

***Entwicklung von Verfahren zur Beurteilung des
Tragverhaltens von mehrschichtigen Außenwandelementen
aus Betonen unterschiedlicher baustofflicher Kennwerte***

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

*an der Fakultät Bauingenieurwesen
der
Bauhaus-Universität Weimar*

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Mirko Neumann

geboren am 27.05.1967 in Leipzig

Weimar

Gutachter : ***Prof. Dr.-Ing. habil. Günther Ackermann
Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Sahlmann
Prof. Dr. sc. techn. Jochen Quade***

Tag der Disputation : ***31.07.1997***

Vorwort

Die vorliegende Arbeit

„Entwicklung von Verfahren zur Beurteilung des Tragverhaltens von mehrschichtigen Außenwandelementen aus Betonen unterschiedlicher baustofflicher Kennwerte“

entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Referat Fassaden- und Befestigungstechnik der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig. Diese Arbeit entspricht einer überarbeiteten Fassung des Abschlußberichtes des Forschungsthemas

„Baukostensenkung durch gesicherte Schadensbeurteilung an haufwerksporigen Leichtbetonelementen der industriell errichteten Wohnbauten der ehemaligen DDR“,

wobei auf die Darstellung der wissenschaftlichen Grundlagen zur statisch-konstruktiven Beurteilung von mehrschichtigen Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefüggedichten Betondeckschichten orientiert wurde.

Das Forschungsthema wurde von folgenden Institutionen gefördert :

- Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Förderzeichen B I 5 - 80 01 94-13),
- Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst,
- Wohnungsbau-Genossenschaft Kontakt e.G., Leipzig,
- Ingenieur- und Architektengemeinschaft für Bauwesen Sahlmann & Partner GbR, Leipzig.

Aus diesem Abschlußbericht wurden Bilder, Tabellen und Textpassagen teilweise wörtlich, zum Teil in überarbeiteter Form in diese Arbeit übernommen. Insbesondere betrifft dies die Kapitel 1 - 5, das Kapitel 7 und den Anhang.

Angeregt wurde ich zu dieser Thematik von meinem Referatsleiter, Herrn Dr.-Ing. Mathias Reuschel, welcher mich während der Bearbeitung nicht nur stets unterstützte, sondern auch immer Zeit für die großen und kleinen Probleme fand. Für die Betreuung des Forschungsthemas und seine freundschaftliche Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit gilt ihm mein besonderer Dank.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Günther Ackermann, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Sahlmann und Herrn Prof. Dr. sc. techn. Jochen Quade danke ich für ihre Unterstützung und für die Übernahme der Gutachten.

Mein Dank richtet sich auch an die Kollegen und Mitarbeiter der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig und der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, welche mir durch ihren persönlichen Einsatz die Durchführung der experimentellen Untersuchungen ermöglichten.

Ebenfalls herzlich danken möchte ich an dieser Stelle meiner Familie und insbesondere meiner Frau, welche durch ihr Verständnis und ihre Unterstützung entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Weimar, August 1997

Mirko Neumann

Inhaltsverzeichnis		
1	Vorbemerkungen	1
2	Aufbau und Herstellung	5
3	Baustoffliche Beurteilung	8
3.1	Parameter der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	8
3.1.1	Stand der Technik	8
3.1.2	Versuchsdurchführung	9
3.1.2.1	Probennahme	9
3.1.2.2	Entwicklung und Anwendung von Prüfverfahren zur Ermittlung der Haufwerksporosität	10
3.1.3	Versuchsauswertung	14
3.1.3.1	Schichtstärke	14
3.1.3.2	Karbonatisierungstiefe	14
3.1.3.3	Zuschlagstoffarten	14
3.1.3.4	Druckfestigkeit	15
3.1.3.4.1	Statistische Auswertung	15
3.1.3.4.2	Einflüsse der Fertigung	21
3.1.3.5	Zugfestigkeit	22
3.1.3.6	Rohdichte	22
3.1.3.7	Zusammenhänge zwischen verschiedenen baustofflichen Parametern	24
3.1.3.7.1	Zusammenhang zwischen Rohdichte und Feststoffporosität	24
3.1.3.7.2	Zusammenhang zwischen Rohdichte und Haufwerksporosität	26
3.1.3.7.3	Zusammenhang zwischen Haufwerksporosität und Gesamtporosität	28
3.1.3.7.4	Zusammenhang zwischen Rohdichte und Druckfestigkeit	29
3.1.3.7.5	Zusammenhang zwischen Haufwerksporosität und Druckfestigkeit	30
3.1.3.7.6	Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Druckfestigkeit	31
3.2	Parameter der gefügedichten Betondeckschichten	32
3.2.1	Schichtstärke	32
3.2.2	Karbonatisierungstiefe	32

3.2.3	Festigkeit	33
3.2.3.1	Entwicklung des Verfahrens zur Festigkeitsermittlung dünn-schichtiger Betonbauteile	33
3.2.3.1.1	Stand der Technik	33
3.2.3.1.2	Probekörperabmessungen	33
3.2.3.1.3	Versuchsdurchführung	34
3.2.3.1.4	Versuchsauswertung	34
3.2.3.2	Festigkeitsspektrum	37
3.3	Zusammenfassung der baustofflichen Beurteilung	38
4	Statisch-konstruktive Beurteilung	42
4.1	Stand der Technik	42
4.2	Entwicklung und Beurteilung ingenieurtheoretischer Modelle für den Nachweis mehrschichtiger Querschnitte	45
4.2.1	Vergleichsflächenverfahren	45
4.2.2	Steifigkeitsverfahren	47
4.2.3	Finite Elemente Methode	48
4.2.4	Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte	49
4.3	Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte auf Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten	53
4.3.1	Spannungs-Verformungs-Beziehungen	53
4.3.1.1	Beton	53
4.3.1.2	Haufwerksporiger Leichtbeton	55
4.3.1.2.1	Vorschriftenwerk der TGL	55
4.3.1.2.2	Vorschriftenwerk der DIN	56
4.3.1.2.3	Europäisches Vorschriftenwerk	58
4.3.1.2.4	Durchgeführte experimentelle Untersuchungen	59
4.3.1.2.5	Annahmen für das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte	59
4.3.2	Statisches System	63
4.3.3	Lasteinleitungsproblematik	66
4.3.4	Entwicklung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung	68
4.3.4.1	Einführung der repräsentativen Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma_r$ auf der Grundlage theoretischer Annahmen	68
4.3.4.2	Experimentelle Überprüfung der getroffenen Annahmen	74

4.3.4.3	Rechnerische Ermittlung des Wertes der repräsentativen Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma_r$ auf der Grundlage der durchgeführten Versuche	80
4.3.5	Einfluß der Exzentrizität der äußeren Beanspruchung	88
4.3.6	Übersicht über die Parameter des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte und des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung	90
4.4	Vergleich der für Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten entwickelten Nachweisverfahren anhand von Beispielen	91
4.5	Anzuwendende Sicherheitskonzepte	98
4.6	Vereinfachte Nachweisverfahren auf der Grundlage des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte und des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung	102
4.7	Verbundproblematik	103
4.7.1	Einfluß des Verbundes zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	103
4.7.2	Prüfverfahren zur Bestimmung des Verbundes	109
4.8	Zusammenfassung der statisch-konstruktiven Beurteilung	114
5	Beurteilung von Verfahren zur Erhöhung der Standsicherheit	121
5.1	Veranlassung	121
5.2	Stand der Technik	122
5.3	Beurteilung von Zementleiminjektagen auf der Grundlage durchgeführter experimenteller Untersuchungen	123
5.3.1	Beurteilung in baustofflicher Hinsicht	123
5.3.2	Beurteilung in statisch-konstruktiver Hinsicht	125
5.3.3	Zusammenfassung der Beurteilung von Zementleiminjektagen	128
5.4	Zusammenfassung der Beurteilung von Verfahren zur Erhöhung der Standsicherheit	128

6	Anwendung der entwickelten Verfahren im Rahmen von Fassadensanierungsmaßnahmen	130
7	Zusammenfassung	135
7.1	Vorhandene Schädigungen von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton	135
7.2	Beurteilung der Standsicherheit von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten	136
7.2.1	Entwickelte Nachweis- und Prüfverfahren	136
7.2.2	Nachweisführung von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten	139
7.3	Vorschläge für weiterführende Arbeiten	141
8	Literaturverzeichnis	142
Anhang	Erläuterungen zu den im Ablaufplan zur tragwerksplanerischen Beurteilung von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton dargestellten Nachweis- und Prüfverfahren	

1 Vorbemerkungen

Nach Beendigung des 2. Weltkrieges war der nutzbare Wohnungsbestand in Deutschland um die Hälfte reduziert.

Auf dem Gebiet der ehemaligen DDR erfolgte der erforderliche Wiederaufbau vorrangig auf der Grundlage der Industrialisierung und Rationalisierung des Bauwesens, welche auf die Entwicklung von möglichst kompletten Elementen für Außenwände, Innenwände, Decken und Dächer ausgerichtet waren.

Während in den ab 1958 errichteten ersten Plattenwerken zunächst kleinere Beton- und Stahlbetonblöcke vorgefertigt wurden, diente die ab 1965 entwickelte zweite Generation von Plattenwerken zur Herstellung von geschoßhohen vorgefertigten Beton- und Stahlbetonelementen in Massenproduktion. Die damit entwickelte Plattenbauweise mit serienmäßiger Montage, welche von 1970 bis 1990 zur dominierenden Bauweise wurde, führte zu einer Vielzahl von sogenannten „Plattenbausiedlungen“, von denen hier stellvertretend nur Halle-Neustadt, Leipzig-Grünau, Cottbus-Sandow, Dresden-Prohlis und vor allem Berlin-Marzahn genannt werden sollen.

Im Gebäudebestand der heutigen Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin, Sachsen-Anhalt, Sachsen und Thüringen sind auf diese Weise im Laufe von rund 32 Jahren 2.100.000 Wohneinheiten in industrieller Bauweise entstanden.

Mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton wurden davon etwa 1.105.000 Wohneinheiten in einer Vielzahl von verschiedenen Gebäudetypen, welche hier vereinfachend in die in Tabelle 1.1 dargestellten Serien zusammengefaßt werden, gefertigt [12, 13, 14, 15, 16].

<i>Serie</i>	<i>Wohneinheiten</i>
Blockbauart	697.000
Typenserie P2	363.000
Streifenbauart	43.000
Typenserie WHH	2.000

Tabelle 1.1 : *Anzahl der Wohneinheiten mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton auf dem Gebiet der Länder Berlin, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen*

In den genannten Ländern sind diese Gebäude mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton in verschiedenem Umfang vorhanden, welcher Tabelle 1.2 entnommen werden kann.

<i>Land</i>	<i>Anteil an Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton [%]</i>
Sachsen	27
Brandenburg	20
Thüringen	18
Sachsen-Anhalt	18
Mecklenburg-Vorpommern	14
Berlin	3

Tabelle 1.2 : *Prozentualer Anteil der Gebäude mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton der Länder Berlin, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen*

Aufgrund der Tatsache, daß die fortschreitende Rationalisierung der Bauprozesse jedoch mit einem zunehmenden Verlust an Fertigungsqualität einherging, müssen heute entsprechend dem Bauschadensbericht des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau für Wohnbauten in Fertigteilbauweise in den neuen Bundesländern [17] für die äußere Gebäudehülle von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton folgende Aussagen getroffen werden :

- Es bestehen großflächige Makrorißstrukturen als Erscheinungsbild möglicher Standsicherheitsgefährdungen sowohl des Einzelelementes als auch des gesamten Gebäudes. Diese Risse können als Netzzrisse, aber auch als Risse in der Ebene der Platte auftreten (siehe Bild 1.1),
- Die Dichtigkeit der Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton ist nicht umfassend gegeben. Im Fugenbereich und an den Anschlußstellen der Fenster sind Feuchtigkeitsschäden vorhanden,
- Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton besitzen nur einen unzureichenden Wärmeschutz und entsprechen somit nicht den Anforderungen der 3. Wärmeschutzverordnung [118].

Eine Bewertung der Bedeutung dieser Schäden in [17] ergab, daß bei ca. 12 % der Schadensfälle ein sofortiger Handlungsbedarf besteht. Bei weiteren 70 % der Schadensfälle ist mittelfristig die Dauerhaftigkeit oder die Nutzbarkeit des Einzelbauteils bzw. des Gesamtgebäudes in Frage gestellt.

Aufgrund dieser Problemstellung sind die beiden nachfolgenden Maßnahmen für Gebäude mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton im Sinne einer umfassenden und dauerhaften Sanierung dringend erforderlich :

-
-
1. **Verbesserung des Wärme- und Feuchtigkeitsschutzes auf der Grundlage der 3. Wärmeschutzverordnung durch Anordnung einer außenliegenden Wärmedämmung mit vorgehängten hinterlüfteten Außenwandbekleidungen oder Wärmedämmverbundsystemen, mit welchen gleichzeitig eine farbliche und strukturelle Auflockerung der monotonen Gebäudeansicht erfolgen kann,**
 2. **Aufgrund zusätzlich eingetragener Beanspruchungen infolge dieser Fassadensanierungsmaßnahmen rechnerische Nachweisführung des vorhandenen Standsicherheitsniveaus für das Einzelelement und das Gesamtgebäude sowie Beurteilung der Notwendigkeit von standsicherheitserhöhenden Maßnahmen.**



Bild 1.1 : *Riß in der Ebene einer Platte aus haufwerksporigem Leichtbeton*

Um diese Maßnahmen durchführen zu können, sind grundlegende Aussagen zu den nachfolgenden Punkten als Voraussetzung für die Sanierbarkeit der Gebäude mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton erforderlich :

- Beurteilung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton im Hinblick auf die Möglichkeit der Einordnung in das derzeit gültige Vorschriftenwerk der DIN in baustofflicher Hinsicht,

- Statisch-konstruktive Beurteilung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton hinsichtlich des erforderlichen und des vorhandenen Standsicherheitsniveaus nach der Einleitung von zusätzlichen Beanspruchungen infolge von Fassadensanierungsmaßnahmen,
- Entwicklung und Beurteilung von Verfahren zur Erhöhung der Standsicherheit sowohl des Einzelelementes als auch des Gesamtgebäudes,
- Beurteilung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton im Hinblick auf die Erfüllung der 3. Wärmeschutzverordnung [118] vor und nach Fassadensanierungsmaßnahmen,
- Beurteilung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton als gesichertem Verankerungsuntergrund für die Montage von vorgehängten hinterlüfteten Außenwandbekleidungen und Wärmedämmverbundsystemen.

Während in [83] bereits eine umfassende Bearbeitung dieser Themenkomplexe erfolgte, soll im Rahmen dieser Arbeit die Problematik der **statisch-konstruktiven Beurteilung von mehrschichtigen Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten** der industriell errichteten Wohngebäude der ehemaligen DDR in wissenschaftlicher Hinsicht betrachtet werden.

Ziel der Arbeit ist es dabei,

- auf der Grundlage von genormten und zu entwickelnden Prüfverfahren die für eine statisch-konstruktive Nachweisführung relevanten baustofflichen Parameter von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten der industriell errichteten Wohngebäude der ehemaligen DDR zu beurteilen,
- die in der ursprünglichen Planung angewendeten Nachweisverfahren für diese Gebäude zu beurteilen und auf der Grundlage von theoretischen Betrachtungen und experimentellen Untersuchungen einfach handhabbare Nachweisverfahren zu entwickeln, welche das Tragverhalten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten genauer beschreiben,
- Verfahren zur Wiederherstellung bzw. Erhöhung der Standsicherheit von Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten zu beurteilen und ihre Anwendungskriterien auszuweisen.

Darüber hinaus soll über die Ergebnisse der Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Prüf- und Nachweisverfahren auf Gebäude mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten im Rahmen von durchgeführten Fassadensanierungsmaßnahmen berichtet werden.

2 Aufbau und Herstellung

Leichtbetone wurden in der ehemaligen DDR an Wohngebäuden mit industriell vorgefertigten Elementen für verschiedene, in Tabelle 2.1 dargestellte, Aufgabenbereiche verwendet.

Bezeichnung	Funktion	Gefüge	geplanter Mittelwert der Rohdichte [g/cm^3]	geplanter Mittelwert der Festigkeit [N/mm^2]
Dämmbeton	rein wärmedämmende Funktion	haufwerksporig, gefügedicht	0.8 ... 1.1	2.5 ... 3.5
Konstruktiv-wärmedämmen-der Leichtbeton	sowohl statische als auch wärmedämmende Funktion	haufwerksporig, gefügedicht	1.0 ... 1.6	3.0 ... 9.0
Konstruktions-leichtbeton	rein statische Funktion	gefügedicht	1.3 ... 1.8	12.0 ... 35.0

Tabelle 2.1 : Übersicht über die Leichtbetone hinsichtlich ihrer Verwendungsart

In Tabelle 2.2 sind die für diese Arbeit maßgebenden charakteristischen Parameter der Gebäudeserien, in denen haufwerksporiger Leichtbeton in Außenwandelementen verwendet wurde, zusammengefaßt.

Serie	maximale Geschoßanzahl	Geschoßhöhe [m]	Gebäuderaster [m]	Art der tragenden Außenwandkonstruktion
Blockbauart	5	2.80	2.40, 3.60	<ul style="list-style-type: none"> • äußere Putzschicht • mittlere Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton • innere Putzschicht
Typenserie P2 (Plattenbauweise)	11	2.80	2.40, 3.60	<ul style="list-style-type: none"> • äußere gefügedichte Betondeckschicht • mittlere Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton • innere gefügedichte Betondeckschicht • teilweise verputzte Dämmschicht aus Holzwolle-Leichtbauplatten oder Polystyrol
Streifenbauart	5	2.80	2.40, 3.60	<ul style="list-style-type: none"> • äußere Putzschicht • mittlere Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton • innere Putzschicht
Typenserie WHH (Plattenbauweise)	25	2.80	2.40, 3.60	<ul style="list-style-type: none"> • äußere gefügedichte Betondeckschicht • mittlere Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton • innere gefügedichte Betondeckschicht • teilweise verputzte Dämmschicht aus Holzwolle-Leichtbauplatten oder Polystyrol

Tabelle 2.2 : Parameter der Gebäudeserien, in denen haufwerksporiger Leichtbeton in Außenwandelementen verwendet wurde

Zu erkennen ist, daß insbesondere bei den Gebäuden in Plattenbauweise, welche hohe Beanspruchungen infolge großer Geschoßanzahl abzutragen haben, als innerer und äußerer Abschluß der Außenwandelemente gefügedichtete Betondeckschichten vorhanden sind. Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichteten Betondeckschichten, welche im Rahmen dieser Arbeit vorrangig betrachtet werden sollen, besitzen somit den in Bild 2.1 dargestellten Schichtenaufbau.

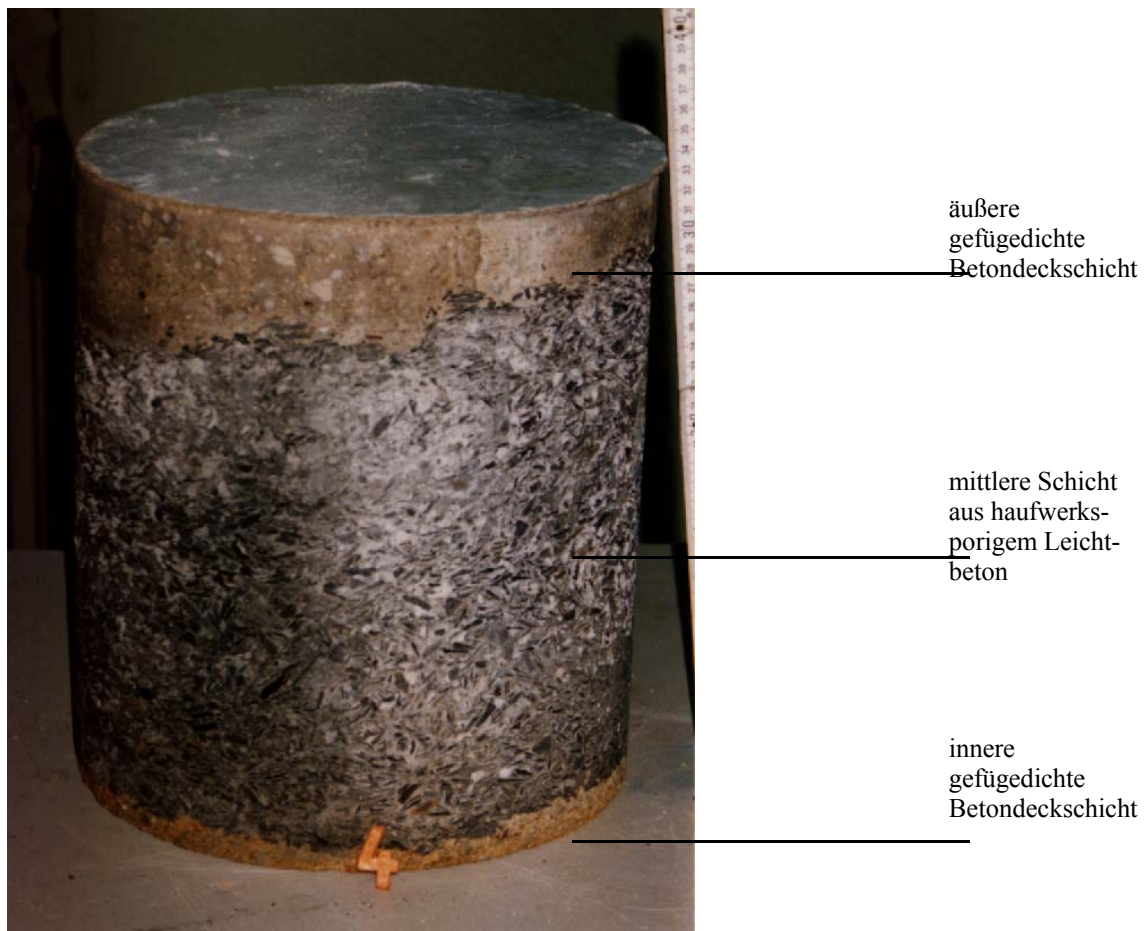


Bild 2.1 : *Schichtenaufbau von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichteten Betondeckschichten*

Unabhängig von ihrer Funktion wurden Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichteten Betondeckschichten lediglich mit einer konstruktiven Bewehrung hergestellt. Diese Bewehrung hatte folgende Aufgaben :

- Übertragung der Elementlasten bei Transport und Montage,
- Kantenschutz,

-
-
- Aufnahme von Beanspruchungen durch Schwinden des haufwerksporigen Leichtbetons und der gefügedichten Betondeckschichten,
 - Herstellen einer festen Verbindung zwischen verschiedenen Elementen durch Verschweißen und zur Wahrnehmung der Ringankerfunktion.

Die Anordnung dieser Bewehrung ist vielfältig und reicht von einer Netzbewehrung bis hin zu einzelnen Bewehrungsstäben, wie [74] entnommen werden kann.

Da der haufwerksporige Leichtbeton aufgrund seiner Gefügestruktur keinen passiven Korrosionsschutz für die Bewehrungslagen garantieren kann, wurde gefordert, diese in einem Tauchbad vorzubehandeln. In [74] durchgeführte Bestandsuntersuchungen haben jedoch gezeigt, daß diese Maßnahme nicht immer durchgeführt wurde.

Die Herstellung der Elemente erfolgte liegend sowohl in Negativfertigung (äußere gefügedichte Betondeckschicht unten) als auch in Positivfertigung (äußere gefügedichte Betondeckschicht oben). Der Verbund der einzelnen Schichten wurde durch ein Verzahnen der Zuschlagstoffe bei einem Betoniervorgang „naß in naß“ erreicht. Die Verdichtung des Betons der gefügedichten Betondeckschichten sowie des haufwerksporigen Leichtbetons erfolgte durch unten und seitlich angebrachte Außenrüttler.

Zum Erreichen eines höheren Formenumschlages wurde zum Teil eine Wärmebehandlung zur Verkürzung der Abbindezeit vorgenommen.

3 Baustoffliche Beurteilung

3.1 Parameter der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton

3.1.1 Stand der Technik

Grundlage für die Planung und Fertigung von haufwerksporigem Leichtbeton in baustofflicher Hinsicht waren auf dem Gebiet der ehemaligen DDR die in Tabelle 3.1 aufgeführten Vorschriften.

Vorschrift	Gültigkeitszeitraum
TGL 0 - 1045; Bauwerke aus Stahlbeton, Projektierung und Ausführung [107]	04/63 - 12/69
TGL 0 - 1048; Betonprüfungen [109]	04/63 - 12/69
TGL 21094; Prüfung des erhärteten Betons, Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit [111]	01/70 - 12/79
TGL 21096; Prüfung des Leichtbetons, Frischbeton, Erhärteter Beton [112]	01/74 - 12/79
DAMW-VW 968; Nachweis der Druckfestigkeit bei Beton [18]	01/70 - 12/79
TGL 33411; Beton und Leichtbeton [116]	01/80 - 09/90
TGL 33433; Prüfung des erhärteten Betons [117]	01/80 - 09/90

Tabelle 3.1 : *Vorschriften für die Planung und Fertigung von haufwerksporigem Leichtbeton in baustofflicher Hinsicht in der ehemaligen DDR*

In diesen Vorschriften waren auf unterschiedlichen statistischen Zusammenhängen beruhende Nachweise zu führen.

Das in TGL 0-1045 [107] zunächst angewendete Verfahren des Nachweises des Mittelwertes der Festigkeit zur Einordnung in eine Betonfestigkeitsklasse wurde in den darauffolgenden Vorschriften durch Nachweise von Fraktilwerten (2.3%-Fraktilwert nach Studentverteilung in DAMW-VW 968 [18] und 5%-Fraktilwert nach Normalverteilung in TGL 33411 [116]) ersetzt. Ein Nachweis der Mindest- oder Höchstrohddichte des Betons oder der Zuschlagstoffe war nicht zu führen. Die Mittelwerte der Rohdichten sollten nach TGL 33411 [116] in einem Spektrum von $\rho_r = 0.66 \dots 1.80 \text{ g/cm}^3$ liegen.

Die Grundlage für die Einordnung eines haufwerksporigen Leichtbetons in eine Betonfestigkeitsklasse nach der heute gültigen DIN 4232 [23] bilden die Serienfestigkeit β_{ws} (Mittelwert aller geprüften Festigkeiten) und die Nennfestigkeit β_{wn} (kleinster Einzelwert).

Da nach 1970, also in der hauptsächlichen Entstehungszeit von Gebäuden aus haufwerksporigem Leichtbeton, die Einordnung der Leichtbetonfestigkeitsklassen nach DAMW-VW 968 [18] und TGL 33411 [116] auf grundsätzlich anderen statistischen Zusammenhängen beruhte und darüber hinaus die Festigkeitskennwerte für eine Zuordnung in die einzelnen Betonfestigkeitsklassen differieren (siehe Tabelle 4.2), ist eine globale Übertragung der geplanten Festigkeiten auf das derzeit gültige Vorschriftenwerk nicht gegeben.

Eine Klassifizierung des haufwerksporigen Leichtbetons auf der Grundlage einer Zuordnung der ursprünglichen Planung zugrundeliegenden Vorschriften zum Vorschriftenwerk der DIN ist aus diesem Grund nicht möglich.

Möglich ist dagegen eine Angabe von Parametern auf der Grundlage des Vorschriftenwerkes der DIN (wie z.B. Dichte und Festigkeit). Allerdings besitzt der haufwerksporige Leichtbeton Charakteristiken, welche nicht durch genormte Prüfungen ermittelt werden können. Für diese Parameter (z.B. Haufwerksporosität) sind geeignete Prüfmethode zu entwickeln und anzuwenden.

3.1.2 Versuchsdurchführung

3.1.2.1 Probennahme

Aufgrund der Tatsache, daß unbekannte Bauwerksbetone zerstörungsarm nur mit Hilfe einer Bohrkernentnahme beurteilt werden können [121], wurden an 110 Objekten der Länder Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern in Vorbereitung von Fassadensanierungsmaßnahmen im Zeitraum von 1992...1994 insgesamt 741 zylindrische Bohrkerne des Durchmessers 100 mm zum Erhalt eines geeigneten Stichprobenumfangs der regional unterschiedlichen haufwerksporigen Leichtbetone entnommen [74, 93]. Die Entnahme der Bohrkerne erfolgte mit einem Kernbohrgerät Hydrostress HCCB-4/000.

Die entnommenen Kerne wiesen im Regelfall folgenden Schichtenaufbau auf :

- äußere gefügedichte Betondeckschicht,
- mittlere Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton,
- innere gefügedichte Betondeckschicht.

Im Labor wurden die Schichtstärke, die vorhandenen Zuschlagstoffe und die Karbonatisierungstiefe durch Vermessung und augenscheinliche Betrachtung an allen entnommenen Prüflingen ermittelt.

Weiterhin wurde unter Normbedingungen die Bestimmung der Rohdichte nach DIN 52102 [25] und der Druckfestigkeit nach DIN 1048 [20] durchgeführt.

An 11 entnommenen Prüfkernen des Durchmessers 100 mm wurde in [77] die Zugfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit ermittelt.

Da nach dem Vorschriftenwerk der DIN keine weiteren charakteristischen Parameter bestimmbar sind, wurde als weiterer spezifischer Parameter die Haufwerksporosität eingeführt. Für diesen Parameter liegen für seine nachträgliche Bestimmung in keinem Vorschriftenwerk genormte Prüfverfahren vor. Es bestand somit die Notwendigkeit der Entwicklung eines geeigneten Prüfverfahrens.

3.1.2.2 Entwicklung und Anwendung von Prüfverfahren zur Ermittlung der Haufwerksporosität

Der haufwerksporige Leichtbeton besteht im wesentlichen aus den drei Bestandteilen Leichtzuschlagstoffe, Zementstein und Haufwerksporen. Da der Anteil des Gefüges, welcher aus Feststoffen gebildet wird, eine Eigenporosität besitzt, die sich mit den Haufwerksporen zur Gesamtporosität vermischt, ist es im Prinzip auch möglich, die Eigenporosität der Feststoffe und ihre Reindichte zur Ermittlung des Volumenanteils der Haufwerksporen zu bestimmen. Dies ist notwendig, falls sich eine direkte Bestimmung der Haufwerksporosität als nicht möglich erweisen sollte.

Es wurden vier voneinander unabhängige Verfahren entwickelt bzw. angewendet, um die erhaltenen Ergebnisse vergleichen zu können.

Verfahren 1 : Tauchverfahren. Die Kerne wurden bis zur Massekonstanz getrocknet und danach in einem Tauchbad in eine Flüssigkeit (hier Wasser) gedrückt. Die verdrängte Flüssigkeit beim Eintauchen kann als Maß für den Volumenanteil der Feststoffe mit den in ihnen enthaltenen Poren angesehen werden. Anschließend wurden die Kerne so lange in der Flüssigkeit gelagert, bis auch die im Zementstein und in den Leichtzuschlagstoffen enthaltenen Poren vollständig gefüllt waren. Die aufgesaugte Flüssigkeitsmenge entspricht dem Porenvolumen der Feststoffe.

Verfahren 2 : Flüssigkeitsaufnahmeverfahren. Die Kerne wurden bis zur Massekonstanz getrocknet und sowohl Masse als auch Volumen bestimmt. Danach wurden sie in einem Tauchbad so lange in einer Flüssigkeit (hier ebenfalls Wasser) gelagert, bis keine Flüssigkeit mehr von den Feststoffen aufgenommen wurde. Anschließend wurde die Flüssigkeit aus den Haufwerksporen durch Austropfenlassen entfernt und danach die Dichte in dem Zustand bestimmt, in dem alle Feststoffe mit Flüssigkeit gesättigt waren. Gleichzeitig wurde die Reindichte der Feststoffe ermittelt. Aus den somit experimentell bestimmten Größen lassen sich Haufwerksporosität und Feststoffporosität berechnen.

Für die Haufwerksporosität gilt :

$$HP = V_{HP} / V * 100 \quad [\text{Vol-}\%] \quad (3.1)$$

mit

$$V_{HP} = V - V_{FS} - V_{FSP} \quad [\text{cm}^3] \quad (3.2)$$

Weiterhin bestehen die Beziehungen :

$$\rho_{\text{gesättigt}} = m_{\text{gesättigt}} / V \quad [\text{g/cm}^3] \quad (3.3)$$

$$m_{F,\text{aufgesaugt}} = m_{\text{gesättigt}} - m \quad [\text{g}] \quad (3.4)$$

Da gilt

$$\rho_F \quad (3.5) \quad = \quad m_{F,\text{aufgesaugt}} / V_{FSP} \quad [\text{g/cm}^3]$$

erhält man durch Umformung der Gleichungen (3.3), (3.4) und (3.5)

$$V_{FS} \quad = \quad m / \rho_0 \quad [\text{cm}^3] \quad (3.6)$$

$$V_{FSP} \quad = \quad (m_{\text{gesättigt}} - m) / \rho_F \quad [\text{cm}^3] \quad (3.7)$$

Damit ergibt sich das Porenvolumen der Haufwerksporen zu

$$V_{HP} \quad = \quad V - m / \rho_0 - (m_{\text{gesättigt}} - m) / \rho_F \quad [\text{cm}^3] \quad (3.8)$$

und mit

$$\rho_r \quad (3.9) \quad = \quad m / V \quad [\text{g/cm}^3]$$

und Gleichung (3.3) kann daraus abgeleitet werden

$$HP \quad = \quad (1 - \rho_r / \rho_0 - (\rho_{\text{gesättigt}} - \rho_r) / \rho_F) * 100 \quad [\text{Vol-\%}] \quad (3.10)$$

$$FS \quad = \quad \rho_r / \rho_0 * 100 \quad [\text{Vol-\%}] \quad (3.11)$$

$$FSP \quad = \quad (\rho_{\text{gesättigt}} - \rho_r) / \rho_F * 100 \quad [\text{Vol-\%}] \quad (3.12)$$

$$P \quad = \quad (1 - \rho_r / \rho_0) * 100 \quad [\text{Vol-\%}] \quad (3.13)$$

Für die Feststoffporosität gilt :

$$P_{FS} \quad = \quad V_{FSP} / (V_{FS} + V_{FSP}) \quad [\text{Vol-\%}] \quad (3.14)$$

und mit den Gleichungen (3.3), (3.6), (3.7) und (3.9) ergibt sich

$$P_{FS} \quad = \quad 1 / (\rho_F * \rho_r / (\rho_0 * (\rho_{\text{gesättigt}} - \rho_r)) + 1) * 100 \quad [\text{Vol-\%}] \quad (3.15)$$

Es bedeuten :

P	:	Gesamtporosität, bezogen auf das Gesamtvolumen	[Vol-\%]
HP	:	Haufwerkporosität, bezogen auf das Gesamtvolumen	[Vol-\%]
FSP	:	Anteil der Feststoffporen, bezogen auf das Gesamtvolumen	[Vol-\%]
FS	:	Anteil der Feststoffe, bezogen auf das Gesamtvolumen	[Vol-\%]
P _{FS}	:	Feststoffporosität, bezogen auf das Volumen der	

		Feststoffe	[Vol-%]
m	:	Masse des Probekörpers = Masse der Feststoffe	[g]
$m_{\text{gesättigt}}$:	Masse des Probekörpers, Feststoffe mit Flüssigkeit gesättigt	[g]
$m_{\text{F,aufgesaugt}}$:	Masse der aufgesaugten Flüssigkeit	[g]
V	:	Volumen des Probekörpers	[cm ³]
V_{HP}	:	Volumen der Haufwerksporen	[cm ³]
V_{FS}	:	Volumen der Feststoffe	[cm ³]
V_{FSP}	:	Volumen der Feststoffporen	[cm ³]
ρ_r	:	Rohdichte des Probekörpers	[g/cm ³]
ρ_0	:	Reindichte der Feststoffe = Reindichte des Probekörpers	[g/cm ³]
$\rho_{\text{gesättigt}}$:	Dichte des Probekörpers, Feststoffe mit Flüssigkeit gesättigt	[g/cm ³]
ρ_{F}	:	Dichte der Flüssigkeit	[g/cm ³]

Verfahren 3 : Flächenermittlungsverfahren. Die angeschnittenen Poren der horizontalen Schnittfläche der Kerne wurden mit einem Kontrastmittel gefüllt und danach in das Bildverarbeitungssystem VIDAS RT eingescannt. Im Bildverarbeitungssystem wurden dann die Flächenanteile unterhalb einer bestimmten Größe eliminiert (Poren im Feststoffanteil) und im weiteren nicht mit betrachtet. Bild 3.1 verdeutlicht diesen Zusammenhang.



a)
b)

Bild 3.1 : a) mit Kontrastmittel gefüllte Schnittfläche eines Kernes
b) eingescannte Schnittfläche nach dem Eliminieren der Feststoffporen

Die verbleibenden kontrastierten Flächenanteile wurden programmintern ermittelt und entsprechen dem Anteil der Haufwerksporen.

Verfahren 4 : Quecksilberdruckporosimetrie. Notwendige Voraussetzungen für eine hinreichend genaue Erfassung der Haufwerksporen mittels Quecksilberdruckporosimetrie ist die Verwendung eines ausreichend großen Probengefäßes, so

daß eine repräsentative Probe untersucht werden kann. Die Haufwerksporen wurden zunächst vollständig mit Quecksilber gefüllt und deren Volumen und damit die Haufwerksporosität ermittelt. Im Anschluß daran wurde weiteres Quecksilber in die Poren der Zuschlagstoffe und des

Zementsteins gedrückt und somit deren Volumen ermittelt. Im Ergebnis dieser Untersuchung ist es außerdem möglich, eine Porengrößenverteilung auszuweisen.

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aller vier Verfahren lieferte die Erkenntnis, daß das Tauchverfahren und das Flächenermittlungsverfahren für die Bestimmung der Haufwerksporosität als ungeeignet angesehen werden müssen.

Die Bestimmung des Porenraumes mit dem Tauchverfahren muß als zu ungenau eingeschätzt werden, da eine exakte Bestimmung der in die Haufwerksporen eingedrungenen bzw. aufgesaugten Flüssigkeit über eine Volumenmeßmethode nicht möglich ist.

Bei Verwendung des Flüssigkeitsaufnahmeverfahrens werden dagegen zur Bestimmung der Volumina nur die genau meßbaren Massen und bekannte oder nach genormten Prüfverfahren ermittelbare Dichten herangezogen. Der einfließende Fehler kann gegenüber dem Tauchverfahren als minimal angesehen werden.

Bei dem Flächenermittlungsverfahren werden infolge der willkürlich entstehenden Schnittflächen beim Herausschneiden der Probekörper die Haufwerksporen nur teilweise und auch nur flächenhaft erfaßt. Daher liefert es im Vergleich zum Tauchverfahren und zum Flüssigkeitsaufnahmeverfahren, bei denen die Poren in ihrem Volumen erfaßt werden, grundsätzlich fehlerbehaftete Ergebnisse. Der einfließende Fehler kann zwar durch eine entsprechend große Anzahl von Schnittflächen eliminiert werden, allerdings ist diese Methode gegenüber den beiden anderen Verfahren mit einem erheblich größeren Aufwand verbunden.

