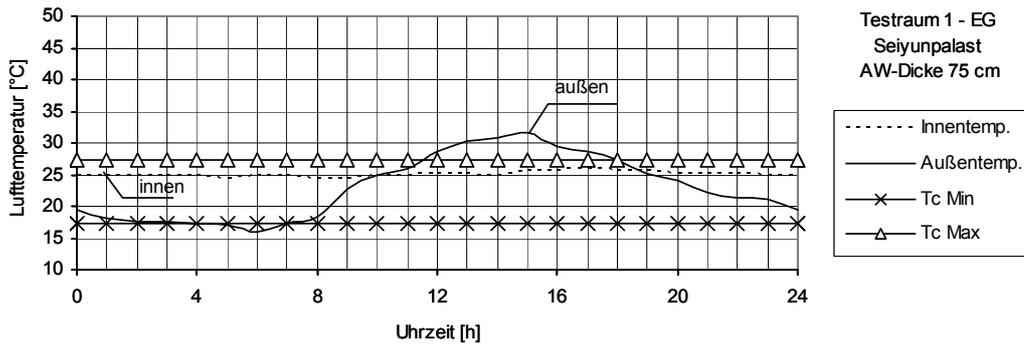
- In den meisten Zeiten lagen die Innenlufttemperaturen in den vier Testräumen außerhalb des Behaglichkeitsbereiches.
- Der Testraum 1 (Außenwanddicke 75 cm) zeigte besseres thermisches Verhalten als die Testräume 2, 3, 4. Im Testraum 1 blieb die Innentemperatur fast konstant bei ca. 36°C, nah an der maximalen Komforttemperatur 34,6°C (gutes Wärmespeichervermögen der Außenwände in diesem Testraum), vgl. Tab. 4.6-2 und Abschnitt 4.6.7.
- In den Testräumen 2 (Außenwanddicke=55 cm) und 3 (Außenwanddicke=50 cm) blieben die Innenlufttemperaturen außerhalb des Behaglichkeitsbereiches mit einer relativen Annäherung an die maximale Komforttemperatur während der Nachtstunden.
- Bei dem Testraum 4 (Außenwanddicke=32 cm) waren die gemessenen Innentemperaturen außerhalb des Behaglichkeitsbereiches mit Ausnahme im Zeitraum von 5:00 Uhr bis 7:00 Uhr, in dem die Innentemperatur innerhalb des Behaglichkeitsbereiches blieb. In den Nachtstunden verlief sie nah an der maximalen Komforttemperatur, und während des Tages verlief sie nah an der Außentemperatur.

## **Wintermessungen**

In der Abb. 4.6-21 wurden der Behaglichkeitsbereich (Maximal- und Minimalkomforttemperatur) sowie die Innenlufttemperatur und Außenlufttemperatur in den Testräumen während der klimatischen Messungen im Wintermonat Januar 04, dargestellt.



**Abb. 4.6-20 Vergleich Innen- und Außentemperatur bezogen auf den Behaglichkeitsbereich in den Testräumen 1, 2, 3 und 4 am Seiyun-Palast an einem Sommertag, Juli 2003**



**Abb. 4.6-21 Vergleich Innen- und Außentemperatur bezogen auf den Behaglichkeitsbereich in den Testräumen 1, 2, 3 und 4 am Seiyunpalast an einem Wintertag, Januar 2004**

Aus der Abb. 4.6-21 kann Folgendes angemerkt werden:

- Wegen der Verbesserung der klimatischen Verhältnisse in der Winterperiode liegen die Innentemperaturen in den meisten Zeiten in allen Testräumen innerhalb des Behaglichkeitsbereiches.
- Alle gemessenen Innenlufttemperaturen im Testraum 1 (Außenwanddicke=75 cm) lagen innerhalb des Behaglichkeitsbereiches und verliefen fast konstant bei ca. 25°C.
- In den Testräumen 2 (Außenwanddicke=55 cm) und 3 (Außenwanddicke=50 cm) blieben die Innentemperaturen innerhalb des Behaglichkeitsbereiches ausgenommen in den Nachmittagsstunden von 13:00 Uhr bis 18:00 Uhr, in denen sie höher als die maximale Komforttemperatur verliefen.
- Im Testraum 4 (Außenwanddicke=32 cm) wurden die Innentemperaturen zwischen 10:00 Uhr und 18:00 Uhr höher als die maximale Komforttemperatur gemessen.



## **5 Einfluss der jemenitischen Klimaverhältnisse auf die Trocknungsgeschwindigkeit und Trockendruckfestigkeit (TDF) geschützter und nicht geschützter Versuchsreihen verschiedener Lehmmischungen**

### **5.1 Gegenstand der Untersuchung**

Folgende Sachverhalte sollen experimentell untersucht werden:

- Einflüsse der sommerlichen und winterlichen Klimabedingungen auf die Trocknungsgeschwindigkeit und Trockendruckfestigkeit (TDF) verschiedener Lehmmischungen.
- Wirkung von verzögerter Trocknung auf verschiedene Lehmmischungen. Die Lehmmischungen werden dabei in 3 cm dicken Schutzschalen aus einem kapillar leitenden Material (hier „Ytong“) getrocknet.
- Wirkung von gebrochenen und rundkörnigen mineralischen Zuschlägen, wie Rundsand, Brechsand, Rundkies und Splitt auf die Druckfestigkeit von geschützten und nicht geschützten Lehmmischungen, die unter sommerlichen und winterlichen Klimabedingungen in Seiyun-Wadi-Hadhramaut-Jemen getrocknet werden.
- die Wirkung der oben erwähnten Schutzschalen auf die Trocknungsgeschwindigkeit und TDF bei unterschiedlichem Tongehalt aber gleichen mineralischen Zuschlägen, getrocknet unter winterlichen Klimabedingungen.
- der Einfluss der Korngröße auf die TDF geschützter und nicht geschützter Probekörper.

### **5.2 Versuchsgeräte und Örtlichkeiten**

Die Analyse der Grundstoffe und die Bindekraftprüfung wurden von Februar 2004 bis April 2004 durchgeführt. Die Herstellung der Probewürfel, die Trocknung, Schwindmaßprüfung und Druckprüfung fanden von August 2004 bis März 2005 in dem Laboratorium des Instituts für Tragkonstruktionen der Universität Karlsruhe statt.

Die Korndichte für das Ausgangsmaterial „Universallehm“ wurde nach DIN 18124 [40] in Zusammenarbeit mit dem Institut für Bodenmechanik und Felstechnik der Universität Karlsruhe bestimmt.

Die qualitative und quantitative Zusammensetzung des Ausgangsmaterials „Universallehm“ wurde im Institut für Mineralogie und Geochemie – Universität Karlsruhe bestimmt.

**Versuchshalle:** Hertzstraße 16 Geb. 06.32

Zwangsmischer, elektrische Säge, Siebanlage, Waage, Schwindmaßmessgeräte, Einrichtung zur Ermittlung der Bindekraft von Lehmmischungen, Lagerung der Versuchsmaterialien (Universallehm „UL“, Rundsand „RS“, Brechsand „BS“, Rundkies „RK“, Splitt „Spl.“

**Klimakammer:** In der oben genannten Versuchshalle (Abb. 5.2-1)

- Befeuchtungsgerät (Abb. A-5-1)
- Luftentfeuchtungsgerät (Abb. A-5-2)
- Feuchteregler mit Feuchtigkeitsfühler (Abb. A-5-3)
- Temperaturregler mit Temperaturfühler (Abb. A-5-4)

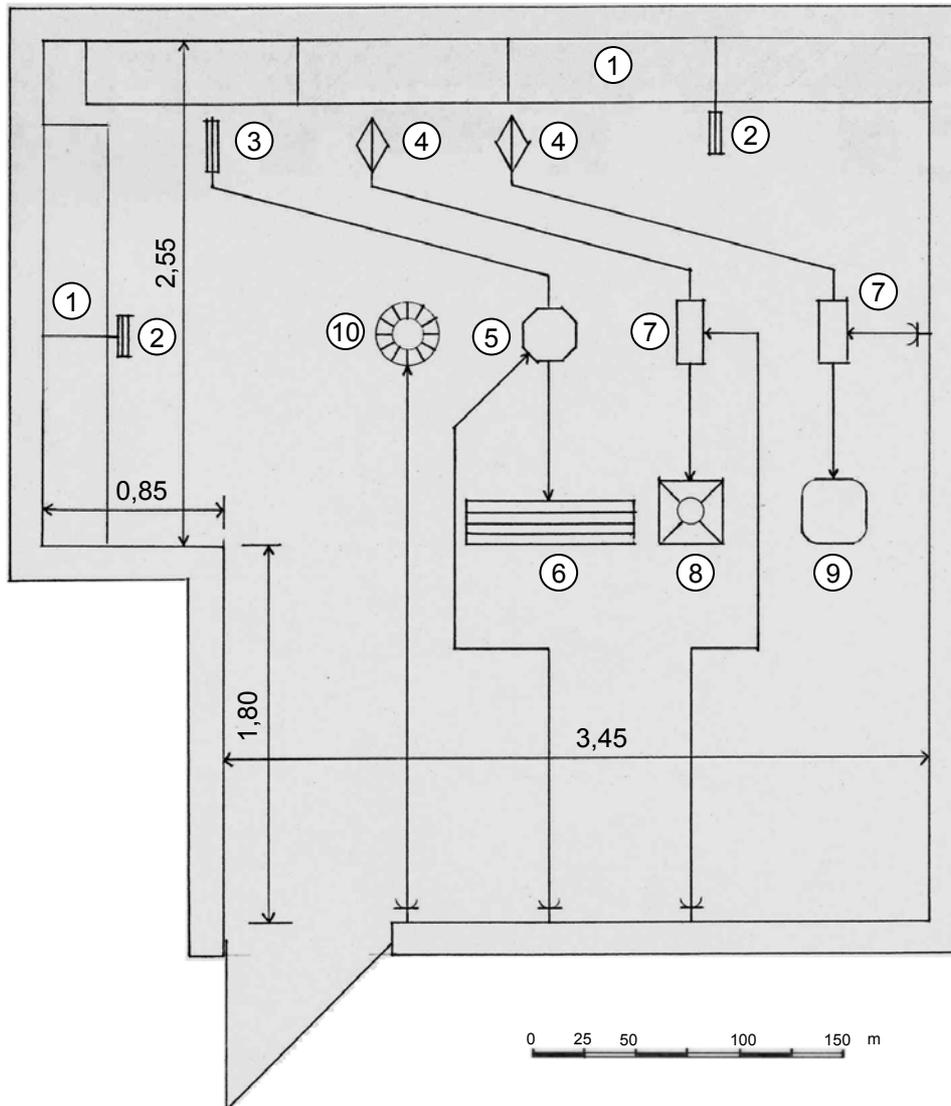
**Versuchsraum 007:** Hertzstraße 16 Geb. 06.34

- Geräte für Sedimentationsanalyse (Abb. A-5-5)
- Messschieber 18 ES (Abb. A-5-6)
- Präzisionswaage DS 65 K1 (Abb. A-5-7)
- Präzisionswaage BP 2100 S (Abb. A-5-8)
- Druckprüfmaschine (Abb. 5.14-2)

### 5.3 Versuchsmaterialien

Folgende Materialien wurden bei dieser Untersuchung verwendet:

- **Universallehm:** Das Ausgangsmaterial mit der Bezeichnung „Universallehm“ (UL) kam von der Firma „eiwa- Technische Entwicklung Lehm bau“ in Bisterschied, vgl. Abb. 5.3-1. Es wurde in einem geschlossenen big-bag von 1200 kg geliefert. Dieser Lehm wurde gewählt, weil er kaolinitreich ist, und damit der jemenitischen Lehmzusammensetzung ähnelt, vgl. [9].



- ① Regale zur Einlagerung der Probekörper s. Abb. 5.3-4-e
- ② Zusätzliche Thermometer für zusätzliche Kontrolle
- ③ Temperatursensor s. Abb. A-5-4
- ④ Feuchtigkeitssensor s. Abb. A-5-3
- ⑤ Temperaturregler s. Abb. A-5-4
- ⑥ Elektro-Heizung
- ⑦ Feuchtigkeitsregler s. Abb. A-5-3
- ⑧ Luftentfeuchtungsgerät s. Abb. A-5-2
- ⑨ Befeuchtungsgerät s. Abb. A-5-1
- ⑩ Ventilator

**Abb. 5.2-1** Prinzipskizze für die begehbare Klimakammer, installiert mit den erforderlichen Sensoren, Reglern und Geräten in der Versuchshalle – Institut für Tragkonstruktionen – Hertzstrasse 16 Geb. 06-32

- **Mineralische Zuschläge:** Folgende mineralische Zuschläge wurden von der Firma „Freyer GmbH-Germersheim“ geliefert (vgl. Abb.5.3-1):
  - Brechsand (BS) (0-2 mm)
  - Rundsand (RS) (0-2 mm)
  - Rundkies (RK) (2-16 mm)
  - Splitt (Spl.) (2-16 mm)
  
- **Abgleichmasse:** Schwefelmischung nach DIN EN 12390-3 : 2001 (D) Anhang A [44]. Dieses Material wurde von der Firma „infraTest – Prüftechnik GmbH“ in Blockform Pack mit 25 kg geliefert. Das Aufbringen des Abgleichsmaterials erfolgte nach oben erwähnter Norm, vgl. Abschnitt 5.14.2.1.
  
- **Schutzschalen:** Sie wurden geformt aus miteinander verklebten Elementen, 30 mm dick, und aus Ytong-Planbauplatten PPp1 0,05 (siehe Abb. 5.3-4). Die Ytong-Planbauplatten PPp1 0,05 hatten die Abmessungen 625x250x100 mm und wurden von der Firma „raab karcher“ geliefert.

## 5.4 Bestimmung der Bindekraft des Ausgangsmaterials „Universallehm“ (UL)

Die Bindekraft des Universallehms wurde nach DIN 18952 Bl.2 [41] Absatz 2 ermittelt, vgl. [93]

### 5.4.1 Herstellung der Versuchskonsistenz „Normsteife“:

- Alle Lehmfraktionen des Lehmgemenges, die größer als 2 mm waren, wurden durch Aussieben des getrockneten Lehmes aus der Probe entfernt.
- Es wurden etwa 1200 cm<sup>3</sup> von dem gesiebten Lehm unter spärlicher Wasserzugabe auf einer Stahlplatte solange mit einem Hammer von 2,5 x 2,5 cm Kopffläche flachgeschlagen, bis ein zusammenhängender Fladen entstand.
- Der Fladen wurde mit dem Messer abgehoben und in ca. 2 cm breite Streifen geschnitten, die dann hochkantig gestellt und danach erneut zu einem Fladen zusammengeschlagen wurden. Dieser Vorgang wurde solange wiederholt, bis auch an der Unterseite eine gleichmäßige Struktur entstand.

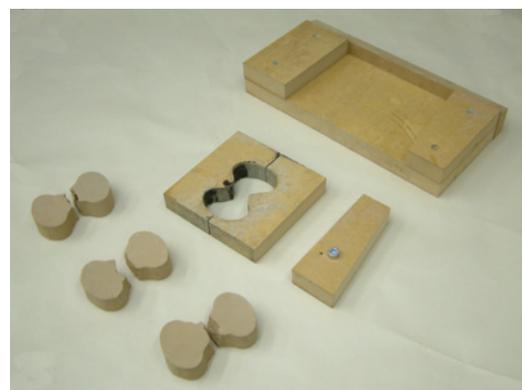


**Abb. 5.3-1 Ausgangsmaterialien für die Versuchsmischungen**

**Abb. 5.3-2 Abplattung bei der Kugelfallprobe bei der Ermittlung der Bindekraft und Messung vom Trockenschwindmaß**

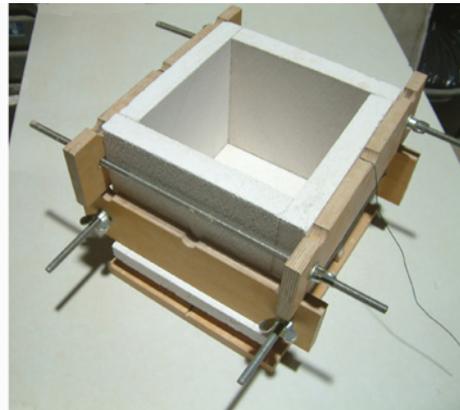


**Abb. 5.3-3 Probekörper zur Ermittlung der Bindekraft im plastischen Zustand des Ausgangsmaterials „Universallehm“ nach [41]**

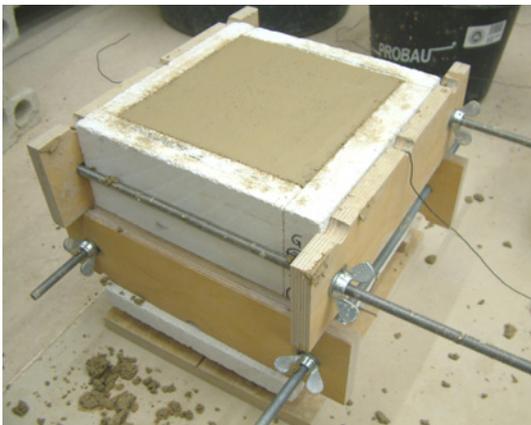




a) Schutzschale zerlegt in ihren Teile



b) Schutzschale vor dem Füllen mit Probelehm



c) Schutzschale nach dem Füllen mit Probelehm



d) Der Deckel der Schutzschale wird aufgelegt und mit Stahldrähten gebunden



e) Schutzschalen während der Trocknung in der Klimakammer



f) Ausschalen der Probekörper

**Abb. 5.3-4 Die einzelnen Zustände der verwendeten Schutzschale**

- Der Lehm sollte danach unter einem feuchten Tuch abgedeckt 12 Stunden ruhen, um eine gleichmäßige Feuchteverteilung zu gewährleisten.
- Unmittelbar nach der gründlichen Aufbereitung wurde ein genau abgewogener Teil von 200 g entnommen. Dieser wurde durch mehrmaliges Schlagen auf die Stahlplatte verdichtet und anschließend zwischen trockenen Händen zu einer Kugel geformt, die aus 2 m Höhe auf eine Stahlplatte fallengelassen wurde, vgl. Abb. 5.3-2.
- Weist die dadurch entstandene Abplattung einen Durchmesser von 50 mm auf, ist die notwendige Versuchskonsistenz „Normsteife“ gemäß DIN 18952 Bl.2 erreicht.
- Die Normsteife gilt noch als erreicht, wenn die Abplattung oval ausfällt, wie z. B. mit Durchmesser von 49 und 51 mm.
- Bei einer größeren oder kleineren Abplattung wurde der Versuch mit weniger bzw. etwas mehr Wasser wiederholt, bis die „Normsteife“ ausfällt.

#### **5.4.2 Anfertigung des Probekörpers**

Nach dem Erreichen der „Normsteife“ wurde sofort die Bindekraft wie folgt ermittelt [41] und [93]:

- In einer Form nach DIN 18952 Bl.2 [41] wurde mit einem Stampfer normsteifer Lehm in drei Lagen von Hand gestampft, bis eine weitere Verdichtung nicht mehr möglich war.
- Die Probekörper wurden beidseitig mit einem Messer mit gerader Schneide glatt gezogen, ausgeschalt und sofort in das Prüfgerät nach DIN 18952 Bl.2 [41] eingespannt.

#### **5.4.3 Zerreiversuch**

- Der Probekörper wurde mit einem angehängten Behälter belastet, dem allmählich und kontinuierlich, trockener Sand mit ca. 1mm Korndurchmesser zugeführt wurde, bis der Körper zerriss. Nach [134] soll die Lastzunahme gleichmäßig sein und höchstens 750 g in der Minute betragen.
- Die Bindekraft des Ausgangsmaterials „Universallehm“ wurde als Mittelwert von drei Proben, die weniger als 10% Abweichung voneinander gehabt haben, ermittelt (siehe Tab.5.4-1) und Abb. 5.3-3.

Bezeichnung der Probe	Probe Nr.1	Probe Nr.2	Probe Nr.3
Zugfestigkeit [g/cm <sup>2</sup> ]	117,66	116,48	119,82
mittlere Zugfestigkeit [g/cm <sup>2</sup> ]	<b>117,99</b>		

**Tab. 5.4-1 Bindekraftprüfung (Zugfestigkeit im plastischen Zustand) für das Ausgangsmaterial „Universallehm“ nach DIN 18952 Bl.2 (zurückgezogen)**

**Ergebnis:** Nach DIN 18952 Blatt 2 Absatz 2.5 [41] ist das Ausgangsmaterial „Universallehm“ mit einer Bindekraft von **117,99 g/cm<sup>2</sup>** als **fast fetter Lehm** zu bezeichnen.

## **5.5 Quantitative und qualitative Analyse des Ausgangsmaterials „Universallehm“ (UL)**

Zur Vergleichbarkeit mit anderen Lehmen wurde der chemisch-mineralogische Aufbau des Ausgangsmaterials analysiert. Die qualitative und quantitative Mineralbestimmung wurde anhand Röntgendiffraktometrie Methode im Institut für Mineralogie und Geochemie der Universität Karlsruhe durchgeführt. Dieses Analysenverfahren beruht auf der Wechselwirkung zwischen Röntgenstrahlen und kristallinen Phasen [73]. Röntgenstrahlen werden unter bestimmten Bedingungen an den Netzebenen (d-Wert) für jede kristalline Phase unterschiedlich ausfallen und ergeben je nach Phase unterschiedliche Beugungsmuster. Somit lassen sich alle Kristallphasen anhand ihrer spezifischen Beugungsmuster identifizieren. Die Beugungsmuster von ca. 50 000 Phasen sind in speziellen Röntgendatenbanken (z B. JCPDS) abgespeichert. Die qualitative Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung der Universal-Lehmprobe wurde röntgenographisch in folgenden Schritten durchgeführt:

- Etwa 100 g von der Universallehmprobe wurden grob zerkleinert und bei 40°C ca. 14 Stunden getrocknet. Von dem so vorbereiteten Material wurden dann 25 g abgetrennt und für alle nachfolgenden Untersuchungen analysenfein gemahlen.

#### **Bestimmung des Gesamtkohlenstoffgehaltes:**

Aus dem Carbonatgehalt (Kohlenstoff) kann der Gehalt der Carbonat-Mineralen (Calcit, Dolomit, Siderit, Magnesit u. a.) berechnet werden, wenn diese Minerale röntgenographisch nachgewiesen werden. Bei gleichzeitigem Vorkommen von mehreren Carbonat-Mineralen wird deren Anteil unter Verwendung der Integralen Röntgenintensitäten an ausgewählten Röntgeninterferenzen mit Hilfe von Eichkurven bestimmt.

#### **Bestimmung des Schwefelgehaltes:**

Schwefel kann in Sulfid- bzw. Sulfatmineralen gebunden sein. Aus dem Schwefelgehalt können die Mengenanteile dieser Minerale berechnet werden. Bei gleichzeitigem Vorkommen wird deren Anteil unter Verwendung der Integralen Röntgenintensitäten an ausgewählten Röntgeninterferenzen mit Hilfe von Eichkurven bestimmt.

#### **Die qualitative Bestimmung der kristallinen Phasen in der Probe wurde in fünf getrennten Schritten durchgeführt:**

1. Quantitative Bestimmung aller kristallinen Phasen, ausgenommen alle Schichtsilikate: Quarz, Feldspat, und andere Minerale wurden mit Hilfe von Eichkurven bestimmt (Verwendung der Integralen Röntgenintensitäten). Die quantitative Bestimmung der Carbonat-Mineralen und der schwefelhaltigen Minerale wurde bereits oben beschrieben.
2. Die Gesamtmenge an Schichtsilikaten wurde als Differenz zu der Summe der unter 1. genannten Minerale bestimmt. Dieses Verfahren wurde gewählt, weil so mit hinreichender Genauigkeit die Gesamtmenge an Schichtsilikaten bestimmt werden kann. Hierbei wird berücksichtigt, dass die Schichtsilikate oft sehr feinkristallin bzw. schlecht kristallisiert in Sedimentgesteinen bzw. Böden auftreten, was zur Verminderung der Röntgenintensitäten führt. Es werden somit meist zu geringe Mengen an Schichtsilikaten bestimmt. Die qualitative Bestimmung der verschiedenen Schichtsilikate erfolgte auch röntgenographisch. Hierzu wurde von der Probe ein Texturpräparat (Sedimentation einer bestimmten Probenmenge auf einen Glasträger) hergestellt, um die spezifischen Röntgeninterferenzen der verschiedenen Schichtsilikate eindeutig zu erfassen.

3. Die quantitative Bestimmung der Schichtsilikate wurde ebenfalls röntgenographisch durchgeführt (Nutzung der Integralen Röntgenintensitäten ausgewählter Röntgeninterferenzen). Zur Unterscheidung von quellfähigen und nicht quellfähigen Schichtsilikaten wurde das Texturpräparat ca. 6 Tage in Glykol-Atmosphäre gelagert. Die quellfähigen Schichtsilikate weiten durch Einlagerung ihr Kristallgitter auf, was röntgenographisch nachgewiesen werden konnte.
4. Es wurde geprüft, ob in der Probe neben Kaolinit auch Chlorit vorhanden ist (Überlagerung von Röntgenreflexen). Hierzu wurde das Texturpräparat ca. 2 Stunden bei 550°C aufgeheizt. Kaolinit ist bei dieser Temperatur nicht mehr stabil („Zusammenbruch“ des Kaolinitgitters), was röntgenographisch nachgewiesen werden konnte. Es ist bekannt, dass Eisen-reiche Chlorite bei 550°C stabiler sein können. In diesem Fall wurde das Vorhandensein von Kaolinit durch die Methode von LAGALY (Einlagerung von Dimethylsulfoxid: Aufweitung der Kaolinitstruktur) überprüft.
5. Neben den Tonmineralen kann auch ein Teil des Illits (so genannter „offener“ Illit) quellfähig sein. Dieser Anteil wurde aus Röntgendiagramm abgeschätzt und ist in der Summe Q (Gesamtmenge der quellfähigen Minerale) enthalten.

Die Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Mineralbestimmung sind in folgender Tab. 5.5-1 und in der Abb. 5.5-1 a, b dargestellt [76].

<b>Probe</b>	<b>Ausgangsmaterial „Universallehm“</b>
Quarz	51
Feldspat	12
Kaolinit	19
quellf. Tone	1
Dolomit	3
Calcit	8
Illit	5
Anhydr.	0
C	1,356
S	0,0051
<b>∑Schichtsilikate</b>	<b>25</b>

**Tab. 5.5-1 Qualitative und quantitative Mineralbestimmung des Ausgangsmaterials „Universallehm“**

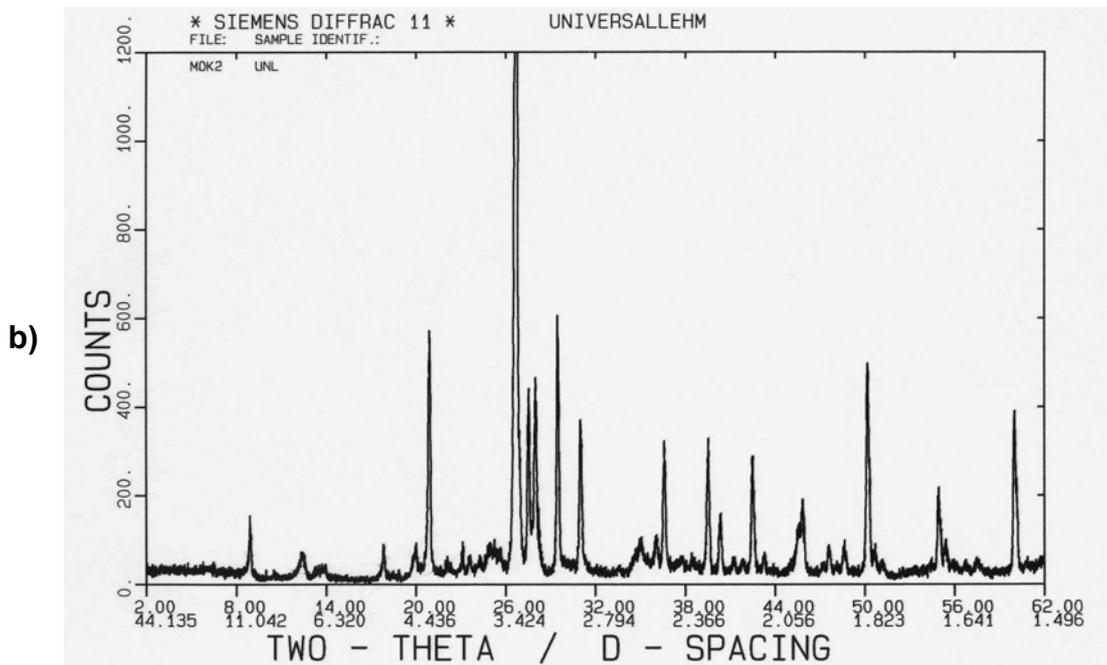
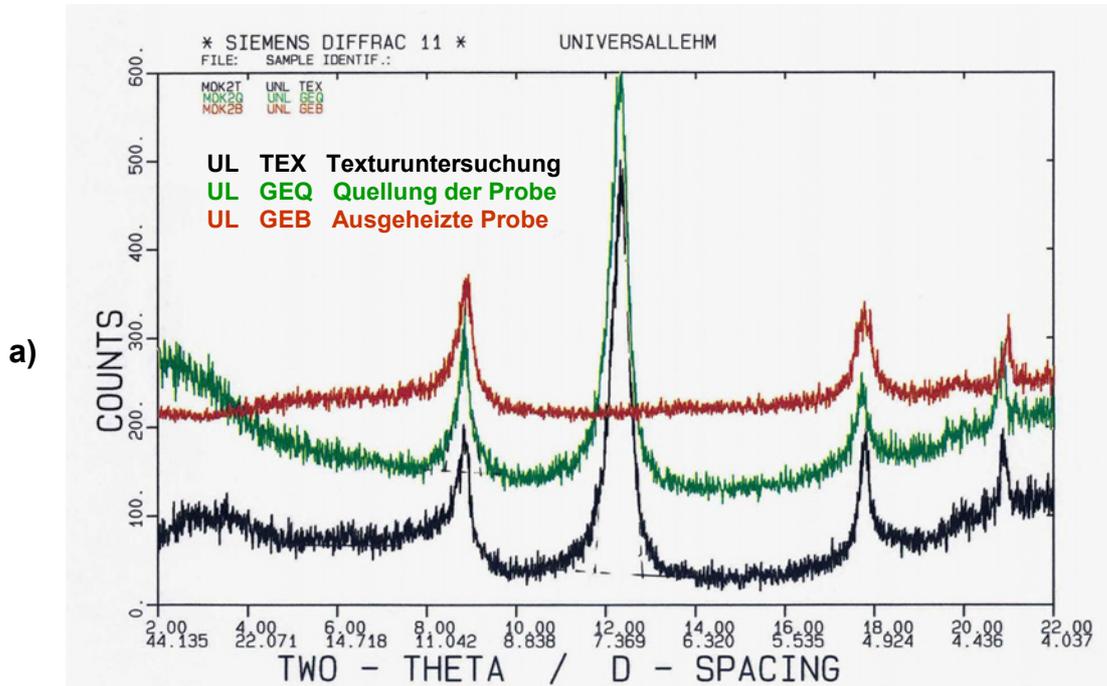


Abb. 5.5-1 a, b Röntgendiffraktometrie Methode zur qualitativen und quantitativen Mineralbestimmung des Ausgangsmaterials „Universallehm“ (UL), vgl. Tabelle 5.5-1

## 5.6 Sieb- und Sedimentationsanalyse von Versuchsmischungen „Sieblinien“

Die Siebanalyse von Ausgangsmaterialien wurde vom Autor im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen nach DIN 18123 [39] durchgeführt. Da dort die Einrichtungen für die Bestimmung der Korndichte nicht vorhanden sind, wurde die Bestimmung der Korndichte nach DIN 18124 [40] im Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe durchgeführt. An drei Proben wurde die Korndichtebestimmung durchgeführt (siehe Tab. 5.6-1). Der Mittelwert der Korndichte betrug **2,709 g/cm<sup>3</sup>** [77].

Probe Nr.	1	2	3
Pyknometer Nr.	80	82	86
Masse Pyknometer $m_p$	49,082	48,270	46,851
Masse Pyknometer + Probe	73,317	73,106	68,649
Masse Pyknometer + Probe + Wasser	167,873	167,373	163,400
Masse Wasser	<b>94,556</b>	<b>94,267</b>	<b>94,751</b>
Temp. des Wassers	21,30	21,00	21,00
Dichte des Wassers bei Temp.	<b>0,99795</b>	<b>0,99802</b>	<b>0,99802</b>
Volumen des Wassers	<b>94,750</b>	<b>94,454</b>	<b>94,939</b>
Masse Pyknometer + Wasser $m_3$			
Masse Wasser bei Temp. (Tabelle $m_3 - m_p$ )	103,4684	103,4173	102,7946
Volumen des Pyknometers bei Temp.	<b>103,6805</b>	<b>103,6225</b>	<b>102,9985</b>
Volumen der Körner	<b>8,931</b>	<b>9,168</b>	<b>8,060</b>
Masse der Körner	<b>24,235</b>	<b>24,836</b>	<b>21,798</b>
Korndichte	<b>2,714</b>	<b>2,709</b>	<b>2,705</b>
<b>Korndichte Mittelwert [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>2,709</b>		

**Tab. 5.6-1 Bestimmung der Korndichte des Ausgangsmaterials „Universallehm“ nach DIN 18124 [40]**

In der Abb. 5.6-1 sind die Ergebnisse der Sieb- und Sedimentationsanalyse des Ausgangsmaterials Universallehm (UL) dargestellt.

Da in der Regel die Baulehme 5-15% Ton enthalten [94], das Ausgangsmaterial aber 25% Ton enthält, wurde es mit mineralischen Zuschlägen gemagert.

In vier weiteren Lehmmischungen betrug die Tonmenge jeweils genau 10%. Diese vier Mischungen wurden wie folgt hergestellt und analysiert (siehe Tab. 5.6-2):

<b>Nr.</b>	<b>Beschreibung der Mischung</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Sieblinie</b>
1	Ausgangsmaterial „Universallehm“ Tonmenge= 25% Ton	UL (T=25%)	S. Abb. 5.6-1
2	Universallehm gemagert mit Rundsand (0-2 mm), Tonmenge=10%	UL+RS (T=10%)	S. Abb. 5.6-2
3	Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm), Tonmenge=10%	UL+BS (T=10%)	S. Abb. 5.6-3
4	Universallehm gemagert mit Rundsand (0-2 mm) und Rundkies (2- 16 mm), Tonmenge=10%	UL+RS+RK (T=10%)	S. Abb. 5.6-4
5	Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) und Splitt (2-16 mm), Tonmenge=10%	UL+BS+Spl. (T=10%)	S. Abb. 5.6-5

**Tab. 5.6-2 Die ersten fünf verwendeten Lehmmischungen in den Versuchen**

Um die Wirkung der langsamen Trocknung (durch kapillar leitende Kräfte der Schutzschalenwände) bei Lehmmischungen verschiedener Tonmengen zu untersuchen, wurden noch zwei weitere Lehmmischungen wie in Tab. 5.6-3 hergestellt.

<b>Nr.</b>	<b>Beschreibung der Mischung</b>	<b>Abkürzung</b>	<b>Sieblinie</b>
6	Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm), Tonmenge=15%	UL+BS (T=15%)	S. Abb. 5.6-6
7	Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm), Tonmenge=5%	UL+BS (T=5%)	S. Abb. 5.6-7

**Tab. 5.6-3 Die sechste und siebente verwendeten Lehmmischungen in den Versuchen**

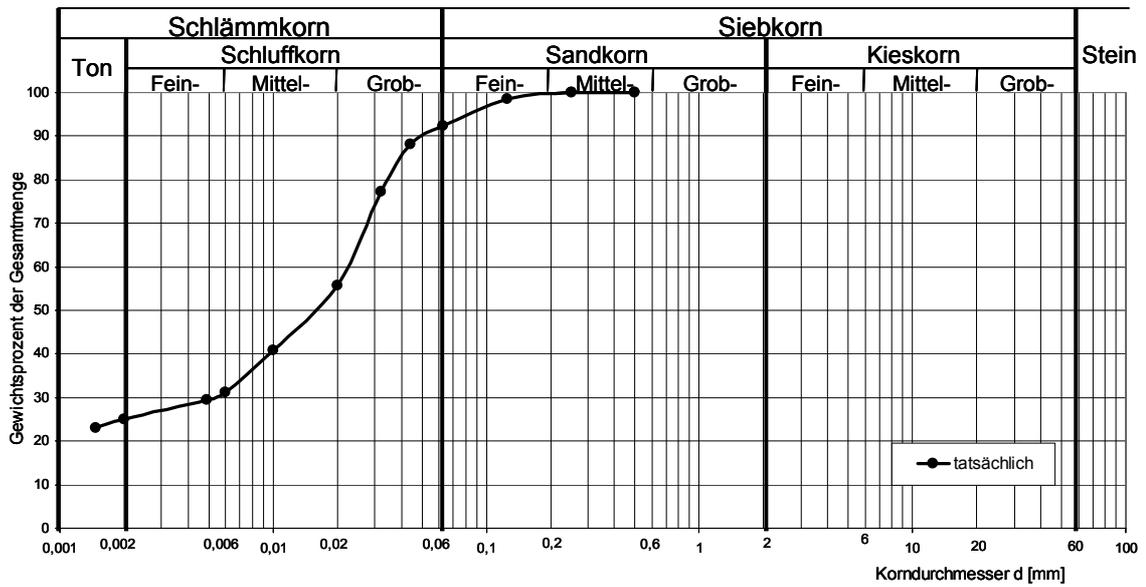


Abb. 5.6-1 Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm „UL (T=25%)“

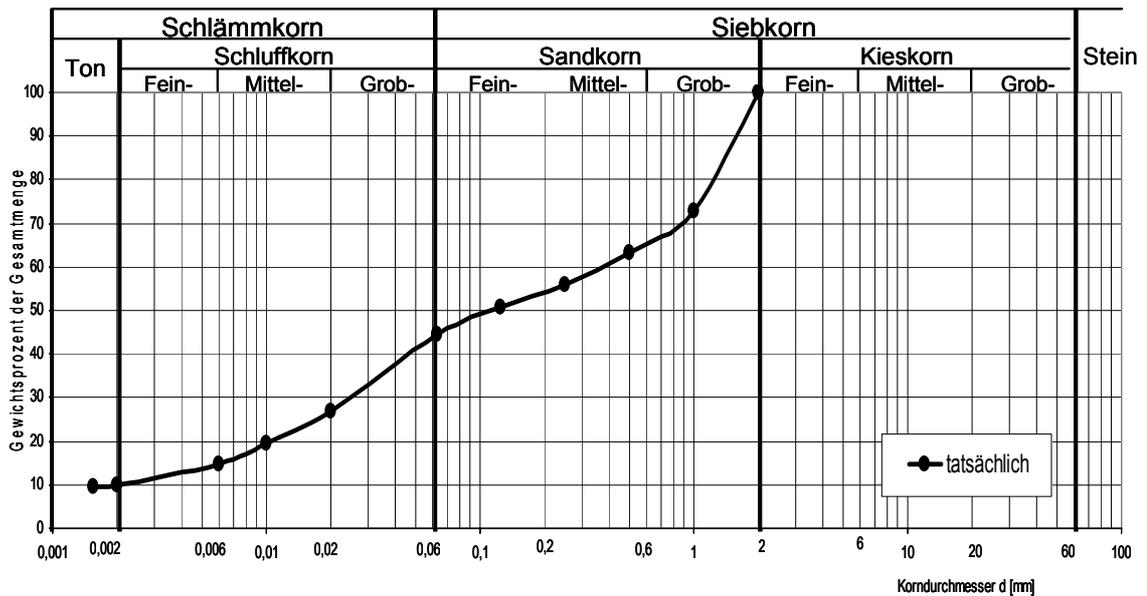
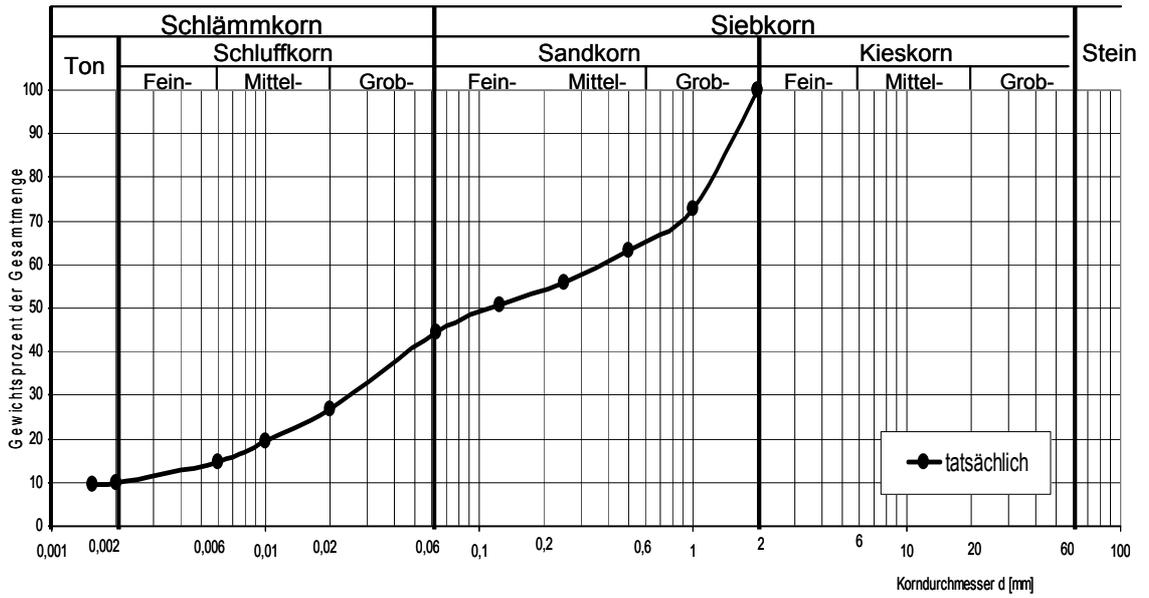
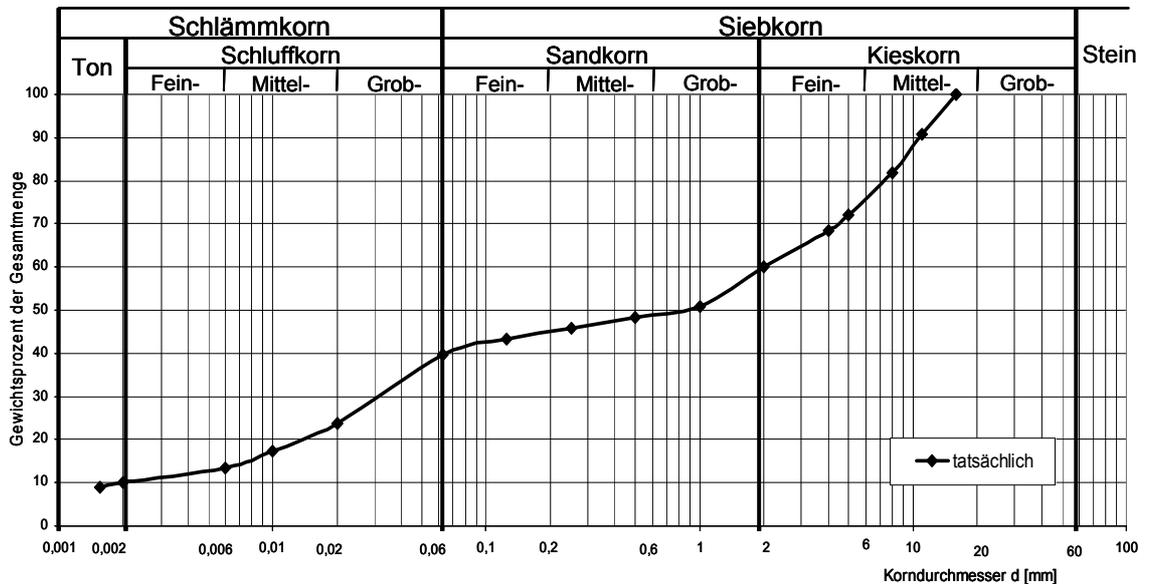


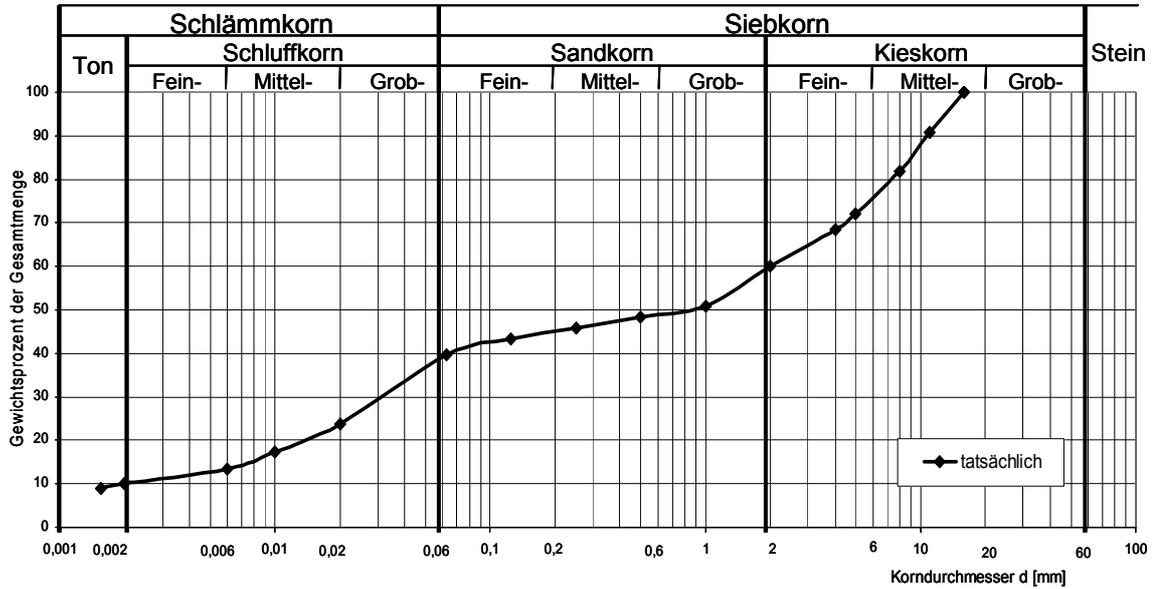
Abb. 5.6-2 Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm gemagert mit Rundsand (0-2 mm) „UL+RS (T=10%)“



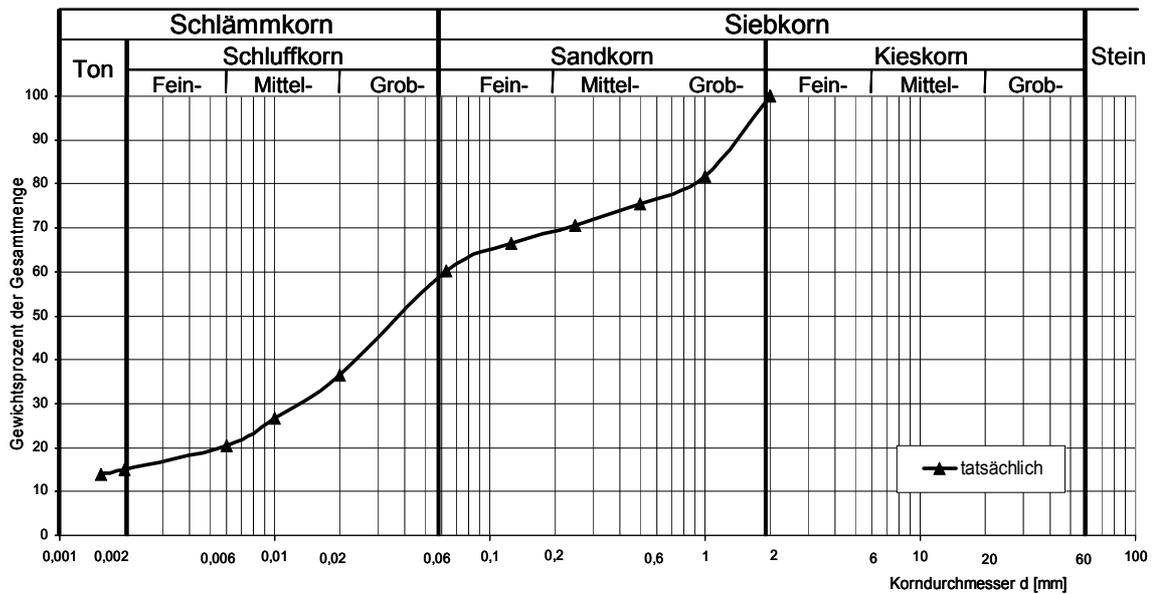
**Abb. 5.6-3 Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL+BS (T=10%)“**



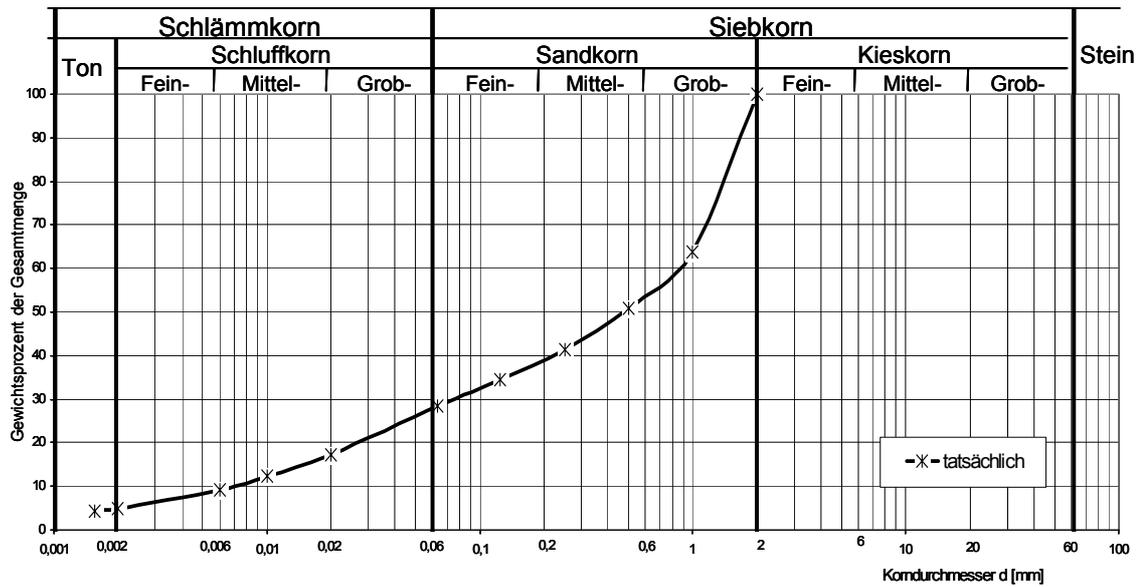
**Abb. 5.6-4 Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm gemagert mit Rundsand (0-2 mm) und Rundkies (2-16 mm) „UL+RS+RK (T=10%)“**



**Abb. 5.6-5 Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) und Splitt (2-16 mm) „UL+BS+Spl.(T=10%)“**



**Abb. 5.6-6 Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL+BS (T=15%)“**



**Abb. 5.6-7 Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL+BS (T=5%)“**

KONSISTENZ					KORN-GRÖSSEN
trocken	erdfeucht	plastisch	breiig	flüssig	
					organisch
	Pisé				kiesig
Auffüllen		extrudiert	Adobe	Verputz	sandig
				Leichtlehm	siltig
					tonig

**Abb. 5.7-1 Eignung von Baulehmen zur Verarbeitung in Abhängigkeit von Lehmbautechnik, Konsistenz und Korngrößen nach [124]**

## **5.7 Bestimmung der Konsistenz der Versuchsmischungen durch Ausbreitmaßverfahren**

Je nach Lehmbautechnik ist eine erdfeuchte (bei Stampflehm), plastische (bei Adobe), bis breiige oder flüssige (bei Leichtlehm) Konsistenz erforderlich, siehe Abb. 5.7-1.

Bei den Lehmbautechniken im Jemen wird der Baustoff Lehm im plastischen Zustand verarbeitet. Deshalb beziehen sich in dieser Arbeit alle Versuche auf den plastischen Zustand. Also alle Versuche wurden mit gleicher Konsistenz durchgeführt. Dafür wurde das Ausbreitmaßverfahren nach DIN 1048 Teil 1, DIN 1045-2 und DIN EN 12350 -5 [37, 38, 43] für Frischbeton mit Modifikation übernommen (siehe unten). Nach DIN 1045-2: 2001-07 [37] Seite 13 Tabelle 6 „Ausbreitmaßklassen“ ist der Frischbeton in der Ausbreitmaßklasse F2 plastisch und hat eine Ausbreitmaß von 350 mm bis 410 mm.

Bazara hat das Ausbreitmaßverfahren von Frischbeton zur Ermittlung der Konsistenz für die jemenitischen Lehme verwendet und setzte dafür 37 cm Durchmesser als Zielwert des Ausbreitmaßes an [18].

Es muss aber hier angemerkt werden, dass bei der Untersuchung von Bazara das Ausbreitmaß direkt nach dem Mischvorgang mit einer Mischdauer von 20 Minuten bzw. 30 Minuten ohne Maukvorgang „wie bei Beton“ ermittelt wurde [18].

Da aber bei Lehmabau der Maukprozess ein sehr wichtiger Vorgang ist, weil dabei die Anziehungskräfte der Tonplättchen besonders aktiviert werden, wird in dieser Arbeit das Ausbreitmaß nach dem Maukprozess von 48 h ermittelt.

Die Variation des Ausbreitmaßes im Rahmen dieser Arbeit hat ergeben, dass für die traditionellen Lehmabauweisen das Ausbreitmaß der optimalen Verarbeitungskonsistenz 30 cm beträgt.

## **5.8 Herstellung der Versuchsmischungen**

Die gelieferten Ausgangsmaterialien wurden in der Halle des Instituts für Tragkonstruktionen in der Hertzstraße 16 und für die gesamte Versuchszeit in feuchteundurchlässigen Plastiksäcken gelagert, um ihre eigene Feuchte konstant zu halten, und damit das erwünschte Ausbreitmaß der Mischungen mit weniger Aufwand zu erreichen.

### **5.8.1 Mischvorgang**

Je nach dem Zustand der Ausgangsmaterialien wurden die Mischungen unter mehr oder weniger spärlichen Wasserzugaben in einem Zwangsmischer (Abb. A-5-9) 5 Minuten lang gemischt, sodass eine plastische Masse entstand.

### **5.8.2 Maukvorgang**

Jede Lehmmischung wurde dann in geschlossenen Plastikbehältern 48 h eingelagert, sodass eine gleichmäßige Feuchteverteilung gewährleistet wurde und die Bindekräfte der Tonplättchen gut geweckt wurden (Abb. A-5-10).

## **5.9 Feststellung des Ausbreitmaßes**

Nach dem Maukprozess wurde jede Mischung vor der Feststellung ihres Ausbreitmaßes noch einmal für 7-10 Minuten gemischt, damit eine eingetretene Trennung des Anmachwassers von den mineralischen Zuschlägen, besonders bei Lehmmischungen mit niedrigen Tonmengen revidiert und eine erneute gleichmäßige Feuchteverteilung gewährleistet wurde. Gleich nach dem Mischvorgang wurde das Ausbreitmaß der Mischung festgestellt, vgl. Abschnitt 5.7. Der Vorgang wurde unter Zugabe von Wasser oder trockenem Material solange wiederholt, bis der Zielwert des Ausbreitmaßdurchmessers von 30 cm erreicht war, (siehe Abb. A-5-11 a, b, c).

## **5.10 Bestimmung der erforderlichen Wassermengen in den Versuchsmischungen**

Unmittelbar nach dem Erreichen des Zielwertes des Ausbreitmaßdurchmessers wurden drei Stichproben von der Lehmmischung entnommen und sofort auf einer präzisen Laborwaage mit einer Messgenauigkeit von 0,01g feucht gewogen, vgl. (Abb. A-5-8). Der Feuchtegehalt der Proben wurde dann nach DIN EN ISO 12570 [45] ermittelt. Die Proben wurden im Ofenschrank bei 105°C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Die Massenkonstanz gilt als erreicht, wenn die Massenänderung bei drei aufeinander folgenden Wägungen mit einem Abstand von jeweils 24 h weniger als 0,1% der Gesamtmasse beträgt.

In den Tabellen A-5-1 bis A-5-7 sind alle Versuchsschritte zur Ermittlung vom Wassergehalt aller in dieser Arbeit verwendeten Lehmischungen im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) beschrieben. Diese Wassermengen wurden direkt nach der Feststellung des Ausbreitmaßes von 30 cm ermittelt, vgl. Abschnitt 5.9, Abb. 5.12-2.

### **5.11 Ermittlung des Trockenschwindmaßes der Versuchsmischungen nach DIN 18952**

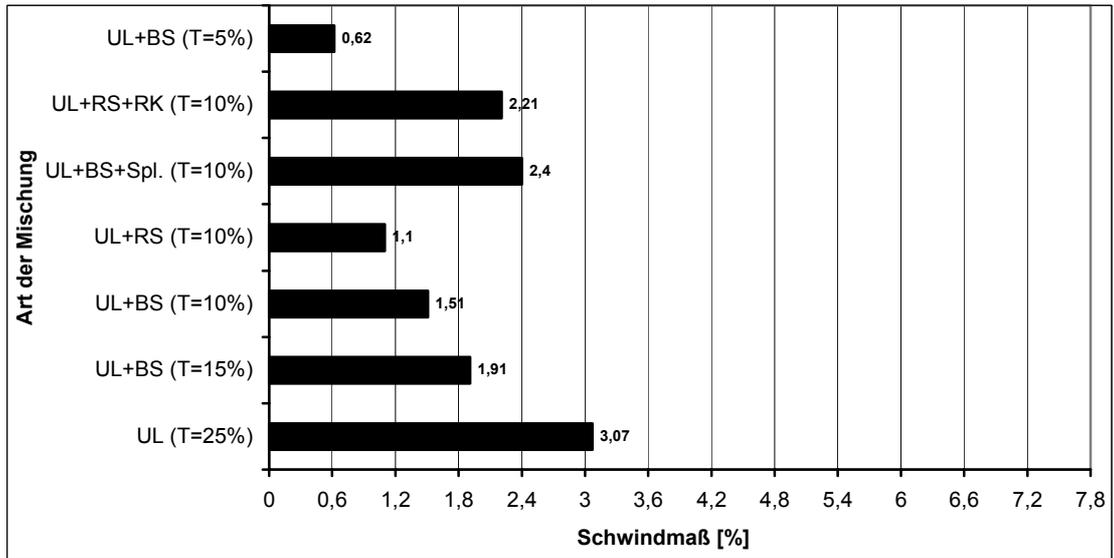
Das Trockenschwindmaß wurde nach DIN 18952 Bl.2 [41] in folgenden Schritten ermittelt:

- Ermittlung der Versuchskonsistenz „Normsteife“, vgl. Abschnitt 5.4-1.
- Stampfen von drei Probekörpern in eine Holzform (200x40x25) mm.
- An den Stirnflächen jedes Probekörpers wurden mittig Messpunkte eingelassen. Der Abstand zwischen den Messpunkten wurde mit einem präzisen digitalen Messschieber auf 0,01 mm genau abgelesen [94].
- Die Probekörper wurden auf einer mit einem Ölfilm versehenen Glasplatte bei einer Umgebungstemperatur von 20°C drei Tage getrocknet, siehe Abb. A-5-12.
- Ab dem vierten Tag wurden die Probekörper bei 60°C solange getrocknet, bis keine Längenverkürzung mehr festzustellen war.
- Das Trockenschwindmaß in % ist der Mittelwert der Verkürzungen der drei Probekörper, die nicht mehr als 2 mm voneinander abweichen dürfen.

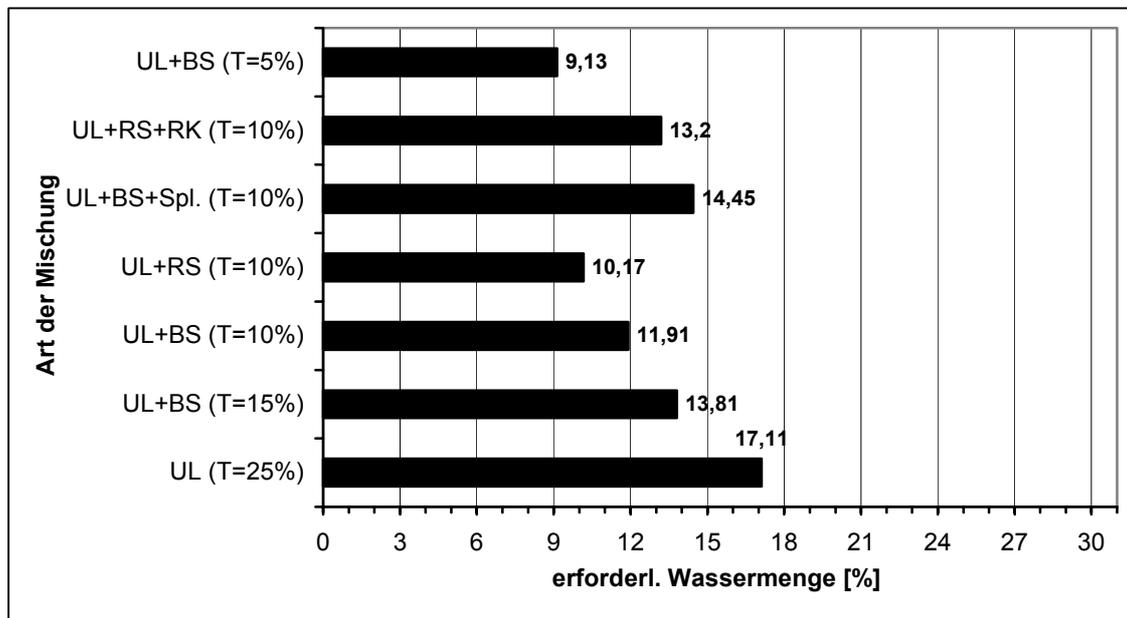
Die Abb. 5.11-1 stellt die Trockenschwindmaße der sieben verschiedenen Lehmischungen dar, die zur Herstellung der Versuchsreihen verwendet wurden.