Obwohl die Quecksilberdruckporosimetrie die genauesten Ergebnisse liefert, ist sie nur sehr aufwendig handhabbar und für eine Bestimmung der Haufwerksporosität eines größeren Probenumfangs nur bedingt geeignet. In [65] durchgeführte Vergleichsuntersuchungen zur Ermittlung der Haufwerksporosität mittels Quecksilberdruckporosimetrie weisen grundsätzlich vergleichbare Ergebnisse zu den mittels Flüssigkeitsaufnahmeverfahren erhaltenen Haufwerksporositäten aus.

Aus den angegebenen Gründen wurde bei den weiteren Betrachtungen auf das entwickelte *Flüssigkeitsaufnahmeverfahren* zurückgegriffen.

3.1.3 Versuchsauswertung

3.1.3.1 Schichtstärken

In Auswertung der durchgeführten Untersuchungen [74, 93] wurde festgestellt, daß die Schichtstärke des haufwerksporigen Leichtbetons innerhalb der Elemente eines Objektes, aber auch bei verschiedenen Objekten in einem Bereich von 150 ... 290 mm liegt. Zurückführbar ist dies auf die Art der Fertigung. Infolge des Betonierens der einzelnen Schichten „naß in naß“ konnte, wie

in Bild 2.1 erkennbar, die Maßhaltigkeit der Schichtstärken nicht gewährleistet werden. Teilweise erfolgte eine Verschmierung der Schichtgrenzen.

3.1.3.2 Karbonatisierungstiefe

Aufgrund der Tatsache, daß die Luft den haufwerksporigen Leichtbeton ungehindert durchströmen kann, hängt die Tiefe der bereits erfolgten Karbonatisierung in entscheidendem Maße von der Dichtigkeit der inneren und äußeren gefügedichten Betondeckschicht ab. Ermittelt wurden an den entnommenen Kernen im haufwerksporigen Leichtbeton stark schwankende Karbonatisierungstiefen von 0 ... 40 mm, wobei aufgrund von Rissen in den Betondeckschichten zum Teil auch durchgängige Karbonatisierungen des haufwerksporigen Leichtbetons festgestellt wurden.

Nicht vorbehandelte Bewehrungsstähle sind somit aufgrund der fehlenden Alkalität der Umgebung korrosionsgefährdet.

3.1.3.3 Zuschlagstoffarten

Insgesamt konnten in [74, 93] vier Arten von Zuschlagstoffen diagnostiziert werden, welche in der in Bild 3.2 dargestellten Häufigkeit auftraten.



Bild 3.2 : Häufigkeit der diagnostizierten Objekte in Abhängigkeit von der Zuschlagstoffart

In Bild 3.3 a) .. d) sind typische Bohrkerne dieser vier Kategorien dargestellt. Es muß angemerkt werden, daß alle Hauptzuschlagstoffarten teilweise mit Hüttenbims vermischt wurden. Darüber hinaus schwankt die Größe der Zuschlagstoffe sowohl beim Vergleich der Bohrkerne verschiedener Objekte als auch innerhalb eines Bohrernes.

Während Leichtbetone mit Zuschlagstoffen aus Blähton, Blähschiefer und Ziegelsplitt aufgrund der relativ großformatigen Zuschlagstoffe und des fehlenden Feinkornanteils Haufwerksporen aufweisen, ist Leichtbeton aus Hochofenschlacke eher zu den gefügedichten Leichtbetonen zu rechnen.

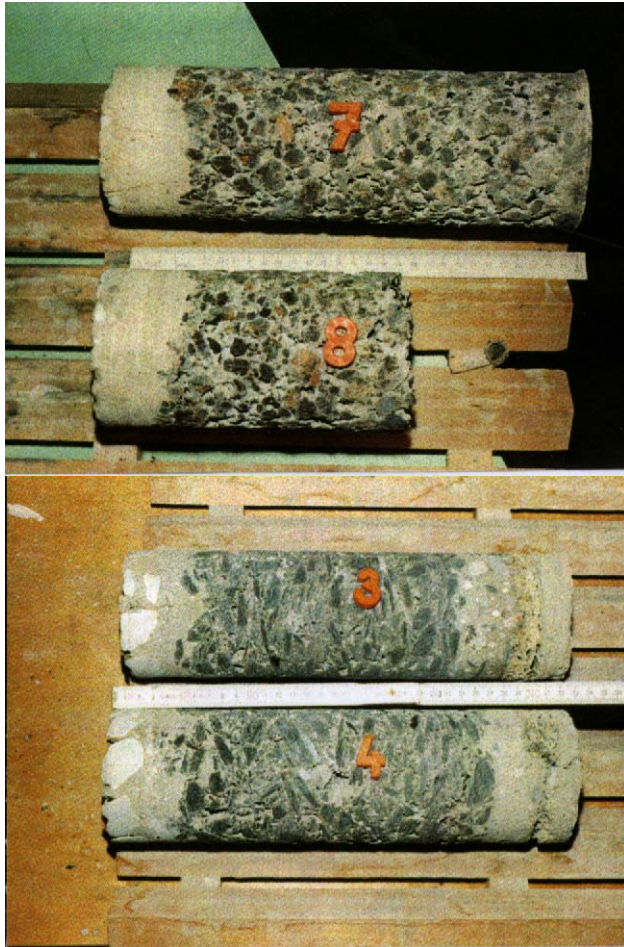


Bild 3.3 a) : Hauptzuschlagstoff Blähton

Bild 3.3 b) : Hauptzuschlagstoff Blähschiefer



Bild 3.3 c) : Hauptzuschlagstoff Ziegelsplitt
Bild 3.3 d) : Hauptzuschlagstoff Hochofenschlacke

3.1.3.4 Druckfestigkeit

3.1.3.4.1 Statistische Auswertung

In Auswertung der in [74, 93] ermittelten Druckfestigkeit kann die in Bild 3.4 dargestellte statistische Verteilung angegeben werden.

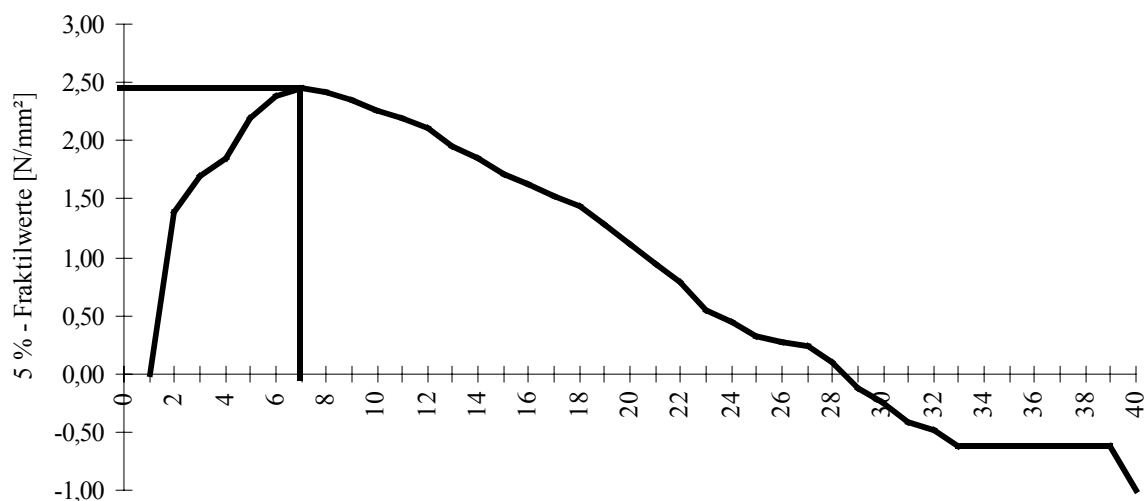
Bild 3.4 : Häufigkeitsverteilung der Druckfestigkeit der entnommenen Kerne

Legt man eine Normalverteilung, wie sie nach TGL 33411 [116] bei der ursprünglichen Planung und Herstellung vorausgesetzt wurde, einer weiteren statistischen Auswertung zugrunde, erhält man folgende Parameter :

Mittelwert	:	9.40	N/mm ²
Standardabweichung	:	6.133	N/mm ²
unterer 5%-Fraktilwert	:	- 1.00	N/mm ²
oberer 5%-Fraktilwert	:	19.50	N/mm ²

Aufgrund der enormen Streuung der Werte tritt bei vorausgesetzter Normalverteilung der ermittelten Druckfestigkeiten der Fall ein, daß die ermittelten hohen Druckfestigkeiten den für eine statistische Auswertung der Druckfestigkeit bedeutsamen unteren 5%-Fraktilwert in sehr niedrige oder sogar negative Druckfestigkeitsbereiche drücken. Werden die hohen Druckfestigkeiten bei der statistischen Auswertung dagegen unberücksichtigt gelassen, kann der untere 5%-Fraktilwert rechnerisch angehoben werden.

Bild 3.5 zeigt, daß durch Eliminierung der Druckfestigkeiten, welche über dem Grenzwert von 7.0 N/mm² liegen, ein maximaler unterer 5%-Fraktilwert von 2.45 N/mm² nachweisbar wird. Grundlage der Ermittlung dieser 5%-Fraktilwerte ist die Anwendung von k_c -Faktoren bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 90 % nach [86], welche die tatsächliche Anzahl der Stichproben einer Grundgesamtheit widerspiegeln.



Für die statistische Auswertung berücksichtigte Maximalwerte der Festigkeit [N/mm²]

Bild 3.5 : *Theoretische Anhebung des unteren 5%-Fraktilwertes bei der statistischen Auswertung der ermittelten Druckfestigkeit bei Betrachtung aller Objekte und Annahme einer Normalverteilung*

Die Gesamtheit aller Gebäude kann damit nach TGL 33411 [116] bei nicht differenzierter Betrachtung aller Einzelgebäude einer untersten Betonfestigkeitsklasse von LBk 2.5 nicht zugeordnet werden, da der maximal erreichbare 5%-Fraktilwert von 2.45 N/mm² unterhalb des nach TGL geforderten 5%-Fraktilwertes von 2.5 N/mm² liegt. Eine Zuordnung zu DAMW-VW 968

[18] ist ebenfalls nicht möglich, da hier der geforderte 2.3%-Fraktilwert von 3.2 N/mm^2 zur Einordnung in eine Betongüte von LB 40 ebenfalls unterschritten wird (siehe Tabelle 4.2).

Eine generelle Zuordnung des haufwerksporigen Leichtbetons aller Gebäude zur Betonfestigkeitsklasse LB 2 nach DIN 4232 [23] ist, obwohl der geforderte 5%-Fraktilwert von 2.0 N/mm^2 erreicht wird, aufgrund nachfolgender Tatsachen dennoch ebenfalls nicht möglich :

Voraussetzung für die Einordnung des haufwerksporigen Leichtbetons in eine Betonfestigkeitsklasse durch Nachweis eines unteren 5%-Fraktilwertes ist, daß alle diesem haufwerksporigen Leichtbeton entnommenen Probekörper mindestens demselben Gebäude angehören. Nur dann ist eine Vernachlässigung der Druckfestigkeiten unterhalb des unteren 5%-Fraktilwertes gerechtfertigt, da diese durch Lastumlagerungen und die damit verbundene veränderte Lastabtragung sowohl innerhalb des betreffenden Bauteils als auch des gesamten Bauwerkes kompensiert werden können.

Handelt es sich jedoch wie im vorliegenden Fall um Probekörper verschiedener Gebäude, können die ermittelten Druckfestigkeiten nicht gemeinsam unter Zugrundelegung des oben angewendeten statistischen Modells ausgewertet werden.

Da, wie in Bild 3.6 dargestellt, Gebäude sowohl mit insgesamt sehr geringen als auch mit sehr hohen Festigkeiten existieren, würde man bei Anwendung der Normalverteilung über alle untersuchten Gebäude voraussetzen, daß die Lastreserven eines Gebäudes mit hoher Festigkeit von einem Gebäude mit geringerer Festigkeit ausgenutzt werden können.

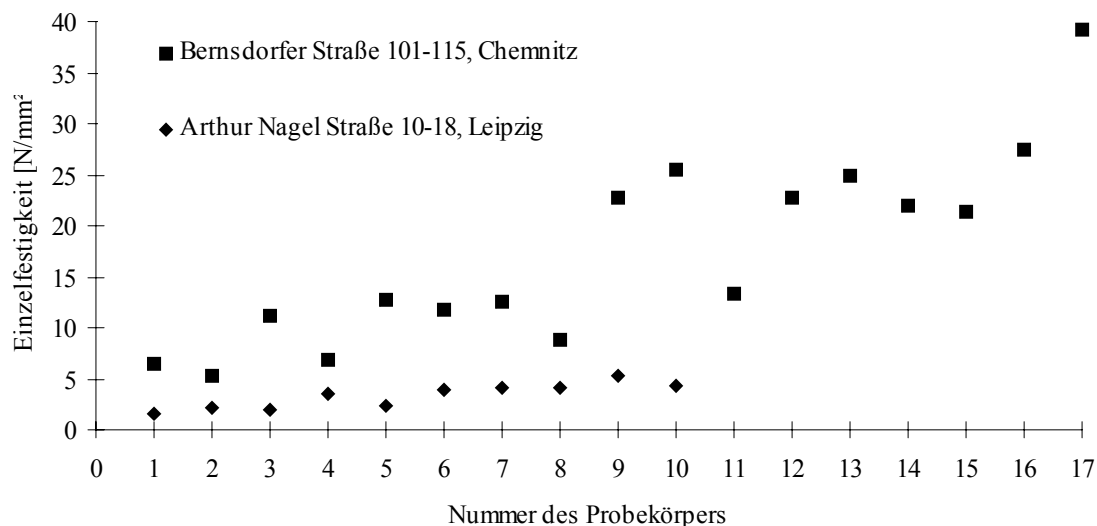


Bild 3.6 : Festigkeitsbereiche zweier unterschiedlicher Gebäude

Erforderlich ist demzufolge die Anwendung eines differenzierten statistischen Modells, welches die spezifischen Gegebenheiten der untersuchten Gebäude und ihre Anzahl einfließen läßt.

Da ein solches Verfahren aus der Literatur nicht bekannt ist, kann an dieser Stelle keine globale Aussage zu einer vorhandenen Festigkeit der Einzelbauteile bzw. der betreffenden Gebäude getroffen werden. Es ist im Gegenteil dazu unbedingt erforderlich, in jedem Einzelfall eine bauwerksdiagnostische Untersuchung durchzuführen, um die vorliegenden gebäudespezifischen stofflichen und geometrischen Parameter zu erfassen, welche, wie in Bild 3.7 dargestellt, bezüglich der Druckfestigkeit am Einzelbauwerk nach DIN 4232 [23] zwischen < LB 2 und LB 8 liegen können.

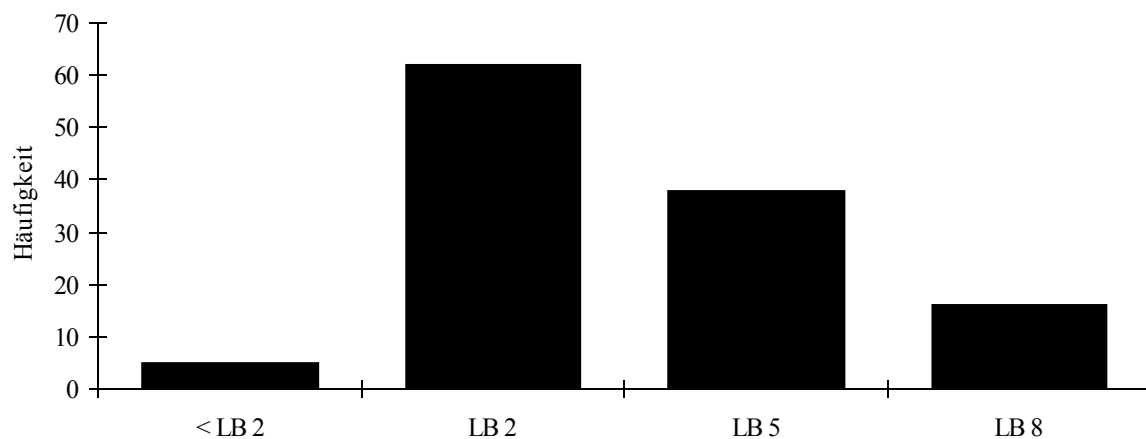


Bild 3.7 : Häufigkeit der diagnostizierten Objekte in Abhängigkeit von der Betonfestigkeitsklasse nach DIN 4232 [23]

Erfolgt dagegen für die Einzelobjekte eine statistische Auswertung auf der Grundlage des Nachweises des unteren 5%-Fraktilwertes bei Annahme einer Normalverteilung, wie er bei der Herstellung nach TGL 33411 [116] gefordert wurde, ist eine Zuordnung zu dem Vorschriftenwerk der DIN auch für die Einzelobjekte in der Regel nicht möglich.

Wie in Bild 3.8 erkennbar, wird aufgrund der großen vorhandenen Streuung auch hier der 5%-Fraktilwert von 2.0 N/mm² zum Teil deutlich unterschritten.

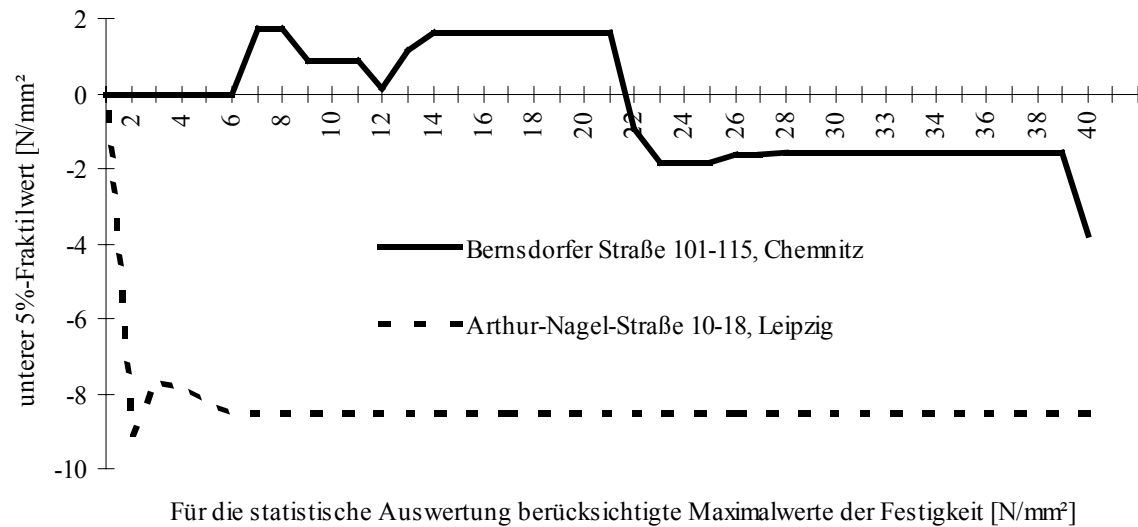


Bild 3.8 : *Theoretische Anhebung des unteren 5%-Fraktilewertes bei der statistischen Auswertung der ermittelten Druckfestigkeit bei Betrachtung zweier Objekte*

Aufgrund der Tatsache, daß negative Fraktilewerte im mathematischen Sinne zwar berechenbar sind, im physikalischen Sinne jedoch nicht existieren können, muß eine andere Art der Herangehensweise an eine statistische Auswertung gefunden werden. In [98] wird daher vorgeschlagen, für Betone geringer Festigkeit eine logarithmische Normalverteilung zugrunde zu legen, da diese Verteilungsfunktion keine negativen Fraktilewerte besitzt.

Da auch die in Bild 3.4 dargestellte Häufigkeitsverteilung des haufwerksporigen Leichtbetons eher einer logarithmischen Normalverteilung als einer Normalverteilung entspricht, erscheint somit nachfolgende stufenweise Vorgehensweise der statistischen Auswertung für eine Einordnung eines haufwerksporigen Leichtbetons in eine Betonfestigkeitsklasse nach DIN 4232 [23] sinnvoll :

Stufe 1 : Einordnung des haufwerksporigen Leichtbetons unter Einhaltung der Nennfestigkeit und der Serienfestigkeit nach Tabelle 3.2,

Stufe 2 : Einordnung des haufwerksporigen Leichtbetons unter Einhaltung eines 5%-Fraktilewertes nach Tabelle 3.2 unter Annahme folgender Verteilungen [61] :

- Variationskoeffizient $v \leq 20$: Normalverteilung,
- Variationskoeffizient $v > 20$: logarithmische Normalverteilung,

Stufe 3 : Einordnung des haufwerksporigen Leichtbetons unter Einhaltung eines 5%-Fraktilewertes nach Tabelle 3.2 unter Annahme einer Mischverteilung aus Normalverteilung und logarithmischer Normalverteilung [61].

Dabei dürfen nach Bild 3.5 bei der Ermittlung des 5%-Fraktilwertes Festigkeiten, welche oberhalb eines bestimmten Grenzwertes liegen, unberücksichtigt bleiben.

Diesen Grenzwert erhält man, beginnend mit der höchsten Einzelfestigkeit, durch schrittweises Aussortieren der Festigkeitswerte bis zum Erreichen des Maximalwertes der 5%-Fraktilfestigkeit.

Ein Aussortieren von Festigkeitswerten, beginnend mit der kleinsten Einzelfestigkeit, ist dagegen jedoch auf keinen Fall zulässig.

Betonfestigkeitsklasse nach DIN 4232 [23]*	Nennfestigkeit β_{WN} [N/mm ²]	Serienfestigkeit β_{WS} [N/mm ²]	5% - Fraktilwert [N/mm ²]
LB 2	2.0	4.0	2.0
LB 5	5.0	8.0	5.0
LB 8	8.0	11.0	8.0

* Werden am Bauwerk Zwischengrößen der Druckfestigkeit diagnostiziert, so dürfen Festigkeitskennwerte und Betonfestigkeitsklassen ausgewiesen werden, welche durch lineare Interpolation zwischen den in dieser Tabelle angegebenen Werten erhalten werden.

Tabelle 3.2 : Nennfestigkeiten, Serienfestigkeiten und 5% - Fraktilwerte für haufwerksporige Leichtbetone nach DIN 4232 [23]

Kann für einen haufwerksporigen Leichtbeton die kleinste nach DIN 4232 [23] mögliche Betonfestigkeitsklasse LB 2 in keiner dieser Stufen nachgewiesen werden oder reicht die nachgewiesene Druckfestigkeit für eine ausreichende Standsicherheit des Bauteils nicht aus, ist es erforderlich, die Festigkeit des vorhandenen Betons zu erhöhen. Die Möglichkeiten solcher nachträglicher Festigkeitserhöhungen werden in Kapitel 5 dieser Arbeit erläutert.

3.1.3.4.2 Einflüsse der Fertigung

Aus Bild 3.6 kann darüber hinaus entnommen werden, daß nicht nur die Druckfestigkeit bei einer Betrachtung aller untersuchten Gebäude stark streut, sondern auch innerhalb eines Gebäudes enorme Festigkeitsschwankungen von mehr als 700 % auftreten können.

Zurückzuführen ist dies auf fertigungsbedingte Gegebenheiten. Die Elemente wurden sowohl in Negativfertigung (Außenseite untenliegend) als auch in Positivfertigung (Innenseite untenliegend) hergestellt. In dieser Lage wurde auch der Beton auf Rütteltischen mit unten und seitlich befestigten Außenrüttlern verdichtet. Da der haufwerksporige Leichtbeton ein Einkornbeton sein kann, wurde angestrebt, dem Frischbeton nur soviel Zementleim zuzugeben, damit alle Zuschlagstoffkörner miteinander verkittet werden und zwischen ihnen die Haufwerksporen entstehen. Enthielt der Frischbeton dagegen mehr Zementleim als zur Verkittung der Zuschlagstoffkörner notwendig war, bestand die Gefahr, daß sich der Zementleim während des Verdichtungsvorganges in verschiedenen Elementbereichen absetzte.

Begünstigt wurde dieser Vorgang durch die Form der Zuschlagstoffe. Bei kugelförmigen, wenig ineinander verzahnten Zuschlagstoffen (z.B. Blähton) konnte sich der Zementleim ungestört im unteren Bereich der Schalung absetzen, während er von bizarr geformten, ineinander verkitteten Zuschlagstoffen (z.B. Blähschiefer) daran gehindert wurde. Da bei kugeligen Zu-

schlagstoffen die maximale Packungsdichte beim Einlaufen des Betons in die Schalung bereits nahezu erreicht ist, kann die eingetragene Rüttelenergie zum Absetzen des Zementleimes führen. Bei bizarr geformten Zuschlagstoffen wird die Rüttelenergie dagegen dazu verwendet, die Zuschlagstoffe weiter ineinander zu verkeilen. Dies kann gegenüber kugeligen Zuschlagstoffen zu einer um 8% vergrößerten Packungsdichte nach dem Verdichten führen [39].

Nach TGL 33411 [116] wurde gefordert, den haufwerksporigen Leichtbeton nur soweit zu verdichten, daß kein Absetzen des Zementleimes erfolgt. Dies gelang aber offensichtlich nicht immer.

An den Stellen im haufwerksporigen Leichtbeton, wo der Anteil des Zementsteines so gering ist, daß nur die Zuschlagstoffkörner miteinander verkittet sind, müssen die Zuschlagstoffe vorrangig bei der Lastabtragung mitwirken. Die Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons ist hier von der Festigkeit der Zuschlagstoffe und des Zementsteines abhängig und wird gering sein.

Umschließt der Zementstein dagegen die Zuschlagstoffe vollständig und füllt auch die Haufwerksporen teilweise aus, entsteht jetzt ein tragfähigeres Gerüst aus Zementstein, welches die eingetragene Beanspruchung abträgt. Die Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons wird an solchen Stellen wesentlich durch die Festigkeit des Zementsteines bestimmt, da die Zuschlagstoffkörner jetzt im Verhältnis zum Zementstein eine geringere tragende Funktion übernehmen.

Nach [39] kann man von folgenden Richtwerten für die Abhängigkeit von Zementgehalt und Haufwerksporosität ausgehen :

- Zementgehalt $< 150 \text{ kg/m}^3$: Zuschlagstoffe werden miteinander verkittet,
- Zementgehalt $> 150 \text{ kg/m}^3$: Zementstein bildet ein selbständig tragendes Gerüst,
- Zementgehalt $> 500 \text{ kg/m}^3$: Haufwerksporen werden vollständig mit Zementstein ausgefüllt.

Ein Mindestzementgehalt wurde nach DAMW-VW 968 [18] bzw. TGL 33411 [116] nicht gefordert.

3.1.3.5 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit der untersuchten Kerne mit der Druckfestigkeit eines LB 2 nach DIN 4232 [23] weist nach [77] folgende Parameter auf :

kleinster Einzelwert	:	0.08	N/mm ²
größter Einzelwert	:	0.80	N/mm ²
Mittelwert	:	0.42	N/mm ²

Charakteristisch für haufwerksporigen Leichtbeton ist damit offensichtlich auch die starke Streuung der Zugfestigkeit.

Aufgrund der geringen Probenanzahl (11 Probekörper) können jedoch keine weiteren Aussagen zu einer statistischen Verteilung getroffen werden.

3.1.3.6 Rohdichte

Die Rohdichte der untersuchten Kerne weist die in Bild 3.9 dargestellte statistische Verteilung auf.

Es kann bei dieser Art der statistischen Verteilung von einer Normalverteilung mit folgenden Parametern ausgegangen werden :

Mittelwert	:	1.50	g/cm ³
Standardabweichung	:	0.183	g/cm ³
unterer 5%-Fraktilwert	:	1.20	g/cm ³
oberer 5%-Fraktilwert	:	1.80	g/cm ³

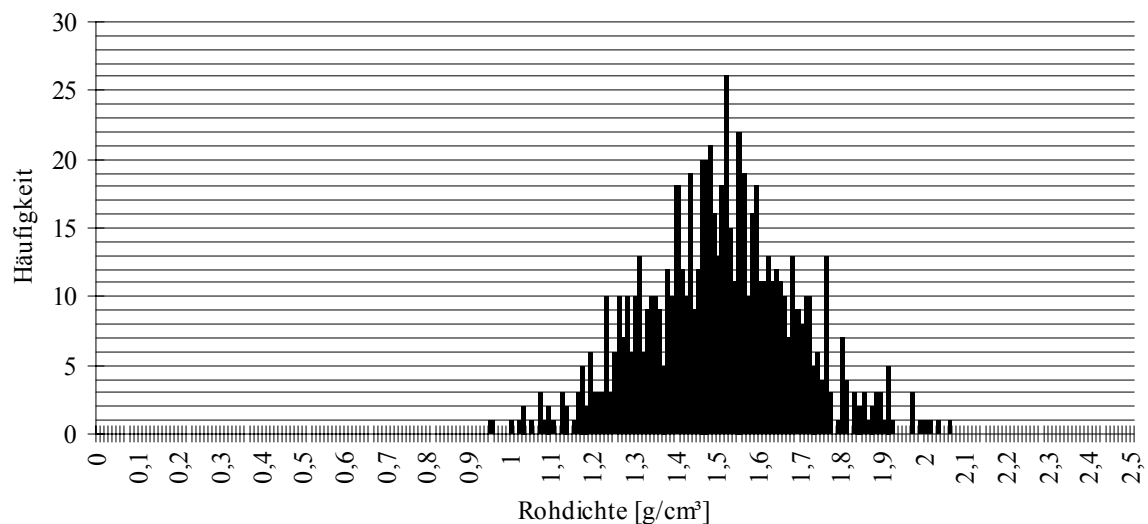


Bild 3.9 : Häufigkeitsverteilung der Rohdichte der entnommenen Kerne

Allerdings muß beachtet werden, daß sich die in Bild 3.9 dargestellte Verteilung nur bei gemeinsamer Betrachtung aller Objekte ergibt. Auch bei den Einzelobjekten ist, wie in Bild 3.10 dargestellt, zwar eine Normalverteilung der Rohdichte erkennbar, die Mittelwerte der Rohdichten der Einzelobjekte können dabei allerdings vom Mittelwert der Gesamtobjekte beträchtlich abweichen.

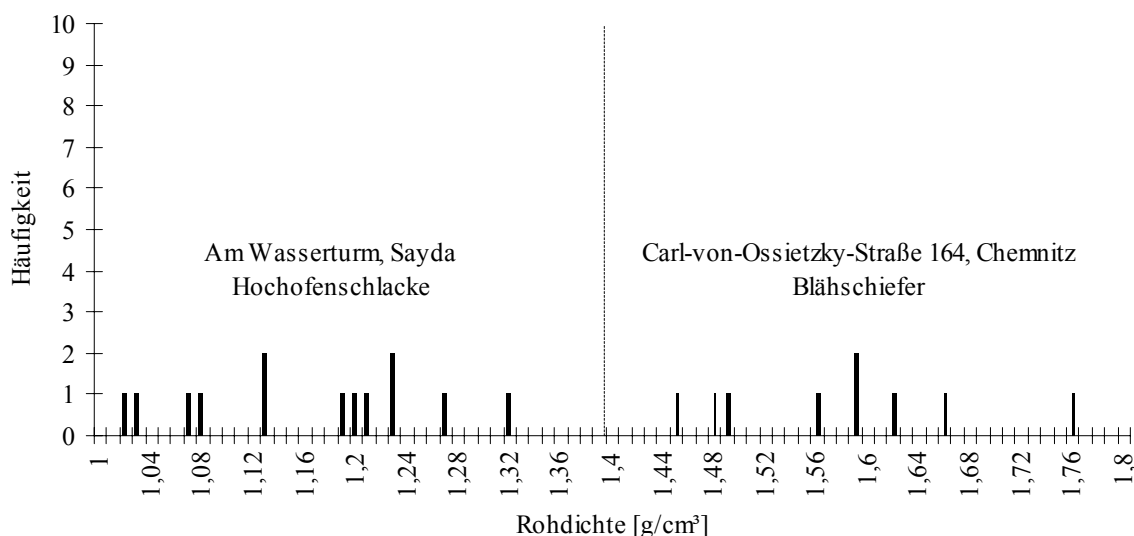


Bild 3.10 : Häufigkeitsverteilung der Rohdichte der entnommenen Kerne zweier Gebäude

3.1.3.7 Zusammenhänge zwischen verschiedenen baustofflichen Parametern

3.1.3.7.1 Zusammenhang zwischen Rohdichte und Feststoffporosität

Im Ergebnis der Untersuchungen der Porositäten mit dem *Flüssigkeitsaufnahmeverfahren* (siehe Abschnitt 3.1.2.2) wurde für ein Objekt mit dem Hauptzuschlagstoff Blähschiefer festgestellt, daß die Feststoffe des haufwerksporigen Leichtbetons innerhalb dieses Objektes stets die gleiche Porosität aufwiesen. Bild 3.11 kann entnommen werden, daß zwischen der Rohdichte des haufwerksporigen Leichtbetons und seiner Dichte im Zustand der mit Wasser gesättigten Feststoffe ein linearer Zusammenhang mit dem Anstieg von 1.0 besteht.

Die Lage der Geraden (Absolutwertverhältnis) wird durch die spezifische Porosität der Zuschlagstoffe bestimmt, die Streubreite der Einzelwerte um die Gerade durch den Anteil des Zementsteines. Bei mehreren Objekten verschiedener Zuschlagstoffe und Zementsteingehalte werden sich demzufolge parallele Geraden ergeben. Voraussetzung für die Entstehung einer Geraden ist, daß die Porosität der Zuschlagstoffe konstant ist und es sich um ein konstantes Verhältnis von Zuschlagstoffen und Zementstein handelt.

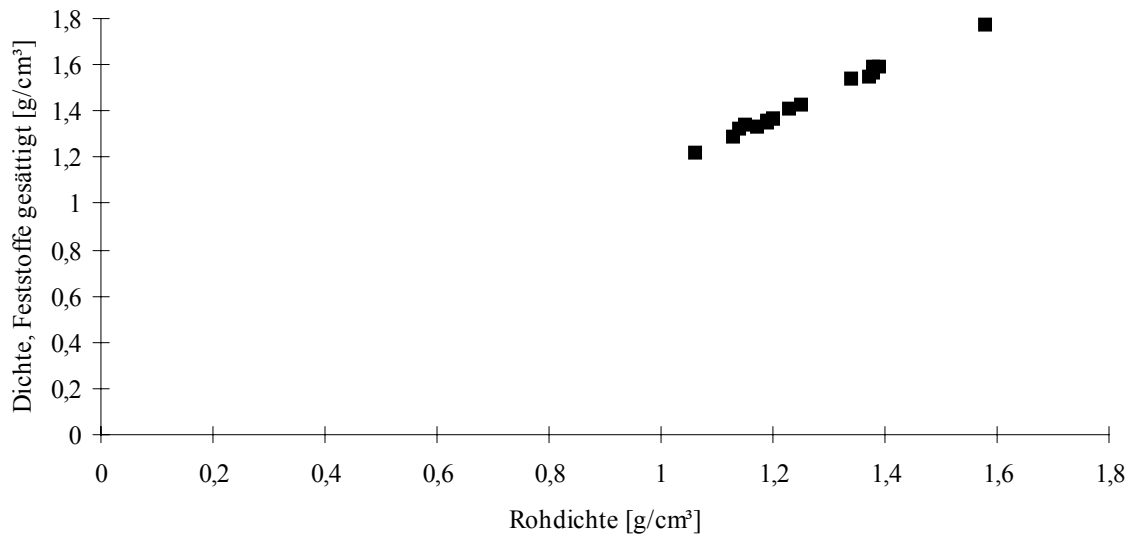


Bild 3.11 : Zusammenhang zwischen Rohdichte und Dichte, Feststoffe mit Wasser gesättigt an einem Objekt

Die an demselben Gebäude ermittelte Porosität der Feststoffe ist konstant und unabhängig von der Rohdichte, wie Bild 3.12 zeigt. Ein Absinken der Feststoffporosität bei größerer Rohdichte würde bedeuten, daß kein konstantes Verhältnis von Zuschlagstoffen und Zementstein an dem betreffenden Gebäude vorhanden ist. In einem solchen Fall würde auch die in Bild 3.11 dargestellte Gerade eine größere Streubreite aufweisen.

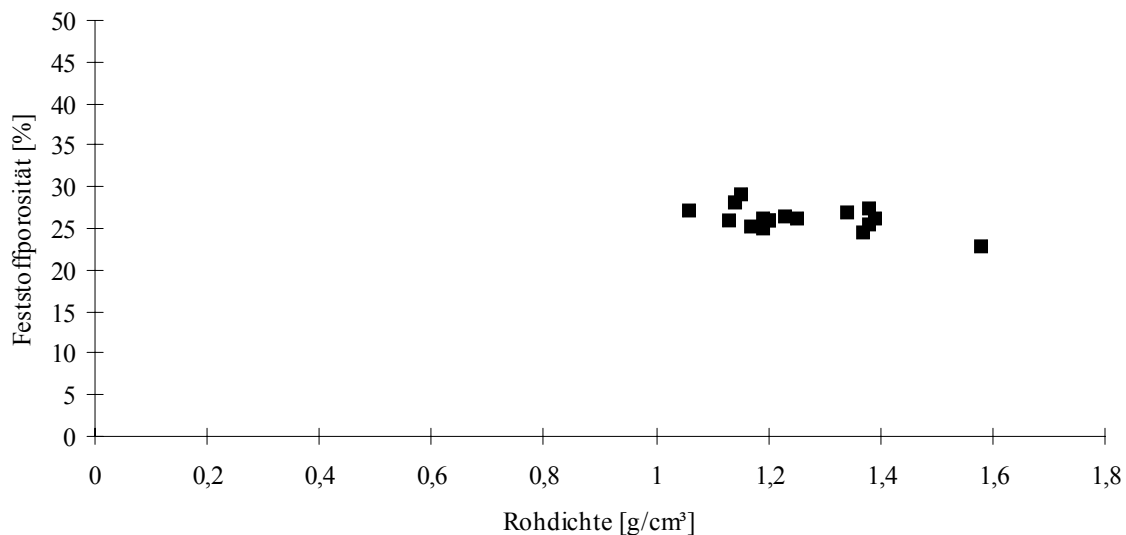


Bild 3.12 : Zusammenhang zwischen Rohdichte und Feststoffporosität an einem Objekt

Der Nachweis der Unabhängigkeit der Feststoffporosität von der Rohdichte kann auch auf mathematischen Wege erfolgen.

Da gilt

$$V = m_{\text{gesättigt}} / \rho_{\text{gesättigt}} = m / \rho_r \quad [\text{cm}^3] \quad (3.16)$$

folgt

$$\rho_{\text{gesättigt}} = m_{\text{gesättigt}} / m * \rho_r \quad [\text{g/cm}^3] \quad (3.17)$$

Aus Gleichung (3.15) folgt damit

$$P_{\text{FS}} = 1 / (\rho_F / (\rho_0 * (m_{\text{gesättigt}} / m - 1)) + 1) * 100 \quad [\text{Vol-\%}] \quad (3.18)$$

Da gilt

$$\rho_F = \text{const} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (3.19)$$

$$\rho_0 = \text{const} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (3.20)$$

ist P_{FS} nur vom Verhältnis $m_{\text{gesättigt}} / m$ abhängig. Dieses Verhältnis und darausfolgend $\rho_{\text{gesättigt}}$ kann nach Bild 3.12 unter der Voraussetzung eines konstanten Verhältnisses von Zuschlagstoffen und Zementstein als konstant angesehen werden.