Die dazu gehörigen erforderlichen Wassermengen bei allen Lehmischungen wurden, wie bereits im Abschnitt 5.10 beschrieben, ermittelt, siehe Abb. 5.11-2.

Diese Methode zur Ermittlung des Trockenschwindmaßes von Lehmischungen erfasst nicht den Einfluss der gröberen mineralischen Zuschläge größer als 2 mm, wie Kies und Splitt, auf das Trockenschwindmaß. Sie setzt die Trennung von gröberen Bestandteilen größer als 2 mm von der Versuchsmischung voraus. Deshalb ist die Tonmenge im Verhältnis höher in der Versuchsmischung als in der ursprünglichen Lehmischung. Demzufolge zeigen die Lehmischungen „UL+RS+RK (T=10%)“ und „UL+BS+Spl. (T=10%)“ höhere Trockenschwindmaße als die Lehmischungen „UL+RS (T=10%)“ und „UL+BS (T=10%)“, obwohl die ursprünglichen vier Lehmischungen gleiche Tonmengen (10%) enthalten haben.



**Abb. 5.11-1 Trockenschwindmaß in Prozent nach DIN 18952 Blatt 2, Konsistenz: Normsteife. Ausgangslänge der Probekörper (20 cm)**



**Abb. 5.11-2 Erforderliche Wassermenge der Lehmmischungen bei der Ermittlung des Trockenschwindmasses nach DIN 18952 Blatt 2, Konsistenz: Normsteife**

## 5.12 Ermittlung des Trockenschwindmaßes nach dem Verarbeitungszustandsverfahren (VZV)

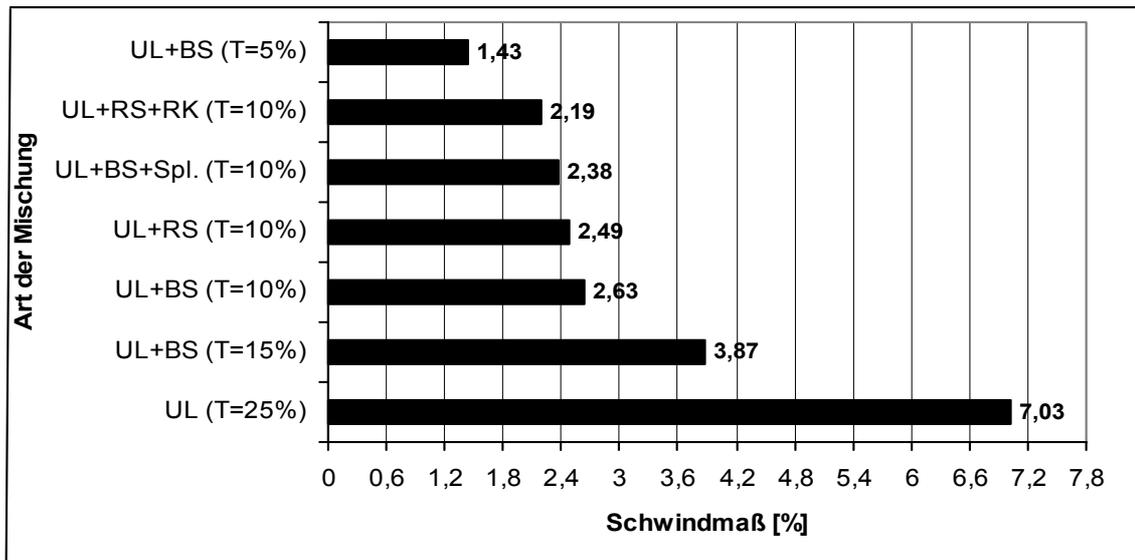
Es ist bekannt, dass der zur Verarbeitung der Lehmmischungen notwendige Wassergehalt sehr stark vom Tongehalt und in geringem Maß auch von der Tonart abhängt. Deshalb müssen die Lehmmischungen gleiche Plastizität aufweisen, um ihr Trockenschwindverhalten vergleichen zu können [93].

Die Ermittlung des Trockenschwindmaßes nach DIN 18952 Bl.2 [41], ist hier nicht sinnvoll, weil einige Lehmmischungen grobe Bestandteile größer als 2 mm enthalten, die aber zur „Normsteifeermittlung“ zu entfernen wären. Dadurch wird die Wirkung von Kies- und Splittkörnern auf das Trockenschwindmaß nicht erfasst. Im Jemen werden die Lehmmischungen bei allen Lehmbauweisen im plastischen Zustand verarbeitet, auch die mit grobkörnigen Zuschlägen größer als 2 mm Korndurchmesser.

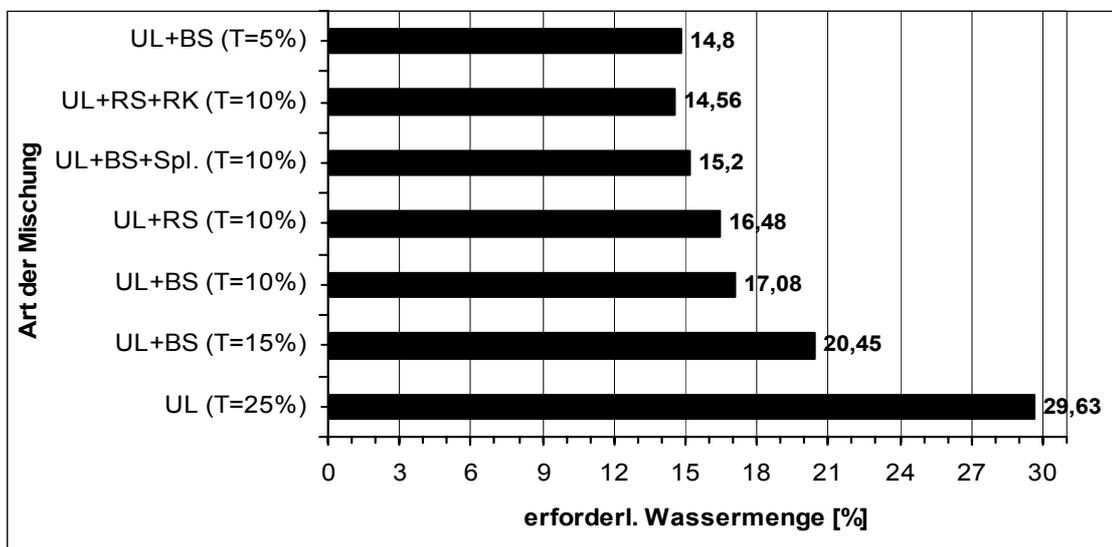
Deshalb wurde das Trockenschwindmaß der verschiedenen Lehmmischungen nach dem vom Verfasser entwickelten Verfahren (VZV) in folgenden Schritten ermittelt:

- Unmittelbar nach Erreichen des angestrebten Ausbreitmaßdurchmessers von 30 cm wurden von jeder Versuchsmischung drei Prüfkörper in einer Holzform **(400x80x50) mm** gestampft.
- An den Stirnflächen jedes Prüfkörpers wurden mittig Messpunkte befestigt, deren Abstände mit einer Messuhr auf 0,01 mm abgelesen werden konnten, vgl. Abb. A-5-13.
- Die Prüfkörper wurden auf einer mit Ölfilm versehenen Glasplatte bei einer Umgebungstemperatur von 20°C drei Tage lang getrocknet, vgl. Abb. A-5-14.
- Ab dem vierten Tag wurden die Probekörper in einem Ofen bei 60°C solange getrocknet, bis keine Längenverkürzung mehr festzustellen war.
- Das Trockenschwindmaß in % ist der Mittelwert der auf die Ausgangslängen der frisch gestampften Prüfkörper bezogenen Verkürzungen, die nicht mehr als 2 mm voneinander abweichen dürfen.

Die Abb. 5.12-1 stellt die Trockenschwindmaße der sieben verschiedenen Versuchsmischungen dar. Die dazu gehörigen erforderlichen Wassermengen wurden wie es im Abschnitt 5.10 schon erwähnt wurde, ermittelt, (vgl. Abb. 5.12-2).



**Abb. 5.12-1 Trockenschwindmaß nach "Verarbeitungszustandsverfahren" bei 30 cm Ausbreitmaß**  
Ausgangslänge der Probekörper 40 cm



**Abb. 5.12-2 Erforderliche Wassermenge der Lehmischungen bei 30 cm Ausbreitmaß nach DIN 1048 Teil 1, DIN 1045-2 und EN 12350-5**

## Zwischenauswertung

Aus Abb. 5.11-1 und Abb. 5.12-1 kann abgeleitet werden, dass **die Ermittlung des Trockenschwindmaßes nach (VZV)** praxisvorteilhafter als nach DIN 18952 Bl.2 ist. Außerdem lässt sich erkennen, dass, je größer der Größtkorn bei gleich bleibender Tonmenge (bei VZV) ist, desto niedriger ist das Trockenschwindmaß. Das Trockenschwindmaß der Versuchsmischung „UL+BS (T=10%)“ betrug 2,63%, das der Mischung „UL+BS+Spl. (T=10%)“ 2,38%.

Das Trockenschwindmaß bei der Versuchsmischung „UL+RS (T=10%)“ betrug 2,49%, bei der Versuchsmischung „UL+RS+RK (T=10%)“ 2,19%. Der Grund für die Abnahme des Trockenschwindmaßes bei den Lehmmischungen gleicher Tonmengen aber steigender Korngröße sind die geringeren erforderlichen Wassermengen, um eine gleiche Konsistenz zu bekommen. Zu erklären ist dies durch die spezifisch geringeren Oberflächen der Kies- bzw. Splittkörner im Vergleich zu den spezifischen Oberflächen der Rund- bzw. Brechsandkörner. Die Sand-, Kies-, bzw. Splittkörner mit ihrer im Vergleich zu den Tonteilchen sehr geringen spezifischen Gesamtoberfläche haben eine geringere Wasseraufnahmefähigkeit. Außerdem wurde bei diesen Versuchsmischungen eine skelettartige, aussteifende Struktur geschaffen, die der Volumenveränderung entgegenwirkt.

Bei der Ermittlung des **Trockenschwindmaßes nach DIN 18952 Bl.2**, mit der Konsistenz „Normsteife“, wurde ein umgekehrtes Ergebnis festgestellt.

Das Trockenschwindmaß der Mischung „UL+BS (T=10%)“ beträgt bei dieser Methode 1,51%, das der Mischung „UL+BS+Spl. (T=10%)“ 2,4%. Das Trockenschwindmaß der Mischung „UL+RS (T=10%)“ hat einen Wert von 1,1% erreicht, hingegen erreichte es 2,21% bei der Mischung „UL+RS+RK (T=10%)“.

Der Grund dafür liegt darin, dass dieses Verfahren die Entfernung aller Partikel größer als 2 mm von der Mischung vorschreibt. Dadurch steigt die erforderliche Wassermenge bei den Lehmmischungen mit Körnern größer als 2 mm, um die gleiche Konsistenz „Normsteife“ zu erhalten, somit wird das Trockenschwindmaß bei den Mischungen mit Kies- oder Splittkörnern höher als bei den Mischungen mit Rund- oder Brechsandkörnern sein.

In der Tabelle 5.12-1 sind die Ergebnisse des Trockenschwindmaßes nach DIN 18952 Bl.2 [41] im Vergleich zu den Ergebnissen, die mit der „Verarbeitungszustandsmethode“ (VZV) ermittelt wurden, für alle verwendeten Versuchsmischungen dargestellt.

Art der Mischung	Ausgangslänge der Probekörper (40 cm) Trockenschwindmaß nach „Verarbeitungszustandsmethode“ bei 30 cm Ausbreitmaß				Art der Mischung	Ausgangslänge der Probekörper (20 cm) Trockenschwindmaß in Prozent nach DIN 18952 bei Normsteife nach Niemeyer			
	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.		Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.
UL (T=25%)	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	UL (T=25%)	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.
	Verkürzung [mm]	27,64	28,40	28,36		Verkürzung [mm]	6,52	6,02	5,86
	Schwindmaß [%]	6,91	7,10	7,09		Schwindmaß [%]	3,26	3,01	2,93
	Mittelwert von Schwindmaß [%]	<b>7,03</b>				Mittelwert von Schwindmaß [%]	<b>3,07</b>		
UL+BS (T=15%)	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	UL+BS (T=15%)	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.
	Verkürzung [mm]	15,84	15,48	15,12		Verkürzung [mm]	4,10	3,72	3,62
	Schwindmaß [%]	3,96	3,87	3,78		Schwindmaß [%]	2,05	1,86	1,81
	Mittelwert von Schwindmaß [%]	<b>3,87</b>				Mittelwert von Schwindmaß [%]	<b>1,91</b>		
UL+BS (T=10%)	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	UL+BS (T=10%)	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.
	Verkürzung [mm]	10,76	9,60	10,08		Verkürzung [mm]	2,78	3,12	3,18
	Schwindmaß [%]	2,96	2,40	2,52		Schwindmaß [%]	1,39	1,56	1,59
	Mittelwert von Schwindmaß [%]	<b>2,63</b>				Mittelwert von Schwindmaß [%]	<b>1,51</b>		
UL+RS (T=10%)	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	UL+RS (T=10%)	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.
	Verkürzung [mm]	10,04	9,64	10,24		Verkürzung [mm]	2,58	2,02	2,04
	Schwindmaß [%]	2,51	2,41	2,56		Schwindmaß [%]	1,29	1,01	1,02
	Mittelwert von Schwindmaß [%]	<b>2,49</b>				Mittelwert von Schwindmaß [%]	<b>1,10</b>		
UL+BS+Spl. (T=10%)	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	UL+BS+Spl. (T=10%)	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.
	Verkürzung [mm]	9,00	10,00	9,56		Verkürzung [mm]	4,64	4,42	5,34
	Schwindmaß [%]	2,25	2,50	2,39		Schwindmaß [%]	2,32	2,21	2,67
	Mittelwert von Schwindmaß [%]	<b>2,38</b>				Mittelwert von Schwindmaß [%]	<b>2,40</b>		
UL+RS+RK (T=10%)	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	UL+RS+RK (T=10%)	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.
	Verkürzung [mm]	9,08	8,60	8,60		Verkürzung [mm]	4,06	4,58	4,60
	Schwindmaß [%]	2,27	2,15	2,15		Schwindmaß [%]	2,03	2,29	2,30
	Mittelwert von Schwindmaß [%]	<b>2,19</b>				Mittelwert von Schwindmaß [%]	<b>2,21</b>		
UL+BS (T=5%)	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	UL+BS (T=5%)	Nr. des Prüfkörpers	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.
	Verkürzung [mm]	5,60	5,68	5,88		Verkürzung [mm]	1,18	1,06	1,50
	Schwindmaß [%]	1,40	1,42	1,47		Schwindmaß [%]	0,59	0,53	0,57
	Mittelwert von Schwindmaß [%]	<b>1,43</b>				Mittelwert von Schwindmaß [%]	<b>0,62</b>		

**Tab. 5.12-1 Ermittlung des Trockenschwindmaßes der Versuchsmischungen nach DIN 18952 im Vergleich zur „Verarbeitungszustands-Verfahren“ bei 30 cm Ausbreitmaßdurchmesser**

## 5.13 Herstellung der Probekörper

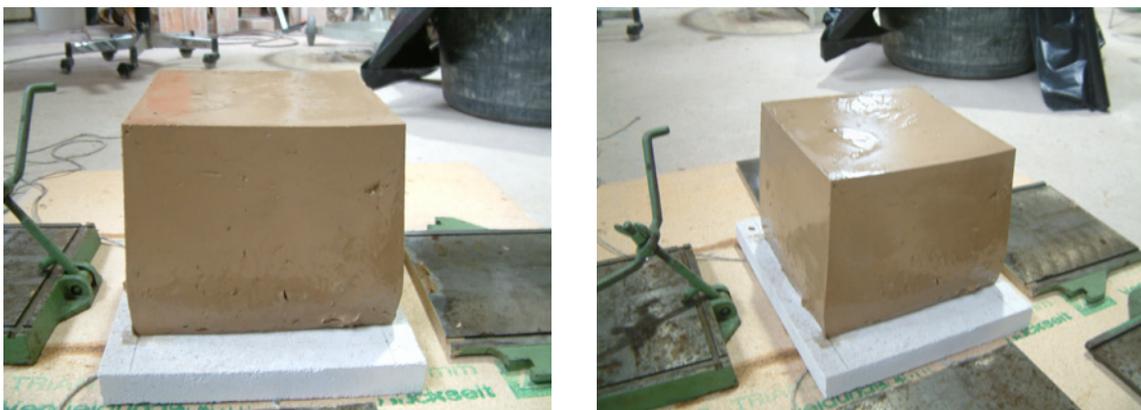
Unmittelbar nach dem Erreichen der Konsistenz mit dem Ausbreitmaß von 30 cm Durchmesser, wurden die Probekörper mit dem sogenannten Handstrichverfahren hergestellt. Dieser Verarbeitungszustand ist bei den traditionellen Lehmbauweisen im Jemen die Regel, vgl. Abschnitt 5.7.

### 5.13.1 Abmessungen der Probekörper

Die Probewürfel wurden mit einer Kantenlänge von 20x20x20 cm hergestellt, vgl. [124].

### 5.13.2 Formen der Probewürfel

Da die Probewürfel mit Lehmbaustoffen in plastischer Konsistenz hergestellt wurden, war ein sofortiges Ausschalen der Probewürfel aus stählernen Formen unmöglich. Eine Verformung der Probewürfel unter Wirkung ihrer Eigenlast wäre die Folge gewesen, (Zaboureffekt), vgl. Abb. 5.13-1. Deshalb wurden die Formen der Probekörper aus Ytong „Porenbeton“ hergestellt. Ihre Wanddicke betrug 30 mm, vgl. Abb. 5.3-4. Durch die Porosität des Porenbetons wurde den Probekörpern soviel Feuchte entzogen, dass sie nach einstündiger Lagerung in der Klimakammer ausgeschalt werden konnten, vgl. Abschnitt 5.14.2.1. Für jede Versuchsreihe wurden fünf Probewürfel hergestellt.



**Abb. 5.13-1 Verformung vom Lehmwürfel nach dem sofortigem Ausschalen der Stahlform (Zaboureffekt)**

## **5.14 Einfluss der sommerlichen und winterlichen Klimabedingungen auf die Trocknungsgeschwindigkeit und Trockendruckfestigkeit verschiedener Lehmmischungen**

### **5.14.1 Ziel der Untersuchung**

Wie in Abschnitt 4.4 dargestellt wurde, sind die im Sommer hergestellten Lehmbauteile schadensanfälliger, als die im Winter hergestellten. Traditionell haben die Jemeniten im Winter gebaut, um Bauarbeiten unter extremer Hitze und heftigem Regen im Sommer zu vermeiden. Somit konnte man auch hohe Arbeitslöhne in der Sommerzeit (wegen intensiver Beschäftigung mit Landwirtschaftsarbeiten) vermeiden [4]. Heutzutage werden Lehm bauarbeiten wegen mehrerer Einflussfaktoren auch während der Sommerzeit vorgenommen, vgl. Kapitel 3. Deshalb ist ein wichtiges Ziel dieser Arbeit, die Wirkung der sommerlichen und winterlichen Klimabedingungen in Wadi-Hadhramaut auf die Druckfestigkeit von verschiedenen Lehmmischungen zu untersuchen.

### **5.14.2 Vorgehensweise**

Der Untersuchung wurden fünf verschiedene Lehmmischungen zugrunde gelegt. Von jeder Lehmmischung wurden zwei Versuchsreihen hergestellt. Jede Versuchsreihe bestand aus fünf Probekörpern.

#### **5.14.2.1 Versuche zur sommerlichen Klimabedingungen**

Als mittleres sommerliches Klima wurden 42°C Lufttemperatur und 23% rel. Luftfeuchte angesetzt.

Die ersten fünf Reihen wurden aus den Lehmmischungen nach Tab. 5.6-2 in folgenden Schritten hergestellt:

a) **Mischvorgang** nach Abschnitt 5.8.1

b) **Mauken** nach Abschnitt 5.8.2

c) **Ausbreitmaß** nach Abschnitt 5.9

**d) Wassergehalt** nach Abschnitt 5.10

**e) Trockenschwindmaß** nach Abschnitt 5.12

**f) Herstellung der Probekörper** nach Abschnitt 5.13

**g) Trocknung**

Die Probekörper der Versuchsreihen 1 bis 5 wurden sofort nach der Herstellung in der Klimakammer unter SKB getrocknet. In der Klimakammer wurden die durchschnittliche maximale Lufttemperatur ( $T=42^{\circ}\text{C}$ ) und die mittlere relative Luftfeuchtigkeit (rel. Feuchte=23%) eingestellt. Dies sollte den Sommermonat Juli, in der Klimaregion Wadi-Hadhramaut nachstellen. Die Probekörper wurden nach einer Stunde der Einlagerung in der Klimakammer ausgeschalt. Die fünf Versuchsreihen wurden bis zur Massenkonstanz getrocknet.

Da die Probekörper dicker als 0,1 m sind, wurden die aufeinander folgenden Wägeabstände von 24 h auf drei Tage verlängert, vgl. DIN EN ISO 12570 Seite 4 [45].

Der Trocknungsvorgang bis zur Massenkonstanz dauerte bei der Lehmmischung „UL ( $T=10\%$ )“ acht Wochen, bei den Lehmmischungen „UL+RS ( $T=10\%$ )“ und „UL+BS ( $T=10\%$ )“ jeweils 7 Wochen, bei den Lehmmischungen „UL+RS+RK ( $T=10\%$ )“ und „UL+BS+Spl. ( $T=10\%$ )“ jeweils 6 Wochen, vgl. Abb. 5.17-2 bis 5.17-6

**h) Aufbringen des Abgleichmaterials – Schwefelmischung**

Unmittelbar nach dem Abschluss der Trocknung wurden die Probewürfel eben und parallel geschliffen. Da einige Lehmversuchsmischungen Kies- und Splittkörner enthielten, wurden die Druckflächen der Probewürfel durch eine Schwefelmischung nach DIN EN 12390-3: 2001(D) S. 11 [44] abgeglichen, vgl. Abb. 5.14-1 a, b, c.

- a) Die geschmolzene Schwefelmischung wurde in einem Aluminiumrahmen (Innenmasse 21x21 cm, Höhe 1 cm) auf eine Stahlplatte gegossen.



- b) Nach dem Aufbringen der Abgleichschicht auf einer der beiden Druckflächen wird der Probekörper in einem geschlossenen Plastikbehälter (ca. 5 min) aufbewahrt, bis die geschmolzene Abgleichschicht für die zweite Druckfläche bereit ist.



- c) Der Probekörper nach dem Aufbringen der Abgleichschicht auf den beiden Druckflächen. Die Abgleichschicht ist maximal 5 mm dick.

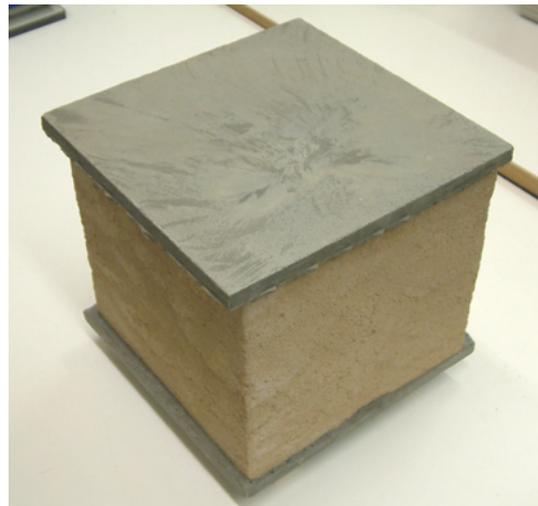


Abb. 5.14-1 von a bis c Aufbringen des Abgleichmaterials – Schwefelmischung auf den Druckflächen der Probekörper

Dabei wurde die Schwefelmischung bis zum Schmelzen erhitzt und in einem Aluminiumrahmen (Innenmaße 21x21x1 cm) auf eine Stahlplatte gegossen, siehe Abb. 5.14-1 a. Der Probekörper wurde unmittelbar von oben auf die geschmolzene Abgleichmasse aufgelegt. Die überschüssige Abgleichmasse wurde nach ca. einer Minute entfernt und der Probekörper um 180° gedreht, sodass die zweite Druckfläche abgeglichen werden konnte. Die Dicke der Abgleichschicht war <3mm, vgl. DIN EN 12390-3: 2001 (D) [44]. Der Vorteil dieser Abgleichschicht besteht darin, dass die Druckprüfung der Probekörper 30 Minuten nach dem Aufbringen der Abgleichschicht durchgeführt werden kann. Dadurch wurde die Feuchtigkeitsaufnahme der Probekörper auf das geringste Maß gehalten. Nach dem Abgleichen der Probekörperdruckflächen wurde jeder Probekörper mindestens 30 Minuten in einem geschlossenen Plastikbehälter bis zur Druckprüfung eingelagert. Die Druckprüfung erfolgte innerhalb von fünf Stunden nach dem Abgleichen.

#### **i) Ermittlung der Maße von Probekörpern**

Die Maße der Probekörper einiger Versuchsreihen liegen außerhalb der Toleranzen der Nennmaße nach DIN EN 12390-1. Deshalb wurden die Maße der Probekörper nach DIN EN 12390-3:2001 (D) Anhang B [44] ermittelt. Dabei wurden die Maße jedes Probekörpers an mehreren Stellen gemessen und die Mittelwerte berechnet. Es wurden drei Messungen in jeder der aufeinander senkrecht stehenden Kantenrichtungen (x, y, z) mit einer Genauigkeit von 0,01 mm durchgeführt. Die Mittelwerte ( $x_m$ ,  $y_m$ ) wurden aus den sechs Messungen in jeder Richtung der Lastenteilungsfläche mit einer Genauigkeit von 0,01 mm berechnet, vgl. Tabellen A-5-8 bis A-5-12.

#### **j) Durchführung der Druckprüfung**

Die Druckprüfung erfolgte im Prüflabor des Instituts für Tragkonstruktionen-Universität Karlsruhe mittels einer Prüfmaschine Typ 197-204 von Straßentest/ Messtek in Anlehnung an DIN EN 12390-3: 2001 (D) [44], vgl. Abb. 5.14-2.



**Abb. 5.14-2 Probewürfel während der Druckversuche im Versuchslabor – Institut für Tragkonstruktionen der Universität Karlsruhe**

### **Druckprüfmaschine**

Firma:	Strassentest / Messtek
Typ:	197 – 204
Max Druckkraft:	600 kN
Kolbentyp:	Plungerzylinder / eingeschliffner Kolben
Eichung:	DIN EN ISO 7500-1; Klasse 1
Maschinentyp:	Hydraulische Druckmaschine

Die Druckversuche fanden unter Normalklima im Versuchsraum 007-3 statt. Der Probekörper wurde auf der unteren Druckplatte zentriert, dabei durften die Abweichungen von der Mitte nicht größer als  $\pm 1\%$  der angegebenen Kantenlänge sein [44]. Wegen der geringen Endfestigkeiten von den Lehmprobekörpern wurde die Last abweichend von DIN EN 12390-3: 2001 (D) [44] nicht mit  $0,5 \pm 0,2$  N/mm<sup>2</sup> je Sekunde, sondern mit  $0,01$  N/mm<sup>2</sup> je Sekunde eingeleitet.

Die Würfel wurden in der Fertigungsrichtung bis zum Bruch belastet. Die typischen Bruchbilder der verschiedenen Versuchsmischungen sind in Abbildungen 5.14-3 bis 5.14-5 abgebildet, in denen auf ein Zug-Scherspannungsversagen entlang des Kegelrandes geschlossen werden kann.

## Ergebnisse

Die maximal erreichte Kraft bei der Druckprüfung wurde gespeichert und als Bruchlast  $F$  bezeichnet. Die Bruchspannung ergibt sich aus der Bruchlast ( $F$ ) bezogen auf die entsprechende Druckfläche ( $A$ ) des Probekörpers.

$$\sigma = F/A \text{ N/mm}^2$$

wobei:

$F$ = Bruchlast in [N]

$A$ = Bruchfläche (Länge<sub>Würfel</sub> ( $x_m$ ) \* Breite<sub>Würfel</sub> ( $y_m$ ))

Der Mittelwert aus fünf Druckfestigkeitsprüfungen, deren Einzelwerte nicht mehr als 20% von dem Mittelwert aller Werte abweichen dürfen, wird als Druckfestigkeit der Versuchsreihe festgelegt, vgl. Tabellen A-5-8 bis A-5-12.

### 5.14.2.2 Versuche zur winterlichen Klimabedingungen

Es wurden fünf weitere Versuchsreihen aus den Lehmischungen 1 bis 5 nach der Tab. 5.6-2 in den gleichen Schritten a bis j, wie unter Abschnitt 5.14.2.1, hergestellt. Ihre Trocknung erfolgte in der Klimakammer unter winterlichen Klimabedingungen. In der Klimakammer wurden die durchschnittliche maximale Lufttemperatur ( $T=29^\circ\text{C}$ ) und die mittlere relative Luftfeuchtigkeit (rel. Feuchte=36%) des Wintermonates Januar, in der Klimaregion Wadi-Hadhramaut-Jemen eingestellt.

Die erste Trocknung für diese Versuchsreihen erfolgte unter oben erwähnten Klimabedingungen bis zur Massenkonstanz. Sie dauerte bei der Lehmischung „UL ( $T=25\%$ )“ neun Wochen, bei den Lehmischungen „UL+RS ( $T=10\%$ )“ und „UL+BS ( $T=10\%$ )“ jeweils 7 Wochen, bei den Lehmischungen „UL+RS+RK ( $T=10\%$ )“ und „UL+BS+Spl. ( $T=10\%$ )“ jeweils sechs Wochen.

Danach wurden die Probekörper wie die unter sommerlichen Klimabedingungen getrockneten Probekörper bis zur Massenkonstanz weiter getrocknet. Die zweite Trocknungsphase dauerte bei allen Lehmischungen drei Wochen, vgl. Abschnitt 5.19.

a) UL (T=25%) Bruchkegel:  
erste erkennbare Risse



b) UL (T=25%) Bruchkegel:  
Abplatzung

c) UL (T=25%) Bruchkegel:  
Endzustand



**Abb. 5.14-3 a, b, c Typische Bruchkegelzustände während der Druckversuche bei der Lehm Mischung: „Universallehm“ „UL (T=25%)“ (vgl. Abb. 5.6-1)**

a) Bruchkegel: erste erkennbare Risse →



← b) Bruchkegel: Abplatzung



c) Bruchkegel: Endzustand →



**Abb. 5.14-4 a, b, c Typische Bruchkegelzustände während der Druckversuche bei der Lehmischung: „Universallehm“ gemagert mit mineralischen Zuschlägen mit Korndurchmesser (0-16) mm**

a) Bruchkegel: erste erkennbare Risse



b) Bruchkegel: Abplatzung



c) Bruchkegel: Endzustand



**Abb. 5.14-5 a, b, c Typische Bruchkegelzustände während der Druckversuche bei der Lehmischung: „Universallehm“ gemagert mit mineralischen Zuschlägen mit Korndurchmesser (0-2) mm**

### **5.14.2.3 Herstellung der Referenzreihe (Versuchsreihe 11)**

Als Referenzreihe wurde die Versuchsreihe 11 aus der Lehmmischung „UL+BS (T=10%)“ hergestellt. Diese Versuchsreihe aus fünf Probewürfeln wurde ebenfalls in den unter Abschnitt 5.14.2.1 erwähnten Schritten hergestellt. Die Probewürfel wurden jedoch nach DIN 18952 Blatt 2 Absatz 5 [41] getrocknet, das heißt fünf Tage lang bei 20°C. Dann wurden sie bei einer Temperatur von 60°C bis zur Massenkonstanz getrocknet.

In Tabelle 5.14-6 sind die Mittelwerte von Gewicht, Dichte und Feuchte bei der Herstellung und bei der Druckprüfung sowie die Bruchlast und die Bruchspannung für die Probekörper dieser Versuchsreihe aufgeführt.

Tabelle A-5-13 zeigt neben der mittleren Druckfestigkeit und Rohdichte dieser Versuchsreihe die Abmessungen und die Druckflächen aller fünf Würfel. Die mittlere Trockendruckfestigkeit dieser Reihe betrug 4,2 N/mm<sup>2</sup>. Sie ist 8,8% niedriger als die mittlere Trockendruckfestigkeit gleicher Mischung „UL+BS (T=10%) -N-W“, die nicht geschützt und unter WKB getrocknet ist und 40,48% höher als die mittlere Trockendruckfestigkeit gleicher Mischung „UL+BS (T=10%)-N-S“, die nicht geschützt und unter SKB getrocknet ist, vgl. Abb. 5.14-6 sowie Tab. 5.18-4.

### **5.14.3 Zwischenauswertung**

In den Tabellen 5.14-1 bis 5.14-6 wurden die Mittelwerte von Gewicht, Dichte und Feuchte bei der Herstellung und bei der Druckprüfung sowie die Bruchlast und die Bruchspannung für die Versuchsreihen 1 bis 11 dargestellt.

In den Tabellen A-5-8 bis A-5-13 wurden, neben der mittleren Druckfestigkeit und Rohdichte jeder Versuchsreihe, die Abmessungen und die Druckfläche jedes Würfels dargestellt.

Bei allen fünf Lehmmischungen haben die unter WKB getrockneten Probekörper höhere Trockendruckfestigkeiten (TDF) als die Probekörper, die unter SKB getrocknet wurden. Die mittlere TDF der Versuchsreihe 1 von der Lehmmischung „UL (T=25%) -N-S“, getrocknet unter SKB, betrug 2,01 N/mm<sup>2</sup>.

Ausgangsmaterial „Universallehm“, UL (T=25%) nicht geschützt		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
getrocknet unter winterl. KB	W 6	15,298	3,82	29,63	11,85	1,81	0,41	187,46	5,2
	W /	15,248	3,81	29,63	11,818	1,83	0,47	168,19	4,7
	W 8	15,534	3,88	29,63	12,041	1,83	0,48	167,29	4,67
	W 9	15,220	3,81	29,63	11,795	1,85	0,46	133,5	3,79
	W10	15,359	3,84	29,63	11,902	1,82	0,45	140,5	3,91
<b>Mittelwert</b>		<b>15,332</b>	<b>3,83</b>	<b>29,63</b>	<b>12,055</b>	<b>1,83</b>	<b>0,45</b>	<b>159,39</b>	<b>4,45</b>
getrocknet unter sommerl. KB	S 6	15,448	3,86	29,63	11,965	1,8	0,4	66,3	1,82
	S 7	15,453	3,86	29,63	11,97	1,81	0,41	79,8	2,2
	S 8	15,709	3,93	29,63	12,178	1,82	0,49	67,7	1,87
	S 9	15,514	3,88	29,63	12,022	1,81	0,45	69	1,91
	S 10	15,657	3,91	29,63	12,139	1,85	0,5	80,54	2,25
<b>Mittelwert</b>		<b>15,556</b>	<b>3,89</b>	<b>29,63</b>	<b>12,055</b>	<b>1,82</b>	<b>0,45</b>	<b>72,67</b>	<b>2,01</b>

**Tab. 5.14-1 Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials „UL (T=25%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)**

„Universallehm“ gemagert mit Rundsand, UL + RS (T=10%) nicht geschützt		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
getrocknet unter winterl. KB	W31	16,528	4,13	16,48	14,225	1,95	0,25	144,61	3,75
	W32	16,55	4,14	16,48	14,24	1,96	0,22	132	3,42
	W33	16,739	4,18	16,48	14,405	1,97	0,24	149,75	3,89
	W34	16,497	4,12	16,48	14,193	1,96	0,21	140,85	3,68
	W35	16,557	4,14	16,48	14,253	1,95	0,27	142,82	3,7
<b>Mittelwert</b>		<b>16,574</b>	<b>4,14</b>	<b>16,48</b>	<b>14,263</b>	<b>1,96</b>	<b>0,24</b>	<b>142,01</b>	<b>3,69</b>
getrocknet unter sommerl. KB	S 16	16,754	4,19	16,48	14,415	1,97	0,22	86,3	2,24
	S 17	16,983	4,25	16,48	14,617	2	0,25	83,2	2,18
	S 18	17,078	4,27	16,48	14,701	1,98	0,27	78,7	2,04
	S 19	16,705	4,18	16,48	14,373	1,98	0,22	79,8	2,08
	S 20	16,783	4,2	16,48	14,443	1,98	0,24	91,3	2,36
<b>Mittelwert</b>		<b>16,861</b>	<b>4,22</b>	<b>16,48</b>	<b>14,510</b>	<b>1,98</b>	<b>0,24</b>	<b>83,86</b>	<b>2,18</b>

**Tab. 5.14-2 Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) „UL + RS (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)**

„Universallehm“ gemagert mit Brechsand, UL + BS (T=10%) nicht geschützt		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
getrocknet unter winterl. KB	W26	16,777	4,19	17,08	14,371	1,97	0,29	189,00	4,95
	W27	16,844	4,21	17,08	14,418	1,96	0,22	177,23	4,61
	W28	16,726	4,18	17,08	14,322	1,97	0,25	176,00	4,6
	W29	16,625	4,16	17,08	14,238	1,96	0,27	174,27	4,55
	W30	16,922	4,23	17,08	14,491	1,96	0,26	161,00	4,16
<b>Mittelwert</b>		<b>16,779</b>	<b>4,19</b>	<b>17,08</b>	<b>14,368</b>	<b>1,96</b>	<b>0,26</b>	<b>175,50</b>	<b>4,57</b>
getrocknet unter sommerl. KB	S 26	17,026	4,26	17,08	14,584	1,99	0,29	104,6	2,71
	S 27	16,86	4,22	17,08	14,432	1,97	0,22	89,8	2,33
	S 28	16,918	4,23	17,08	14,486	1,95	0,25	96,4	2,48
	S 29	16,878	4,22	17,08	14,455	1,96	0,27	95,2	2,46
	S 30	16,983	4,25	17,08	14,543	1,97	0,26	98,2	2,54
<b>Mittelwert</b>		<b>16,933</b>	<b>4,24</b>	<b>17,08</b>	<b>14,500</b>	<b>1,97</b>	<b>0,26</b>	<b>96,84</b>	<b>2,50</b>

Tab. 5.14-3 Auswertung der Versuchsreihen Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL + BS (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)

„Universallehm“ gemagert mit Rundsand+ Rundkies, UL+RS+RK (T=10%) nicht geschützt		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
getrocknet unter winterl. KB	W36	17,463	4,37	14,56	15,277	2,05	0,22	98,21	2,55
	W37	17,426	4,36	14,56	15,242	2,06	0,2	104,97	2,75
	W38	17,409	4,35	14,56	15,233	2,04	0,24	96,84	2,51
	W39	17,622	4,41	14,56	15,427	2,06	0,29	86,1	2,31
	W40	17,53	4,38	14,56	15,342	2,05	0,26	90,89	2,36
<b>Mittelwert</b>		<b>17,490</b>	<b>4,37</b>	<b>14,56</b>	<b>15,304</b>	<b>2,05</b>	<b>0,24</b>	<b>95,40</b>	<b>2,50</b>
getrocknet unter sommerl. KB	S 36	17,751	4,44	14,56	15,537	2,04	0,27	82,2	2,1
	S 37	17,688	4,42	14,56	15,477	2,04	0,24	72,3	1,86
	S 38	17,754	4,44	14,56	15,53	2,04	0,21	70,9	1,82
	S 39	17,831	4,46	14,56	15,601	2,04	0,23	72,8	1,87
	S 40	17,618	4,4	14,56	15,416	2,04	0,24	73,1	1,88
<b>Mittelwert</b>		<b>17,728</b>	<b>4,43</b>	<b>14,56</b>	<b>15,512</b>	<b>2,04</b>	<b>0,24</b>	<b>74,26</b>	<b>1,91</b>

Tab. 5.14-4 Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) und Rundkies (2-16 mm) „UL+RS+RK (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)

„Universallehm“ gemagert mit Brechsand + Splitt, UL+BS+Spl. (T=10%) nicht geschützt		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
getrocknet unter winterl. KB	W41	17,387	4,35	15,2	15,129	2,02	0,24	123,27	3,2
	W42	17,213	4,3	15,2	14,972	1,98	0,2	116,83	3
	W43	17,133	4,28	15,2	14,907	2	0,23	113,47	2,95
	W44	17,379	4,34	15,2	15,119	2	0,22	106,43	2,74
	W45	17,58	4,4	15,2	15,302	2,01	0,27	112,33	2,87
<b>Mittelwert</b>		<b>17,338</b>	<b>4,33</b>	<b>15,20</b>	<b>15,086</b>	<b>2,00</b>	<b>0,23</b>	<b>114,47</b>	<b>2,95</b>
getrocknet unter sommerl. KB	S 46	17,815	4,45	15,2	15,503	2,03	0,25	85,14	2,17
	S 47	17,647	4,41	15,2	15,355	2,01	0,24	78,55	2,01
	S 48	17,74	4,44	15,2	15,433	2,02	0,22	88,5	2,26
	S 49	17,649	4,41	15,2	15,351	2,02	0,2	84,39	2,16
	S 50	17,975	4,49	15,2	15,639	2,02	0,23	94,96	2,41
<b>Mittelwert</b>		<b>17,765</b>	<b>4,44</b>	<b>15,20</b>	<b>15,456</b>	<b>2,02</b>	<b>0,23</b>	<b>86,31</b>	<b>2,20</b>

Tab. 5.14-5 Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) und Splitt (2-16 mm) „UL+BS+Spl. (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Luftfeuchte=36%)

„Universallehm“ gemagert mit Brechsand, UL + BS (T=10%) nicht geschützt		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
getrocknet unter NB	56	16,986	4,25	17,08	14,508	1,96	0	162,48	4,21
	57	16,908	4,23	17,08	14,441	1,95	0	182,55	4,72
	58	16,929	4,23	17,08	14,459	1,96	0	163,00	4,21
	59	16,968	4,24	17,08	14,493	1,94	0	145,28	3,76
	60	16,947	4,24	17,08	14,475	1,96	0	158,48	4,10
<b>Mittelwert</b>		<b>16,948</b>	<b>4,24</b>	<b>17,08</b>	<b>14,475</b>	<b>1,95</b>	<b>0,0</b>	<b>162,36</b>	<b>4,20</b>

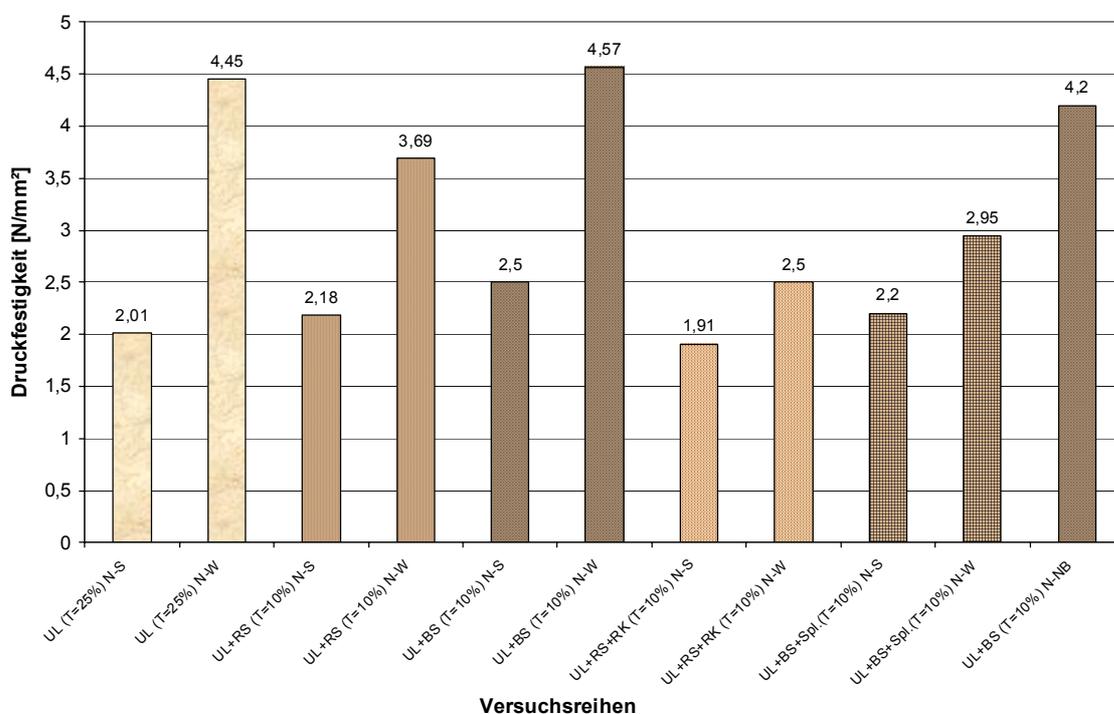
Tab. 5.14-6 Auswertung der Versuchsreihe 11 des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL+BS (T=10%)“, getrocknet fünf Tage bei 20°C und danach wurde die Trocknung bei (T=60°C) bis zur Massenkonstanz beschleunigt, vgl. DIN 18952 Blatt 2

Die Trockendruckfestigkeit der Versuchsreihe 6 gleicher Lehmischung „UL (T=25%)-N-W“ getrocknet unter WKB war 121% höher, und betrug 4,45 N/mm<sup>2</sup>. Die mittlere TDF der Versuchsreihe 2 der Mischung „UL+RS (T=10%)“, getrocknet unter SKB, betrug 2,18 N/mm<sup>2</sup> und bei der Trocknung unter (WKB) betrug sie 3,69 N/mm<sup>2</sup> bei der Versuchsreihe 7, mit einer Erhöhung von ca. 69,3%.

Die mittlere TDF der Versuchsreihe 8 von der Mischung „UL+BS (T=10%)“ vergrößerte sich bei Trocknung unter WKB im Vergleich zur Trocknung unter SKB um 82,8%, von 2,5 kN/mm<sup>2</sup> auf 4,57 kN/mm<sup>2</sup>.

Die mittlere TDF der Versuchsreihe 4 der Mischung „UL+RS+RK (T=10%) -N-S“, getrocknet unter SKB, betrug 1,91 N/mm<sup>2</sup> und bei der Trocknung unter WKB betrug sie 2,5 N/mm<sup>2</sup> bei der Versuchsreihe 9, mit einer Erhöhung von ca. 30,9%.

Nicht anders war es auch bei den Versuchsreihen der Mischung „UL+BS+Spl. (T=10%)“. Die mittlere TDF der Versuchsreihe 5 dieser Mischung, getrocknet unter SKB betrug 2,2 N/mm<sup>2</sup>. Bei der Trocknung unter WKB erreichte sie einen Wert von 2,95 N/mm<sup>2</sup>, mit einer Erhöhung von 34,1%, vgl. Abb. 5.14-6.



**Abb. 5.14-6 Mittlere Endfestigkeiten von den nicht geschützten Versuchsreihen getrocknet unter SKB (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und unter WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%) im Vergleich zu der Endfestigkeit der Versuchsreihe Nr. 11 (Referenzreihe) getrocknet bei (T=60°C) mit 5 tägiger Vortrocknung bei 20°C**

Aus den Abschnitten 5.14.2.1 und 5.14.2.2 ist ersichtlich, dass die Trocknungsgeschwindigkeit gleicher Lehmmischungen bei der Trocknung unter SKB höher ist als unter WKB. Der Grund dafür sind die unter SKB höhere Umgebungstemperatur (42°C) und die niedrige relative Luftfeuchtigkeit (23%).

Die Schwindrisse an den unter SKB getrockneten Probekörpern waren zahlenmäßig mehr, breiter und länger als die Schwindrisse an den unter WKB getrockneten Probekörpern gleicher Lehmmischungen, siehe Abb. 5.14-7. Der Grund dafür ist die schnellere Austrocknung der Oberflächen von Probekörpern im Vergleich zu ihren Kernen bei der Trocknung unter SKB. Die Folge davon sind relativ große Schwindspannungen, sodass breitere und längere Schwindrisse entstehen.

Das ist ein Grund für die niedrigeren Trockendruckfestigkeiten der Versuchsreihen, die unter SKB getrocknet wurden.

## **5.15 Einfluss der Schutzschalen auf die Trocknungsgeschwindigkeit und die Trockendruckfestigkeit bei verschiedenen Lehmmischungen**

### **5.15.1 Ziel der Untersuchung**

In Abschnitt 5.14 wurde gezeigt, dass die schnelle Trocknung der Probekörper unter SKB zur Entstehung von mehr Schwindrissen und somit zur Druckfestigkeitsminderung geführt hat. Es stellte sich logischerweise die Frage:

***Welchen Einfluss hat die Verzögerung der Trocknung durch Schutzschalen auf die Druckfestigkeit der Probekörper?***

Eine klare Antwort auf diese Frage zu bekommen, ist das Ziel der Untersuchung in diesem Abschnitt.

UL+BS (T=10%) - N - W

mittlere Trockendruckfestigkeit = **4.57** N/mm<sup>2</sup>



29-W

getrocknet ohne Schutzschalen

UL+BS (T=10%) - N - S

mittlere Trockendruckfestigkeit = **2.5** N/mm<sup>2</sup>



27

Schwindrisse: meistens nur ein Schwindriss mit einer Länge > L/2\*

Schwindrisse: mehrere Schwindrisse mit einer Länge > L/2\*

UL+BS (T=10%) - G - W

mittlere Trockendruckfestigkeit = **4.75** N/mm<sup>2</sup>



18-W

getrocknet mit Schutzschalen

UL+BS (T=10%) - G - S

mittlere Trockendruckfestigkeit = **2.66** N/mm<sup>2</sup>



21

Schwindrisse: keine sichtbaren Schwindrisse

Schwindrisse: wenige Schwindrisse mit einer Länge ≤ L/5\*



**Abb. 5.14-7 Einfluss der sommerlichen und winterlichen Klimabedingungen auf die Schwindrisse bei geschützten und nicht geschützten Probewürfeln der Mischung: „UL+BS (T=10%)“**

\* L: die Kantenlänge der Probewürfel

### **5.15.2 Vorgehensweise**

Um den Einfluss der langsamen Trocknung zu untersuchen, wurden die fünf Versuchsreihen von 12 bis 16 aus den Lehmischungen nach der Tab. 5.6-2 in den gleichen Schritten wie unter Abschnitt 5.14.2.1 hergestellt. Der einzige Unterschied zu den Versuchsreihen 1 bis 5 besteht darin, dass die Probekörper während des Trocknungsvorgangs nicht ausgeschalt wurden. Sie blieben „geschützt“ bis ihre Massenkonstanz nach EN ISO 12570 [45] erreicht wurde. Die Trocknung erfolgte in der Klimakammer unter SKB.

### **5.15.3 Zwischenauswertung**

In den Tabellen 5.15-1 bis 5.15-5 ist die Auswertung der geschützten Versuchsreihen 12 bis 16 im Vergleich zu der Auswertung der nicht geschützten Versuchsreihen 1 bis 5, die im Abschnitt 5.14.2.1 erwähnt wurden, dargestellt. Die Mittelwerte von Gewicht, Dichte und Feuchte bei der Herstellung und bei der Druckprüfung sowie die Bruchlast und die Bruchspannung sind für die oben erwähnten Versuchsreihen dargestellt.

In den Tabellen A-5-14 bis A-5-18 wurden neben den mittleren Druckfestigkeiten und Rohdichten jeder Versuchsreihe die Abmessungen und die Druckflächen jedes Würfels dargestellt.

Bei allen fünf verschiedenen Lehmischungen (ohne Ausnahme) haben die während des Trocknungsprozesses geschützten Probekörper höhere Trockendruckfestigkeiten als die Probekörper, die während der Trocknung nicht geschützt wurden, die also eine Stunde nach der Herstellung ausgeschalt wurden.

Die mittlere TDF der geschützten Versuchsreihe 12 der Mischung „UL (T=25%)-G-S“ betrug 2,41 kN/mm<sup>2</sup>, 19,90% höher als die mittlere Trockendruckfestigkeit der Versuchsreihe 1 gleicher Mischung „UL (T=10%) -N-S“, die nicht geschützt war, und deren Trockendruckfestigkeit nur 2,01 N/mm<sup>2</sup> betrug.

Bei der Lehmischung Universallehm gemagert mit Rundsand (0-2 mm) „UI+RS (T=10%)“ betrug die TDF der nicht geschützten Versuchsreihe 2 „UL+RS (T=10%) -N-S“ 2,18 N/mm<sup>2</sup>, wobei sie bei der geschützten Versuchsreihe 13 2,33 N/mm<sup>2</sup> betrug, eine Erhöhung von 6,88%.

Ausgangsmaterial „Universallehm“, UL (T=25%) getrocknet unter SKB		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
geschützt	S 1	15,598	3,9	29,63	12,088	1,82	0,46	87,27	2,4
	S 2	15,608	3,9	29,63	12,097	1,83	0,47	90,49	2,5
	S 3	15,622	3,91	29,63	12,104	1,79	0,44	83,07	2,23
	S 4	15,729	3,93	29,63	12,186	1,81	0,43	90,49	2,44
	S 5	15,421	3,86	29,63	11,95	1,79	0,45	91,29	2,47
<b>Mittelwert</b>		<b>15,596</b>	<b>3,9</b>	<b>29,63</b>	<b>12,085</b>	<b>1,81</b>	<b>0,45</b>	<b>88,52</b>	<b>2,41</b>
nicht geschützt	S 6	15,448	3,86	29,63	11,965	1,8	0,4	66,3	1,82
	S 7	15,453	3,86	29,63	11,97	1,81	0,41	79,8	2,2
	S 8	15,709	3,93	29,63	12,178	1,82	0,49	67,7	1,87
	S 9	15,514	3,88	29,63	12,022	1,81	0,45	69	1,91
	S 10	15,657	3,91	29,63	12,139	1,85	0,5	80,54	2,25
<b>Mittelwert</b>		<b>15,556</b>	<b>3,89</b>	<b>29,63</b>	<b>12,055</b>	<b>1,82</b>	<b>0,45</b>	<b>72,67</b>	<b>2,01</b>

**Tab. 5.15-1 Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials „UL (T=25%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)**

„Universallehm“ + Rundsand (0-2) mm, UL + RS (T=10%) getrocknet unter SKB		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
geschützt	S 11	16,802	4,2	16,48	14,458	1,97	0,23	84,94	2,2
	S 12	16,787	4,2	16,48	14,444	1,96	0,22	81,85	2,1
	S 13	16,844	4,21	16,48	14,497	1,96	0,25	107,06	2,76
	S 14	16,745	4,19	16,48	14,415	1,97	0,27	91,16	2,38
	S 15	16,929	4,23	16,48	14,569	1,97	0,24	85,69	2,21
<b>Mittelwert</b>		<b>16,822</b>	<b>4,21</b>	<b>16,48</b>	<b>14,477</b>	<b>1,97</b>	<b>0,24</b>	<b>90,14</b>	<b>2,33</b>
nicht geschützt	S 16	16,754	4,19	16,48	14,415	1,97	0,22	86,3	2,24
	S 17	16,983	4,25	16,48	14,617	2	0,25	83,2	2,18
	S 18	17,078	4,27	16,48	14,701	1,98	0,27	78,7	2,04
	S 19	16,705	4,18	16,48	14,373	1,98	0,22	79,8	2,08
	S 20	16,783	4,2	16,48	14,443	1,98	0,24	91,3	2,36
<b>Mittelwert</b>		<b>16,861</b>	<b>4,22</b>	<b>16,48</b>	<b>14,510</b>	<b>1,98</b>	<b>0,24</b>	<b>83,86</b>	<b>2,18</b>

**Tab. 5.15-2 Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) „UL + RS (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)**

„Universallehm“ + Brechsand (0-2) mm, UL + BS (T=10%) getrocknet unter SKB		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
geschützt	S 21	16,724	4,18	17,08	14,32	1,96	0,25	110	2,86
	S 22	16,525	4,13	17,08	14,147	1,94	0,23	102,6	2,6
	S 23	16,685	4,17	17,08	14,289	1,95	0,27	95,43	2,47
	S 24	16,99	4,25	17,08	14,552	1,95	0,28	106,3	2,74
	S 25	17,012	4,25	17,08	14,568	1,97	0,26	100,7	2,62
<b>Mittelwert</b>		<b>16,787</b>	<b>4,2</b>	<b>17,08</b>	<b>14,375</b>	<b>1,95</b>	<b>0,26</b>	<b>103,01</b>	<b>2,66</b>
nicht geschützt	S 26	17,026	4,26	17,08	14,584	1,99	0,29	104,6	2,71
	S 27	16,86	4,22	17,08	14,432	1,97	0,22	89,8	2,33
	S 28	16,918	4,23	17,08	14,486	1,95	0,25	96,4	2,48
	S 29	16,878	4,22	17,08	14,455	1,96	0,27	95,2	2,46
	S 30	16,983	4,25	17,08	14,543	1,97	0,26	98,2	2,54
<b>Mittelwert</b>		<b>16,933</b>	<b>4,24</b>	<b>17,08</b>	<b>14,500</b>	<b>1,97</b>	<b>0,26</b>	<b>96,84</b>	<b>2,50</b>

**Tab. 5.15-3 Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL + BS (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)**

„Universallehm“ + Rundsand (0-2) mm + Rundkies (2-16) mm, UL+RS+RK (T=10%) getrocknet unter SKB		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
geschützt	S 31	17,702	4,43	14,56	15,485	2,03	0,21	82,19	2,1
	S 32	17,693	4,42	14,56	15,48	2,05	0,23	70,63	1,82
	S 33	17,931	4,48	14,56	15,694	2,03	0,27	83,01	2,11
	S 34	17,755	4,44	14,56	15,537	2,03	0,25	75,94	1,95
	S 35	17,806	4,45	14,56	15,58	2,04	0,24	86,67	2,23
<b>Mittelwert</b>		<b>17,777</b>	<b>4,44</b>	<b>14,56</b>	<b>15,555</b>	<b>2,04</b>	<b>0,24</b>	<b>79,69</b>	<b>2,04</b>
nicht geschützt	S 36	17,751	4,44	14,56	15,537	2,04	0,27	82,2	2,1
	S 37	17,688	4,42	14,56	15,477	2,04	0,24	72,3	1,86
	S 38	17,754	4,44	14,56	15,53	2,04	0,21	70,9	1,82
	S 39	17,831	4,46	14,56	15,601	2,04	0,23	72,8	1,87
	S 40	17,618	4,4	14,56	15,416	2,04	0,24	73,1	1,88
<b>Mittelwert</b>		<b>17,728</b>	<b>4,43</b>	<b>14,56</b>	<b>15,512</b>	<b>2,04</b>	<b>0,24</b>	<b>74,26</b>	<b>1,91</b>

**Tab. 5.15-4 Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) und Rundkies (2-16 mm) „UL + RS + RK (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)**

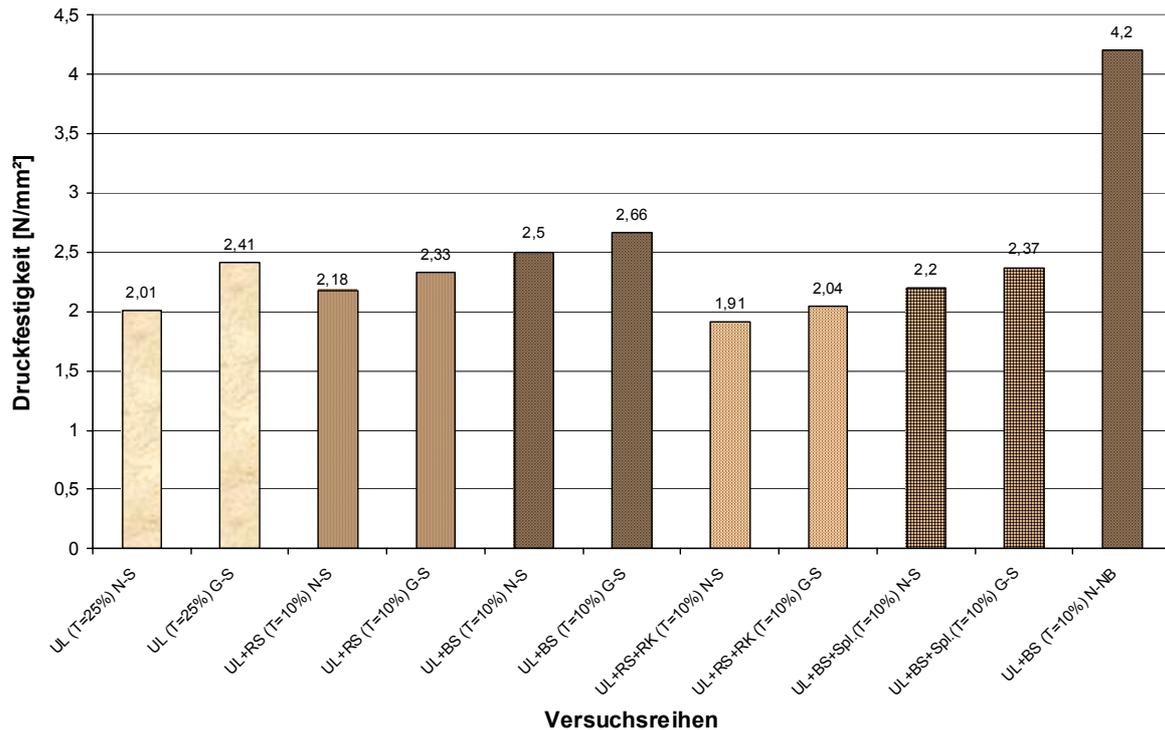
„Universallehm“ + Brechsand (0-2) mm + Splitt (2-16) mm, UL+BS+Spl. (T=10%) getrocknet unter SKB		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[KN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
geschützt	S 41	18,087	4,52	15,2	15,743	2,02	0,27	97,98	2,48
	S 42	17,728	4,43	15,2	15,42	2,02	0,2	87,66	2,24
	S 43	17,679	4,42	15,2	15,379	2,01	0,21	92,03	2,36
	S 44	17,731	4,43	15,2	15,425	1,99	0,22	94,67	2,42
	S 45	17,936	4,48	15,2	15,605	2,01	0,23	93,08	2,36
<b>Mittelwert</b>		<b>17,832</b>	<b>4,46</b>	<b>15,20</b>	<b>15,514</b>	<b>2,01</b>	<b>0,23</b>	<b>93,08</b>	<b>2,37</b>
nicht geschützt	S 46	17,815	4,45	15,2	15,503	2,03	0,25	85,14	2,17
	S 47	17,647	4,41	15,2	15,355	2,01	0,24	78,55	2,01
	S 48	17,74	4,44	15,2	15,433	2,02	0,22	88,5	2,26
	S 49	17,649	4,41	15,2	15,351	2,02	0,2	84,39	2,16
	S 50	17,975	4,49	15,2	15,639	2,02	0,23	94,96	2,41
<b>Mittelwert</b>		<b>17,765</b>	<b>4,44</b>	<b>15,20</b>	<b>15,456</b>	<b>2,02</b>	<b>0,23</b>	<b>86,31</b>	<b>2,20</b>

**Tab. 5.15-5 Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) und Splitt (2-16 mm) „UL + BS + Spl. (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)**

Bei der Lehmischung Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) betrug die mittlere TDF der nicht geschützten Versuchsreihe 3 „UL+BS (T=10%)- N-S“ 2,50 N/mm<sup>2</sup>, wobei sie 2,66 N/mm<sup>2</sup> bei der geschützten Versuchsreihe 14 betrug, eine Erhöhung von 6,4%.

Die mittlere TDF der nicht geschützten Versuchsreihe 4 der Lehmischung Universallehm gemagert mit Rundsand (0-2 mm) und Rundkies (2-16 mm) „UL+RS+RK (T=10%) -N-S“ betrug 1,91 N/mm<sup>2</sup>, wobei sie bei der geschützten Versuchsreihe 15 „UL+RS+RK (T=10%)-G-S“ 2,04 N/mm<sup>2</sup> betrug, eine Erhöhung von 6,81%.

Bei der Lehmischung Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) und Splitt (2-16 mm) betrug die mittlere TDF der nicht geschützten Versuchsreihe 5 „UL+BS+Spl. (T=10%) -N-S“ 2,20 N/mm<sup>2</sup>, wobei sie bei der geschützten Versuchsreihe 16 „UL+BS+Spl. (T=10%) -G-S“ 2,37 N/mm<sup>2</sup> betrug, eine Erhöhung von 7,73%, vgl. Abb. 5.15-1.



**Abb. 5.15-1 Mittlere Endfestigkeiten von geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen getrocknet unter SKB (T=42°C, rel. Feuchte=23%) im Vergleich zu der Endfestigkeit von Reihe Nr. 11 (Referenzreihe) aetrocknet bei 60°C mit 5 tägiger Vortrocknung bei 20°C**

Der Trocknungsvorgang dauerte bei der Versuchsreihe 12 der Lehmischung „UL (T=25%)-G-S“ acht Wochen. Bei den Versuchsreihen 13, 14, 15, 16 der Lehmischungen „UL+RS(T=10%)-G-S“, „UL+BS(T=10%)-G-S“, „UL+RS+RK(T=10%)-G-S“ und „UL+BS+Spl. (T=10%)-G-S“ hat der Trocknungsvorgang 7 Wochen gedauert.

Aus der Trocknungsdauer lässt sich ableiten, dass die Schutzschalen keinen großen Einfluss auf die gesamte Trocknungsdauer haben. Die Gesamttrocknungsdauer blieb unveränderlich bei allen fünf Versuchsmischungen außer bei den Lehmischungen „UL+RS+RK(T=10%)“ und „UL+BS+Spl.(T=10%)“. Die Trocknungsdauer ist bei den geschützten Versuchsreihen eine Woche länger als bei den nicht geschützten Versuchsreihen gewesen.

Die Wirkung der Schutzschalen betrifft eher den Trocknungsverlauf als die gesamte Trocknungsdauer. Sie verzögern die Trocknung in der ersten Trocknungsphase, siehe Abb. 5.17-2 bis 5.17-6.

Dabei ist z. B. zu erkennen, dass eine Woche nach der Herstellung der Feuchtegehalt bei der nicht geschützten Versuchsreihe 1 „UL (T=25%) -N-S“ nur noch 3,62% war, während er bei der geschützten Versuchsreihe 6 gleicher Mischung „UL (T=25%)-G-S“ immer noch 18% betrug. Dadurch entstehen weniger Schwindspannungen und folglich weniger Schwindrisse bei den geschützten Versuchsreihen als bei den nicht geschützten

Versuchsreihen, vgl. Abb. 5.14-7. Darin ist vermutlich die relative Erhöhung der mittleren Trockendruckfestigkeiten der geschützten Versuchsreihen begründet.

Interessant ist dabei, dass die Wirkung der Schutzschalen umso größer ausfällt, je höher die Tonmenge ist.

## **5.16 Einfluss der Schutzschalen auf die Trocknungsgeschwindigkeit und die Trockendruckfestigkeit von Versuchsreihen gleicher mineralischer Zuschläge verschiedener Tonmengen**

### **5.16.1 Ziel der Untersuchung**

Aus dem Abschnitt 5.15 lässt sich feststellen, dass die positive Wirkung der Schutzschalen auf die Trockendruckfestigkeit der Versuchsreihe mit Tonmenge 25% höher als bei den Versuchsreihen mit 10% Tonmenge war, obwohl alle Versuchsreihen unter WKB getrocknet wurden. Eine klare Aussage über den Einfluss der Schutzschalen auf die Trockendruckfestigkeit von Versuchsreihen mit verschiedenen Tonmengen und gleichen mineralischen Zuschlägen ist das Ziel der Untersuchung in diesem Abschnitt.

### **5.16.2 Vorgehensweise**

Es wurden die folgenden Versuchsreihen (jeweils aus fünf Probewürfeln) hergestellt und unter WKB getrocknet:

**Versuchsreihe 17:** Universallehm „UL (T=25%) -G-W“

**Versuchsreihe 18:** Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm), Mischungsverhältnis (60:40), nicht geschützt „UL+BS (T=15%) -N-W“

**Versuchsreihe 19:** Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm), Mischungsverhältnisse (60:40), geschützt „UL+BS (T=15%) -G-W“

**Versuchsreihe 20:** Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm), Mischungsverhältnisse (40:60), geschützt „UL+BS (T=10%) -G-W“

**Versuchsreihe 21:** Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm), Mischungsverhältnisse (20:80), geschützt „UL+BS (T=5%) -G-W“

**Versuchsreihe 22:** Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm), Mischungsverhältnisse (20:80), nicht geschützt „UL+BS (T=5%) -N-W“

Die Versuchsreihen wurden in den gleichen Schritten a bis j, die im Abschnitt 5.14.2.1 erwähnt wurden, hergestellt. Sie wurden in der ersten Trocknungsphase (bis zur Massenkonstanz) in der Klimakammer unter (WKB) (T=29°C, rel. Feuchte=36°C) getrocknet. Die zweite Trocknungsphase erfolgte bis zur Massenkonstanz unter SKB,

sodass diese Versuchsreihen mit den Versuchsreihen, die in Abschnitten 15.14 und 15.15 behandelt wurden, verglichen werden können.

### **5.16.3 Zwischenauswertung**

Der Gesamttrocknungsvorgang dauerte bei der Versuchsreihe 17 „UL (T=25%) -G-W“ elf Wochen. Bei den Versuchsreihen 18, 19, 20 „UL+BS (T=15%) -N-W“, „UL+BS(T=15%)-G-W“, „UL+BS(T=10%)-G-W“ hat der Gesamttrocknungsvorgang zehn Wochen gedauert. Der Trocknungsvorgang dauerte bei den Versuchsreihen 21, 22 „UL+BS (T=5%) -G-W“, „UL+BS(T=5%) -N-W insgesamt acht Wochen.

Die geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen gleicher Lehmmischungen haben gleiche Gesamttrocknungsdauer gehabt. Das zeigt, dass auch bei der Trocknung unter WKB die Wirkung der Schutzschalen eher den Trocknungsverlauf als die Trocknungsdauer betrifft, vgl. Abb. 5.17-2 bis 5.17-4.

In den Tabellen 5.16-1 bis 5.16-4 ist die Auswertung der Versuchsreihen von 17 bis 22 sowie 6 und 8 dargestellt. Die Mittelwerte von Gewicht, Dichte und Feuchte bei der Herstellung und bei der Druckprüfung sowie die Bruchlast und die Bruchspannung sind für die oben erwähnten Versuchsreihen dargestellt. In den Tabellen A-5-19 bis A-5-22 wurden neben den mittleren Druckfestigkeiten und Rohdichten jeder Versuchsreihe die Abmessungen und die Druckfläche jedes Würfels dargestellt.

In den Abbildungen A-5-15 bis A-5-22 wurden die typischen Kraft-Weg-Diagramme dieser Versuchsreihen dargestellt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die tatsächliche Druckfestigkeit im Durchschnitt siebenmal so hoch wie die zulässige Druckspannung nach DIN 18954, vgl. Tab. A-5-23. (Zum Vergleich wurden in den Abb. A-5-23 bis A-5-25 die Kraft-Weg-Diagramme der verwendeten Lehmmischungen „UL+RS (T=10%)“, „UL+RS+RK (T=10%) und „UL+BS+Spl. (T=10)“ dargestellt).

Bei allen vier verschiedenen Lehmmischungen haben die während des Trocknungsprozesses geschützten Versuchsreihen höhere Trockendruckfestigkeiten als die Versuchsreihen, die während der Trocknung nicht geschützt wurden.

Interessant ist dabei, dass der Einfluss der Schutzschalen mit dem Tonanteil in der betroffenen Lehmmischung zunimmt.

Die mittlere Trockendruckfestigkeit der geschützten Versuchsreihe 17 der Mischung „UL (T=25%) -G-W“ betrug 4,96 N/mm<sup>2</sup>. Sie ist 11,46% höher als die mittlere TDF der Versuchsreihe 6 „UL (T=25%) -N-W“, die nicht geschützt ist, und deren TDF einen Wert von 4,45 N/mm<sup>2</sup> erreichte.

Bei der nicht geschützten Versuchsreihe 18 „UL+BS (T=15%)-N-W“ betrug die Trockendruckfestigkeit 5,05 N/mm<sup>2</sup>, wobei sie bei der geschützten Versuchsreihe 19 „UL+BS (T=15%)-G-W“ 5,4 N/mm<sup>2</sup> betrug, mit einer Erhöhung von 6,88%.

Ausgangsmaterial „Universallehm“, UL (T=25%)		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
geschützt	W 1	15,327	3,83	29,63	11,876	1,81	0,44	196,16	5,47
	W 2	15,345	3,84	29,63	11,886	1,82	0,41	164,97	4,62
	W 3	15,418	3,85	29,63	11,947	1,83	0,45	160,11	4,45
	W 4	15,34	3,84	29,63	11,888	1,81	0,46	187,02	5,17
	W 5	15,517	3,88	29,63	12,029	1,79	0,49	185,61	5,08
<b>Mittelwert</b>		<b>15,389</b>	<b>3,85</b>	<b>29,63</b>	<b>11,925</b>	<b>1,81</b>	<b>0,45</b>	<b>178,77</b>	<b>4,96</b>
nicht geschützt	W 6	15,298	3,82	29,63	11,85	1,81	0,41	187,46	5,2
	W 7	15,248	3,81	29,63	11,818	1,83	0,47	168,19	4,7
	W 8	15,534	3,88	29,63	12,041	1,83	0,48	167,29	4,67
	W 9	15,22	3,81	29,63	11,795	1,85	0,46	133,5	3,79
	W10	15,359	3,84	29,63	11,902	1,82	0,45	140,5	3,91
<b>Mittelwert</b>		<b>15,332</b>	<b>3,83</b>	<b>29,63</b>	<b>12,055</b>	<b>1,83</b>	<b>0,45</b>	<b>159,39</b>	<b>4,45</b>

Tab.5.16-1 Auswertung der geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials „UL(T=25%)“, getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)

„Universallehm“ gemagert mit Brechsand, UL + BS (T=15%)		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
nicht geschützt	W11	16,377	4,09	20,45	13,641	1,93	0,33	202,49	5,41
	W12	16,415	4,1	20,45	13,674	1,92	0,34	165,94	4,4
	W13	16,384	4,1	20,45	13,647	1,93	0,33	213,14	5,66
	W14	16,481	4,12	20,45	13,732	1,92	0,36	194,02	5,1
	W15	16,385	4,1	20,45	13,647	1,90	0,32	185,62	4,89
<b>Mittelwert</b>		<b>16,408</b>	<b>4,10</b>	<b>20,45</b>	<b>13,668</b>	<b>1,92</b>	<b>0,34</b>	<b>192,24</b>	<b>5,09</b>
geschützt	W16	16,356	4,09	20,45	13,627	1,91	0,35	178,3	4,72
	W17	16,283	4,07	20,45	13,562	1,92	0,32	190,53	5,06
	W18	16,351	4,09	20,45	13,621	1,94	0,34	236,2	6,36
	W19	16,347	4,09	20,45	13,616	1,89	0,33	226,72	5,96
	W20	16,382	4,1	20,45	13,651	1,89	0,37	186,27	4,9
<b>Mittelwert</b>		<b>16,344</b>	<b>4,09</b>	<b>20,45</b>	<b>13,615</b>	<b>1,91</b>	<b>0,34</b>	<b>203,60</b>	<b>5,40</b>

Tab.5.16-2 Auswertung der geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL + BS (T=15%)“, getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)

„Universallehm“ gemagert mit Brechsand, UL + BS (T=10%)		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
geschützt	W21	16,838	4,21	17,08	14,418	1,96	0,25	160,3	4,18
	W22	16,662	4,17	17,08	14,264	1,95	0,23	170,84	4,44
	W23	16,784	4,2	17,08	14,374	1,96	0,27	216,82	5,63
	W24	16,825	4,21	17,08	14,411	1,96	0,28	183,85	4,79
	W25	16,785	4,2	17,08	14,374	1,93	0,26	182,14	4,72
<b>Mittelwert</b>		<b>16,779</b>	<b>4,20</b>	<b>17,08</b>	<b>14,368</b>	<b>1,95</b>	<b>0,26</b>	<b>182,79</b>	<b>4,75</b>
nicht geschützt	W26	16,777	4,19	17,08	14,371	1,97	0,29	189,00	4,95
	W27	16,844	4,21	17,08	14,418	1,96	0,22	177,23	4,61
	W28	16,726	4,18	17,08	14,322	1,97	0,25	176,00	4,6
	W29	16,625	4,16	17,08	14,238	1,96	0,27	174,27	4,55
	W30	16,922	4,23	17,08	14,491	1,96	0,26	161,00	4,16
<b>Mittelwert</b>		<b>16,779</b>	<b>4,19</b>	<b>17,08</b>	<b>14,368</b>	<b>1,96</b>	<b>0,26</b>	<b>175,50</b>	<b>4,57</b>

Tab.5.16-3 Auswertung der geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL + BS (T=10%)“, getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)

„Universallehm“ gemagert mit Brechsand, UL + BS (T=5%)		Herstellung			Druckprüfung				
		Gewicht <sub>Herstellung</sub>	Dichte <sub>Herstellung</sub>	Feuchte <sub>Herstellung</sub>	Gewicht <sub>Druckprüfung</sub>	Dichte <sub>Druckprüfung</sub>	Feuchte <sub>Druckprüfung</sub>	Bruchlast	Bruchspannung
Würfel Nr.		[kg]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kg]	[Kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
geschützt	W46	17,273	4,32	14,38	15,13	1,98	0,19	135,19	3,45
	W47	17,008	4,25	14,38	14,892	1,98	0,15	119,08	3,04
	W48	17,066	4,27	14,38	14,944	1,98	0,16	140,54	3,59
	W49	17,134	4,28	14,38	15,007	1,96	0,18	147,39	3,74
	W50	17,024	4,26	14,38	14,909	1,98	0,17	146,66	3,76
<b>Mittelwert</b>		<b>17,101</b>	<b>4,28</b>	<b>14,38</b>	<b>14,976</b>	<b>1,98</b>	<b>0,17</b>	<b>137,77</b>	<b>3,52</b>
nicht geschützt	W51	17,16	4,29	14,38	15,024	1,96	0,14	143,53	3,66
	W52	17,18	4,3	14,38	15,046	1,96	0,17	131,4	3,35
	W53	17,216	4,3	14,38	15,079	1,96	0,18	151,11	3,84
	W54	17,225	4,31	14,38	15,088	1,96	0,19	118,33	3,02
	W55	17,259	4,31	14,38	15,115	1,96	0,17	126,86	3,21
<b>Mittelwert</b>		<b>17,208</b>	<b>4,30</b>	<b>14,38</b>	<b>15,070</b>	<b>1,96</b>	<b>0,17</b>	<b>134,25</b>	<b>3,42</b>

Tab.5.16-4 Auswertung der geschützten und nicht geschützten Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL + BS (T=5%)“, getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)

Die mittlere Trockendruckfestigkeit der geschützten Versuchsreihe 20 „UL+BS (T=10%) -G-W“ betrug 4,75 N/mm<sup>2</sup>, 3,94% höher als die mittlere Trockendruckfestigkeit der nicht geschützten Versuchsreihe 8 „UL+BS (T=10%) -N-W“, die 4,57 N/mm<sup>2</sup> betrug.

Bei der nicht geschützten Versuchsreihe 22 „UL+BS (T=5%) -N-W“ betrug die Trockendruckfestigkeit 3,43 N/mm<sup>2</sup>, wobei sie bei der geschützten Versuchsreihe 21 „UL+BS (T=5%) -G-W“ einen Wert von 3,52 N/mm<sup>2</sup> erreichte, mit einer Erhöhung der Trockendruckfestigkeit durch die Schutzschalen von nur noch 2,62%, vgl. Abb. 5.16-1 und 5.16-2.

## **5.17 Auswertung der Versuche**

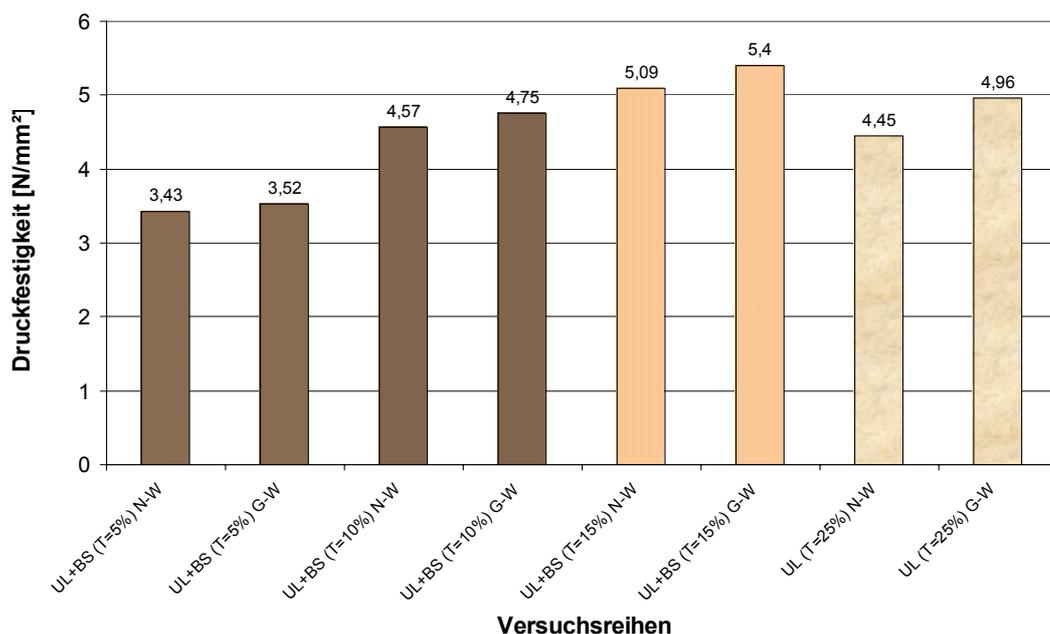
### **5.17.1 Einfluss der sommerlichen und winterlichen Trocknungs-Bedingungen auf die Trockendruckfestigkeit verschiedener Lehmischungen**

Wie bereits im Abschnitt 5.14 dargestellt wurde, haben alle Versuchsreihen, die unter WKB getrocknet wurden, höhere Trockendruckfestigkeiten (TDF) als die Versuchsreihen gleicher Lehmischungen, die unter SKB getrocknet wurden, erreicht. Dieser Effekt ist sowohl bei den geschützten als auch bei den nicht geschützten Versuchsreihen eingetreten, vgl. Abb. 5.17-1.

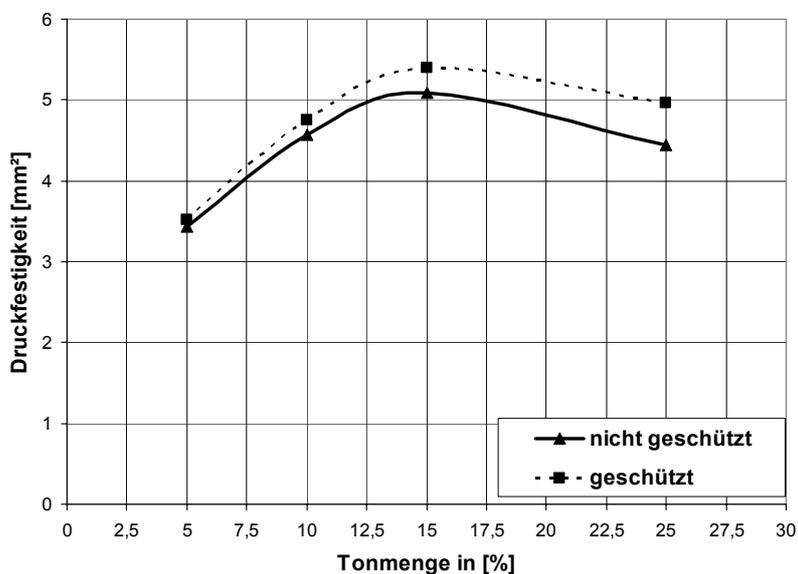
Die strukturelle Gliederung von Ton-Sand-Kies bzw. Splitt-Mischungen wird durch die elektrostatischen Bindungskräfte bestimmt. Es ist deshalb zweckmäßig, die dazu gehörigen Grundlagen aus der Tonmineralogie, die schon unter dem Abschnitt 2.11 erwähnt wurden, zu verwenden.

In Abschnitt 2.11.5 ist dargestellt, dass die Tonminerale sich mit abnehmendem pH-Wert des Anmachwassers dichter zueinander einordnen. Der pH-Wert von Anmachwasser steigt mit steigender Temperatur im Sommer. Deshalb legen sich die Tonplättchen bei der Trocknung unter SKB weniger dicht zueinander als unter WKB. Demzufolge erhalten die Versuchsreihen, die unter WKB getrocknet sind, höhere Trockendruckfestigkeiten als die Versuchsreihen, die unter SKB getrocknet sind.

Die hohen Sommertemperaturen verursachen nicht nur die Erhöhung des pH-Wertes des Anmachwassers bzw. Porenwassers, sondern sie führen auch zur Vergrößerung der so genannten diffusen Ionenschichten zwischen den Tonteilchen, weil mit steigender Temperatur ein immer größerer Anteil der Gegenionen (Kationen) die Tonplättchenschicht verlässt.



**Abb. 5.16-1 Einfluss der Schutzschalen auf die mittlere Trockendruckfestigkeit von Versuchsreihen verschiedener Tonmengen aber gleicher mineralischer Zuschläge getrocknet unter WKB (T=29°C , rel. Feuchte=36%)**



**Abb. 5.16-2 Einfluss der Schutzschalen auf die mittlere Trockendruckfestigkeit von Versuchsreihen verschiedener Tonmengen aber gleicher mineralischer Zuschläge getrocknet unter WKB (T=29°C , rel. Feuchte=36%)**

Die Versuchsmischungen sind: Ausgangsmaterial "UL (T=25%)", "UL+BS(T=15%)", "UL+BS (T=10%)" und "UL+BS (T=5%)"

Dadurch werden die Tonplättchen im Ausgangszustand ferner voneinander gehalten, sodass sie sich während des Trocknungsvorganges unter SKB weniger dicht als unter WKB ordnen. Das ist ein zweiter Grund für die niedrigeren Trockendruckfestigkeiten der Versuchsreihen, die unter SKB getrocknet wurden.

Nach der DLVO-Theorie überwinden die van-der-Waalschen Anziehungskräfte (bei kleinen Abständen zwischen den Tonplättchen) die elektrostatische Abstoßung, vgl. Abb. 2.11-6.

Das wäre ein dritter Grund für die niedrigeren Trockendruckfestigkeiten der Versuchsreihen, die unter SKB getrocknet sind.

Ein vierter Grund für die höheren Werte der Trockendruckfestigkeiten der Versuchsreihen, die unter WKB getrocknet wurden, liegt an den geringeren Schwindspannungen und weniger Schwindrissen.

Die maximale Erhöhung der Trockendruckfestigkeit der unter WKB getrockneten Versuchsreihen im Vergleich zu unter SKB getrockneten Versuchsreihen gleicher Lehmischungen, war 121,4% bei der Lehmischung „UL (T=25%)“ und die minimale Erhöhung war 30,9% bei der Lehmischung „UL+RS+RK (T=10%)“, vgl. Abb. 5.17-1.

Die mittlere Trockendruckfestigkeit der nicht geschützten und unter WKB getrockneten Versuchsreihe 8 „UL+BS (T=10%) -N-W“ erreichte einen Wert von 4,57 N/mm<sup>2</sup>, also 8,8% höher als die mittlere Trockendruckfestigkeit der Versuchsreihe 11 derselben Lehmischung „UL+BS (T=10%) -N-NB“, die fünf Tage bei 20°C und dann bei 60°C bis zur Massenkonstanz schnell getrocknet wurde, vgl. DIN 18952 Bl.2.

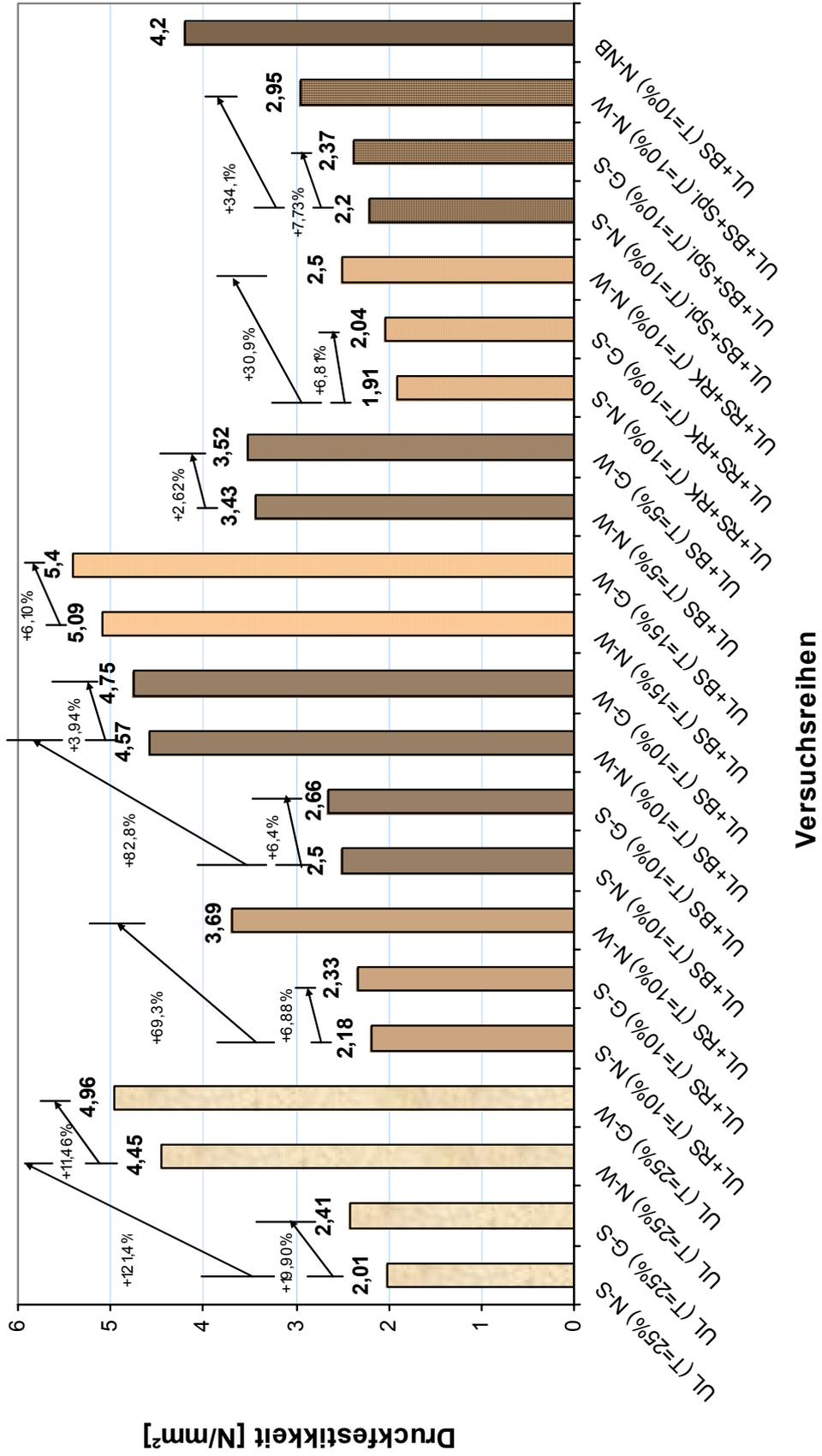
Daraus kann abgeleitet werden, dass eine langsame und gleichmäßige Trocknung nicht nur in der ersten Trocknungsphase sondern während des gesamten Trocknungsvorgangs von Vorteil ist.

Wie in Abschnitt 5.16.3 erwähnt wurde, haben die Lehmischungen mit gebrochenen mineralischen Zuschlägen höhere Trockendruckfestigkeiten als die Lehmischungen gleicher Tonmenge, die mit rundkörnigen mineralischen Zuschlägen gemagert wurden. Grund dafür sind die größeren zur Verfügung stehenden „Haftflächen“ für Tonteilchen bei den gebrochenen Zuschlägen im Vergleich zu den rundkörnigen Zuschlägen.

### **5.17.2 Einfluss der Schutzschalen auf die Trocknungsgeschwindigkeit und Trockendruckfestigkeit der Versuchsreihen**

Aus dem Vergleich der Trockendruckfestigkeit der geschützten mit den nicht geschützten Versuchsreihen, die im Abschnitt 5.15 dargestellt wurden, erkennt man den Einfluss der langsamen Trocknung durch kapillar leitende Kräfte auf die Trockendruckfestigkeit der Versuchsreihen.

Abb. 5.17-1 Vergleich der mittleren Endfestigkeiten von den geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Luftfeuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Luftfeuchte=36%) im Vergleich zu der Endfestigkeit von Versuchsreihe Nr. 11 (Referenzreihe) getrocknet bei (T=60°C) mit 5 tägiger Vortrocknung bei 20°C



Die Abb. 5.17-2 bis 5.17-8 stellen sowohl den Einfluss der Schutzschalen auf die Trockendruckfestigkeit der Versuchsreihen dar als auch die Wirkung der langsamen Trocknung durch Schutzschalen auf die Trockendruckfestigkeit der Versuchsreihen. Daraus kann abgeleitet werden, dass die langsame und gleichmäßige Trocknung der Versuchsreihen durch die kapillar leitenden Kräfte der Schutzschalenwand zur Erhöhung ihrer Druckfestigkeit führt.

### **5.17.3 Einfluss der mineralischen Zuschläge auf die Trockendruckfestigkeit TDF der Lehmmischungen gleicher Tonmenge**

Obwohl die Lehmmischungen 2,3,4,5 nach der Tab. 5.6.2 gleiche Tonmengen (10%) enthalten, haben ihre Versuchsreihen (bei gleichen Trocknungsbedingungen) unterschiedliche Trockendruckfestigkeiten erreicht, vgl. Abb. 5.14-6 und Tab. 5.14-1 bis 5.14-5 sowie Tab. A-5-8 bis A-5-12.

Der Grund dafür ist die Kornzusammensetzung, also Kornform und Korngröße.

#### **5.17.3.1 Einfluss der Kornform**

Aus den Endtrockendruckfestigkeiten der Versuchsreihen nach Abb. 5.17-1 kann abgeleitet werden, dass die Versuchsreihen mit gebrochenen Zuschlägen höhere TDF aufweisen als die Versuchsreihen mit rundkörnigen Zuschlägen.

##### **Bei der Trocknung unter SKB:**

Die TDF der Versuchsreihe 2 „UL+RS (T=10%)-N-S“ betrug 2,18 N/mm<sup>2</sup>. Bei der Versuchsreihe 3 „UL+BS (T=10%)-N-S“ betrug sie 2,5 N/mm<sup>2</sup>, 14,68% höher als die TDF der Versuchsreihe 2.

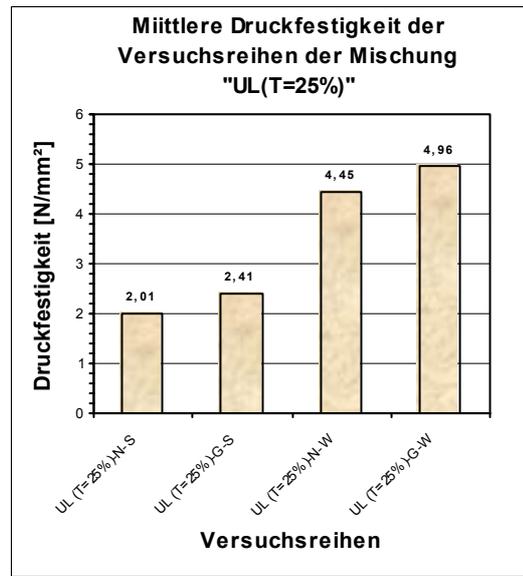
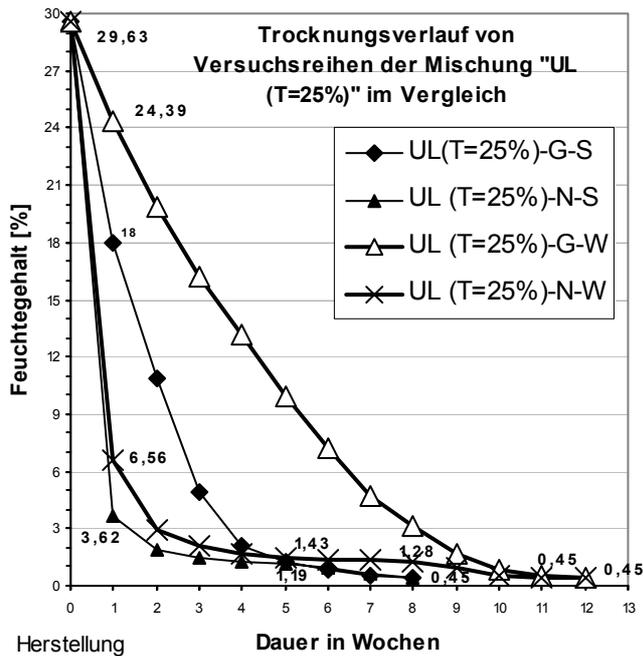
Die TDF der Versuchsreihe 5 „UL+BS+Spl. (T=10%)-N-S“ erreichte einen Wert von 2,2 N/mm<sup>2</sup>, also 15,18% höher als die TDF der Versuchsreihe 4 „UL+RS+RK(T=10%)-N-S“, die 1,91 N/mm<sup>2</sup> betrug.

##### **Bei der Trocknung unter WKB:**

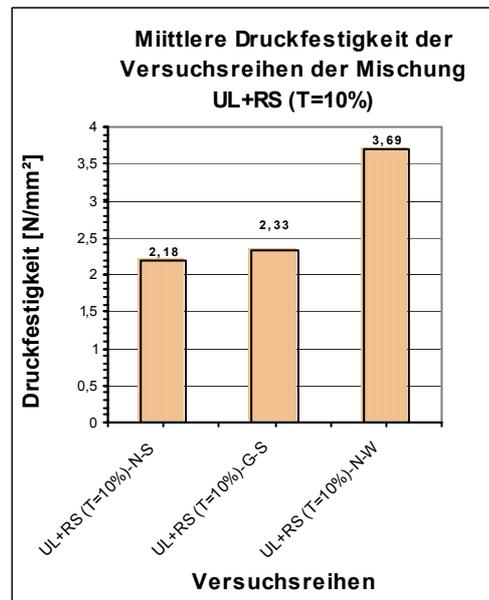
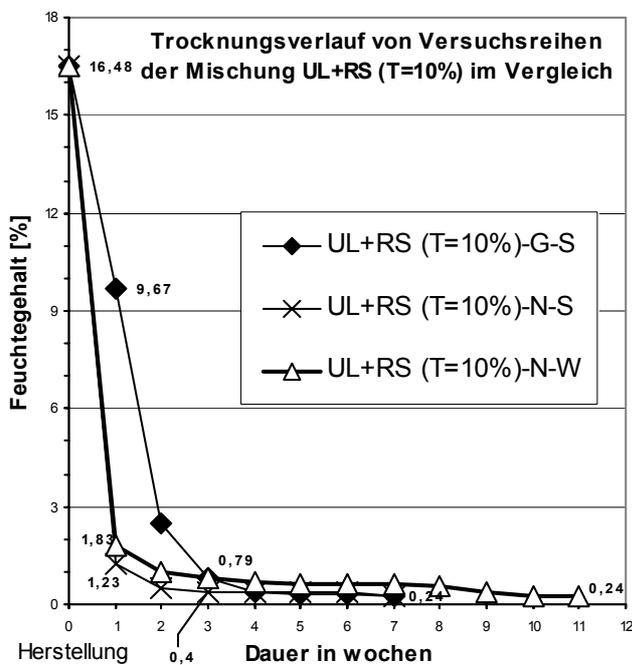
Die TDF der Versuchsreihe 8 „UL+BS (T=10%) -N-W“ erreichte einen Wert von 4,57 N/mm<sup>2</sup>, also 23,85% höher als die TDF der Versuchsreihe 7 „UL+RS (T=10%)-N-W“, die nur 3,69 N/mm<sup>2</sup> betrug.

Die TDF der Versuchsreihe 10 „UL+BS+Spl. (T=10%) -N-W“ erreichte einen Wert von 2,95 N/mm<sup>2</sup>, also 18% höher als die TDF der Versuchsreihe 9 „UL+RS+RK (T=10%)-N-W“, die 2,5 N/mm<sup>2</sup> betrug.

Daraus lässt sich ableiten, dass der positive Einfluss der gebrochenen Zuschläge auf die TDF bei der Trocknung unter WKB höher ist als bei der Trocknung unter SKB.



**Abb.5.17-2** Trocknungsverlauf der Lehmischung "UL (T=25%)", geschützte und nicht geschützte Versuchsreihen getrocknet unter sommerlichen (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und winterlichen (T=29°C, rel. Feuchte=36%) Klimabedingungen



**Abb. 5.17-3** Trocknungsverlauf und mittlere Trockendruckfestigkeit der Mischung "UL+RS (T=10%)", geschützte und nicht geschützte Versuchsreihen getrocknet unter SKB (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%)

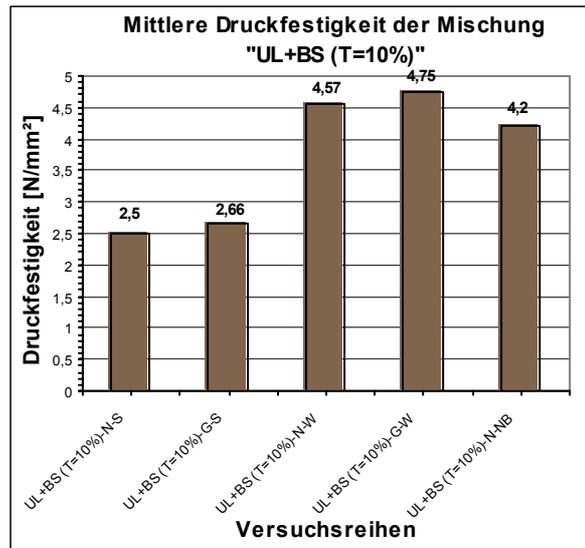
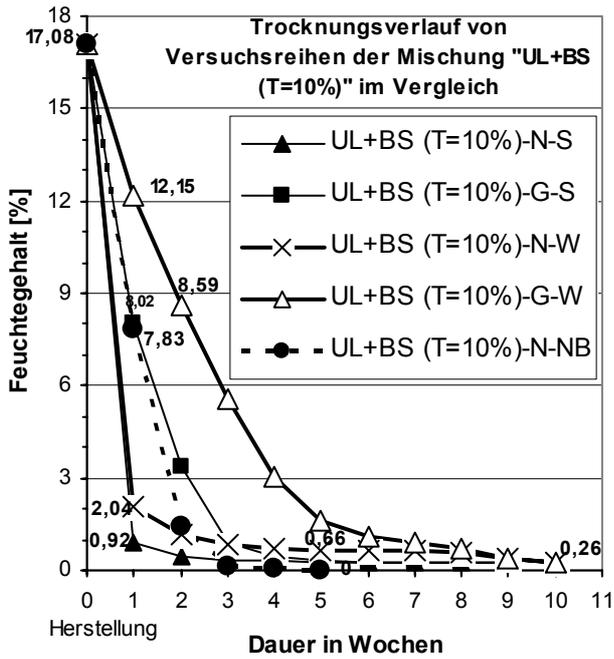


Abb. 5.17-4 Trocknungsverlauf der Lehmischung "UL+BS (T=10%)", geschützte und nicht geschützte Versuchsreihen getrocknet unter SKB (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%) im Vergleich zu der unter Normbedingungen getrockneten Versuchsreihe 11 (beschleunigte Trocknung bei 60°C mit fünftägiger Vortrocknung bei 20°C)

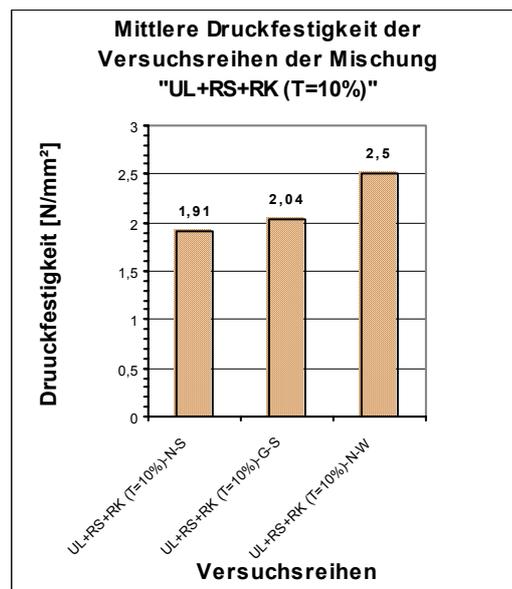
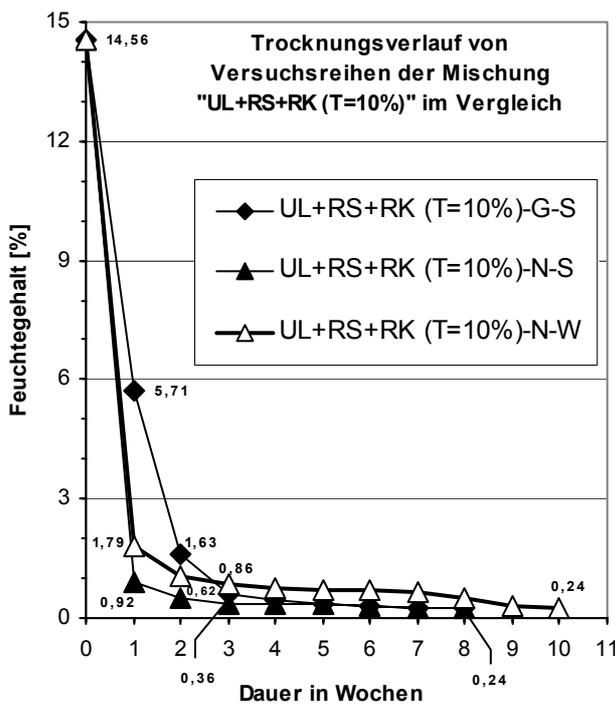


Abb. 17.5-5 Trocknungsverlauf der Lehmischung "UL+RS+RK (T=10%)", geschützte und nicht geschützte Versuchsreihen getrocknet unter SKB (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%)

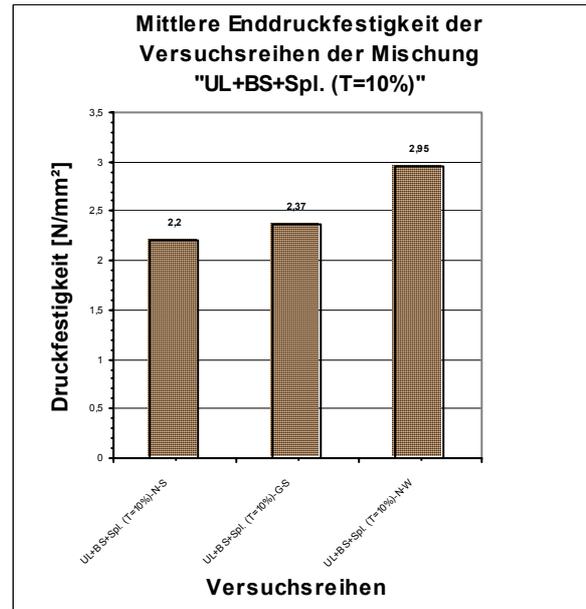
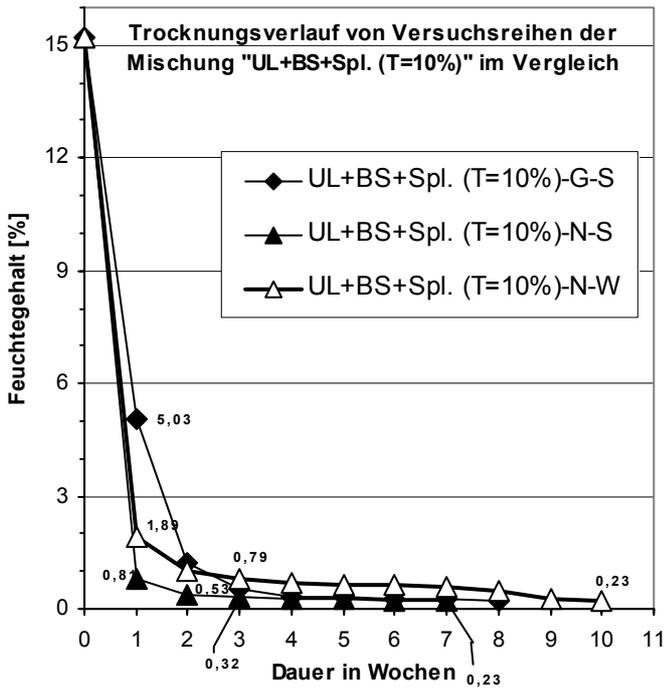


Abb. 5.17-6 Trocknungsverlauf der Mischung "UL+BS+Spl. (T=10%)", geschützte und nicht geschützte Versuchsreihen getrocknet unter SKB (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%)

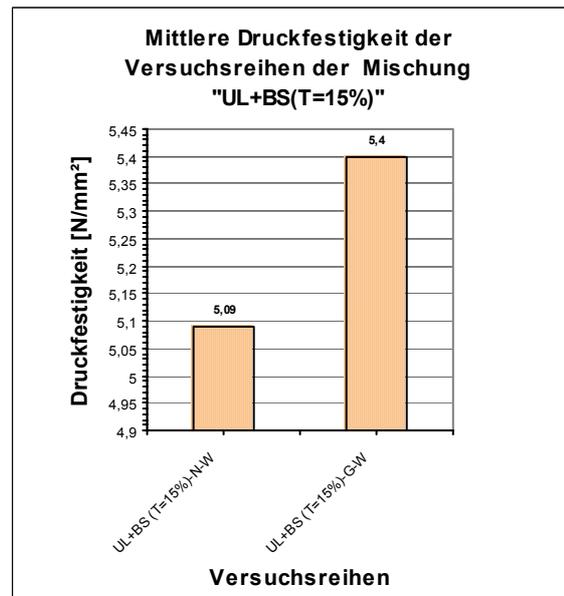
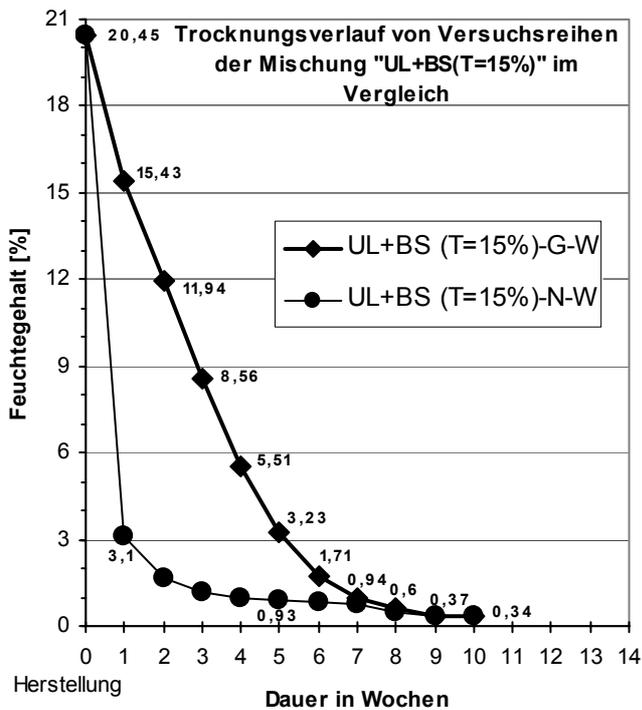
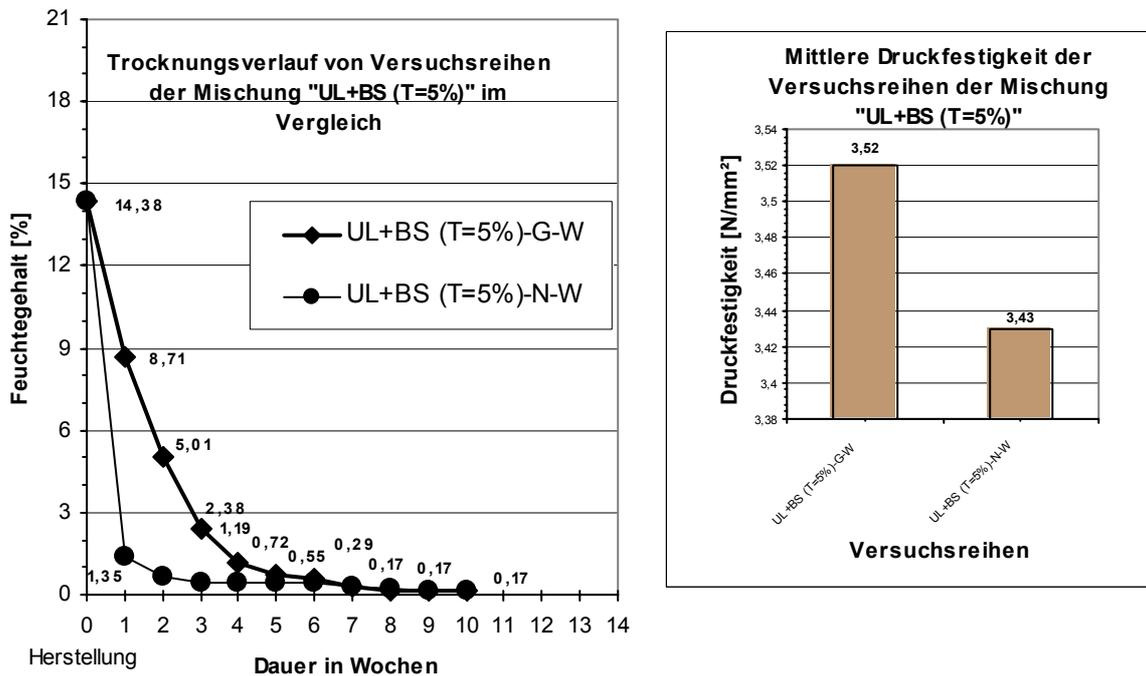


Abb. 5.17-7 Trocknungsverlauf der Versuchsreihen der Lehmischung "UL+BS(T=15%)", geschützte und nicht geschützte Versuchsreihen getrocknet unter WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%)



**Abb. 5.17-8 Trocknungsverlauf der Versuchsreihe "UL+BS (T=5%)", geschützte und nicht geschützte Versuchsreihen, getrocknet unter WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%)**

Der Grund für die Erhöhung der TDF bei den gebrochenen Zuschlägen liegt an dem höheren Anteil der Körneroberfläche. Dabei werden mehr Tonteilchen an den Oberflächen der Körner parallel angeordnet als bei den rundkörnigen Zuschlägen, was zur Erhöhung der TDF führt.

### 5.17.3.2 Einfluss der Korngröße

Aus der Abb. 5.17-1 kann abgelesen werden, dass die mit Sandkörnern gemagerten Versuchsreihen höhere TDF erreichen als die mit Sand und Kies- bzw. Splittkörnern gemagerten Versuchsreihen, bei gleichem Tongehalt.

#### Bei der Trocknung unter SKB:

Die TDF der Versuchsreihe 2 „UL+RS (T=10%) -N-S“ erreichte einen Wert von 2,18 N/mm<sup>2</sup>, also 14,14% höher als die TDF der Versuchsreihe 4 „UL+RS+RK (T=10%) -N-S“, die nur 1,91 N/mm<sup>2</sup> betrug.

Die TDF der Versuchsreihe 3 „UL+BS (T=10%) -N-S“ erreichte einen Wert von 2,5 N/mm<sup>2</sup>, also 13,64% höher als die TDF der Versuchsreihe 5 „UL+BS+Spl. (T=10%) -N-S“, die nur 2,2 N/mm<sup>2</sup> betrug.

### **Bei der Trocknung unter WKB**

Die TDF der Versuchsreihe 7 „UL+RS (T=10%) -N-W“ erreichte einen Wert von 3,69 N/mm<sup>2</sup>, also 47,6% höher als die TDF der Versuchsreihe 9 „UL+RS+RK (T=10%) -N-W“, die nur 2,5 N/mm<sup>2</sup> betrug.

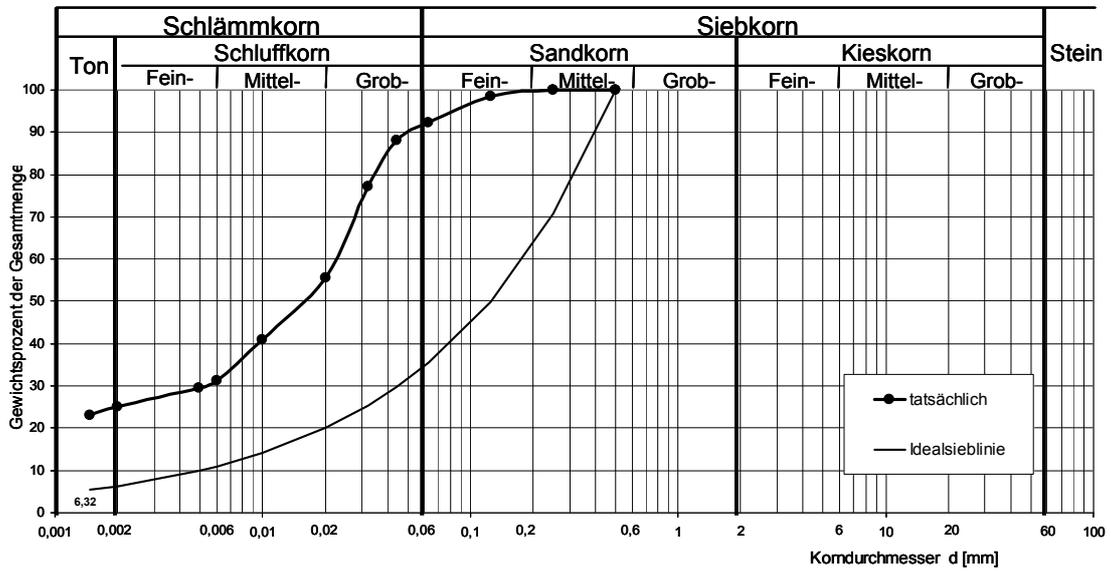
Analog dazu war es auch bei den Lehmmischungen mit gebrochenen Zuschlägen. Die TDF der Versuchsreihe 8 „UL+BS (T=10%) -N-W“ hat einen Wert von 4,57 N/mm<sup>2</sup> erreicht, also 54,91% höher als die TDF der Versuchsreihe 10 „UL+BS+Spl. (T=10%) -N-W“, die nur 2,95 N/mm<sup>2</sup> betrug.

Der Grund für die Erhöhung der TDF, der mit Sandkörnern gemagerten Versuchsreihen, sind die dünneren sogenannten Tonumhüllungsschichten der Körner. Das kann leicht abgeleitet werden, indem man die tatsächlichen Sieblinien mit den Idealsieblinien „nach der Fullerparabel“ der Versuchsmischungen vergleicht, siehe Abb. 5.17-9 bis 5.17-15. Bei den mit Kies bzw. Splitt gemagerten Lehmmischungen gleicher Tonmenge, ist die Tonumhüllungsschicht der Körner dicker. Je dicker die Tonumhüllungsschicht ist, desto öfter tritt die Kantenverbindung zwischen Kanten und Oberflächen der Tonteilchen auf, was zur Festigkeitsverminderung führt, vgl. Abb. 5.17-16.

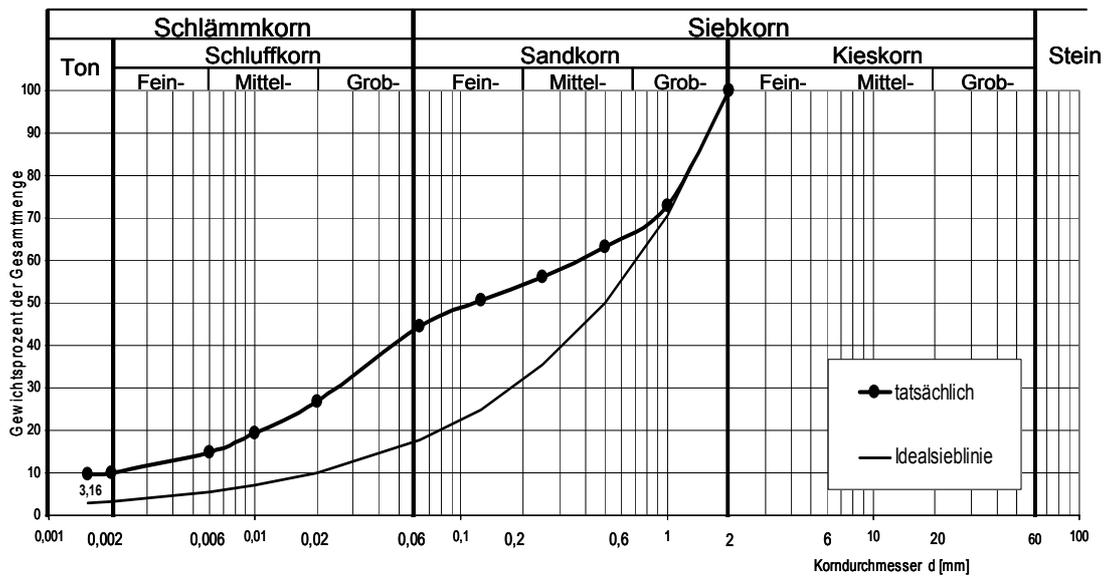
Daraus kann abgeleitet werden, dass die Schutzschalen lediglich den Trocknungsverlauf und kaum die gesamte Trocknungsdauer beeinflussen. Bei den geschützten Versuchsreihen lief die Trocknung in der ersten Trocknungsphase langsamer als bei den nicht geschützten Versuchsreihen ab. Das wird im folgenden Beispiel erläutert:

Die nicht geschützte Versuchsreihe 1 „UL (T=25%) -N-S“ hatte nach einwöchiger Trocknung unter SKB einen Feuchtegehalt von 3,62%, in drei Wochen 1,48% und nach acht Wochen hat sie ihre Massenkonstanz bei dem Wert von 0,45% Feuchtegehalt erreicht. Die geschützte Versuchsreihe 12 „UL (T=25%) -G-S“ hatte nach einer Woche Trocknung einen Feuchtegehalt von 18%, in drei Wochen 4,93% und nach acht Wochen erreichte sie ihre Massenkonstanz bei einem Feuchtegehalt von 0,45%. Die TDF der geschützten Versuchsreihe 12 erreichte einen Wert von 2,41 N/mm<sup>2</sup>, also 19,9% höher als die Trockendruckfestigkeit der nicht geschützten Versuchsreihe 1, deren TDF nur noch 2,01 N/mm<sup>2</sup> betrug.