Es bedeuten :

P_{FS}	:	Feststoffporosität, bezogen auf das Volumen der Feststoffe	[Vol-%]
m	:	Masse des Probekörpers = Masse der Feststoffe	[g]
$m_{\text{gesättigt}}$:	Masse des Probekörpers, Feststoffe mit Flüssigkeit gesättigt	[g]
V	:	Volumen des Probekörpers	[cm ³]
ρ_r	:	Rohdichte des Probekörpers	[g/cm ³]
ρ_0	:	Reindichte der Feststoffe = Reindichte des Probekörpers	[g/cm ³]
$\rho_{\text{gesättigt}}$:	Dichte des Probekörpers, Feststoffe mit Flüssigkeit gesättigt	[g/cm ³]
ρ_F	:	Dichte der Flüssigkeit	[g/cm ³]

Versuchstechnisch ist es demzufolge ausreichend, zur Bestimmung der Feststoffporosität für ein Objekt die Parameter ρ_r , ρ_0 und $\rho_{\text{gesättigt}}$ an nur einem repräsentativen Prüfkörper zu ermitteln.

3.1.3.7.2 Zusammenhang zwischen Rohdichte und Haufwerkporosität

Da man somit annehmen kann, daß an einem Objekt die Feststoffporosität konstant ist und demzufolge keinen Einfluß auf die Rohdichte hat, müssen an einem Objekt die Rohdichte und die Haufwerkporosität linear voneinander abhängig sein.

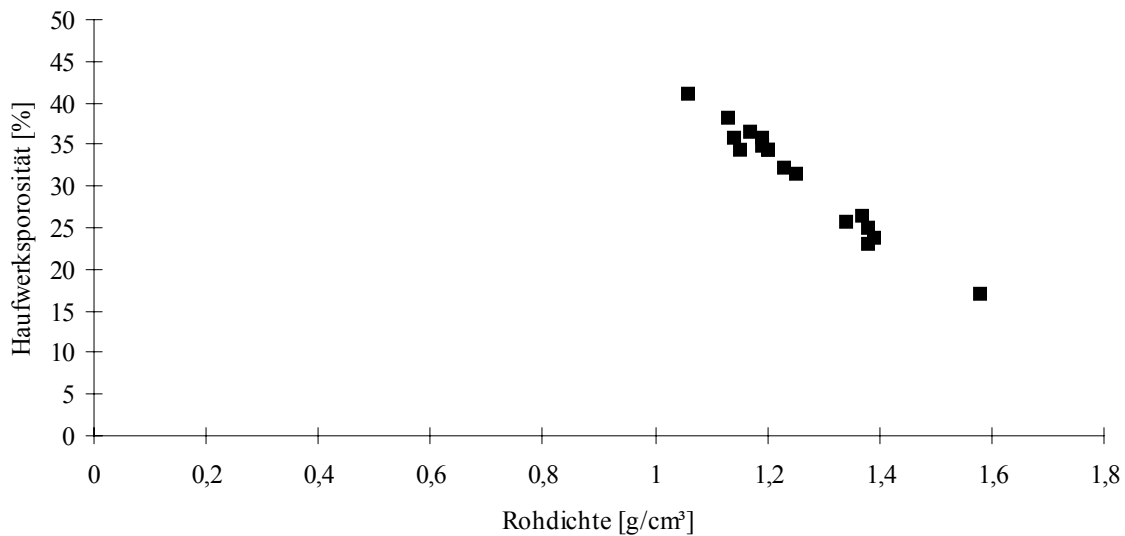


Bild 3.13 : Zusammenhang zwischen Rohdichte und Haufwerkporosität an einem Objekt

Dieser nach Gleichung (3.10) für das gleiche Objekt ermittelte und grafisch in Bild 3.13 dargestellte Zusammenhang kann ebenfalls mathematisch erfaßt werden.

Aus den Gleichungen (3.10), (3.16) und (3.17) folgt

$$HP = (\rho_r * (1 / \rho_F - 1 / \rho_0 - (m_{\text{gesättigt}} / m) / \rho_F) + 1) * 100 \quad [\text{Vol-\%}] \quad (3.21)$$

Es ergibt sich eine Geradengleichung der Form

$$HP = (a * \rho_r + b) * 100 \quad [\text{Vol-\%}] \quad (3.22)$$

mit den Parametern

$$a = 1 / \rho_F - 1 / \rho_0 - (m_{\text{gesättigt}} / m) / \rho_F \quad [\text{cm}^3/\text{g}] \quad (3.23)$$

$$b = 1 \quad [-] \quad (3.24)$$

Mit den Gleichungen (3.19) und (3.20) und unter der Voraussetzung, daß die Feststoffporosität an einem Objekt konstant ist, also gilt

$$\begin{aligned} m_{\text{gesättigt}} / m &= \text{const} && [-] && (3.25) \\ \rho_{\text{gesättigt}} &= \text{const} && [\text{g}/\text{cm}^3] && \\ &&& (3.26) && \end{aligned}$$

ergibt sich aus Gleichung (3.21)

$$\text{HP} = (\rho_r * (\rho_0 - \rho_F) / (\rho_0 * \rho_F) - \rho_{\text{gesättigt}} / \rho_F + 1) * 100 \quad [\text{Vol-\%}] \quad (3.27)$$

so daß eine Geradengleichung nach Gleichung (3.22) mit den Parametern

$$\begin{aligned} a &= (\rho_0 - \rho_F) / (\rho_0 * \rho_F) && [\text{cm}^3/\text{g}] && \\ &&& (3.28) && \\ b &= - \rho_{\text{gesättigt}} / \rho_F + 1 && [-] && (3.29) \end{aligned}$$

entsteht.

Es bedeuten :

HP	:	Haufwerksporosität, bezogen auf das Gesamtvolumen	[Vol-%]
m	:	Masse des Probekörpers = Masse der Feststoffe	[g]
$m_{\text{gesättigt}}$:	Masse des Probekörpers, Feststoffe mit Flüssigkeit gesättigt	[g]
ρ_r	:	Rohdichte des Probekörpers	[g/cm ³]
ρ_0	:	Reindichte der Feststoffe = Reindichte des Probekörpers	[g/cm ³]
$\rho_{\text{gesättigt}}$:	Dichte des Probekörpers, Feststoffe mit Flüssigkeit gesättigt	[g/cm ³]
ρ_F	:	Dichte der Flüssigkeit	[g/cm ³]

Es ist aus Gleichung (3.27) erkennbar, daß unter der Voraussetzung der Gültigkeit der Gleichungen (3.19), (3.20), (3.25) und (3.26) die Haufwerksporosität innerhalb eines Objektes nur von der Rohdichte abhängig ist. Der Anstieg der Geraden wird durch die Reindichte, die vertikale Verschiebung durch die Feststoffporosität bestimmt.

Für die versuchstechnische Bestimmung der Haufwerksporosität bedeutet das, daß bei konstanter Porosität der Feststoffe nur die Rohdichte ρ_r an jedem Prüfkörper zu bestimmen ist. Die Bestimmung der Parameter ρ_0 und $\rho_{\text{gesättigt}}$ ist lediglich für einen repräsentativen Prüfkörper erforderlich. Nach Gleichung (3.10) ist aus diesen Parametern die Bestimmung der Haufwerksporosität dann für jeden Prüfkörper möglich.

3.1.3.7.3 Zusammenhang zwischen Haufwerksporosität und Gesamtporosität

Da die Differenz zwischen der Haufwerksporosität und der Gesamtporosität nur durch die Porosität der Feststoffe bestimmt wird, welche nach Bild 3.12 als konstant für ein Objekt angesehen werden kann, muß zwischen der Haufwerksporosität und der Gesamtporosität ein linearer Zusammenhang mit dem Anstieg von 1.0 bestehen, welcher in Bild 3.14 dargestellt ist.

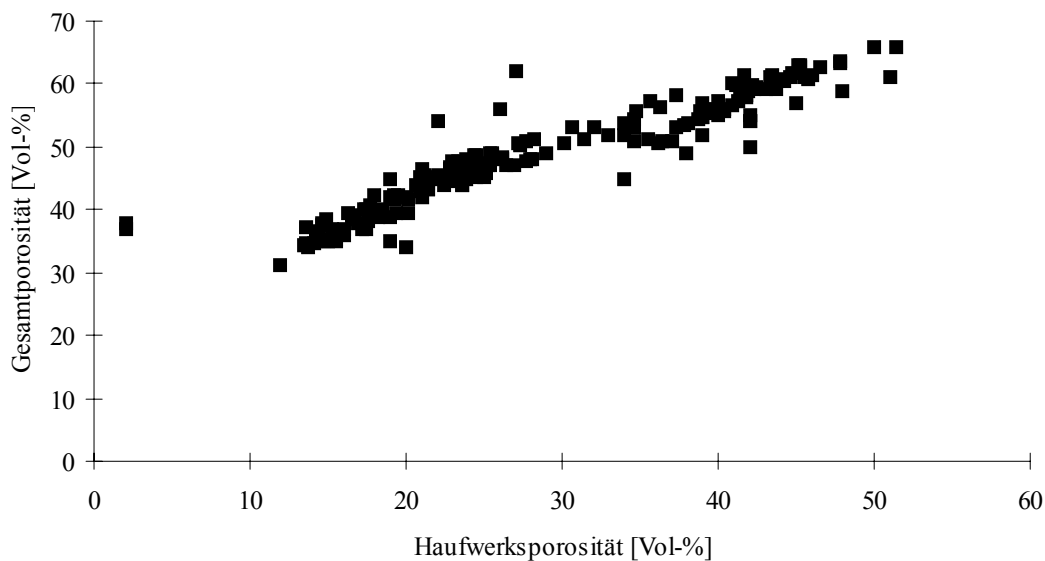


Bild 3.14 : Zusammenhang zwischen Haufwerksporosität und Gesamtporosität an einem Objekt

Die Lage der in Bild 3.14 dargestellten Geraden wird auch hier durch die spezifische Porosität der Zuschlagstoffe bestimmt, die Streubreite der Einzelwerte um die Gerade durch den Anteil des Zementsteines. Liegen bei mehreren Objekten verschiedene Zuschlagstoffe und Zementsteingehalte vor, werden die entstehenden Geraden Parallelen bilden. Auch in diesem Fall ist die Voraussetzung für die Entstehung einer Geraden, daß die Porosität der Zuschlagstoffe konstant ist und es sich um ein konstantes Verhältnis von Zuschlagstoffen und Zementstein handelt.

Theoretisch sind für den Idealfall

- Einkornbeton,
- kugelige Form der Zuschlagstoffe,
- Zementstein verkittet nur die Zuschlagstoffkörner,
- maximale Verdichtung,

unabhängig von der Korngröße folgende maximale Haufwerksporositäten möglich [39] :

- kubische Mittelpunktstellung der Zuschlagstoffkörner : 47.6 Vol-%
- tetraedrische bzw. oktaedrische Mittelpunktstellung der Zuschlagstoffkörner : 26.0 Vol-%

Das in Bild 3.14 ausgewiesene Spektrum der Haufwerksporositäten von 3.0 ... 52.0 Vol-% überschreitet damit den theoretischen Maximalwert um 9.2 %.

Zurückführbar ist dies auf die Tatsache, daß die theoretische Annahme exakt kugeligter Zuschlagstoffe mit maximaler Verdichtung für die untersuchten haufwerksporigen Leichtbetone nicht in vollem Umfang zutreffen kann.

3.1.3.7.4 Zusammenhang zwischen Rohdichte und Druckfestigkeit

Da die Druckfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons im wesentlichen durch die Festigkeit und Konzentration des die Zuschlagstoffkörner umgebenden Zementsteingerüsts geprägt ist, erklärt sich auch der in Bild 3.15 dargestellte scheinbare Widerspruch, daß bei gemeinsamer Betrachtung aller untersuchten Objekte beim haufwerksporigen Leichtbeton eine höhere Rohdichte zwar höhere Festigkeiten bedingen kann, aber nicht zwangsläufig bedingen muß. Eine höhere Rohdichte ergibt sich zwar bei einer Konzentration von Zementstein, aber auch durch schwerere Zuschlagstoffe, welche jedoch nur einen bedingten Einfluß auf die Festigkeit haben.

Deutlich wird diese Tatsache bei Betrachtung einzelner Objekte. Es kann Bild 3.16 entnommen werden, daß bei differenzierter Betrachtung einzelner Objekte eine höhere Dichte innerhalb eines Gebäudes dennoch immer eine höhere Festigkeit bedingt. Ursache dafür ist wiederum die unterschiedliche Konzentration von Zementstein in verschiedenen Bereichen der Elemente eines Objektes. Trotzdem können die Rohdichten der Betone verschiedener Gebäude bei gleicher Festigkeit sehr wohl unterschiedliche Werte annehmen, da es dafür nur unterschiedlich schwerer Zuschlagstoffe bedarf.

Werden dagegen, wie in Bild 3.15, alle Objekte zusammen betrachtet, erfolgt eine Überlagerung der beiden Parameter Zementsteinkonzentration und Dichte der Zuschlagstoffe der einzelnen Objekte.

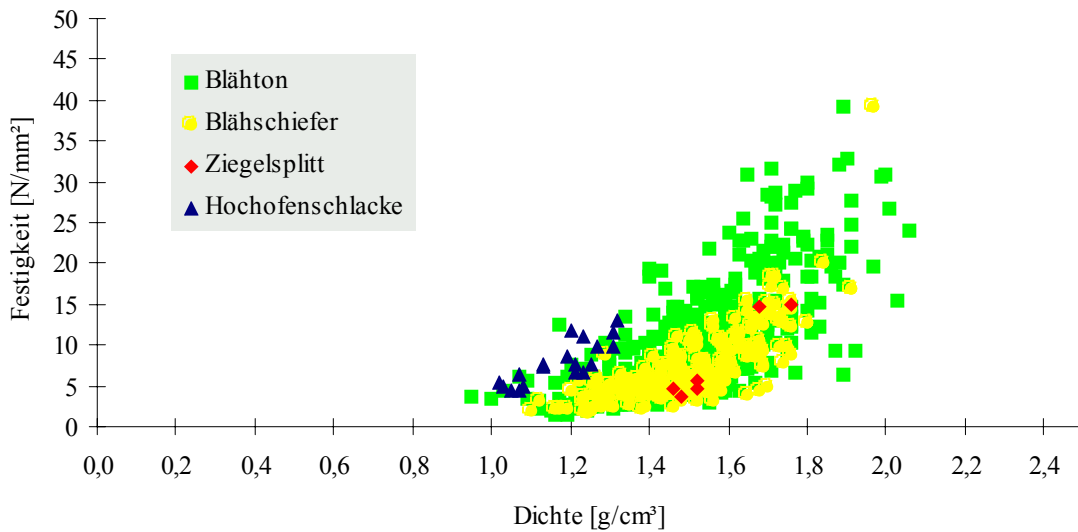


Bild 3.15 : Zusammenhang zwischen Rohdichte und Druckfestigkeit bei gemeinsamer Betrachtung aller untersuchten Objekte

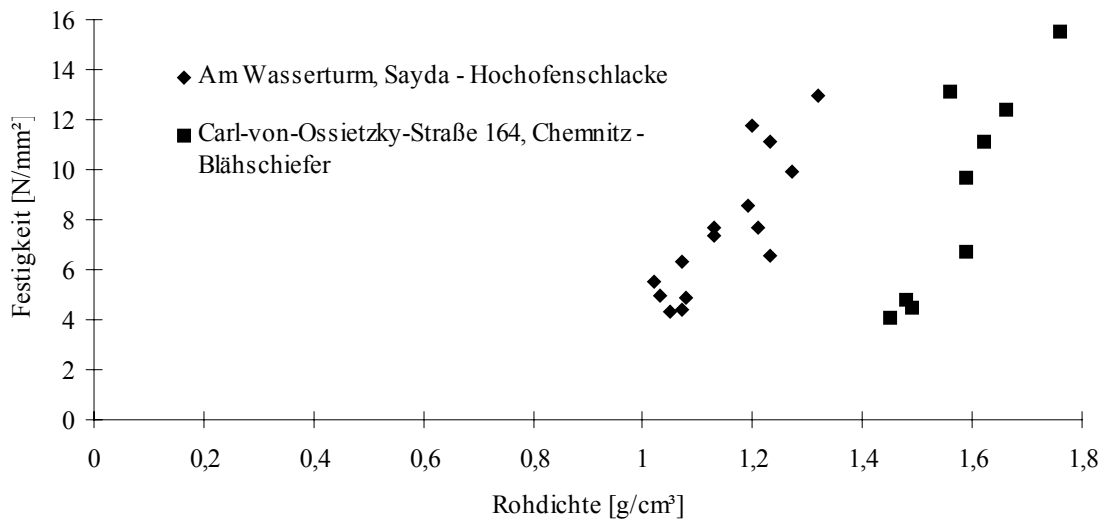


Bild 3.16 : Zusammenhang zwischen Rohdichte und Druckfestigkeit bei Betrachtung zweier Objekte

3.1.3.7.5 Zusammenhang zwischen Haufwerksporosität und Druckfestigkeit

Betrachtet man das Verhältnis von Haufwerksporosität und Druckfestigkeit, so kann man aufgrund der Tatsache, daß eine hohe Haufwerksporosität auf jeden Fall eine geringe Menge an vorhandenem Zementstein bedeutet und die Festigkeit in diesen Bereichen deutlich absinken muß, erwarten, daß diese Parameter in direktem Zusammenhang stehen. Entsprechende bestäti-

gende Ergebnisse wurden bei der Untersuchung eines Gebäudes mit dem Hauptzuschlagstoff Blähschiefer gefunden und sind in Bild 3.17 dargestellt.

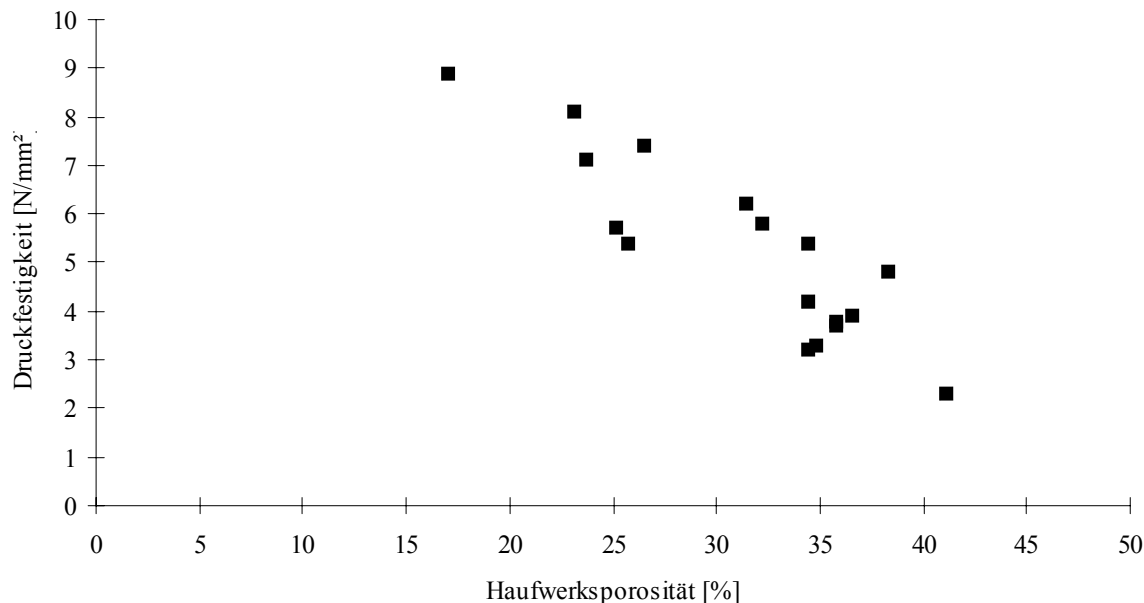


Bild 3.17 : Zusammenhang zwischen Haufwerksporosität und Druckfestigkeit

Auf der anderen Seite bedeutet eine geringere Haufwerksporosität nicht zwangsläufig eine höhere Festigkeit.

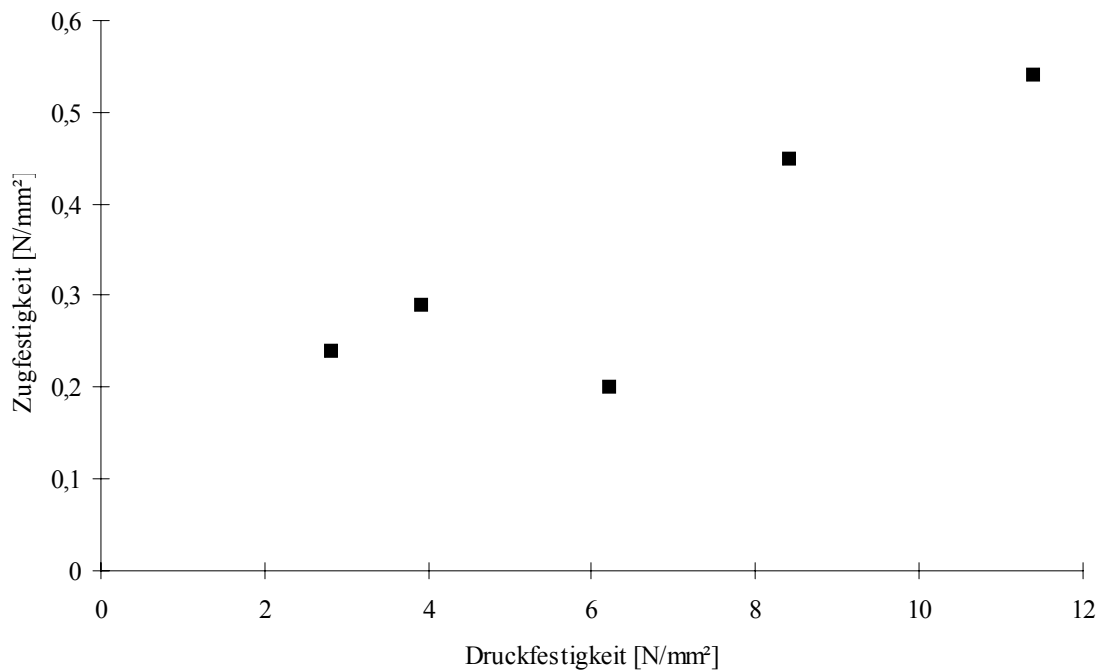
Durch Verwendung von Zuschlagstoffen mit kleinem Größtkorn kann der Haufwerksporenraum auch reduziert werden, ohne daß notwendigerweise eine Festigkeitssteigerung eintritt. In diesem Fall ist der mögliche Haufwerksporenraum von vornherein sehr gering und wird durch wenig Zementstein nur unbedeutend reduziert. Bei Verwendung von Zuschlagstoffen mit großem Größtkorn ist der Haufwerksporenraum dagegen ursprünglich sehr groß und wird dann durch den festigkeitssteigernden Zementstein reduziert. In beiden Fällen kann die Haufwerksporosität den gleichen Wert annehmen und trotzdem wird die erreichte Festigkeit beider Stoffe wesentlich voneinander abweichen.

Wiederum macht Bild 3.15 diesen Zusammenhang deutlich. Während der nahezu gefügedichte Leichtbeton aus Hochofenschlacke eine verhältnismäßig geringe Festigkeit aufweist, können von haufwerksporigen Leichtbetonen aus Blähton oder Blähschiefer mit einem wesentlich größeren Haufwerksporenraum vielfach höhere Festigkeiten erreicht werden.

3.1.3.7.6 Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Druckfestigkeit

Zwischen Zugfestigkeit und Druckfestigkeit kann nach [77] ein linearer Zusammenhang vorausgesetzt werden. In Bild 3.18 ist dieser Zusammenhang dargestellt.

Bild 3.18 : Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Druckfestigkeit



Das Verhältnis von Druckfestigkeit zu Zugfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons von 1 : 0.03 ... 0.09 liegt damit deutlich unter dem Verhältnis von Druckfestigkeit zu Zugfestigkeit des Betons, welches als Richtwert mit 1 : 0.10 ... 0.15 angegeben werden kann.

3.2 Parameter der gefügedichten Betondeckschichten

3.2.1 Schichtstärke

Wie in Bild 2.1 erkennbar, schwanken die Schichtstärken der gefügedichten Betondeckschichten sehr stark. Für die innere gefügedichte Betondeckschicht wurden Stärken von 5 ... 60 mm festgestellt, die Stärke der äußeren gefügedichten Betondeckschicht beträgt 30 ... 120 mm.

3.2.2 Karbonatisierungstiefe

Auch die Karbonatisierungstiefen der gefügedichten Betondeckschichten schwanken sehr stark. Die Ursache dafür ist die unterschiedliche Festigkeit und die differente Zusammensetzung der gefügedichten Betondeckschichten. Festgestellt wurden Karbonatisierungstiefen von 0 ... 120 mm.

3.2.3 Festigkeit

3.2.3.1 Entwicklung des Verfahrens zur Festigkeitsermittlung dünn-schichtiger Betonbauteile

3.2.3.1.1 Stand der Technik

Nach DIN 1048 [20] müssen Probekörper zum Prüfen der Druckfestigkeit von Beton die Form eines Würfels mit einer Kantenlänge von 200 mm haben. Diese Würfel sind in vorgeschriebener Weise herzustellen, nachzubehandeln und im Alter von 28 Tagen zu prüfen.

Ist ein Beton unbekannter Festigkeit an einem Bauwerk vorhanden, kann diese Festigkeit bestimmt werden, indem zylindrische Probekörper aus dem zu untersuchenden Beton entnommen werden. Ist bei diesen Probekörpern die Höhe gleich dem Durchmesser, so kann nach DIN 1048 [20] davon ausgegangen werden, daß für Zylinder mit 100 mm und 150 mm Durchmesser die ermittelte Druckfestigkeit der Druckfestigkeit von Würfeln mit 200 mm Kantenlänge entspricht. Der Probekörperdurchmesser sollte aufgrund des Größtkorneinflusses und des Einflusses der Querdehnungsbehinderung mindestens 50 mm betragen, für diese Zylinder ist der ermittelte Wert dann auf 90 % abzumindern.

An vorhandenen massiven Beton- und Stahlbetonkonstruktionen mit einzuhaltenden Mindestabmessungen können zylindrische Probekörper der geforderten geometrischen Abmessungen im Regelfall mittels eines Bohrkerngerätes ohne Schwierigkeiten entnommen werden. Ein Problem tritt erst auf, wenn die Druckfestigkeiten von dünnen Betonschichten, z.B. den gefügedichten Betondeckschichten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton, nachträglich bestimmt werden müssen. Unterschreitet die Schichtstärke den geforderten Durchmesser des zylindrischen Probekörpers von 50 mm, so kann die tatsächlich vorhandene Festigkeit der Schicht mit genormten Prüfverfahren nicht bestimmt werden.

Für die gefügedichten Betondeckschichten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton unterschreitet die Schichtstärke diesen Grenzwert sehr häufig (siehe Abschnitt 3.2.1). Um die Festigkeit dieser Schichten beurteilen zu können, war die Notwendigkeit gegeben, das *Verfahren zur Festigkeitsermittlung dünn-schichtiger Betonbauteile* zu entwickeln [90].

3.2.3.1.2 Probekörperabmessungen

Da davon ausgegangen werden kann, daß das im Beton der betreffenden Schicht enthaltene Größtkorn lediglich eine Größe von einem Drittel der Schichtdicke besitzt, kann der Durchmesser der Probekörper auf die Schichtdicke reduziert werden.

Allerdings erscheint es wenig zweckmäßig, in Anlehnung an die Forderung der DIN 1048 [20] (Prüfkörperhöhe = Prüfkörperdurchmesser) für eine minimale Schichtdicke von 20 mm einen zylindrischen Probekörper des gleichen Durchmessers zu entnehmen, da dieser infolge des He-

rausbrechens der Zuschlagstoffkörner an den Schnittflächen seine zylindrische Form nicht behalten würde. Es erscheint vielmehr sinnvoller, ein ungleiches Verhältnis von Probekörperhöhe zu Durchmesser zuzulassen und die daraus resultierenden Konsequenzen bei der Festigkeitsermittlung zu berücksichtigen.

Nimmt man als geeigneten Prüfkörperdurchmesser einen Durchmesser von 50 mm an, ist die Untersuchung des Einflusses der Probekörperhöhe und der Betonfestigkeitsklasse erforderlich.

3.2.3.1.3 Versuchsdurchführung

Insgesamt wurden 204 Probekörper mit dem Durchmesser 50 mm und den Höhen 50 mm, 40 mm, 30 mm und 20 mm in den Betonfestigkeitsklassen B 15, B 25 und B 35 gefertigt, welche die in Tabelle 3.3 dargestellten Bestandteile und Eigenschaften aufwiesen.

Bestandteil bzw. Eigenschaft		Betonfestigkeitsklasse nach DIN 1045 [19]		
		B 15	B 25	B 35
Zement PZ 35 F	[kg/m ³]	215	265	350
55 % Sand 0/2	[kg/m ³]	1025	1005	955
45 % Sand 2/8	[kg/m ³]	840	825	785
Wassergehalt	[kg/m ³]	200	200	205
Konsistenz		KP	KP	KP
Rohdichte	[g/cm ³]	2.21	2.23	2.27
β_{w200}	[N/mm ²]	21.60	28.30	40.90

Tabelle 3.3 : Bestandteile und Eigenschaften der gefertigten Probekörper

Die Probekörper wurden auf einem Rütteltisch bei einer Frequenz von 3000/min verdichtet und nach 24 h ausgeschalt. Das Verdunsten von Wasser wurde mittels einer Folie verhindert. Dann wurden die Probekörper bis zur Druckfestigkeitsprüfung unter Normbedingungen gelagert. Alle Probekörper wurden im Alter von 28 Tagen geprüft. Die Last wurde dabei so gesteigert, daß die Druckspannung pro Sekunde um 0.5 N/mm² zunahm.

3.2.3.1.4 Versuchsauswertung

Aufgrund des mit der Verringerung der Probekörperhöhe ständig wachsenden Einflusses des Größtkornes und der Querdehnungsbehinderung ist zu erwarten, daß in diesem Maße die ermittelten Druckfestigkeiten ansteigen.

Experimentell ergeben sich die in Bild 3.19 dargestellten Abhängigkeiten der ermittelten Druckfestigkeiten von der Probekörperhöhe und der Betonfestigkeitsklasse.

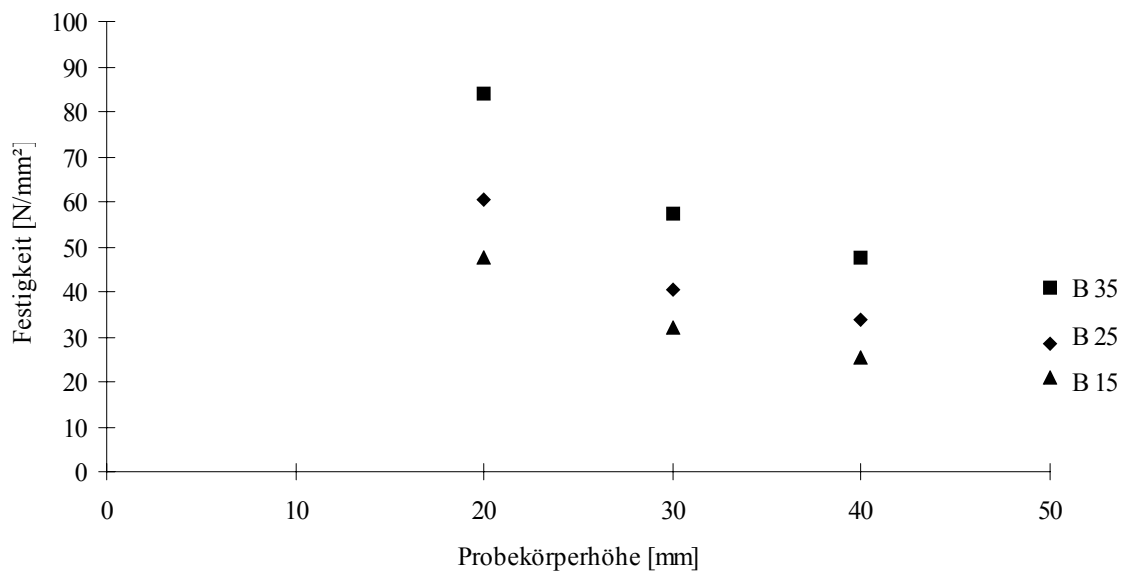


Bild 3.19 : Abhängigkeit der geprüften Druckfestigkeit eines Zylinders des Durchmessers 50 mm von der Probekörperhöhe und der Betonfestigkeitsklasse

Die dargestellten Werte sind die über die Prüfkörperanzahl gemittelten Werte. Gerechtfertigt ist diese Vorgehensweise dadurch, daß die erhaltene Streuung mit maximal 15 % als vergleichsweise gering angesehen werden kann und nicht vorrangig die Druckfestigkeit zur Einordnung in eine Betonfestigkeitsklasse untersucht worden ist, sondern Verhältniswerte die Zielgröße waren.

Es ist zu erkennen, daß die geprüften Festigkeiten nach folgender Beziehung abzumindern sind, um sie auf die Festigkeit eines Würfels mit der Kantenlänge von 200 mm zu beziehen :

$$\beta_{w200} = b_{(1)} * \beta_{c50,h} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.30)$$

mit

β_{w200}	:	Festigkeit des Würfels der Kantenlänge 200 mm	$[\text{N/mm}^2]$
$\beta_{c50,h}$:	Festigkeit des Zylinders mit dem Durchmesser 50 mm und der Höhe h	$[\text{N/mm}^2]$
$b_{(1)}$:	Abminderungsfaktor	$[-]$

Als Abminderungsfaktoren können dabei in Auswertung der Versuche die in Tabelle 3.4 dargestellten Werte $b_{(1)}$ angegeben werden, wobei die Betonfestigkeitsklasse vernachlässigt werden kann, wie Bild 3.20 zeigt.

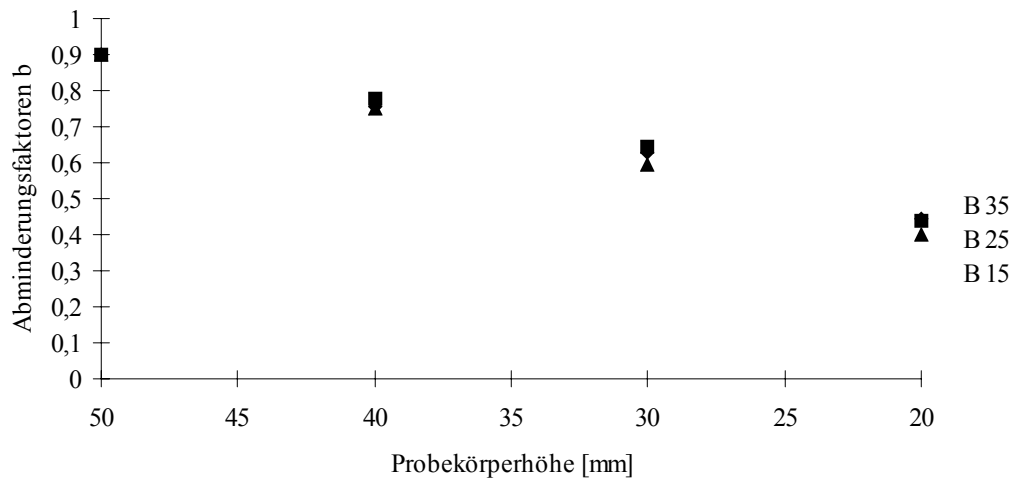


Bild 3.20 : *Abminderungsfaktoren für Zylinder des Durchmessers 50 mm in Abhängigkeit von der Zylinderhöhe und der Betonfestigkeitsklasse im Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen*

Zylinderhöhe h [mm]	50	40	30	20
Abminderungsfaktor $b_{(1)}$	0.900	0.760	0.620	0.420

Tabelle 3.4 : *Abminderungsfaktoren $b_{(1)}$ für Zylinder des Durchmessers 50 mm in Abhängigkeit von der Zylinderhöhe im Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen*

Aus der Fachliteratur sind zahlreiche Veröffentlichungen bekannt, die den Einfluß der Gestalt von Betonproben auf die an ihnen ermittelten Druckfestigkeiten beinhalten [9, 36, 72, 73, 119]. Auf das Problem von zylindrischen Probekörpern, welche ein ungleiches Verhältnis von Durchmesser zu Höhe besitzen, wird nur sehr flüchtig eingegangen. Aus [119] kann für das vorliegende Problem ein Umrechnungsvorschlag abgeleitet werden, welcher sich allerdings auf Versuche mit Würfeln unterschiedlicher Abmessungen und Zylinder des Durchmessers 150 mm stützt :

$$\beta_{C50} = 3 / (2 + d/h) * \beta_{C50,h} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.31)$$

mit

β_{C50}	:	Festigkeit des Zylinders mit dem Durchmesser und der Höhe 50 mm	[N/mm ²]
$\beta_{C50,h}$:	Festigkeit des Zylinders mit dem Durchmesser 50 mm und der Höhe h	[N/mm ²]
d	:	Durchmesser bei Zylindern bzw. Kantenlänge bei Würfeln	[mm]
h	:	Probenhöhe	[mm]

Um infolge Gleichung (3.31) zur tatsächlichen Betondruckfestigkeit β_{W200} zu gelangen, ist demzufolge die geprüfte Festigkeit der Zylinder des Durchmessers 50 mm nach [119] mit den in Tabelle 3.5 angegebenen Faktoren $b_{(2)}$ in Abhängigkeit von der Zylinderhöhe abzumindern.

Zylinderhöhe h [mm]	50	40	30	20
Abminderungsfaktor $b_{(2)}$	0.900	0.830	0.740	0.600

Tabelle 3.5 : Abminderungsfaktoren $b_{(2)}$ für Zylinder des Durchmessers 50 mm in Abhängigkeit von der Zylinderhöhe nach [119]

Es ergibt sich aus diesen Abminderungsfaktoren, daß infolge Gleichung (3.31) die Festigkeiten zu hoch erfaßt werden und eine globale Übertragung der Ergebnisse von Zylindern mit Durchmessern > 50 mm bzw. Betonwürfeln auf Zylinder des Durchmessers 50 mm nicht möglich ist, wie Bild 3.21 zeigt.

Besonders gravierend ist die Abweichung in den Bereichen mit sehr ungleichen Verhältnissen von Durchmesser zu Höhe. Die Abweichung beträgt dort immerhin bis zu 30 %.