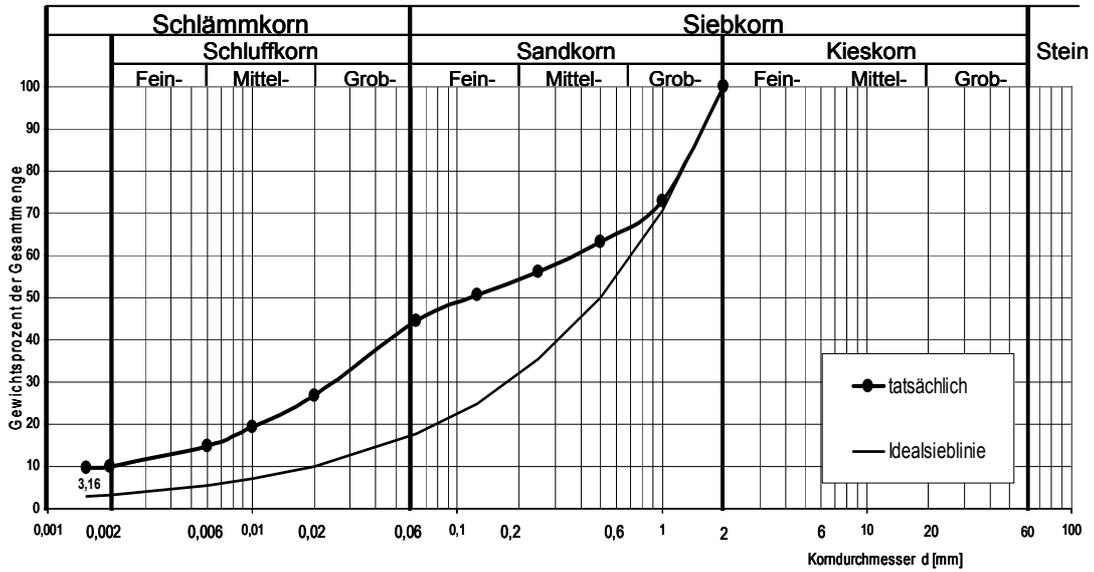
Bei der Trocknung unter WKB hatte die nicht geschützte Versuchsreihe 6 „UL (T=25%) -N-W“ in einer Woche einen Feuchtegehalt von 6,56%, in drei Wochen 2,05% und nach elf Wochen 0,45%. Die geschützte Versuchsreihe 17 „UL (T=25%) -G-W“, getrocknet unter WKB, hatte in einer Woche einen Feuchtegehalt von 24,39%, in drei Wochen 16,19% und in elf Wochen 0,45%, vgl. Abb. 5.17-2.



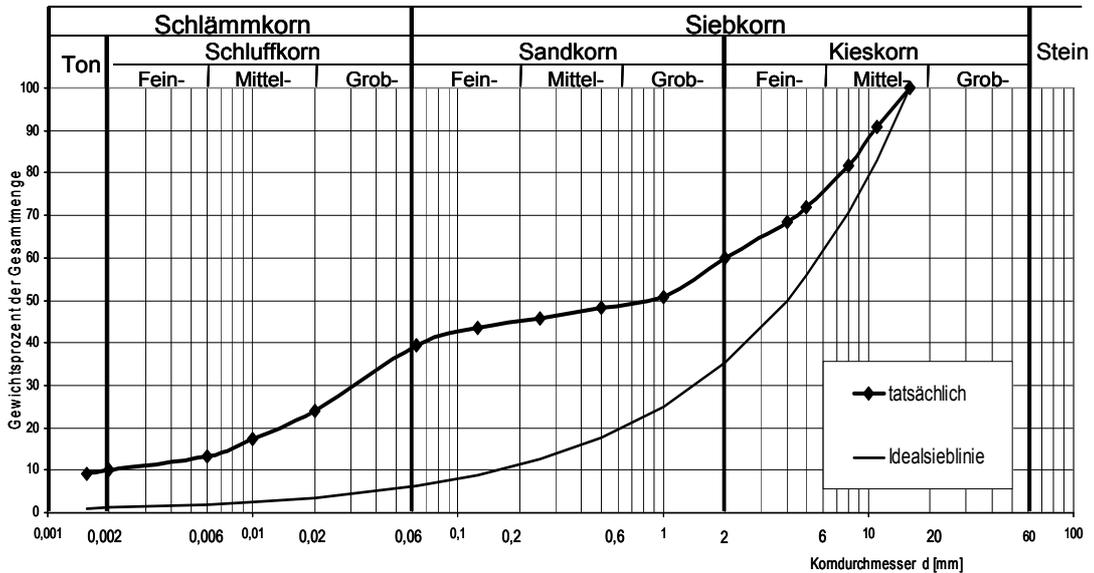
**Abb. 5.17-9 Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm „UL (T=25%)“ im Vergleich zur idealen Sieblinie**



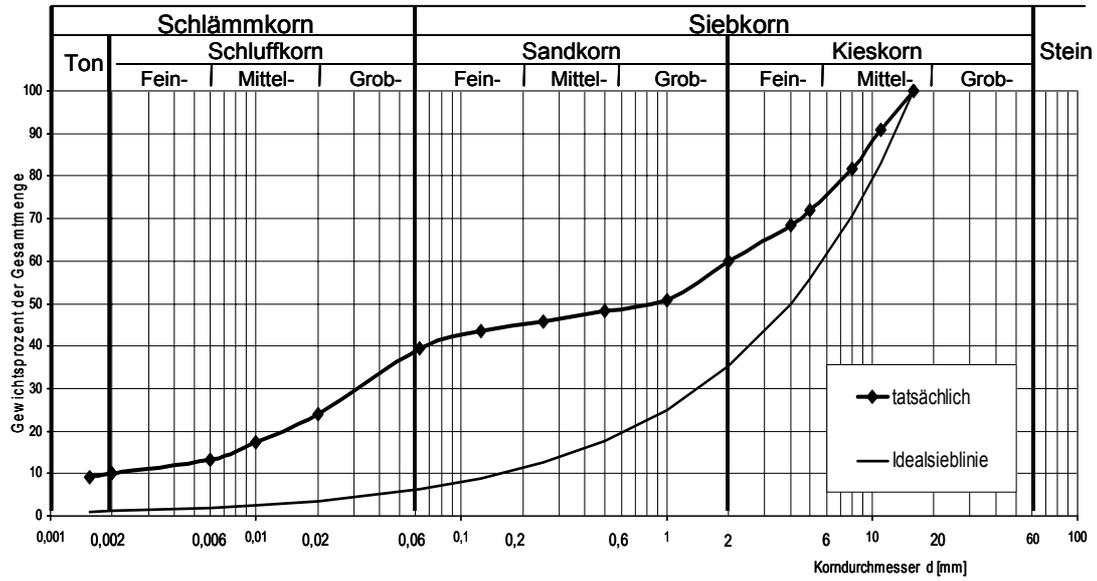
**Abb. 5.17-10 Sieblinie der Mischung Universallehm gemagert mit Rundsand (0-2 mm) „UL+RS (T=10%)“ im Vergleich zur idealen Sieblinie**



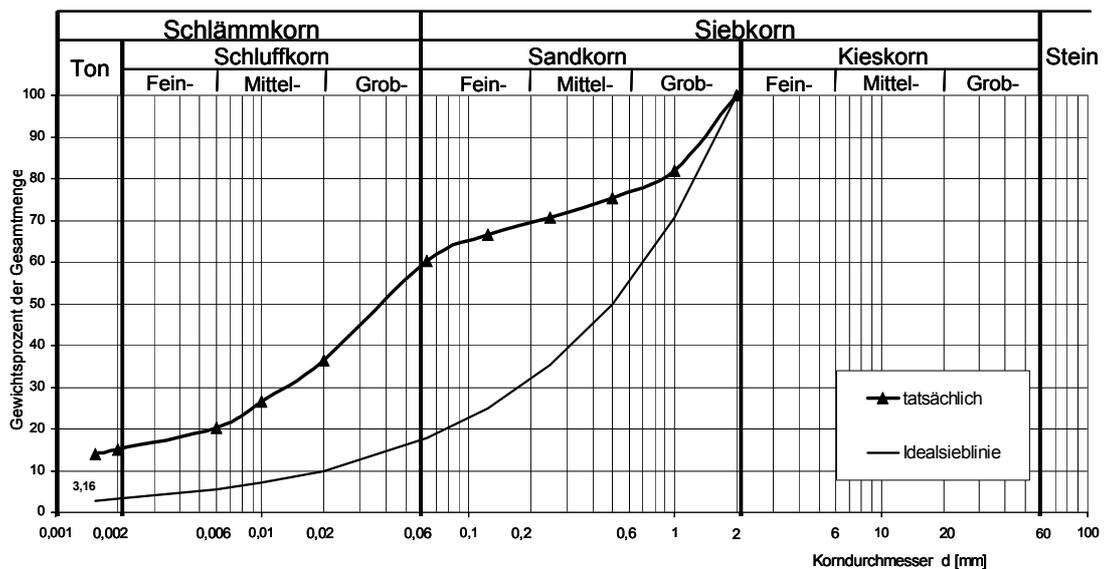
**Abb. 5.17-11 Sieblinie der Mischung Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL+BS (T=10%)“ im Vergleich zur idealen Sieblinie**



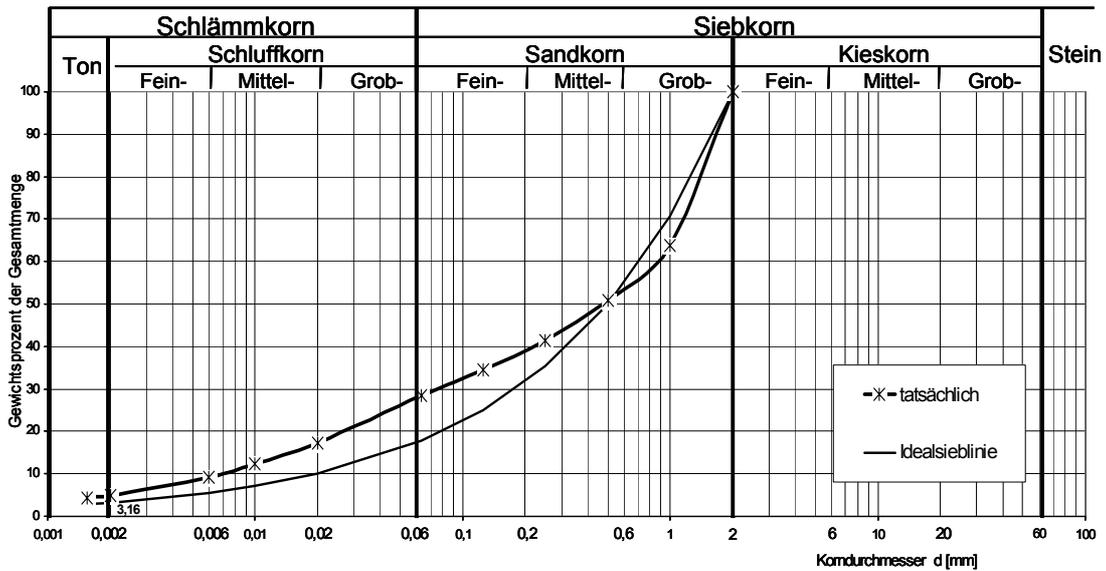
**Abb. 5.17-12 Sieblinie der Mischung Universallehm gemagert mit Rundsand (0-2 mm) und Rundkies (2-16 mm) „UL+RS+RK (T=10%)“ im Vergleich zur idealen Sieblinie**



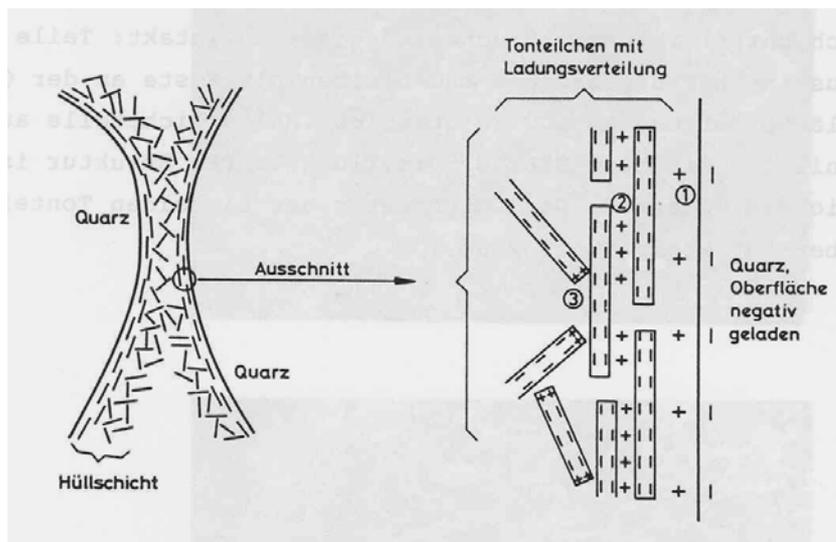
**Abb. 5.17-13 Sieblinie der Mischung Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) und Splitt (2-16 mm) „UL+BS+Splitt (T=10%)“ im Vergleich zur idealen Sieblinie**



**Abb. 5.17-14 Sieblinie der Mischung Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL+BS (T=15%)“ im Vergleich zur idealen Sieblinie**



**Abb. 5.17-15 Sieblinie der Mischung Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL+BS (T=5%)“ im Vergleich zur idealen Sieblinie**



- ① Bindung zwischen negativ geladener Quarzoberfläche und austauschbaren Kationen von parallel zur Oberfläche angeordneten Tonteilchen
- ② Oberflächenbindung durch austauschbare Kationen zwischen gerichteten Tonteilchen
- ③ Kantenbindung zwischen Kanten und Oberflächen von Tonteilchen

**Abb. 5.17-16 Mikrostruktur des Ton-Sand-Wassergemisches mit den für die Entstehung der Struktur maßgebenden Bindungsarten nach [120]**

Die TDF der geschützten Versuchsreihe 17 „UL (T=25%) -G-W“ erreichte einen Wert von 4,96 N/mm<sup>2</sup>, also 11,46% höher als die TDF der nicht geschützten Versuchsreihe 6 „UL (T=25%) -N-W“, deren TDF nur noch 4,45 N/mm<sup>2</sup> betrug.

Bei den geschützten Probewürfeln war eine relativ gleichmäßige, spannungsarme Austrocknung gewährleistet. Dadurch entstanden weniger Schwindspannungen in der ersten Trocknungsphase, in der das Material extrem weich und anfällig für Schwindrisse war. Daher zeigen die geschützten Versuchsreihen weniger Schwindrisse und somit höhere TDF als die nicht geschützten Versuchsreihen, vgl. Abb. 5.14-6.

Demzufolge kann abgeleitet werden, dass die langsame und gleichmäßige Trocknung durch Verwendung von Schutzschalen zur Festigkeitssteigerung führt.

Interessant ist, dass diese positive Wirkung der Schutzschalen umso größer ist, je höher der Tonanteil in der Lehmischung ist. Das wurde detailliert unter dem Abschnitt 5.16 behandelt.

## 5.18 Bewertung der Streuung der Versuchsergebnisse

In den Tabellen 5.18-1 bis 5.18-3 wurden die Bewertungen der Streuungen der Versuchsreihen für folgende Kenngrößen bei der Druckfestigkeitsprüfung aufgeführt:

Druckfestigkeit, Rohdichte und Materialfeuchte.

Folgende Kennwerte wurden dabei ermittelt, vgl. Tab. 5.18-1 bis 5.18-3 und [49].

$X_{\max}$  maximaler Messwert

$X_{\min}$  minimaler Mittelwert

$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$  Arithmetisches Mittel „Mittelwert einer Messreihe“

$S^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$  Die Varianz „durchschnittliche Abweichung vom Mittelwert“

$S = \sqrt{S^2}$  Standardabweichung „positive Quadratwurzel der Varianz“

$V = (S / \bar{X}) \cdot 100$  Varianzkoeffizient „mittlere Abweichung der Messwerte“

Wobei:

$n$  Stichprobenumfang  $X_i$  Messwerte

Die Druckfestigkeit des Lehmbaustoffes ist der Mittelwert aus drei Druckfestigkeitsprüfungen. Die Einzelwerte der Festigkeiten dürfen höchstens 20% vom Mittelwert aller Werte abweichen, vgl. DIN 18952 Bl. 2 (zurückgezogen) [41].

Nach [134] soll die Prüfung an drei Probewürfeln erfolgen, der kleinste Wert ist maßgeblich.

Da es sich in dieser Arbeit um vergleichende Messwerte und nicht um anzusetzende Druckfestigkeiten handelt, wurden zur Auswertung der Versuchsreihen die Mittelwerte aus fünf Probewürfeln jeder Versuchsreihe betrachtet.

Die Bedingung, dass die maximale Abweichung vom Mittelwert  $\bar{X}$  kleiner 20% beträgt, ist nach Tabelle 5.18-1 erfüllt.

Die größte maximale Abweichung vom Mittelwert  $\bar{X}$  betrug 18,48% bei der Versuchsreihe 20 „UL+BS (T=10%)-G-W“, und die kleinste maximale Abweichung vom Mittelwert betrug 7,27% bei der Versuchsreihe 6 „UL+RS (T=10%) -N-W“, vgl. Tab. 5.18-1.

Die Rohdichte der Versuchsreihen ist der Mittelwert aus fünf Rohdichten der Probewürfel. Nach [Lehmbau Regeln 2002,S. 22], dürfen die Einzelwerte jeder Versuchsreihe nicht mehr als 5% voneinander abweichen. Diese Bedingung ist nach der Tab. 5.18-2 erfüllt.

Die maximale Abweichung der Einzelwerte betrug 2,62% bei der Versuchsreihe 1 „UL (T=25%) -N-S“, und die minimale Abweichung der Einzelwerte betrug 0,27% bei der Versuchsreihe 22 „UL+BS (T=5%) -N-S“.

Die größte maximale Abweichung vom Mittelwert  $\bar{X}$  betrug 1,54% bei der Versuchsreihe 1 „UL (T=25%)-N-S“, und die kleinste maximale Abweichung vom Mittelwert hatte einen Wert von 0,17% erreicht, bei der Versuchsreihe 22 „UL+BS (T=5%) -N-W“

In der Tabelle 5.18-3 sind die Kennwerte der Materialfeuchten zusammengestellt. Die größte maximale Abweichung vom Mittelwert  $\bar{X}$  betrug 19,83% bei der Versuchsreihe 9 „UL+RS+RK (T=10%) -N-W“, und die kleinste maximale Abweichung vom Mittelwert betrug 4,44% bei der Versuchsreihe 12 „UL (T=25%) -G-S“.

In der Tabelle 5.18-4 sind die Nummern, Abkürzungenamen und Trocknungsbedingungen aller in dieser Arbeit geprüften Versuchsreihen, dargestellt.

Versuchsreihe		$n$	$\bar{X}$	$X_{\max}$	$X_{\min}$	$S^2$	$S$	$V$	Max. Abweichung von $\bar{X}$
Nr.	Abkürzung		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]		[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]
1	UL (T=25%) -N-S	5	2,01	2,25	1,8	0,04	0,2	9,95	11,94
2	UL+RS (T=10%) -N-S	5	2,18	2,36	2	0,02	0,14	6,49	8,26
3	UL+BS (T=10%) -N-S	5	2,5	2,71	2,3	0,02	0,14	5,65	8,23
4	UL+RS+RK (T=10%) -N-S	5	1,91	2,1	1,8	0,01	0,1	5,25	10,18
5	UL+BS+Spl. (T=10%) -N-S	5	2,2	2,41	2	0,02	0,14	6,42	9,45
6	UL (T=25%) -N-W	5	4,45	5,2	3,8	0,35	0,59	13,28	16,75
7	UL+RS (T=10%) -N-W	5	3,69	3,89	3,4	0,03	0,17	4,7	7,27
8	UL+BS (T=10%) -N-W	5	4,57	4,95	4,2	0,08	0,28	6,18	9,05
9	UL+RS+RK (T=10%) -N-W	5	2,5	2,75	2,3	0,03	0,17	6,94	10,18
10	UL+BS+Spl. (T=10%) -N-W	5	2,95	3,2	2,7	0,03	0,17	5,87	8,4
11	UL+BS (T=10%) -N-NB	5	4,2	4,72	3,8	0,12	0,35	8,25	12,38
12	UL (T=25%) -G-S	5	2,41	2,5	2,2	0,01	0,1	4,15	7,39
13	UL+RS (T=10%) -G-S	5	2,33	2,76	2,1	0,07	0,26	11,36	18,45
14	UL+BS (T=10%) -G-S	5	2,66	2,86	2,5	0,02	0,14	5,32	7,6
15	UL+RS+RK (T=10%) -G-S	5	2,04	2,23	1,8	0,03	0,17	8,48	10,87
16	UL+BS+Spl. (T=10%) -G-S	5	2,37	2,48	2,2	0,01	0,1	4,22	5,56
17	UL (T=25%) -G-W	5	4,96	5,47	4,5	0,17	0,41	8,32	10,33
18	UL+BS (T=15%) -N-W	5	5,09	5,66	4,4	0,24	0,49	9,62	13,59
19	UL+BS (T=15%) -G-W	5	5,4	6,36	4,7	0,52	0,72	13,35	17,78
20	UL+BS (T=10%) -G-W	5	4,75	5,63	4,2	0,3	0,55	11,53	18,48
21	UL+BS (T=5%) -G-W	5	3,52	3,76	3	0,09	0,3	8,53	13,54
22	UL+BS (T=5%) -N-W	5	3,42	3,84	3	0,11	0,33	9,71	12,41

Tab. 5.18-1 Streuungskennwerte der Versuchsreihen, Druckfestigkeit

Versuchsreihe		$n$	$\bar{X}$	$X_{\max}$	$X_{\min}$	$S^2$	$S$	$V$	Max. Abweichung von $\bar{X}$
Nr.	Abkürzung		[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]		[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[%]
1	UL (T=25%) -N-S	5	1817,924	1845,91	1798,76	304,47	17,45	0,96	1,54
2	UL+RS (T=10%) -N-S	5	1982,258	1997,87	1971,46	101,58	10,08	0,51	0,79
3	UL+BS (T=10%) -N-S	5	1967,95	1988,23	1951,5	186,96	13,67	0,69	1,03
4	UL+RS+RK (T=10%) -N-S	5	2039,644	2044,59	2035,36	12,63	3,55	0,17	0,24
5	UL+BS+Spl. (T=10%) -N-S	5	2020,27	2031,61	2012,39	53,44	7,31	0,36	0,56
6	UL (T=25%) -N-W	5	1827,952	1845,98	1806,3	241,37	15,54	0,85	1,18
7	UL+RS (T=10%) -N-W	5	1956,892	1968,35	1947,39	68,26	8,26	0,42	0,59
8	UL+BS (T=10%) -N-W	5	1963,9	1970,23	1955,64	32,75	5,72	0,29	0,42
9	UL+RS+RK (T=10%) -N-W	5	2053,02	2060,61	2044,97	46,27	6,8	0,33	0,39
10	UL+BS+Spl. (T=10%) -N-W	5	2002,12	2017,04	1984,64	136,37	11,68	0,58	0,87
11	UL+BS (T=10%) -N-NB	5	1955,112	1964,91	1945,23	53,75	7,33	0,37	0,51
12	UL (T=25%) -G-S	5	1809,656	1830,4	1789,23	363,52	19,07	1,05	1,15
13	UL+RS (T=10%) -G-S	5	1965,5	1967,63	1961,04	8,39	2,9	0,15	0,23
14	UL+BS (T=10%) -G-S	5	1955,262	1968,64	1944,14	107,04	10,35	0,53	0,68
15	UL+RS+RK (T=10%) -G-S	5	2035,266	2045,48	2027,68	54,15	7,36	0,36	0,5
16	UL+BS+Spl. (T=10%) -G-S	5	2011,048	2022,95	1993,68	131,04	11,45	0,57	0,86
17	UL (T=25%) -G-W	5	1811,058	1828,09	1789,44	246,16	15,69	0,87	1,19
18	UL+BS (T=15%) -N-W	5	1921,082	1933,43	1902,04	139,02	11,79	0,61	0,99
19	UL+BS (T=15%) -G-W	5	1909,72	1936,61	1887,83	377,41	19,43	1,02	1,41
20	UL+BS (T=10%) -G-W	5	1953,56	1961,84	1934,69	120,86	10,99	0,56	0,97
21	UL+BS (T=5%) -G-W	5	1975,716	1982,86	1960,53	77,96	8,83	0,45	0,77
22	UL+BS (T=5%) -N-W	5	1961,298	1963,21	1957,95	4,74	2,18	0,11	0,17

Tab. 5.18-2 Streuungskennwerte der Versuchsreihen, Rohdichte bei der Druckfestigkeitsprüfung

Versuchsreihe		$n$	$\bar{X}$	$X_{\max}$	$X_{\min}$	$S^2$	$S$	$V$	Max. Abweichung von $\bar{X}$
Nr.	Abkürzung		%	%	%		%	[%]	[%]
1	UL (T=25%) -N-S	5	0,45	0,5	0,4	0,00205	0,05	10,06	11,11
2	UL+RS (T=10%) -N-S	5	0,24	0,27	0,22	0,00045	0,02	8,84	12,5
3	UL+BS (T=10%) -N-S	5	0,26	0,29	0,22	0,00067	0,03	10,03	14,73
4	UL+RS+RK (T=10%) -N-S	5	0,24	0,27	0,21	0,00047	0,02	9,11	13,45
5	UL+BS+Spl. (T=10%) -N-S	5	0,23	0,25	0,2	0,00037	0,02	8,44	12,28
6	UL (T=25%) -N-W	5	0,45	0,48	0,41	0,00073	0,03	5,95	9,69
7	UL+RS (T=10%) -N-W	5	0,24	0,27	0,21	0,00057	0,02	10,03	13,45
8	UL+BS (T=10%) -N-W	5	0,26	0,29	0,22	0,00067	0,03	10,03	14,73
9	UL+RS+RK (T=10%) -N-W	5	0,24	0,29	0,2	0,00122	0,03	14,43	19,83
10	UL+BS+Spl. (T=10%) -N-W	5	0,23	0,27	0,2	0,00067	0,03	11,16	16,38
11	UL+BS (T=10%) -N-NB	5	0	0	0	0	0	0	0
12	UL (T=25%) -G-S	5	0,45	0,47	0,43	0,00025	0,02	3,51	4,44
13	UL+RS (T=10%) -G-S	5	0,24	0,27	0,22	0,00037	0,02	7,95	11,57
14	UL+BS (T=10%) -G-S	5	0,26	0,28	0,23	0,00037	0,02	7,46	10,85
15	UL+RS+RK (T=10%) -G-S	5	0,24	0,27	0,21	0,0005	0,02	9,32	12,5
16	UL+BS+Spl. (T=10%) -G-S	5	0,23	0,27	0,2	0,00073	0,03	11,96	19,47
17	UL (T=25%) -G-W	5	0,45	0,49	0,41	0,00085	0,03	6,48	8,89
18	UL+BS (T=15%) -N-W	5	0,34	0,36	0,32	0,00023	0,02	4,51	7,14
19	UL+BS (T=15%) -G-W	5	0,34	0,37	0,32	0,00037	0,02	5,62	8,19
20	UL+BS (T=10%) -G-W	5	0,26	0,28	0,23	0,00037	0,02	7,46	10,85
21	UL+BS (T=5%) -G-W	5	0,17	0,19	0,15	0,00025	0,02	9,3	11,76
22	UL+BS (T=5%) -N-W	5	0,17	0,19	0,14	0,00035	0,02	11	17,65

**Tab. 5.18-3 Streuungskennwerte der Versuchsreihen, Materialfeuchte bei der Druckfestigkeitsprüfung**

Versuchs-Reihe Nr.	Abkürzung	Bedeutung der Abkürzung
1	UL (T=25%) -N-S	Ausgangsmaterial „Universallehm“, enthält 25% Ton, nicht geschützt, unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42 °C, rel. Feuchte=23%) getrocknet.
2	UL+RS (T=10%) -N-S	Universallehm +Rundsand (0-2 mm), enthält 10% Ton, nicht geschützt, unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42 °C, rel. Feuchte=23%) getrocknet
3	UL+BS (T=10%) -N-S	Universallehm +Brechsand (0-2 mm), enthält 10% Ton, nicht geschützt, unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42 °C, rel. Feuchte=23%) getrocknet
4	UL+RS+RK (T=10%) -N-S	Universallehm +Rundsand (0-2 mm) +Rundkies (2-16 mm) enthält 10% Ton, nicht geschützt, unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42 °C, rel. Feuchte=23%) getrocknet.
5	UL+BS+Spl. (T=10%) -N-S	Universallehm +Brechsand (0-2 mm) +Splitt (2-16 mm) enthält 10% Ton, nicht geschützt, unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42 °C, rel. Feuchte=23%) getrocknet.
6	UL (T=25%) -N-W	Ausgangsmaterial „Universallehm“, enthält 25% Ton, nicht geschützt, unter winterlichen Klimabedingungen (T=29 °C, rel. Feuchte=36%) getrocknet.
7	UL+RS (T=10%) -N-W	Universallehm +Rundsand (0-2 mm), enthält 10% Ton, nicht geschützt, unter winterlichen Klimabedingungen (T=29 °C, rel. Feuchte=36%) getrocknet
8	UL+BS (T=10%) -N-W	Universallehm +Brechsand (0-2 mm), enthält 10% Ton, nicht geschützt, unter winterlichen Klimabedingungen (T=29 °C, rel. Feuchte=36%) getrocknet
9	UL+RS+RK (T=10%) -N-W	Universallehm +Rundsand (0-2 mm) +Rundkies (2-16 mm), enthält 10% Ton, nicht geschützt, unter winterlichen Klimabedingungen (T=29 °C, rel. Feuchte=36%) getrocknet.
10	UL+BS+Spl. (T=10%) -N-W	Universallehm +Brechsand (0-2 mm) +Splitt (2-16 mm), enthält 10% Ton, nicht geschützt, unter winterlichen Klimabedingungen (T=29 °C, rel. Feuchte=36%) getrocknet.
11	UL+BS (T=10%) -N-NB	Universallehm +Brechsand (0-2 mm), enthält 10 % Ton, nicht geschützt, fünf Tage unter 20 °C getrocknet und weiter bei 60 °C getrocknet
12	UL (T=25%) -G-S	Ausgangsmaterial „Universallehm“, enthält 25% Ton, geschützt, unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42 °C, rel. Feuchte=23%) getrocknet.
13	UL+RS (T=10%) -G-S	Universallehm +Rundsand (0-2 mm), enthält 10% Ton, geschützt, unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42 °C, rel. Feuchte=23%) getrocknet
14	UL+BS (T=10%) -G-S	Universallehm +Brechsand (0-2 mm), enthält 10% Ton, geschützt, unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42 °C, rel. Feuchte=23%) getrocknet
15	UL+RS+RK (T=10%) -G-S	Universallehm +Rundsand (0-2 mm) +Rundkies (2-16 mm), enthält 10% Ton, geschützt, unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42 °C, rel. Feuchte=23%) getrocknet.
16	UL+BS+Spl. (T=10%) -G-S	Universallehm +Brechsand (0-2 mm) +Splitt (2-16 mm) enthält 10% Ton, geschützt, unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42 °C, rel. Feuchte=23%) getrocknet.
17	UL (T=25%) -G-W	Ausgangsmaterial „Universallehm“, enthält 25% Ton, geschützt, unter winterlichen Klimabedingungen (T=29 °C, rel. Feuchte=36%) getrocknet
18	UL+BS (T=15%) -N-W	Universallehm +Brechsand (0-2 mm), enthält 15% Ton, nicht geschützt, unter winterlichen Klimabedingungen (T=29 °C, rel. Feuchte=36%) getrocknet
19	UL+BS (T=15%) -G-W	Universallehm +Brechsand (0-2 mm), enthält 15% Ton, geschützt, unter winterlichen Klimabedingungen (T=29 °C, rel. Feuchte=36%) getrocknet
20	UL+BS (T=10%) -G-W	Universallehm +Brechsand (0-2 mm), enthält 10% Ton, geschützt, unter winterlichen Klimabedingungen (T=29 °C, rel. Feuchte=36%) getrocknet
21	UL+BS (T=5%) -G-W	Universallehm +Brechsand (0-2 mm), enthält 5% Ton, geschützt, unter winterlichen Klimabedingungen (T=29 °C, rel. Feuchte=36%) getrocknet
22	UL+BS (T=5%) -N-W	Universallehm +Brechsand (0-2 mm), enthält 5% Ton, nicht geschützt, unter winterlichen Klimabedingungen (T=29 °C, rel. Feuchte=36%) getrocknet

**Tab. 5.18-4 Nummern, Abkürzungen und Trocknungsbedingungen der Versuchsreihen im Überblick**

## 6 Schlussfolgerungen

**Ausgehend von der Analyse der Vorteile, Nachteile, Ausführungstechniken, Verbreitungsgebiete und den oft auftretenden Schäden bei den traditionellen Lehmbauweisen im Kapitel 4 kann Folgendes abgeleitet werden:**

- Lehmteile, die unter sommerlichen Klimabedingungen getrocknet sind, zeigen mehr Schwindrisse als die Lehmteile, die unter winterlichen Klimabedingungen getrocknet werden. Wenn durch schnelles Abtrocknen der Wandoberflächen das Feuchtegefälle von innen nach außen zu groß wird, erreichen die Zwängungsspannungen durch unterschiedliches Schwinden die geringe Zugfestigkeit der Lehmstoffe, so dass vermehrt Schwindrisse auftreten. Die entstandenen Schwindrisse setzen die Festigkeit und den Regenerationswiderstand herab.
- Die erforderlichen langen Trocknungszeiten nach den Bauabschnitten bzw. vor den Putzarbeiten führen zu langen Bauprozessen und damit zu wirtschaftlichen Nachteilen sowohl für Bauherren als auch für die Baufirmen. Sie führen zu hohen Kosten.
- Heftige Regen- und Hagelfälle während des Trocknungsprozesses können sowohl die frisch geformten Lehmsteine als auch die frisch geputzten Zauburwände stark beschädigen. Auch nicht geputzte Lehmmaußenwände können dadurch beschädigt werden.
- Das Innere der Lehmteile kann bei einer Verletzung der Oberfläche durch herausragende Strohteile leichter durchfeuchtet werden, was zur Abnahme der Festigkeit der Bauteile führt.
- Die Putzabplatzungen bei den geputzten Lehmwänden entstehen vor allem wegen unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten zwischen Putzschichten und Untergrund (Lehmwand).
- Wegen der statischen Gefährdung durch Feuchtigkeit müssen die Sicherheiten bei den traditionellen Lehmtechniken höher liegen als bei wasserfesten Baustoffen. Dadurch entstehen dickere Wände, als es im trocknen Zustand statisch erforderlich wäre.
- Da der Baustoff Lehm geringe Zugfestigkeit und Kantenfestigkeit hat, treten oft Schäden um den Fenster- und Türrahmen auf.

- Die Kombination vom Baustoff Lehm als Wandkern mit Naturstein als Schutzschalen ermöglichte in den regenreichen Gebieten des Jemen eine geschützte Bauweise, die sogar bei dem Bau von Zisternenbauten verwendet wurde. Dabei waren sowohl die langsame Trocknung für den Wandkern als auch der optimale Schutz gegen Regen- und Hagelfälle garantiert. Diese Bauweise liefert uns die Idee und den Ansatzpunkt für die Entwicklung von geschützten Lehmbauweisen, soweit man deren relativ dicke Wände und hohen Kosten vermeiden kann.

**Aus den klimatischen Messungen im Abschnitt 4.6 kann folgendes abgeleitet werden:**

- Die Außenwände der Bauten im Seiyun-Klima (warm, trocken) sollten die größtmögliche Speichermasse besitzen, um die Temperaturamplitude zu dämpfen. Diese Maßnahme ist sehr wichtig und hat ihre positive Wirkung auf das Innenraumklima besonders in der Winterperiode.
- Während der Sommerperiode soll eine intensive Durchlüftung der Bauten in den Abendstunden, in denen die Außenlufttemperatur niedriger ist als am Tag, eine Abkühlung der Innenwände ermöglichen. Dabei wird die Nachtkälte in der Konstruktion gespeichert und dient der Senkung der Raumtemperatur im Laufe des Tages.
- Während der Winterperiode soll eine intensive Durchlüftung der Bauten in den Vormittags- und Nachmittagsstunden erfolgen, so dass die in der Konstruktion gespeicherte Wärme während der kalten Nachtstunden in die Räume ausgestrahlt werden kann.
- Bei der Entwicklung von modernen Lehmbautechniken sollen mineralische Zuschläge mit hohen Rohdichten verwendet werden, sodass die Rohdichte des Baulehms steigt und dadurch das Wärmespeichervermögen des Materials zunimmt. Denn:

$$Q_s = c \cdot \rho \cdot s \quad [\text{kJ/m}^2\text{K}] \text{ bzw. } [\text{Wh/m}^2\text{K}]$$

Wobei:

$Q_s$  : das Wärmespeichervermögen in  $[\text{kJ/m}^2\text{K}]$  bzw.  $[\text{Wh/m}^2\text{K}]$

$c$  : spezifische Wärme in  $[\text{J/kgK}]$

$s$  : Bauteildicke in  $[\text{m}]$

$\rho$  : Rohdichte in  $[\text{kg/m}^3]$

Diese Maßnahme hat die Priorität besonders, wenn der Wunsch besteht, die Wanddicken so klein wie möglich zu halten, um die Konstruktionsfläche zu verringern. Das ist notwendig aufgrund heutiger hoher Kosten für die Grundstücke.

- In den Neubaugebieten, wo die gegenseitige Verschattung der Gebäude aus verkehrstechnischen Gründen sowie wegen der Feuerwehranforderungen fehlt, ist die Entwicklung einer Lehmbauweise, die die Verschattung der Fassaden integriert (Selbstverschattungsprinzip) und den Schutz gegen Regen- und Hagelfälle mitliefert, unvermeidbar.
- Bei der Entwicklung von modernen Lehmbauweisen soll darauf geachtet werden, dass die Außenoberflächen der Bauten weiß sind oder zumindest helle Farbtöne, wie gelb, hellblau, hellrot haben. Das Ziel dabei ist die Reduzierung der Wärmebelastung durch Verringerung des Absorptionsfaktors. Der Reflexionsfaktor von weißen Kalkputzen beträgt 70-80%. Bei Lehm und Erdfarben (Lehmputzen) beträgt der Reflexionsfaktor nur noch 15-30%. Die hellen Farbtöne wie gelb, hellblau und hellrot haben einen Reflexionsgrad von 60%. Ziegel mit dunkelroter und rauher Oberfläche haben einen Reflexionsfaktor von nur 25%, vgl. [81] und [138].

**Ausgehend von den Versuchsergebnissen in Kapitel 5 kann Folgendes abgeleitet werden:**

- Die traditionelle Grundregel, dass Lehmhäuser in der Winterperiode und nicht in der Sommerperiode gebaut werden sollen, sollte weiter eingehalten werden. Denn die Vernachlässigung dieser Regel führt nicht nur zur Beschädigung von frisch gebauten Lehmobjekten durch heftige sommerliche Regen- und Hagelfälle, sondern auch zur Festigkeitsminderung. Es hat sich gezeigt, dass in extremen Fällen eine Druckfestigkeitsverminderung über 54% bestehen kann, vgl. Abb. 5.17-1.
- Das Magern von sehr fetten und fetten Lehmen, um das Anmachwasser und damit das Schwindmaß sowie Schwindrisse zu verringern, sollte möglichst mit gebrochenen Zuschlägen und nicht mit rundkörnigen Zuschlägen erfolgen.
- Das Magern der Baulehme mit mineralischen Zuschlägen sollte möglichst mit Partikeln erfolgen, deren Größtkorn im Sandbereich liegt. Je größer der Größtkorn ist, desto dicker wird die Tonumhüllungsschicht der Körner sein, bei gleicher erwünschter Tonmenge. Dadurch tritt öfter die Kantenverbindung zwischen Kanten und Oberflächen der Tonteilchen auf, was zur Festigkeitsverminderung führt.

- Sowohl ist die langsame Trocknung in der ersten Trocknungsphase (erste Woche) sehr wichtig als auch die langsame Trocknung über den gesamten Trocknungsvorgang zu empfehlen, vgl. Abschnitt 5.14 und Abschnitt 5.15 sowie Abschnitt 5.16.
- Die Entwicklung von Schutzschalen (verlorene Schalung) für die Lehmbauelemente ist von großer Bedeutung. Sie garantieren eine langsame Trocknung der Lehmwände, was zur Verminderung der Schwindspannungen und somit zur Verringerung der Schwindrisse führt, sodass die Festigkeit der Wände zunimmt. Die Wirkung der Schutzschalen ist umso größer, je höher der Tonanteil in der Mischung ist, vgl. 5.15.
- Das Verarbeitungszustandsverfahren (VZV), das vom Verfasser zur Ermittlung des Trockenschwindmaßes der Lehmmischungen entwickelt wurde, gibt das Trockenschwinden der Lehmmischungen in der Praxis zutreffender wieder als die Ermittlung des Trockenschwindmaßes nach DIN 18952 Bl.2. Dies ist leicht zu erkennen, besonders bei den Lehmmischungen „UL+RS+RK (T=10%)“ und „UL+BS+Spl. (T=10%)“ im Vergleich zu den Lehmmischungen „UL+RS (T=10%)“ und „UL+BS (T=10%)“, vgl. Abb. 5.11-1 und Abb. 5.12-1.

### **Abschließend**

Soll Lehm im Jemen vermehrt angewendet werden, so muss man sich mit den Schwächen des Baustoffes Lehm beschäftigen, denn allein seine baubiologischen Qualitäten zu propagieren, genügt nicht. Der architektonischen Gestaltung und materialgerechten Konstruktion von Lehmbauten sollte künftig mehr Beachtung geschenkt werden.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Forschungsarbeit hatte folgende Ziele:

- einen Beitrag zur Bauforschung über die traditionellen Lehmbauweisen im Jemen und ihrer Vorteile, Nachteile, Ausführungstechniken, Verbreitungsgebiete und oft auftretenden Schäden sowie übliche Schutzmaßnahmen zu leisten. Daraus sollten Lösungsansätze für die modernen Lehmbautechniken hergeleitet werden.
- wichtige Kenntnisse über die traditionellen Lehmbautechniken im Jemen, die bis jetzt nicht von anderen Autoren benannt wurden, durch Detailzeichnungen und ausführliche Beschreibungen zu dokumentieren
- die Feststellung des Einflusses von Lehmwandstärke auf das Raumklima im Sommer und Winter in der Klimaregion „Wadi-Hadhramaut“, um klimatische Kenntnisse und Grundlagen für die Entwicklung von modernen Lehmbauweisen zu liefern
- die Wirkung der sommerlichen und winterlichen Klimabedingungen auf die Festigkeit von Lehmmischungen gleicher Tonmenge und unterschiedlicher Zuschläge zu untersuchen und diese Wirkung bei der verzögerten Trocknung der Probekörper in 3 cm dicken Schutzschalen aus einem kapillar leitenden Material, bei dieser Arbeit „Ytong“, zu prüfen

Um diese Ziele zu erreichen, wurden folgende Methoden angewandt:

- **Analyse und Studie der wesentlichen Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Lehmbautechniken im Jemen**

Die Einflüsse der geographischen, topographischen, klimatischen, historischen, religiösen und technischen Faktoren auf die Entwicklung des Lehmbaus und seiner Techniken im Jemen wurden zusammengefasst dargestellt. Es ist deutlich geworden, dass die Jemeniten ihre klimatischen Bedingungen und natürliche Gegebenheiten sehr gut erkannt hatten und auf diese klug reagierten. In den niederschlagsarmen Gebieten herrscht die reine Lehmbautechnik vor. In den niederschlagsreicheren Gebieten und dort, wo fetter Lehm weniger häufig zu finden ist, wurde eine Kombination von kiesigem Lehm als Kern mit beidseitigen Schalen aus ortsnahem Naturstein gewählt. So ergab sich eine „geschützte Bauweise“.

In den Küstengebieten, wo das Klima warmfeucht ist und die Speichermasse von Nachteil wäre, hat man eine leichte Lehmbauweise (Mischbauweise) entwickelt.

Darüber hinaus wurden die Einflüsse der Migration und Binnenwanderung sowie der jemenitischen Wiedervereinigung auf den Lehmbau in einer intensiven Recherche untersucht. Die gesellschaftlichen Gründe, die den Rückgang des Lehmbaus und die Verdrängung des Baustoffes Lehm durch moderne Baustoffe, vor allem Beton und Stahlbeton, insbesondere in den letzten vier Jahrzehnten verursachten, wurden dargestellt.

Einen besonderen Einfluss auf das Lehmvorkommen und die Lehmbautechniken haben im Jemen die traditionellen Bewässerungssysteme. Das gilt für die Wadi-Bewässerung bzw. Sayl-Bewässerung ebenso wie für die Terrassenbewässerung.

Es hat sich gezeigt, dass einerseits die Bewässerungssysteme den Lehmbau benötigen, um die Felderflächen auf dem erforderlichen Bewässerungsniveau zu halten und auf der anderen Seite der Lehmbau die traditionellen Bewässerungssysteme braucht, um den regenerierbaren Baustoff Lehm zu gewinnen.

▪ **Analyse der traditionellen Lehmbautechniken anhand von Fallbeispielen in Seiyun, Tarim, Shibam, Sa'da, Sana'a und Ma'bar.**

Die Schwächen des Baustoffes Lehm in den traditionellen Lehmbauweisen, wurden im Kapitel 4 dargestellt. Dabei wurde nach Baugebieten und Ausführungstechniken unterschieden. Die Felduntersuchung erstreckte sich auf Lehmbauten in Herstellungsphase und auf Herstellungsstätten der Lehmsteine und Kalkputze. Erfahrene Lehmbaumeister wurden zu Rate gezogen. Die Kenntnisse wurden durch Detail-Zeichnungen, Tabellen und Abbildungen dokumentiert. Auf die oft auftretenden Schäden und die traditionellen Schutzmaßnahmen wurde eingegangen. Sie liefern weitere Gründe für den Rückgang des Lehmbaus im Jemen.

Die Verwendung von Lehmstoffen umfasst im Jemen hauptsächlich zwei Bauweisen:

- Lehm für massive tragende Wände mit den drei Konstruktionsprinzipien:
  - Lehmsteintechnik
  - Die Zabourtechnik
  - Die Kombination vom Lehm und Naturstein (geschützte Bauweise) in den regenreichen Gebieten;

- Lehm als nicht tragenden Baustoff zum Bewurf von Flechtwerkwänden in den warmfeuchten Gebieten längs der Westküste des Landes

Die Bauschadensanalyse zahlreicher historischer und neuer Lehmbauten in Shibam, Seiyun, Tarim, Sa'da, Sana'a und Ma'bar zeigt, dass Schlagregen, Hagel und aufsteigende Feuchtigkeit das Hauptproblem bei der Sicherung des Bestandes darstellen. Neben ästhetischen Auswirkungen wurde an einem Großteil der Gebäude eine erhebliche Beeinträchtigung der Standsicherheit festgestellt. Einerseits wird bei den massiven Lehmbauweisen (Lehmsteintechnik und Zabourtechnik) eine ausreichende Trocknungszeit vor dem Beginn mit der Dach- oder Deckenerrichtung verlangt und auf der anderen Seite kann eine Verzögerung der Errichtung von Decken bzw. Dächern die Standsicherheit der Lehmwände erheblich durch Regenwasser- und Hagelfälle beeinträchtigen. Bei der Zabourbauweise hat sich gezeigt, dass die unter sommerlichen Klimabedingungen errichteten Häuser mehr Schwindrisse und Regenempfindlichkeit zeigen als diejenigen, die unter winterlichen Klimabedingungen gebaut sind.

Die Erosionsgefahr erfordert eine Überdimensionierung der Außenwände. Deshalb weisen die traditionellen massiven Lehmbauweisen stets dicke Wände auf.

Anhand dieser Felduntersuchung können die oft auftretenden Schäden an Lehmbauten im Jemen wie folgt zusammengefasst werden:

- Oberflächenabspülungen und Verletzungen an den Außenwandflächen durch Regen oder Regen-Hagelfälle
- Schäden wegen aufsteigender Feuchte
- Putzabplatzungen bei den geputzten Lehmwänden wegen unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten zwischen Putzschicht und Untergrund (Lehmwand) sowie wegen zu rascher Trocknung der Putzfläche oder Ausführungsmängeln.
- Bauschädliche Salze durch Tierhaltung und Einleitung von Abwässern in gebäudenahe Sickergruben
- Schäden an den Fenster- und Türleibungen bedingt durch energisches Öffnen und Schließen der Tür- bzw. Fensterflügel, weil der Baustoff Lehm relativ geringe Zugfestigkeit hat.
- Da der Lehm in den jemenitischen traditionellen Lehmbautechniken im plastischen Zustand verarbeitet wird, treten oft Schwindrisse auf, besonders wenn die Bearbeitung in die Sommerperiode fällt.

Sowohl aus der Analyse der traditionellen Lehmbautechniken als auch aus der Studie der Einflussfaktoren auf den Lehmabau im Jemen kann man folgende Gründe für den Rückgang von Lehmabau im Jemen herleiten:

- Die langen Trocknungszeiten zwischen den Bauabschnitten und vor den Putzarbeiten führen zu langen Bauzeiten und damit zu wirtschaftlichen Nachteilen sowohl für Bauherren als auch für die Baufirmen im Vergleich zu den modernen Baustoffen.
- Die Herstellung von Lehmabauten ist von der Jahreszeit abhängig. Sie werden meistens in den Jahrestrockenperioden gebaut.
- Die sehr hohe Empfindlichkeit des Lehmes gegenüber Feuchtigkeit, sodass die Standsicherheit der Gebäude bei Wassereintrich gefährdet sein kann.
- Die modernen Anforderungen an ein städtebauliches Konzept und an die Gebäudeplanung, insbesondere aus verkehrstechnischer Sicht sowie die Feuerwehranforderungen bedingen die Planung „selbstschützender“ Gebäude.
- Die traditionellen Lehmbautechniken können die heutigen Anforderungen an größere Spannweiten und Öffnungen in bestimmten Bauwerken nicht erfüllen.
- Die großen Grundrissflächen der Wände traditioneller Lehmabauweisen im Vergleich zu den modernen Baustoffen sind ein weiteres Hindernis für die Verwendung des Baustoffes Lehm besonders in Gebieten mit steigenden Grundstückspreisen.
- erforderliche kontinuierliche Pflege und Pflegekosten für die Lehmabauten.
- wegen starker gesellschaftlicher Veränderungen (Binnenwanderung, Lebensform, Migration) und Verschlechterung der wirtschaftlichen Lage im Jemen unterbleibt die Pflege.
- Fehlende Flexibilität in der Grundrissgestaltung bei den traditionellen Lehmbautechniken wegen ihrer tragenden Außen- und Innenwände
- Das Verlorengang des traditionellen Wissens im Umgang mit dem Baustoff Lehm
- Das Öffnen der Märkte des Landes für Baustoffe aus dem Ausland
- Es gibt keine Normen für den Baustoff Lehm im Jemen.
- Fehlende Forschung und Verbesserung für die traditionellen Lehmabauweisen

### ▪ **Bauklimatische Messungen in einigen Testhäusern**

Um die Wirkung der Veränderung von Lehmwandstärken auf das Raumklima zu untersuchen, und das thermische und hygrische Verhalten von Lehmwänden verschiedener Dicken festzustellen, wurden bauklimatische Messungen in den Sommer- und Wintermonaten in einigen Testhäusern in Seiyun Wadi-Hadhramaut, durchgeführt.

Die bauklimatischen Messungen (Innenraumtemperatur, Außenlufttemperatur, Oberflächentemperatur der inneren Umschließungsflächen, Luftgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit in Innenräumen sowie im Außenraum) im Seiyun-Palast „Kasr-al-Sultan“ in den kritischen Monaten Januar und Juli wurden in dieser Arbeit als Beispiel dargestellt und bewertet.

Die Bewertung der thermischen Behaglichkeit in den Testräumen während der Sommermessungen und Wintermessungen erfolgte sowohl nach Gleichgewichtsmodell als auch nach dem adaptiven Modell.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Außenwände der Bauten im Seiyun-Klima (warm, trocken) die größtmögliche Speichermasse besitzen sollten. Dabei sollen mineralische Zuschläge mit hohen Rohdichten verwendet werden, sodass die Rohdichte des Baulehms steigt und dadurch das Wärmespeichervermögen des Materials zunimmt

### ▪ **Einflüsse von sommerlichen und winterlichen Klimabedingungen im Jemen auf die Trockendruckfestigkeit von verschiedenen Lehmmischungen**

Dabei wurden insgesamt zehn Versuchsreihen mit je fünf Probekörpern für fünf verschiedene Lehmmischungen gleicher Konsistenz und unterschiedlicher mineralischer Zuschläge hergestellt. Die erste Mischung ist das Ausgangsmaterial „Universallehm“ (UL), das eine Tonmenge von 25% enthält.

Die anderen vier Mischungen wurden mit Rundsand (0-2 mm), Brechsand (0-2 mm), Rundsand + Kies (2-16 mm) und Brechsand + Splitt (2-16 mm) gemagert, sodass jede Mischung genau 10% Tonmenge enthielt, vgl. Sieblinien der Versuchsmischungen im Kapitel 5.

Die Bindekraft des Ausgangsmaterials „Universallehm“ wurde ermittelt und betrug 117,99 g/cm<sup>2</sup>.

In dieser Arbeit wurde von dem Durchmesser 30 cm als Zielwert des Ausbreitmaßes bei allen Versuchsreihen ausgegangen.

Die Ermittlung des Trockenschwindmaßes der Versuchsmischungen erfolgte sowohl nach DIN 18952 Bl.2 als auch nach dem neuen entwickelten Verfahren in dieser Arbeit (Verarbeitungszustandsverfahren) „VZV“.

Die Probekörper aller Versuchsreihen in dieser Arbeit wurden nach der Feststellung des Zielwertes vom Ausbreitmaß (30 cm) sofort mit Handstrichverfahren hergestellt.

Die Versuchsreihen 1 bis 5 wurden sofort nach der Herstellung unter sommerlichen Klimabedingungen (SKB) des Sommermonates Juli in der Klimakammer bis zur Massenkonstanz getrocknet.

Die Versuchsreihen 6 bis 10 der oben genannten fünf Lehmischungen wurden sofort nach der Herstellung unter winterlichen Klimabedingungen (WKB) des Wintermonates Januar in der Klimakammer bis zur Massenkonstanz getrocknet.

Bei allen fünf verschiedenen Lehmischungen haben die unter WKB getrockneten Versuchsreihen höhere Trockendruckfestigkeiten erreicht als die Versuchsreihen, die unter SKB getrocknet wurden.

▪ **Einflüsse der langsamen Trocknung durch kapillare Leitfähigkeit der Schutzschalenwände auf die Druckfestigkeit der Versuchsreihen.**

Dabei wurden die Versuchsreihen 12 bis 16, je fünf Probekörper, von den oben erwähnten fünf Lehmischungen hergestellt und in Schutzschalen aus Porenbeton, deren Wanddicke 3 cm beträgt, unter SKB getrocknet.

Aus dieser Untersuchung kann Folgendes abgeleitet werden:

- Die geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen gleicher Lehmischungen haben gleiche Gesamttrocknungsdauer. Das zeigt, dass die Schutzschalen nur den Trocknungsverlauf beeinflussen und jedoch kaum die Trocknungsdauer.
- Bei allen fünf verschiedenen Lehmischungen haben die während des Trocknungsprozesses geschützten Versuchsreihen höhere Trockendruckfestigkeiten als die Versuchsreihen, die während der Trocknung nicht geschützt wurden.
- Der Einfluss der Schutzschalen ist umso größer, je höher der Tonanteil in der betroffenen Lehmischung ist.

## Ausblick

Die Beibehaltung einer bestimmten Lehmbauweise ist entscheidend davon abhängig, wie weit es gelingt, die Probleme der Langzeitbeständigkeit des Baustoffes Lehm und der Standsicherheit des Gebäudes mit vertretbarem Aufwand zu lösen. Deshalb sollen Lehmbauweisen entwickelt werden, die Schutzmaßnahmen für ihre Lehmteile gegen schnelle Trocknung, Erosion, direkte Sonneneinstrahlung und mechanische Beschädigung garantieren, sodass die traditionelle Überdimensionierung der Lehmwände vermieden wird.

Es soll Folgendes untersucht werden:

- Entwicklungsmöglichkeit von Schutzelementen als verlorene Schalung, die die Trocknung der Lehmmasse verzögern. Sie sollen möglichst kapillarfeuchteleitfähig und diffusionsoffen, sowie gegen Durchfeuchtung ausreichend stabil sein.
- Einsatzmöglichkeit des „Wasserkrugprinzips“ zur Kühlung der gestampften Lehmmasse um dadurch hohe Festigkeiten für den gestampften Lehm zu erreichen.
- Entwicklungsmöglichkeit von Schutzelementen aus der traditionellen Kalk- und Sandmischung, die bei der Herstellung der historischen Kalkputze verwendet wurde. Dabei kann die weiße Farbe der Schutzschalen zur Verringerung der Wärmelast aufgrund ihres hohen Reflexionsfaktors ausgenutzt werden.



## 8 Verzeichnisse

### 8.1 Abbildungsverzeichnis

#### Zu Kapitel 1:

Abb. 1.1-1	Weltbevölkerungswachstum zwischen 1950 und 2005 und Prognose bis zum Jahr 2050 [29]	14
Abb. 1.1-2	Entwicklung des weltweiten jährlichen Bedarfs an Primär-Energie und elektrischer Energie (1900-2050) [60]	14
Abb. 1.2-1	Bevölkerungswachstum im Jemen zwischen 1961 und 2003 und Prognose bis zum Jahr 2031, Daten nach [85, 86, 87, 88]	17
Abb. 1.2-2	Entwicklung der Zementpreise im Jemen in den letzten 15 Jahren Daten nach [11, 56, 85, 86, 87, 88]	17
Abb. 1.2-3	Das Gebäude in der südwestlichen Ecke der Stadt Shibam hat seine Standsicherheit verloren aufgrund starker Regen- und Hagelfälle sowie verzögerter Restaurierung, Januar 2004	18
Abb. 1.2-4	Beispiel für Putzabplatzungen am Seiyun-Palast, ein Jahr nach der letzten Renovierung 2002	20
Abb. 1.2-5	Putzschäden an den Ecken, (Anbau am Seiyun-Palast)	20
Abb. 1.2-6	Putzschäden bei den Türrahmen, (Anbau am Seiyun-Palast)	20
Abb. 1.2-7	Gesamtbaugenehmigungen in der Region Hadhramaut von 1999 bis 2003 (umfasst Lehmbauten, Betonbauten und Wohnbauten), Daten nach [85, 86, 87, 88]	21

#### Zu Kapitel 2:

Abb. 2.2-1	Thermal Sensation Abstimmung im Wintermonat Januar 2001 in Seiyun Wadi-Hadhramaut [14]	27
Abb. 2.2-2	Thermal Sensation Abstimmung im Sommermonat August 2000 in Seiyun Wadi-Hadhramaut [14]	27
Abb. 2.4-1	Veränderung der Druckfestigkeit von Lehmern durch Zementzugabe [94]	30
Abb. 2.4-2	Veränderung der Druckfestigkeit von Lehmern durch Kalkzugabe [94]	30
Abb. 2.6-1	Anstieg der Materialfeuchte in Abhängigkeit von andauernden relativen Luftfeuchten bei 20°C [36]	32
Abb. 2.6-2	Abfall der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von andauernden relativen Luftfeuchten [36]	33
Abb. 2.6-3	Feuchteabhängige Druckfestigkeit der verwendeten Stampflehm-Mischung in der Kapelle der Versöhnung in Berlin [35]	33
Abb. 2.7-1	Würfeldruckfestigkeiten einer Stampflehm-Mischung unter verschiedenen Trocknungsbedingungen nach dem Erreichen ihrer Ausgleichfeuchte [119]	34
Abb. 2.7-2	Kornverteilungskurve der verwendeten Stampflehm-Mischung von der Kapelle der Versöhnung – Berlin [35]	34

Abb. 2.8-1	Eine Armierung der Lehmsteinwände mit vertikalen Schilfrohren alle 45 cm und horizontalen gespaltenen Schilfrohren in jeder vierten Steinschicht verbessert den Widerstand der Lehmstein-Wände gegen Erdbebenkräfte (im Vergleich zu den nicht armierten Lehmsteinwänden) [22]	35
Abb. 2.10-1	Typische Korngrößenverteilungen von Quarz, Kaolinit, Illit und Montmorillonit [97]	38
Abb. 2.10-2	Räumliche Darstellung der Schichtstruktur von Tonmineralen [79] a) Zweischichtminerale                      b) Dreischichtminerale	38
Abb. 2.10-3	Schematische Darstellung der Struktur eines Schichtsilikates (Muskovit). An den durch einen Pfeil gekennzeichneten Stellen sitzt eine negative Ladung [132]	39
Abb. 2.10-4	Die Struktur der Sedimente der plättchenförmigen Teilchen in Abhängigkeit von der Aggregation in der Lösung [78]	40
Abb. 2.10-5	Verbindungsformen zwischen plattigen Tonteilchen [72]	40
Abb. 2.10-6	Wechselwirkungen zwischen kolloidalen Teilchen nach der DLVO-Theorie [78]	41
Abb. 2.10-7	Aggregationsmöglichkeiten der Tonmineralplättchen in Abhängigkeit vom pH-Wert [78]	42
Abb. 2.10-8	Abhängigkeit des pH-Wertes des Wassers von der Temperatur [72]	42
Abb. 2.10-9	Schematische Darstellung der Wirkung von Ca- und Na-Ionen auf Kaolinit-Wasser-Mischungen [115]	42
Abb. 2.10-10	Zwei Tonteilchen mit negativen (äußeren) Oberflächenladungen und Gegenionen in einem Elektrolyt. Die zu kurze Entfernung zwischen den Teilchen verursacht eine Überlappung ihrer diffusen Schichten, folglich ein Eindringen von Wassermolekülen in die Überlappungszone und eine osmotische Quellung [59]	45
Abb. 2.10-11	Arten des Wassers im Boden [72]  1 Strukturwasser;    2 Adsorbiertes Wasser;    3 Tonmineral; 4 Solvatwasser;      5 Porenwasser	45

### **Zu Kapitel 3:**

Abb. 3.3-1	Wetterkarten zu den drei Jahreszeiten im Jemen [24]	50
------------	---	----

### **Zu Kapitel 4:**

Abb. 4.1-1	Allgemeine Hauptbauformen der traditionellen Bauweisen, in denen Lehm als Baustoff verwendet wird im Jemen	66
Abb. 4.1-2	Nach dem 2- 3 Tage lang dauernden Maukprozess wird die Lehmmasse mit den Füßen getreten, mit Stroh vermischt, bis sie die erforderliche Homogenität erreicht hat, und dann transportiert	68
Abb. 4.1-3	Die plastische Lehmmasse wird mit dem Handstrichverfahren in die Holzformen aus einer Höhe 30-40 cm hineingeworfen und glatt abgestrichen. Entformt wird unmittelbar danach	68
Abb. 4.1-4	Nach 1-2 Tagen werden die Lehmziegel hoch-kantig gestellt, und dann im Sommer sieben Tage lang bzw. im Winter zehn Tage lang sonnen- und luftgetrocknet	68
Abb. 4.1-5	Typischer Schichtenaufbau bei der Gründung der achtgeschossigen Lehmsteinbauten in Shibam Wadi-Hadhramaut	71

Abb. 4.1-6	Südensicht der Stadt Shibam Wadi-Hadhramaut Bildaufnahme 1/2003	72
Abb. 4.1-7	Plan der Stadt Shibam nach Archivunterlagen der SUDP, ergänzt und weiterbearbeitet vom Autor	72
Abb. 4.1-8	Das Minarett der Al-Mihdar- Moschee in Tarim, 38,1 m hoch, höchstes Lehmbauwerk im Jemen [95], von Saijed Al-Sakaf 1914 aus handgefertigten Lehmsteinen gebaut.	74
Abb. 4.1-9	Lehmteilchen werden von den Putzabplatzungsstellen durch Regenwasser abgespült und verfärben stellenweise die weißen Kalkputzflächen mit Lehmfarbe. (ästhetisches Problem). Dar-U'schah in Tarim von Frau Omar al-Kaf, gebaut 1952	74
Abb. 4.1-10	Sabyah-Verband	76
Abb. 4.1-11	Sabyah- und Marudhahverband	76
Abb. 4.1-12	Dach-Wand-Detail	77
Abb. 4.1-13	Decke-Wand-Detail	77
Abb. 4.1-14	Suq al-Ienan in Barat in Zabourtechnik gebaut [131]	81
Abb. 4.1-15	Sa'da 1975 Luftaufnahme [32]	81
Abb. 4.1-16	a), b) und c) Details bei der Errichtung der Zabourbauten	83
Abb.4.1-17	Schwindrisse in Zabourwänden, die im Sommer gebaut sind. Mugahid- Haus, Rahban – Sa'da	84
Abb.4.1-18	Gründungen der Zabourwände. Rahban – Sa'da	84
Abb.4.1-19	Bei der Errichtung von Zabourwänden. Mugahid-Haus. Rahban-Sa'da	84
Abb.4.1-20	Zabourhaus in Ma'bar wurde in den Sommermonaten gebaut, zeigt starke Schwindrisse und muss abgerissen werden	84
Abb.4.1-21	Zabourhaus in Rahban – Sa'da wurde in den Wintermonaten gebaut und es zeigt weniger Schwindrisse	84
Abb. 4.1-22	Horizontale Rundhölzer in Zabourschichten an den renovierten Teilen der historischen Stadtmauer der Altstadt von Sana'a. Wegen Regenwassererosion und hoher Feuchtigkeit sind einige Rundhölzer verfault	87
Abb. 4.1-23	Reststück der historischen Stadtmauer von Sana'a. Man erkennt das horizontal eingelegte Rundholz mit 7 cm Durchmesser und das Verzichten auf mehrere Hölzer	87
Abb. 4.1-24	Prinzipskizze für das Einlegen von Rundhölzern in den Zabourschichten. Sie wirken als Zuganker zwischen Quer- und Längswänden	87
Abb. 4.1-25	Die Erosion von Zabourwänden ist stärker an den Flächen, die direkt unter den geputzten Flächen liegen und an den früh entstandenen vertikalen Schwindrissen. Maswarah – Marib, Juli 2003	89
Abb. 4.1-26	Die obersten Geschosse verlieren Ihre Standsicherheit schneller, weil sie am stärksten von Regen- und Hagelfällen betroffen sind, und ihre Wände dünner sind. Maswarah – Marib, Juli 2003	89
Abb. 4.1-27	Abplatzung von Putzschichten und abgebröckelten Teilen von Zabourschichten an einem Zabourhaus in Barat. Bild nach [131]	89
Abb. 4.1-28	Hajarah, etwa 100 km südwestlich von Sana'a. nach [135]	91
Abb. 4.1-29	Zisterne im Bauzustand in Al-Arouq in Taiz, Aufnahme August 2003	91
Abb. 4.1-30	Prinzipskizze für eine Zisterne wand in Al-Arouk – Taiz in der geschützten Bauweise „Kombination von Lehm und Naturstein“	92

Abb. 4.2-1	Wohnhäuser der Tikar in Kamerun, als Skelettbauten errichtet, deren Wandzone oft mit Lehm verputzt wird [80]	95
Abb. 4.2-2	Grundriss und Schnitt eines Hofes mit Rundbauten in Tehamah nach [48] zitiert in [139]	95
Abb. 4.2-3	Bauweise im heiß-feuchten Klima (Tehama) [131]	96
Abb. 4.3-1	Mahdhah-Schicht, gleich nach jeder Maufer (fünf Schichten) an den unten erwähnten tragenden Lehmsteinwänden ausgeführt	99
Abb. 4.3-2	Tragende Lehmstein-Wände, etwa (52)cm breit beim Ausführungs-Zustand in Sabyah-Verband durchgeführt, gegenüber Dar- Asalam in Tarim	99
Abb. 4.3-3	Kalkbrennöfen bei Shibam	101
Abb. 4.3-4	Verarbeitung und Sumpfen von Kalk vor der Verwendung	101
Abb. 4.3-5	Kalkputze unterschiedlicher Dicke in Tarim, Vor- und Rückseite	101
Abb. 4.3-6	Kalkputzschäden am Lehmsteingebäude Nr. 81-D in Shibam benachteiligen die ästhetische Wirkung, vgl. Abb. 4.1-7	104
Abb. 4.3-7	Kalkputzabplatzung am Al-Rinad-Palast in Tarim. Gebaut von Mohamad Al-Kathierie 1931, mit Lehmsteintechnik, oft renoviert	104
Abb. 4.3-8	Hantut- Palast in Tarim: Putzrisse wegen Schwinden und unterschiedlicher Ausdehnungs-Koeffizienten zwischen der Putz-Schicht und dem Untergrund, sowie Mängel bei der Ausführung führen zu Putzabplatzungen. Die Durchfeuchtung von Bauteilen kann ihre Standsicherheit beträchtlich gefährden.	104
Abb. 4.3-9	Durch aufsteigende Feuchte geschwächte Zabourwände. Die geschädigte Zone wurde zusätzlich im Querschnitt durch den Gangbau von Ratten und Hasen geschwächt. Ras'a Haus / Khazanstr. / Ma'bar	105
Abb. 4.3-10	Bei zahlreichen historischen Zabourbauten werden Schaden-Bereiche mit Naturstein verkleidet und dann mit Zementputzen versehen. Al-Anisy- Haus/ Khazanstr. /Ma'bar	105
Abb. 4.3-11	Die schlechte Ableitung des Regenwassers ist eine direkte Ursache für Feuchtigkeit. Salzbelastungen der unteren Zabourschichten sind außerdem eine zusätzliche Querschnittsschwächung an den tragenden Wänden. Shirian-Haus, Wasita / Ma'bar	105
Abb. 4.3-12	Haus von Mura'd / Ma'bar, Abplatzung des Zementputzes im Erdgeschoss. Zweites Geschoss ist aus Beton-Blocksteinen gebaut	106
Abb. 4.3-13	Lagerhaus in Harat Ad- Dawar / Altstadt Sa'da. Kalkputzabplatzungen benachteiligen das ästhetische Aussehen	106
Abb. 4.3-14	Kalkputzabplatzungen an einem Wohnhaus in Harat Al-Girba / Altstadt Sa'da. Direkt unter den geputzten Flächen an der Fassade machen sich die erodierenden Wettereinflüsse bemerkbar	106
Abb. 4.3-15	Blick ins Harat-as-Suq von der Dachterrasse der Mädchenschule Richtung Südosten. Die oberen Geschosse der meisten Zabourhäuser wurden mit Betonhohlblocksteinen gebaut (Als Schutz für die unteren Geschosse)	107
Abb. 4.3-16	Das Obergeschoss aus Betonhohlblocksteinen, mit Zementputz und Kalkanstrich versehen. Man betrachtet das obere Geschoss als Schutz für die zwei unteren Zabour-Geschosse, Rahban / Sa'da	107
Abb. 4.3-17	Traditionell hat man die Zabourhäuser mit dem Errichten des letzten Geschosses aus gebrannten Lehmziegeln geschützt. Bait Madaga, Harat-al-Zaidan, Sa'da ca. 1952 gebaut	107
Abb. 4.4-1	Durch Regenwasser beschädigte Fensterbank an einem Lehmsteinhaus in Shibam	108

Abb. 4.4-2	Bab Nagran an der historischen Stadtmauer in Sa'da, 16. Jh. erbaut. Entlang der Mauer zeigen die übereinander liegenden Schichten verschiedene Erosionsgrade. Die ersten zwei Schichten sind mehr erodiert als die darüber liegenden fünf Schichten. Dann folgen fünf Schichten mit sehr großem Erosionsgrad. Danach folgen drei bis fünf Schichten, die weniger erodiert sind	110
Abb. 4.4-3	Erhöhte Sockelbildung. Man vermutete, dass Spritzwasser eine Schadenursache ist. Das Resultat der Bemühungen war unbefriedigend. Es wurde nur eine Verschiebung der Problemzone erreicht. Die drei bzw. vier letzten Zabourschichten entlang der historischen Stadtmauer zeigen mehr Schwindrisse als die unteren sechs Schichten.	110
Abb. 4.4-4	Kornverteilungskurve der verwendeten Zabourlehmischung bei der Restaurierung der historischen Altstadtmauer in Sana'a [114]	112
Abb. 4.6-1	Langjährige Außenlufttemperatur in Seiyun als Mittelwerte für maximale, minimale und mittlere monatliche Werte	114
Abb. 4.6-2	Langjährige relative Außenluftfeuchtigkeit in Seiyun, Wadi-Hadhramaut	115
Abb. 4.6-3	Hauptwindrichtung im Laufe des Jahres in Seiyun, Wadi-Hadhramaut [123]	116
Abb. 4.6-4	Seiyun-Palast 1873 gebaut, 1936 ergänzt und mit Kalkputz geschützt, oft renoviert, letzte Renovierung 2001, Bildaufnahme Januar 2004	117
Abb. 4.6-5	Lageplan des Seiyun-Palastes im Zentrum der Stadt Seiyun	117
Abb. 4.6-6	Grundrisse und Schnitt der Testräume im Seiyun-Palast	119
Abb. 4.6-7	Vergleich Innen- und Außentemperatur in den Testräumen 1, 2, 3 und 4 im Seiyun-Palast an einem Sommertag, Juli 2003	121
Abb. 4.6-8	Vergleich Innen- und Außentemperatur in den Testräumen 1, 2, 3 und 4 im Seiyun-Palast an einem Wintertag, Januar 2004	123
Abb. 4.6-9	Vergleich der inneren und äußeren relativen Luftfeuchtigkeit in den Testräumen 1, 2, 3 und 4 im Seiyun-Palast an einem Sommertag, Juli 2003	125
Abb. 4.6-10	Vergleich der inneren und äußeren relativen Luftfeuchtigkeit in den Testräumen 1, 2, 3 und 4 im Seiyun-Palast an einem Wintertag, Januar 2004	126
Abb. 4.6-11	Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 1 im Erdgeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Sommermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 75 cm.	130
Abb. 4.6-12	Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 2 im 1. Obergeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Sommermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 55 cm.	130
Abb. 4.6-13	Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 3 im 2. Obergeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Sommermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 50 cm.	131
Abb. 4.6-14	Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 4 im 3. Obergeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Sommermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 32 cm	131
Abb. 4.6-15	Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 1 im Erdstoß – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Wintermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 75 cm.	132
Abb. 4.6-16	Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 2 im 1. Obergeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Wintermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 55 cm.	132
Abb. 4.6-17	Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 3 im 2. Obergeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Wintermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 50 cm.	133

Abb. 4.6-18	Behaglichkeitsdiagramm nach Fanger [51] im Testraum 4 im 3. Obergeschoss – Seiyun-Palast mit eingetragenen Messpunkten (Wintermessungen). Die Ziffern an den Messpunkten geben die Uhrzeit wieder. Die Außenwanddicke beträgt 32 cm	133
Abb. 4.6-19a	Korrelation zwischen mittlerer Raumtemperatur und Komforttemperatur [66]	135
Abb. 4.6-19b	Die Beziehung zwischen der monatlichen mittleren Außenlufttemperatur und der Komforttemperatur nach [66]	137
Abb. 4.6-20	Vergleich Innen- und Außentemperatur bezogen auf den Behaglichkeitsbereich in den Testräumen 1, 2, 3 und 4 am Seiyun-Palast an einem Sommertag, Juli 2003	139
Abb. 4.6-21	Vergleich Innen- und Außentemperatur bezogen auf den Behaglichkeitsbereich in den Testräumen 1, 2, 3 und 4 am Seiyun-Palast an einem Wintertag, Januar 2004	140

## Zu Kapitel 5:

Abb. 5.2-1	Prinzipskizze für die begehbare Klimakammer, installiert mit den erforderlichen Sensoren, Reglern und Geräten in der Versuchshalle – Institut für Tragkonstruktionen – Hertzstraße 16 Geb. 06-32	145
Abb. 5.3-1	Ausgangsmaterialien für die Versuchsmischungen	147
Abb. 5.3-2	Abplattung bei der Kugelfallprobe bei der Ermittlung der Bindekraft und Messung vom Trockenschwindmaß	147
Abb. 5.3-3	Probekörper zur Ermittlung der Bindekraft im plastischen Zustand des Ausgangsmaterials „Universallehm“ nach [41]	147
Abb. 5.3-4	Die einzelnen Zustände der verwendeten Schutzschale	148
Abb. 5.5-1	a, b Röntgendiffraktometrie Methode zur qualitativen und quantitativen Mineralbestimmung des Ausgangsmaterials „Universallehm“ (UL), vgl. Tabelle 5.5-1	153
Abb. 5.6-1	Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm „UL (T=25%)“	156
Abb. 5.6-2	Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm gemagert mit Rundsand (0-2 mm) „UL+RS (T=10%)“	156
Abb. 5.6-3	Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL+BS (T=10%)“	157
Abb. 5.6-4	Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm gemagert mit Rundsand (0-2 mm) und Rundkies (2-16 mm) „UL+RS+RK (T=10%)“	157
Abb. 5.6-5	Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) und Splitt (2-16 mm) „UL+BS+Spl.(T=10%)“	158
Abb. 5.6-6	Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL+BS (T=15%)“	158
Abb. 5.6-7	Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL+BS (T=5%)“	159
Abb. 5.7-1	Eignung von Baulehmen zur Verarbeitung in Abhängigkeit von Lehmbautechnik, Konsistenz und Korngrößen nach [124]	159
Abb. 5.11-1	Trockenschwindmaß in Prozent nach DIN 18952 Blatt 2, Konsistenz: Normsteife. Ausgangslänge der Probekörper 20 cm	163
Abb. 5.11-2	Erforderliche Wassermenge der Lehmmischungen bei der Ermittlung des Trockenschwindmaßes nach DIN 18952 Blatt 2, Konsistenz: Normsteife	163
Abb. 5.12-1	Trockenschwindmaß nach dem „Verarbeitungszustandsverfahren“ bei 30 cm Ausbreitmaß, Ausgangslänge der Probekörper 40 cm	165

Abb.5.12-2	Erforderliche Wassermenge der Lehm-mischungen bei 30 cm Ausbreitmaß nach DIN 1048 Teil 1, DIN 1045-2 und EN 12350-5	165
Abb. 5.13-1	Verformung vom Lehmwürfel nach dem sofortigem Ausschalen der Stahlform (Zaboureffekt)	168
Abb. 5.14-1	von a bis c Aufbringen des Abgleichmaterials – Schwefelmischung auf den Druckflächen der Probekörper	171
Abb. 5.14-2	Probewürfel während der Druckversuche im Versuchslabor – Institut für Tragkonstruktionen der Universität Karlsruhe	173
Abb. 5.14-3	a, b, c Typische Bruchkegelzustände während der Druckversuche bei der Lehm-mischung: „Universallehm“ „UL (T=25%)“ (vgl. Abb. 5.6-1)	175
Abb. 5.14-4	a, b, c Typische Bruchkegelzustände während der Druckversuche bei der Lehm-mischung: „Universallehm“ gemagert mit mineralischen Zuschlägen mit Korndurchmesser (0-16) mm	176
Abb. 5.14-5	a, b, c Typische Bruchkegelzustände während der Druckversuche bei der Lehm-mischung: „Universallehm“ gemagert mit mineralischen Zuschlägen mit Korndurchmesser (0-2) mm	177
Abb. 5.14-6	Mittlere Endfestigkeiten von den nicht geschützten Versuchsreihen getrocknet unter SKB (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und unter WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%) im Vergleich zu der Endfestigkeit der Versuchsreihe Nr. 11 (Referenzreihe) getrocknet bei (T=60°C) mit 5 tägiger Vortrocknung bei 20°C	182
Abb. 5.14-7	Einfluss der sommerlichen und winterlichen Klimabedingungen auf die Schwindrisse bei geschützten und nicht geschützten Probewürfeln der Mischung: „UL+BS (T=10%)“	184
Abb. 5.15-1	Mittlere Endfestigkeiten von geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen getrocknet unter SKB (T=42°C, rel. Feuchte=23%) im Vergleich zu der Endfestigkeit von Reihe Nr. 11 (Referenzreihe) getrocknet bei 60°C mit 5 tägiger Vortrocknung bei 20°C	189
Abb. 5.16-1	Einfluss der Schutzschalen auf die mittlere Trockendruckfestigkeit von Versuchsreihen verschiedener Tonmengen aber gleicher mineralischer Zuschläge getrocknet unter WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	195
Abb. 5.16-2	Einfluss der Schutzschalen auf die mittlere Trockendruckfestigkeit von Versuchsreihen verschiedener Tonmengen aber gleicher mineralischer Zuschläge getrocknet unter WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	195
Abb. 5.17-1	Vergleich der mittleren Endfestigkeiten von den geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Luftfeuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Luftfeuchte=36%) im Vergleich zu der Endfestigkeit von Versuchsreihe Nr. 11 (Referenzreihe) getrocknet bei (T=60°C) mit 5 tägiger Vortrocknung bei 20°C	197
Abb.5.17-2	Trocknungsverlauf der Lehm-mischung "UL (T=25%)" geschützte und nicht geschützte Versuchsreihen getrocknet unter sommerlichen (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und winterlichen (T=29°C, rel. Feuchte=36%) Klimabedingungen	199
Abb. 5.17-3	Trocknungsverlauf und mittlere Trockendruckfestigkeit der Mischung "UL+RS (T=10%)", geschützte und nicht geschützte Versuchsreihen getrocknet unter SKB (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	199
Abb. 5.17-4	Trocknungsverlauf der Lehm-mischung "UL+BS (T=10%)", geschützte und nicht geschützte Versuchsreihen getrocknet unter SKB (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%) im Vergleich zu der unter Normbedingungen getrockneten Versuchsreihe 11 (beschleunigte Trocknung bei 60°C mit fünftägiger Vortrocknung bei 20°C)	200
Abb. 5.17-5	Trocknungsverlauf der Lehm-mischung "UL+RS+RK (T=10%)", geschützte und nicht geschützte Versuchsreihen getrocknet unter SKB (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	200

Abb. 5.17-6	Trocknungsverlauf der Mischung "UL+BS+Spl. (T=10%)", geschützte und nicht geschützte Versuchsreihen getrocknet unter SKB (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	201
Abb. 5.17-7	Trocknungsverlauf der Versuchsreihen der Lehmmischung "UL+BS(T=15%)", geschützte und nicht geschützte Versuchsreihen getrocknet unter WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	201
Abb. 5.17-8	Trocknungsverlauf der Versuchsreihe "UL+BS (T=5%)", geschützte und nicht geschützte Versuchsreihen, getrocknet unter WKB (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	202
Abb. 5.17-9	Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm „UL (T=25%)“ im Vergleich zur idealen Sieblinie	204
Abb. 5.17-10	Sieblinie der Mischung Universallehm gemagert mit Rundsand (0-2 mm) „UL+RS (T=10%)“ im Vergleich zur idealen Sieblinie	204
Abb. 5.17-11	Sieblinie der Mischung Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL+BS (T=10%)“ im Vergleich zur idealen Sieblinie	205
Abb. 5.17-12	Sieblinie der Mischung Universallehm gemagert mit Rundsand (0-2 mm) und Rundkies (2-16 mm) „UL+RS+RK (T=10%)“ im Vergleich zur idealen Sieblinie	205
Abb. 5.17-13	Tatsächliche und ideale Sieblinie des Ausgangsmaterials Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) und Splitt (2-16 mm) „UL+BS+Splitt (T=10%)“	206
Abb. 5.17-14	Sieblinie der Mischung Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL+BS (T=15%)“ im Vergleich zur idealen Sieblinie	206
Abb. 5.17-15	Sieblinie der Mischung Universallehm gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL+BS (T=5%)“ im Vergleich zur idealen Sieblinie	207
Abb. 5.17-16	Mikrostruktur des Ton-Sand-Wassergemisches mit den für die Entstehung der Struktur maßgebenden Bindungsarten nach [120]	207

## 8.2 Tabellenverzeichnis

### Zu Kapitel 1:

Tab. 1.1-1	Primärenergieinhalt (PEI) einiger Baustoffe im Vergleich mit Lehm	15
------------	---	----

### Zu Kapitel 2:

Tab. 2.2-1	Alle Teilnehmer der Umfrage über die thermische Behaglichkeit der Einwohner in den traditionellen und neuen Lehmhäusern sowie in den Stahlbetonbauten in Seiyun [14]	26
Tab. 2.2-2	Seven Point ASHRAE scale	26
Tab. 2.2-3	Gemessener Kühlungsenergieverbrauch im kritischen Sommermonat August in unterschiedlichen Bautypen [14]	28
Tab. 2.3-1	Reduzierung der Druckfestigkeit von Massivlehm durch Strohhäcksel (5 cm) [93]	28
Tab. 2.3-2	Wirkung des Strohs auf die Festigkeit der untersuchten jemenitischen Lehme [18]	29
Tab. 2.5-1	Einfluss der Zementzugabe bzw. Sisal-Fasern auf die Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit der gepressten Lehmsteine [99]	31

### Zu Kapitel 3:

Tab. 3.1-1	Die wichtigsten Rohstoffe von Gesteinen und Mineralen und ihrer Mengen im Jemen, Angaben [54]	49
------------	---	----

### Zu Kapitel 4:

Tab. 4.1-1	Lehmsteinformate, Benennungen und abgerundete Maße in cm in Wadi-Hadhramaut	69
Tab. 4.1-2	Übliche Geschosshöhen, Anzahl der „Maufer“ und Wanddicken in den sechs- bis achtgeschossigen Lehmsteinbauten in Shibam, Wadi-Hadhramaut	73
Tab. 4.6-1	Gemessene Klimafaktoren und die verwendeten Messgeräte	118
Tab. 4.6-2	Maximale, minimale und mittlere Außenlufttemperatur sowie maximale, minimale und mittlere Komforttemperatur für die Stadt Seiyun, ermittelt vom Autor nach der Adaptionsgleichung 4-2	137

### Zu Kapitel 5:

Tab. 5.4-1	Bindekraftprüfung (Zugfestigkeit im plastischen Zustand) für das Ausgangsmaterial „Universallehm“ nach DIN 18952 Bl.2 (zurückgezogen)	150
Tab. 5.5-1	Qualitative und quantitative Mineralbestimmung des Ausgangsmaterials „Universallehm“	152
Tab. 5.6-1	Bestimmung der Korndichte des Ausgangsmaterials „Universallehm“ nach DIN 18124 [40]	154
Tab. 5.6-2	Die ersten fünf verwendeten Lehmmischungen in den Versuchen	155
Tab. 5.6-3	Die sechste und siebente verwendeten Lehmmischungen in den Versuchen	155
Tab. 5.12-1	Ermittlung des Trockenschwindmaßes der Versuchs-Mischungen nach DIN 18952 im Vergleich zur „Verarbeitungs-Zustands-Verfahren“ bei 30 cm Ausbreitmaßdurchmesser	167

Tab. 5.14-1	Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials „UL (T=25%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	179
Tab. 5.14-2	Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) „UL + RS (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	179
Tab. 5.14-3	Auswertung der Versuchsreihen Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL + BS (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	180
Tab. 5.14-4	Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) und Rundkies (2-16 mm) „UL+RS+RK (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	180
Tab. 5.14-5	Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) und Splitt (2-16 mm) „UL+BS+Spl. (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Luftfeuchte=36%)	181
Tab. 5.14-6	Auswertung der Versuchsreihe 11 des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL+BS (T=10%)“, getrocknet fünf Tage bei 20°C und danach wurde die Trocknung bei (T=60°C) bis zur Massenkonstanz beschleunigt, vgl. DIN 18952 Blatt 2	181
Tab. 5.15-1	Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials „UL(T=25%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)	186
Tab. 5.15-2	Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) „UL + RS (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)	186
Tab. 5.15-3	Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL + BS (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)	187
Tab. 5.15-4	Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) und Rundkies (2-16 mm) „UL + RS + RK (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)	187
Tab. 5.15-5	Auswertung der Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) und Splitt (2-16 mm) „UL + BS + Spl. (T=10%)“, getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)	188
Tab.5.16-1	Auswertung der geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials „UL (T=25%)“, getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	192
Tab. 5.16-2	Auswertung der geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL + BS (T=15%)“, getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	192
Tab. 5.16-3	Auswertung der geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL + BS (T=10%)“, getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	193
Tab. 5.16-4	Auswertung der geschützten und nicht geschützten Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL + BS (T=5%)“, getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	193
Tab. 5.18-1	Streuungskennwerte der Versuchsreihen, Druckfestigkeit	210
Tab. 5.18-2	Streuungskennwerte der Versuchsreihen, Rohdichte bei der Druckfestigkeitsprüfung	210
Tab. 5.18-3	Streuungskennwerte der Versuchsreihen, Materialfeuchte bei der Druckfestigkeitsprüfung	211
Tab. 5.18-4	Nummern, Abkürzungen und Trocknungsbedingungen der Versuchsreihen im Überblick	212

## 8.3 Literaturverzeichnis:

Anmerkung: Tabellen, Diagramme, Fotos und Zeichnungen ohne Literaturangaben stammen vom Verfasser

- [1] Abbas, A.: *Pedologie im Jemen (Arabisch: gughrafiat atturbah fi al-jaman)*. Sana'a : Obadi studies & publishing center, 1996
- [2] Abbas, S.: *Bevölkerungsgeographie für jemenitische Republik. (Arabisch: al-gughrafia al-sukania llgumhuria al-jamania)*. Sana'a : Obadi studies & publishing center, 1997
- [3] Ahmed, A.: *Jemen- Geographie (Arabisch: Gughrafiat al-jaman Attabieeia)*. Sana'a : Almutada Verlag, 2001
- [4] Al-Saqaf, G.: *Lehmarchitektur in Hadhramaut und Steinherstellung aus Lehm. In: First Scientific Conference, Clay Architecture on the Threshold of the 21<sup>ST</sup> Century*. Seiyun : Hadhramout University of Science & Technology, Clay Architecture Center, 2000
- [5] Al-Ariki, M.: *Architektur und geistliches Denken im Alt-Jemen (von 1500 v. Chr. bis 600 n. Chr.) (Arabisch: Al-Fan Al-Memarie ual- Fekr Al- Dinie fi Al-Jaman Al-Kadim)*. Kairo : Arabia- Verlag, 2002
- [6] Al-Ganad, E.; Al-Sapri, A.: *Bau- und Dekorationssteine im Jemen (Arabisch: Ahgaar al-bina`a wa-al-Zina fi Al-jaman)*. Sana'a : geological survey & mineral resources board, 2003
- [7] Al-Kadiri, A.: *Morphologie der jemenitischen Architektur (Arabisch: Morfologiat al-Emarah- Alyamania)*. Bagdag : Bagdad- Universität, 1999, Masterarbeit (Unveröffentlicht)
- [8] Al-Maflahi, Y.: *Bau- und Industriegesteine im Jemen (Arabisch: As- suchoor Al-Enschaeiah ua As-Sinaija fi Al-jaman)*. In: *Jemenitische Enzyklopädie (Arabisch: Al- Mausuah Al-jamania)*. Sana'a : Alafif-Verlag, 1992, Vol. 2, Aufl.1, S. 565-567
- [9] Al-Mashreki, M.: *Soil Profile Location, Description and Analytical Data in Different Areas of Yemen*. Dhamar : AREA, 2002
- [10] Al-Sabban, A.: *Historical & Touristic Information on Wadi- Hadramaut (Arabisch: Ta`rifat Ta`richiah a`n uadi Hadhramaut)*. Seiyun : Al-Ammien, 2000
- [11] Al-Sahwa: *Interview mit dem jemenitischen Industrieminister am 30-05-05* [online]. Erhältlich im Internet unter <http://www.alsahwa-yemen.net/>
- [12] Al-Sapri, R.: *Klimagerechtes Bauen in der heißfeuchten Tihama- Region im Jemen*. Aachen : Shaker Verlag, 1999
- [13] Al-Shibami, F.; Ward, I.: *Energy consumption and Thermal comfort for domestic buildings in Seiyun (Yemen)*. In: *Indoor air 2002, the 9<sup>th</sup> international conference on Indoor air quality and climate*. Monterey, California, 30<sup>th</sup> June to 5<sup>th</sup> July, 2002, S. 765-766
- [14] Al-Shibami, F.: *Energy consumption and thermal comfort in domestic buildings in Yemen*. Sheffield : The University of Sheffield, 2004
- [15] Audouin, R.: *Städte und Tempel – Die Entstehung der südarabischen Zivilisation*. In: Daum, W.: *Jemen 3000 Kunst und Kultur des glücklichen Arabien*. Frankfurt/Main : Pinguin-Verlag, 1987, S.74-80
- [16] Balfakih, A.: *Geographie der Republik Jemen (Arabisch: gughrafiat al-gumhuria al-jamania)*. Aden : Aden Universität, 1994
- [17] Basin News, Building Advisory Service and Information Network (BASIN). *Local Development and Jobs from Housing*, Vol. 22, Dec.2001
- [18] Bazara, A.: *Bautechnische Grundlagen zum Lehmgeschossbau im Jemen*. Berlin : Fraunhofer IRB Verlag, 1998
- [19] Betzler, E.: *Sozialer Umbruch und Kulturlandschaftswandel in Südarabien*. Wiesbaden : Dr. Ludwig Reichert Verlag, 1987
- [20] Bianca, S.: *Städtebau in islamischen Ländern : Analysen u. Konzepte unter Berücksichtigung gegenwärtiger Entwicklungstendenzen u. künftiger Planungsaufgaben*. Zürich : Inst. F. Orts-, Regional- u. Landesplan., 1980
- [21] Blondet, M. u. a.: *Adobe in Peru : Tradition, Research and future*. In: Steingass, P.: *Moderner Lehmbau 2002 : Internationale Beiträge zum modernen Lehmbau*. Stuttgart : Fraunhofer-IRB-Verlag, 2002, S. 154-161
- [22] Blondet, M.; Garcia, G.: *Research studies on Adobe buildings & Earthquake*. In: Steingass, P.: *Moderner Lehmbau 2003 : Internationale Beiträge zum modernen Lehmbau*. Stuttgart : Fraunhofer-IRB-Verlag, 2003, S. 139-147

- [23] Boenkendorf, U.; Knöfel, D.: Putzmörtel auf Lehmausfachungen. In: *Bautenschutz Bausanierung : Zeitschrift für Bauinstandhaltung und Denkmalpflege*, Mai 1995, 18. Jahrgang Nr. 4
- [24] Brunner, U.: *Jemen vom Weihrauch zum Erdöl*. Wien : Böhlau Verlag, 1999
- [25] Brunner, U.; Haefner, H.: Altsüdarabische Bewässerungsoasen. In: *Die Erde* 121, S. 135-153, 1990
- [26] Busch, J.: A tale of Two puupulations : thermal comfort in air - conditioned und naturally ventilated offices in Thailand. In: *Energie and Buildings*, 1992, Vol. 18, S. 235 - 249
- [27] Busch, J.: *Thermal comfort in Thai air – conditioned and naturally ventilated offices Standards for Thermal Comfort*. London : Chapman & Hall, 1995, S. 114 – 121.
- [28] Busch, J.: Thermal Response to the Thai Office Environment. In: *ASHRAE Transactions*, 1990, vol. 96, Part 1, S. 859 – 872
- [29] Census.gov.: *World population* [online]. Erhältlich im Internet unter: [<http://www.ipc/www/img/worldpop.gif>]
- [30] Damluji, S.: *A Yemen Reality : architecture sculptured in mud and stone*. UK, Reading : Garnet Publishing Ltd., 1991
- [31] Damluji, S.: *Wadi-Hadhramaut : Lehmarchitektur, Shibam und Tarim (Arabisch: uadi- Hadhramaut, Handasat al-emarah attinia, madinta shibam wa Tarim)*. UK, Reading : Garnet Publishing Ltd., 1995
- [32] Daum, W.: Jemen – 3000 Jahre Geschichte, Kultur und Kunst : Von der Königen von Saba zu einem modernen Staatswesen. In: DAUM, W.: *Jemen 3000 Kunst und Kultur des glücklichen Arabien*. Frankfurt/main : Pinguin-Verlag, 1987, S.9 - 32
- [33] Daum, W.: *Jemen : das südliche Tor Arabiens*. Tübingen : Edition Erdmann Verlags-GmbH, 1980
- [34] Dequin, H.: *Arabische Republik Jemen : Wirtschaftsgeographie eines Entwicklungsland*. Riyadh : 1976
- [35] Dierks, K.; Ziegert, C.: Materialprüfung und Begleitforschung im tragenden Lehm- und Ziegelmasonrybau. In: Steingass, P.: *Lehm 2000 : Beiträge zur 3. internationale Fachtagung Lehm- und Ziegelmasonrybau des Dachverbands Lehm e.V., 17.-19. November 2000 in Berlin*. Berlin : Overall Verlag Berlin, 2000
- [36] Dierks, K.; Ziegert, C.: Neue Untersuchungen zum Materialverhalten von Stampflehm. In: Steingass, P.: *Moderner Lehm- und Ziegelmasonrybau 2002 : Internationale Beiträge zum modernen Lehm- und Ziegelmasonrybau*. Stuttgart : Fraunhofer-IRB-Verlag, 2002, S. 29-36
- [37] DIN 1045-2: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Berlin : Beuth-Verlag, (Juli 2001)
- [38] DIN 1048 Teil 1: *Prüfverfahren für Beton : Frischbeton*. Berlin : Beuth-Verlag, (Juni 1991)
- [39] DIN 18123: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben : Bestimmung der Korngrößenverteilung*. Berlin : Beuth-Verlag, (November 1996)
- [40] DIN 18124: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben : Bestimmung der Korndichte; Kapillarpyknometer-Weithalspyknometer*. Berlin : Beuth-Verlag, (1997)
- [41] DIN 18952 (Vornorm): *Baulehm*. Blatt 1: Begriffe – Arten. Blatt 2 : Prüfung von Baulehmen. Berlin : Beuth-Verlag, (1956)
- [42] DIN 18954 (Vornorm): *Ausführung von Lehm- und Ziegelmasonrybauten*. Berlin : Beuth-Verlag, (Mai) 1956
- [43] DIN EN 12350-5: *Prüfung von Frischbeton; Teil 5: Ausbreitmaß*. CEN, Brüssel : (Oktober 1999)
- [44] DIN EN 12390-3: *Prüfung von Festbeton : Druckfestigkeit von Probekörpern*. Berlin : Beuth-Verlag, (Dezember 2001)
- [45] DIN EN ISO 12570: *Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur*. Beuth-Verlag, Berlin (April 2000)
- [46] DIN EN ISO 7730: *Ergonomie der Thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV – und PPD Indexes und Kriterien*. Berlin : Beuth-Verlag, (Mai 2006).
- [47] Dresch, P.: *A history of modern Yemen*. Cambridge : Cambridge University Press, 2000
- [48] Dubach, R.: *Yemen Arab Republic : A study of Traditional Forms of Habitation*. Zürich, 1977
- [49] Ehrenberg, A.: *Statistik oder der Umgang mit Daten*. Weinheim : VCH, 1986
- [50] Engelhardt, W.: *Die Bildung von Sedimenten und Sedimentgesteinen*. (Sediment-Petrologie [ ] ). Stuttgart : Schweizerbart, 1973
- [51] Fanger, P.: *Thermal Comfort*. Copenhagen : Danish Technical Pr., 1970

- [52] FAO: *Agro-Climatic Resources of Yemen : Part 1 Agro-climatic inventory*. Dhamar, Agricultural Research and Extension Authority, Ministry of Agriculture and Water Resources, 1997
- [53] Fauth, W.: Der Lehm als Baustoff. In: *Reichskuratorium für Wirtschaftlichkeit : Bauwirtschaftlicher Siedler-Lehrdienst*. Berlin, 1933, H.1
- [54] GENERAL DEPARTMENT OF INFORMATION: *Informationsmappe 2002*. Sana'a : Geological Survey & Mineral Resources Board, 2002
- [55] GEOLOGICAL SURVEY § MINERAL RESOURCES BOARD: *Summary In Industrial Non-Metallic Raw Materials of Yemen*. Sana'a, 2002
- [56] Gov. Ye.: *Zementindustrie im Jemen* [online]. Erhältlich im Internet unter : <http://www.nic.gov.ye/SITE%20CONTAINTS/studies%20and%20reports/social%20sciences/m.alesttm ar/m.alesttm3.html>
- [57] Günzel, J.: *Zur Geschichte des Lehmbaus in Deutschland*. Staufen : Ökobuch Verlag, 1988
- [58] Heidari, S.: *Thermal Comfort in Iranian Courtyard Housing : A Field Study of Thermal Comfort in Western Iran (PhD Thesis)*. Sheffield : University of Sheffield, 2000
- [59] Heim, D.: *Tone und Tonminerale*. Stuttgart : Ferdinand Enke Verlag, 1990
- [60] Heinloth, K. : *Die Energiefrage : Bedarf und Potentiale, Nutzung, Risiken und Kosten*. Braunschweig ; Wiesbaden : Vieweg, 1997
- [61] Helmut, H.: *Die Volksdemokratische Republik Jemen : Geschichte, Natur, Wirtschaft*. Halle : Martin-Luther-Universität, 1986
- [62] Hirschi, S.; Hirschi, M. : *L'architecture au Yemen du nord*. Paris : Berger-Levrault, 1983
- [63] Hohl, R.: *Die Entwicklungsgeschichte der Erde : Nachschlagwerk Geologie*. Hanau/Main : Dausien, 1981
- [64] Houben, H.; Guillaud, H.: *Earth Construction : A Comprehensive Guide*. London : Intermediate Technology Publications, 1994
- [65] Humphreys, M.: An adaptive approach to the thermal comfort of office workers in North West Pakistan. In: *Renewable Energie*, 1994, Band 5, Heft 5-8, S. 985-992
- [66] Humphreys, M.; Nicol, J.: Understanding the Adaptive Approach To Thermal Comfort. In: *ASHRAE Transactions – American Society of Heating Refrigerating Airconditioning*. Engin, 1998, Band 104, Heft 1, Teil B, S. 991-1004
- [67] Ibn Al-Mugawir, Y.: *Geschichte der Aufheiterung (Arabisch: Tarich al-mustabscher)*, 690 hijri/1291
- [68] Ingrams, H.: The Hadramaut in Time of War. In: *The Geographical Journal*, Vol. 55, Nr. ½; S. 1-29. London, 1945
- [69] Jasmund, K.; Lagaly, G.: *Tonminerale und Tone : Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt*. Darmstadt : Steinkopff Verlag, 1993
- [70] Kapfinger, O.; *Rammed earth : Martin Rauch : Lehm und Architektur*. Basel; Boston; Berlin : Birkhäuser, 2001
- [71] Karotke, E.; Ziegert, C.: Schäden und Sanierung im Lehmbau : Auswirkungen aufsteigender Feuchte auf tragende Wände aus Lehm. In: Steingass, P.: *Lehm 2000 : Beiträge zur 3. internationale Fachtagung Lehm bau des Dachverbands Lehm e.V., 17.-19. November 2000 in Berlin*. Berlin : Overall Verlag Berlin, 2000
- [72] Kezdi, A.: *Handbuch der Bodenmechanik : Band I Bodebphysik*. Berlin : VEB Verlag für Bauwesen, 1969
- [73] Klug, H.; Alexander, L.: *X-ray diffraction procedures : for polycrystalline and amorphous materials*. New York : Wiley, 1954
- [74] Kohler, S.: Jemen-Studien Band 13 : *Institutionen in der Bewässerung- Landwirtschaft im Jemen*. Wiesbaden : Dr. Ludwig Reichert Verlag, 1999
- [75] Kopp, H.: *Jemen (Nord) im Aufbruch : Tendenzen der wirtschaftlichen, kulturellen und politischen Entwicklung*. Hildesheim : OLMS- Verlag, 1988
- [76] Kramar, U.: *Quantitative Mineralbestimmung*. Untersuchungsbericht für das Ausgangsmaterial „Universallehm“ im Institut für Mineralogie und Geochemie – Universität Karlsruhe (TH) im Auftrag des Institut für Tragkonstruktionen am 14. Mai 2004
- [77] Külzer, M.: *Untersuchung der Korndichte nach DIN 18124*. Untersuchungsbericht für die Korndichte des Ausgangsmaterials „Universallehm“ im Institut für Bodenmechanik und Felstechnik – Universität Karlsruhe (TH) im Auftrag des Institut für Tragkonstruktionen am 27. Mai 2004

- [78] Lagaly, G.: Reaktionen der Tonminerale. In: Jasmund, K.; Lagaly, G.: *Tonminerale und Tone : Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt*. Darmstadt : Steinkopff Verlag, 1993, S. 89 -167
- [79] Lagaly, G.; Köster, H.: Tone und Tonminerale. In: Jasmund, K.; Lagaly, G.: *Tonminerale und Tone : Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt*. Darmstadt : Steinkopff Verlag, 1993, S. 1-32
- [80] Lehner, E.: *Elementare Bauformen außereuropäischer Kulturen*. Wien . Graz : NWV Neuer Wissenschaftlicher Verlag, 2003
- [81] Lippsmeier, G.: *Tropenbau*. München : Callwey Verlag, 1980
- [82] Martin, G.: *Geologie und Bodenschätze der Arabischen Republik Jemen : Jemen-Report 16*, 1985, S. 16 – 18
- [83] Meyer, G.: Von der Arbeitsemigration zum Erdölboom : die Wirtschaftsentwicklung in der Arab. Rep. Jemen 1970-1987. In: KOPP, H.: *Jemen (Nord) im Aufbruch : Tendenzen der wirtschaftlichen, kulturellen und politischen Entwicklung*. Hildesheim : OLMS-Verlag, 1988, S. 63 -98
- [84] Meyer, G.: *Arbeitsmigration, Binnenwanderung und Wirtschaftsentwicklung in der arabischen Republik Jemen*. Wiesbaden : Dr. Ludwig Reichert Verlag, 1986
- [85] MINISTRY OF PLANING & INTER. COOP., CENTRAL STATISTICAL ORGAN : *Statistical year-book 2003*. Sana'a : Almethak, 2004
- [86] MINISTRY OF PLANING AND DEVELOPMENT: *Statistical year-book 1993*. Yemen, Sana'a, 1994
- [87] MINISTRY OF PLANING AND DEVELOPMENT: *Statistical year-book 1998*. Yemen, Sana'a, 1999
- [88] MINISTRY OF PLANING AND DEVELOPMENT: *Statistical year-book 2000*. Yemen, Sana'a, 2001
- [89] Minke, G.: *Untersuchungen und Erfahrungen mit alternativen Baustoffen und Selbstbauweisen*. Grebenstein : Öko-Buchversand, 1980
- [90] Minke, G.: *Bauen mit Lehm : Aktuelle Berichte aus Praxis und Forschung, Heft 5 Lehmsteinbau*. (FEB), Gesamthochschule Kassel : Ökobuch Verlag, 1986
- [91] Minke, G.: *Bauen mit Lehm : Aktuelle Berichte aus Praxis und Forschung, Heft 3 Lehm im Fachwerkbau*. (FEB), Gesamthochschule Kassel : Ökobuch Verlag, 1985
- [92] Minke, G.: *Bauen mit Lehm : Aktuelle Berichte aus Praxis und Forschung, Heft 4 Nasslehmtechnik*. (FEB), Gesamthochschule Kassel : Ökobuch Verlag, 1986
- [93] Minke, G.: *Das neue Lehmhandbuch : Baustoffkunde . Konstruktionen . Lehmarchitektur*. Staufen bei Freiburg : Ökobuch Verlag, 2001
- [94] Minke, G.: *Das neue Lehmhandbuch : Baustoffkunde . Konstruktionen . Lehmarchitektur*. Staufen bei Freiburg : Ökobuch Verlag, 2004
- [95] Mubarak, N.: Architektonische Kunst der Moscheen im Jemen. (Arabisch: al-fan alm'amarie li- tas'miem al- Masajid fi al- jaman). In: *International conference on yemeni architecture, Evolution and Perspective, Jan. 8-9, 1991*. Aden : University of Aden, 1991
- [96] Müller, H.: *Baustoffkunde und Konstruktionsbaustoffe : Skriptum zu den Vorlesungen von Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller*, Universität Karlsruhe (TH), 2005/2006
- [97] Müller-Vonmoos, M.; Kohler, E.: Geotechnik und Entsorgung. In: Jasmund, K.; Lagaly, G.: *Tonminerale und Tone : Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt*. Darmstadt : Steinkopff Verlag, 1993, S. 312-357
- [98] Mumford, L.: The Natural History of Urbanisation. In: THOMAS, W.: *Man's Role in Changing the Face of the Earth*. Chicago : Univ. of Chicago, 1956, S. 382 - 398
- [99] Namango, S.; u. a.: Compressed Earth Blocks Reinforced with Natural Fibres. In: Steingass, P.: *Moderner Lehmbau 2005 „Tagungsband“*. Berlin : Umbra Umwelt- und Unternehmensberatung GmbH, 2005
- [100] Nicol, J.: An Analysis of some Observations of Thermal Comfort in Rorkee, India und Bagdad, Iraq. In: *Annals of Human Biologie*. No. 4, 1974, S. 411-426
- [101] Nicol, J.; Humphreys, M.: Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. In: *Energie and Buildings*, 2002, Band 34, Heft 6, S. 563-572
- [102] Niemeyer, R.: *Der Lehmbau und seine praktische Anwendung*. Hamburg : Verlag BR. Sachse, 1946
- [103] Niewöhner-Eberhard, E.: *Sa'da : Bauten und Bewohner in einer traditionellen islamischen Stadt*. Wiesbaden : Dr. Ludwig Reichert Verlag, 1985

- [104] Nippa, A.: *Haus und Familie in arabischen Ländern : vom Mittelalter bis zur Gegenwart*. München : Beck, 1991
- [105] Othman, A.: *Bausteine im Jemen. (Arabisch: Ahgaar al-bina fi Al-jaman)*. Sana`a : geological survey & mineral resources board, 2000
- [106] Pritzkat, T.: *Stadtentwicklung und Migration im Südjemen (=Jemen Studien Bd. 16)*. Wiesbaden : Ludwig Reichert Verlag, 2001
- [107] Ramudhah, S.; Mubarak, S.; Hanshur, A.: Sonderheiten der Lehmarchitektur in der Stadt Shibam (Arabisch: Al-khasaes al-handasia li-al-Emarah al-Tinia fi Madinat- Shibam). In: *Al-Muhandsun. Nummer 1*, Aden, 1988, S. 10-15
- [108] Rathjens, C; u. a.: *Beiträge zur Klimakunde des Südwest-Arabiens : Das Klima von Sana'a und Jemen*. Hamburg : Deutscher Wetterdienst, 1956
- [109] Rauch, M.: Rammed Earth – Anwendungsbeispiele, Probleme und Potentielle. In: Steingas, P.: *Moderner Lehm-bau 2002 : Internationale Beiträge zum moderner Lehm-bau*. Stuttgart : Fraunhofer – IRB -Verlag, 2002, S. 23-28
- [110] Ryckmans, J.: Die Altsüdarabische Religion. In: Daum, W.: *Jemen 3000 Kunst und Kultur des glücklichen Arabien*. Frankfurt/Main : Pinguin-Verlag, 1987, S.111-115
- [111] Saeed, H.: Zukunft der Lehmarchitektur in Wadi-Hadhramaut (Arabisch: Mustaqbal al- e'mahrah al-Thinjiah fi wadi- Hadhramaut). In: *First Scientific Conference, Clay Architecture on the Threshold of the 21<sup>ST</sup> Century*. Seiyun : Hadhramout University of Science & Technology, Clay Architecture Center, 2000
- [112] Saeed, M.: Wiederbewertung der Geschichte von Irak (Arabisch: l'-adat Taqjeem Tarich Al-l'arak) . In: *A~fak Arabia. (7-8) 1998*. Bagdad : 1998, S. 64-65
- [113] Sallam, S.: *The effect of modern building technologies on yemeni traditional architecture (Study of alternatives suitability)*. Hilwan : Hilwan-university, 1995
- [114] Sallam, Y.: Wiederbebauung der historische Stadtmauer von Sana'a. (Arabisch: l'adat Bina Sur sana'a al-Tarichie"). In: *University of Aden Journal*. Aden : Aden University Printing & Publishing House, April 2002, S. 91-105
- [115] Salmang, H.; Scholze, H.: *Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Keramik*. Berlin : Springer-Verlag, 1968
- [116] Schippmann, K.: *Geschichte der altsüdarabischen Reiche*. Darmstadt : Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1998
- [117] Schmidt, K.: *Erdgeschichte*.- 3. Aufl. Berlin, New York : (Sammlung Götschen Bd. 2616), 1978
- [118] Schneider, U.; u. a.: *Lehm-bau für Architekten und Ingenieure : Konstruktion, Baustoffe, Prüfungen und Normen, Rechenwerte*. Düsseldorf, 1996
- [119] Schulz, C.: *Über den Einfluss des Trocknungsvorgangs auf die Endfestigkeit von Stampflehm*. Berlin, Diplomarbeit an der TU Berlin, FG Tragwerksentwurf und –Konstruktionen, 2002, unveröffentlicht
- [120] Schuster, P.: *Experimentelle Untersuchungen über das Verhalten von Silt-Sand-Fraktionen, die mit dem quellfähigen Ton vergütet werden*. Zürich : Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 1985
- [121] Sedov, A.: *Temples of ancient Hadramawt*. Pisa : Pisa University Press, 2005
- [122] Serjeant, R.: The Hadrami Network. In: Aubin, J. und Lombard, D.: *Marchands et hommes d'affaires asiatiques dans l'Océan Indien et la Mer de Chine 13ème-20ème siècles*. Paris, 1987, S.147-154.,
- [123] Shaban, A.: Die Wechselwirkung zwischen Lehmarchitektur und Außenwelt in Wadi- Hadhramaut (Arabisch: atta' thier al- Mutabadal lilemarah attiniah ma'a albia'a almanachia fi Wadi- Hadhramaut). In: *First Scientific Conference, Clay Architecture on the threshold of the 21<sup>st</sup> Century. Seiyun, 10-13 Feb., 2000*, S. 148-169
- [124] SIA (Schweizerischer Ingenieur- und Architekten- Verein): *Regeln zum Bauen mit Lehm*. Zürich : Dokumentation D 0111, (April 1994)
- [125] Steffen, H.: Resultate der ersten Bevölkerungs- und Häuserzählung in der Arabischen Republik Jemen von Februar 1975 und einer Studie zu Zahl der Auslandjemeniten. In: Becker, H. u. Kopp, H.: *Resultate aktueller Jemen-Forschung : eine Zwischenbilanz*. Bamberg : Fach Geographie an der Gesamthochschule, 1978
- [126] Steingass, P.: Lehm 2000 : *Beiträge zur 3. internationale Fachtagung Lehm-bau des Dachverbands Lehm e. V., 17.-19. November 2000 in Berlin*. Berlin : Overall Verlag Berlin, 2000

- [127] Steingass, P.: *Moderner Lehmabau 2002 : Internationale Beiträge zum modernen Lehmabau*. Stuttgart : Fraunhofer-IRB-Verlag, 2002
- [128] Swanson, J.: *Emigration and economic development : the case of the Yemen Arab Republic*. Boulder Colorado : Westview Press, 1979, S. 47-50
- [129] U.N. Publications: *World Population Prospects : The 1998 Revision*. New York, 1998
- [130] U.N. Publications: *World Urbanization Prospects : The 1999 Revision*. New York, 1999
- [131] Varanda, F.: *Art of Building in Yemen*. London, England : Cambridge, Massachusetts, 1982
- [132] Veder, C.: *Rutschungen und ihre Sanierung*. Wien : Springer-Verlag, 1979
- [133] Villwock, G.: *Beiträge zur physischen Geographie und Landschaftsgliederung des südlichen Jemen (ehemals VDRJ) (=Jemen Studien Bd. 10)*. Wiesbaden : Ludwig Reichert Verlag, 1991
- [134] Volhard, F.: *Lehmabau Regeln : Begriffe, Baustoffe, Bauteile*. Braunschweig/Wiesbaden : Vieweg, 2002
- [135] Wald, P.: *Jemen : Antike und Islam : Geschichte, Kultur und Kunst im Südwesten Arabien*. Köln : DuMont, 1997
- [136] Wald, P.: *Nord- und Südjemen : antikes und islamisches Südarabien, Geschichte, Kultur und Kunst zwischen Rotem Meer und Arabischer Wüste*. Köln : DuMont, 1988
- [137] Walker, P.: Erosion Testing of Compressed Earth Blocks. In: *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Masonry Conference*, 1998, S. 264-268,
- [138] Weinmann, K.: *Handbuch Bautenschutz, Band 1 – Bauphysik*. Ehningen bei Böblingen : Experten Verlag, 1990
- [139] Wichmann, H.: *Architektur der Vergänglichkeit : Lehmabauten der dritten Welt*. Basel ; Boston ; Berlin : Birkhäuser, 1983
- [140] Wissman, H. u. a.: Beiträge zur Tektonik Arabiens. In: *Geologische Rundschau*, 33, S. 221-253, 1942
- [141] Wright, G.: Bauen mit Lehm im Jemen. In: Wichmann, H.: *Architektur der Vergänglichkeit : Lehmabauten der Dritten Welt*. Stuttgart : Birkhäuser, 1983, S.117-143
- [142] Ziegert, C.: *Lehmwellerbau : Konstruktion, Schäden und Sanierung*. Berlin : Fraunhofer IRB Verlag, 2003

# Anhang

## Abbildungsverzeichnis zum Anhang

### Zu Kapitel 1:

Abb. A-1-1	Mehr und mehr wird Lehm vom Stahlbeton in der Region Hadhramaut verdrängt, Seiyun	245
Abb. A-1-2	Kombination von Lehm und Stahlbeton, Seiyun	245
Abb. A-1-3	In der Altstadt von Tarim werden die ungepflegten Lehmbauten abgerissen und durch Stahlbetonbauten ersetzt	245
Abb. A-1-4	Statt Lehmbauten zu pflegen, lässt man sie zerfallen, und baut auf ihren Grundstücken Stahlbetonbauten mit dünnen Wänden! /Sihil-Shibam	245

### Zu Kapitel 3:

Abb. A-3-1	Landkarte vom Jemen mit den wichtigsten Lehmbaugebieten	246
Abb. A-3-2	Die Lage der Kalkgesteine im Jemen Nach [54] betragen die bis jetzt festgestellten Reserven von Kalkgesteinen im Jemen 13,5 Mrd. m <sup>3</sup>	247
Abb. A-3-3	Geologischer Aufbau Jemens [54]	248
Abb. A-3-4	Die wichtigsten Karawanen- und Schiffsrouten des antiken Arabien [136]	249
Abb. A-3-5	Zielgebiete der hadhramitischen Migration bis ca. 1960 [106]	249
Abb. A-3-6	Felder in Wadi-Hadhramaut. Durch Ablenkanäle wird das Regenwasser vom Hauptabflusskanal zu den Feldern geleitet. Dort kommt das Wasser zum Stillstand und dort werden die Feinteilchen sedimentiert.	250
Abb. A-3-7	Schematische Kartenskizze der antiken Oase von Mayfa'a [24]	250
Abb. A-3-8	Wadi- Alshawefah- Taiz im Trockenperiode, Aufnahme von der Al-Hikkahberg (etwa 1070 m hoch), im Februar -05	250

### Zu Kapitel 4:

Abb. A-4-1	Typische Grundrisse und Raumordnung für die Lehmhäuser in Shibam, dargestellt am Beispiel Haus Nr. D 67 in Shibam	251
Abb. A-4-2	Hauptansicht „Nordansicht“ des Hauses D 67	252
Abb. A-4-3	Schnitt A-A im Haus D 67 in Shibam	252
Abb. A-4-4	Typische Grundrisse und Raumordnung in Zabourbauten in Sa'da, dargestellt am Beispiel Haus G2 nach Abb. A-4-1, vgl. [62]	253
Abb. A-4-5	Schnitte und Ansichten für das Zabourhaus G2 in Sa'da, vgl. Abb. A-4-4	254
Abb. A-4-6	Plan der Altstadt von Sa'da, gezeichnet nach einem 1971 aufgenommenen Luftbild nach [102] und ergänzt vom Autor	255
Abb. A-4-7	Das zur Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit verwendete Gerät, HOB0	256

Abb. A-4-8	Die Lufttemperatur-, rel. Luftfeuchte- und Strömungssensoren wurden in der Mitte der Testräume und auf einer Höhe von 80 cm über der Oberfläche des Fußbodens installiert	256
Abb. A-4-9	Das zur Messung kleiner Windgeschwindigkeit verwendete Gerät, Thermoelektrischer Strömungssensor	257
Abb. A-4-10	Das zur berührungslosen Messung der Oberflächentemperatur von Wänden, Decken, Fußböden und Dächer verwendete Gerät	258
Abb. A-4-11	Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 1 (Erdgeschoss / Seiyun-Palast) im Sommermonat Juli 2003	259
Abb. A-4-12	Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 2 (1. Obergeschoss / Seiyun-Palast) im Sommermonat Juli 2003	260
Abb. A-4-13	Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 3 (2. Obergeschoss / Seiyun-Palast) im Sommermonat Juli 2003	261
Abb. A-4-14	Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 4 (3. Obergeschoss / Seiyun-Palast) im Sommermonat Juli 2003	262
Abb. A-4-15	Messergebnisse von OFT + Außen- und Innentemperatur in den Testräumen 1, 2, 3, und 4 im Seiyun-Palast im Sommermonat Juli 2003	263
Abb. A-4-16	Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 1 (Erdgeschoss / Seiyun-Palast) im Wintermonat Januar 2004	264
Abb. A-4-17	Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 2 (1. Obergeschoss / Seiyun-Palast) im Wintermonat Januar 2004	265
Abb. A-4-18	Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 3 (2. Obergeschoss / Seiyun-Palast) im Wintermonat Januar 2004	266
Abb. A-4-19	Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 4 (3. Obergeschoss / Seiyun-Palast) im Wintermonat Januar 2004	267
Abb. A-4-20	Messergebnisse von OFT + Außen- und Innentemperatur in den Testräumen 1, 2, 3 und 4 im Seiyun-Palast im Wintermonat Januar 2004	268

## **Zu Kapitel 5:**

Abb. A-5-1	Dampf-Luftbefeuchter	269
Abb. A-5-2	Luftentfeuchtungsgerät	269
Abb. A-5-3	Das zur Messung und Regulierung der rel. Feuchtigkeit in der Klimakammer verwendete Gerät, in der einzelnen Komponenten zerlegt	270
Abb. A-5-4	Das zur Messung und Regulierung der Raumlufttemperatur in der Klimakammer verwendete Gerät	271
Abb. A-5-5	Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Siebung und Sedimentation nach DIN 18123	272
Abb. A-5-6	Digital-Messschieber, das zur Messung der Kantenlänge der Probekörper verwendete Gerät	272
Abb. A-5-7	Elektronische Präzisions-Waage DS65 K1	273
Abb. A-5-8	Elektronische Präzisions-Waage BP 2100 S	273
Abb. A-5-9	Zwangsmischer zur Mischung der Ausgangsmaterialien	274
Abb. A-5-10	Lehmmischungen während des Maukprozesses	274

Abb. A-5-11	a, b, c Konsistenz- Bestimmung der Lehm-mischungen durch Ausbreitmaß (30 cm), in Bildern nach DIN EN 12350-5 [43]	275
Abb. A-5-12	Die zur Ermittlung des Trockenschwindmaßes nach DIN 18952 Bl.2 hergestellten Probekörper (25x40x200) mm. Statt einer Markierung an der Oberseite des Probe-Körpers wurden Messpunkte mittig an den Stirnflächen eingelassen, deren Abstände mit einem präzisen digitalen Messschieber gemessen wurden, (siehe Abb. A-5-8)	276
Abb. A-5-13	Einrichtung zur Messung von Trocken-Schwindmaß mit einer Messuhr, die auf 0,01 mm genau abgelesen werden kann, nach (VZV)	276
Abb. A-5-14	Ermittlung des Trockenschwindmaßes der verarbeiteten Lehm-mischungen im plastischen Zustand jeweils an drei Probekörpern (400x80x50) cm, nach (VZV)	276
Abb. A-5-15	Typisches Kraft-Weg-Diagramm von geschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials „UL (T=25%)“	277
Abb. A-5-16	Typisches Kraft-Weg-Diagramm von nichtgeschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials „UL (T=25%)“	277
Abb. A-5-17	Typisches Kraft-Weg-Diagramm von geschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=15%)“, MV (60:40)	278
Abb. A-5-18	Typisches Kraft-Weg-Diagramm von nichtgeschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=15%)“, MV (60:40)	278
Abb. A-5-19	Typisches Kraft-Weg-Diagramm von geschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=10%)“, MV (40:60)	279
Abb. A-5-20	Typisches Kraft-Weg-Diagramm von nichtgeschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=10%)“, MV (40:60)	279
Abb. A-5-21	Typisches Kraft-Weg-Diagramm von geschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=5%)“, MV (20:80)	280
Abb. A-5-22	Typisches Kraft-Weg-Diagramm von nichtgeschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=5%)“, MV (20:80)	280
Abb. A-5-23	Typisches Kraft-Weg-Diagramm von nichtgeschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2) mm „UL + RS (T=10%)“, MV (40:60)	281
Abb. A-5-24	Typisches Kraft-Weg-Diagramm von nichtgeschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2) mm und Rundkies (2-16) mm „UL + RS + RK (T=10%)“, MV (40:21:39)	281
Abb. A-5-25	Typisches Kraft-Weg-Diagramm von nichtgeschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm und Splitt (2-16) mm „UL + BS + Splitt (T=10%)“, MV (40:21:39)	282