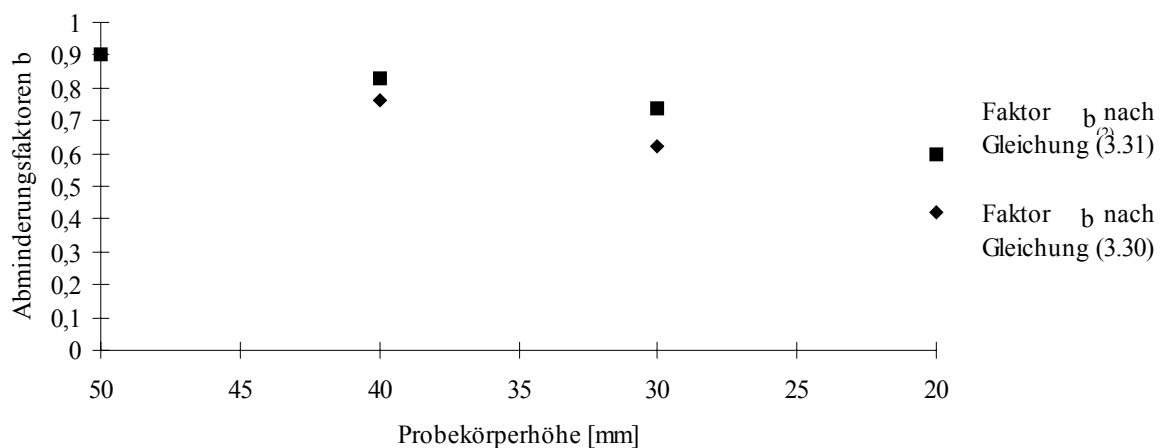


Bild 3.21 : Gegenüberstellung der Abminderungsfaktoren nach Gleichung (3.30) und (3.31)

Aus diesem Grund sollten für die Beurteilung der Festigkeit dünnwandiger Betonbauteile, wie den gefügedichten Betondeckschichten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton, bei Schichtstärken von 20 ... 50 mm ein Prüfkörperdurchmesser von 50 mm und die in Tabelle 3.4 angegebenen Abminderungsfaktoren verwendet werden, wobei zwischen den angegebenen Werten linear interpoliert werden kann.

3.2.3.2 Festigkeitsspektrum

Die Festigkeiten der gefügedichten Betondeckschichten schwanken innerhalb eines Außenwandelementes nur geringfügig, an verschiedenen Objekten dagegen sehr stark. Festgestellt wurden Festigkeiten in einem Spektrum von B 5 ... B 50.

3.3 Zusammenfassung der baustofflichen Beurteilung

Die geometrischen und stofflichen Parameter der auf dem Gebiet der ehemaligen DDR vorhandenen Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten liegen innerhalb eines breiten Spektrums. Tabelle 3.6 können Eckwerte dieses Spektrums entnommen werden.

<i>Schicht</i>	<i>Stärke [mm]</i>	<i>Betonfestigkeitsklasse nach DIN 4232 [23] bzw. DIN 1045 [19]</i>
äußere gefügedichte Betondeckschicht	30 ... 120	B 5 ... B 50
mittlere Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	150 ... 290	< LB 2 ... LB 8
innere gefügedichte Betondeckschicht	5 ... 60	B 5 ... B 50

Tabelle 3.6 : *Spektrum der Schichtstärken und Festigkeiten der Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten*

Der vorhandene haufwerksporige Leichtbeton der ehemaligen DDR läßt sich in baustofflicher Hinsicht weder dem Vorschriftenwerk der TGL noch dem der DIN mit genormten Prüfverfahren eindeutig zuordnen.

Im Ergebnis der in dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen und den theoretischen Auswertungen muß festgestellt werden, daß eine globale Übertragung von Erfahrungswerten, welche durch Erforschung des Baustoffs gefügedichter Beton gewonnen wurden, für eine nachträgliche Beurteilung der Eigenschaften des haufwerksporigen Leichtbetons nicht immer gerechtfertigt ist. Auf der Grundlage der vorliegenden Untersuchungsergebnisse kann jedoch festgestellt werden, daß es grundsätzlich möglich ist, den in der ehemaligen DDR gefertigten haufwerksporigen Leichtbeton eindeutig zu klassifizieren. Es ist dazu notwendig, sowohl bereits genormte als auch speziell zur Prüfung des haufwerksporigen Leichtbetons neu entwickelte Prüfverfahren anzuwenden.

Vier Hauptgruppen von haufwerksporigen Leichtbetonen wurden an 110 im Vorfeld von konkreten Sanierungsmaßnahmen diagnostizierten Objekten [74, 93] bezüglich der Art der Zuschlagstoffe mit der in Tabelle 3.7 dargestellten Häufigkeit festgestellt.

<i>Hauptzuschlagstoff</i>	<i>Anteil in %</i>
Blähton, teilweise mit Hüttenbims vermischt	75
Blähschiefer, teilweise mit Hüttenbims vermischt	18
Ziegelsplitt, teilweise mit Hüttenbims vermischt	2
Hochofenschlacke, teilweise gefügedicht	5

Tabelle 3.7 : *Häufigkeit der Zuschlagstoffe des diagnostizierten haufwerksporigen Leichtbetons*

In Tabelle 3.8 sind die Streubreiten der für haufwerksporige Leichtbetone nach Tabelle 3.7 charakteristischen baustofflichen Parameter angegeben. Tabelle 3.9 enthält die Häufigkeiten der in [74, 93] diagnostizierten Betonfestigkeitsklassen nach DIN 4232 [23].

<i>Parameter</i>	<i>kleinster Einzelwert</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>größter Einzelwert</i>
Festigkeit [N/mm ²]	1.50	9.40	39.20
Rohdichte [g/cm ³]	0.95	1.50	2.05
Reindichte [g/cm ³]	2.45	2.60	2.65
Gesamtporosität [Vol-%]	30	50	65
Haufwerksporosität [Vol-%]	3	30	52
Feststoffporosität [Vol-%]	23	25	28

Tabelle 3.8 : *Streubreiten charakteristischer baustofflicher Parameter des diagnostizierten haufwerksporigen Leichtbetons*

<i>Betonfestigkeitsklasse nach DIN 4232 [23]</i>	<i>Anteil in %</i>
< LB 2	4
LB 2	47
LB 5	34
LB 8	15

Tabelle 3.9 : *Häufigkeit der diagnostizierten Betonfestigkeitsklassen nach DIN 4232 [23]*

Während sich die geplante Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons dem Vorschriftenwerk der DIN zwar nicht global zuordnen läßt, auf seiner Grundlage aber geprüft werden kann, besitzt der haufwerksporige Leichtbeton neben dem Parameter der Dichte den charakteristischen Parameter Haufwerksporosität, für dessen Ermittlung keine genormten Prüfverfahren vorhanden sind.

Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit das *Flüssigkeitsaufnahmeverfahren* entwickelt (siehe Abschnitt 3.1.2.2), auf dessen Grundlage mathematische Zusammenhänge zur einfachen Bestimmung der Haufwerksporosität hergeleitet werden können.

Zur eindeutigen Klassifizierung des haufwerksporigen Leichtbetons sind experimentell nachfolgende Parameter bei der Gebäuediagnostik zu ermitteln :

1. *Betonfestigkeit*. Um eine nachträgliche Bestimmung der Betonfestigkeit durchzuführen, ist es zweckmäßig, Bohrkerne des Durchmessers 100 mm zu entnehmen. Diese Form kann als optimaler Kompromiß zwischen Reduzierung der Streuung innerhalb der zu bestimmenden Eigenschaften und Zerstörung des Bauteils angesehen werden. Die Einordnung des haufwerksporigen Leichtbetons in eine Betonfestigkeitsklasse nach DIN 4232 [23] kann dabei stufenweise nach der *Statistischen Auswertung* (siehe Abschnitt 3.1.3.4.1) erfolgen.
2. *Rohdichte*. Die Rohdichte wird nach dem in DIN 52102 [25] genormten Verfahren an jedem Prüfkörper ermittelt.
3. *Reindichte*. Die Reindichte wird nach dem in DIN 52102 [25] genormten Verfahren für jeden Prüfkörper ermittelt. Wird festgestellt, daß die Feststoffporosität für das betreffende Ob-

jekt konstant ist, kann die Ermittlung dieses Parameters auf einen repräsentativen Prüfkörper des Objektes beschränkt werden (siehe Abschnitt 3.1.3.7.1 und 3.1.3.7.2).

4. *Dichte, Feststoffe mit Flüssigkeit gesättigt.* Diese wird nach dem in Abschnitt 3.1.2.2 entwickelten *Flüssigkeitsaufnahmeverfahren* für jeden Prüfkörper ermittelt. Wird festgestellt, daß die Feststoffporosität für das betreffende Objekt konstant ist, kann nach Abschnitt 3.1.3.7.1 und Abschnitt 3.1.3.7.2 die Ermittlung dieses Parameters auf einen repräsentativen Prüfkörper des Objektes beschränkt werden.
5. *Dichte der Flüssigkeit.* Diese ist im allgemeinen bekannt (Wasser : $\rho_F = 1.0 \text{ g/cm}^3$).

Aufbauend auf diese Werte sind folgende weitere Parameter rechnerisch zu bestimmen :

1. *Haufwerksporosität* nach Gleichung (3.10),
2. *Anteil der Feststoffe* nach Gleichung (3.11),
3. *Anteil der Feststoffporen* nach Gleichung (3.12),
4. *Gesamtporosität* nach Gleichung (3.13),
5. *Feststoffporosität* nach Gleichung (3.15).

Im Ergebnis der in dieser Arbeit durchgeführten baustofflichen Untersuchungen ist es somit möglich, den Baustoff **haufwerksporiger Leichtbeton** nach den Parametern

1. Festigkeit (auf der Grundlage der *Statistischen Auswertung* nach Abschnitt 3.1.3.4.1),
2. Haufwerksporosität (auf der Grundlage des *Flüssigkeitsaufnahmeverfahrens* nach Abschnitt 3.1.2.2),
3. Rohdichte (nach Abschnitt 3.1.3.6)

zu beurteilen.

Aufgrund der Tatsache, daß die **gefügedichten Betondeckschichten** der betrachteten Außenwandelemente Schichtdicken aufweisen können, welche unterhalb einer für eine Ermittlung der Festigkeit nach DIN 1048 [20] geforderten Schichtdicke von 50 mm liegen, war die Notwendigkeit gegeben, das *Verfahren zur Festigkeitsermittlung dünnenschichtiger Betonbauteile* zu entwickeln (siehe Abschnitt 3.2.3.1).

Voraussetzung für die Ermittlung der Festigkeit der gefügedichten Betondeckschichten nach diesem Verfahren ist eine Mindestschichtdicke von 20 mm und ein Bohrkerndurchmesser von 50 mm. Mit den in Tabelle 3.10 angegebenen Faktoren kann dann die experimentell ermittelte Festigkeit des zylindrischen Probekörpers des Durchmessers 50 mm und einer Höhe von 20 ... 50 mm zur Einordnung in eine Betonfestigkeitsklasse nach DIN 1045 [19] auf die Festigkeit eines Würfels einer Kantenlänge von 200 mm bezogen werden.

Zylinderhöhe h [mm]	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40
-----------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

<i>Abminderungsfaktor</i>	0.900	0.886	0.872	0.858	0.844	0.830	0.816	0.802	0.788	0.774	0.760
<i>Zylinderhöhe h [mm]</i>	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30
<i>Abminderungsfaktor</i>	0.760	0.746	0.732	0.718	0.704	0.690	0.676	0.662	0.648	0.634	0.620
<i>Zylinderhöhe h [mm]</i>	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20
<i>Abminderungsfaktor</i>	0.620	0.600	0.580	0.560	0.540	0.520	0.500	0.480	0.460	0.440	0.420

Tabelle 3.10 : *Abminderungsfaktoren für zylindrische Betonprobekörper eines Durchmessers von $d = 50$ mm und einer Höhe von $h = 20 \dots 50$ mm zur Einordnung in eine Betonfestigkeitsklasse nach DIN 1045 [19] nach dem Verfahren zur Festigkeitsermittlung dünn-schichtiger Betonbauteile*

Mit diesen Faktoren ist es möglich, eine Einordnung der Festigkeiten der gefügedichten Betondeckschichten in das Vorschriftenwerk der DIN [19, 20] vorzunehmen.

Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten werden somit aufgrund der in diesem Kapitel entwickelten Verfahren, der erläuterten mathematischen Zusammenhänge und des ausgewiesenen Parameterspektrums beurteilbar

1. als tragende Bauteile nach Kapitel 4,
2. als sanierungsfähige Elemente im Rahmen von standsicherheitserhöhenden Maßnahmen nach Kapitel 5.

4 Statisch-konstruktive Beurteilung

4.1 Stand der Technik

Für die Planung von Gebäuden in Montagebauweise wurden in der ehemaligen DDR eine Reihe von Vorschriften und Richtlinien entwickelt, welche dem erreichten Stand der Technik entsprachen und in bestimmten Zeiträumen Anwendung fanden.

Diese Vorschriften können in zwei Vorschriftenbereiche unterteilt werden. Während in Tabelle 3.1 die Vorschriften zur Prüfung und Klassifizierung von Beton angegeben werden, enthält Tabelle 4.1 die Vorschriften zur statisch-konstruktiven und baulichen Durchbildung.

Vorschriften	Gültigkeitszeitraum
<i>Vorschriftenwerk der TGL</i>	
TGL 0-1045 (4.63, Berechnung nach n-Verfahren) [107]	04/63 - 12/73
TGL 0-1047 [108]	10/63 - 01/86
TGL 0-1045 (4.73, Berechnung nach Traglastverfahren) [107]	01/74 - 01/86
TGL 11422 (Berechnung nach Traglastverfahren) [110]	10/61 - 01/86
TGL 33405 (Berechnung nach der Methode der Grenzzustände) [114]	01/86 - 09/90
TGL 33406 [115]	03/83 - 09/90
<i>Zum Vorschriftenwerk der TGL erläuternde Vorschriften in Bezug auf Gebäude in Montagebauweise</i>	
FSB-Entwurf Nr. 112-0318 [35]	12/61 - 07/66
Richtlinien für die Blockbauweise [97]	01/63 - 07/66
Richtlinien für die Projektierung von Bauten in Wandkonstruktion in Montagebauweise [38]	07/66 - 07/77
Bauten in Wandkonstruktion, Grundlagen für Konstruktion und statische Berechnung [38]	06/67 - 07/77
Richtlinien für die Projektierung von Bauten in Wandkonstruktion in Montagebauweise, 1. Nachtrag [38]	03/70 - 07/77
Vorschrift Nr. 50/76 der Staatlichen Bauaufsicht einschließlich 1. bis 4. Ergänzung [120]	07/77 - 03/89
Richtlinie Wandbauten in Montagebauweise, Tafel-, Streifen- und Blockkonstruktionen, bauliche Durchbildung und Berechnung [96]	03/89 - 09/90

Tabelle 4.1 : *Vorschriften zur statisch-konstruktiven und baulichen Durchbildung von Gebäuden*

Zusätzlich war eine Vielzahl von Sonder- und Ausnahmegenehmigungen der Staatlichen Bauaufsicht der DDR gültig, welche hier jedoch wegen deren Vielfalt nicht wiedergegeben werden sollen.

Aufgrund der chronologischen Reihenfolge dieser Vorschriften und der Tatsache, daß bestimmte Vorschriften und Richtlinien sich gegenseitig bedingen, können in Tabelle 4.2 Berechnungskomplexe, nach welchen Gebäude mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten geplant werden konnten und gegebenenfalls eine Nachbewertung der Gebäude zum jetzigen Zeitpunkt erfolgen kann, angegeben werden.

Berechnungskomplex	1	2	3	4	5

etwaiger Gültigkeitszeitraum	bis 1970	1970 - 1980	1980 - 1990	1980 - 1990	ab 1990
Bemessungsvorschrift	TGL 0-1045(4.63) TGL 0-1047	TGL 0-1045(4.73) TGL 0-1047 TGL 11422	TGL 0-1045(4.73) TGL 0-1047 TGL 11422	TGL 33405 TGL 33406 ETV - Beton	DIN 1045 DIN 4232 DIN 1053
Bemessungsverfahren	n - Verfahren	Traglastverfahren	Traglastverfahren	Methode der Grenzzustände	Traglastverfahren
Betonprüfvorschrift	TGL 0-1045 TGL 0-1048	TGL 21094 TGL 21096 TGL 0-1048 DAMW-VW 968	TGL 33411 ETV Beton	TGL 33411 ETV Beton	DIN 1045 DIN 1048 DIN 4232
Prüfgrundlage	Würfel 200 mm Kantenlänge	Würfel 200 mm Kantenlänge	Würfel 150 mm Kantenlänge	Würfel 150 mm Kantenlänge	Würfel 200 mm Kantenlänge
Nachweis für Klassifizierung	Mittelwert	2.3%-Fraktilwert nach Studentverteilung	5%-Fraktilwert nach Normalverteilung	5%-Fraktilwert nach Normalverteilung	kleinster Einzelwert und Mittelwert
Bezeichnung	Betongüte B W_{28}	Betongüte LB R_{28}	Betongüte LB R^N	Betonklasse LBk R^N	Betonklasse LB β_{W200}
Rechenfestigkeit	W_{28}	R_{28}	$R_{28} = R^N$	$R_b = 0.56 * R^N$	$\beta_R = 0.3 \dots 0.75 * \beta_{WN}$
im haufwerksporigen Leichtbeton geforderter Sicherheitsfaktor gegenüber Würfelprüfung	B 50 : $\gamma = 5.0$ \geq B 80 : $\gamma = 4.0$	$3.33 \leq \gamma \leq 3.78$	$3.33 \leq \gamma \leq 3.78$	$2.00 \leq \gamma \leq 3.47$	$4.00 \leq \gamma \leq 10.00$ in Abhängigkeit von der Schlankheit und der Betonfestigkeitsklasse
Querschnittsgeometrie	einschichtig	einschichtig	einschichtig	einschichtig	einschichtig
Festigkeitskennwerte des haufwerksporigen Leichtbetons für eine Zuordnung der einzelnen Berechnungskomplexe [N/mm ²]					

Tabelle 4.2 : Übersicht über die bei der ursprünglichen Planung von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton angewendeten und heute anwendbaren Verfahren

Nach dem Beitritt der ehemaligen DDR zur Bundesrepublik Deutschland und dem damit verbundenen Inkrafttreten des Vorschriftenwerkes der DIN kann ein weiterer Berechnungskomplex auf der Grundlage der DIN zum Nachweis der Standsicherheit von Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten angewendet werden. Dieser Tatsache wird in Tabelle 4.2 ebenfalls Rechnung getragen.

Allen Berechnungskomplexen ist gemeinsam, daß sie auf dem Nachweis eines einschichtigen Querschnitts unter Zugrundelegung eines homogenen und isotropen Materials beruhen.

Betrachtet man nun den in Bild 2.1 dargestellten typischen Aufbau der tragenden Schichten eines Außenwandelementes aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten, so wird ersichtlich, daß es sich hierbei nicht um einen homogenen und isotropen Baustoff handelt.

Da jedoch für eine solche mehrschichtige Verbundkonstruktion aus Betonen verschiedener Festigkeiten und Elastizitätsmoduli zur Entstehungszeit der Gebäude mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten keine genormten Berechnungsverfahren existierten, wurden bei der ursprünglichen Planung solcher Außenwandelemente auch die gefügedichten Betondeckschichten mit den Materialparametern der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton in Ansatz gebracht.

Damit wurden allerdings die tatsächlich gegebenen stofflichen und geometrischen Parameter wie

- unterschiedliche Druckfestigkeiten der Materialien der einzelnen Schichten,
- unterschiedliche Dehn- und Biegesteifigkeiten der einzelnen Schichten,
- unterschiedliches Spannungs-Verformungs-Verhalten der Materialien der einzelnen Schichten,
- vorhandene Verbundfestigkeit zwischen den Schichten,
- unterschiedliche Temperaturbeanspruchungen der einzelnen Schichten

nicht oder nur unzureichend erfaßt.

Kann der Standsicherheitsnachweis eines Gebäudes mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten unter Anwendung eines der genormten Berechnungskomplexe erbracht werden, ist die exakte Erfassung dieser stofflichen und geometrischen Parameter auch nicht erforderlich. Die Praxis zeigt jedoch, daß der Standsicherheitsnachweis unter Zugrundelegung eines einschichtigen Querschnitts besonders für Gebäude mit hoher Geschoßanzahl heute nur selten erbracht werden kann [41, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 53, 54]. Begründet ist dies darin, daß die geplanten Parameter der Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons in der Fertigung nicht immer erreicht wurden (siehe Kapitel 3) und zusätzliche Beanspruchungen infolge von Fassadensanierungsmaßnahmen zu berücksichtigen sind (siehe Kapitel 1).

Durch die Anwendung eines Nachweisverfahrens, welches die real am Bauwerk vorhandenen Gegebenheiten berücksichtigt, können die Tragreserven des vorhandenen mehrschichtigen Querschnitts rechnerisch erschlossen und die real vorhandenen Eigenschaften in den Nachweis einbezogen werden.

Aus der Literatur sind eine Reihe von vorschritunabhängigen Verfahren bekannt, welche sich mit mehrschichtigen Konstruktionen beschäftigen. Mit diesen Verfahren werden jedoch Konstruktionen betrachtet,

- welche vorrangig einer Biegebeanspruchung unterzogen werden und bei denen die Tragfähigkeit der mittleren Schicht zum Teil vernachlässigt werden kann [2, 3, 4, 31, 68, 103, 104, 122],
- bei denen die einzelnen Schichten aus Stahlbeton oder Epoxidharzbeton bestehen und die Erfassung der Beanspruchungen in Vertikalstäben und Umschnürungsbügeln im Vordergrund steht [11, 32, 33, 70, 82, 106],
- bei denen die Deckschichten aus Metall bestehen, die mittlere Schicht Strukturierungen aufweisen kann und die einzelnen Schichten durch Verdübelungen miteinander verbunden sein können [6, 67],
- bei denen die einzelnen Schichten des Querschnitts abschnittsweise hergestellt werden und bereits einer Beanspruchung infolge Biegung oder Längskraft unterworfen sein können [1, 66],
- bei denen der Querschnitt aus Stahlbeton besteht und einer Momenten- und Normalkraftbeanspruchung unterzogen wird [69, 101].

In Auswertung der Literatur konnte kein sofort nutzbares, einfach handhabbares Berechnungsverfahren zur statisch-konstruktiven Beurteilung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten, welche vorrangig durch Kräfte in Elementebene beansprucht werden, gefunden werden.

Deshalb war es erforderlich, Verfahren zu entwickeln und zu beurteilen, welche die spezifischen Gegebenheiten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten in statisch-konstruktiver Hinsicht beschreiben.

4.2 Entwicklung und Beurteilung ingenieurtheoretischer Modelle für den Nachweis mehrschichtiger Querschnitte

4.2.1 Vergleichsflächenverfahren

Aufgrund der Tatsache, daß bei der ursprünglichen Planung die gefügedichten Betondeckschichten mit den Materialeigenschaften des haufwerksporigen Leichtbetons in Ansatz gebracht wurden, kann man annehmen, daß die unterschiedlichen Festigkeiten der einzelnen Schichten durch Vergleichsflächen gleicher Festigkeit berücksichtigt und auf das ursprünglich geplante

Sicherheitsniveau bezogen werden können. Voraussetzung dafür ist, daß die Elastizitätsmoduli aller Schichten gleich sind und alle Schichten an der Lastabtragung beteiligt sein können.

Unter Zugrundelegung eines einheitlichen Berechnungskomplexes nach Tabelle 4.2 erfolgt der Vergleich nach der Gleichung

$$\eta = (d_1 * \beta_{R1,vorh} + d_2 * \beta_{R2,vorh} + d_3 * \beta_{R3,vorh}) / ((d_1 + d_2 + d_3) * \beta_{R2,gepl}) * 100 \quad [\%] \quad (4.1)$$

mit

η	-	Prozentualer Anteil des vorhandenen Sicherheitsniveaus am geplanten Sicherheitsniveau	[%]
d_1	-	Schichtstärke der inneren gefügedichten Betondeckschicht	[mm]
d_2	-	Schichtstärke der mittleren Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	[mm]
d_3	-	Schichtstärke der äußeren gefügedichten Betondeckschicht	[mm]
$\beta_{R1,vorh}$	-	vorhandene Festigkeit der inneren gefügedichten Betondeckschicht	[N/mm ²]
$\beta_{R2,vorh}$	-	vorhandene Festigkeit der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	[N/mm ²]
$\beta_{R3,vorh}$	-	vorhandene Festigkeit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht	[N/mm ²]
$\beta_{R2,gepl}$	-	geplante Festigkeit der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	[N/mm ²]

Erhält man einen Wert $\eta \geq 100 \%$, so kann das vorhandene Sicherheitsniveau entsprechend der ursprünglich geplanten Sicherheit als ausreichend angesehen werden.

Diesem Verfahren liegt das einfachste theoretische Modell zugrunde. Die erhaltenen Ergebnisse können aus diesem Grund nur in grober Näherung das tatsächliche Tragverhalten einer mehrschichtigen Konstruktion widerspiegeln, da die Gegebenheiten

- außermittige Beanspruchung,
- unterschiedliche Dehn- und Biegesteifigkeiten der einzelnen Schichten,
- unterschiedliches Spannungs-Verformungs-Verhalten der Materialien der einzelnen Schichten,
- vorhandene Verbundfestigkeit zwischen den Schichten,
- unterschiedliche Temperaturbeanspruchungen der einzelnen Schichten

in diese Form der Nachweisführung nicht einfließen.

4.2.2 Steifigkeitsverfahren

Bei diesem Verfahren wird von der Überlegung ausgegangen, daß steifere Materialien größere Beanspruchungen aufnehmen können. Aufgrund der Tatsache, daß die einzelnen Schichten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten unterschiedliche Steifigkeiten aufweisen, werden die angreifenden Beanspruchungen den einzelnen Schichten in Abhängigkeit der unterschiedlichen Steifigkeiten zugewiesen.

Bei dieser Art der Nachweisführung von mehrschichtigen Querschnitten ist es erforderlich, die angreifenden Beanspruchungen bezüglich ihrer Einwirkungsweise auf das Bauteil zu differenzieren. Es wird unterschieden in

- Einwirkungen, die das Bauteil auf Biegung beanspruchen und
- Einwirkungen, die das Bauteil auf Längskraft beanspruchen.

Erstere Einwirkungen werden in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Biegesteifigkeiten den einzelnen Schichten zugewiesen, während letztere hinsichtlich der Dehnsteifigkeiten der Schichten verteilt werden.

Der Nachweis erfolgt getrennt für die einzelnen Schichten nach Gleichung (4.2), wobei die für den Nachweis maßgebenden maximalen Spannungen infolge Biegebeanspruchung auf der sicheren Seite liegend als konstant über den Querschnitt angesetzt werden.

$$\sigma_i = (N / A_{\text{ges}} * k_{D,i} + M / W_{\text{ges}} * k_{B,i}) * A_{\text{ges}} / A_i \leq \beta_{R,i} / \gamma_i \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.2)$$

mit

$$k_{D,i} = E_i * A_i / \sum_{i=1}^n (E_i * A_i) \quad [-]$$

$$k_{B,i} = E_i * I_i / \sum_{i=1}^n (E_i * I_i) \quad [-]$$

i	-	betrachtete Schicht	[-]
n	-	Anzahl der betrachteten Schichten	[-]
σ_i	-	vorhandene Spannung in der betrachteten Schicht	[N/mm ²]
N	-	angreifende Normalkraft	[N]
M	-	angreifendes Moment	[Nmm]
E_i	-	Elastizitätsmodul des Materials der betrachteten Schicht	[N/mm ²]
A_i	-	Fläche der betrachteten Schicht	[mm ²]
A_{ges}	-	Fläche des Gesamtquerschnitts	[mm ²]
W_{ges}	-	Widerstandsmoment des Gesamtquerschnitts	[mm ³]
I_i	-	Trägheitsmoment der betrachteten Schicht	[mm ⁴]
$\beta_{R,i}$	-	Rechenfestigkeit des Materials der betrachteten Schicht	[N/mm ²]

—

γ_i - erforderliches Sicherheitsniveau in der betrachteten Schicht [-]

Obwohl dieses Verfahren gegenüber dem Vergleichsflächenverfahren das tatsächliche Tragverhalten mehrschichtiger Querschnitte genauer erfassen kann, werden auch hier die Gegebenheiten

- unterschiedliches Spannungs-Verformungs-Verhalten der Materialien der einzelnen Schichten,
- vorhandene Verbundfestigkeit zwischen den Schichten,
- unterschiedliche Temperaturbeanspruchungen der einzelnen Schichten

innerhalb des Nachweisverfahrens nicht berücksichtigt.

4.2.3 Finite Elemente Methode

Die Finite Elemente Methode (FEM), welche im Prinzip uneingeschränkt für alle Bereiche der Technik anwendbar ist [81, 99], hat die Berechnungsmöglichkeiten von bisher schwierig oder gar nicht zu lösenden Problemen enorm erweitert.

Der Grundgedanke eines solchen Berechnungsverfahrens ist, die zu betrachtende Konstruktion durch miteinander gekoppelte Unterstrukturen zu erfassen, aus welchen man repräsentative Elemente auswählt und ihre physikalischen Eigenschaften näherungsweise beschreibt. Bei diesen Elementen handelt es sich um endlich kleine (finite) Elemente, deren partielle Differentialgleichungen durch Diskretisierung auf ein System linear algebraischer Gleichungen reduziert werden. Damit lassen sich jede Art der Belastung, beliebige Lagerung, veränderliche geometrische Abmessungen und wechselnde Materialeigenschaften berücksichtigen. Als Ergebnis der Gleichungsauflösung erhält man die Verschiebungen der Knoten zwischen den Elementen, aus denen sich dann die Verformungen der Gesamtkonstruktion und die daraus resultierenden Spannungen ermitteln lassen.

Aufgrund dieser gegebenen Voraussetzungen ist eine numerische Beschreibung von Außenwandelementen aus haufwerksporigen Leichtbetonelementen mit gefügedichten Betondeckschichten mittels der Finiten Elemente Methode grundsätzlich möglich.

Wie in [10, 100, 102] anhand von Beispielrechnungen für Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten unter Zuhilfenahme der FEM-Rechenprogramme

- ANSYS® Rev. 5.2
- SOFiSTiK ASS - Statik allgemeiner Scheibensysteme

nachgewiesen wurde, ergeben sich jedoch nachfolgende Einschränkungen der Anwendbarkeit :

- Die Berechnungsergebnisse hängen sehr stark von den implementierten Materialgesetzen, der Anzahl der Knoten und der Form der finiten Elemente ab.
- Die vorhandenen baustofflichen Parameter, wie z.B. differente Spannungs-Verformungs-Beziehungen für Zug- und Druckbeanspruchung, sind nur schwer durch die in den FEM-Rechenprogrammen geforderten einheitlichen Größen erfaßbar.
- Eine Simulation des Tragverhaltens unter Berücksichtigung der zu erwartenden Ribbildung im Bereich von auftretenden Zugbeanspruchungen in der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton, welche mit Hilfe des FEM-Programms ANSYS® Rev. 5.2 über eine Ribanalyse möglich wäre, scheitert daran, daß eine Reihe von dafür notwendigen Parametern, wie z.B.
 - Kraft-Riß-Aufweitungskurve,
 - Initialrißlängen,
 - Schubübertragungskoeffizient am geschlossenen Riß,
 - Schubübertragungskoeffizient am offenen Riß,
 - Spannungsintensitätsfaktoren,
 - erforderliche Riböffnungsarbeit
 insbesondere für die Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton und den Verbundbereich zwischen dieser Schicht und den gefügedichten Betondeckschichten aufgrund von bisher nicht durchgeführten Untersuchungen zu diesen Baustoffkennwerten nicht angegeben werden können.

Obwohl das Verfahren der Finiten Elemente das tatsächliche Tragverhalten mehrschichtiger Konstruktionen theoretisch am exaktesten erfassen kann, ist es aufgrund dieser Aussagen für eine quantitative Erfassung des Bruchverhaltens und des überkritischen Tragverhaltens von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten nur unter den o.g. Voraussetzungen geeignet. Diese Methode kann jedoch zur qualitativen Beurteilung des Tragverhaltens unter idealisierten Bedingungen, wie z.B. elastisches Materialverhalten und starrer Verbund zwischen den Schichten, herangezogen werden (siehe Abschnitt 4.3.4.2.).

4.2.4 Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte

Dem Vergleichsflächenverfahren und dem Steifigkeitsverfahren ist gemeinsam, daß sie einfach und schnell Ergebnisse liefern, welche das tatsächliche Tragverhalten mehrschichtiger Querschnitte jedoch nur näherungsweise erfassen. Mit der Finiten Elemente Methode kann dagegen zwar das Tragverhalten mathematisch exakter erfaßt werden, aber es ist nur sehr aufwendig handhabbar und kann nur unter bestimmten Voraussetzungen zum Einsatz kommen.

Ein praxisgerechtes Nachweisverfahren sollte daher in bezug auf den Inhalt der Finiten Elemente Methode entsprechen und die Handhabbarkeit des Vergleichsflächenverfahrens bzw. des Steifigkeitsverfahrens besitzen.

Der Grund für die mathematisch exaktere Erfassung des Tragverhaltens mittels FEM besteht darin, daß das vorhandene komplexe Verhalten der Materialien des Querschnitts näherungsweise in der Berechnung beschrieben werden kann. Gelingt es, die Beschreibung dieses Materialverhaltens in ein einfacheres Berechnungsverfahren einfließen zu lassen, kann der Forderung nach der hinreichend genauen Erfassung des Tragverhaltens und der einfachen Handhabbarkeit entsprochen werden.

In [66] wird ein solches Berechnungsverfahren, in welchem das komplexe Materialverhalten näherungsweise durch Einbeziehung von Spannungs-Verformungs-Beziehungen beschrieben wird, für abschnittsweise hergestellte Stahlbeton- und Spannbetonquerschnitte entwickelt. Untersucht werden dabei Querschnitte, welche durch nachträgliches Ergänzen mit Ortbeton und Einbau nachträglicher Spannlieder oder ganzer Spannbeton- bzw. Stahlträger verändert wurden. Es wird in diesem Verfahren davon ausgegangen, daß die einzelnen Teile des Querschnitts in der Regel nicht spannungslos zusammengefügt werden, da Schnittreaktionen aus Eigengewicht, Montage, bereits erfolgter Vorspannung oder Vorbiegung (z.B. elastisch gekrümmter Träger) mit eingebracht werden. Darüber hinaus können auch Querschnitte erfaßt werden, bei denen zu beliebigen Zeitpunkten Querschnittsteile wieder entfernt oder gegen andere ausgetauscht werden können.

Dieses Verfahren wird in [101] aufgegriffen und hinsichtlich der Berechnung der Nulllinienlage unter Normalkraft- und zweiachsiger Momentenbeanspruchung unter Berücksichtigung der Forderungen der TGL 33405 [114] für beliebig geformte Stahlbetonquerschnitte erweitert.

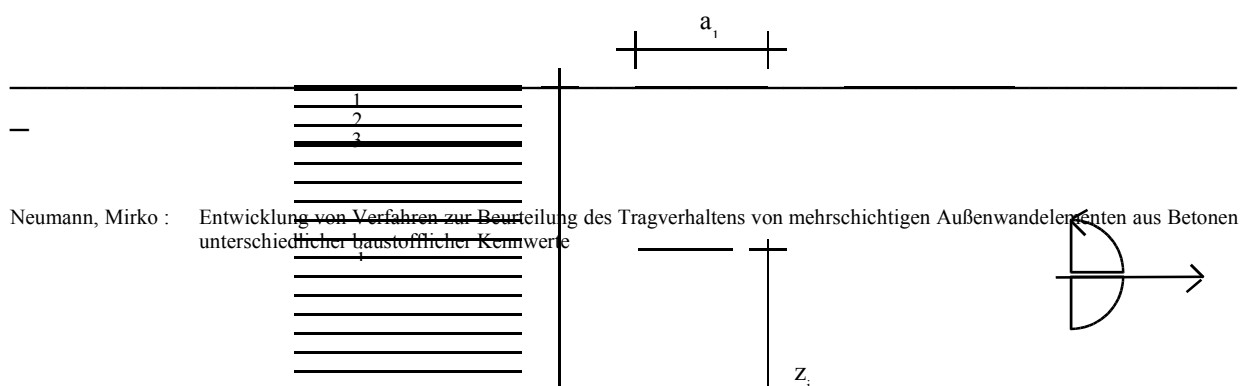
In [69] wird über die erfolgreiche Anwendung dieses Berechnungsverfahrens auf ein im Vorfeld experimentell untersuchtes Stahlbetonelement berichtet. Somit kann davon ausgegangen werden, daß durch Einbeziehung der Spannungs-Verformungs-Beziehungen das komplexe Materialverhalten des Querschnitts hinreichend genau beschrieben werden kann.

Da jedoch die genannten Voraussetzungen für die Anwendung des Verfahrens für Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten nicht gegeben sind, ist es erforderlich, die in [66] gelegten theoretischen Grundlagen mit den in [69, 101] erfolgten Veränderungen im Hinblick auf eine Anwendbarkeit auf diese Außenwandelemente zu modifizieren [91].

Dazu wird vorausgesetzt :

- ebene Querschnitte bleiben unter Beanspruchung eben (Hypothese von Bernoulli ist gültig),
- die Spannungs-Verformungs-Beziehungen der Materialien der einzelnen Schichten sind bekannt und mathematisch beschreibbar,
- es besteht vollflächiger Verbund zwischen den einzelnen Schichten des Querschnitts.

Der Querschnitt wird in Elemente nach Bild 4.1 aufgeteilt und eine Verformungsebene des Querschnittes wird angenommen.



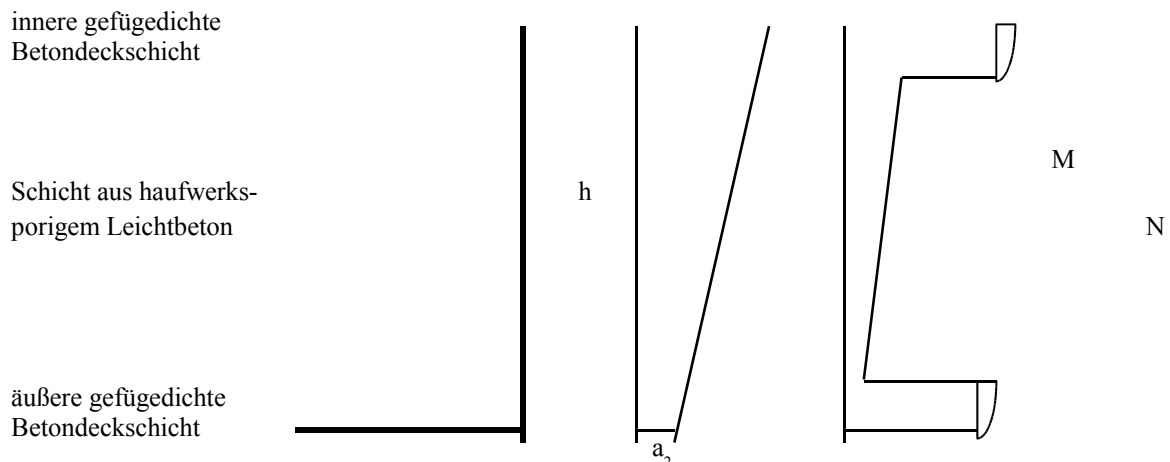


Bild 4.1 : *Mehrschichtiger Querschnitt mit Verformungen und Spannungen in den Flächenelementen*

Der somit für jedes Element bekannte Verformung kann aus der Kenntnis der Spannungs-Verformungs-Beziehung die dazugehörige Spannung zugeordnet werden. Durch Summation der daraus für die einzelnen Elemente resultierenden Kräfte werden die Schnittreaktionen des Querschnitts bestimmt. Da diese mit den angreifenden Beanspruchungen im Gleichgewicht stehen müssen, können durch eine Iteration in Anlehnung an das Newtonsche Näherungsverfahren die den angreifenden Beanspruchungen entsprechende Verformungsebene und daraus folgend die vorhandenen Spannungen ermittelt werden.