**Abbildungen:**

**Abb. A-1-1 Mehr und mehr wird Lehm vom Stahlbeton in der Region Hadhramaut verdrängt, Seiyun\***



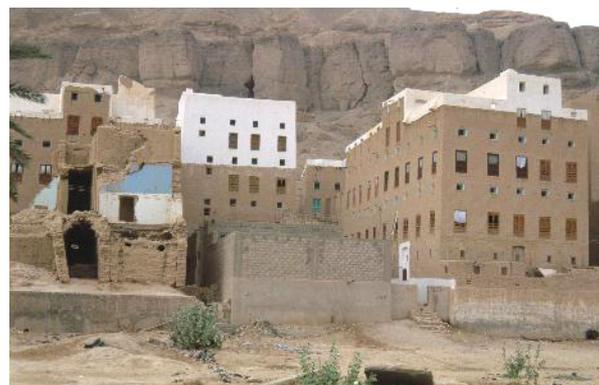
**Abb. A-1-2 Kombination von Lehm und Stahlbeton, Seiyun\***



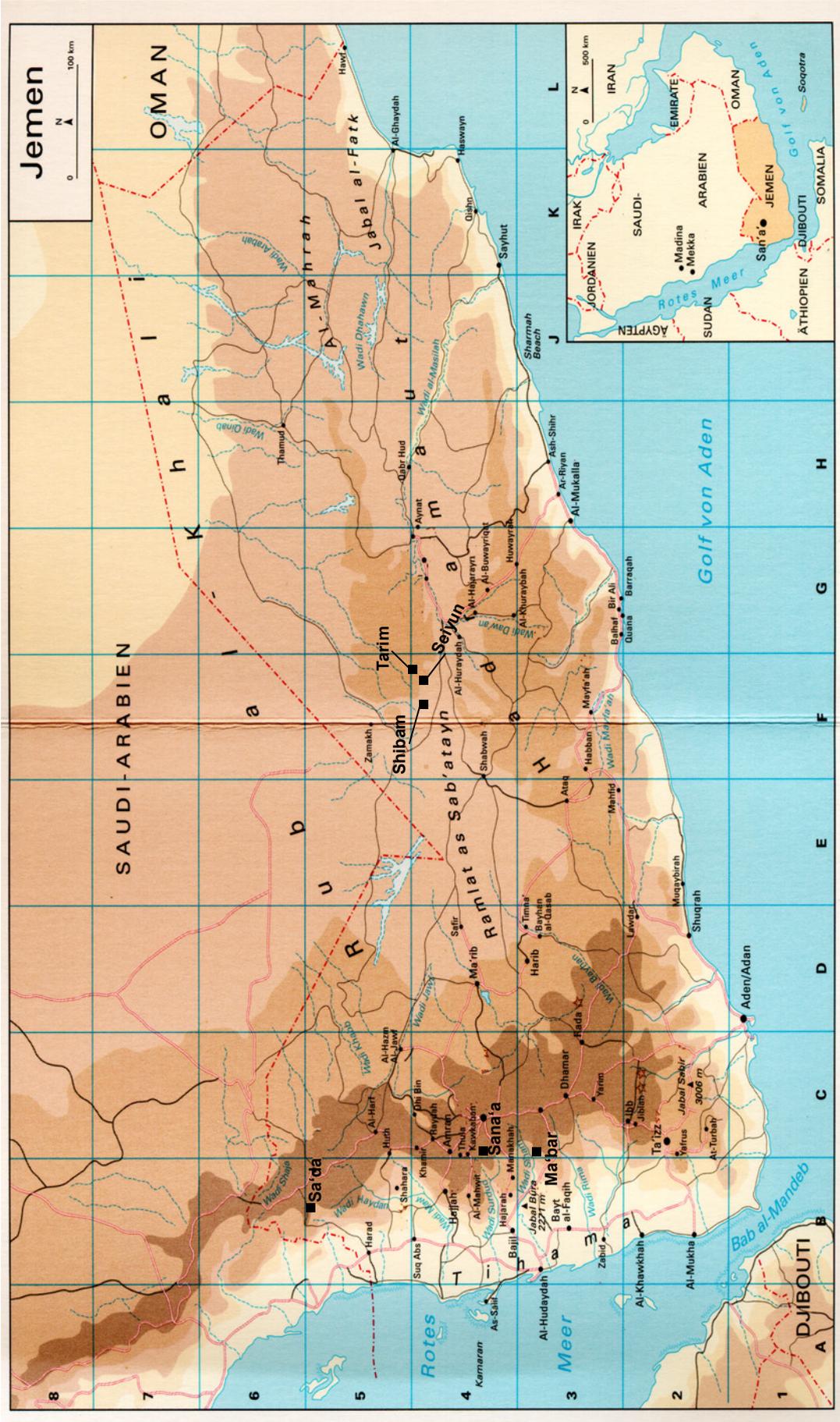
**Abb. A-1-3 In der Altstadt von Tarim werden die ungepflegten Lehmbauten abgerissen und durch Stahlbetonbauten ersetzt\***



**Abb. A-1-4 Statt Lehmbauten zu pflegen, lässt man sie zerfallen, und baut auf ihren Grundstücken Stahlbetonbauten mit dünnen Wänden! /Sihil-Shibam\***



\* Bildaufnahme: Januar 2004



A-3-1 Landkarte vom Jemen mit den wichtigsten Lehmbaugebieten

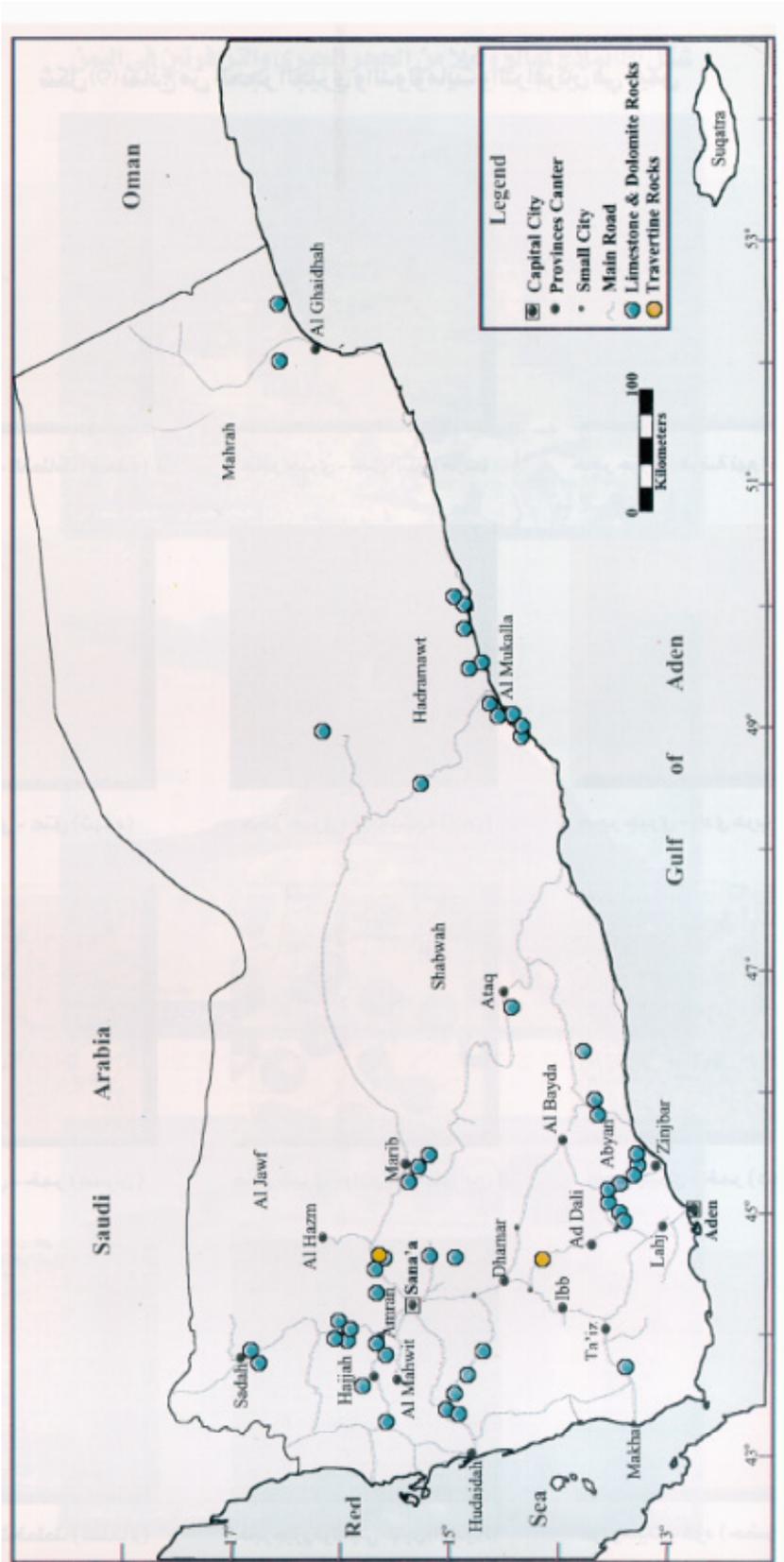


Abb. A-3-2 Die Lage der Kalkgesteine im Jemen  
Nach [54] betragen die bis jetzt festgestellten Reserven von Kalkgesteinen im Jemen 13,5 Mrd. m<sup>3</sup>

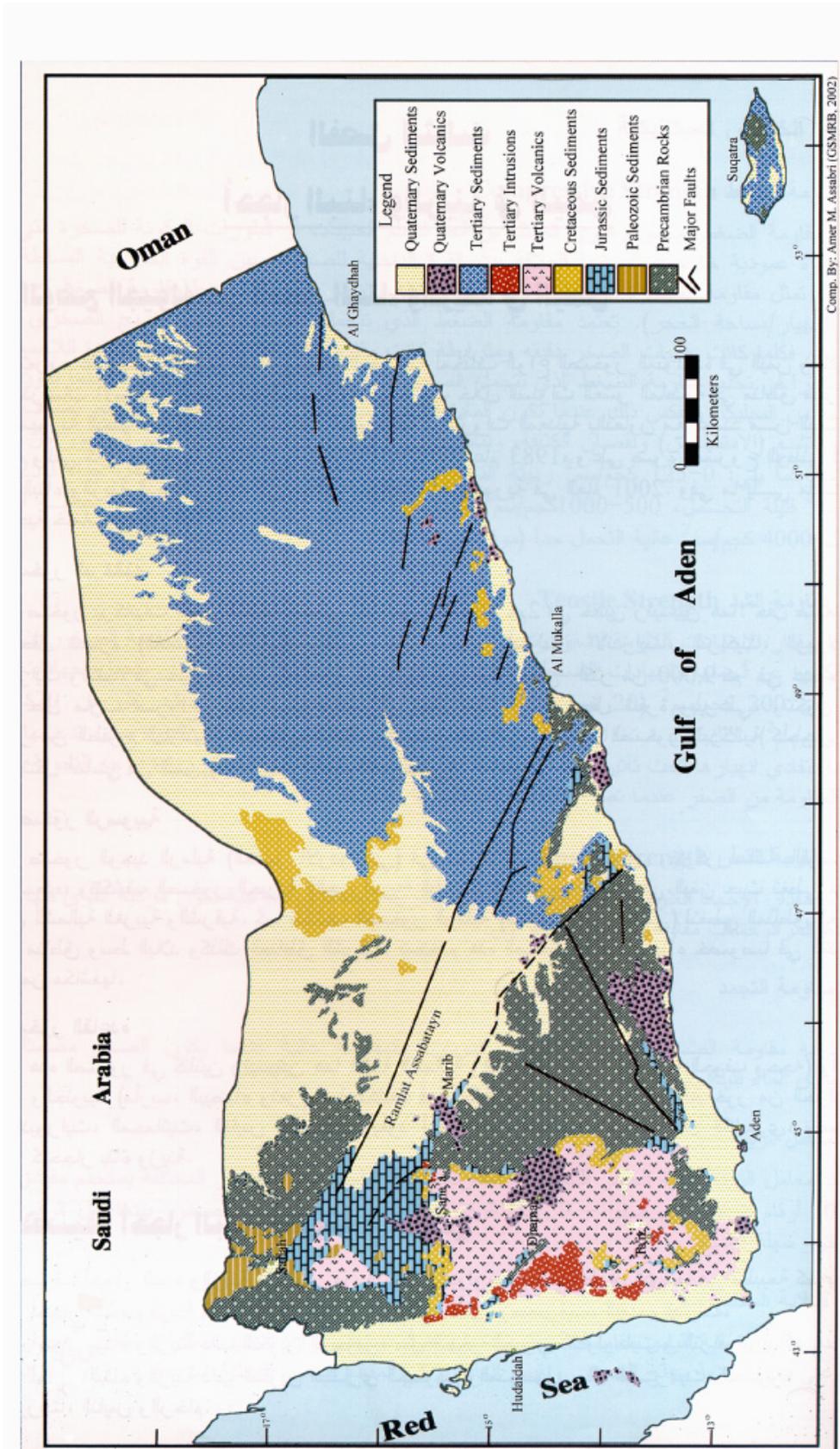
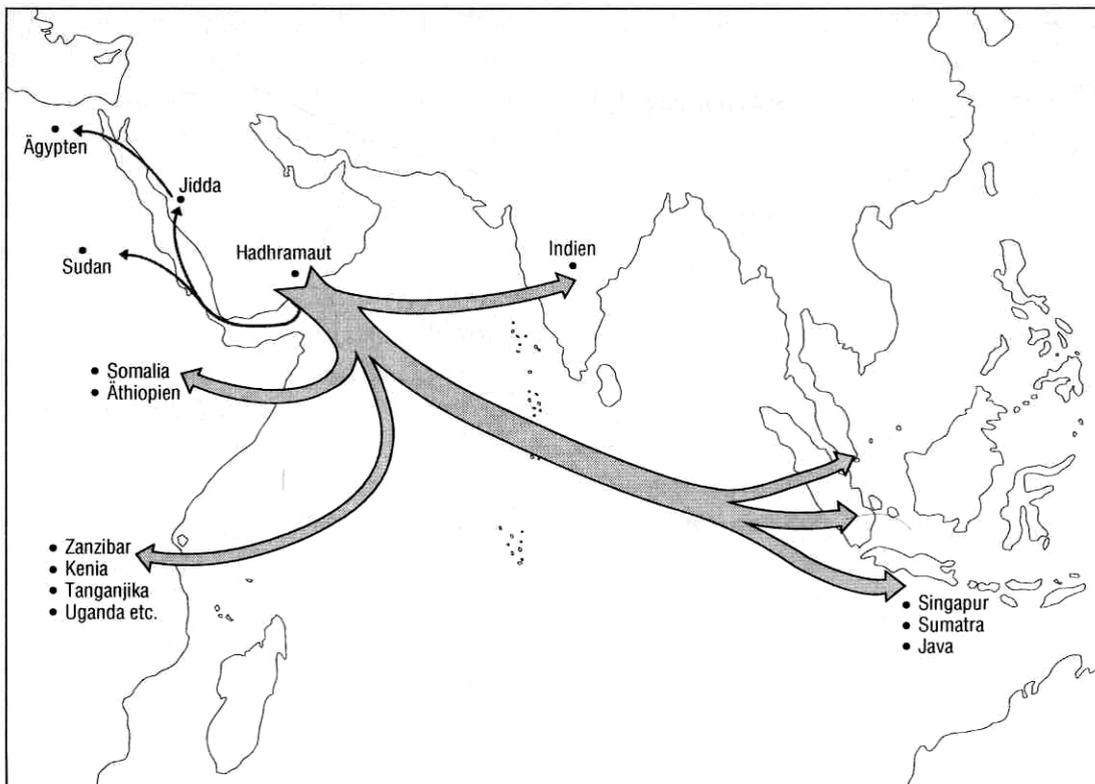
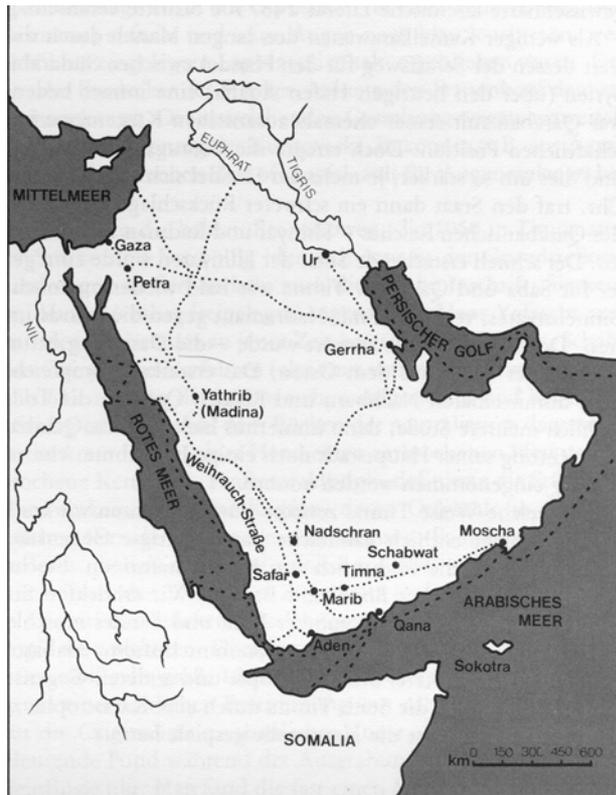


Abb. A-3-3 Geologischer Aufbau Jemens [54]

**Abb. A-3-4 Die wichtigsten Karawanen- und Schiffsrouten des antiken Arabien [136]**



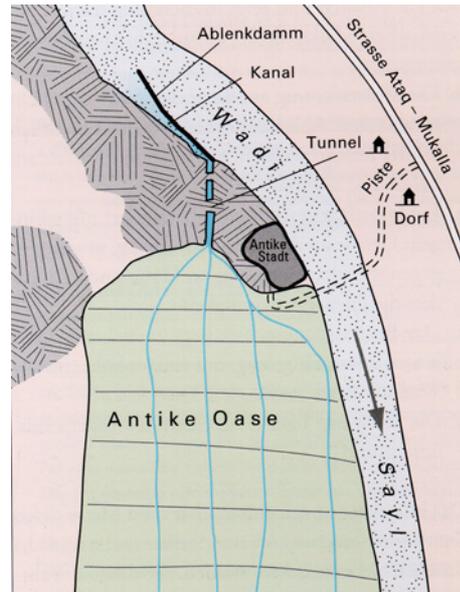
Quelle/Source: Literatur (s. Text) u. Erhebg. d. Verf./own investigations

Entwurf/Design: T. Pritzkat

**Abb. A-3-5 Zielgebiete der hadhramitischen Migration bis ca. 1960 [106]**



**Abb. A-3-6** Felder in Wadi-Hadramaut. Durch Ablenkanäle wird das Regenwasser vom Hauptabflusskanal zu den Feldern geleitet. Dort kommt das Wasser zum Stillstand und dort werden die Feinteilchen sedimentiert.



**Abb. A-3-7** Schematische Kartenskizze der antiken Oase von Mayfa'a [24]



**Abb. A-3-8** Wadi-Alshawefah-Taiz in der Trockenperiode, Aufnahme von der Al-Hikkahberg (etwa 1070 m hoch), Februar 2005

Regenwasser fällt mit großer Intensität in der Regenperiode, der stark fließende Wasserstrom wird teilweise durch die Bergterrassen gebremst, der Rest wird zum Hauptkanal geleitet, von dem er durch Ablenkanäle an die unteren Feldern geleitet wird. Dort sedimentieren sich fette Lehme, die zum Bauzweck brauchbar sind.

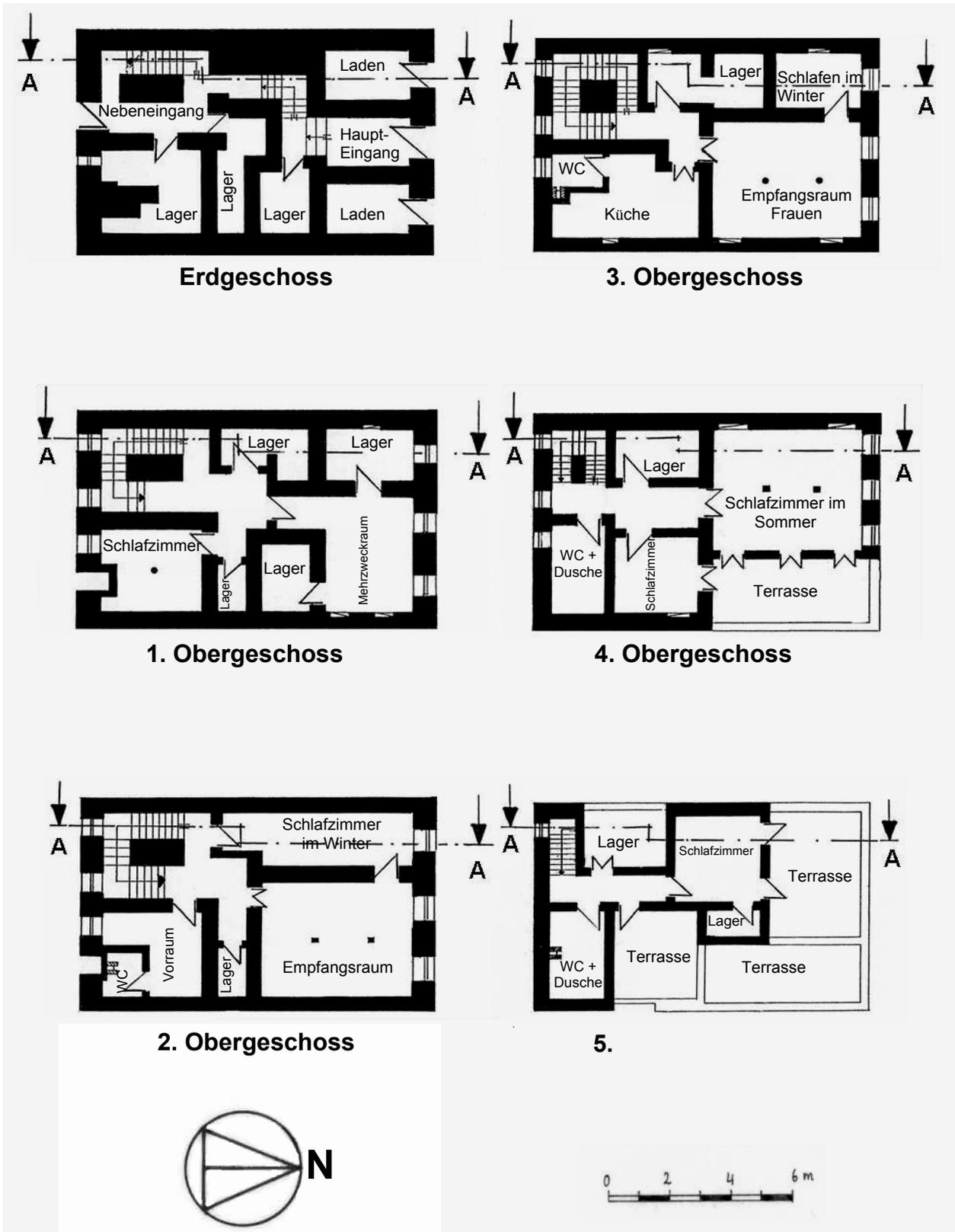


Abb. A-4-1 Typische Grundrisse und Raumordnung für die Lehmhäuser in Shibam, dargestellt am Beispiel Haus Nr. D 67 in Shibam

Abb. A-4-2 Hauptansicht „Nordansicht“  
des Hauses D 67

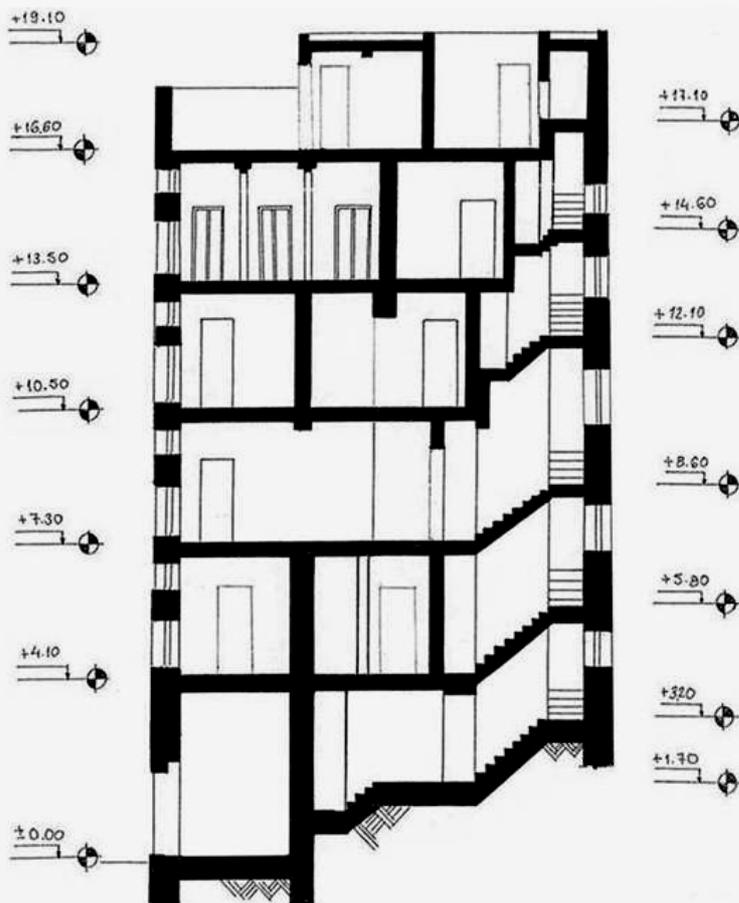
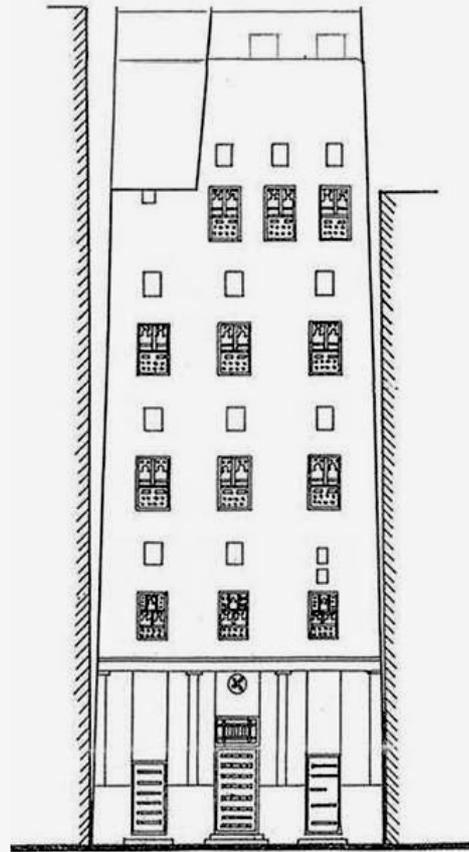
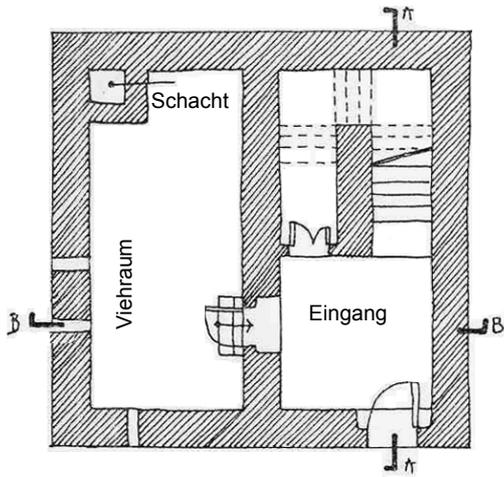
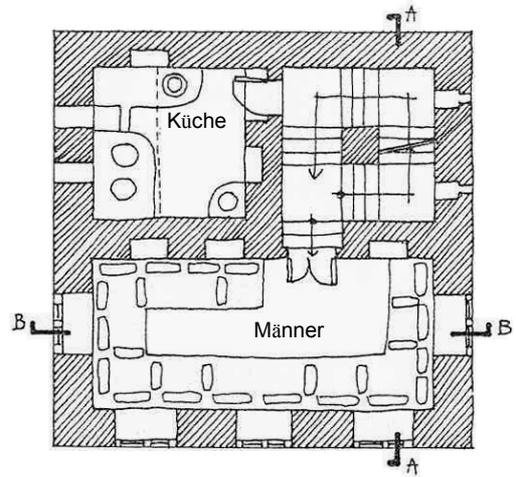


Abb. A-4-3 Schnitt A-A im  
Haus D 67 in Shibam

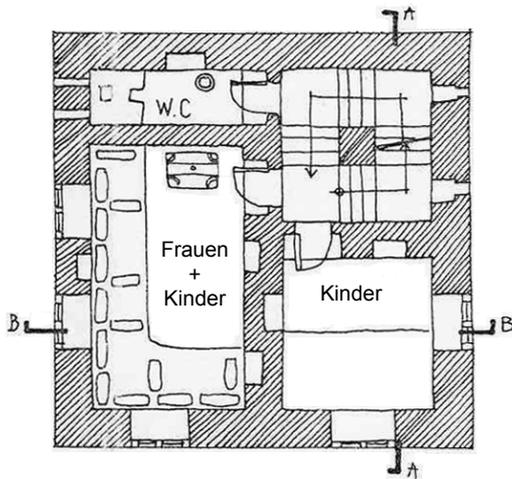




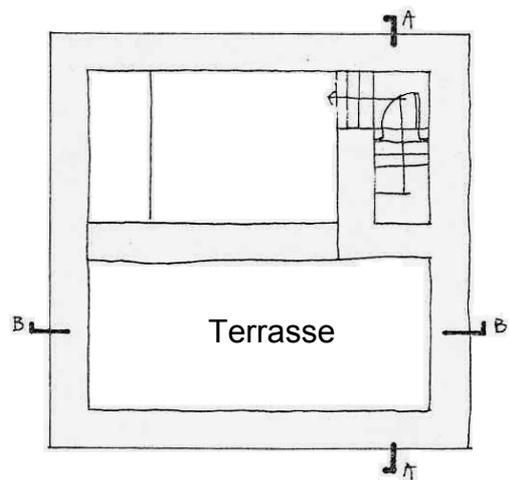
**Erdgeschoss**



**2. Obergeschoss**



**1. Obergeschoss**

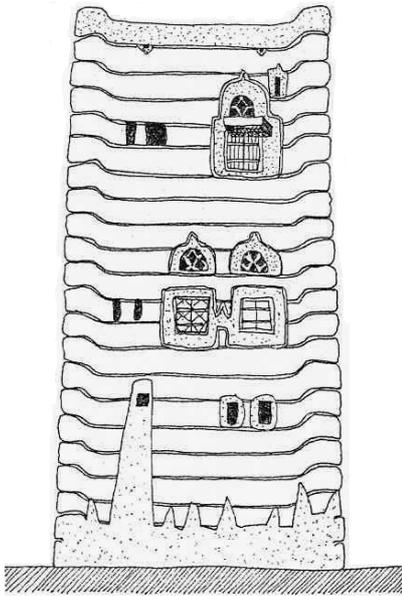


**1. Obergeschoss**

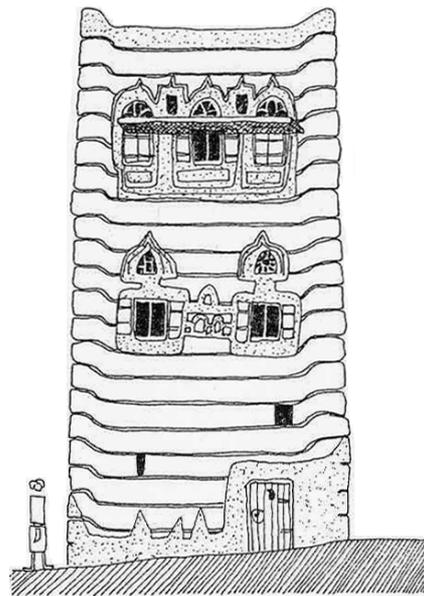
N



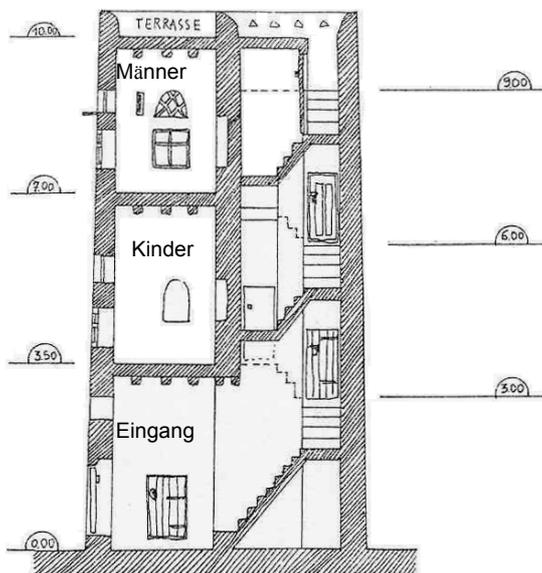
**Abb. A-4-4 Typische Grundrisse und Raumordnung in Zabourbauten in Sa'da, dargestellt am Beispiel Haus G2 nach Abb. A-4-1, vgl. [62]**



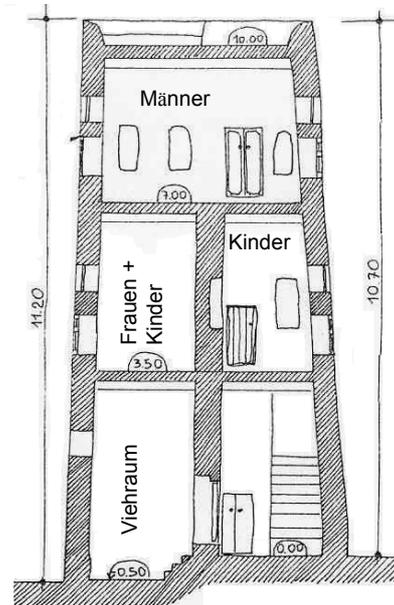
**Süd-West-Ansicht**



**Süd-Ost-Ansicht**

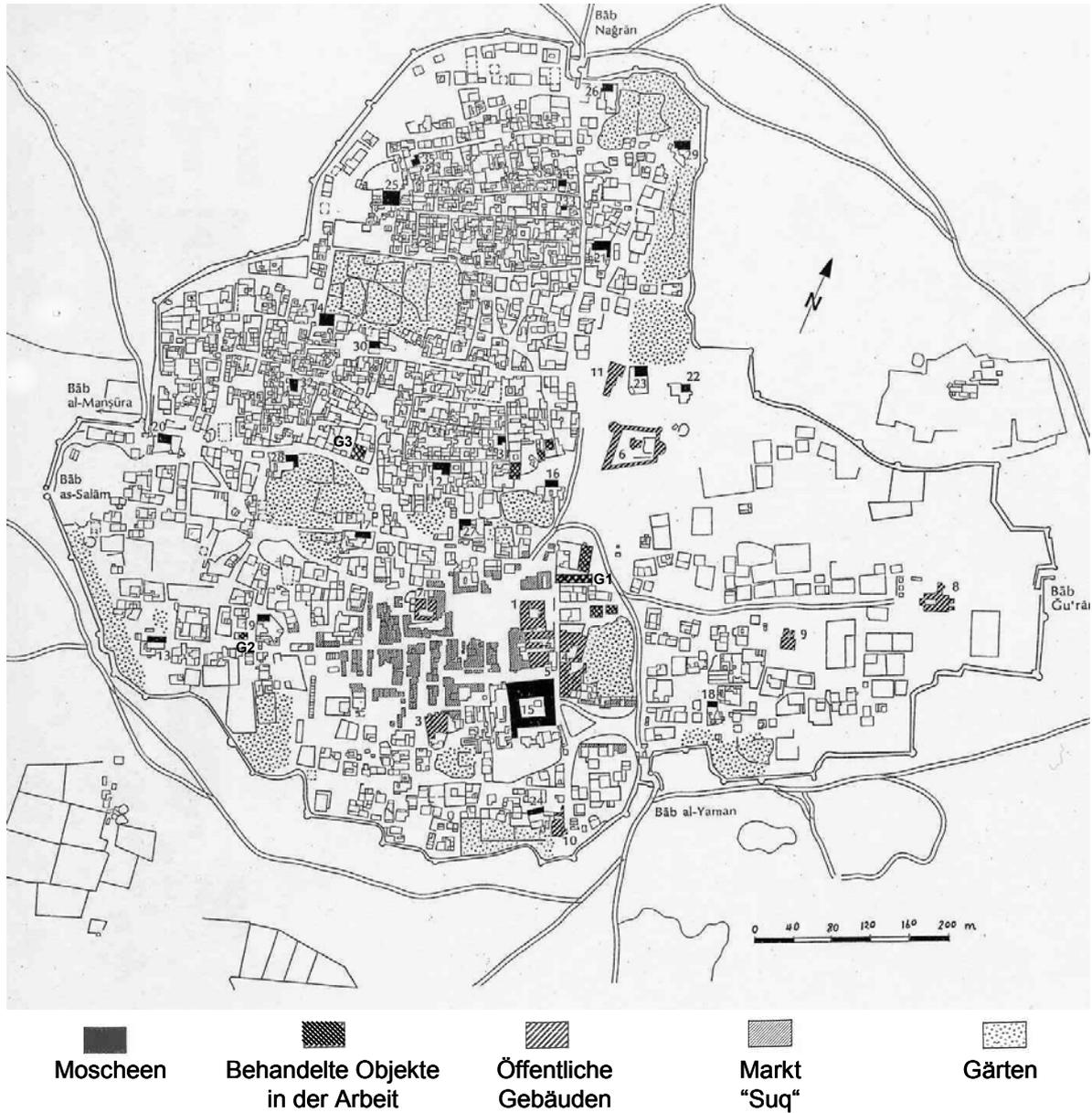


**Schnitt A-A**

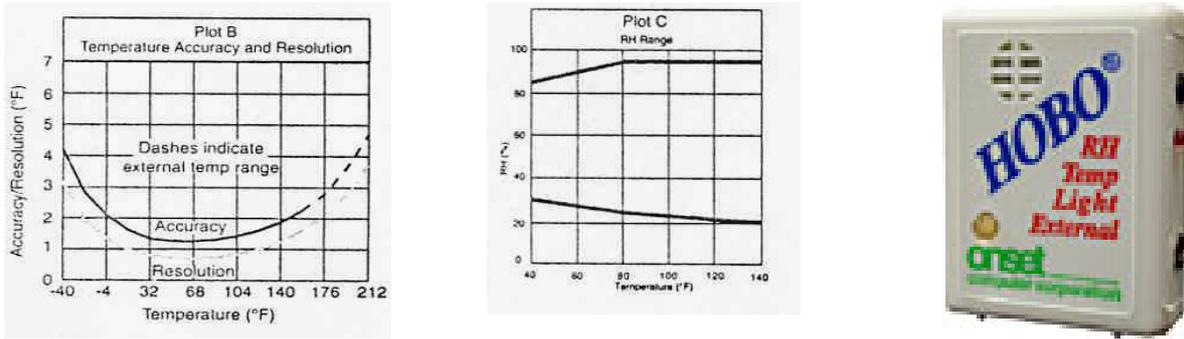


**Schnitt B-B**

**Abb. A-4-5 Schnitte und Ansichten für das Zabourhaus G2 in Sa'da, vgl. Abb. A-4-4**



**Abb. A-4-6 Plan der Altstadt von Sa'da, gezeichnet nach einem 1971 aufgenommenen Luftbild nach [103] und ergänzt vom Autor**

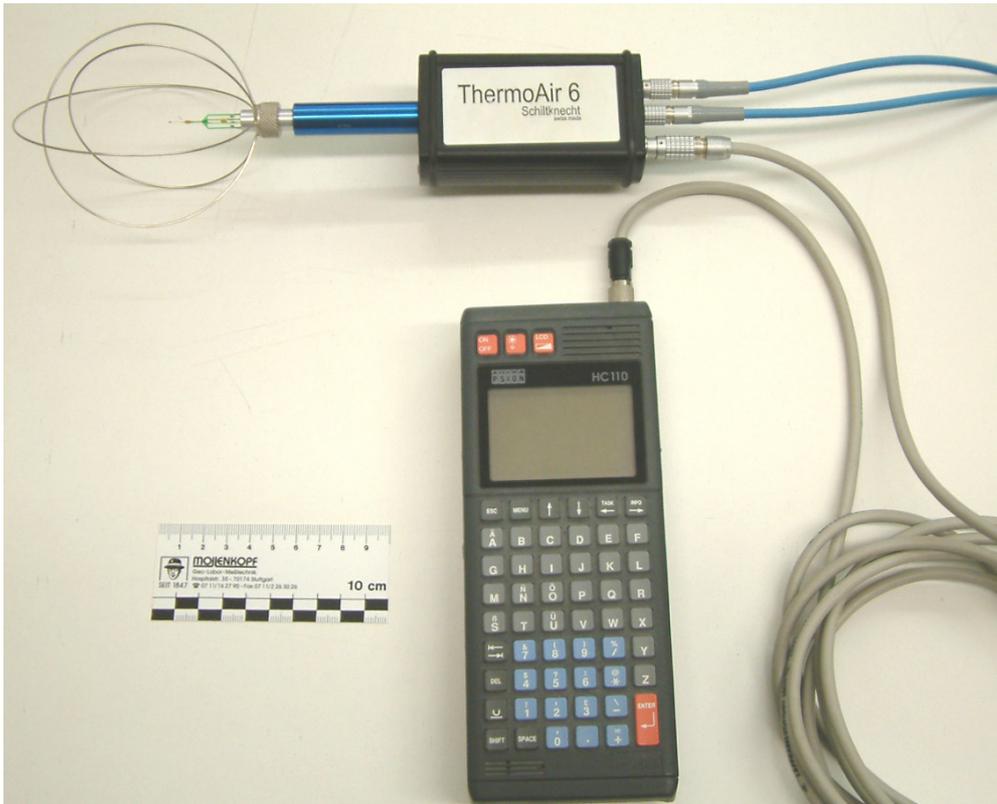


**Abb. A-4-7 Das zur Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit verwendete Gerät, HOBO**

Firma: Onset Technical Support  
Onset Computer Corporation  
Modell: HOBO RH/Temp/Light/External  
Messbereich:  
Temperatur: -20°C bis +70°C  
Rel. Feuchte: 0% bis 95%  
Genauigkeit:  
Temperatur: siehe Abbildung links  
Rel. Feuchte: siehe mittlere Abbildung



**Abb. A-4-8 Die Lufttemperatur-, rel. Luftfeuchte- und Strömungssensoren wurden in der Mitte der Testräume und auf einer Höhe von 80 cm über der Oberfläche des Fußbodens installiert**



**Abb. A-4-9 Das zur Messung kleiner Windgeschwindigkeit verwendete Gerät, Thermoelektrischer Strömungssensor**

100 % garantierte Messtoleranzen durch die integrierte Temperaturkompensation und den individuellen Abgleich

Firma: Schiltknecht swiss made

Modell: ThermoAir 6 Omnidirektional 0 -1 V

Messbereich: 0 – 5 m/s bzw. 0,15 – 5 m/s

Anströmungswinkel: +/- 180°

Genauigkeit:  $\pm 0,5\%$  v. Endwert und  $\pm 1,5\%$  v. Messwert

**Anzeigegerät**

Firma: Technische Informationssysteme GmbH

Modell: HC-01-8SR HC-ADC Erweiterungsgruppe

Max. Eingangsspannung: 0-10V,  $\pm 10V$  oder  $\pm 5V$

Auflösung unipolar: 12 Bit

bipolar: 11 Bit + Vorzeichen

Genauigkeit V=1:  $\pm 1$  Digit

Betriebstemperatur: 0..50 °C

## Infrarot Thermometer.

Firma: Conrad

Modell: IR-352

Optik ca.: 12:1

Detektor: Thermopile

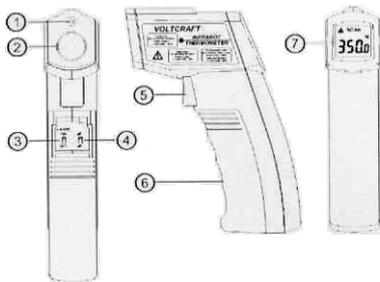
Temperaturmessbereich: -20 bis +500 °C

Auflösung: 0,1°C

Genauigkeit: ±2% v. Messwert

Ansprechzeit: 0,5 Sekunden

Messentfernung: Siehe Abbildung unten



### Bedienungselemente

- |                                |                                 |
|--------------------------------|---------------------------------|
| 1. Laseraustrittsöffnung       | 5. Taster zur Temperaturmessung |
| 2. Öffnung für Infrarot-Sensor | 6. Batteriefach                 |
| 3. Laser Ein/Aus Schalter      | 7. LCD-Anzeige                  |
| 4. Umschalter °C / °F          |                                 |

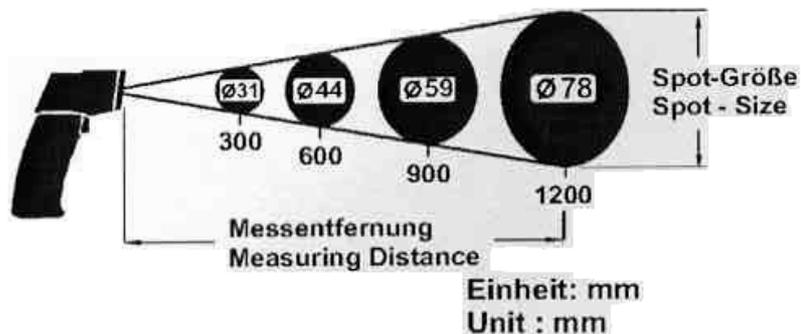
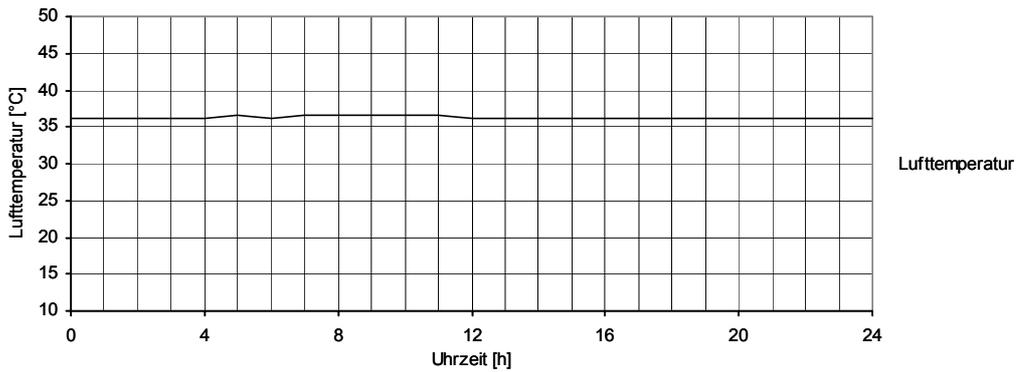
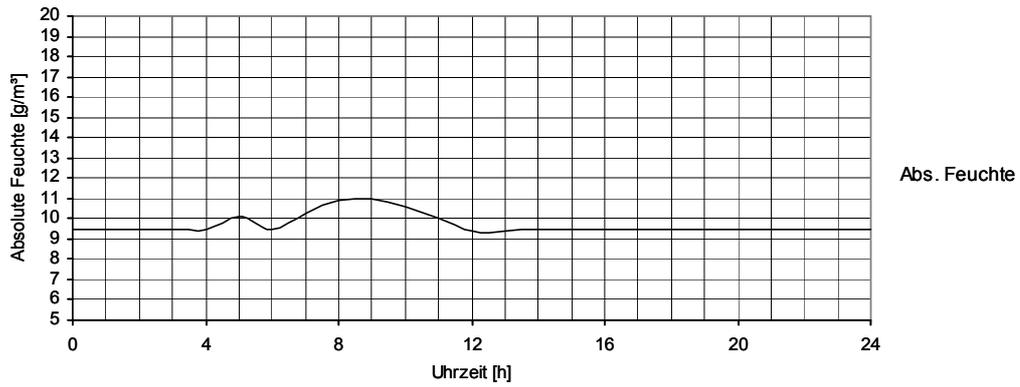
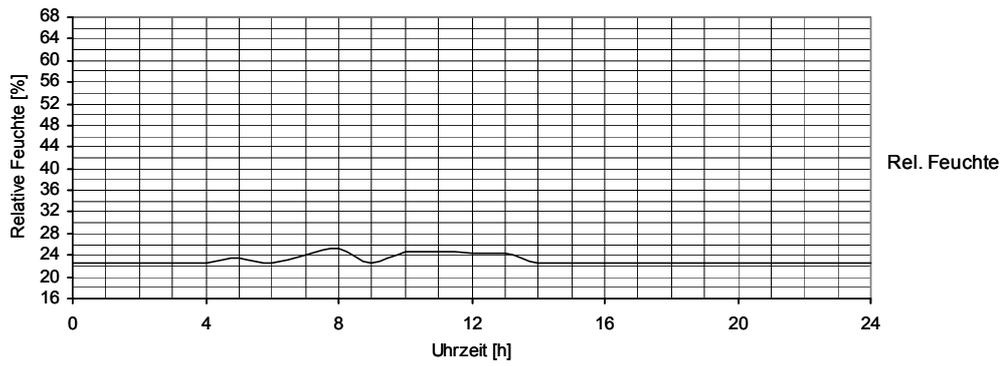
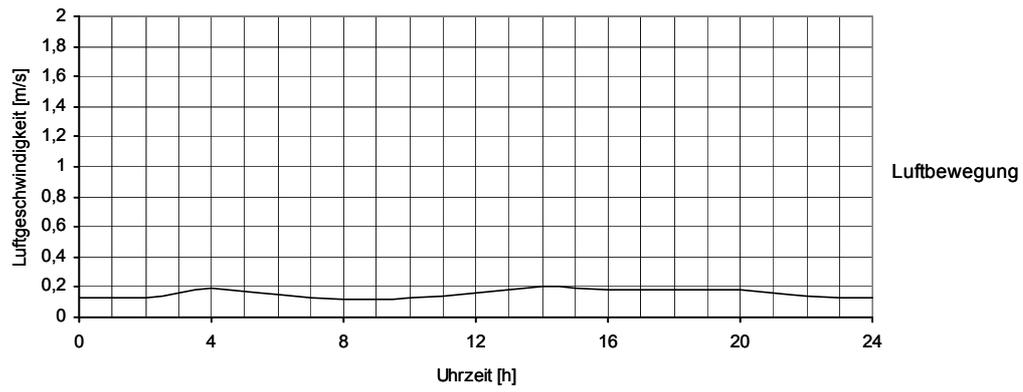
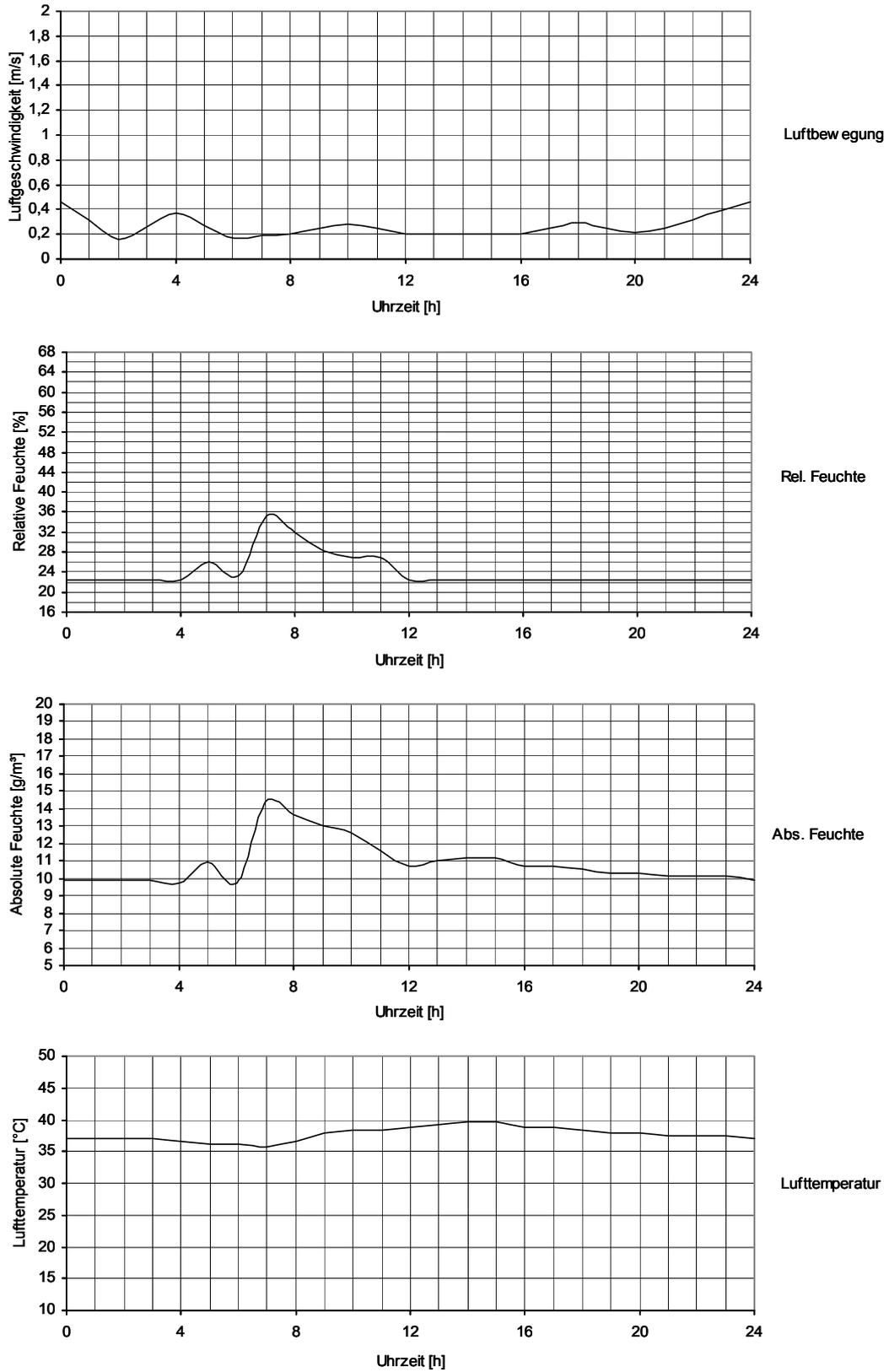


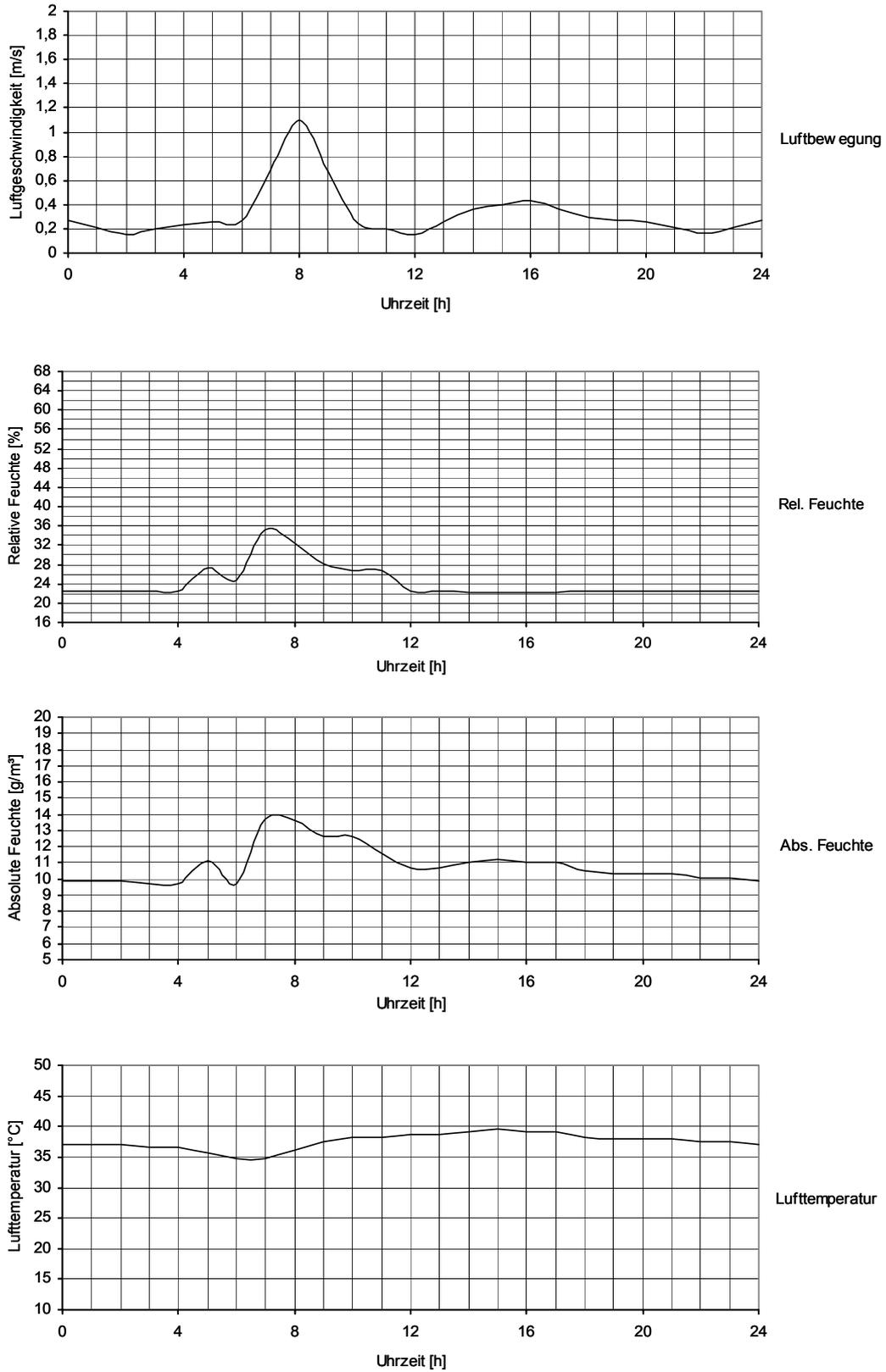
Abb. A-4-10 Das zur berührungslosen Messung der Oberflächentemperatur von Wänden, Decken, Fußböden und Dächer verwendete Gerät



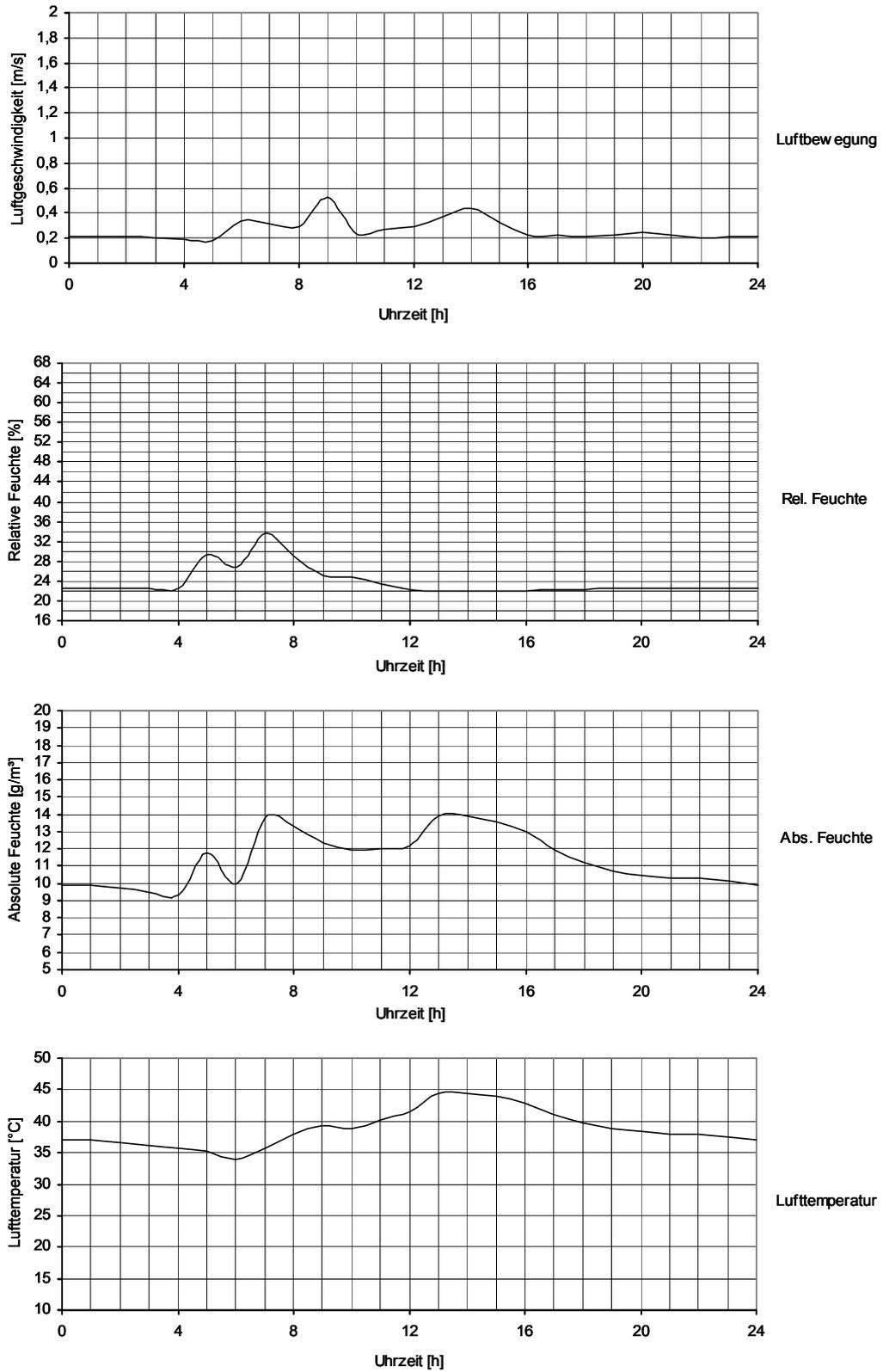
**Abb. A-4-11 Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 1 (Erdgeschoss / Seiyun-Palast) an einem Sommertag, Juli 2003**



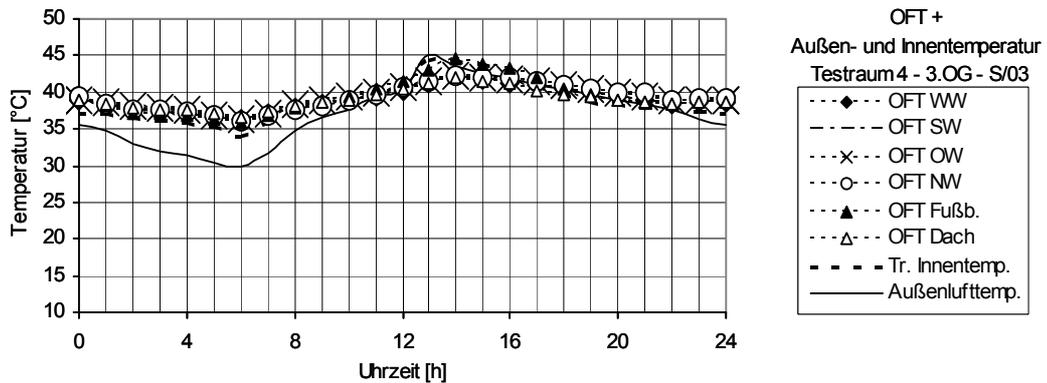
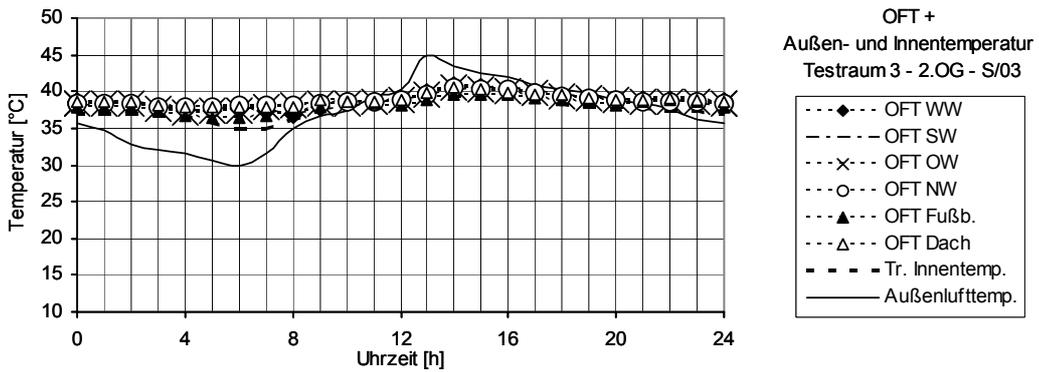
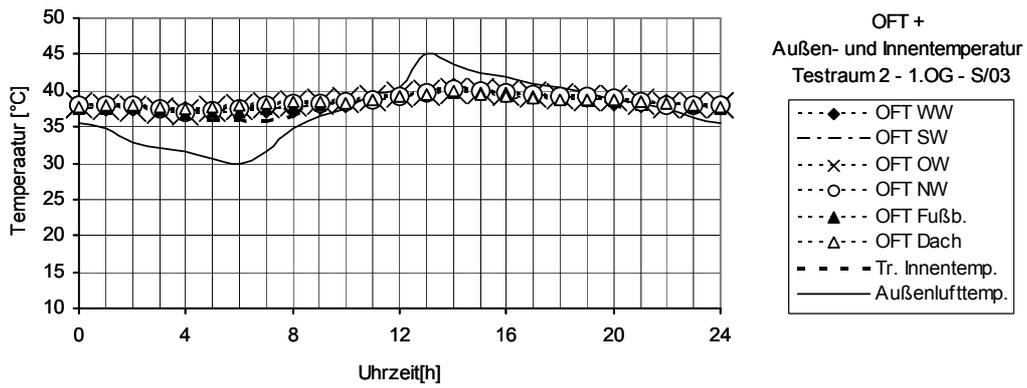
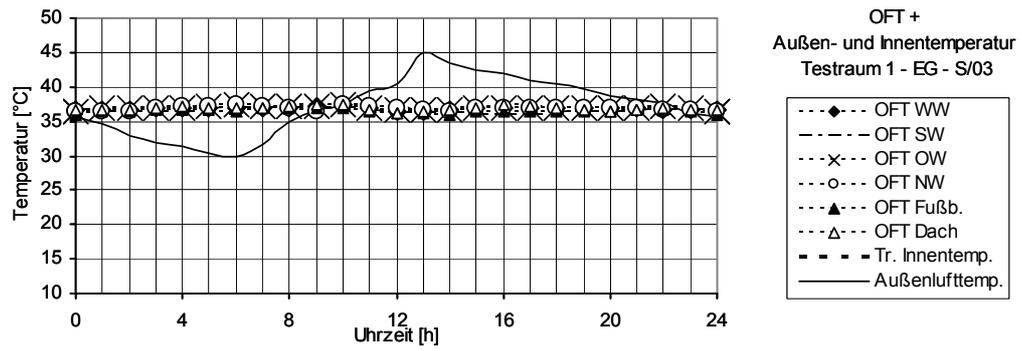
**Abb. A-4-12 Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 2  
(1. Oberschoss / Seiyun-Palast) an einem Sommertag, Juli 2003**



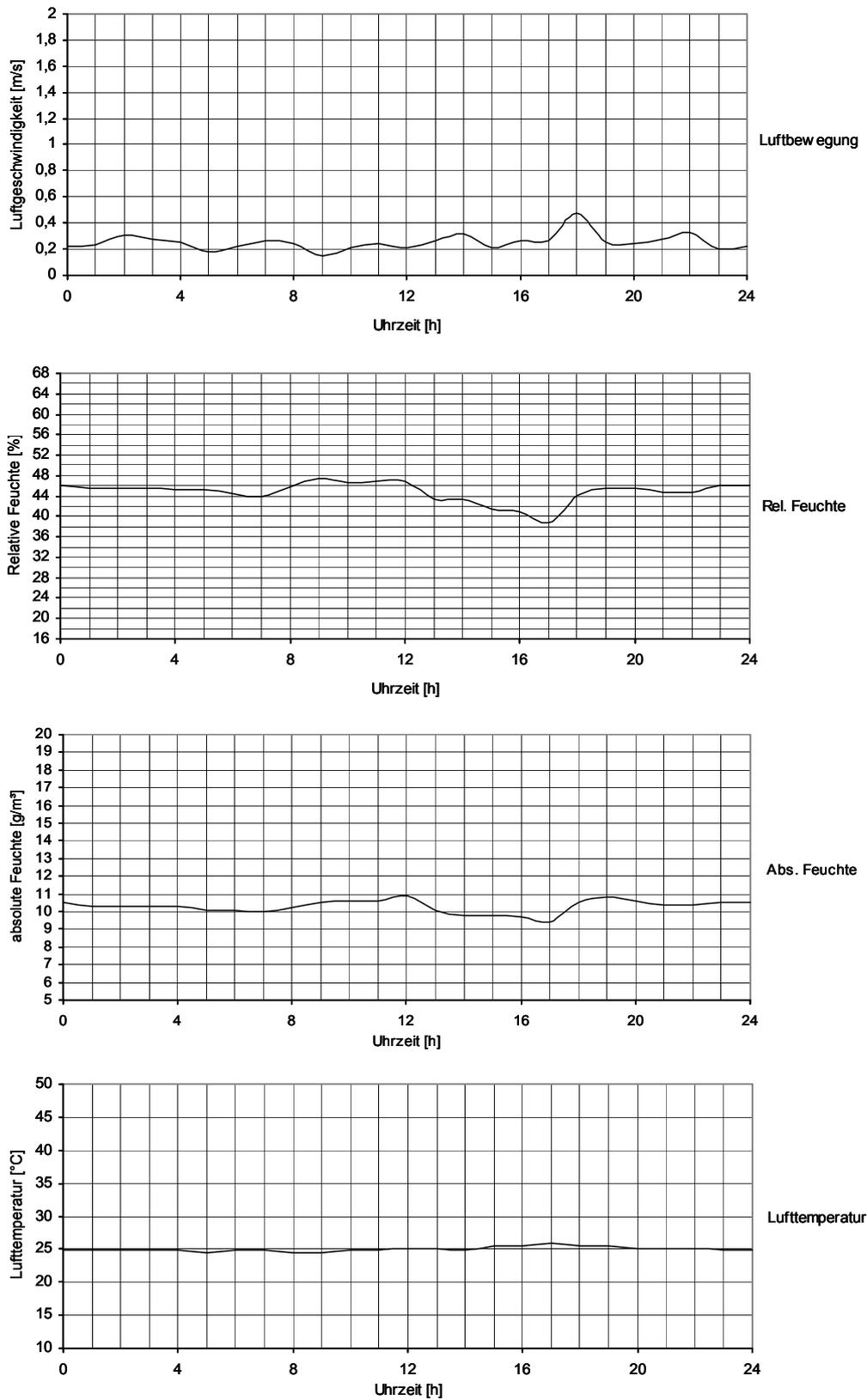
**Abb. A-4-13 Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 3  
(2. Oberschoss / Seiyun-Palast) an einem Sommertag, Juli 2003**



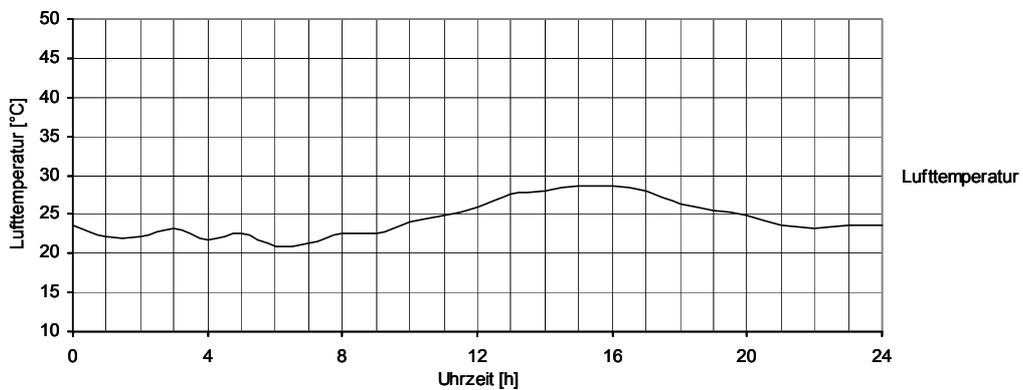
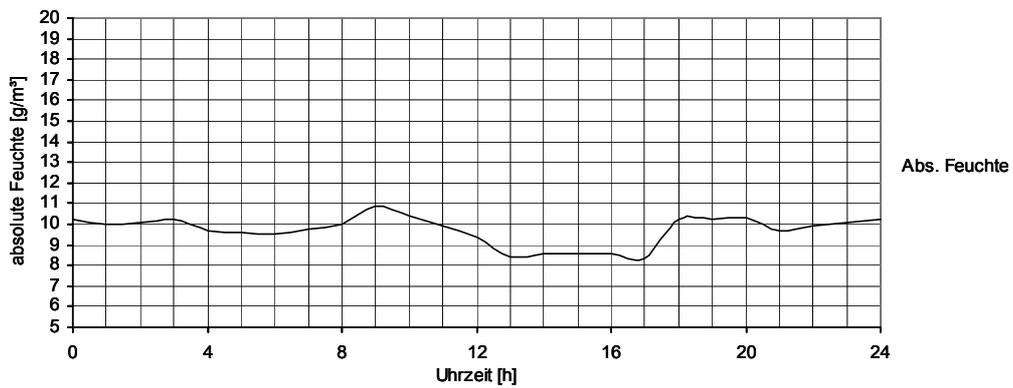
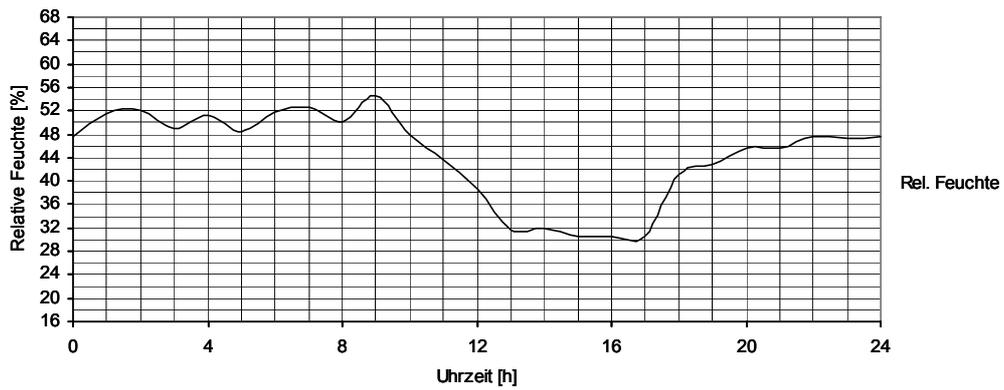
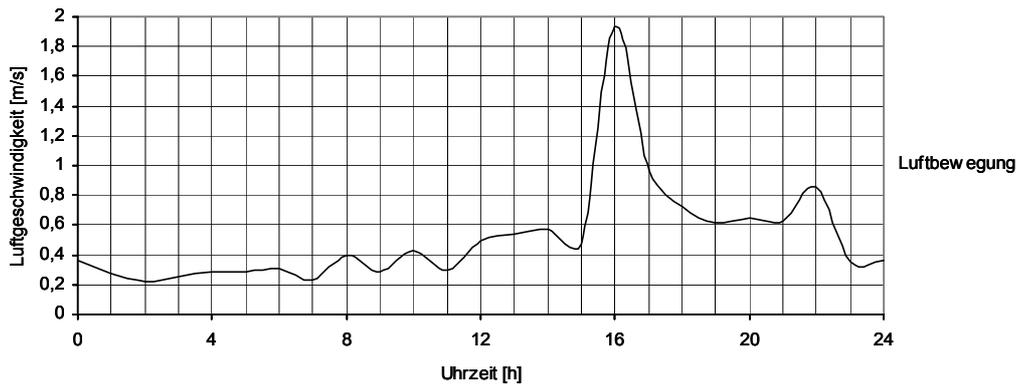
**Abb. A-4-14 Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 4  
(3. Oberschoss / Seiyun-Palast) an einem Sommertag, Juli 2003**



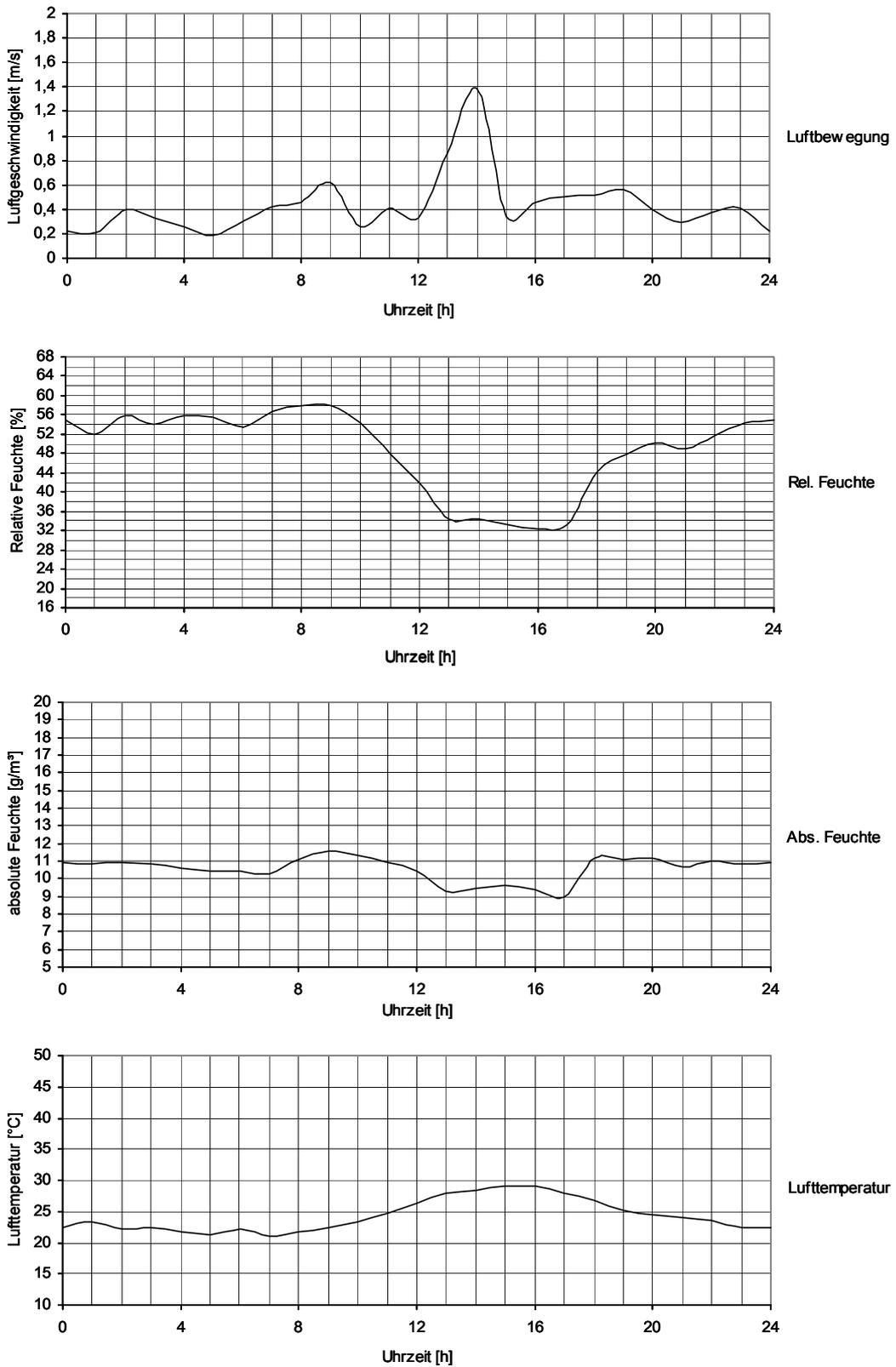
**Abb. A-4-15 Messergebnisse von OFT + Außen- und Innentemperatur in den Testräumen 1, 2, 3, und 4 am Seiyun-Palast an einem Sommertag, Juli 2003**



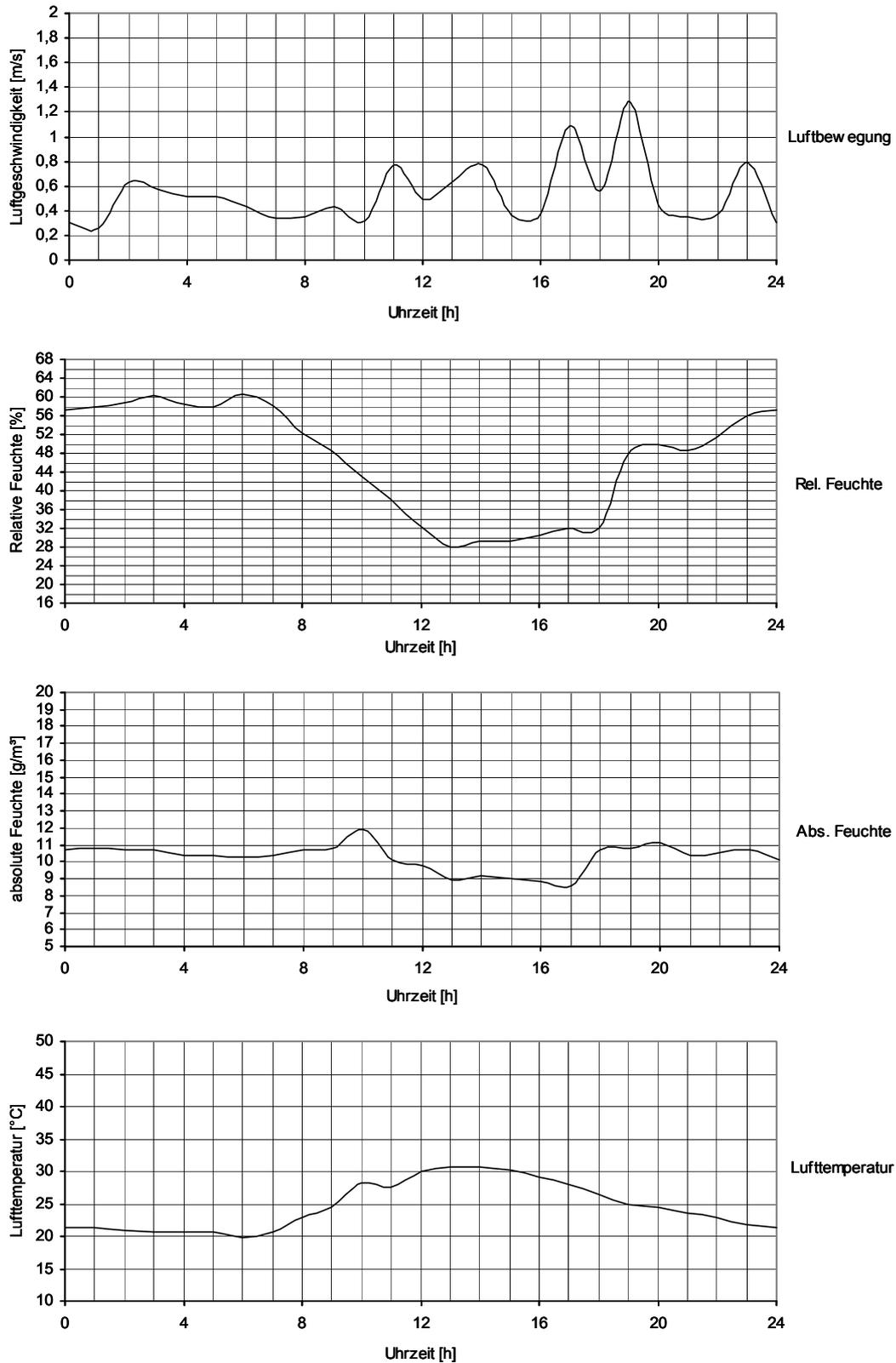
**Abb. A-4-16 Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 1 (Erdgeschoss / Seiyun-Palast) an einem Wintertag, Januar 2004**



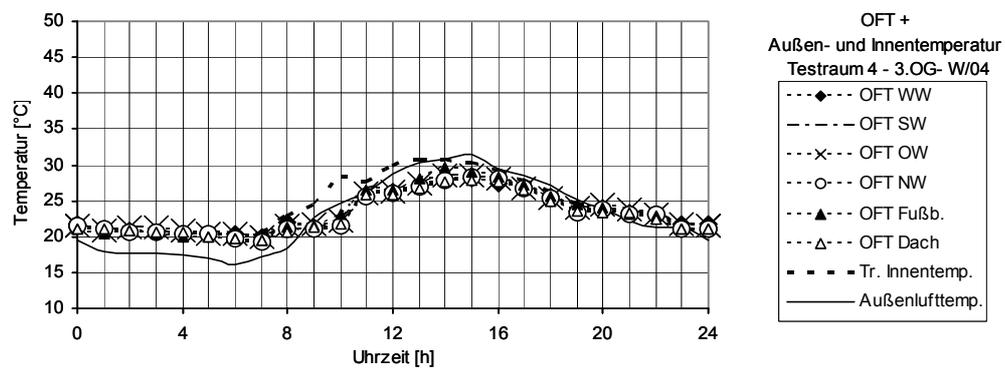
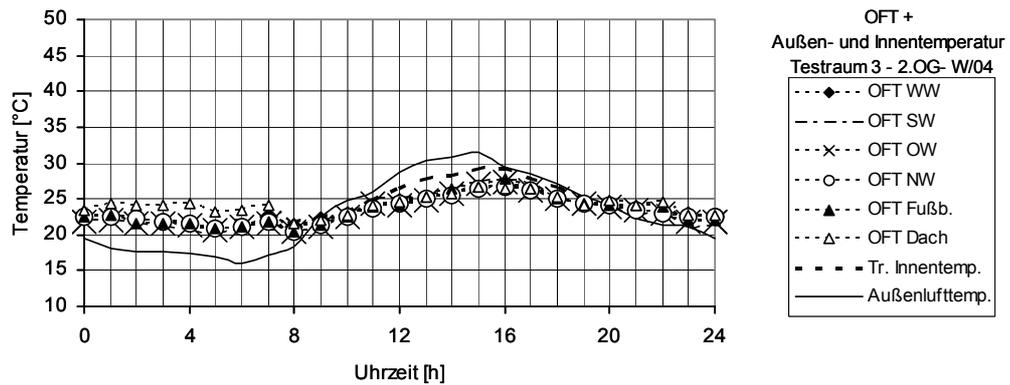
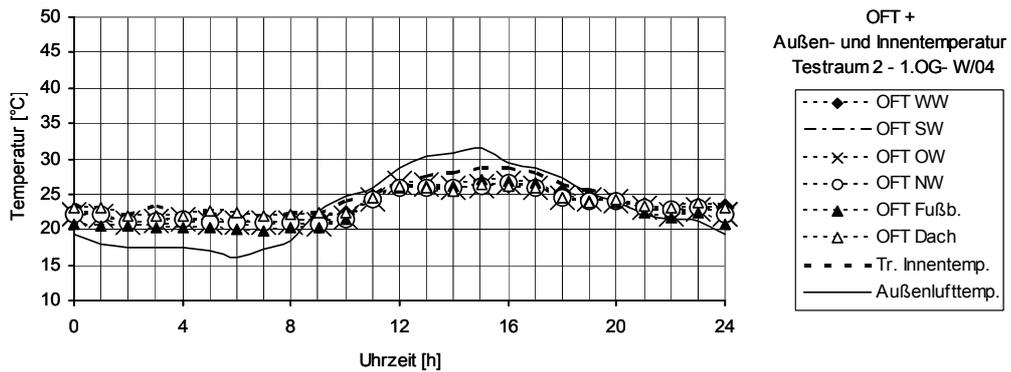
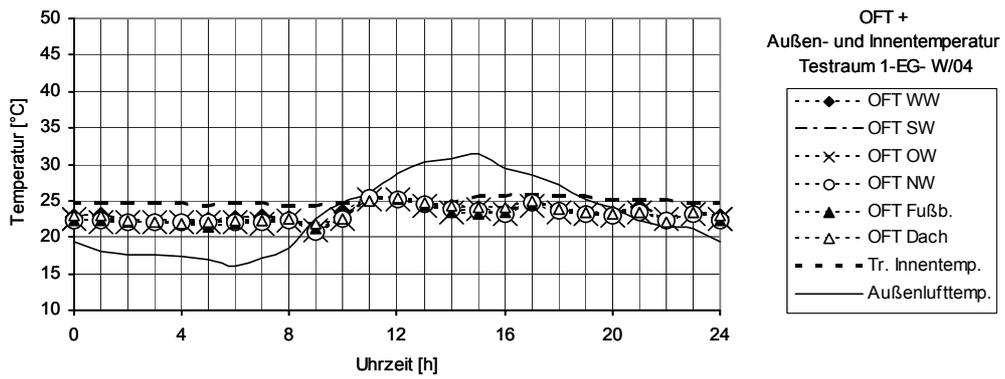
**Abb. A-4-17 Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 2  
(1. Oberschoss / Seiyun-Palast) an einem Wintertag, Januar 2004**



**Abb. A-4-18 Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 3  
(2. Oberschoss / Seiyun-Palast) an einem Wintertag, Januar 2004**



**Abb. A-4-19 Tagesverlauf der Messwerte im Testraum 4 (3. Oberschoss / Seiyun-Palast) an einem Wintertag, Januar 2004**



**Abb. A-4-20 Messergebnisse von OFT + Außen- und Innentemperatur in den Testräumen 1, 2, 3, und 4 am Seiyun-Palast an einem Wintertag, Januar 2004**



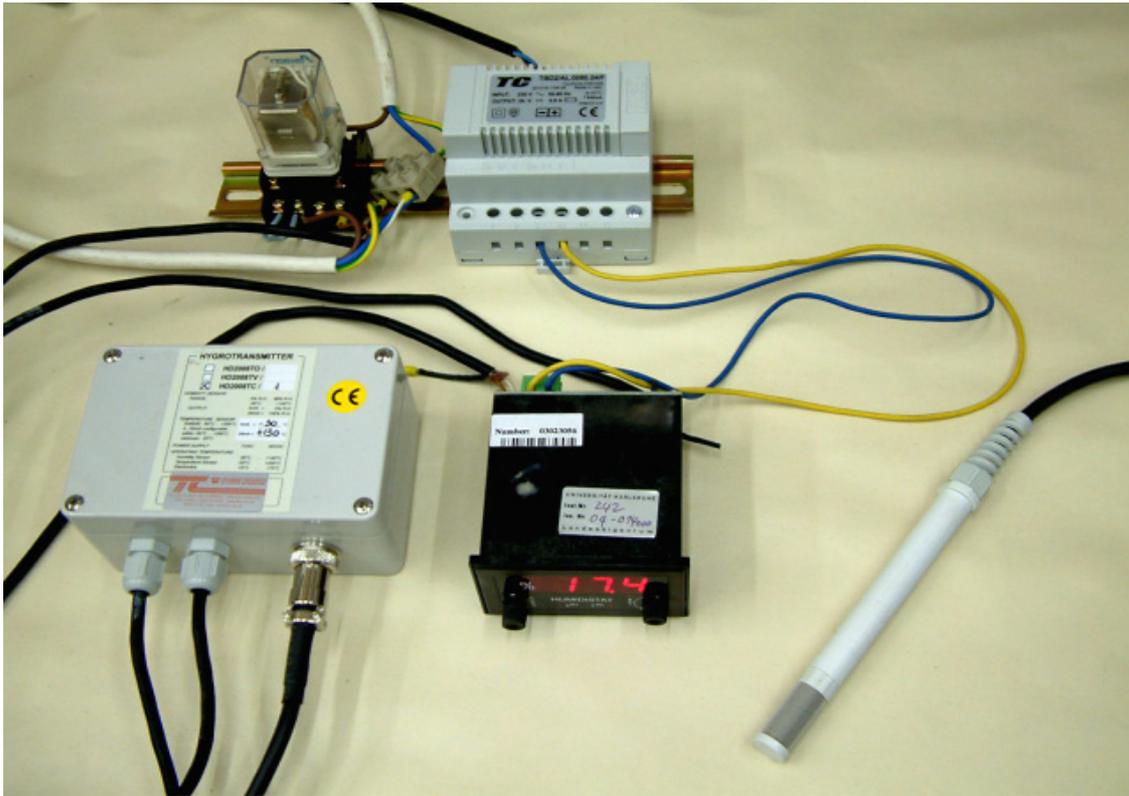
**Abb. A-5-1 Dampf-Luftbefeuchter**

Firma: CONDAIR AG  
Modell: Junior 1000  
Netzanschluss: 220...240 V / 50...60 Hz  
Dampfabgabe: 400...1000 g/h  
Raumgröße: 160...400 m<sup>3</sup>  
Umgebungstemperatur: 1...50 °C  
Fassungsvermögen: 10 l

**Abb. A-5-2 Luftentfeuchtungsgerät**

Firma: Long life for art  
Modell: OD 165-TH  
Entfeuchterleistung: 16,5 l / 24 h  
Raumvolumen: bis max. 650 m<sup>3</sup>  
Luftumwälzung: ca. 700 m<sup>3</sup> / h  
Spannungsversorgung: 230 V / 50 Hz





**Abb. A-5-3 Das zur Messung und Regulierung der rel. Feuchtigkeit in der Klimakammer verwendete Gerät, in die einzelnen Komponenten zerlegt**

Firma: TC LTD England

Modell: HD 2008TC/1, Hygrostat : HD 4049

Das Transmitter HD 2008TC/1 ist mit einem Feuchte- und Temperatursensor versehen und auf einen Stromausgang von 4 mA bis 20 mA kalibriert.

**Feuchtigkeitssensor:**

Arbeitsbereich:

rel. Feuchtigkeit: 5% ... 98%

Temperatur: -30°C ... 140°C

programmiert: 4 mA = 0% rel. F., 20 mA = 100% rel. F.

Genauigkeit:  $\pm 2\%$

**Temperatursensor:**

Arbeitsbereich:

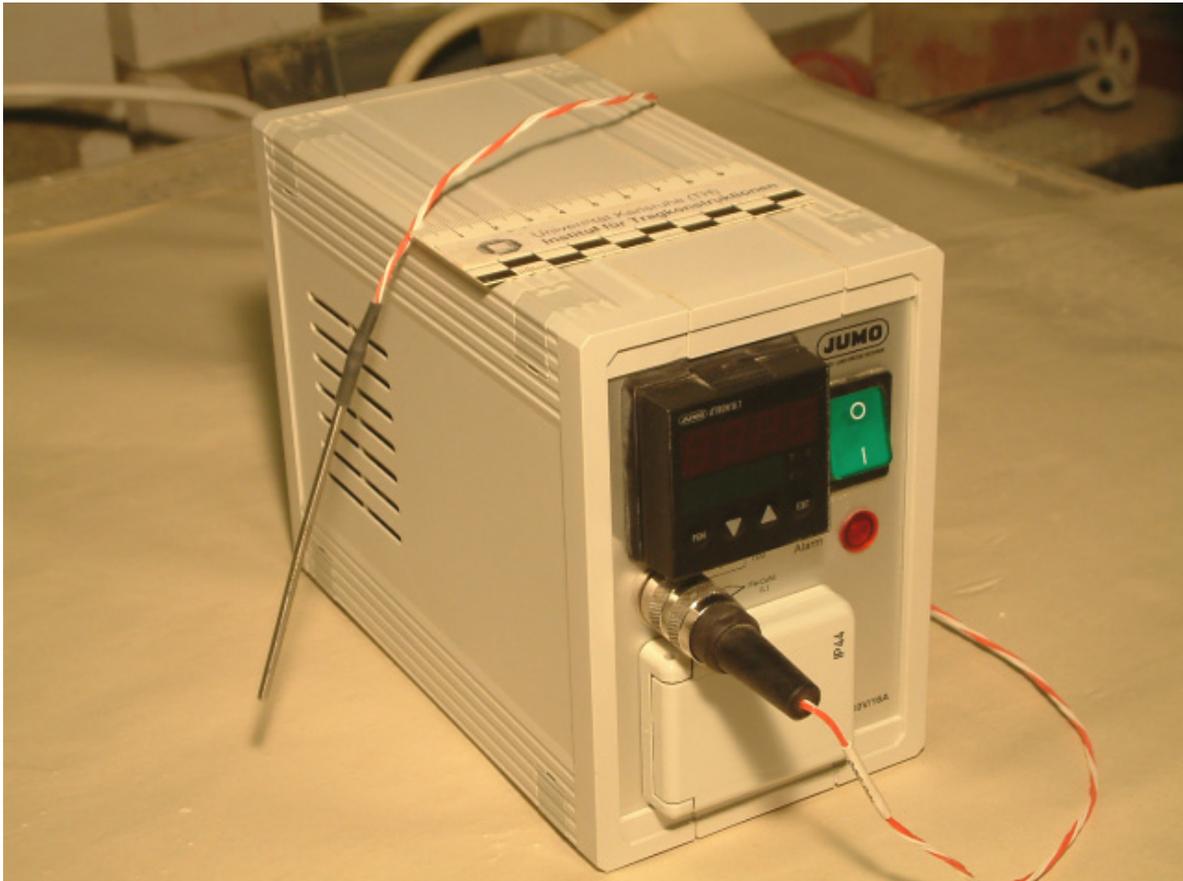
rel. Feuchtigkeit: 0 ... 100

Temperatur: -50°C ... +200°C

programmiert: 4 mA = -30°C, 20 mA = +130°C

Genauigkeit:  $\pm 0,1\%$  vom Messwert

**Elektronik:** Arbeitsbereich: -10°C ... +70°C



**Abb. A-5-4 Das zur Messung und Regulierung der Raumlufttemperatur in der Klimakammer verwendete Gerät**

**Regler:** Kompakter Mikroprozessorregler

Firma: **JUMO M. K. JUCHHEIM GmbH & Co**

Modell: LR 16.1

Regelbereich: -200 ... +850°C

Zulässiger Umgebungstemperaturbereich: 0 ...55°C

Zulässige rel. Feuchtigkeitsbereich der Umgebung < 75%

Messgenauigkeit: > 0,1% vom Messwert wird von Messkreisüberwachung erkannt

Spannungsversorgung: 230 V / 50 Hz

**Temperatursensor:**

Firma: **RS Components GmbH**

Modell: Pt100 (100W bei 0°C) nach B.S. 1984, Klasse B, Präzisions-Sensor

Einsatzbereich: von -50°C bis +250°C

Genauigkeit: ±0,06°C bei 0°C



**Abb. A-5-5 Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Siebung und Sedimentation nach DIN 18123**

Firma: Mahr GmbH  
Modell: 18 ES  
Messspanne: 300 mm  
Ablesbarkeit: 0,01 mm  
Genauigkeit: DIN 862  
Betriebstemp.: + 10 °C ...+ 40 °C  
Max. Verfahrensgeschwindigkeit: 1,5 m/ Sek.  
Betriebstemperatur: +5 °C bis + 40 °C  
Meßsystem: LCD Digital-Anzeige



**Abb. A-5-6 Digital-Messschieber, das zur Messung der Kantenlänge der Probekörper verwendete Gerät**

Firma: KERN & Sohn GmbH  
Modell: DS65 K1  
Wägebereich: 65.100 g  
Ablesbarkeit: 1 g  
Wägeplatte: 450 x 350 mm  
Betriebstemp.: + 10 °C ...+ 40 °C  
Einschwingzeit: 3 sec.  
Reproduzierbarkeit  
(Standardabweichung):  $\leq \pm 1$  g



**Abb. A-5-7 Elektronische Präzisions-Waage DS65 K1**

Firma: Sartorius AG  
Modell: BP 2100 S  
Wägebereich: 2100 g  
Ablesbarkeit: 0,01 g  
Wägeplatte: 180 x 180 mm  
Betriebstemp.: + 10 °C ...+ 40 °C  
Einschwingzeit:  $\leq 1,5$  sec.  
Reproduzierbarkeit  
(Standardabweichung):  $\leq \pm 0,01$  g



**Abb. A-5-8 Elektronische Präzisions-Waage BP 2100 S**

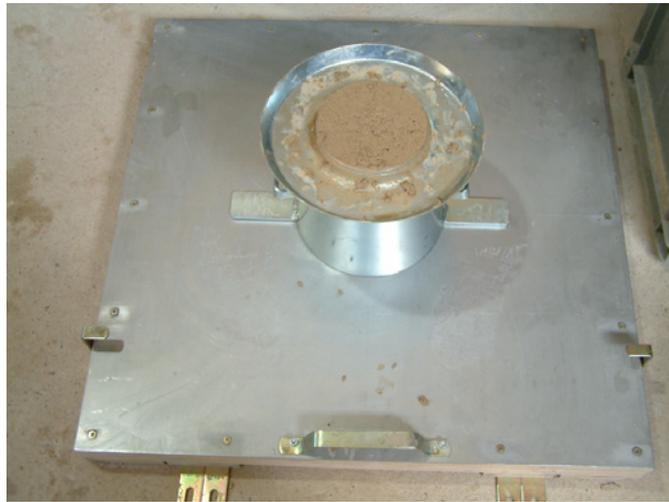
**Abb. A-5-9 Zwangsmischer zur Mischung der Ausgangsmaterialien**

Firma: STRASSENTEST  
Baustoff-Prüfsysteme  
Modell: 64/13/91 IP 54  
Vermögen: 65 l  
Spannungsversorgung: 220 V / 50 Hz

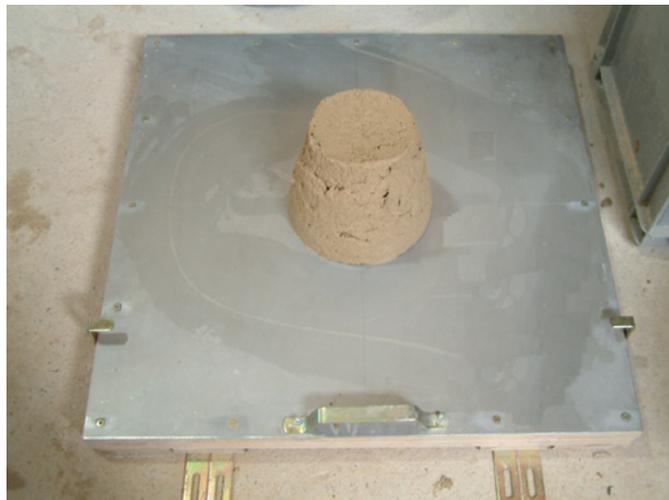


**Abb. A-5-10 Lehmmischungen während des Maukprozesses**

a



b



c

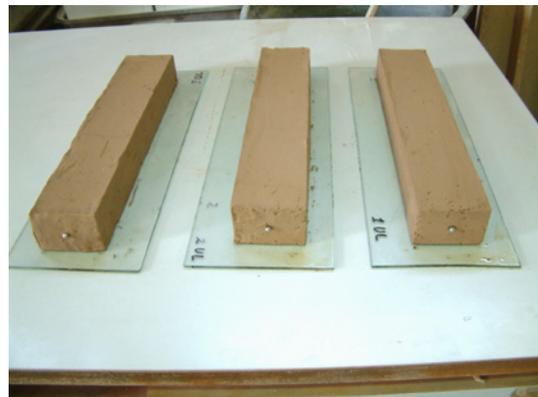


**Abb. A-5-11 a, b, c Konsistenz-Bestimmung der Lehm-mischungen durch Ausbreitmaß (30 cm), in Bildern nach DIN EN 12350-5 [43]**

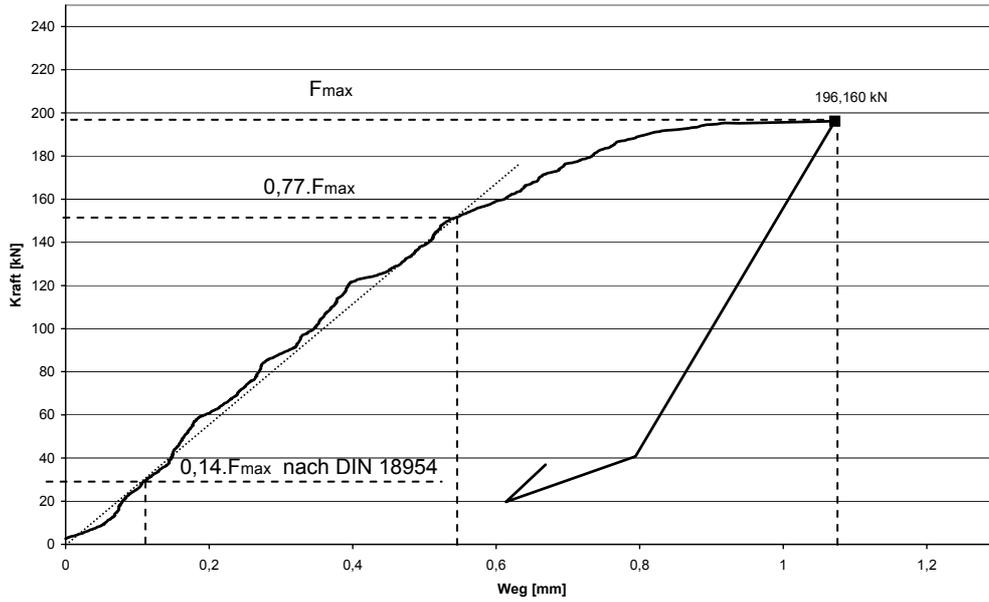
**Abb. A-5-12** Die zur Ermittlung des Trockenschwindmaßes nach DIN 18952 Bl.2 hergestellten Probekörper (25x40x200) mm. Statt einer Markierung an der Oberseite des Probekörpers wurden Messpunkte mittig an den Stirnflächen eingelassen, deren Abstände mit einem präzisen digitalen Messschieber gemessen wurden, (siehe Abb. A-5-6)



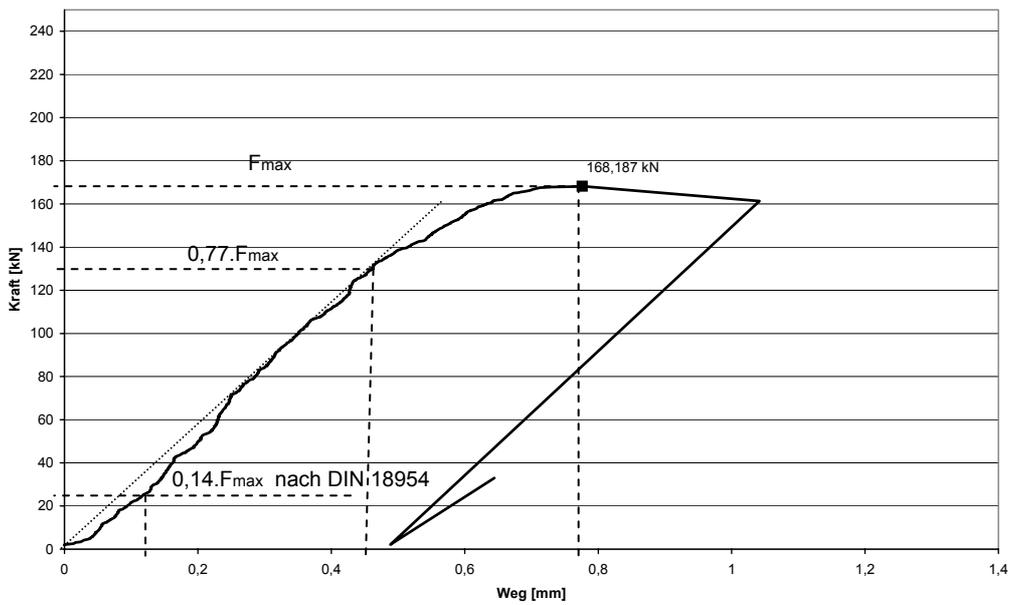
**Abb. A-5-13** Einrichtung zur Messung von Trocken-Schwindmaß mit einer Messuhr, die auf 0,01 mm genau abgelesen werden kann, nach (VZV)



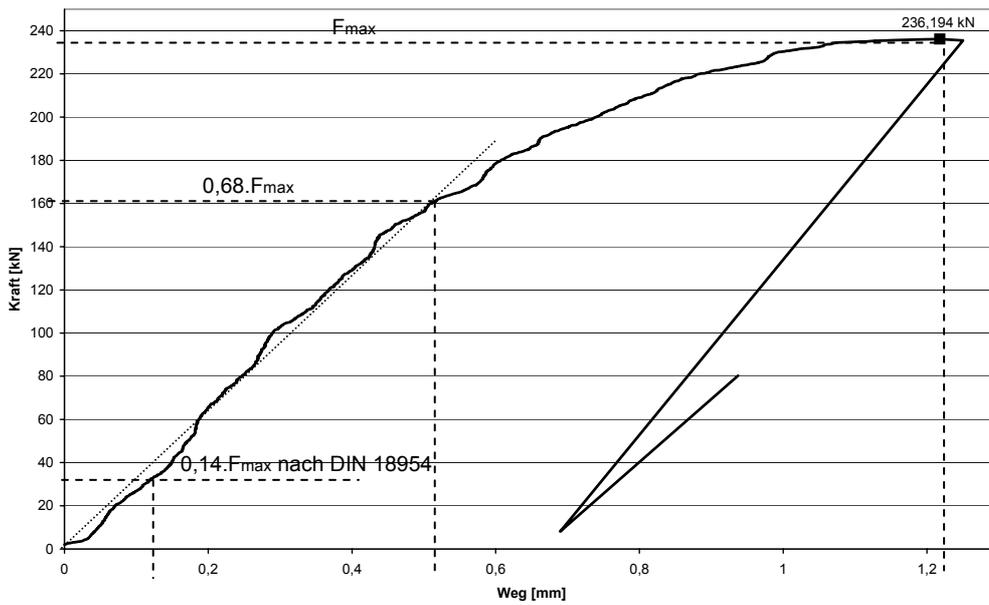
**Abb. A-5-14** Ermittlung des Trockenschwindmaßes der verarbeiteten Lehmischungen im plastischen Zustand jeweils an drei Probekörpern (400x80x50) mm, nach (VZV)



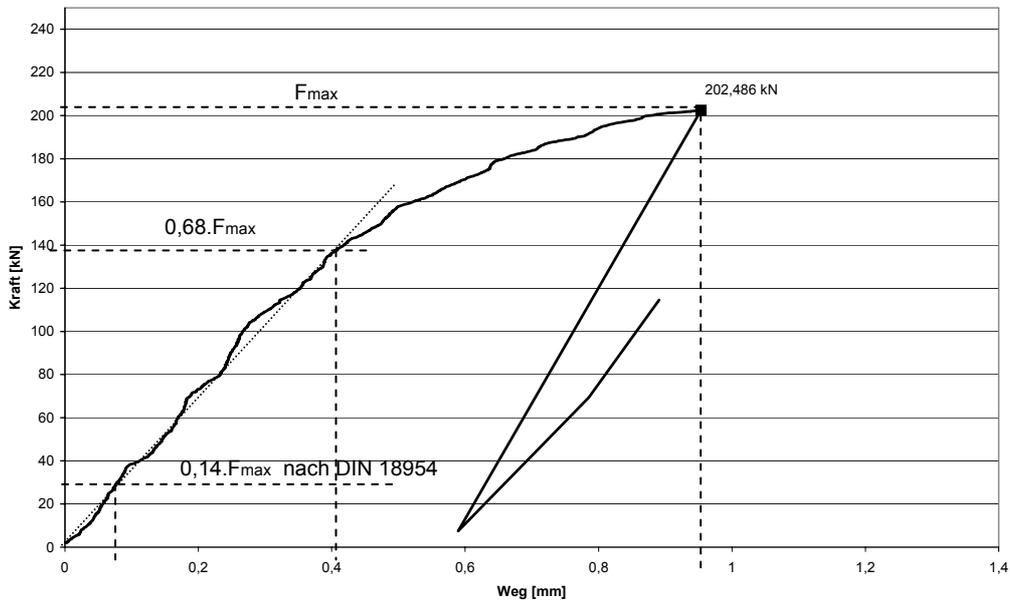
**Abb. A-5-15** Typisches Kraft-Weg-Diagramm von geschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials „UL (T=25%)“



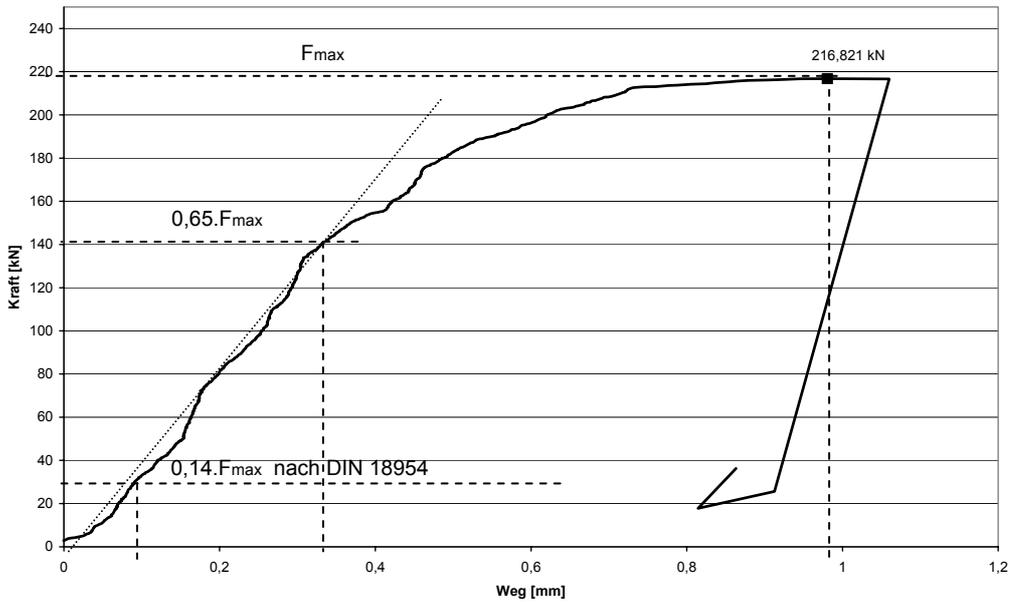
**Abb. A-5-16** Typisches Kraft-Weg-Diagramm von nichtgeschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials „UL (T=25%)“



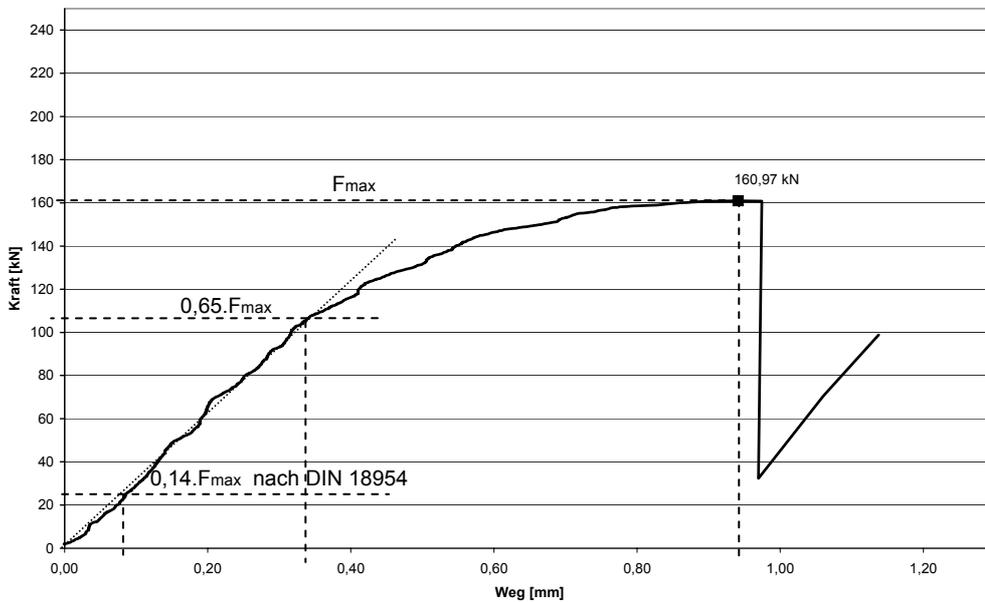
**Abb. A-5-17** Typisches Kraft-Weg-Diagramm von geschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=15%)“, MV (60:40)



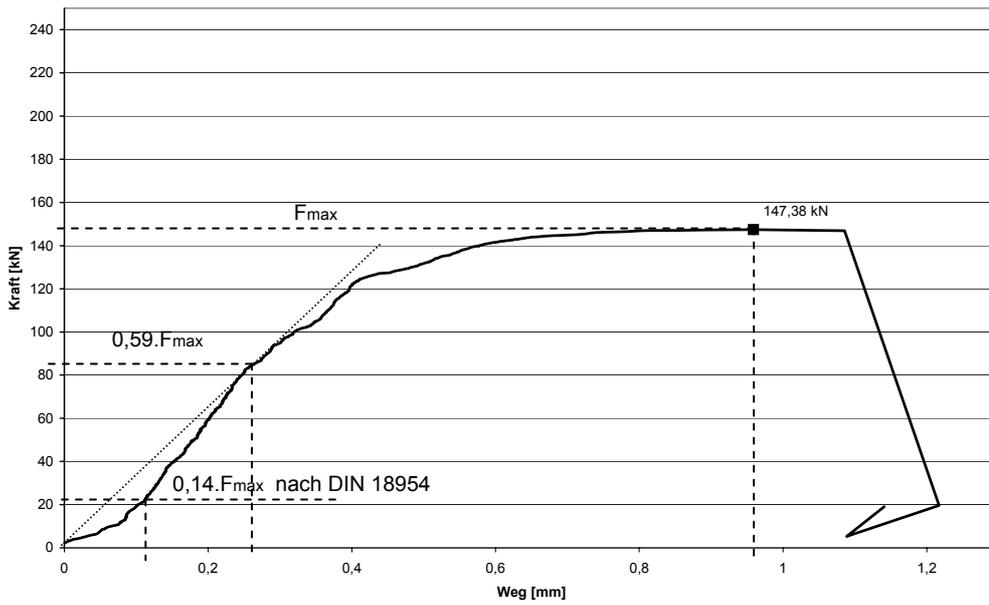
**Abb. A-5-18** Typisches Kraft-Weg-Diagramm von nichtgeschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=15%)“, MV (60:40)



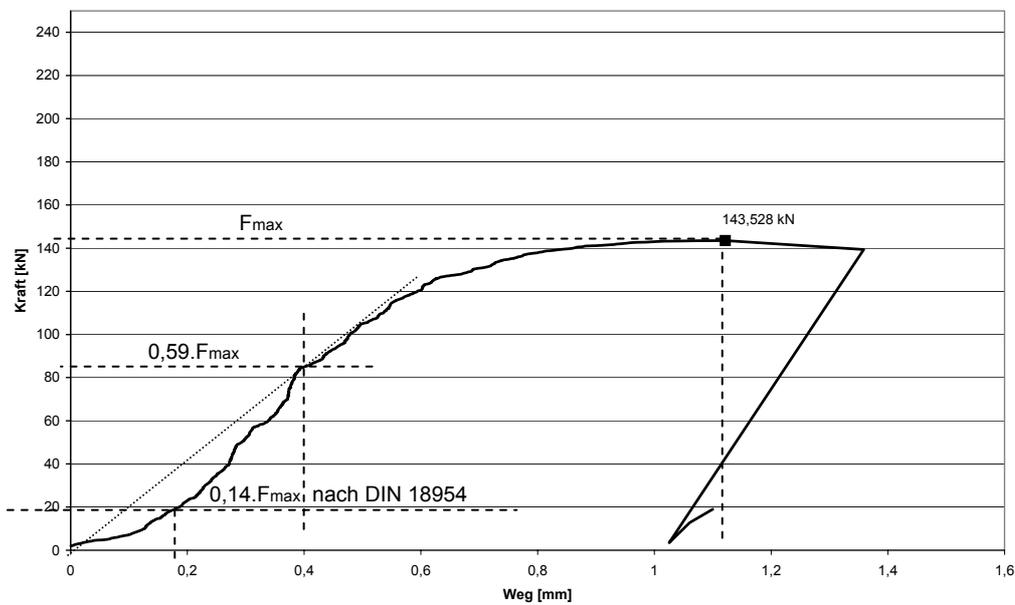
**Abb. A-5-19** Typisches Kraft-Weg-Diagramm von geschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=10%)“, MV (40:60)



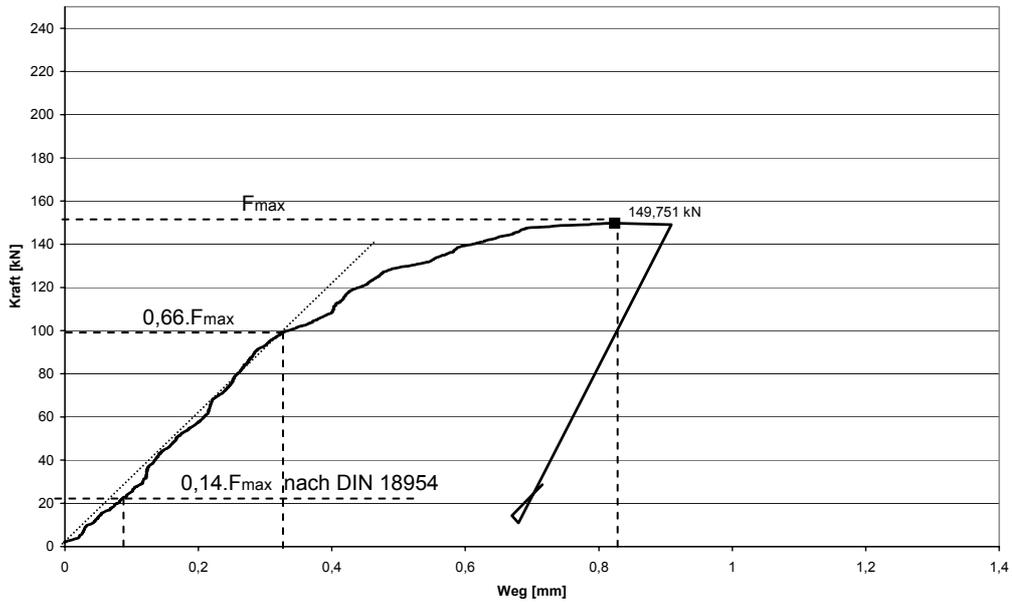
**Abb. A-5-20** Typisches Kraft-Weg-Diagramm von nichtgeschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=10%)“, MV (40:60)