Folgender Rechengang wird durchgeführt :

1. Rechenschritt : Vorgabe einer Verformungsebene

Die Verformungsebene kann durch die Beziehung

$$\varepsilon_i = (a_1 - a_2) * z_i / h + a_2 \quad [\text{‰}] \quad (4.3)$$

mit

ε_i	-	Verformung im Schwerpunkt des Flächenelements	[‰]
a_1	-	Verformung am inneren Rand des Querschnitts	[‰]
a_2	-	Verformung am äußeren Rand des Querschnitts	[‰]
h	-	Querschnittsstärke	[mm]
z_i	-	geometrischer Ort des Flächenelements	[mm]

beschrieben werden. Dabei werden die Koeffizienten a_1 und a_2 zunächst geschätzt, um mit der Iteration beginnen zu können.

2. Rechenschritt : *Ermittlung der Spannungen in jedem Flächenelement*

Infolge der angenommenen Verformungsebene ist für jedes einzelne Flächenelement die Verformung bekannt. Aus den für die Materialien der einzelnen Schichten spezifischen Spannungs-Verformungs-Beziehungen können die Spannungen in den einzelnen Flächenelementen ermittelt werden.

Die so ermittelten Spannungen werden über den Querschnitt aufsummiert und ergeben den Vektor der Schnittreaktionen k .

3. Rechenschritt : *Gleichgewichtskontrolle*

Da die Verformungsebene im 1. Rechenschritt angenommen wurde, wird der Vektor der Schnittreaktionen k zunächst nicht mit dem Vektor der angreifenden Beanspruchungen s im Gleichgewicht stehen :

$$s \neq k \tag{4.4}$$

mit

$$s = \begin{pmatrix} N \\ M \end{pmatrix}$$

$$k = \begin{pmatrix} N_0 \\ M_0 \end{pmatrix}$$

N_0	-	im Querschnitt erzeugte Normalkraft	[N]
M_0	-	im Querschnitt erzeugtes Moment	[Nmm]
N	-	angreifende Normalkraft	[N]
M	-	angreifendes Moment	[Nmm]

4. Rechenschritt : *Korrektur der Verformungsebene*

Die Rechenschritte 1 bis 3 ergaben die Schnittkräfte N_0 und M_0 . Diese Schritte werden zweimal für geänderte Koeffizienten a_1 und a_2 wiederholt. Man erhält

- mit $a_1 + \delta$ und a_2 die Schnittreaktionen N_1 und M_1 ,
- mit a_1 und $a_2 + \delta$ die Schnittreaktionen N_2 und M_2 .

Für den konstanten Parameter δ werden Werte zwischen 10^{-2} ‰ und 10^{-4} ‰ empfohlen. Die so mit korrigierten Schnittreaktionen werden zur Matrix B zusammengefaßt :

$$B = \begin{pmatrix} N_1 & N_2 \\ M_1 & M_2 \end{pmatrix} \tag{4.5}$$

Die Matrix C ermittelt sich wie folgt :

$$C = \begin{pmatrix} N_1 - N_0 & N_2 - N_0 \\ M_1 - M_0 & M_2 - M_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Ist G der Wert der Matrix C, so ermitteln sich die verbesserten Koeffizienten a_1 und a_2 zu

$$a_{1,neu} = a_{1,alt} + \delta / G * (C_{22} * (N - N_0) - C_{12} * (M - M_0)) \quad [‰] \quad (4.7)$$

$$a_{2,neu} = a_{2,alt} + \delta / G * (-C_{21} * (N - N_0) + C_{11} * (M - M_0)) \quad [‰] \quad (4.8)$$

Diese Iteration wird solange wiederholt, bis der Vektor der Schnittreaktionen mit dem Vektor der angreifenden Beanspruchungen im Gleichgewicht steht.

Nach DIN 1045 [19] wird die in einer Betonkonstruktion vorhandene Sicherheit als Verhältnis von Rechenfestigkeit zu vorhandener Spannung im Querschnitt definiert. Da es sich bei dieser Sicherheit um eine globale Sicherheit handelt, belegt man die aus der Spannungs-Verformungs-Beziehung ermittelte Spannung zunächst mit einem sehr großen Sicherheitsfaktor und führt die oben beschriebene Iteration durch. Der Querschnitt wird nun zunächst nicht in der Lage sein, die vorgegebene Beanspruchung aufzunehmen. Durch schrittweise Reduzierung des angenommenen Sicherheitsniveaus, welche innerhalb einer weiteren Iterationsschleife durchgeführt wird, kann die in der Konstruktion vorherrschende Sicherheit ermittelt werden.

Der angegebene Rechengang kann rechentechnisch leicht umgesetzt werden [84] und führt bereits nach wenigen Iterationsschritten zur Lösung der Aufgabenstellung.

Mit diesem Verfahren, dem *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte*, ist nunmehr die Möglichkeit gegeben, auf relativ einfachem und schnellem Weg die spezifischen Gegebenheiten mehrschichtiger Konstruktionen hinreichend genau zu beschreiben und auf Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten anzuwenden.

4.3 Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte auf Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten

4.3.1 Spannungs-Verformungs-Beziehungen

4.3.1.1 Beton

Aufgrund der Tatsache, daß die Spannungs-Verformungs-Beziehungen der Materialien der einzelnen Schichten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten einen entscheidenden Einfluß auf das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte haben, hängt von der Exaktheit, mit der diese Beziehungen das tatsächliche Materialverhalten widerspiegeln, die Gültigkeit der mit dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte erhaltenen Ergebnisse ab.

Für die gefügedichten Betondeckschichten kann die Spannungs-Verformungs-Beziehung nach DIN 1045 [19] angegeben werden :

$$\varepsilon > 0 ‰ \quad : \quad \sigma_B = 0 \quad [N/mm^2] \quad (4.9)$$

$$0 ‰ \geq \varepsilon > -2.0 ‰ \quad : \quad \sigma_B = \beta_{R,B} * (|\varepsilon| - |\varepsilon|^2 / 4) \quad [N/mm^2] \quad (4.10)$$

$$-2.0 ‰ \geq \varepsilon \geq -3.5 ‰ \quad : \quad \sigma_B = \beta_{R,B} \quad [N/mm^2] \quad (4.11)$$

$$\varepsilon < -3.5 ‰ \quad : \quad \sigma_B = 0 \quad [N/mm^2] \quad (4.12)$$

mit

ε	-	Verformung des Betons	[‰]
σ_B	-	rechnerische Spannung für die im Beton herrschende Verformung	[N/mm ²]
$\beta_{R,B}$	-	Rechenwert der Druckfestigkeit des Betons	[N/mm ²]

Eine grafische Darstellung dieser Beziehung enthält Bild 4.2.

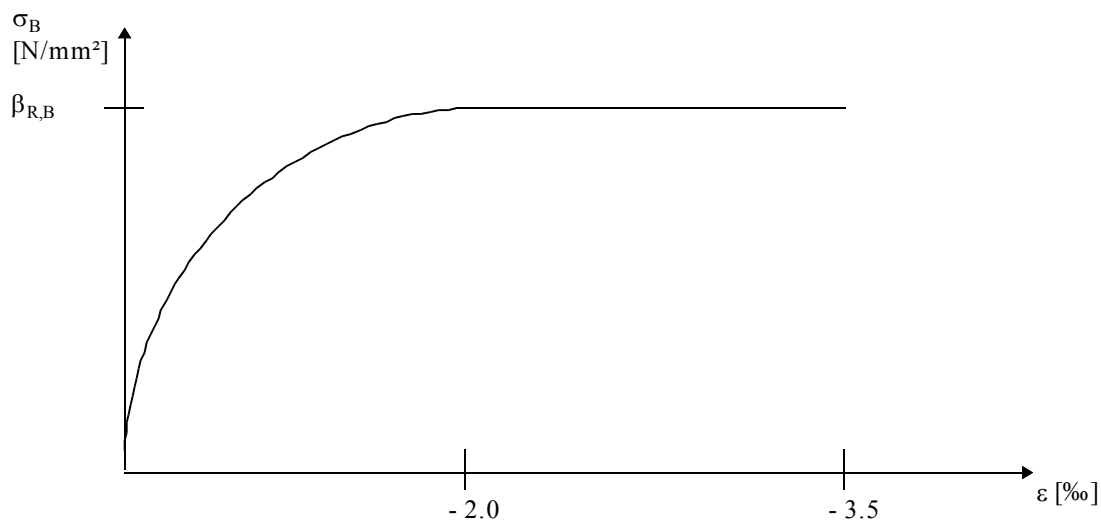


Bild 4.2 : Darstellung der Spannungs-Verformungs-Beziehung für Beton nach DIN 1045 [19]

Die Rechenfestigkeit des Betons ermittelt sich nach folgender Beziehung :

$$\beta_{R,B} = f_B * \beta_{WN,B} \quad [N/mm^2] \quad (4.13)$$

mit

- $\beta_{\text{WN,B}}$ - Nennfestigkeit des Betons nach DIN 1045 [19] [N/mm²]
 f_{B} - Abminderungsfaktor nach Tabelle 4.3 zur Erfassung der verminderten Druckfestigkeit des Betons bei hoher und dauernd einwirkender Spannung [19] [-]

Betonfestigkeitsklasse nach DIN 1045 [19]	B 5	B 10	B 15	B 25	B 35	B 45	B 55
Abminderungsfaktor f_{B}	0.70	0.70	0.70	0.70	0.65	0.60	0.55

Tabelle 4.3 : Abminderungsfaktoren zur Bestimmung der Rechenfestigkeit des Betons nach DIN 1045 [19]

4.3.1.2 Haufwerksporiger Leichtbeton

4.3.1.2.1 Vorschriftenwerk der TGL

Für den haufwerksporigen Leichtbeton wurde nach TGL 11422 [110] folgende Annahme für die Spannungs-Verformungs-Beziehung getroffen :

$$\varepsilon_b > 0 \text{ ‰} \quad : \quad \sigma_b = 0 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.14)$$

$$0 \text{ ‰} \geq \varepsilon_b \geq -2.0 \text{ ‰} \quad : \quad \sigma_b = \max \sigma_b * (1 - (1 + 0.5 * \varepsilon_b)^2) \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.15)$$

$$\varepsilon_b < -2.0 \text{ ‰} \quad : \quad \sigma_b = 0 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.16)$$

mit

- ε_b - Verformung des haufwerksporigen Leichtbetons [%o]
 σ_b - rechnerische Spannung für die im haufwerksporigen Leichtbeton herrschende Verformung [N/mm²]
 $\max \sigma_b$ - Druckfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons [N/mm²]

Diese Beziehung ist in Bild 4.3 grafisch dargestellt.

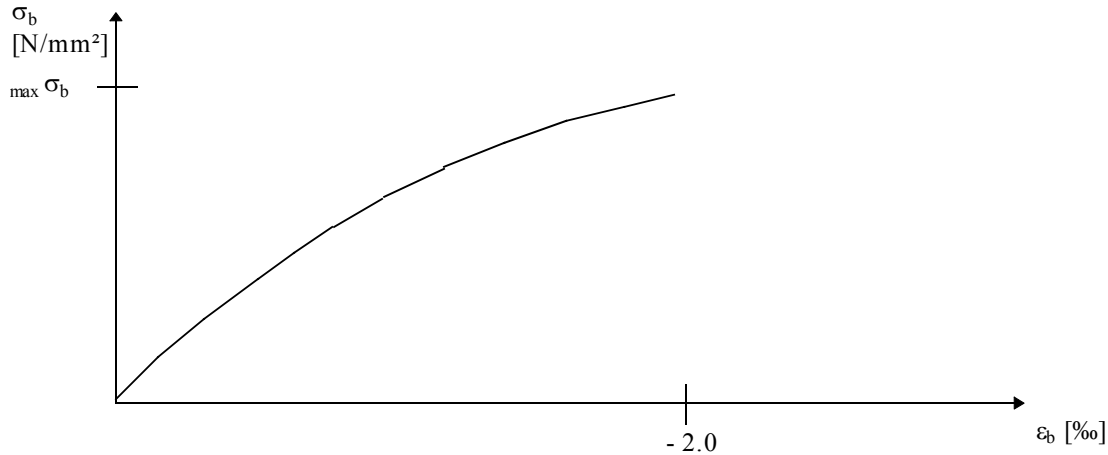


Bild 4.3 : Darstellung der Spannungs-Verformungs-Beziehung für haufwerksporigen Leichtbeton nach TGL 11422 [110]

Der Einfluß der in TGL 33403 [113] angegebenen Rohdichteabhängigkeit des Elastizitätsmoduls auf die Spannungs-Verformungs-Beziehung des haufwerksporigen Leichtbetons ist zum jetzigen Zeitpunkt aus dem Vorschriftenwerk der TGL nicht mehr nachvollziehbar. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß sich infolge der differenten Rohdichten Kurvenscharen der Spannungs-Verformungs-Beziehungen ergeben, welche durch die in Bild 4.3 angegebene Beziehung hinreichend genau beschrieben werden.

4.3.1.2.2 Vorschriftenwerk der DIN

Im Vorschriftenwerk der DIN wird für haufwerksporigen Leichtbeton in der dafür anzuwendenden DIN 4232 [23] keine explizite Aussage zu einer Spannungs-Verformungs-Beziehung des haufwerksporigen Leichtbetons getroffen. Es wird dort jedoch darauf hingewiesen, daß die DIN 1045 [19] sinngemäß anzuwenden ist. Somit ergibt sich für haufwerksporigen Leichtbeton folgende Spannungs-Verformungs-Beziehung :

$$\varepsilon > 0 \text{ ‰} \quad : \quad \sigma_{\text{HLB}} = 0 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.17)$$

$$0 \text{ ‰} \geq \varepsilon > -2.0 \text{ ‰} \quad : \quad \sigma_{\text{HLB}} = \beta_{\text{R,HLB}} * (|\varepsilon| - |\varepsilon|^2 / 4) \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.18)$$

$$-2.0 \text{ ‰} \geq \varepsilon \geq -3.5 \text{ ‰} \quad : \quad \sigma_{\text{HLB}} = \beta_{\text{R,HLB}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.19)$$

$$\varepsilon < -3.5 \text{ ‰} \quad : \quad \sigma_{\text{HLB}} = 0 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.20)$$

mit

ε	-	Verformung des haufwerksporigen Leichtbetons	[‰]
σ_{HLB}	-	rechnerische Spannung für die im haufwerksporigen Leichtbeton herrschende Verformung	[N/mm ²]
$\beta_{\text{R,HLB}}$	-	Rechenwert der Druckfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons	[N/mm ²]

Diese Beziehung, welche auch als Parabel-Rechteck-Beziehung bezeichnet wird, ist in Bild 4.4 grafisch dargestellt.

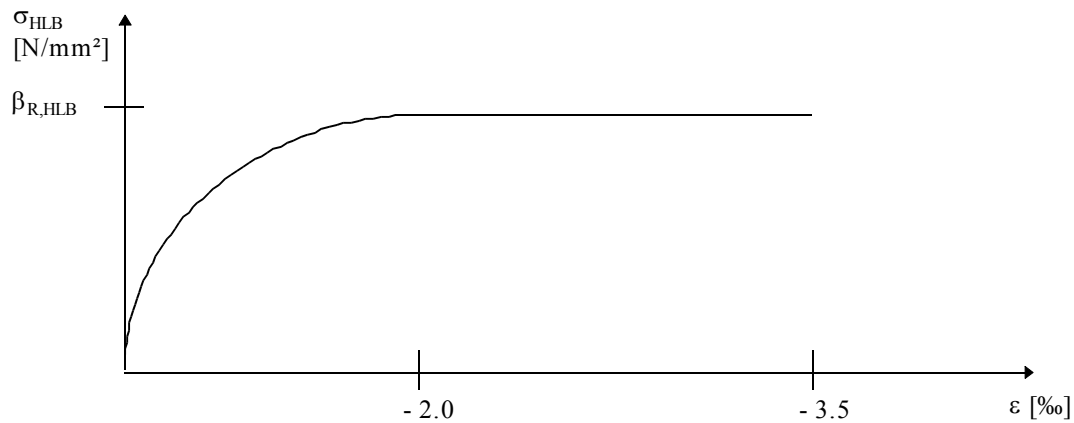


Bild 4.4 : *Darstellung der Parabel-Rechteck-Beziehung als Spannungs-Verformungs-Beziehung für haufwerksporigen Leichtbeton nach DIN 4232 [23] in Anlehnung an DIN 1045 [19]*

Die DIN 1045 [19] legt weiterhin fest, daß in Vereinfachung der in Bild 4.4 dargestellten Parabel-Rechteck-Beziehung auch die nachfolgende bilineare Spannungs-Verformungs-Beziehung angewendet werden kann :

$$\varepsilon > 0 \text{ ‰} \quad : \quad \sigma_{\text{HLB}} = 0 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.21)$$

$$0 \text{ ‰} \geq \varepsilon > -1.35 \text{ ‰} \quad : \quad \sigma_{\text{HLB}} = \beta_{\text{R,HLB}} / 1.35 * |\varepsilon| \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.22)$$

$$-1.35 \text{ ‰} \geq \varepsilon \geq -3.5 \text{ ‰} \quad : \quad \sigma_{\text{HLB}} = \beta_{\text{R,HLB}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.23)$$

$$\varepsilon < -3.5 \text{ ‰} \quad : \quad \sigma_{\text{HLB}} = 0 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.24)$$

Diese Beziehung ist grafisch in Bild 4.5 dargestellt.

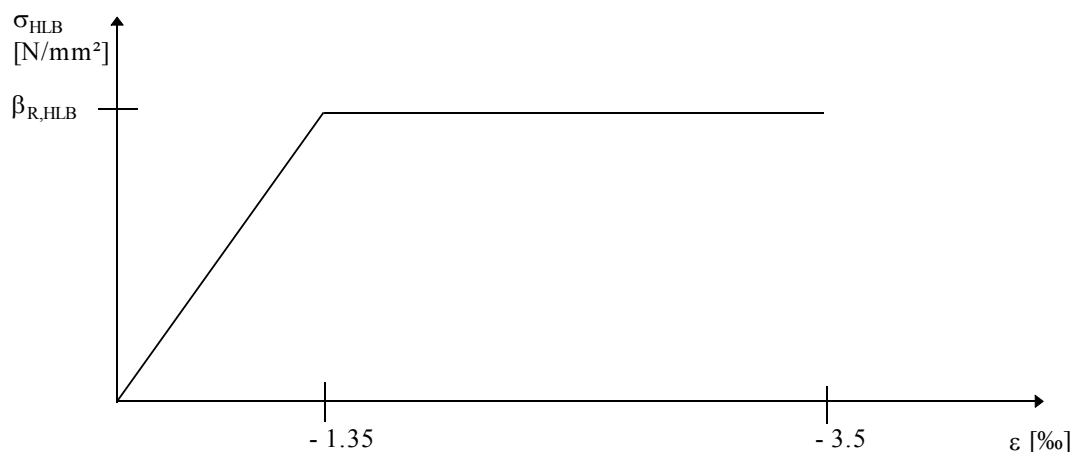


Bild 4.5 : Darstellung der bilinearen Beziehung als vereinfachte Spannungs-Verformungs-Beziehung für haufwerksporigen Leichtbeton nach DIN 4232 [23] in Anlehnung an DIN 1045 [19]

4.3.1.2.3 Europäisches Vorschriftenwerk

Das in Entwurfsfassung vorliegende Europäische Vorschriftenwerk enthält die DIN EN 1520 [27], welche als Ersatz für DIN 4232 [23] vorgesehen ist.

Nach dieser Vorschrift gilt für Bauteile, deren Querschnitte ausschließlich Längsdruckspannungen unterworfen sind, folgende Spannungs-Verformungs-Beziehung :

$$\varepsilon > 0 \text{ ‰} \quad : \quad f_{cd} = 0 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.25)$$

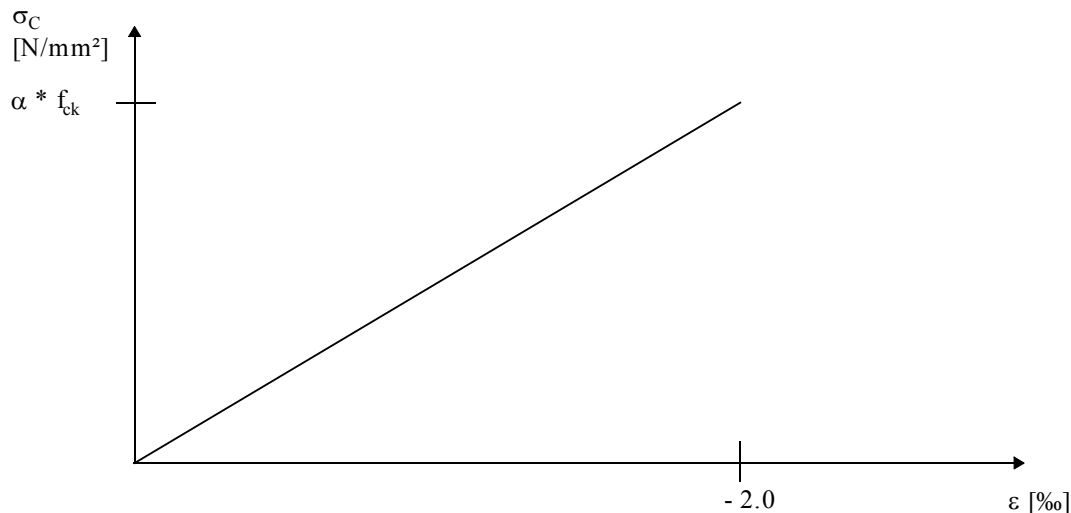
$$0 \text{ ‰} \geq \varepsilon \geq -2.0 \text{ ‰} \quad : \quad f_{cd} = \alpha * f_{ck} / 2 * |\varepsilon| \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.26)$$

$$\varepsilon < -2.0 \text{ ‰} \quad : \quad f_{cd} = 0 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.27)$$

mit

ε	-	Verformung des haufwerksporigen Leichtbetons	[‰]
f_{cd}	-	rechnerische Spannung für die im haufwerksporigen Leichtbeton herrschende Verformung	[N/mm ²]
f_{ck}	-	charakteristische Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons	[N/mm ²]
α	-	Abminderungskoeffizient zur Erfassung der verminderten Druckfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons bei hoher und dauernd einwirkender Spannung, im allgemeinen gilt $\alpha = 0.80$ [27]	[-]

In Bild 4.6 ist diese Beziehung grafisch dargestellt.



Aufgrund der Tatsache, daß der an bestehenden Gebäuden vorhandene haufwerksporige Leichtbeton der ehemaligen DDR in seinen baustofflichen Parametern sehr stark streut und vielfältige stoffliche Zusammensetzungen aufweisen kann (siehe Kapitel 3), kann die relativ aufwendige Untersuchung zur Bestimmung einer Spannungs-Verformungs-Beziehung nur stichprobenartigen Charakter haben.

Gesichertes Erkenntnis einer solchen Untersuchung kann demzufolge nur eine Aussage zum qualitativen Verlauf der Spannungs-Verformungs-Beziehung sein.

In [57, 63] wurde an quaderförmigen Probekörpern der Betonfestigkeitsklasse LB 2 nach DIN 4232 [23] die Spannungs-Verformungs-Beziehung bestimmt. Folgende Ergebnisse wurden erhalten :

- Der Verlauf der Spannungs-Verformungs-Beziehung entspricht qualitativ der in Bild 4.7 angegebenen Darstellung,
- Für den charakteristischen Wert der Bruchstauchung ε_{Br} wurden Werte von 1.60 ... 2.00 ‰ bei einem Mittelwert von 1.80 ‰ ermittelt.

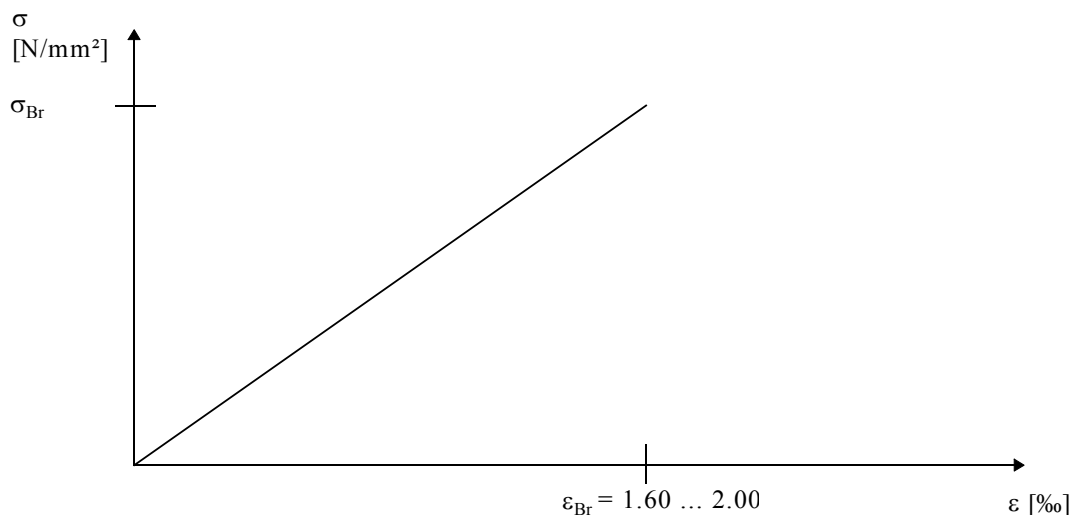


Bild 4.7 : *Qualitativer Verlauf der Spannungs-Verformungs-Beziehung für haufwerksporigen Leichtbeton nach den in [57, 63] durchgeführten Versuchen*

4.3.1.2.5 Annahmen für das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte

Die in den Vorschriftenwerken angegebenen und anhand von Versuchen ermittelten Spannungs-Verformungs-Beziehungen für haufwerksporigen Leichtbeton weisen Unterschiede

- im qualitativen Verlauf,
- in der Bruchgrenzstauchung,
- im Verhältnis von plastischem und elastischem Materialverhalten

auf. In Bild 4.8 werden diese Unterschiede grafisch dargestellt.

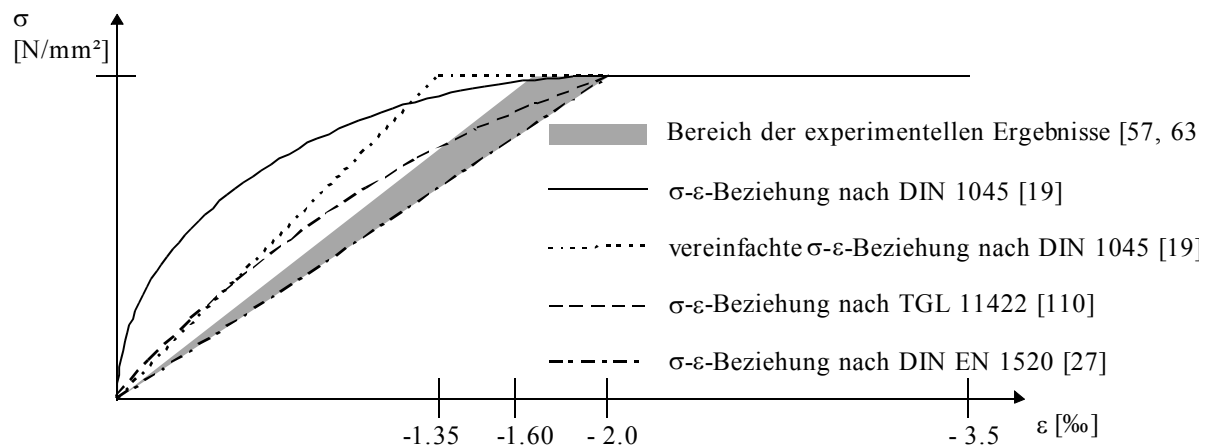


Bild 4.8 : Gegenüberstellung der Spannungs-Verformungs-Beziehungen für haufwerksporigen Leichtbeton

Betrachtet man den Bereich der auf der Grundlage experimenteller Untersuchungen in [57, 63] erhaltenen Ergebnisse, so muß festgestellt werden, daß keine der genormten Spannungs-Verformungs-Beziehungen den erhaltenen Ergebnissen eindeutig zugeordnet werden kann.

Während die nichtlinearen Spannungs-Verformungs-Beziehungen nach TGL 11422 [110] und nach DIN 1045 [19] dem in den experimentellen Untersuchungen erhaltenen qualitativen Verlauf nicht entsprechen, stellt die Spannungs-Verformungs-Beziehung nach DIN EN 1520 [27] den oberen Grenzwert des in den experimentellen Untersuchungen erhaltenen Spektrums dar.

Ausgehend von der Tatsache, daß die durchgeführten experimentellen Untersuchungen nur stichprobenartigen Charakter haben und somit nicht ausgeschlossen werden kann, daß haufwerksporige Leichtbetone vorliegen, deren Spannungs-Verformungs-Beziehungen unterhalb des ermittelten Spektrums liegen, werden für das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte folgende Annahmen getroffen :

- Aufgrund der in [57, 63] durchgeführten Untersuchungen wird eine lineare Spannungs-Verformungs-Beziehung bis zum Bruch des haufwerksporigen Leichtbetons angenommen.
- Ein plastisches Materialverhalten des haufwerksporigen Leichtbetons ist nicht vorhanden.
- Die rechnerische Bruchstauchung des haufwerksporigen Leichtbetons wird auf der sicheren Seite liegend in Anlehnung an die derzeit für eine Nachweisführung von Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten gültige vereinfachte Spannungs-Verformungs-Beziehung nach DIN 1045 [19] zu $\varepsilon_{Br} = 1.35$ ‰ angenommen.

Es ergibt sich somit folgende, im Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte für die Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton anzuwendende, Spannungs-Verformungs-Beziehung :

$$\varepsilon > 0 \text{ ‰} \quad : \quad \sigma_{\text{HLB}} = 0 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.28)$$

$$0 \text{ ‰} \geq \varepsilon \geq -1.35 \text{ ‰} \quad : \quad \sigma_{\text{HLB}} = \beta_{\text{R,HLB}} / 1.35 * |\varepsilon| \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.29)$$

$$\varepsilon < -1.35 \text{ ‰} \quad : \quad \sigma_{\text{HLB}} = 0 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.30)$$

mit

ε	-	Verformung des haufwerksporigen Leichtbetons	[‰]
σ_{HLB}	-	rechnerische Spannung für die im haufwerksporigen Leichtbeton herrschende Verformung	[N/mm ²]
$\beta_{\text{R,HLB}}$	-	Rechenwert der Druckfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons	[N/mm ²]

Diese Beziehung ist in Bild 4.9 grafisch dargestellt.

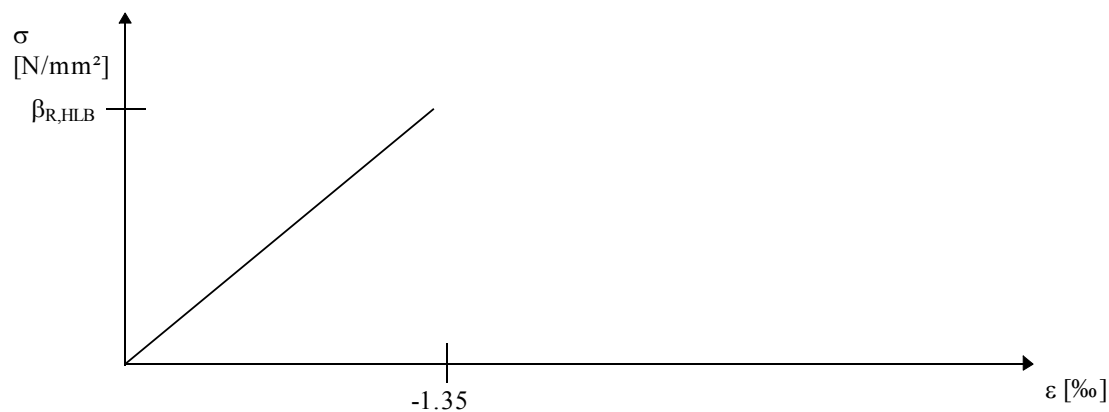


Bild 4.9 : *Darstellung der für das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte angenommenen Spannungs-Verformungs-Beziehung für haufwerksporigen Leichtbeton*

Die Rechenfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons ist dabei abhängig von der Schlankheit der Konstruktion. Wird die Rechenfestigkeit nach Gleichung (4.31) ermittelt, kann ein Versagen der Konstruktion infolge eines Stabilitätsproblems ausgeschlossen werden [23].

$$\beta_{\text{R,HLB}} = f_{\text{HLB}} * \beta_{\text{WN,HLB}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.31)$$

mit

$\beta_{\text{WN,HLB}}$ - Nennfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons

—

f_{HLB} - nach DIN 4232 [23] [N/mm²]
 - Abminderungsfaktor nach Tabelle 4.4 zur Erfassung der verminderten Druckfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons bei hoher und dauernd einwirkender Spannung und zum Ausschließen eines Stabilitätsproblems [23] [-]

Abminderungsfaktor f_{HLB}	h_k / d			
Betonfestigkeitsklasse nach DIN 4232 [23]	≤ 5	10	15	20
LB 2	0.75	0.68	0.53	0.30
LB 5	0.72	0.60	0.48	0.30
LB 8	0.71	0.62	0.47	0.30

Tabelle 4.4 : Abminderungsfaktoren zur Bestimmung der Rechenfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons nach DIN 4232 [23]

mit

h_k - Knicklänge der betrachteten Konstruktion, für Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit einer Geschoßhöhe von 2.80 m gilt : $h_k = 2800$ [88] [mm]
 d - Stärke der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton [mm]

Die aus diesen Beziehungen ermittelbaren Elastizitätsmoduli liegen in der Größenordnung der in DIN 4232 [23] angegebenen Werte und unterschreiten diese auf der sicheren Seite liegend, wie Tabelle 4.5 zeigt.

Betonfestigkeitsklasse nach DIN 4232 [23]	Aus Gleichung (4.28) ... (4.30) ermittelter Elastizitätsmodul [N/mm ²]	Elastizitätsmodul nach DIN 4232 [23] [N/mm ²]
LB 2	444 ... 1111	2000
LB 5	1111 ... 2667	4000
LB 8	1778 ... 4207	6000

Tabelle 4.5 : Vergleich der Elastizitätsmoduli des haufwerksporigen Leichtbetons nach Gleichung (4.28) ... (4.30) und DIN 4232 [23]

4.3.2 Statisches System

Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten wurden in einer Reihe von verschiedenen Typenserien gefertigt (siehe Tabelle 1.1 und 2.2).

Der Aufbau der Außenwandelemente, die konstruktive Verbindung der Elemente untereinander und die Einbindung der Geschoßdecken wurde in diesen Typenserien auf verschiedene Art und Weise ausgeführt.

Aufgrund der Tatsache, daß

- die Beanspruchung der Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton infolge Eigen-, Verkehrs- und Windlasteinwirkung mit der Gebäudehöhe zunimmt,
- die Typenserie P2 mit einer maximalen Geschoßanzahl von 11 Geschossen ca. 99 % des Gebäudebestandes an Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten einnimmt (siehe Tabelle 1.1 und 2.2),

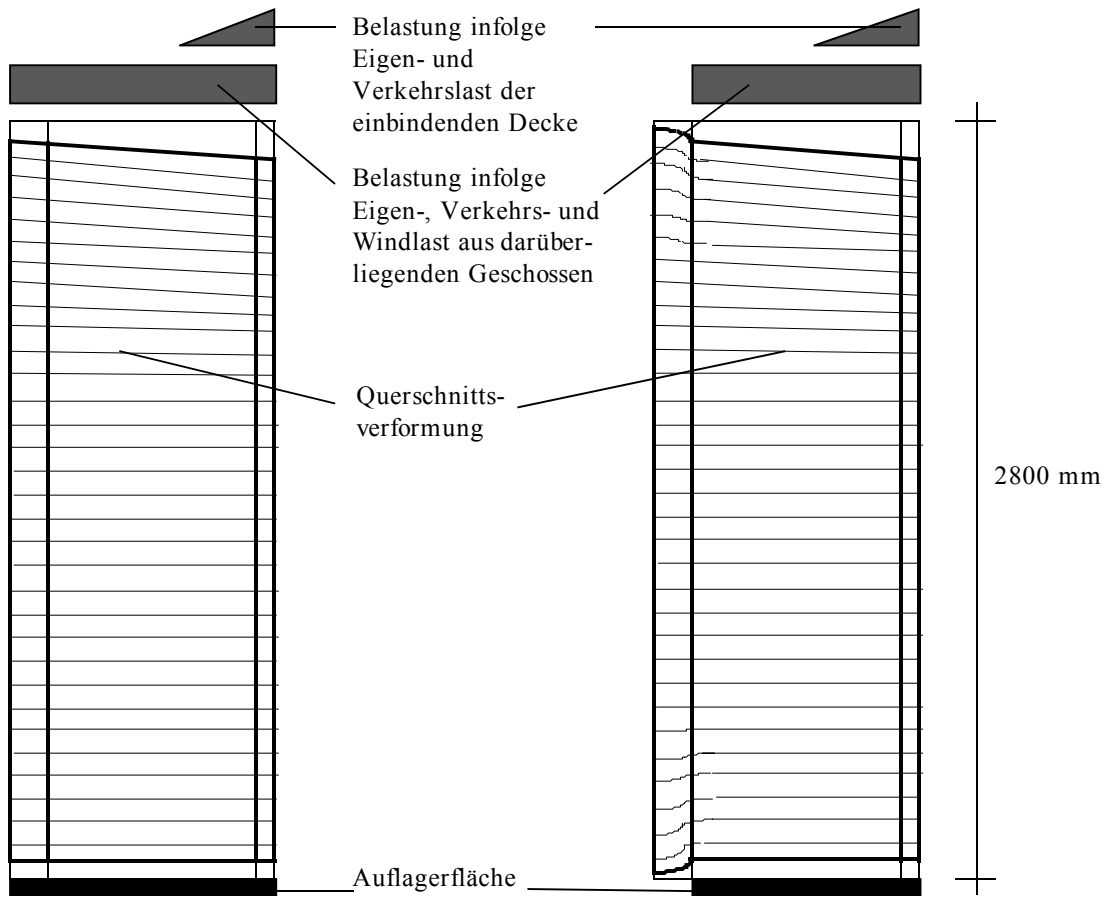
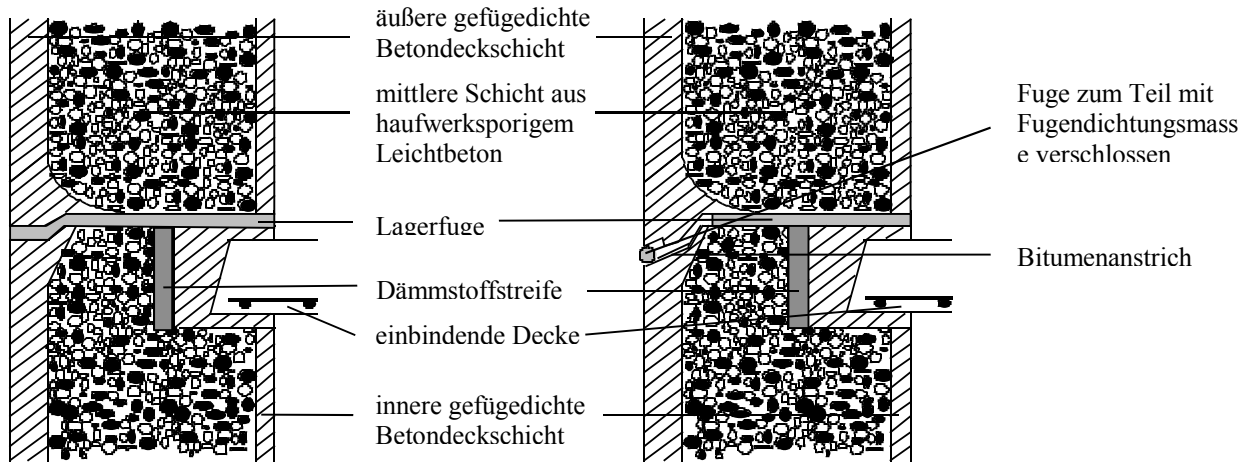
sollen im folgenden insbesondere die spezifischen Gegebenheiten dieses Gebäudetyps der Plattenbauweise in die Betrachtung einfließen. Für die anderen Typenserien sind die nachfolgenden Ausführungen entsprechend anwendbar.

Bei der Typenserie P2, welche eine Querwandbauweise darstellt, unterliegen die für eine statische Nachweisführung des Gebäudes maßgebenden tragenden Giebelscheiben aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten folgenden Einwirkungsarten :

1. Eigenlast der Giebelscheibe, Eigen- und Verkehrslast der in die Giebelscheiben einbindenden Decken und Eigen-, Verkehrs- und Schneelast der Dachkonstruktion,
2. Windlast senkrecht zur Giebelscheibenebene,
3. Windlast in Giebelscheibenebene,
4. Temperaturbeanspruchung.

Nach [5] kann davon ausgegangen werden, daß die Kombination von Einwirkungsart 1 und Einwirkungsart 3 die maßgebende Einwirkungskombination darstellt. Zu beachten ist dabei, daß im Rahmen dieser Arbeit der Einfluß der Einwirkungsart 4 unberücksichtigt bleiben kann, da sich nach Kapitel 1 der Zwang zur statisch-konstruktiven Beurteilung nur durch die zusätzlich eingetragenen Beanspruchungen infolge von Fassadensanierungsmaßnahmen mit außenliegender Wärmedämmung, welche die Temperaturbeanspruchung auf einen zu vernachlässigenden Umfang reduziert, ergibt.

Die schematische Darstellung der Ausbildung der Deckenknoten, die Beanspruchungen der Außenwandelemente aus dieser Einwirkungskombination und die daraus resultierenden Querschnittsverformungen sind für die Typenserie P2 Bild 4.10 zu entnehmen. Dabei ist zwischen Systemen mit geschlossener und offener Horizontalfuge zu unterscheiden.



a) System mit geschlossener Horizontalfuge

b) System mit offener Horizontalfuge

Bild 4.10 : *Ausbildung der Deckenknoten, Beanspruchungen und daraus resultierende Querschnittsverformungen der Außenwandelemente der Typenserie P2*

Aus diesen Gegebenheiten läßt sich das in Bild 4.11 dargestellte, für Systeme mit offener und mit geschlossener Horizontalfuge gleichermaßen gültige, idealisierte statische System herleiten.

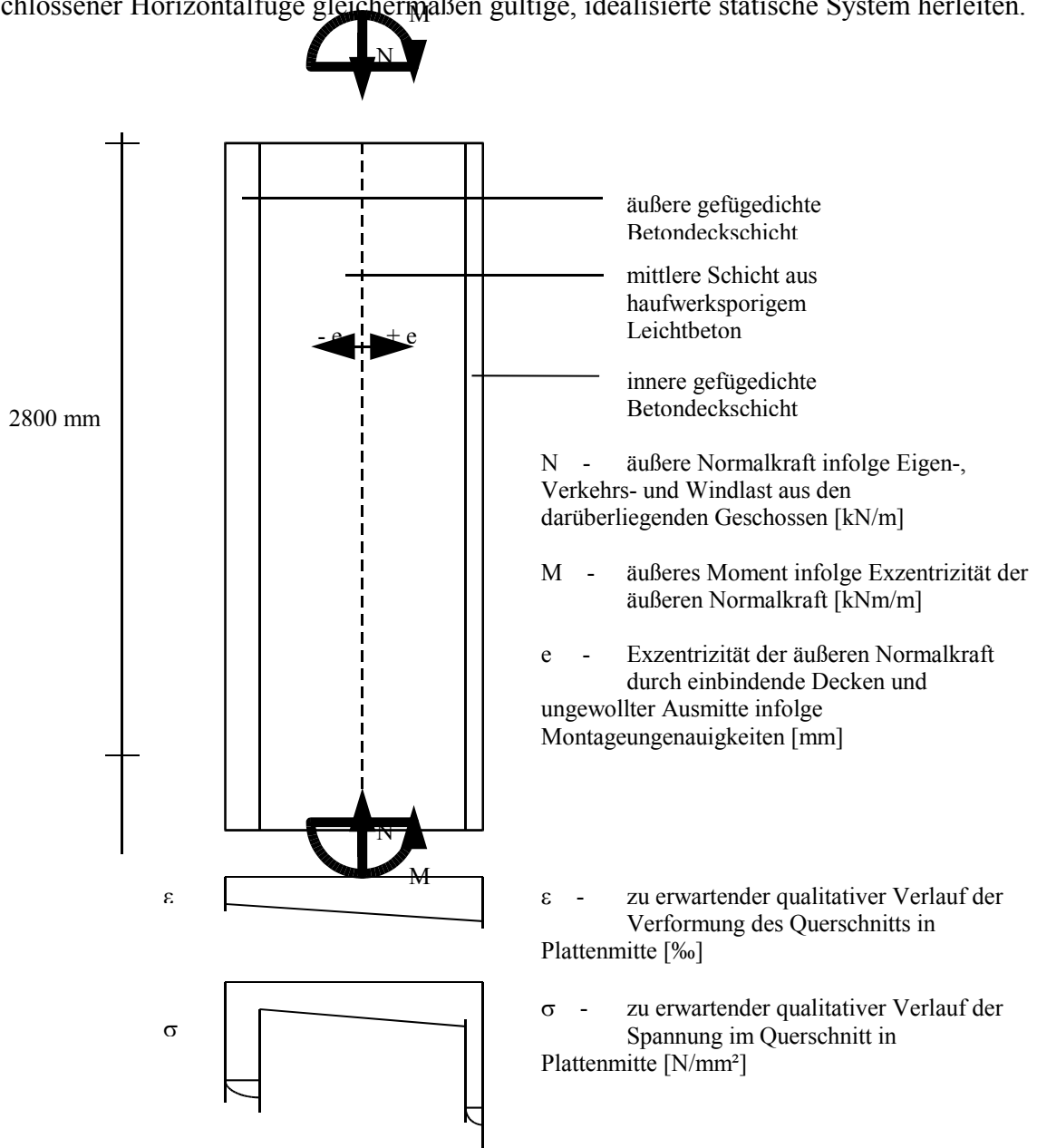


Bild 4.11 : *Idealisiertes statisches System und zu erwartender qualitativer Verlauf der Verformung und Spannung für Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichteten Betondeckschichten in Plattenmitte*

4.3.3 Lasteinleitungsproblematik

—

Für Systeme mit geschlossener Horizontalfuge ist das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit dem in Bild 4.11 dargestellten Moment M und der Normalkraft N als äußere Beanspruchungen aufgrund nachfolgender Tatsachen ohne weitere Modifizierung anwendbar :

- Die Lasten werden aufgrund der spezifischen Art der Deckennotenausbildung relativ gleichmäßig in alle Schichten des Außenwandelementes eingetragen.
- Aufgrund der eben über die Plattenhöhe verlaufenden Querschnittsverformungen in Bild 4.10 und der damit verbundenen Gültigkeit der Hypothese von Bernoulli vom Ebenbleiben der Querschnitte als Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte ist ein qualitativ und quantitativ ähnlicher Verlauf der Verformungs- und daraus folgend der Spannungsverteilung über die gesamte Plattenhöhe zu erwarten.
- Der Nachweis der Konstruktion in Plattenmitte kann damit als repräsentativ für die gesamte Platte angesehen werden.

Für Systeme mit offener Horizontalfuge gelten diese Aussagen nicht. Da nach Bild 4.10 bei diesen Systemen die Lasten nur über die innere gefügedichte Betondeckschicht und die Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton direkt in das Außenwandelement eingetragen werden, entsteht sowohl im Kopf- als auch im Fußbereich des Außenwandelementes im Verbundbereich zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton eine Lasteinleitungsproblematik.

In Bild 4.12 ist diese Lasteinleitungsproblematik im Bereich des Verbundes zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton dargestellt.

In diesem Bereich werden durch die besondere Art der Lasteinleitung bei Systemen mit offener Horizontalfuge Zugspannungen erzeugt

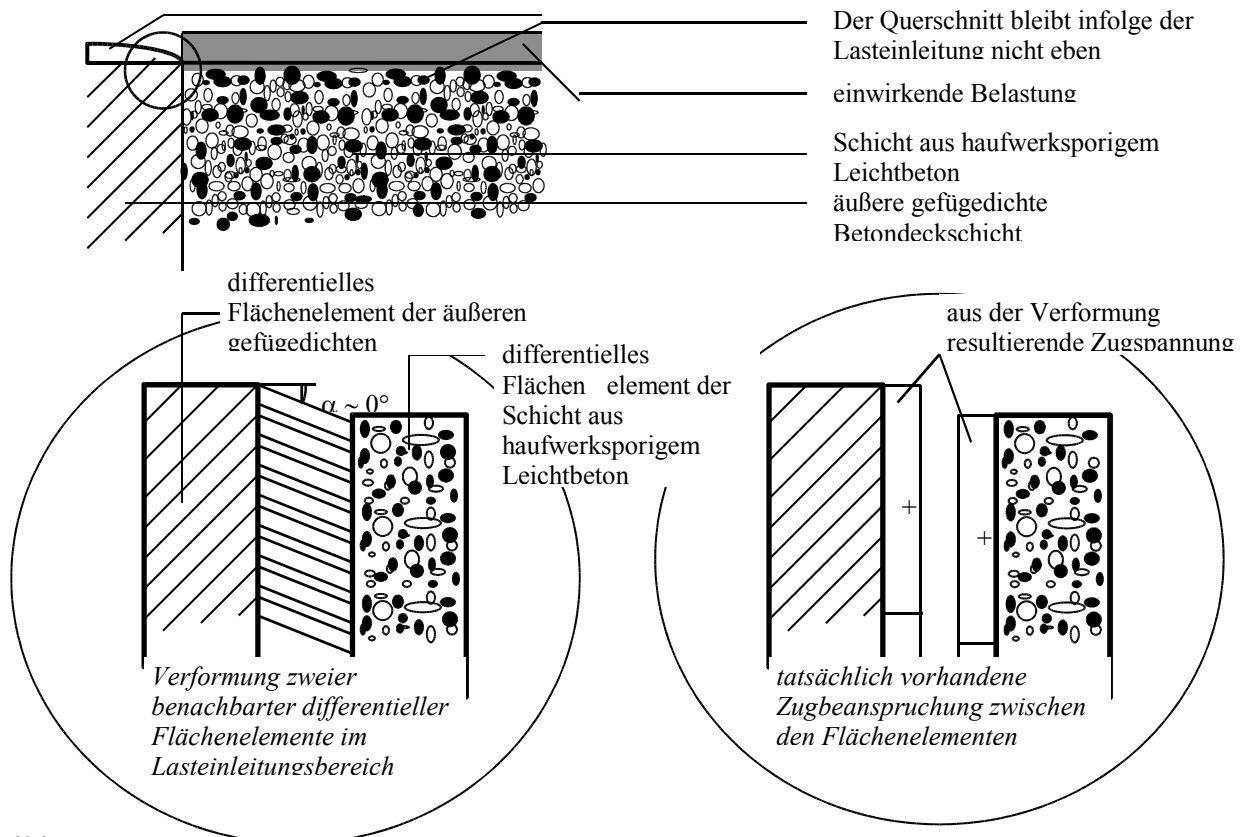


Bild 4.12 : Eintragung von Zugspannungen in den Verbundbereich zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton infolge der Lasteinleitungsproblematik

Da die Lasteinleitung in diesem Bereich über die gegenüber der äußeren Betondeckschicht verformungsfähigere Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton erfolgt, werden in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton Zugspannungen erzeugt. Diese beeinflussen die Querschnittsverformungen im Bereich der Lasteinleitung derart, daß von einem Ebenbleiben der Querschnitte nicht mehr ausgegangen werden kann (siehe Bild 4.10).

Die Hypothese von Bernoulli vom Ebenbleiben der Querschnitte, welche die Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte darstellt, ist demzufolge für den Lasteinleitungsbereich nicht mehr gültig und der Nachweis der Konstruktion in Plattenmitte ist damit nicht mehr repräsentativ für die gesamte Platte.

Denkbar wäre nun die Anwendung eines modifizierten Berechnungsverfahrens auf der Grundlage einer unebenen Verformungsfigur des Querschnitts in einer möglichst großen Anzahl von Schnitten in verschiedenen Plattenhöhen unter Berücksichtigung des für diesen Schnitt wirkenden Einflusses der erzeugten Zugspannungen.

—

Eine solche Vorgehensweise kann jedoch aufgrund der schwer zu definierenden unebenen Verformungsfigur des Querschnitts und der Tatsache, daß aus dieser Verformungsfigur keine Betondruckspannungen sondern die für den Lasteinleitungsbereich maßgebenden Betonzugspannungen abzuleiten wären, nicht als praxisgerecht angesehen werden.

Erforderlich ist für Systeme mit offener Horizontalfuge vielmehr die Einführung weiterer Parameter in das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte, um mit minimalem Rechenaufwand eine gesicherte Aussage zum Tragverhalten und zur Standsicherheit dieser Konstruktionen treffen zu können.

4.3.4 Entwicklung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung

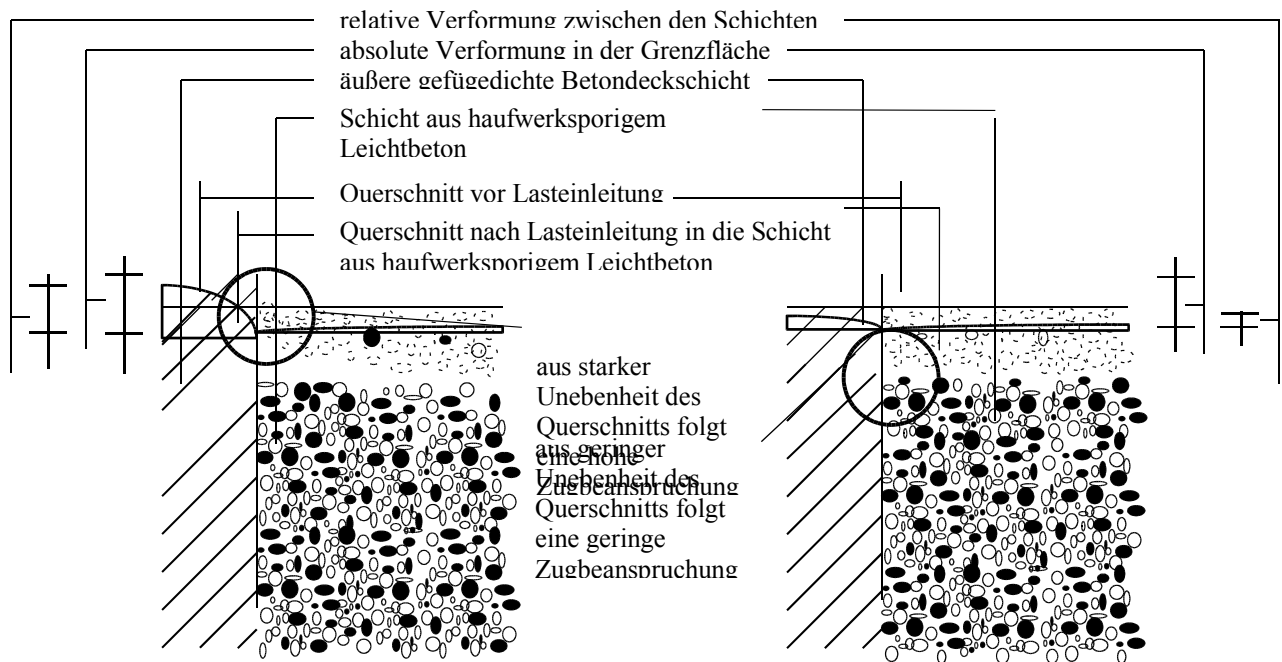
4.3.4.1 Einführung der repräsentativen Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma_r$ auf der Grundlage theoretischer Annahmen

Folgende Grundgedanken werden der Einführung weiterer Parameter zugrunde gelegt :

Ist die Festigkeitsdifferenz zwischen den Materialien der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton sehr groß, werden aufgrund der starken Verformbarkeit des weniger festen Materials und der geringeren Verformbarkeit des festeren Materials infolge einer in die Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton eingeleiteten äußeren Beanspruchung große Zugbeanspruchungen im Lasteinleitungsbereich entstehen.

Ist die Festigkeitsdifferenz der Materialien der beiden Schichten bei gleicher äußerer Beanspruchung dagegen geringer, werden auch die Zugbeanspruchungen im Lasteinleitungsbereich geringer sein. Bild 4.13 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Die relative Verformung zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton und die daraus entstehenden Zugbeanspruchungen sind damit bei gleicher äußerer Beanspruchung von der Festigkeitsdifferenz dieser beiden Schichten abhängig.



Große Festigkeitsdifferenz zwischen den einzelnen Schichten. Durch die größeren relativen Verformungen zwischen den Schichten entstehen größere Zugspannungen in der Grenzfläche zwischen den beiden Schichten bei

Geringe Festigkeitsdifferenz zwischen den einzelnen Schichten. Durch die geringeren relativen Verformungen zwischen den Schichten entstehen geringere Zugspannungen in der Grenzfläche zwischen den beiden Schichten bei

Bild 4.13 : Darstellung der unterschiedlichen Verformungen infolge unterschiedlicher Festigkeitsdifferenz der Materialien der äußeren gefügedichteten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton.

Bei einer geringen Festigkeitsdifferenz der Materialien der beiden Schichten bleiben nach Bild 4.13 infolge der geringeren relativen Verformung zwischen diesen Schichten die Querschnitte im Lasteinleitungsbereich ebener als bei einer größeren Festigkeitsdifferenz.

Daraus folgend ergibt sich eine geringere Zugspannungsbeanspruchung im Lasteinleitungsbereich und somit kann bis zum Erreichen der Versagenszugspannung eine größere äußere Beanspruchung aufgebracht werden als bei einer größeren Festigkeitsdifferenz.

In der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichteten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton tritt im Lasteinleitungsbereich somit stets eine unebene Verformung auf.

Nimmt man nun an, daß

- diese unebene Verformung durch die Annahme einer ebenen Querschnittsverformung bis zu einer bestimmten Größe der Unebenheit hinreichend genau beschrieben werden kann,

- die Überschreitung der im Lasteinleitungsbereich erzeugten Zugbeanspruchungen zum Versagen der Konstruktion führt,

müssen zwei für das Tragverhalten von Systemen mit offener Horizontalfuge charakteristische Parameter existieren :

1. Der Parameter *relative Gestaltänderungsverformung* repräsentiert die relative Verformung zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton, ab welcher die unebene Verformung des Querschnitts im Lasteinleitungsbereich nicht mehr durch die Annahme einer ebenen Querschnittsverformung beschrieben werden kann. Die zu diesem Zeitpunkt eingetragene äußere Beanspruchung wird als *Gestaltänderungsbeanspruchung* bezeichnet.
2. Der Parameter *relative Versagensverformung* repräsentiert die relative Verformung zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton, bei der die Konstruktion durch Überschreitung der infolge der *Versagensbeanspruchung* im Lasteinleitungsbereich erzeugten Zugspannungen versagt.

Somit kann von dem in Bild 4.14 qualitativ dargestellten zweistufigen Versagensablauf von Systemen mit offener Horizontalfuge ausgegangen werden.

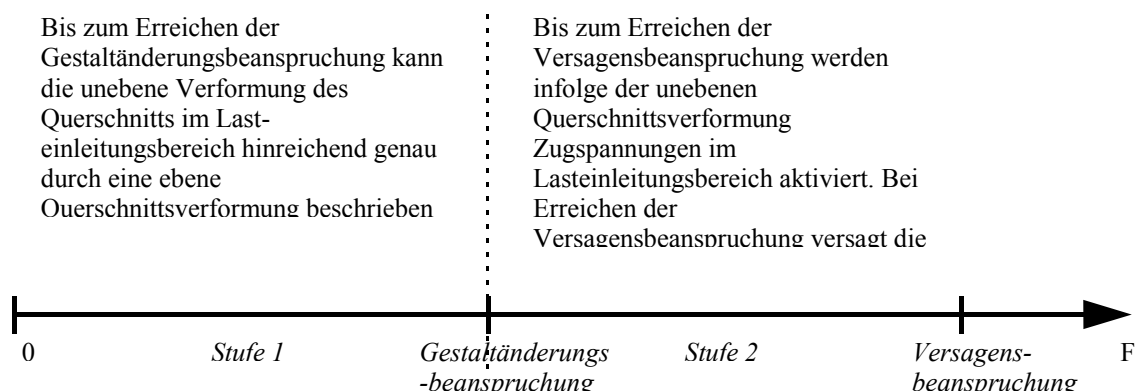


Bild 4.14 : Versagensablauf von Systemen mit offener Horizontalfuge

Die Bestimmung der relativen Gestaltänderungsverformung und der Gestaltänderungsbeanspruchung in Abhängigkeit der geometrischen und stofflichen Parameter von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten ist allerdings nur mit erheblichem rechnerischen Aufwand möglich.

Diese Parameter sind jedoch für eine gesicherte Aussage zum Tragverhalten des Gesamtelementes und vor allem zur Standsicherheit von Systemen mit offener Horizontalfuge auf der Grundlage eines rechnerischen Nachweises nur von untergeordneter Bedeutung.

Von Bedeutung dagegen ist die Bestimmung der relativen Versagensverformung und damit der Versagensbeanspruchung.

Da für Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten sowohl die Versagensbeanspruchung als auch die relative Versagensverformung von den geometrischen und stofflichen Parametern der Schichten abhängig ist, die Versagensbeanspruchung versuchstechnisch jedoch mit relativ geringem Aufwand für repräsentative Außenwandelemente ermittelt werden kann, ist folgende Vorgehensweise möglich :

1. Experimentelle Bestimmung der Versagensbeanspruchung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten unter Berücksichtigung der für Systeme mit offener Horizontalfuge vorhandenen Lasteinleitungsgegebenheiten,
2. Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte auf die geprüften Elemente unter Berücksichtigung ihrer geometrischen und stofflichen Parameter,
3. Ermittlung der relativen Versagensverformung als nunmehr einzige Unbekannte mit dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte auf der Grundlage der experimentell bestimmten Versagensbeanspruchung.

Da eine relative Versagensverformung nicht in das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte eingeht, muß ein Parameter gefunden werden, welcher einen Einfluß auf das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte hat und die relative Versagensverformung repräsentiert.

Aufgrund der Tatsache, daß

- die relative Versagensverformung von der Festigkeitsdifferenz der Materialien der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton abhängig ist,
- die Festigkeitsdifferenz der Materialien dieser beiden Schichten aufgrund der Spannungs-Verformungs-Beziehungen in Abhängigkeit der in die Grenzfläche zwischen den beiden Schichten eingetragenen absoluten Verformung aktiviert wird,

muß eine Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma$ existieren, bei deren Aktivierung das Versagen der Konstruktion infolge überschrittener Zugbeanspruchung im Lasteinleitungsbereich eintritt.

Dieser aktivierten Festigkeitsdifferenz kommt aufgrund der Tatsache, daß sie die relative Versagensverformung repräsentiert, besondere Bedeutung zu. Sie wird als repräsentative Festig-

keitsdifferenz $\Delta\sigma_r$ und die dazugehörige absolute Verformung in der Grenzfläche zwischen den beiden Schichten als repräsentative Verformung ϵ_r bezeichnet. Bild 4.15 stellt diese Zusammenhänge dar.

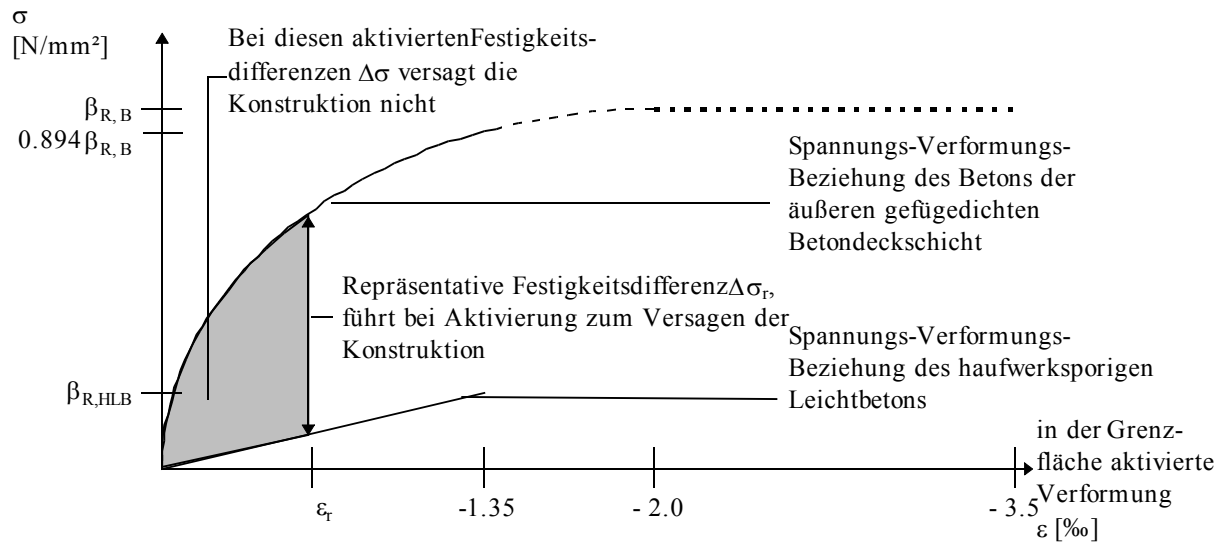


Bild 4.15 : Darstellung der aktivierbaren Festigkeitsdifferenz der Materialien der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton in Abhängigkeit der in die Grenzfläche zwischen diesen beiden Schichten eingetragenen absoluten Verformung

Da die repräsentative Verformung ϵ_r von der repräsentativen Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma_r$ abhängt, kann im Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte durch Überprüfung der absoluten Verformung in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton rechnerisch die Überschreitung der repräsentativen Festigkeitsdifferenz verhindert werden.

In Abhängigkeit der Rechenfestigkeiten der Materialien der einzelnen Schichten darf die absolute Verformung in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton folgende Werte ϵ_r nicht überschreiten :

$$\Delta\sigma_r \leq (0.894 * \beta_{R,B} - \beta_{R,HLB}) : \quad \epsilon_r = -a + \sqrt{a^2 - b} \quad [\text{‰}] \quad (4.32)$$

$$\Delta\sigma_r > (0.894 * \beta_{R,B} - \beta_{R,HLB}) : \quad \epsilon_r = -1.35 \quad [\text{‰}] \quad (4.33)$$

mit

a	=	$2 - (2 * \beta_{R,HLB}) / (1.35 * \beta_{R,B})$	[‰]
b	=	$4 * \Delta\sigma_r / \beta_{R,B}$	[‰]
ε_r	-	repräsentative Verformung, entspricht dem oberen Grenzwert der in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton aktivierbaren Verformung	[‰]
$\Delta\sigma_r$	-	repräsentative Festigkeitsdifferenz, entspricht dem oberen Grenzwert der in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton aktivierbaren Festigkeitsdifferenz	[N/mm ²]
$\beta_{R,B}$	-	Rechenfestigkeit des Betons der äußeren gefügedichten Betondeckschicht nach Gleichung (4.13)	[N/mm ²]
$\beta_{R,HLB}$	-	Rechenfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons nach Gleichung (4.31)	[N/mm ²]

Gelingt es nun, unabhängig von den geometrischen und stofflichen Parametern von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten einen allgemeingültigen Wert für die repräsentative Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma_r$ anzugeben, kann das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte auch für Systeme mit offener Horizontalfuge angewendet werden. Ein Nachweis der Außenwandplatte in Plattenmitte beinhaltet dann auch die spezifischen Besonderheiten, die infolge der Lasteinleitungsproblematik im Kopf- und Fußbereich vorhanden sind.

Für das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte ergibt sich dann folgender veränderter Rechengang :

1. *Rechenschritt* : *Vorgabe einer Verformungsebene*

Entsprechend Abschnitt 4.2.4.

2. *Rechenschritt* : *Ermittlung der Spannungen in jedem Flächenelement und Beschränkung der Verformung*

Entsprechend Abschnitt 4.2.4.

Zusätzlich ist folgende Überprüfung durchzuführen :

1. Aus der Vorgabe einer repräsentativen Festigkeitsdifferenz ist die repräsentative Verformung in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton nach den Gleichungen (4.32) und (4.33) zu ermitteln.
2. In der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton ist zu überprüfen, ob diese repräsentative Verformung überschritten wird.

-
3. Wird die repräsentative Verformung überschritten, ist der Querschnitt als versagt anzunehmen. Die Spannungen in allen Flächenelementen sind dann innerhalb des Berechnungsverfahrens zu Null zu setzen.

3. Rechenschritt : Gleichgewichtskontrolle

Entsprechend Abschnitt 4.2.4.

4. Rechenschritt : Korrektur der Verformungsebene

Entsprechend Abschnitt 4.2.4.

Da in diesem Berechnungsablauf die aktivierbare Verformung in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton beschränkt wird, wird dieses Verfahren als *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung* bezeichnet.

4.3.4.2 Experimentelle Überprüfung der getroffenen Annahmen

Das im vorigen Abschnitt hergeleitete Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung für Systeme mit offener Horizontalfuge wurde auf folgende Annahmen begründet :

- Während in Plattenmitte von der Gültigkeit der Hypothese von Bernoulli vom Ebenbleiben der Querschnitte ausgegangen werden kann, kommt es im Lasteinleitungsbereich zu einer unebenen Verformung. Diese führt zu Zugspannungen, welche das Versagenskriterium von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten und offener Horizontalfuge darstellen.
- Es existiert unabhängig von den vorhandenen geometrischen und stofflichen Parametern von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten genau eine repräsentative Festigkeitsdifferenz, welche bei Aktivierung zum Versagen der Konstruktion führt.

Da diese Aussagen nur experimentell überprüfbar sind, wurden Großplattenversuche mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten in Anlehnung an DIN EN 1740 [28] durchgeführt [76]. In diesen Versuchen wurde

- die Versagensbeanspruchung von Originalelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten bestimmt, wobei die Lasteintragung den real am Bauwerk

vorhandenen Gegebenheiten eines Systems mit offener Horizontalfuge entsprach,

- diese Versagensbeanspruchung mit Festigkeitskennwerten aus zylindrischen Probekörpern verglichen, welche den Elementen nach den Versuchen entnommen wurden,
- das Bruchverhalten der Elemente dokumentiert,
- die Spannungs-Verformungs-Beziehung der Elemente erfaßt,
- die Biegelinie der Elemente unter Lasteinwirkung bestimmt,
- mittels Schallemissionsanalyse die Beanspruchung bestimmt, mit welcher eine irreversible Formänderung (Beginn der instabilen Mikrorißbildung) eingeleitet wird,
- aus den genannten Punkten Rückschlüsse auf das Versagenskriterium gezogen.

Die detaillierten Untersuchungsergebnisse können [75, 76, 83] entnommen werden. Die für die Erweiterung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte charakteristischen Parameter der Elemente sind in Tabelle 4.6 zusammengefaßt.

<i>Charakteristischer Parameter</i>	<i>Platte 1</i>	<i>Platte 2</i>	<i>Platte 3</i>
Stärke der inneren gefügedichten Betondeckschicht [mm]	50	50	5
Stärke der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton [mm]	230	230	290
Stärke der äußeren gefügedichten Betondeckschicht [mm]	40	40	25
Betonfestigkeitsklasse der inneren gefügedichten Betondeckschicht	B 13	B 8.5	-
Betonfestigkeitsklasse der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	LB 3	LB 4	LB 8
Betonfestigkeitsklasse der äußeren gefügedichten Betondeckschicht	B 47	B 30	B 46
eingetragene äußere Beanspruchung im Bruchzustand [kN/m]	998.0	1264.0	2470.0
Exzentrizität der eingetragenen Beanspruchung gegenüber dem Gesamtquerschnitt [mm]	+ 30	+ 30	+ 30
Verformung auf der Oberfläche der inneren gefügedichten Betondeckschicht im Bruchzustand [‰]	- 0.20 ... - 0.31	- 0.35 ... - 0.85	- 0.08 ... - 1.00
Verformung auf der Oberfläche der äußeren gefügedichten Betondeckschicht im Bruchzustand [‰]	- 0.10 ... - 0.22	0.05 ... - 0.28	0.10 ... - 0.40
Verhältniswert von äußerer Beanspruchung im irreversiblen Verformungszustand und äußerer Beanspruchung im Bruchzustand [-]	0.42 ... 0.45	0.63 ... 0.64	0.42 ... 0.46
Versagenskriterium	Überschreitung der diametralen Zugspannungen im haufwerksporigen Leichtbeton		
Bruchbild	Aufreißen der Konstruktion über die Plattenhöhe in Plattenebene in der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton, und zwar <div style="display: flex; justify-content: space-around; text-align: center;"> <div>von unten nach oben</div> <div>von unten nach oben</div> <div>gleichzeitig von unten und von oben</div> </div>		

Tabelle 4.6 : Charakteristische Parameter der in den Großplattenversuchen untersuchten Konstruktionen

Tabelle 4.6 kann entnommen werden, daß als Versagenskriterium der drei untersuchten Elemente die Überschreitung der diametralen Zugspannungen des haufwerksporigen Leichtbetons festgestellt wurde. Infolge dieser Überschreitung erfolgte ein Aufreißen der Elemente in ihrer Ebene.

Dieses Aufreißen fand aufgrund der Tatsache, daß der haufwerksporige Leichtbeton gegenüber dem Beton der gefügedichten Betondeckschichten eine geringere aufnehmbare Zugspannung aufweist (siehe Abschnitt 3.1.3.7.6), vorrangig in der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton statt.

Ausgelöst wurde dieser Versagensmechanismus jedoch im Lasteinleitungsbereich in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton. Bild 4.16 zeigt den typischen Verlauf der Rißbildung im Versagenszustand.

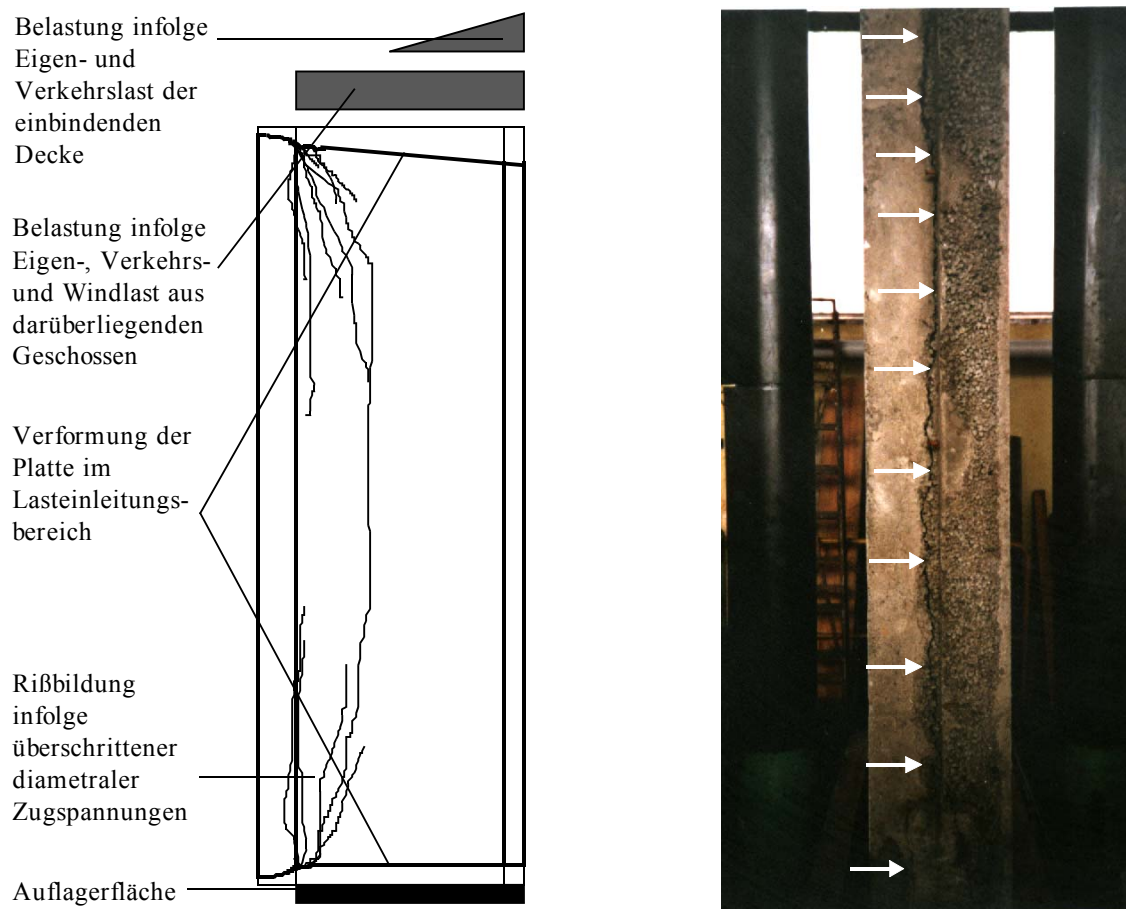


Bild 4.16 :Bild 4.16 :Rißbildung in Plattenebene infolge überschrittener diametraler Zugspannungen als typisches Rißbild bei Systemen mit offener Horizontalfuge

Die Annahme, daß die Überschreitung der Zugspannungen, welche im Lasteinleitungsbereich der Konstruktion erzeugt werden, das Versagenskriterium von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten bei offener Horizontalfuge darstellt, wurde damit im Versuch bestätigt.

Die experimentell ermittelte Versagensbeanspruchung resultierte somit aus dem Einfluß der nicht ebenen Verformung des Querschnitts im Lasteinleitungsbereich.

Eine Bestätigung dieser Annahme ist auch durch rechnerische Simulation der Versuche unter Anwendung des Verfahrens der Finiten Elemente (FEM) möglich [100]. Obwohl die Finite Elemente Methode, wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben, für eine hinreichend genaue quantitative Aussage zum Tragverhalten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten nur unter bestimmten Voraussetzungen geeignet ist, kann jedoch eine qualitative Beurteilung des Versagensmechanismus erfolgen. Die in Bild 4.17 dargestellten diametralen Zugspannungen, welche durch Anwendung der FEM erhalten wurden [100], zeigen deutlich die maximalen Zugbeanspruchungen im Lasteinleitungsbereich.