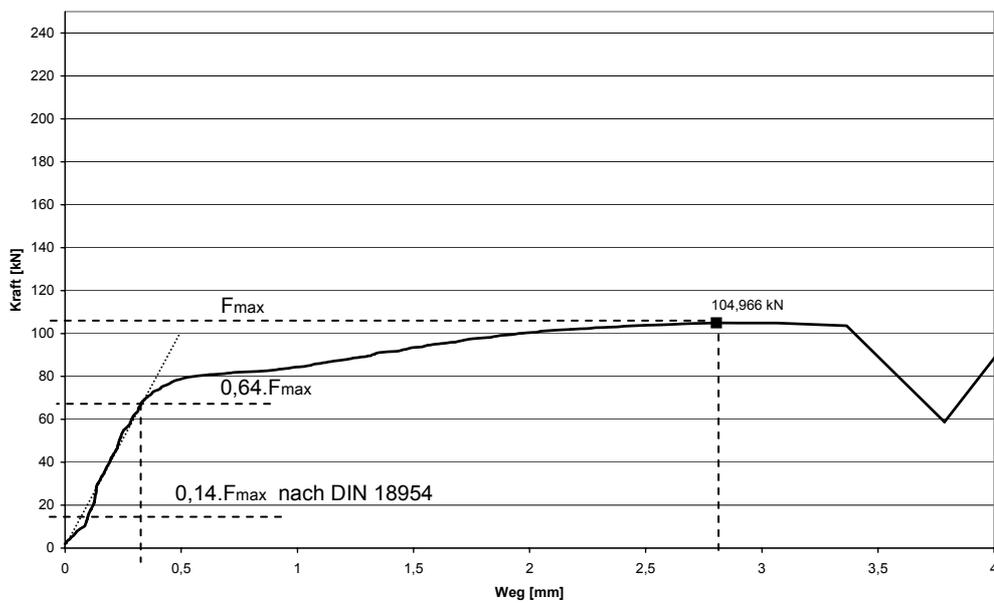
**Abb. A-5-21** Typisches Kraft-Weg-Diagramm von geschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=5%)“, MV (20:80)



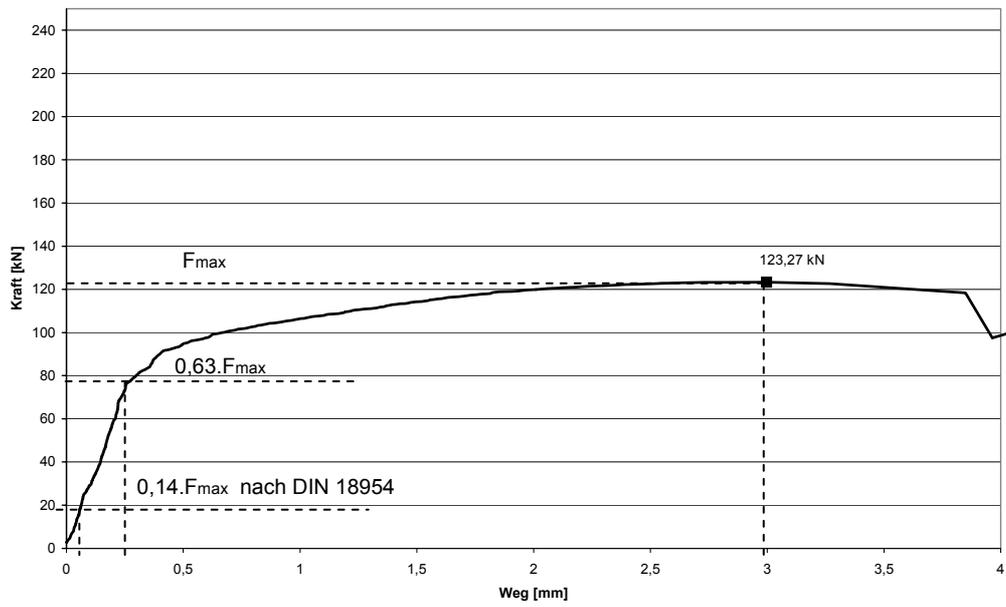
**Abb. A-5-22** Typisches Kraft-Weg-Diagramm von nichtgeschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=5%)“, MV (20:80)



**Abb. A-5-23** Typisches Kraft-Weg-Diagramm von nichtgeschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2) mm „UL + RS (T=10%)“, MV (40:60)



**Abb. A-5-24** Typisches Kraft-Weg-Diagramm von nichtgeschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2) mm und Rundkies (2-16) mm „UL + RS + RK (T=10%)“, MV (40:21:39)



**Abb. A-5-25** Typisches Kraft-Weg-Diagramm von nichtgeschützter Versuchsreihe des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm und Splitt (2-16) mm „UL + BS + Splitt (T=10%)“, MV (40:21:39)

## Tabellenverzeichnis zum Anhang

### Zu Kapitel 4:

Tab. A-4-1	Messergebnisse im Testraum 1 – Erdgeschoss – Seiyun-Palast im Sommermonat Juli 2003	285
Tab. A-4-2	Messergebnisse im Testraum 2 – 1. Obergeschoss – Seiyun-Palast im Sommermonat Juli 2003	285
Tab. A-4-3	Messergebnisse im Testraum 3 – 2. Obergeschoss – Seiyun-Palast im Sommermonat Juli 2003	286
Tab. A-4-4	Messergebnisse im Testraum 4 – 3. Obergeschoss – Seiyun-Palast im Sommermonat Juli 2003	286
Tab. A-4-5	Messergebnisse im Testraum 1 – Erdgeschoss – Seiyun-Palast im Wintermonat Januar 2004	287
Tab. A-4-6	Messergebnisse im Testraum 2 – 1. Obergeschoss – Seiyun-Palast im Wintermonat Januar 2004	287
Tab. A-4-7	Messergebnisse im Testraum 3 – 2. Obergeschoss – Seiyun-Palast im Wintermonat Januar 2004	288
Tab. A-4-8	Messergebnisse im Testraum 4 – 3. Obergeschoss – Seiyun-Palast im Wintermonat Januar 2004	288

### Zu Kapitel 5:

Tab. A-5-1	Wassergehalt der Lehmmischung „UL (T=25%)“ im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) mit dem Ausbreitmaß 30 cm	289
Tab. A-5-2	Wassergehalt der Lehmmischung „UL + RS (T=10%)“ im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) mit dem Ausbreitmaß 30 cm	289
Tab. A-5-3	Wassergehalt der Lehmmischung „UL + BS (T=10%)“ im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) mit dem Ausbreitmaß 30 cm	290
Tab. A-5-4	Wassergehalt der Lehmmischung „UL + RS + RK (T=10%)“ im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) mit dem Ausbreitmaß 30 cm	290
Tab. A-5-5	Wassergehalt der Lehmmischung „UL + BS + Splitt (T=10%)“ im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) mit dem Ausbreitmaß 30 cm	291
Tab. A-5-6	Wassergehalt der Lehmmischung „UL + BS (T=15%)“ im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) mit dem Ausbreitmaß 30 cm	291
Tab. A-5-7	Wassergehalt der Lehmmischung „UL + BS (T=5%)“ im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) mit dem Ausbreitmaß 30 cm	292
Tab. A-5-8	Druckfestigkeitsversuch an nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials „UL (T=25%)“ getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und (WKB) bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	292
Tab. A-5-9	Druckfestigkeitsversuch an nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) „UL + RS (T=10%)“, MV (40:60), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	293

Tab. A-5-10	Druckfestigkeitsversuch an nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL + BS (T=10%)“, MV (40:60), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	293
Tab. A-5-11	Druckfestigkeitsversuch an nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) und Rundkies (2-16 mm) „UL + RS + RK (T=10%)“, MV (40:21:39), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	294
Tab. A-5-12	Druckfestigkeitsversuch an nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) und Splitt (2-16 mm) „UL + BS + Splitt (T=10%)“, MV (40: 21:39), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	294
Tab. A-5-13	Druckfestigkeitsversuch an nichtgeschützter Versuchsreihe (Referenzreihe: Ausgangsmaterial gemagert mit Brechsand (0-2 mm)) „UL + BS (T=10%)“, MV (40:60), fünf Tage bei 20°C getrocknet und dann bei 60°C bis zur Massenkonstanz getrocknet.	295
Tab. A-5-14	Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials „UL (T=25%)“ getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)	295
Tab. A-5-15	Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) „UL + RS (T=10%)“, MV (40:60), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)	296
Tab. A-5-16	Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL + BS (T=10%)“, MV (40:60), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)	296
Tab. A-5-17	Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) und Rundkies (2-16 mm) „UL + RS + RK (T=10%)“, MV (40:21:39), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)	297
Tab. A-5-18	Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) und Splitt (2-16 mm) „UL + BS + Splitt (T=10%)“, MV (40:21:39), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)	297
Tab. A-5-19	Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials „UL (T=25%)“ getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	298
Tab. A-5-20	Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=15%)“, MV (60:40), getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	298
Tab. A-5-21	Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=10%)“, MV (40:60), getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	299
Tab. A-5-22	Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=5%)“, MV (20:80), getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)	299
Tab. A-5-23	Zulässige Druckspannungen von Lehmen nach DIN 18954	300

**Tabellen:**

Meßb.	Uhrzeit→		00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
Testraum 1 – Erdgeschoss (AWD=75 cm)	Tr. Innentemp.	[°C]	36,13	36,13	36,13	36,13	36,13	36,57	36,13	36,57	36,57	36,57	36,57	36,57	36,13	36,13	36,13	36,13	36,13	36,13	36,13	36,13	36,13	36,13	36,13	36,13	
	Außenlufttemp.	[°C]	35,60	34,70	32,90	32,00	31,50	30,50	30,00	31,60	34,90	36,60	37,50	39,40	40,40	45,00	43,50	42,40	41,90	40,90	40,40	39,80	38,80	38,30	37,60	36,20	
	R. Innenluftf.	[%]	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60	23,50	22,60	24,10	25,30	25,60	24,70	24,70	22,40	22,40	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60	22,60
	R. Außenluftf.	[%]	22,70	22,70	22,70	22,80	22,90	29,00	26,90	31,80	22,50	20,60	21,30	21,30	21,50	21,80	21,90	22,10	22,20	22,30	22,50	22,50	22,50	22,60	22,60	22,60	22,60
	OFT OW	[°C]	36,50	36,80	37,00	37,00	37,00	37,10	37,30	37,20	37,10	37,20	37,30	37,00	37,70	36,60	36,60	36,80	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,10	36,80
	OFT NW	[°C]	36,50	36,50	36,50	36,80	37,10	37,20	37,30	37,20	36,90	36,30	37,40	37,10	36,80	36,60	36,50	36,80	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	36,80	36,60	36,60
	OFT WW	[°C]	36,60	36,60	36,70	36,90	37,00	36,90	36,90	36,90	37,00	37,20	37,40	36,90	36,40	36,50	36,60	36,80	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	36,80	36,60	36,60
	OFT SW	[°C]	36,60	36,50	36,40	36,50	36,50	36,70	36,80	36,90	37,00	37,00	37,00	36,60	36,10	36,10	36,10	36,00	36,00	36,00	36,20	36,30	36,50	36,50	36,60	36,60	36,60
	OFT Fußb.	[°C]	36,00	36,30	36,50	36,60	36,60	36,60	36,50	36,80	37,00	36,90	36,80	36,50	36,20	36,10	36,00	36,30	36,50	36,50	36,50	36,50	36,50	36,60	36,70	36,30	36,30
	OFT Dach	[°C]	36,70	36,60	36,60	36,80	37,10	37,00	36,90	37,00	37,10	37,30	37,50	36,70	36,20	36,40	36,60	37,00	37,30	37,10	36,90	36,70	36,50	36,70	36,80	36,80	36,70
	Luftgeschw.	[m/s]	0,128	0,130	0,132	0,162	0,192	0,170	0,149	0,134	0,119	0,123	0,128	0,144	0,161	0,181	0,201	0,193	0,186	0,185	0,185	0,184	0,184	0,159	0,135	0,131	

**Tab. A-4-1 Messergebnisse im Testraum 1 – Erdgeschoss – Seiyun-Palast im Sommermonat Juli 2003**

Meßb.	Uhrzeit→		00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Testraum 2 – 1. Obergeschoß (AWD=55 cm)	Tr. Innentemp.	[°C]	37,00	37,00	37,00	37,00	36,57	36,13	36,13	35,70	36,57	37,88	38,32	38,32	38,77	39,22	39,67	39,67	38,77	38,77	38,32	37,88	37,88	37,44	37,44	37,44
	Außenlufttemp.	[°C]	35,60	34,70	32,90	32,00	31,50	30,50	30,00	31,60	34,90	36,60	37,50	39,40	40,40	45,00	43,50	42,40	41,90	40,90	40,40	39,80	38,80	38,30	37,60	36,20
	R. Innenluftf.	[%]	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	26,00	23,20	35,20	32,00	28,30	26,80	26,80	22,40	22,30	22,30	22,30	22,40	22,40	22,40	22,40	22,40	22,50	22,50	22,50
	R. Außenluftf.	[%]	22,70	22,70	22,70	22,80	22,90	29,00	26,90	31,80	22,50	20,60	21,30	21,30	21,50	21,80	21,90	22,10	22,20	22,30	22,50	22,50	22,50	22,60	22,60	22,60
	OFT OW	[°C]	37,90	37,70	37,60	37,30	37,10	37,40	37,70	37,90	38,10	38,40	38,60	39,00	39,50	39,70	39,90	39,90	39,80	39,40	39,10	39,00	39,00	38,50	38,00	37,90
	OFT NW	[°C]	37,90	38,00	38,00	37,50	37,10	37,30	37,60	37,90	38,20	38,30	38,50	38,80	39,10	39,70	40,30	40,00	39,60	39,40	39,20	39,10	39,00	38,50	38,00	37,90
	OFT WW	[°C]	37,90	37,80	37,80	37,50	37,20	37,30	37,40	37,50	37,60	37,90	38,20	38,60	39,10	39,70	40,40	40,00	39,60	39,40	39,30	38,90	38,50	38,30	38,10	38,00
	OFT SW	[°C]	37,40	37,60	37,80	37,50	37,30	37,30	37,30	37,50	37,60	37,90	38,20	38,60	39,00	39,80	40,50	40,10	38,70	39,30	39,00	38,70	38,50	38,30	38,10	37,70
	OFT Fußb.	[°C]	37,40	37,60	37,70	37,20	36,70	36,90	37,10	37,40	37,70	38,00	38,20	38,60	39,10	39,50	39,80	39,80	39,80	39,20	38,70	38,60	38,60	38,40	38,20	37,80
	OFT Dach	[°C]	37,80	37,90	38,00	37,80	37,50	37,80	38,00	38,20	38,50	38,40	38,30	38,70	39,10	39,50	39,90	39,50	39,20	39,00	38,80	38,70	38,60	38,40	38,20	38,00
	Luftgeschw.	[m/s]	0,466	0,309	0,152	0,261	0,370	0,271	0,173	0,190	0,207	0,244	0,281	0,243	0,205	0,205	0,205	0,201	0,197	0,242	0,288	0,248	0,208	0,250	0,310	0,388

**Tab. A-4-2 Messergebnisse im Testraum 2 – 1. Obergeschoß – Seiyun-Palast im Sommermonat Juli 2003**

Meßb.	Uhrzeit→		00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Testraum 3 – 2. Obergeschoß (AWD=50 cm)	Tr. Innentemp.	[°C]	37,00	37,00	37,00	36,57	36,57	35,70	34,85	34,85	36,13	37,44	38,32	38,32	38,77	38,77	39,22	39,67	39,22	39,22	38,32	37,88	37,88	37,88	37,44	37,44
	Außenlufttemp.	[°C]	35,60	34,70	32,90	32,00	31,50	30,50	30,00	31,60	34,90	36,60	37,50	39,40	40,40	45,00	43,50	42,40	41,90	40,90	40,40	39,80	38,80	38,30	37,60	36,20
	R. Innenluftf.	[%]	22,50	22,50	22,50	22,50	22,50	27,20	24,80	35,10	32,50	28,20	26,80	26,80	22,40	22,40	22,30	22,30	22,30	22,30	22,50	22,50	22,50	22,60	22,60	22,60
	R. Außenluftf.	[%]	22,70	22,70	22,70	22,80	22,90	29,00	26,90	31,80	22,50	20,60	21,30	21,30	21,50	21,80	21,90	22,10	22,20	22,30	22,50	22,50	22,50	22,60	22,60	22,60
	OFT OW	[°C]	38,40	38,30	38,30	37,70	37,20	37,30	37,50	37,80	38,10	38,30	38,40	38,60	38,80	39,60	40,50	40,20	40,00	39,70	39,30	39,00	38,80	38,70	38,60	38,50
	OFT NW	[°C]	38,40	38,30	38,30	38,00	37,80	38,00	38,20	38,10	38,10	38,30	38,50	38,70	38,80	39,60	40,60	40,40	40,20	39,80	39,30	39,00	38,80	38,70	38,70	38,50
	OFT WW	[°C]	38,50	38,40	38,40	37,80	37,30	37,50	37,60	37,30	37,00	37,80	38,50	38,70	38,90	39,80	40,70	40,60	40,40	39,90	39,40	39,10	38,80	38,80	38,80	38,60
	OFT SW	[°C]	38,00	38,30	38,50	37,80	37,30	37,50	37,60	37,30	37,00	37,50	37,90	38,40	38,90	39,40	40,00	40,20	40,50	40,00	39,50	39,10	38,80	38,80	38,80	38,40
	OFT Fußb.	[°C]	37,90	37,80	37,80	37,30	36,70	36,50	36,40	36,70	37,10	37,80	38,50	38,30	38,10	38,80	39,50	39,50	39,60	39,20	38,80	38,50	38,20	38,50	38,80	38,50
	OFT Dach	[°C]	38,60	38,50	38,50	38,20	38,00	38,00	37,90	38,00	38,00	38,30	38,60	38,70	38,90	39,70	40,60	40,20	39,80	39,60	39,50	39,20	38,90	38,90	39,00	38,80
	Luftgeschw.	[m/s]	0,265	0,209	0,153	0,194	0,235	0,254	0,273	0,688	1,103	0,674	0,245	0,198	0,151	0,255	0,359	0,398	0,437	0,362	0,287	0,274	0,262	0,214	0,166	0,215

**Tab. A-4-3 Messergebnisse im Testraum 3 – 2. Obergeschoß – Seiyun-Palast im Sommermonat Juli 2003**

Meßb.	Uhrzeit→		00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Testraum 3-3. OG Außenwanddicke=32 cm )	Tr. Innentemp.	[°C]	37,00	37,00	36,57	36,13	35,70	35,27	34,01	35,70	37,88	39,22	38,77	38,77	41,52	44,40	44,40	43,91	42,94	41,05	39,67	38,77	38,32	37,88	37,88	37,44
	Außenlufttemp.	[°C]	35,60	34,70	32,90	32,00	31,50	30,50	30,00	31,60	34,90	36,60	37,50	39,40	40,40	45,00	43,50	42,40	41,90	40,90	40,40	39,80	38,80	38,30	37,60	36,20
	R. Innenluftf.	[%]	22,50	22,50	22,50	22,60	22,60	29,40	26,80	33,70	29,00	25,00	24,80	24,80	22,20	21,90	21,90	22,00	22,10	22,20	22,30	22,40	22,40	22,40	22,40	22,50
	R. Außenluftf.	[%]	22,70	22,70	22,70	22,80	22,90	29,00	26,90	31,80	22,50	20,60	21,30	21,30	21,50	21,80	21,90	22,10	22,20	22,30	22,50	22,50	22,50	22,60	22,60	22,60
	OFT OW	[°C]	39,00	38,60	38,20	37,90	37,50	36,80	36,20	37,20	38,30	38,80	39,40	40,00	40,60	41,40	42,30	42,00	41,80	41,40	41,00	40,50	40,00	39,40	38,90	38,90
	OFT NW	[°C]	39,30	38,50	37,70	37,50	37,40	36,80	36,10	36,80	37,60	38,20	38,80	39,70	40,60	41,40	42,30	42,10	41,90	41,50	41,00	40,50	39,90	39,90	38,90	39,10
	OFT WW	[°C]	38,80	38,20	37,70	37,30	37,00	36,60	36,20	37,00	37,80	38,30	38,80	39,50	40,30	41,30	42,30	41,80	41,30	40,90	40,50	40,00	39,50	38,90	38,30	38,60
	OFT SW	[°C]	38,80	38,30	37,70	37,30	36,90	36,50	36,20	36,90	37,60	38,20	38,90	39,60	40,40	41,20	42,00	41,70	41,40	41,00	40,50	40,00	39,50	38,90	38,30	38,60
	OFT Fußb.	[°C]	38,90	38,10	37,20	37,00	36,90	36,30	35,70	36,80	38,00	38,70	39,50	40,50	41,50	43,00	44,50	43,90	43,30	41,90	40,50	39,70	39,00	38,70	38,40	38,70
	OFT Dach	[°C]	38,90	38,40	37,90	37,70	37,50	37,00	36,50	37,30	38,10	38,60	39,00	39,70	40,50	41,30	42,00	41,60	41,10	40,30	39,60	39,30	39,00	38,70	38,50	38,70
	Luftgeschw.	[m/s]	0,218	0,217	0,216	0,206	0,196	0,176	0,333	0,315	0,297	0,533	0,236	0,266	0,296	0,366	0,436	0,330	0,224	0,221	0,218	0,230	0,243	0,222	0,201	0,209

**Tab. A-4-4 Messergebnisse im Testraum 4 – 3. Obergeschoß – Seiyun-Palast im Sommermonat Juli 2003**

Meßb.	Uhrzeit→		00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Testraum 1 – Erdgeschoss (AWD=75 cm)	Tr. Innentemp.	[°C]	24,79	24,79	24,79	24,79	24,79	24,40	24,79	24,79	24,40	24,40	24,79	24,79	25,17	25,17	24,79	25,56	25,56	25,95	25,56	25,56	25,17	25,17	25,17	24,79
	Außenlufttemp.	[°C]	19,40	18,00	17,60	17,60	17,40	17,00	16,00	17,20	18,40	22,60	24,80	26,00	28,70	30,31	30,71	31,52	29,50	28,60	27,20	25,20	24,00	22,20	21,40	21,20
	R. Innenluftf.	[%]	46,10	45,40	45,40	45,40	45,20	45,30	44,50	44,00	45,90	47,40	46,50	46,80	47,00	43,40	43,30	41,40	40,80	38,70	44,10	45,50	45,60	44,70	44,70	46,10
	R. Außenluftf.	[%]	61,10	65,80	64,20	66,20	64,60	62,40	68,10	61,80	53,40	48,50	45,70	41,10	32,50	27,40	28,70	27,70	30,60	32,80	45,50	50,30	53,40	53,40	56,40	59,60
	OFT OW	[°C]	22,60	22,10	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00	21,90	22,40	21,00	22,50	25,30	25,20	24,30	23,40	23,80	25,10	24,20	23,50	23,10	23,00	23,40	22,50	23,10
	OFT NW	[°C]	22,20	22,20	22,00	22,00	22,10	22,10	22,10	22,10	22,40	20,80	22,50	25,40	25,10	24,50	23,90	23,70	23,10	24,80	23,60	23,10	23,00	23,50	22,40	23,20
	OFT WW	[°C]	22,80	23,00	22,10	22,10	22,10	22,20	22,50	22,80	22,50	21,00	23,30	25,50	25,30	24,60	24,00	23,80	23,20	24,80	23,70	23,10	23,10	24,00	22,40	23,30
	OFT SW	[°C]	22,80	23,00	22,20	22,20	22,20	22,30	22,50	22,80	22,50	21,00	22,50	25,30	25,20	24,30	23,40	23,90	23,30	24,80	23,80	23,20	23,20	24,00	22,60	23,30
	OFT Fußb.	[°C]	22,20	22,30	22,10	22,00	21,90	21,50	21,90	22,20	22,50	21,20	22,60	25,00	25,30	24,40	23,50	23,20	23,40	24,50	23,80	23,30	23,20	23,50	22,00	23,30
	OFT Dach	[°C]	22,90	23,00	22,30	22,00	21,80	22,10	22,20	22,30	22,60	21,90	22,60	25,00	25,40	24,80	24,20	24,00	24,00	24,90	23,90	23,30	23,10	23,50	22,00	23,30
	Luftgeschw.	[m/s]	0,222	0,237	0,306	0,278	0,251	0,176	0,221	0,266	0,244	0,150	0,209	0,241	0,210	0,263	0,315	0,213	0,265	0,266	0,473	0,258	0,244	0,277	0,331	0,205

**Tab. A-4-5 Messergebnisse im Testraum 1 – Erdgeschoss – Seiyun-Palast im Wintermonat Januar 2004**

Meßb.	Uhrzeit→		00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Testraum 2 – 1. Obergeschoß (AWD=55 cm)	Tr. Innentemp.	[°C]	23,63	22,09	22,09	23,24	21,71	22,48	20,95	21,33	22,48	22,48	24,01	24,79	25,95	27,52	27,91	28,70	28,70	27,91	26,34	25,56	24,79	23,63	23,24	23,63
	Außenlufttemp.	[°C]	19,40	18,00	17,60	17,60	17,40	17,00	16,00	17,20	18,40	22,60	24,80	26,00	28,70	30,31	30,71	31,52	29,50	28,60	27,20	25,20	24,00	22,20	21,40	21,20
	R. Innenluftf.	[%]	47,70	51,50	52,00	49,00	51,10	48,30	51,90	52,50	50,00	54,50	47,90	43,60	38,70	31,60	31,90	30,60	30,40	30,60	41,20	42,80	45,50	45,70	47,70	47,30
	R. Außenluftf.	[%]	61,10	65,80	64,20	66,20	64,60	62,40	68,10	61,80	53,40	48,50	45,70	41,10	32,50	27,40	28,70	27,70	30,60	32,80	45,50	50,30	53,40	53,40	56,40	59,60
	OFT OW	[°C]	22,10	22,00	21,10	21,30	21,50	21,10	21,00	21,00	21,10	20,80	21,80	24,20	26,70	26,40	26,00	26,10	26,70	25,80	24,50	24,30	24,00	23,00	22,10	22,90
	OFT NW	[°C]	22,20	22,10	21,10	21,30	21,50	21,00	21,00	21,00	21,10	20,80	21,50	24,30	26,00	26,00	26,00	26,10	26,60	25,80	24,50	24,00	24,10	23,20	22,90	23,00
	OFT WW	[°C]	22,30	22,10	20,90	21,20	21,50	21,50	21,30	21,00	21,10	21,60	22,10	24,40	26,00	26,00	26,00	26,10	26,30	25,80	25,10	24,50	24,10	23,30	22,50	23,00
	OFT SW	[°C]	22,30	21,40	20,50	20,70	20,90	21,10	20,80	20,50	21,20	21,30	21,40	24,70	26,70	25,30	25,90	26,20	26,00	25,80	25,00	24,10	24,10	22,90	22,30	23,00
	OFT Fußb.	[°C]	20,80	20,60	20,50	20,40	20,30	20,40	20,10	19,80	20,20	20,20	21,40	24,40	26,00	26,10	26,20	27,00	26,90	26,60	24,50	24,10	23,80	22,50	21,70	22,30
	OFT Dach	[°C]	23,00	23,00	22,00	22,00	22,00	22,70	22,40	22,00	22,10	22,40	22,30	24,50	26,10	25,80	25,50	26,30	26,20	26,00	24,50	23,80	24,20	23,30	23,00	23,80
	Luftgeschw.	[m/s]	0,366	0,279	0,225	0,254	0,284	0,288	0,307	0,226	0,391	0,291	0,428	0,294	0,491	0,533	0,576	0,472	1,935	0,972	0,720	0,617	0,653	0,628	0,858	0,357

**Tab. A-4-6 Messergebnisse im Testraum 2 – 1. Obergeschoß – Seiyun-Palast im Wintermonat Januar 2004**

Meßb.	Uhrzeit→		00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Testraum 3 – 2. Obergeschoß (AWD=50 cm)	Tr. Innentemp.	[°C]	22,48	23,24	22,09	22,48	21,71	21,33	22,09	20,95	21,71	22,48	23,24	24,79	26,34	27,91	28,31	29,10	29,10	27,91	26,73	25,17	24,40	24,01	23,63	22,48
	Außenlufttemp.	[°C]	19,40	18,00	17,60	17,60	17,40	17,00	16,00	17,20	18,40	22,60	24,80	26,00	28,70	30,31	30,71	31,52	29,50	28,60	27,20	25,20	24,00	22,20	21,40	21,20
	R. Innenluftf.	[%]	54,80	52,00	55,70	54,10	55,80	55,60	53,30	56,70	57,90	58,00	54,30	47,70	41,80	34,30	34,40	33,20	32,40	33,10	44,30	47,80	50,10	49,10	51,80	54,30
	R. Außenluftf.	[%]	61,10	65,80	64,20	66,20	64,60	62,40	68,10	61,80	53,40	48,50	45,70	41,10	32,50	27,40	28,70	27,70	30,60	32,80	45,50	50,30	53,40	53,40	56,40	59,60
	OFT OW	[°C]	21,80	22,00	21,50	21,50	21,40	20,70	21,10	21,60	20,50	21,20	22,60	24,30	24,10	24,90	25,80	27,00	27,40	26,20	25,00	24,30	23,90	23,30	22,90	21,80
	OFT NW	[°C]	22,50	22,60	22,30	21,90	21,50	20,80	21,20	21,70	20,30	21,30	22,50	23,60	24,30	25,00	25,60	26,50	26,70	26,30	25,00	24,30	24,00	23,40	23,00	22,50
	OFT WW	[°C]	22,50	22,70	22,30	21,90	21,50	20,80	21,10	22,40	21,00	22,00	22,80	23,70	24,60	25,10	25,60	26,50	26,90	26,30	25,10	24,30	24,00	23,40	23,10	22,70
	OFT SW	[°C]	21,80	22,00	21,60	21,10	20,70	20,00	20,80	21,60	20,30	21,30	22,80	24,90	25,00	25,60	26,30	27,30	27,60	27,00	25,10	24,30	23,90	22,80	23,00	21,20
	OFT Fußb.	[°C]	22,50	22,80	21,60	21,60	21,50	20,80	21,20	21,70	20,30	21,30	22,50	23,90	24,20	25,30	26,40	26,06	27,80	26,40	25,10	24,40	24,00	24,10	23,80	22,00
	OFT Dach	[°C]	23,40	24,30	24,00	24,10	24,30	23,10	23,50	24,00	21,50	22,10	22,80	24,00	24,60	25,20	25,70	26,70	26,40	26,50	25,30	24,10	24,80	24,20	24,50	22,80
	Luftgeschw.	[m/s]	0,223	0,205	0,397	0,327	0,258	0,185	0,305	0,424	0,456	0,620	0,254	0,408	0,333	0,855	1,377	0,335	0,452	0,498	0,511	0,567	0,392	0,294	0,376	0,408

**Tab. A-4-7 Messergebnisse im Testraum 3 – 2. Obergeschoß – Seiyun-Palast im Wintermonat Januar 2004**

Meßb.	Uhrzeit→		00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Testraum 4 – 3. Obergeschoß (AWD=32 cm)	Tr. Innentemp.	[°C]	21,33	21,33	20,95	20,57	20,57	20,57	19,81	20,57	22,86	24,40	28,31	27,52	29,90	30,71	30,71	30,31	29,10	27,91	26,34	24,79	24,40	23,63	22,86	21,71
	Außenlufttemp.	[°C]	19,40	18,00	17,60	17,60	17,40	17,00	16,00	17,20	18,40	22,60	24,80	26,00	28,70	30,31	30,71	31,52	29,50	28,60	27,20	25,20	24,00	22,20	21,40	21,20
	R. Innenluftf.	[%]	57,20	58,00	58,70	60,20	58,40	58,00	60,60	58,20	52,30	48,70	43,00	38,30	32,40	28,10	29,20	29,30	30,50	31,90	32,00	47,60	50,00	48,60	51,50	55,90
	R. Außenluftf.	[%]	61,10	65,80	64,20	66,20	64,60	62,40	68,10	61,80	53,40	48,50	45,70	41,10	32,50	27,40	28,70	27,70	30,60	32,80	45,50	50,30	53,40	53,40	56,40	59,60
	OFT OW	[°C]	21,50	20,90	21,40	21,20	20,90	20,50	20,30	20,00	21,60	21,80	22,10	26,10	26,20	27,40	28,60	28,50	28,00	26,70	25,40	24,10	24,50	23,80	23,00	21,80
	OFT NW	[°C]	21,50	21,00	20,70	20,60	20,50	20,30	19,80	19,30	21,00	21,10	21,50	25,50	26,10	27,00	27,90	28,30	28,00	26,70	25,40	23,40	23,70	23,20	23,00	21,00
	OFT WW	[°C]	21,70	21,00	20,80	20,60	20,50	20,50	20,30	20,00	21,90	21,20	21,50	25,70	26,20	27,10	28,00	28,10	27,50	26,90	25,50	23,60	23,90	23,30	23,00	21,80
	OFT SW	[°C]	21,70	21,10	21,40	21,00	20,50	20,60	20,30	20,10	21,10	21,30	22,40	26,80	26,50	27,50	28,50	28,20	28,20	26,90	25,50	24,30	23,90	23,30	23,00	21,80
	OFT Fußb.	[°C]	21,00	20,30	20,80	20,40	20,00	19,90	19,70	19,40	21,30	21,50	23,00	26,50	26,60	28,10	29,70	29,00	28,30	27,10	25,60	24,40	24,00	23,10	22,80	21,10
	OFT Dach	[°C]	21,00	21,10	20,80	20,70	20,60	19,90	19,70	19,50	20,70	21,40	21,70	25,90	25,90	26,70	27,60	27,80	27,70	26,50	25,00	23,60	23,40	23,40	22,40	21,10
	Luftgeschw.	[m/s]	0,308	0,259	0,630	0,572	0,514	0,518	0,431	0,344	0,350	0,428	0,319	0,771	0,488	0,631	0,774	0,367	0,379	1,091	0,556	1,281	0,444	0,351	0,370	0,792

**Tab. A-4-8 Messergebnisse im Testraum 4 – 3. Obergeschoß – Seiyun-Palast im Wintermonat Januar 2004**

<b>Wassergehalt der Versuchsmischung (Ausgangsmaterial) Universallehm, „UL (T=25%)“</b>					
		1. Probe	2. Probe	3. Probe	Mittelwert
		[g]	[g]	[g]	[g]
<b>Einbaufeuchte</b>					
	Messschale leer	1,10	1,09	1,10	
	Messschale voll (feucht)	105,54	138,85	141,72	
	<b>Lehmmasse Netto</b>	104,44	137,76	140,62	<b>127,61</b>
<b>Getrocknet</b>					
	Messschale leer	1,10	1,09	1,10	
	Messschale voll (trocken)	81,65	107,31	109,66	
	<b>Lehmmasse netto</b>	80,55	106,22	108,56	<b>98,44</b>
	<b>Wassergehalt in [g]</b>	23,89	31,54	32,06	<b>29,16</b>
	<b>Materialfeuchte %</b>	29,66	29,69	29,53	<b>29,63 %</b>

**Tab. A-5-1 Wassergehalt der Lehmmischung "UL (T=25%)“ im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) mit dem Ausbreitmaß 30 cm**

<b>Wassergehalt der Versuchsmischung Universallehm + Rundsand (0 –2 mm), „UL + RS (T=10%)“</b>					
		1. Probe	2. Probe	3. Probe	Mittelwert
		[g]	[g]	[g]	[g]
<b>Einbaufeuchte</b>					
	Messschale leer	1,03	1,01	1,03	
	Messschale voll (feucht)	104,34	115,12	112,13	
	<b>Lehmmasse Netto</b>	103,31	114,11	111,10	<b>109,51</b>
<b>Getrocknet</b>					
	Messschale leer	1,03	1,01	1,03	
	Messschale voll (trocken)	89,78	98,88	96,43	
	<b>Lehmmasse netto</b>	88,75	97,87	95,40	<b>94,01</b>
	<b>Wassergehalt in [g]</b>	14,56	16,24	15,70	<b>15,50</b>
	<b>Materialfeuchte %</b>	16,40	16,59	16,45	<b>16,48 %</b>

**Tab. A-5-2 Wassergehalt der Lehmmischung „UL + RS (T=10%)“ im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) mit dem Ausbreitmaß 30 cm**

<b>Wassergehalt der Versuchsmischung Universallehm + Brechsand (0–2 mm), „UL +BS (T=10%)“</b>					
		1. Probe	2. Probe	3. Probe	Mittelwert
		[g]	[g]	[g]	[g]
<b>Einbaufeuchte</b>					
	Messschale leer	0,81	0,82	0,83	
	Messschale voll (feucht)	66,31	64,79	79,54	
	<b>Lehmmasse Netto</b>	65,50	63,97	78,71	<b>69,39</b>
<b>Getrocknet</b>					
	Messschale leer	0,81	0,82	0,83	
	Messschale voll (trocken)	56,74	55,32	68,24	
	<b>Lehmmasse netto</b>	55,93	54,50	67,41	<b>59,28</b>
	<b>Wassergehalt in [g]</b>	9,57	9,47	11,30	<b>10,11</b>
	<b>Materialfeuchte %</b>	17,11	17,38	16,76	<b>17,08 %</b>

**Tab. A-5-3 Wassergehalt der Lehmischung „UL + BS (T=10%)“ im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) mit dem Ausbreitmaß 30 cm**

<b>Wassergehalt der Versuchsmischung Universallehm + Rundsand (0-2 mm) + Rundkies (2-16 mm), „UL + RS + RK (T=10%)“</b>					
		1. Probe	2. Probe	3. Probe	Mittelwert
		[g]	[g]	[g]	[g]
<b>Einbaufeuchte</b>					
	Messschale leer	0,79	0,79	0,79	
	Messschale voll (feucht)	119,72	148,77	120,93	
	<b>Lehmmasse Netto</b>	118,93	147,98	120,18	<b>129,03</b>
<b>Getrocknet</b>					
	Messschale leer	0,79	0,79	0,79	
	Messschale voll (trocken)	105,13	129,42	105,60	
	<b>Lehmmasse netto</b>	104,34	128,63	104,81	<b>112,59</b>
	<b>Wassergehalt in [g]</b>	14,59	19,35	15,37	<b>16,44</b>
	<b>Materialfeuchte %</b>	13,98	15,04	14,66	<b>14,56 %</b>

**Tab. A-5-4 Wassergehalt der Lehmischung „UL + RS + RK (T=10%)“ im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) mit dem Ausbreitmaß 30 cm**

<b>Wassergehalt der Versuchsmischung Universallehm + Brechsand (0-2 mm) + Splitt (2-16 mm), „UL + BS + Splitt (T=10%)“</b>					
		1. Probe	2. Probe	3. Probe	Mittelwert
		[g]	[g]	[g]	[g]
<b>Einbaufeuchte</b>					
	Messschale leer	0,84	0,79	0,76	
	Messschale voll (feucht)	84,33	96,31	104,48	
	<b>Lehm Masse Netto</b>	83,49	95,52	103,72	<b>94,24</b>
<b>Getrocknet</b>					
	Messschale leer	0,84	0,79	0,76	
	Messschale voll (trocken)	73,50	83,69	90,58	
	<b>Lehm Masse netto</b>	72,66	82,90	89,82	<b>81,79</b>
	<b>Wassergehalt in [g]</b>	10,83	12,62	13,90	<b>12,45</b>
	<b>Materialfeuchte %</b>	14,91	15,22	15,47	<b>15,20 %</b>

**Tab. A-5-5 Wassergehalt der Lehmmischung „UL + BS + Splitt (T=10%)“ im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) mit dem Ausbreitmaß 30 cm**

<b>Wassergehalt der Versuchsmischung Universallehm + Brechsand (0-2 mm), „UL + BS (T=15%)“</b>					
		1. Probe	2. Probe	3. Probe	Mittelwert
		[g]	[g]	[g]	[g]
<b>Einbaufeuchte</b>					
	Messschale leer	0,87	0,88	0,87	
	Messschale voll (feucht)	95,67	79,95	108,37	
	<b>Lehm Masse Netto</b>	94,80	79,07	107,50	<b>93,79</b>
<b>Getrocknet</b>					
	Messschale leer	0,87	0,88	0,87	
	Messschale voll (trocken)	79,65	66,54	90,02	
	<b>Lehm Masse netto</b>	78,78	65,66	89,15	<b>77,86</b>
	<b>Wassergehalt in [g]</b>	16,02	13,41	18,35	<b>15,93</b>
	<b>Materialfeuchte %</b>	20,34	20,42	20,58	<b>20,45 %</b>

**Tab. A-5-6 Wassergehalt der Lehmmischung „UL + BS (T=15%)“ im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) mit dem Ausbreitmaß 30 cm**

<b>Wassergehalt der Versuchsmischung Universallehm + Brechsand (0-2 mm), „UL + BS (T=5%)“</b>					
		1. Probe	2. Probe	3. Probe	Mittelwert
		[g]	[g]	[g]	[g]
<b>Einbaufeuchte</b>					
	Messschale leer	0,88	0,87	0,87	
	Messschale voll (feucht)	116,71	114,35	100,14	
	<b>Lehmmasse Netto</b>	115,53	113,48	99,27	<b>109,43</b>
<b>Getrocknet</b>					
	Messschale leer				
	Messschale voll (trocken)	102,30	100,10	87,29	
	<b>Lehmmasse netto</b>	101,42	99,23	86,42	<b>95,69</b>
	<b>Wassergehalt in [g]</b>	14,11	14,25	12,85	<b>13,74</b>
	<b>Materialfeuchte %</b>	13,91	14,36	14,87	<b>14,38 %</b>

**Tab. A-5-7 Wassergehalt der Lehmmischung „UL + BS (T=5%)“ im plastischen Zustand (Verarbeitungszustand) mit dem Ausbreitmaß 30 cm**

Probebezeichnung	nicht geschützte Probewürfel getrocknet unter winterlichen Klimabedingungen (T=29°C, rel. Feuchte=36%)					nicht geschützte Probewürfel getrocknet unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42°C, rel. Feuchte=23%)					
	W 6	W 7	W 8	W 9	W 10	S 6	S 7	S 8	S 9	S 10	
Probewürfel Nr.											
Trockenmasse [g]	11850	11818	12041	11795	11902	11965	11970	12178	12022	12139	
Abmessungen in [mm]	Xm	190,69	190,06	190,10	187,32	189,03	190,62	189,58	190,20	189,92	188,83
	Ym	189,05	188,19	188,48	188,05	190,22	190,77	191,02	190,55	190,12	189,58
	Zm	181,98	180,12	183,19	181,39	182,01	182,92	182,42	184,60	183,67	183,70
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1806,30	1834,40	1834,48	1845,98	1818,60	1798,76	1811,97	1820,22	1812,76	1845,91	
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>1827,95</b>					<b>1817,92</b>					
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]	36050	35767	35830	35225	35957	36365	36214	36243	36108	35798	
Bruchlast F [kN]	187,46	168,19	167,29	133,50	140,50	66,30	79,80	67,70	69,00	80,54	
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	5,20	4,70	4,67	3,79	3,91	1,82	2,20	1,87	1,91	2,25	
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>4,45</b>					<b>2,01</b>					

**Tab. A-5-8 Druckfestigkeitsversuch an nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials „UL (T=25%)“ getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und (WKB) bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)**

Probebezeichnung	nicht geschützte Probewürfel getrocknet unter winterlichen Klimabedingungen (T=29°C, rel. Feuchte=36%)					nicht geschützte Probewürfel getrocknet unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42°C, rel. Feuchte=23%)					
	Probewürfel Nr.	W 31	W 32	W 33	W 34	W 35	S 16	S 17	S 18	S 19	S 20
Trockenmasse [g]	14225	14240	14405	14193	14253	14415	14617	14701	14373	14443	
Abmessungen in [mm]	Xm	197,19	196,67	196,43	195,47	196,21	196,85	195,97	196,43	195,02	196,38
	Ym	195,45	196,48	195,84	195,61	196,73	195,65	194,68	196,28	196,38	196,67
	Zm	189,07	188,52	190,24	189,21	189,61	189,85	191,77	192,12	189,42	189,25
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1952,13	1954,77	1968,35	1961,82	1947,39	1971,46	1997,87	1984,68	1981,28	1976,00	
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>1956,89</b>					<b>1982,26</b>					
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]	38541	38642	38469	38236	38600	38514	38151	38555	38298	38622	
Bruchlast F [kN]	144,61	132,00	149,75	140,85	142,82	86,30	83,20	78,70	79,80	91,30	
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	3,75	3,42	3,89	3,68	3,70	2,24	2,18	2,04	2,08	2,36	
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>3,69</b>					<b>2,18</b>					

**Tab. A-5-9 Druckfestigkeitsversuch an nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) „UL + RS (T=10%)“, MV (40:60), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)**

Probebezeichnung	nicht geschützte Probewürfel getrocknet unter winterlichen Klimabedingungen (T=29°C, rel. Feuchte=36%)					nicht geschützte Probewürfel getrocknet unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42°C, rel. Feuchte=23%)					
	Probewürfel Nr.	W 26	W 27	W 28	W 29	W 30	S 26	S 27	S 28	S 29	S 30
Trockenmasse [g]	14371	14418	14322	14238	14491	14584	14432	14486	14455	14543	
Abmessungen in [mm]	Xm	194,89	196,49	195,73	195,16	196,83	195,82	196,07	197,28	196,65	196,77
	Ym	195,92	195,51	195,49	196,26	196,56	196,82	196,12	197,03	196,72	196,80
	Zm	191,03	191,16	190,17	190,08	190,90	190,32	190,42	190,97	190,60	190,77
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1970,23	1963,35	1968,25	1955,64	1962,03	1988,23	1970,97	1951,50	1960,44	1968,61	
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>1963,90</b>					<b>1967,95</b>					
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]	38183	38416	38263	38302	38689	38541	38453	38870	38685	38724	
Bruchlast F [kN]	189,00	177,23	176,00	174,27	161,00	104,60	89,80	96,40	95,20	98,20	
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	4,95	4,61	4,60	4,55	4,16	2,71	2,33	2,48	2,46	2,54	
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>4,57</b>					<b>2,50</b>					

**Tab. A-5-10 Druckfestigkeitsversuch an nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL + BS (T=10%)“, MV (40:60), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)**

Probebezeichnung	nicht geschützte Probewürfel getrocknet unter winterlichen Klimabedingungen (T=29°C, rel. Feuchte=36%)					nicht geschützte Probewürfel getrocknet unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42°C, rel. Feuchte=23%)					
	W 36	W 37	W 38	W 39	W 40	S 36	S 37	S 38	S 39	S 40	
Probewürfel Nr.	W 36	W 37	W 38	W 39	W 40	S 36	S 37	S 38	S 39	S 40	
Trockenmasse [g]	15277	15242	15233	15427	15342	15537	15477	15530	15601	15416	
Abmessungen in [mm]	Xm	196,20	195,09	196,57	196,36	196,70	197,38	196,88	197,33	197,52	196,95
	Ym	196,23	195,67	195,89	196,15	195,97	198,47	197,70	197,63	197,55	197,62
	Zm	193,66	193,77	193,45	194,48	194,05	194,27	195,02	195,42	195,55	194,60
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2048,96	2060,61	2044,97	2059,52	2051,04	2041,57	2038,92	2037,78	2044,59	2035,36	
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>2053,02</b>					<b>2039,64</b>					
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]	38500	38173	38506	38516	38547	39174	38923	38998	39020	38921	
Bruchlast F [kN]	98,21	104,97	96,84	86,10	90,89	82,20	72,30	70,90	72,80	73,10	
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,55	2,75	2,51	2,31	2,36	2,10	1,86	1,82	1,87	1,88	
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>2,50</b>					<b>1,91</b>					

**Tab. A-5-11 Druckfestigkeitsversuch an nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) und Rundkies (2-16 mm) „UL + RS + RK (T=10%)“, MV (40:21:39), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)**

Probebezeichnung	nicht geschützte Probewürfel getrocknet unter winterlichen Klimabedingungen (T=29°C, rel. Feuchte=36%)					nicht geschützte Probewürfel getrocknet unter sommerlichen Klimabedingungen (T=42°C, rel. Feuchte=23%)					
	W 41	W 42	W 43	W 44	W 45	S 46	S 47	S 48	S 49	S 50	
Probewürfel Nr.	W 41	W 42	W 43	W 44	W 45	S 46	S 47	S 48	S 49	S 50	
Trockenmasse [g]	15129	14972	14907	15119	15302	15503	15355	15433	15351	15639	
Abmessungen in [mm]	Xm	19662	19658	19590	19693	19829	198,23	197,70	198,13	197,43	198,12
	Ym	19593	19811	19635	19725	19738	198,02	197,67	197,77	197,63	198,75
	Zm	19470	19371	19378	19425	19497	194,40	195,25	195,15	195,10	196,37
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2017,04	1984,64	1999,93	2003,70	2005,29	2031,61	2012,39	2018,23	2016,57	2022,55	
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>2002,12</b>					<b>2020,27</b>					
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]	38524	38944	38465	38844	39138	39253	39079	39184	39018	39376	
Bruchlast F [kN]	123,27	116,83	113,47	106,43	112,33	85,14	78,55	88,50	84,39	94,96	
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	3,20	3,00	2,95	2,74	2,87	2,17	2,01	2,26	2,16	2,41	
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>2,95</b>					<b>2,20</b>					

**Tab. A-5-12 Druckfestigkeitsversuch an nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) und Splitt (2-16 mm) „UL + BS + Splitt (T=10%)“, MV (40:21:39), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%) und WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)**

Probebezeichnung		Referenzreihe 11, fünf Tage bei 20°C getrocknet, dann bei 60°C bis zur Massenkonstanz getrocknet				
Probewürfel Nr.		W 56	W 57	W 58	W 59	W 60
Trockenmasse [g]		14508	14441	14459	14493	14475
Abmessungen in [mm]	Xm	196,19	196,24	197,12	195,77	196,41
	Ym	196,78	196,99	196,26	197,21	196,80
	Zm	191,88	191,38	190,21	192,98	191,62
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		1958,48	1951,95	1964,91	1945,23	1954,99
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		<b>1955,11</b>				
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]		38606	38657	38687	38608	38653
Bruchlast F [kN]		162,48	182,55	163,00	145,28	158,48
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]		4,21	4,72	4,21	3,76	4,10
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		<b>4,2</b>				

**Tab. A-5-13 Druckfestigkeitsversuch an nicht geschützter Versuchsreihe (Referenzreihe: Ausgangsmaterial gemagert mit Brechsand (0-2 mm)) „UL + BS (T=10%)“, MV (40:60), fünf Tage bei 20°C getrocknet und dann bei 60°C bis zur Massenkonstanz getrocknet.**

Probebezeichnung		geschützte Probewürfel					nicht geschützte Probewürfel				
Probewürfel Nr.		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Trockenmasse [g]		12088	12097	12104	12186	11950	11965	11970	12178	12022	12139
Abmessungen in [mm]	Xm	190,92	190,40	192,22	192,65	192,88	190,62	189,58	190,20	189,92	188,83
	Ym	190,55	190,30	193,98	192,55	191,87	190,77	191,02	190,55	190,12	189,58
	Zm	182,10	182,40	181,30	181,15	181,00	182,92	182,42	184,60	183,67	183,70
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		1824,67	1830,4	1790,51	1813,47	1789,23	1798,76	1811,97	1820,22	1812,76	1845,91
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		<b>1809,66</b>					<b>1817,92</b>				
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]		36380	36233	37287	37095	37008	36365	36214	36243	36108	35798
Bruchlast F [kN]		87,27	90,49	83,07	90,49	91,29	66,30	79,80	67,70	69,00	80,54
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]		2,4	2,5	2,23	2,44	2,47	1,82	2,20	1,87	1,91	2,25
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		<b>2,41</b>					<b>2,01</b>				

**Tab. A-5-14 Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials „UL (T=25%)“ getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)**

Probebezeichnung	geschützte Probewürfel					nicht geschützte Probewürfel					
Probewürfel Nr.	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	
Trockenmasse [g]	14458	14444	14497	14415	14569	14415	14617	14701	14373	14443	
Abmessungen in [mm]	Xm	196,60	196,57	196,93	194,48	197,23	196,85	195,97	196,43	195,02	196,38
	Ym	196,38	196,42	196,95	196,95	196,60	195,65	194,68	196,28	196,38	196,67
	Zm	190,32	190,47	190,60	191,30	190,97	189,85	191,77	192,12	189,42	189,25
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1967,63	1964,07	1961,04	1967,29	1967,47	1971,46	1997,87	1984,68	1981,28	1976,00	
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>1965,50</b>					<b>1982,26</b>					
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]	38608	38610	38789	38303	38775	38514	38151	38555	38298	38622	
Bruchlast F [kN]	84,94	81,85	107,06	91,16	85,69	86,30	83,20	78,70	79,80	91,30	
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,2	2,1	2,76	2,38	2,21	2,24	2,18	2,04	2,08	2,36	
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>2,33</b>					<b>2,18</b>					

**Tab. A-5-15 Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) „UL + RS (T=10%)“, MV (40:60), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)**

Probebezeichnung	geschützte Probewürfel					nicht geschützte Probewürfel					
Probewürfel Nr.	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28	S29	S30	
Trockenmasse [g]	14320	14147	14289	14552	14568	14584	14432	14486	14455	14543	
Abmessungen in [mm]	Xm	196,60	196,60	196,68	196,90	196,30	195,82	196,07	197,28	196,65	196,77
	Ym	195,83	194,12	196,28	197,52	195,73	196,82	196,12	197,03	196,72	196,80
	Zm	189,45	190,67	190,00	191,67	192,60	190,32	190,42	190,97	190,60	190,77
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1963,29	1944,14	1948,10	1952,14	1968,64	1988,23	1970,97	1951,50	1960,44	1968,61	
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>1955,26</b>					<b>1967,95</b>					
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]	38500	38164	38604	38892	38422	38541	38453	38870	38685	38724	
Bruchlast F [kN]	110,00	102,60	95,43	106,30	100,70	104,60	89,80	96,40	95,20	98,20	
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,86	2,60	2,47	2,74	2,62	2,71	2,33	2,48	2,46	2,54	
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>2,66</b>					<b>2,50</b>					

**Tab. A-5-16 Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) „UL + BS (T=10%)“, MV (40:60), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)**

Probebezeichnung		geschützte Probewürfel					nicht geschützte Probewürfel				
Probewürfel Nr.		S31	S32	S33	S34	S35	S36	S37	S38	S39	S40
Trockenmasse [g]		15485	15480	15694	15537	15580	15537	15477	15530	15601	15416
Abmessungen in [mm]	Xm	198,10	197,00	198,10	196,82	196,97	197,38	196,88	197,33	197,52	196,95
	Ym	197,52	196,40	198,63	198,00	197,15	198,47	197,70	197,63	197,55	197,62
	Zm	195,02	195,60	196,70	195,97	196,72	194,27	195,02	195,42	195,55	194,60
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		2029,25	2045,48	2027,68	2034,43	2039,49	2041,57	2038,92	2037,78	2044,59	2035,36
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		<b>2035,27</b>					<b>2039,64</b>				
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]		39129	38691	39349	38970	38833	39174	38923	38998	39020	38921
Bruchlast F [kN]		82,19	70,63	83,01	75,94	86,67	82,20	72,30	70,90	72,80	73,10
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]		2,10	1,82	2,11	1,95	2,23	2,10	1,86	1,82	1,87	1,88
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		<b>2,04</b>					<b>1,91</b>				

**Tab. A-5-17 Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Rundsand (0-2 mm) und Rundkies (2-16 mm) „UL + RS + RK (T=10%)“, MV (40:21:39), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)**

Probebezeichnung		geschützte Probewürfel					nicht geschützte Probewürfel				
Probewürfel Nr.		S41	S42	S43	S44	S45	S46	S47	S48	S49	S50
Trockenmasse [g]		15743	15420	15379	15425	15605	15503	15355	15433	15351	15639
Abmessungen in [mm]	Xm	198,08	197,72	196,78	197,53	197,88	198,23	197,70	198,13	197,43	198,12
	Ym	199,23	197,55	197,87	197,85	198,87	198,02	197,67	197,77	197,63	198,75
	Zm	197,20	195,52	196,77	197,97	197,07	194,40	195,25	195,15	195,10	196,37
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		2022,95	2019,13	2007,28	1993,68	2012,20	2031,61	2012,39	2018,23	2016,57	2022,55
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		<b>2011,05</b>					<b>2020,27</b>				
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]		39463	39060	38937	39081	39352	39253	39079	39184	39018	39376
Bruchlast F [kN]		97,98	87,66	92,03	94,67	93,08	85,14	78,55	88,50	84,39	94,96
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]		2,48	2,24	2,36	2,42	2,36	2,17	2,01	2,26	2,16	2,41
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		<b>2,37</b>					<b>2,20</b>				

**Tab. A-5-18 Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2 mm) und Splitt (2-16 mm) „UL + BS + Splitt (T=10%)“, MV (40:21:39), getrocknet unter SKB bei (T=42°C, rel. Feuchte=23%)**

Probebezeichnung		geschützte Probewürfel					nicht geschützte Probewürfel				
Probewürfel Nr.		W 1	W 2	W 3	W 4	W 5	W 6	W 7	W 8	W 9	W 10
Trockenmasse [g]		11876	11886	11947	11888	12,029	11850	11818	12041	11795	11902
Abmessungen in [mm]	Xm	188,29	188,95	189,51	189,11	190,94	190,69	190,06	190,10	187,32	189,03
	Ym	190,46	189,07	189,79	191,27	191,42	189,05	188,19	188,48	188,05	190,22
	Zm	183,39	182,34	181,70	181,85	183,92	181,98	180,12	183,19	181,39	182,01
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		1805,77	1824,67	1828,09	1807,32	1789,44	1806,30	1834,40	1834,48	1845,98	1818,60
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		<b>1811,06</b>					<b>1827,95</b>				
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]		35862	35752	35967	36171	36550	36050	35767	35830	35225	35957
Bruchlast F [kN]		196,16	164,97	160,11	187,02	185,61	187,46	168,19	167,29	133,50	140,50
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]		5,47	4,62	4,45	5,17	5,08	5,20	4,70	4,67	3,79	3,91
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		<b>4,96</b>					<b>4,45</b>				

**Tab. A-5-19 Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials „UL (T=25%)“ getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)**

Probebezeichnung		nicht geschützte Probewürfel					geschützte Probewürfel				
Probewürfel Nr.		W 11	W 12	W 13	W 14	W 15	W 16	W 17	W 18	W 19	W 20
Trockenmasse [g]		13641	13674	13647	13732	13647	13627	13562	13621	13616	13651
Abmessungen in [mm]	Xm	193,11	194,31	194,85	193,27	195,08	193,54	194,42	192,73	195,02	194,70
	Ym	193,79	194,21	193,16	196,84	194,60	195,05	193,50	192,66	195,06	195,25
	Zm	188,53	188,64	188,12	187,84	189,00	188,55	188,18	189,42	189,60	189,60
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		1933,43	1920,86	1927,46	1921,62	1902,04	1914,51	1915,70	1936,61	1887,83	1893,95
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		<b>1921,02</b>					<b>1909,72</b>				
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]		37423	37737	37637	38043	37963	37750	37620	37131	38041	38015
Bruchlast F [kN]		202,49	165,94	213,14	194,02	185,62	178,30	190,53	236,20	226,72	186,27
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]		5,41	4,40	5,66	5,10	4,89	4,72	5,06	6,36	5,96	4,90
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		<b>5,09</b>					<b>5,40</b>				

**Tab. A-5-20 Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=15%)“, MV (60:40), getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)**

Probebezeichnung	geschützte Probewürfel					nicht geschützte Probewürfel					
Probewürfel Nr.	W 21	W 22	W 23	W 24	W 25	W 26	W 27	W 28	W 29	W 30	
Trockenmasse [g]	14418	14264	14374	14411	14374	14371	14418	14322	14238	14491	
Abmessungen in [mm]	Xm	195,54	195,76	196,71	196,13	196,70	194,89	196,49	195,73	195,16	196,83
	Ym	196,13	196,91	195,37	195,72	195,95	195,92	195,51	195,49	196,26	196,56
	Zm	192,17	189,35	190,76	191,36	192,76	191,03	191,16	190,17	190,08	190,90
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1956,32	1954,27	1960,68	1961,84	1934,69	1970,23	1963,35	1968,25	1955,64	1962,03	
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>1953,56</b>					<b>1963,90</b>					
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]	38351	38547	38431	38387	38544	38183	38416	38263	38302	38689	
Bruchlast F [kN]	160,30	170,84	216,82	183,85	182,14	189,00	177,23	176,00	174,27	161,00	
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	4,18	4,44	5,63	4,79	4,72	4,95	4,61	4,60	4,55	4,16	
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>4,75</b>					<b>4,57</b>					

**Tab. A-5-21 Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=10%)“, MV (40:60), getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)**

Probebezeichnung	geschützte Probewürfel					nicht geschützte Probewürfel					
Probewürfel Nr.	W 46	W 47	W 48	W 49	W 50	W 51	W 52	W 53	W 54	W 55	
Trockenmasse [g]	15130	14892	14944	15007	14909	15024	15046	15079	15088	15115	
Abmessungen in [mm]	Xm	197,47	197,83	197,83	198,48	197,55	198,41	198,63	197,78	197,38	199,01
	Ym	198,51	198,12	197,92	198,14	197,51	197,72	197,72	198,97	198,55	198,62
	Zm	195,16	191,62	192,69	194,64	193,30	195,08	195,67	195,18	196,27	195,04
Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1977,72	1982,86	1980,73	1960,53	1976,74	1963,17	1957,95	1963,21	1961,57	1960,59	
Mittlere Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<b>1975,72</b>					<b>1961,30</b>					
Druckfläche A [mm <sup>2</sup> ]	39200	39194	39154	39327	39018	39230	39273	39352	39190	39527	
Bruchlast F [kN]	135,19	119,08	140,54	147,39	146,66	143,53	131,40	151,11	118,33	126,86	
Druckfestigkeit $\beta_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	3,45	3,04	3,59	3,74	3,76	3,66	3,35	3,84	3,02	3,21	
Mittlere Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>3,52</b>					<b>3,42</b>					

**Tab. A-5-22 Druckfestigkeitsversuch an geschützten und nicht geschützten Versuchsreihen des Ausgangsmaterials gemagert mit Brechsand (0-2) mm „UL + BS (T=5%)“, MV (20:80), getrocknet unter WKB bei (T=29°C, rel. Feuchte=36%)**

Rechnungsgewicht des trocknen und verdichteten Lehmstoffes kg/m <sup>3</sup>	Druckfestigkeit  kg/cm <sup>2</sup>	Zulässige Druckspannungen in kg/cm <sup>2</sup>					
		Wände	Pfeiler mit einer Schlankheit h/d von				
			11	12	13	14	15
1600 bis 2200	20	3	3	2	1		
	30	4	4	3	2	1	
	40	5	5	4	3	2	1

**Tab. A-5-23 Zulässige Druckspannungen von Lehm nach DIN 18954 [42]**