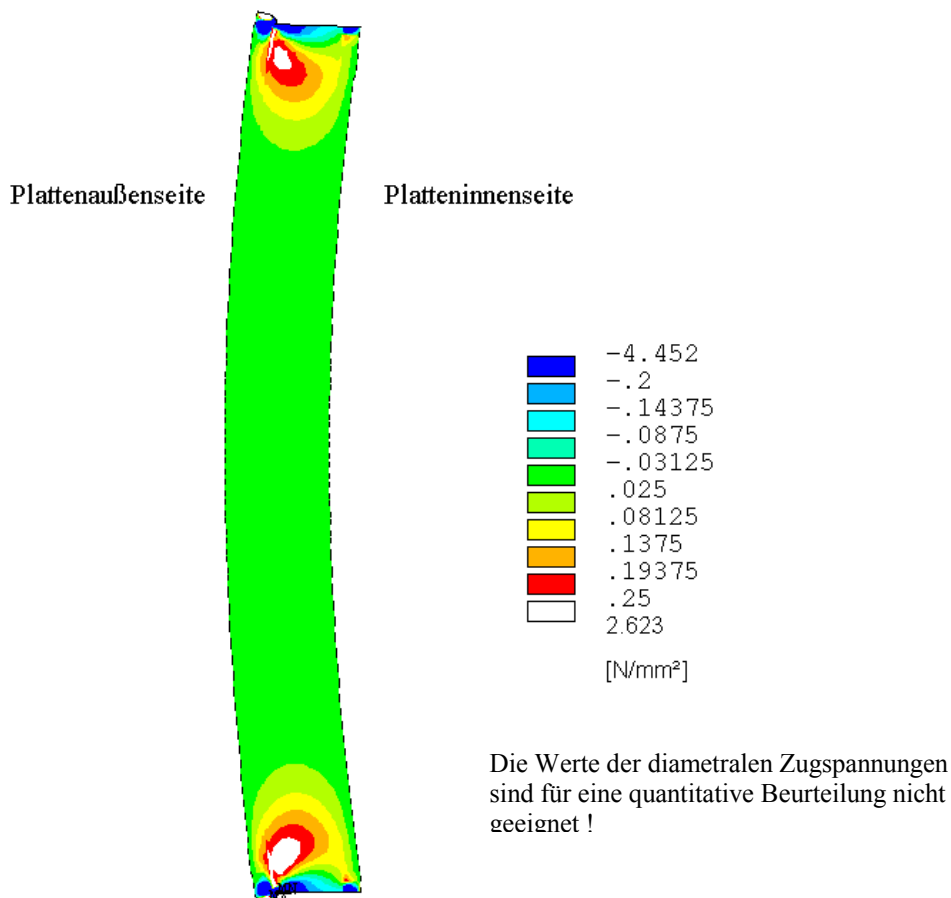


Bild 4.17 : *Qualitativer Verlauf der durch rechnerische Simulation der Versuche mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (ANSYS® Rev. 5.2) ermittelten diametralen Zugspannungen [100]*

Die Annahme der differenten Verformungen in Plattenmitte und im Lasteinleitungsbereich konnte mit Hilfe der Finiten Elemente Methode ebenfalls bestätigt werden. Während, wie in Bild 4.18 dargestellt, in Plattenmitte von der Gültigkeit der Hypothese von Bernoulli vom Ebenbleiben der Querschnitte ausgegangen werden kann, ergeben sich im Lasteinleitungsbereich unebene Verformungen, welche auf die in Abschnitt 4.3.3 beschriebene Lasteinleitungsproblematik zurückzuführen sind.

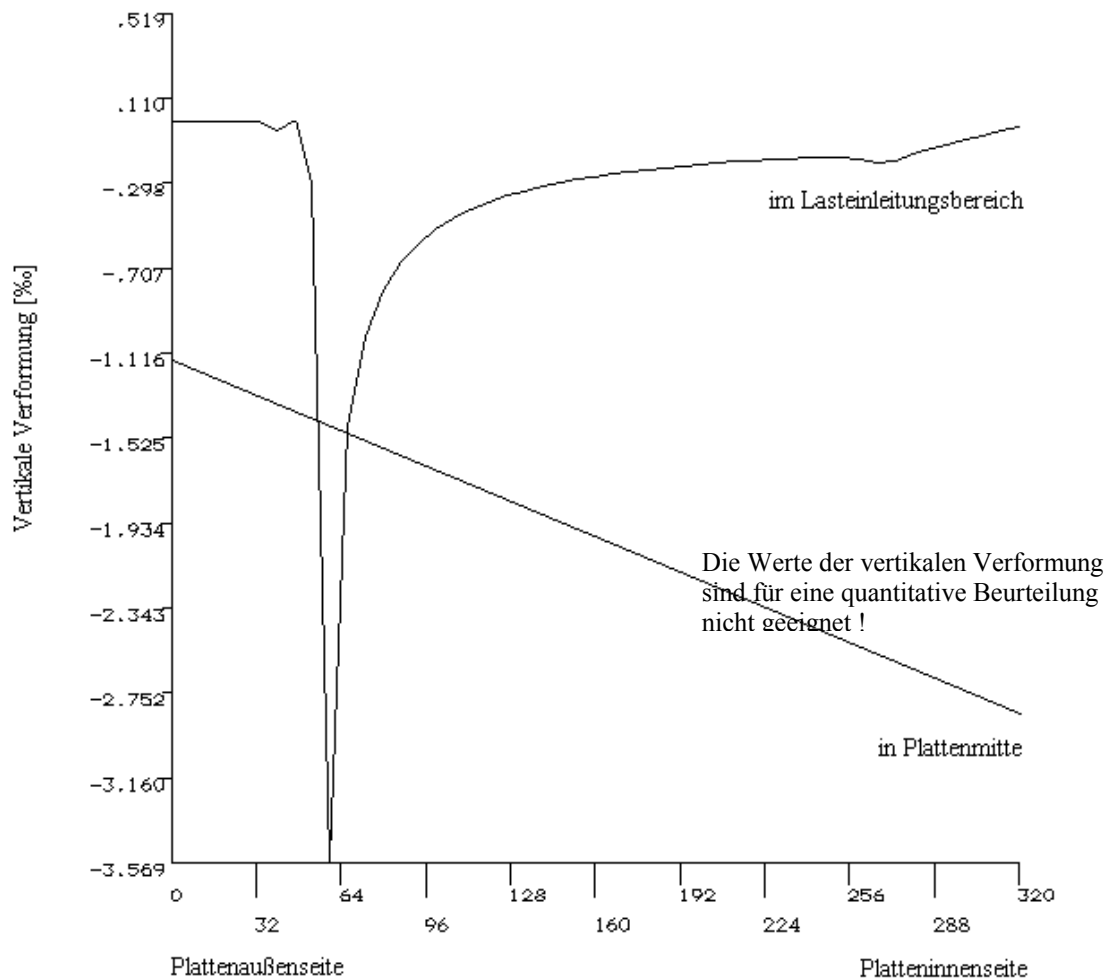


Bild 4.18 : *Qualitativer Verlauf der durch rechnerische Simulation der Versuche mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (ANSYS® Rev. 5.2) ermittelten vertikalen Verformungen [100]*

Damit ist es auf der Grundlage dieser durchgeführten Großplattenversuche möglich, für das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung auf rechnerischem Weg allgemeingültige Werte für die repräsentative Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma_r$ anzugeben.

Erforderlich ist dazu jedoch die Kenntnis der Beanspruchung im rechnerischen Versagenszustand.

Aufgrund der Tatsache, daß die durchgeführten Versuche im Vergleich zur Nutzungsdauer von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten eine Kurzzeitbelastung darstellen, ist es erforderlich, die experimentell ermittelte Versagensbeanspruchung abzumindern, um die Verminderung der Druckfestigkeit bei hoher und dauernd einwirkender Spannung zu berücksichtigen [7].

Es wird vorausgesetzt, daß das Verhältnis von Beanspruchung im rechnerischen Versagenszustand zu experimentell ermittelter Versagensbeanspruchung des Elementes dem über den Gesamtquerschnitt des Elementes gemittelten Verhältnis von Rechenfestigkeit zu Nennfestigkeit der Materialien der einzelnen Schichten entspricht. Es gilt also die Beziehung :

$$\frac{N, M_{\text{Versagen, rech}}}{N, M_{\text{Versagen, exp}}} = f_{\text{Platte}} = \sum_{i=1}^n ((\beta_{R,i} / \beta_{WN,i}) * (d_i / d_{\text{ges}})) \quad [-] \quad (4.34)$$

mit

$N, M_{\text{Versagen, rech}}$	-	Beanspruchung im rechnerischen Versagenszustand des Elementes	[kN/m, kNm/m]
$N, M_{\text{Versagen, exp}}$	-	experimentell ermittelte Versagensbeanspruchung des Elementes	[kN/m, kNm/m]
i	-	betrachtete Schicht	
β_R	-	Rechenfestigkeit des Materials der betrachteten Schicht	[N/mm ²]
β_{WN}	-	Nennfestigkeit des Materials der betrachteten Schicht	[N/mm ²]
d	-	Schichtdicke der betrachteten Schicht	[mm]
d_{ges}	-	Gesamtstärke des Querschnitts	[mm]
f_{Platte}	-	Abminderungsfaktor zur Erfassung der verminderten Festigkeit von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten bei hoher und dauernd einwirkender Spannung	[-]

Unter Verwendung der Gleichungen (4.34), (4.31) und (4.13) ergibt sich

$$f_{\text{Platte}} = (d_1 * f_{B,1} + d_2 * f_{HLB,2} + d_3 * f_{B,3}) / (d_1 + d_2 + d_3) \quad [-] \quad (4.35)$$

mit

d_1	-	Schichtstärke der inneren gefügedichten Betondeckschicht	[mm]
d_2	-	Schichtstärke der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	[mm]
d_3	-	Schichtstärke der äußeren gefügedichten Betondeckschicht	[mm]
$f_{B,1}$	-	Abminderungsfaktor für den Beton der inneren gefügedichten Betondeckschicht nach Tabelle 4.3	[-]
$f_{HLB,2}$	-	Abminderungsfaktor für den haufwerksporigen	

—

$f_{B,3}$ - Leichtbeton nach Tabelle 4.4 [-]
 - Abminderungsfaktor für den Beton der äußeren
 gefügedichten Betondeckschicht nach Tabelle 4.3 [-]

Auf der Grundlage der Gleichung (4.35) lassen sich damit für die experimentell untersuchten Platten weitere charakteristische Parameter angeben. Diese sind in Tabelle 4.7 zusammengefaßt und entsprechen in ihrer Größenordnung den in den experimentellen Untersuchungen festgestellten Beanspruchungen im irreversiblen Verformungszustand.

<i>charakteristischer Parameter</i>	<i>Platte 1</i>	<i>Platte 2</i>	<i>Platte 3</i>
Verhältniswert von äußerer Beanspruchung im irreversiblen Verformungszustand und äußerer Beanspruchung im Bruchzustand [-]	0.42 ... 0.45	0.63 ... 0.64	0.42 ... 0.46
f_{platte} nach Gleichung 4.35 [-]	0.61	0.60	0.62
eingetragene äußere Normalkraft im rechnerischen Versagenszustand [kN/m]	609.0	758.0	1531.0
eingetragenes äußeres Moment im rechnerischen Versagenszustand [kNm/m]	18.3	22.8	46.0

Tabelle 4.7 : *Weitere charakteristische Parameter der untersuchten Konstruktionen*

Auf der Grundlage dieser Parameter kann nun die Ermittlung des Wertes der im rechnerischen Versagenszustand in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton aktivierten repräsentativen Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma_r$ erfolgen.

4.3.4.3 Rechnerische Ermittlung des Wertes der repräsentativen Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma_r$ auf der Grundlage der durchgeführten Versuche

Rechnerischer Nachweis der Platte 1

Das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte wird zunächst ohne Überprüfung einer repräsentativen Verformung in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton auf die in Tabelle 4.8 angegebenen Parameter der Platte 1 angewendet, wobei die Nachweisführung für einen Schnitt in Plattenmitte durchgeführt wird.

<i>charakteristischer Parameter</i>	<i>Platte 1</i>
Stärke der inneren gefügedichten Betondeckschicht [mm]	50
Stärke der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton [mm]	230
Stärke der äußeren gefügedichten Betondeckschicht [mm]	40
Betonfestigkeitsklasse der inneren gefügedichten Betondeckschicht	B 13
Betonfestigkeitsklasse der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	LB 3

Betonfestigkeitsklasse der äußeren gefügedichten Betondeckschicht	B 47
eingetragene äußere Beanspruchung im Bruchzustand [kN/m]	998.0
Exzentrizität der eingetragenen Beanspruchung gegenüber dem Gesamtquerschnitt [mm]	+ 30
Verformung auf der Oberfläche der inneren gefügedichten Betondeckschicht im Bruch-zustand [%]	- 0.20 ... - 0.31
maximale Verformung auf der Oberfläche der äußeren gefügedichten Betondeckschicht im Bruchzustand [%]	- 0.10 ... - 0.22
eingetragene äußere Normalkraft im rechnerischen Versagenszustand [kN/m]	609.0
eingetragenes äußeres Moment im rechnerischen Versagenszustand [kNm/m]	18.3

Tabelle 4.8 : Charakteristische Parameter der Platte 1

Im Ergebnis dieser Berechnung ohne Verformungsbeschränkung erhält man nachfolgende Beanspruchungen im rechnerischen Versagenszustand :

$$N_{\text{Versagen, errechnet}} = 910.0 \text{ kN/m}$$

$$M_{\text{Versagen, errechnet}} = 27.3 \text{ kNm/m}$$

Aufgrund der Tatsache, daß eine Beschränkung der Verformung in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton in der Berechnung nicht erfolgte, müssen diese rechnerisch ermittelten Beanspruchungen größer als die experimentell ermittelten Beanspruchungen sein :

$$N_{\text{Versagen, exp}} = 609.0 \text{ kN/m} < N_{\text{Versagen, errechnet}}$$

$$M_{\text{Versagen, exp}} = 18.3 \text{ kNm/m} < M_{\text{Versagen, errechnet}}$$

Führt man nun das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung mit der Zielstellung durch, bei der experimentell ermittelten Beanspruchung im rechnerischen Versagenszustand die in der Grenzfläche vorhandene repräsentative Verformung und daraus folgend die aktivierte repräsentative Festigkeitsdifferenz, die zum Erreichen des rechnerischen Versagenszustandes führte, zu ermitteln, erhält man

$$\Delta\sigma_r = 5.25 \text{ N/mm}^2$$

und es ergeben sich die in Bild 4.19 dargestellten Spannungs- und Verformungsverteilungen.

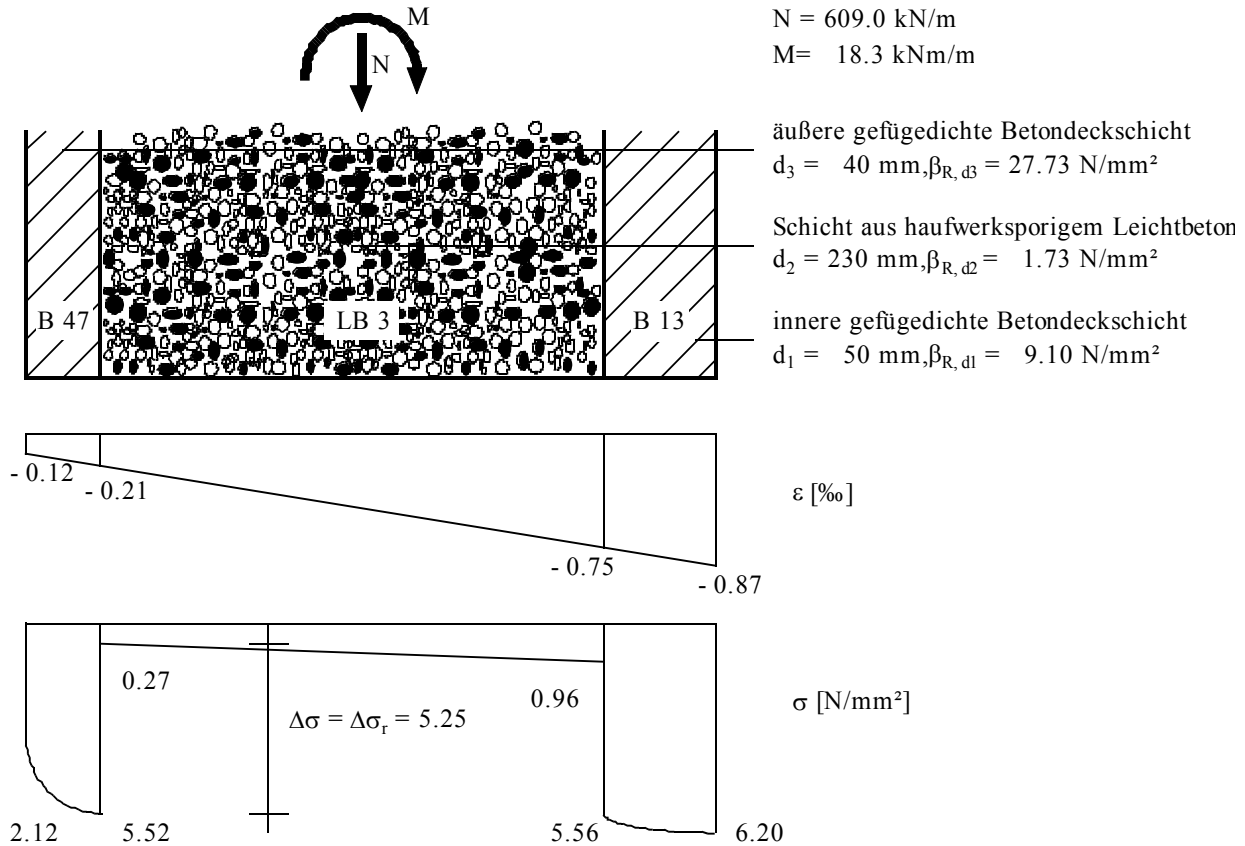


Bild 4.19 : Rechnerische Spannungs- und Verformungsverteilung in der Platte 1 bei Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung

Die experimentell ermittelten Verformungen auf den Oberflächen der Platte sind mit den berechneten Verformungen nicht direkt vergleichbar, da die Berechnung für einen Schnitt in Plattenmitte erfolgt und gleichzeitig die Lasteinleitungsproblematik durch die aktivierbare Festigkeitsdifferenz berücksichtigt wird.

Die berechneten Verformungen liegen jedoch innerhalb des experimentell ermittelten Spektrums der Verformungen auf den Plattenoberflächen im Versagenszustand oder überschreiten diese auf der sicheren Seite liegend, wie Tabelle 4.9 zeigt.

Ermittelte Verformungen auf den Plattenoberflächen	experimentell	rechnerisch
Oberfläche der inneren gefügedichten Betondeckschicht	- 0.20 ... - 0.31	- 0.87
Oberfläche der äußeren gefügedichten Betondeckschicht	- 0.10 ... - 0.22	- 0.12

Tabelle 4.9 : Vergleich der auf den Plattenoberflächen der Platte 1 experimentell und rechnerisch ermittelten Verformungen

Rechnerischer Nachweis der Platte 2

Auch hier wird das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte zunächst ohne Beschränkung der Verformung in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton angewendet. Grundlage dafür sind die in Tabelle 4.10 angegebenen Parameter der Platte 2.

<i>charakteristischer Parameter</i>	<i>Platte 2</i>
Stärke der inneren gefügedichten Betondeckschicht [mm]	50
Stärke der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton [mm]	230
Stärke der äußeren gefügedichten Betondeckschicht [mm]	40
Betonfestigkeitsklasse der inneren gefügedichten Betondeckschicht	B 8.5
Betonfestigkeitsklasse der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	LB 4
Betonfestigkeitsklasse der äußeren gefügedichten Betondeckschicht	B 30
eingetragene äußere Beanspruchung im Bruchzustand [kN/m]	1264.0
Exzentrizität der eingetragenen Beanspruchung gegenüber dem Gesamtquerschnitt [mm]	+ 30
Verformung auf der Oberfläche der inneren gefügedichten Betondeckschicht im Bruch-zustand [‰]	- 0.35 ... - 0.85
maximale Verformung auf der Oberfläche der äußeren gefügedichten Betondeckschicht im Bruchzustand [‰]	0.05 ... - 0.28
eingetragene äußere Normalkraft im rechnerischen Versagenszustand [kN/m]	758.0
eingetragenes äußeres Moment im rechnerischen Versagenszustand [kNm/m]	22.8

Tabelle 4.10 : Charakteristische Parameter der Platte 2

Im Ergebnis der Berechnung ohne Verformungsbeschränkung erhält man nachfolgende Beanspruchungen im rechnerischen Versagenszustand :

$$N_{\text{Versagen, errechnet}} = 740.0 \text{ kN/m}$$

$$M_{\text{Versagen, errechnet}} = 22.2 \text{ kNm/m}$$

Diese Beanspruchungen liegen bereits unter den experimentell ermittelten Beanspruchungen im rechnerischen Versagenszustand. Diese Tatsache ist nur dadurch erklärbar, daß, wie Bild 4.20 entnehmbar, das Versagen der Konstruktion hier rechnerisch durch die Überschreitung der Druckspannungen an der Innenseite der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton bestimmt wird, noch bevor die repräsentative Festigkeitsdifferenz aktiviert werden konnte.

Die in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton aktivierte Verformung führt somit zu einer aktivierten Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma$, welche kleiner als die repräsentative Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma_r$ sein muß :

$$\Delta\sigma = 5.00 \text{ N/mm}^2 < \Delta\sigma_r$$

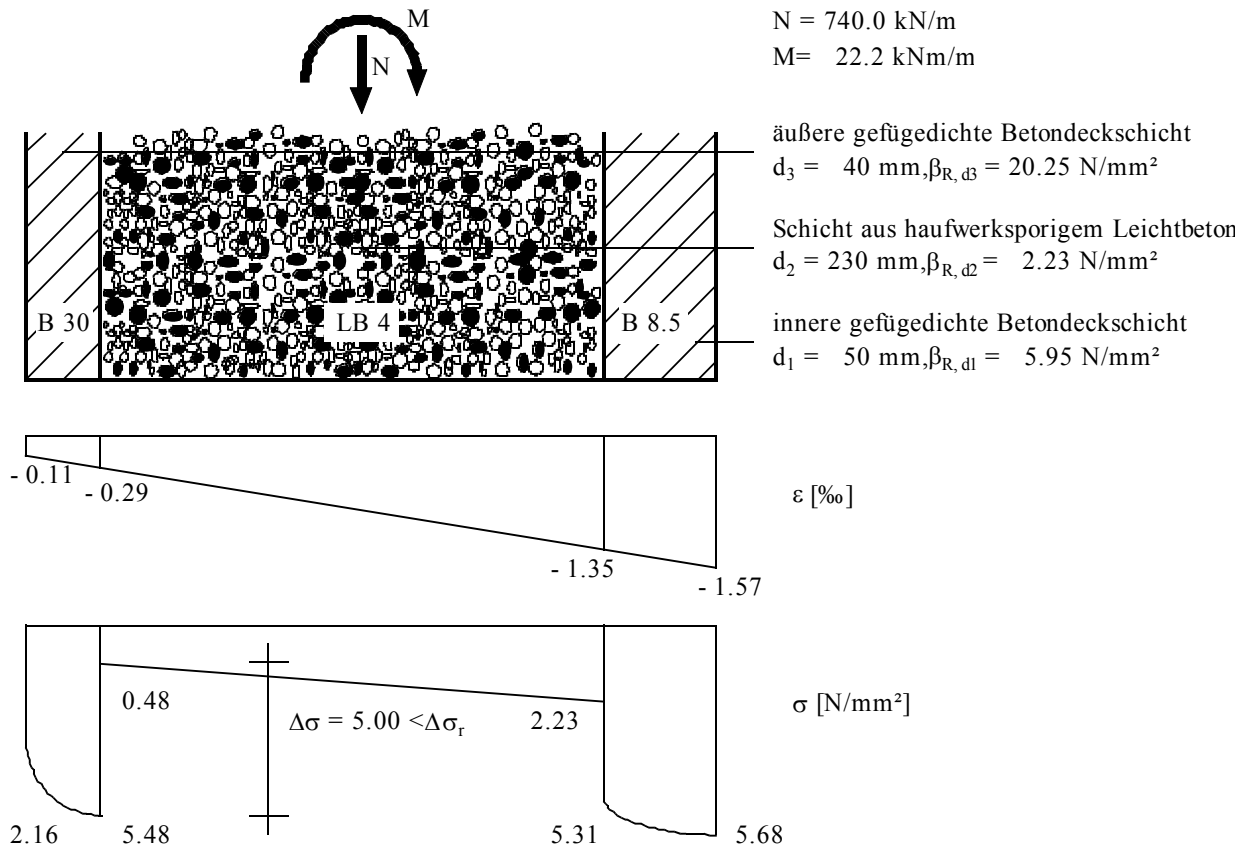


Bild 4.20 : Rechnerische Spannungs- und Verformungsverteilung in der Platte 2 bei Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte

Auch in diesem Fall liegen die berechneten Verformungen innerhalb des experimentell ermittelten Spektrums der Verformungen auf den Plattenoberflächen im Versagenszustand oder überschreiten diese auf der sicheren Seite liegend, wie Tabelle 4.11 zeigt.

Ermittelte Verformungen auf den Plattenoberflächen	experimentell	rechnerisch
Oberfläche der inneren gefügedichten Betondeckschicht	- 0.35 ... - 0.85	- 1.57
Oberfläche der äußeren gefügedichten Betondeckschicht	0.05 ... - 0.29	- 0.11

Tabelle 4.11 : Vergleich der auf den Plattenoberflächen der Platte 2 experimentell und rechnerisch ermittelten Verformungen

Rechnerischer Nachweis der Platte 3

Wendet man das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte ohne Beschränkung der Verformung in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton auf die in Tabelle 4.12 angegebenen Parameter der Platte 3 an, so erhält man nachfolgende Beanspruchungen im rechnerischen Versagenszustand :

$$N_{\text{Versagen, errechnet}} = 932.0 \text{ kN/m}$$

$$M_{\text{Versagen, errechnet}} = 28.0 \text{ kNm/m}$$

<i>charakteristischer Parameter</i>	<i>Platte 3</i>
Stärke der inneren gefügedichten Betondeckschicht [mm]	5
Stärke der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton [mm]	290
Stärke der äußeren gefügedichten Betondeckschicht [mm]	25
Betonfestigkeitsklasse der inneren gefügedichten Betondeckschicht	LB 8 angesetzt
Betonfestigkeitsklasse der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	LB 8
Betonfestigkeitsklasse der äußeren gefügedichten Betondeckschicht	B 46
eingetragene äußere Beanspruchung im Bruchzustand [kN/m]	2470.0
Exzentrizität der eingetragenen Beanspruchung gegenüber dem Gesamtquerschnitt [mm]	+ 30
Verformung auf der Oberfläche der inneren gefügedichten Betondeckschicht im Bruch-zustand [%]	- 0.08 ... - 1.30
maximale Verformung auf der Oberfläche der äußeren gefügedichten Betondeckschicht im Bruchzustand [%]	0.10 ... - 0.40
eingetragene äußere Normalkraft im rechnerischen Versagenszustand [kN/m]	1531.0
eingetragenes äußeres Moment im rechnerischen Versagenszustand [kNm/m]	46.0

Tabelle 4.12 : Charakteristische Parameter der Platte 3

Auch diese Beanspruchungen liegen bereits unter den experimentell ermittelten Beanspruchungen im rechnerischen Versagenszustand.

Wiederum ist diese Tatsache nur dadurch erklärbar, daß, wie in Bild 4.21 dargestellt, das Versagen der Konstruktion hier rechnerisch durch die Überschreitung der Druckspannungen an der Innenseite der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton bestimmt wird, noch bevor die repräsentative Festigkeitsdifferenz aktiviert werden konnte.

Die in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton aktivierte Verformung führt somit ebenfalls zu einer aktivierten Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma$, welche kleiner als die repräsentative Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma_r$ sein muß :

$$\Delta\sigma = 4.24 \text{ N/mm}^2 < \Delta\sigma_r$$

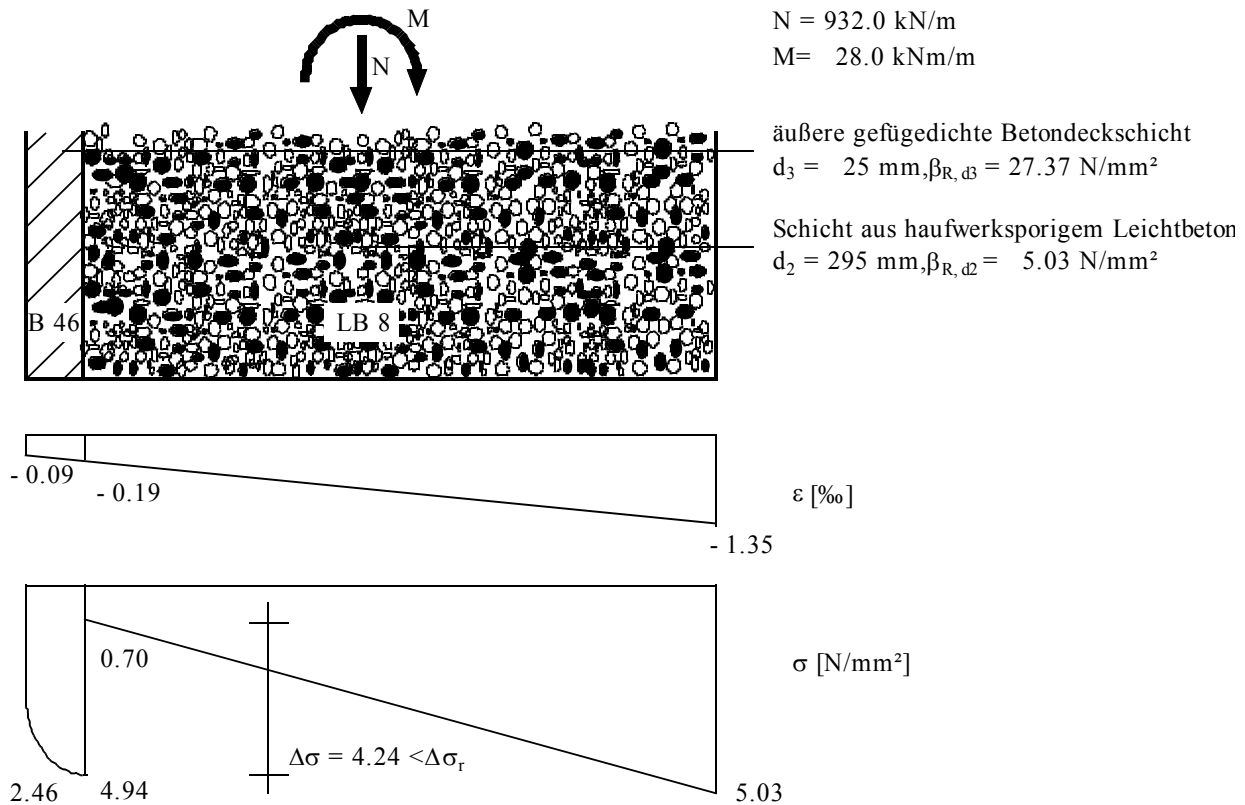


Bild 4.21 : Rechnerische Spannungs- und Verformungsverteilung in der Platte 3 bei Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte

Auch in diesem Fall liegen die berechneten Verformungen innerhalb des experimentell ermittelten Spektrums der Verformungen auf den Plattenoberflächen im Versagenszustand oder überschreiten diese auf der sicheren Seite liegend, wie Tabelle 4.13 zeigt.

Ermittelte Verformungen auf den Plattenoberflächen	experimentell	rechnerisch
Oberfläche der inneren gefügedichten Betondeckschicht	- 0.08 ... - 1.00	- 1.35
Oberfläche der äußeren gefügedichten Betondeckschicht	0.10 ... - 0.40	- 0.09

Tabelle 4.13 : Vergleich der auf den Plattenoberflächen der Platte 3 experimentell und rechnerisch ermittelten Verformungen

Wie aus den rechnerischen Nachweisen der Platten 1 ... 3 erkennbar ist, hat die aktivierte Festigkeitsdifferenz einen entscheidenden Einfluß auf den Nachweis der Standsicherheit von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten bei Systemen mit offener Horizontalfuge.

Mit dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte bzw. dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung wurden für diese Platten die in Tabelle 4.14 dargestellten Werte für die aktivierte Festigkeitsdifferenz ermittelt.

Konstruktion	aktivierte Festigkeitsdifferenz [N/mm ²]	rechnerisch ermitteltes Versagenskriterium	experimentell ermitteltes Versagenskriterium
Platte 1	$\Delta\sigma = \Delta\sigma_r = 5.25$	Überschreitung der Zugbeanspruchbarkeit im Lasteinleitungsbereich ($\Delta\sigma_r$ wird maßgebend)	Überschreitung der Zugbeanspruchbarkeit im Lasteinleitungsbereich
Platte 2	$\Delta\sigma = 5.00$	Überschreitung der Druckbeanspruchbarkeit an der Innenseite der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	Überschreitung der Zugbeanspruchbarkeit im Lasteinleitungsbereich
Platte 3	$\Delta\sigma = 4.24$	Überschreitung der Druckbeanspruchbarkeit an der Innenseite der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	Überschreitung der Zugbeanspruchbarkeit im Lasteinleitungsbereich

Tabelle 4.14 : Mit dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung ermittelte Werte für die aktivierte Festigkeitsdifferenz

Obwohl in der experimentellen Untersuchung der Platten 1 ... 3 festgestellt wurde, daß die Überschreitung der Zugspannungen, welche im Lasteinleitungsbereich der Konstruktion erzeugt werden, das Versagenskriterium von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten und offener Horizontalfuge darstellt, wurde in der rechnerischen Nachweisführung der Platten 2 und 3 dieses Versagenskriterium nicht festgestellt.

Im Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung können demzufolge zwei Versagenskriterien maßgebend werden, wobei bereits das Erreichen eines dieser Kriterien rechnerisch zum Versagen der Konstruktion führt :

Versagenskriterium 1 : Aktivierung der repräsentativen Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma_r$

Versagenskriterium 2 : Druckfestigkeitsversagen des haufwerksporigen Leichtbetons

Aufgrund der Tatsache, daß rechnerisch nur bei der Nachweisführung der Platte 1 die repräsentative Festigkeitsdifferenz aktiviert wurde, wird für die Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung für die repräsentative Festigkeitsdifferenz auf der sicheren Seite liegend ein Wert von

$$\Delta\sigma_r = 5.00 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.36)$$

empfohlen.

Durch Vergleichsuntersuchungen an Fensterpfeilern aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten [59] wurde dieser Wert für $\Delta\sigma_r$ bestätigt.

4.3.5 Einfluß der Exzentrizität der äußeren Beanspruchung

Die Exzentrizität der äußeren Beanspruchung hat sowohl auf das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte als auch auf das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung einen entscheidenden Einfluß.

Bei der ursprünglichen Planung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten wurden folgende Annahmen getroffen [38] :

$$e = e_K + e_M \quad [\text{mm}] \quad (4.37)$$

mit

e	-	Exzentrizität der äußeren Beanspruchung, bezogen auf die Querschnittsmitte (siehe Bild 4.11)	[mm]
e_K	-	Konstruktionsausmittigkeit infolge einbindender Decken	[mm]
e_M	-	ungewollte Montageausmittigkeit, es gilt $e_M = d_{\text{ges}} / 10$	[mm]
d_{ges}	-	Stärke des Gesamtquerschnitts	[mm]

Da der Nachweis der Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten in der ursprünglichen Planung unter Zugrundelegung eines einschichtigen Querschnitts erfolgte, lag die Annahme einer maximalen Exzentrizität der äußeren Beanspruchung unabhängig vom Vorzeichen der Exzentrizität auf der sicheren Seite.

Für das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte und das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung, welchen ein mehrschichtiger Querschnitt zugrundeliegt, führt die Annahme einer maximalen Exzentrizität ohne Berücksichtigung des Vorzeichens der Exzentrizität aufgrund nachfolgender Tatsachen nicht zwangsläufig zum maßgebenden Standsicherheitsniveau :

- In den beiden Berechnungsverfahren werden die Spannungs-Verformungs-Beziehungen der Materialien der einzelnen Schichten berücksichtigt. Unter der Voraussetzung des Ebenbleibens der Querschnitte werden die Festigkeiten der einzelnen Schichten in Abhängigkeit vom Lastangriffspunkt aktiviert.
- Im Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung erfolgt eine Beschränkung der aktivierbaren Festigkeitsdifferenz zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton. Der Lastangriffspunkt hat einen entscheidenden Einfluß auf die aktivierte Festigkeitsdifferenz zwischen diesen beiden Schichten.

Das rechnerische Standsicherheitsniveau ist damit in entscheidendem Maße von der Annahme der Exzentrizität der äußeren Beanspruchung abhängig. Tabelle 4.15 verdeutlicht diesen Zusammenhang anhand eines Beispiels.

Stärke der inneren gefügedichten Betondeckschicht [mm]									20
Stärke der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton [mm]									230
Stärke der äußeren gefügedichten Betondeckschicht [mm]									50
Betonfestigkeitsklasse der inneren gefügedichten Betondeckschicht									B 15
Betonfestigkeitsklasse der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton									LB 2.5
Betonfestigkeitsklasse der äußeren gefügedichten Betondeckschicht									B 35
eingetragene äußere Beanspruchung [kN/m]									350.0
Exzentrizität nach Bild 4.11 [mm]	- 50	- 30	- 10	0	+ 10	+ 30	+ 40	+ 50	+ 70
Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung auf ein System mit offener Horizontalfuge									
γ_{vorh} [-]	1.12*	1.20*	1.29*	1.34*	1.38*	1.47*	1.45	1.36	1.20
Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte auf ein System mit geschlossener Horizontalfuge									
γ_{vorh} [-]	3.44	2.62	2.12	1.94	1.79	1.54	1.45	1.36	1.20

* Die bei Systemen mit offener Horizontalfuge gegenüber Systemen mit geschlossener Horizontalfuge verminderten Sicherheitsniveaus resultieren aus dem Einfluß der Beschränkung der aktivierbaren Festigkeitsdifferenz durch $\Delta\sigma_r$ im Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung.

Tabelle 4.15 : Darstellung der Abhängigkeit des rechnerischen Standsicherheitsniveaus von der Annahme der Exzentrizität der äußeren Beanspruchung an einem Beispiel

Da somit die an einem Gebäude vorhandene Exzentrizität objektspezifisch ist und von den geometrischen und stofflichen Parametern des betrachteten Gebäudes abhängt, ist die Exzentrizität an jedem Einzelgebäude im Rahmen der statischen Nachweisführung zu beurteilen und in Ansatz zu bringen.

Ohne bauwerksdiagnostische Beurteilung der Exzentrizität ist jedoch aufgrund der Tatsache, daß

- nach [5] von einer maximalen in der ursprünglichen Planung angesetzten Exzentrizität von $e = + 30$ mm nach Bild 4.11 ausgegangen werden kann,
- die Konstruktionsausmittigkeit infolge einbindender Decken stets einen positiven Wert hat,
- bei Systemen mit offener Horizontalfuge eine negative Exzentrizität ein geringeres Sicherheitsniveau bedingen kann (siehe Tabelle 4.15)

eine Annahme von

- + 30 mm nach Bild 4.11 im Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte,
- - 10 mm nach Bild 4.11 im Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung

als Richtwert der maßgebenden Exzentrizität gerechtfertigt.

4.3.6 Übersicht über die Parameter des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte und des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung

die in Tabelle 4.17 angegebenen fünf Nachweisverfahren erläutert und entwickelt, welche zwei Kategorien zugeordnet werden können.

Verfahren		Anwendung	Beschreibung	Nachweisführung
Kategorie 1 : <i>Nachweisverfahren, welche auf der Annahme eines einschichtigen Querschnitts beruhen</i>				
1	Planungsgrundlage	Sowohl auf Systeme mit offener als auch mit geschlossener Horizontalfuge nach Bild 4.10	Der gesamte Querschnitt wird mit den Materialparametern der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton angesetzt. Für eine Nachbewertung dieser in der ursprünglichen Planung angewendeten Vorgehensweise im Rahmen dieser Arbeit wird im Hinblick auf die Gültigkeit des verwendeten Vorschriftenwerkes der Berechnungskomplex 5 nach Tabelle 4.2 zugrundegelegt.	$\gamma = \beta_{R,HLB} / \sigma_{vorh}$ mit $\sigma_{vorh} = N/A+M/W$ $\beta_{R,HLB}$ nach Gl. (4.31)
Kategorie 2 : <i>Nachweisverfahren, welche auf der Annahme eines mehrschichtigen Querschnitts beruhen</i>				
2	Vergleichsflächenverfahren	Sowohl auf Systeme mit offener als auch mit geschlossener Horizontalfuge nach Bild 4.10	Die unterschiedlichen Festigkeiten der einzelnen Schichten werden durch Vergleichsflächen gleicher Festigkeit berücksichtigt und auf das geplante Sicherheitsniveau bezogen.	nach Gl. (4.1)
3	Steifigkeitsverfahren	Sowohl auf Systeme mit offener als auch mit geschlossener Horizontalfuge nach Bild 4.10	Die Beanspruchungen werden den einzelnen Schichten in Abhängigkeit ihrer Steifigkeiten zugewiesen.	nach Gl. (4.2)
4	Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte	Anwendung auf Systeme mit geschlossener Horizontalfuge nach Bild 4.10.	Es wird von der Gültigkeit der Hypothese von Bernoulli ausgegangen. Die Beanspruchungen werden den einzelnen Schichten in Abhängigkeit ihrer Spannungs-Verformungs-Beziehung zugewiesen.	nach Tab. 4.16
5	Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung	Anwendung auf Systeme mit offener Horizontalfuge nach Bild 4.10.	Es wird von der Gültigkeit der Hypothese von Bernoulli ausgegangen. Die Beanspruchungen werden den einzelnen Schichten in Abhängigkeit ihrer Spannungs-Verformungs-Beziehung zugewiesen und es erfolgt eine Verformungsbeschränkung infolge Lasteinleitungsproblematik nach Abschnitt 4.3.3.	nach Tab. 4.16

Tabelle 4.17 : Übersicht über die für Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten erläuterten und entwickelten Nachweisverfahren

Diese fünf Nachweisverfahren werden nun auf die in Tabelle 4.18 angegebenen gewählten geometrischen und stofflichen Parameter zweier Außenwandplatten aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten angewendet. Die Anwendung soll dabei sowohl für Systeme mit geschlossener als auch mit offener Horizontalfuge nach Bild 4.10 erfolgen.

Parameter	Außenwandplatte 1	Außenwandplatte 2
Stärke der inneren gefügedichten Betondeckschicht d_1 [mm]	20	20
Stärke der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton d_2 [mm]	230	230

Stärke der äußeren gefügedichten Betondeckschicht d_3 [mm]	50	50
Betonfestigkeitsklasse der inneren gefügedichten Betondeckschicht	B 10	B 10
Betonfestigkeitsklasse der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	LB 2	LB 2
Betonfestigkeitsklasse der äußeren gefügedichten Betondeckschicht	B 10	B 50
eingetragene äußere Beanspruchung [kN/m]	260	260
Exzentrizität der eingetragenen Beanspruchung gegenüber dem Gesamtquerschnitt [mm]	+ 30	+ 30
Annahme der geplanten Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons [N/mm ²]	5.00	5.00
Knicklänge der Platte [mm]	2800	2800

Tabelle 4.18 : Geometrische und stoffliche Parameter der betrachteten Außenwandplatten aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten

In Tabelle 4.19 sind der Rechengang der einzelnen Nachweisverfahren und die erhaltenen vorhandenen Sicherheiten für diese beiden Außenwandplatten ausgewiesen.

Verfahren	Außenwandplatte 1	Außenwandplatte 2
1	$h_K/d_{ges} = 2800/(20+230+50) = 9.33$ $f_{HLB} = 0.69; \beta_{R,HLB} = 0.69 \cdot 2 = 1.38 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_{vorh} = 260000/((20+230+50) \cdot 1000) + 260000 \cdot 30 \cdot 6 / (1000 \cdot 300^2) = 1.38 \text{ N/mm}^2$ $\gamma_{vorh} = 1.38/1.38 = \mathbf{1.00}$ Die erhaltenen Ergebnisse gelten sowohl für Systeme mit geschlossener als auch mit offener Horizontalfuge	
2	$f_{B,1} = 0.7; \beta_{R1,vorh} = 0.7 \cdot 10 = 7.00 \text{ N/mm}^2$ $h_K/d_2 = 2800/230 = 12.17$ $f_{HLB,2} = 0.61; \beta_{R2,vorh} = 0.61 \cdot 2 = 1.22 \text{ N/mm}^2$ $f_{B,3} = 0.7; \beta_{R3,vorh} = 0.7 \cdot 10 = 7.00 \text{ N/mm}^2$ $\eta = (20 \cdot 7.00 + 230 \cdot 1.22 + 50 \cdot 7.00) / (300 \cdot 5.00) \cdot 100$ $\eta = 51 \%$	$f_{B,1} = 0.7; \beta_{R1,vorh} = 0.7 \cdot 10 = 7.00 \text{ N/mm}^2$ $h_K/d_2 = 2800/230 = 12.17$ $f_{HLB,2} = 0.61; \beta_{R2,vorh} = 0.61 \cdot 2 = 1.22 \text{ N/mm}^2$ $f_{B,3} = 0.58; \beta_{R3,vorh} = 0.58 \cdot 50 = 29.00 \text{ N/mm}^2$ $\eta = (20 \cdot 7.00 + 230 \cdot 1.22 + 50 \cdot 29.00) / (300 \cdot 5.00) \cdot 100$ $\eta = 125 \%$
	Entsprechend des in Tabelle 4.2 angegebenen Spektrums der geplanten Sicherheiten beträgt die Sicherheit der Konstruktion $\gamma_{vorh} = 0.51 \cdot (2.0 \dots 5.0) = \mathbf{1.02 \dots 2.55}$ $\gamma_{vorh} = 1.25 \cdot (2.0 \dots 10.0) = \mathbf{2.50 \dots 12.50}$ Die erhaltenen Ergebnisse gelten sowohl für Systeme mit geschlossener als auch mit offener Horizontalfuge	

Verfahren	Außenwandplatte 1	Außenwandplatte 2
-----------	-------------------	-------------------

3	$f_{B,1} = 0.7; \beta_{R1,vorh} = 0.7 \cdot 10 = 7.00 \text{ N/mm}^2$ $h_K/d_2 = 2800/230 = 12.17$ $f_{HLB,2} = 0.61; \beta_{R2,vorh} = 0.61 \cdot 2 = 1.22 \text{ N/mm}^2$ $f_{B,3} = 0.7; \beta_{R3,vorh} = 0.7 \cdot 10 = 7.00 \text{ N/mm}^2$ $(E \cdot A)_1 = 22000 \cdot 20 \cdot 1000 = 0.44e9 \text{ Nmm}^2/\text{mm}^2$ $(E \cdot A)_2 = 2000 \cdot 230 \cdot 1000 = 0.46e9 \text{ Nmm}^2/\text{mm}^2$ $(E \cdot A)_3 = 22000 \cdot 50 \cdot 1000 = 1.10e9 \text{ Nmm}^2/\text{mm}^2$ $(E \cdot A)_{ges} = 2.00e9 \text{ Nmm}^2/\text{mm}^2$ $(E \cdot I)_1 = 22000 \cdot 1000 \cdot 20^3/12 = 1.46e10 \text{ Nmm}^4/\text{mm}^2$ $(E \cdot I)_2 = 2000 \cdot 1000 \cdot 230^3/12 = 2.03e12 \text{ Nmm}^4/\text{mm}^2$ $(E \cdot I)_3 = 22000 \cdot 1000 \cdot 50^3/12 = 2.29e11 \text{ Nmm}^4/\text{mm}^2$ $(E \cdot I)_{ges} = 2.27e12 \text{ Nmm}^4/\text{mm}^2$ $k_{D,1} = 0.44e9/2.00e9 = 0.22$ $k_{D,2} = 0.46e9/2.00e9 = 0.23$ $k_{D,3} = 1.10e9/2.00e9 = 0.55$ $k_{B,1} = 1.46e10/2.27e12 = 0.01$ $k_{B,2} = 2.03e12/2.27e12 = 0.89$ $k_{B,3} = 2.29e11/2.27e12 = 0.10$ $\sigma_1 = (260000/1000/300 \cdot 0.22 + 260000 \cdot 30 \cdot 6/1000/300^2 \cdot 0.01) \cdot 300/20 = 2.94 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_2 = (260000/1000/300 \cdot 0.23 + 260000 \cdot 30 \cdot 6/1000/300^2 \cdot 0.89) \cdot 300/230 = 0.86 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_3 = (260000/1000/300 \cdot 0.55 + 260000 \cdot 30 \cdot 6/1000/300^2 \cdot 0.10) \cdot 300/50 = 3.17 \text{ N/mm}^2$ $\gamma_{vorh,1} = 7.00/2.94 = 2.38$ $\gamma_{vorh,2} = 1.22/0.86 = 1.42$ $\gamma_{vorh,3} = 7.00/3.17 = 2.21$ <p>Um die erhaltenen Sicherheiten in den einzelnen Schichten mit den Sicherheiten der anderen Verfahren vergleichen zu können, wird eine über den Querschnitt gemittelte Sicherheit errechnet :</p> $\gamma_{vorh} = (2.38 \cdot 20 + 1.42 \cdot 230 + 2.21 \cdot 50)/300 = \mathbf{1.62}$ Die erhaltenen Ergebnisse gelten sowohl für Systeme mit geschlossener als auch mit offener Horizontalfuge	$f_{B,1} = 0.7; \beta_{R1,vorh} = 0.7 \cdot 10 = 7.00 \text{ N/mm}^2$ $h_K/d_2 = 2800/230 = 12.17$ $f_{HLB,2} = 0.61; \beta_{R2,vorh} = 0.61 \cdot 2 = 1.22 \text{ N/mm}^2$ $f_{B,3} = 0.58; \beta_{R3,vorh} = 0.58 \cdot 50 = 29.00 \text{ N/mm}^2$ $(E \cdot A)_1 = 22000 \cdot 20 \cdot 1000 = 0.44e9 \text{ Nmm}^2/\text{mm}^2$ $(E \cdot A)_2 = 2000 \cdot 230 \cdot 1000 = 0.46e9 \text{ Nmm}^2/\text{mm}^2$ $(E \cdot A)_3 = 38000 \cdot 50 \cdot 1000 = 1.90e9 \text{ Nmm}^2/\text{mm}^2$ $(E \cdot A)_{ges} = 2.80e9 \text{ Nmm}^2/\text{mm}^2$ $(E \cdot I)_1 = 22000 \cdot 1000 \cdot 20^3/12 = 1.46e10 \text{ Nmm}^4/\text{mm}^2$ $(E \cdot I)_2 = 2000 \cdot 1000 \cdot 230^3/12 = 2.03e12 \text{ Nmm}^4/\text{mm}^2$ $(E \cdot I)_3 = 38000 \cdot 1000 \cdot 50^3/12 = 3.96e11 \text{ Nmm}^4/\text{mm}^2$ $(E \cdot I)_{ges} = 2.44e12 \text{ Nmm}^4/\text{mm}^2$ $k_{D,1} = 0.44e9/2.80e9 = 0.16$ $k_{D,2} = 0.46e9/2.80e9 = 0.16$ $k_{D,3} = 1.90e9/2.80e9 = 0.68$ $k_{B,1} = 1.46e10/2.44e12 = 0.01$ $k_{B,2} = 2.03e12/2.44e12 = 0.83$ $k_{B,3} = 3.96e11/2.44e12 = 0.16$ $\sigma_1 = (260000/1000/300 \cdot 0.16 + 260000 \cdot 30 \cdot 6/1000/300^2 \cdot 0.01) \cdot 300/20 = 2.16 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_2 = (260000/1000/300 \cdot 0.16 + 260000 \cdot 30 \cdot 6/1000/300^2 \cdot 0.83) \cdot 300/230 = 0.74 \text{ N/mm}^2$ $\sigma_3 = (260000/1000/300 \cdot 0.68 + 260000 \cdot 30 \cdot 6/1000/300^2 \cdot 0.16) \cdot 300/50 = 4.04 \text{ N/mm}^2$ $\gamma_{vorh,1} = 7.00/2.16 = 3.24$ $\gamma_{vorh,2} = 1.22/0.74 = 1.65$ $\gamma_{vorh,3} = 29.00/4.04 = 7.18$ $\gamma_{vorh} = (3.24 \cdot 20 + 1.65 \cdot 230 + 7.18 \cdot 50)/300 = \mathbf{2.68}$
---	---	--

Verfahren	Außenwandplatte 1	Außenwandplatte 2
-----------	-------------------	-------------------

4	<p>Nachfolgende Spannungsverteilung wird erhalten :</p> <p>$\gamma_{vorh} = 1.56$</p>	<p>Nachfolgende Spannungsverteilung wird erhalten :</p> <p>$\gamma_{vorh} = 1.54$</p>
<p>Die erhaltenen Ergebnisse gelten nur für Systeme mit geschlossener Horizontalfuge</p>		
5	<p>Nachfolgende Spannungsverteilung wird erhalten :</p> <p>$\Delta\sigma = (1.63 - 0.23) * 1.56$ $\Delta\sigma = 2.18 < \Delta\sigma_r$ $\gamma_{vorh} = 1.56$</p>	<p>Nachfolgende Spannungsverteilung wird erhalten :</p> <p>$\Delta\sigma = (3.56 - 0.11) * 1.45$ $\Delta\sigma = 5.00 = \Delta\sigma_r$ $\gamma_{vorh} = 1.45$</p>
<p>Die erhaltenen Ergebnisse gelten nur für Systeme mit offener Horizontalfuge</p>		

Tabelle 4.19 : Gegenüberstellung der für Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten erläuterten und entwickelten Nachweisverfahren anhand von Beispielen

Im Ergebnis der vorangegangenen Beispielrechnungen können folgende Aussagen zur Anwendbarkeit der Berechnungsverfahren getroffen werden :

- Bei den in der ursprünglichen Planung angewendeten genormten Nachweisverfahren (Planungsgrundlage), dem Vergleichsflächenverfahren und dem Steifigkeitsverfahren können aufgrund der Tatsache, daß die Nachweisführung sowohl für Systeme mit offener als auch mit geschlossener Horizontalfuge gleichermaßen erfolgt, die spezifischen Besonderheiten,

welche infolge der Lasteinleitungsproblematik bei Systemen mit offener Horizontalfuge gegeben sind, nicht erfaßt werden.

- Bei den in der ursprünglichen Planung angewendeten genormten Nachweisverfahren werden darüber hinaus aufgrund der Tatsache, daß ihnen die Annahme eines einschichtigen Querschnitts zugrundeliegt, die differenten Festigkeiten der Materialien der einzelnen Schichten nicht berücksichtigt.
- Eine Berücksichtigung sowohl der unterschiedlichen Festigkeiten als auch der Lasteinleitungsproblematik bei Systemen mit offener Horizontalfuge kann nur mit dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung erfolgen.

Betrachtet man die ermittelten Sicherheiten, so erfolgt sowohl beim Vergleichsflächenverfahren als auch beim Steifigkeitsverfahren infolge der höheren Festigkeit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht der Außenwandplatte 2 gegenüber der Außenwandplatte 1 bei der Nachweisführung eine zum Teil erhebliche rechnerische Vergrößerung des Sicherheitsniveaus.

Erfolgt der Nachweis dagegen mit dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte oder dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung, so erhält man bei höherer Festigkeit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht ein geringeres Sicherheitsniveau.

Die mit dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte oder mit dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung ermittelte Sicherheit ist aus folgenden Gründen realistischer :

- Wird eine geschlossene Horizontalfuge vorausgesetzt, kann bei gleicher Lasteinleitung aufgrund der Tatsache, daß sich infolge der Exzentrizität der äußeren Beanspruchung die maximale Stauchung auf der Platteninnenseite ergeben muß, die erhöhte Festigkeit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht nicht aktiviert werden.

Da eine Veränderung der Spannungs-Verformungs-Beziehung dieser Schicht jedoch eine veränderte Dehnungsebene bedingt und die Festigkeit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht nicht unbegrenzt aktiviert werden kann, weil in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton die gleiche Verformung herrschen muß, ist eine Reduzierung des Sicherheitsniveaus die Folge.

- Betrachtet man Systeme mit offener Horizontalfuge, führt das Lasteinleitungsproblem zur Reduzierung des Sicherheitsniveaus. Da auch hier die Festigkeit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht nicht unbegrenzt aktivierbar ist, sondern eine Beschränkung der aktivierbaren Festigkeitsdifferenz zwischen dieser Schicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton durch die repräsentative Festigkeitsdifferenz erfolgen muß, können zwei unterschiedliche Versagensmechanismen das vorhandene Sicherheitsniveau bestimmen :

Versagensmechanismus 1. Bei Außenwandplatte 1 nach Tabelle 4.18 wurde die repräsentative Festigkeitsdifferenz nicht überschritten, sondern die Druckfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons stellt das maßgebende Kriterium dar. In diesem Fall wurde die Festigkeit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht ohne Beschränkung aktiviert.

Versagensmechanismus 2. Bei Außenwandplatte 2 nach Tabelle 4.18 wird dagegen das Erreichen der repräsentativen Festigkeitsdifferenz für die Ermittlung des vorhandenen Sicherheitsniveaus maßgebend. Deshalb kann die höhere Festigkeit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht nur begrenzt aktiviert werden. Durch die Beschränkung der Verformung in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton verläuft die Verformungsebene gegenüber der Verformungsebene der Außenwandplatte 1 auf geringerem Niveau, was zu einer Verringerung des vorhandenen Sicherheitsniveaus bei Außenwandplatte 2 führt.

Bei einer sehr großen Festigkeitsdifferenz zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton muß aufgrund dieser Aussagen das rechnerische Sicherheitsniveau unterhalb des Sicherheitsniveaus einer Konstruktion mit geringer Festigkeitsdifferenz zwischen diesen beiden Schichten liegen.

Nur eine Nachweisführung mit dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte für Systeme mit geschlossener Horizontalfuge und dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung für Systeme mit offener Horizontalfuge entspricht dieser Forderung.

Deutlich wird dies bei Anwendung der genannten Nachweisverfahren auf zu sanierende Gebäude mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten.

In Bild 4.22 ist die Verteilung des in [46, 48, 54] ermittelten Sicherheitsniveaus in Abhängigkeit des verwendeten Nachweisverfahrens und der betrachteten Höhe am Gebäude für ein Gebäude der Typenserie P2 nach [40] mit repräsentativen stofflichen und geometrischen Parametern dargestellt. Obwohl es sich bei diesem Gebäude um ein System mit offener Horizontalfuge handelt, wurde neben dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung auch das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte einbezogen.

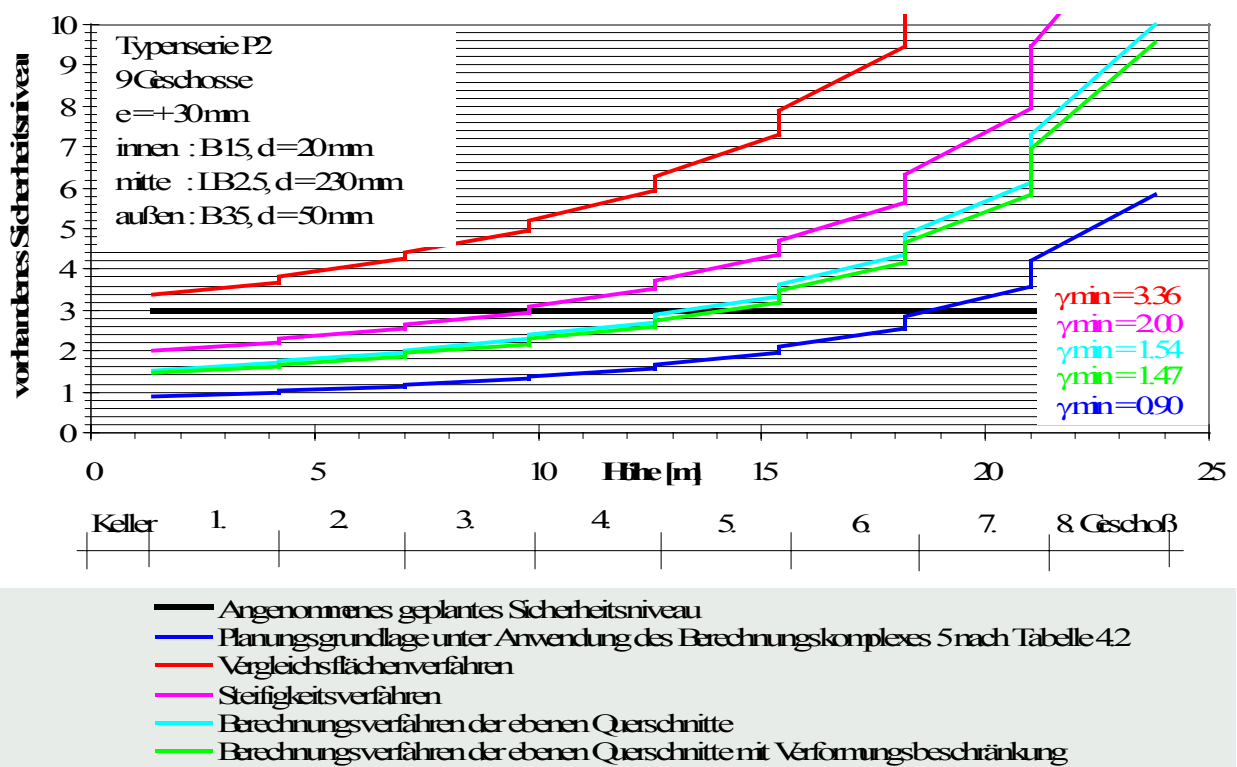


Bild 4.22 : Gegenüberstellung der mit den Nachweisverfahren ermittelten Sicherheitsniveaus anhand des Gebäudes Yorckstraße 50 - 58, Chemnitz

Wird der Nachweis der Standsicherheit nach der Planungsgrundlage geführt, wird ein minimales Standsicherheitsniveau von $\gamma_{\text{vorh}} = 0.90$ ausgewiesen. Eine solche vorhandene Standsicherheit würde bereits zum Versagen der Konstruktion führen.

Da das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung für Systeme mit offener Horizontalfuge aufgrund der vorangegangenen Erläuterungen das tatsächliche Tragverhalten der Konstruktion genauer erfassen kann als die Berechnungsverfahren, welche der ursprünglichen Planung der Außenwandelemente zugrunde lagen, ist für dieses Gebäude eine rechnerische Erhöhung des vorhandenen minimalen Sicherheitsniveaus bei Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung um 63 % auf $\gamma_{\text{vorh}} = 1.47$ möglich.

Dieses Standsicherheitsniveau ergibt sich infolge der Verformungsbeschränkung in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichteten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton. Hätte es sich bei dem Gebäude um ein System mit geschlossener Horizontalfuge gehandelt, so wäre infolge der jetzt maßgebenden Beschränkung der Verformbarkeit des haufwerksporigen Leichtbetons ein minimales Standsicherheitsniveau von $\gamma_{\text{vorh}} = 1.54$ nachweisbar gewesen, was einer rechnerischen Erhöhung des Sicherheitsniveaus um 70 % entspricht.

Wird die Nachweisführung dagegen mit dem Vergleichsflächenverfahren oder dem Steifigkeitsverfahren durchgeführt, erfolgt aufgrund der nicht beachteten Verformbarkeit des mehrschichtigen Querschnitts und der damit verbundenen unbegrenzten Lastzuweisung in die einzelnen Schichten eine Überschätzung des Tragverhaltens der Konstruktion.

Eine rechnerische Nachweisführung von mehrschichtigen Konstruktionen ohne Beachtung der Verformbarkeit des Querschnitts kann demzufolge auf der unsicheren Seite liegen. Aus diesem Grund ist sowohl das Vergleichsflächenverfahren als auch das Steifigkeitsverfahren für einen Nachweis der vorhandenen Standsicherheit von Gebäuden aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten nicht geeignet.

Um den Aufwand bei der Standsicherheitsbeurteilung solcher Konstruktionen zu begrenzen, wird folgende zweistufige Nachweisführung vorgeschlagen, welche sukzessive angewendet werden kann :

Stufe1. Annahme eines einschichtigen Querschnitts. Der gesamte Querschnitt wird mit den Materialparametern der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton in Ansatz gebracht (Planungsgrundlage). Um dem gültigen Vorschriftenwerk der DIN zu entsprechen, wird die Anwendung des Berechnungskomplexes 5 nach Tabelle 4.2 empfohlen.

Stufe2. Zugrundelegung des real vorhandenen mehrschichtigen Querschnitts. Die Nachweisführung erfolgt unter Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte für Systeme mit geschlossener Horizontalfuge und des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung für Systeme mit offener Horizontalfuge.

4.5 Anzuwendende Sicherheitskonzepte

Auch die anzuwendenden Sicherheitskonzepte unterscheiden sich bei diesen beiden Stufen der Nachweisführung.

Für den Nachweis einschichtiger Querschnitte aus haufwerksporigem Leichtbeton wird in DIN 4232 [23] ein erforderliches Sicherheitsniveau von $\gamma_{\text{erf,HLB}} = 3.0$ angegeben. Dieses Sicherheitsniveau entspricht dem bei Anwendung des Nachweisverfahrens der Stufe 1 nach Abschnitt 4.4 zu fordernden globalen Sicherheitsniveau.

Den Nachweisverfahren der Stufe 2 nach Abschnitt 4.4 liegt dagegen die Annahme eines mehrschichtigen Verbundquerschnitts aus Beton und haufwerksporigem Leichtbeton zugrunde. Während nach DIN 4232 [23] für die Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton eine globale Sicherheit von $\gamma_{\text{erf,HLB}} = 3.0$ zu fordern ist, wird für die gefügedichten Betondeckschichten in

DIN 1045 [19] von einem erforderlichen globalen Sicherheitsniveau von $\gamma_{\text{erf,B}} = 2.1$ ausgegangen.

Die ausschließliche Anwendung eines dieser Sicherheitsfaktoren auf einen mehrschichtigen Verbundquerschnitt ist aufgrund der Tatsache, daß diese globalen Sicherheitsfaktoren für den Nachweis einschichtiger Querschnitte entwickelt wurden, nicht gerechtfertigt.

Da dem gültigen Vorschriftenwerk der DIN jedoch nicht entnommen werden kann, wie ein zu forderndes globales Sicherheitsniveau eines mehrschichtigen Verbundquerschnitts zu ermitteln ist, kann auf der Grundlage dieses Vorschriftenwerkes ein solcher Sicherheitsfaktor nicht angegeben werden.

Deshalb kann zu den in Abschnitt 4.4 mit dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte und dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung ermittelten vorhandenen globalen Sicherheiten kein äquivalenter Wert angegeben werden, welcher in Form eines nachzuweisenden Sicherheitsniveaus nicht unterschritten werden darf.

Die Ermittlung einer globalen Sicherheit mit diesen Berechnungsverfahren ist somit für einen Vergleich mit den anderen Nachweisverfahren nach Abschnitt 4.1 und 4.2 für mehrschichtige Querschnitte zwar sinnvoll, für eine Nachweisführung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten jedoch nicht anwendbar.

Es ist daher für das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte und das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung ein auf Teilsicherheitsfaktoren basierendes Sicherheitskonzept zu entwickeln, welches die differenten Materialeigenschaften der gefügedichten Betondeckschichten und des haufwerksporigen Leichtbetons berücksichtigt.

Aus diesem Grund ist nachfolgende weitere Anpassung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte und des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung erforderlich :

- Die äußeren Beanspruchungen werden mit Teilsicherheitsfaktoren belegt und mit ihren γ_G - bzw. γ_Q -fachen Werten in Ansatz gebracht.
- Die aus den Verformungen des Querschnitts ermittelten Spannungen werden mit Teilsicherheitsfaktoren belegt und gehen mit ihren $1/\gamma_B$ - bzw. $1/\gamma_{\text{HLB}}$ -fachen Werten in die Berechnung ein.
- Die äußeren Beanspruchungen werden desweiteren mit einem Faktor ξ behaftet. Wird für ξ ein sehr großer Wert gewählt, wird der Querschnitt zunächst nicht in der Lage sein, die äußere Beanspruchung aufzunehmen. Ein Gleichgewicht zwischen innerer und äußerer Beanspruchung ist dann nicht möglich. Durch eine schrittweise Reduzierung kann jedoch der Wert ξ ermittelt werden, welcher zum Gleichgewicht zwischen innerer und äußerer Beanspruchung führt. Der Nachweis des Querschnittes gilt als erfüllt, wenn ein Wert $\xi \geq 1.0$ erhalten wird.

In Anlehnung an die vereinfachte Kombinationsregel der DIN V 18932 T1 Eurocode 2 [30] und auf der Grundlage von [64] können in Tabelle 4.20 die Werte der anzuwendenden Teilsicherheitsfaktoren γ_G , γ_Q , γ_B und γ_{HLB} angegeben werden.

Äußere Beanspruchung		Innere Beanspruchung	
Ständige Einwirkung (Eigenlast)	Veränderliche Einwirkung (Verkehrslast, Windlast)	Gefügedichte Betondeckschichten	Haufwerksporiger Leichtbeton
γ_G [-]	γ_Q [-]	γ_B [-]	γ_{HLB} [-]
1.35	$\psi * 1.50^*$	1.50	2.00

* Liegen mehrere veränderliche Einwirkungen vor, so ist der ungünstigere Wert aus der größten veränderlichen Einwirkung mit $\psi = 1.0$ und der Summe aller veränderlichen Einwirkungen mit $\psi = 0.9$ maßgebend (Anwendung der vereinfachten Kombinationsregel nach [30]).

Tabelle 4.20 : Im Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte und dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung anzuwendende Teilsicherheitsfaktoren

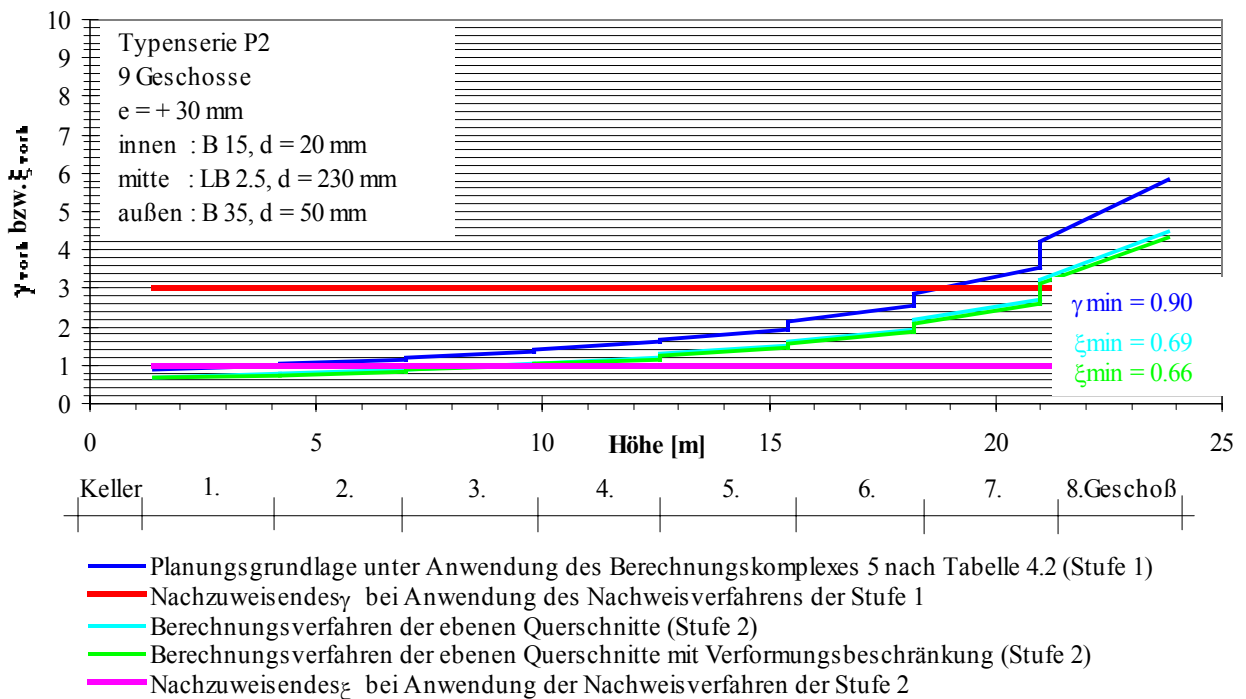
In Tabelle 4.21 sind die beiden Stufen der Nachweisführung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten noch einmal zusammenfassend angegeben.

Stufe	Nachweisverfahren	anzuwendendes Sicherheitskonzept
1	Der gesamte Querschnitt wird als einschichtiger Querschnitt betrachtet und mit den Materialparametern der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton in Ansatz gebracht (Planungsgrundlage). Um dem gültigen Vorschriftenwerk der DIN zu entsprechen, wird die Anwendung des Berechnungskomplexes 5 nach Tabelle 4.2 empfohlen.	Anwendung eines globalen Sicherheitsfaktors. Nachweis : $\gamma \geq 3.0$
2	Zugrundelegung eines mehrschichtigen Querschnitts über die gesamte Querschnittsbreite und Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte bei Systemen mit geschlossener Horizontalfuge nach Bild 4.10 und des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung bei Systemen mit offener Horizontalfuge nach Bild 4.10.	Anwendung von Teilsicherheitsfaktoren nach Tabelle 4.20. Nachweis : $\xi \geq 1.0$

Tabelle 4.21 : Übersicht über die anzuwendende zweistufige Nachweisführung bei Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten

Wendet man diese beiden Stufen der Nachweisführung auf das bereits in Abschnitt 4.4 betrachtete Gebäude an, so erhält man in Abhängigkeit der betrachteten Höhe am Gebäude die in Bild 4.23 dargestellten nachweisbaren Werte für γ und ξ .

Bild 4.23 : Gegenüberstellung der unter Anwendung der Berechnungsverfahren der Stufen 1 und 2 auf das Gebäude Yorckstraße 50 - 58, Chemnitz ermittelten Sicherheitsniveaus



Betrachtet man das minimale Verhältnis von nachweisbarem zu nachzuweisendem Wert γ bzw. ξ , so erhält man folgende Verhältniswerte :

$$\begin{aligned} \text{Nachweisverfahren der Stufe 1 :} & \quad 0.90 / 3.00 & = & \quad 0.30 \\ \text{Nachweisverfahren der Stufe 2 :} & \quad (0.66 \text{ bzw. } 0.69) / 1.00 & = & \quad 0.66 \text{ bzw. } 0.69 \end{aligned}$$

Obwohl damit aufgrund der Anwendung des differenzierten sicherheitstheoretischen Modells mit den Nachweisverfahren der Stufe 2 gegenüber den Nachweisverfahren der Stufe 1 eine rechnerische Erhöhung des vorhandenen Verhältnisses von nachweisbarem zu nachzuweisendem Wert und damit des Sicherheitsniveaus um bis zu 130 % möglich ist, unterschreiten die für das Gebäude ermittelten Werte für γ und ξ in Abhängigkeit des betrachteten Geschosses die nachzuweisenden Werte zum Teil beträchtlich.

Für die Geschosse, für die die geforderten Werte nicht nachgewiesen werden können, muß somit durch geeignete Maßnahmen eine Standsicherheitserhöhung erfolgen (siehe Kapitel 5). Eine solche standsicherheitserhöhende Maßnahme wäre für das betrachtete Gebäude bei alleiniger Anwendung des Nachweisverfahrens der Stufe 1 bis zur Oberkante des 7. Geschosses erforderlich. Werden dagegen die Nachweisverfahren der Stufe 2 in Abhängigkeit der Ausbildung der Horizontalfuge nach Bild 4.10 angewendet, ist eine Standsicherheitserhöhung bis zur Oberkante des 3. Geschosses ausreichend.

4.6 Vereinfachte Nachweisverfahren auf der Grundlage des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte und des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung

Da sowohl das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte als auch das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung aufgrund der beiden übereinanderliegenden Iterationen im Regelfall nur rechentechisch handhabbar ist, erscheint es sinnvoll, vereinfachte Rechenansätze auf der Grundlage dieser beiden Verfahren zu entwickeln.

Folgende Vorgehensweisen sind dabei möglich :

1. Ermittlung der geschlossenen Lösung der den Berechnungsverfahren zugrundeliegenden Gleichgewichtsbedingungen,
2. Entwicklung eines empirischen Verfahrens auf der Grundlage von Parameterstudien.

In [87] wurde der Versuch unternommen, die geschlossene Lösung der Gleichgewichtsbedingungen zu ermitteln. Dazu war erforderlich :

- Ermittlung der geschlossenen Lösung der Bestimmung der Spannungsverteilung aus der Verformungsebene auf der Grundlage der Kenntnis der Spannungs-Verformungs-Beziehungen für die einzelnen Schichten des Querschnitts,
- Ermittlung der geschlossenen Lösung des der 1. Iteration (Erfüllung der Gleichgewichtsbedingungen nach Abschnitt 4.2.4) zugrundeliegenden Newtonschen Näherungsverfahrens oder Entwicklung eines geschlossen lösbar Verfahrens,
- Entwicklung eines geschlossen lösbar Verfahrens für die 2. Iteration (schrittweise Reduzierung von ξ nach Abschnitt 4.5).

Aufgrund der Tatsache, daß

- die Spannungs-Verformungs-Beziehungen der Materialien der einzelnen Schichten Unstetigkeitsstellen aufweisen (siehe Abschnitt 4.3.1),
- sich die Spannungs-Verformungs-Beziehungen für die Materialien der einzelnen Schichten unterscheiden (siehe Abschnitt 4.3.1),

ist eine geschlossene Lösung der Bestimmung der Spannungsverteilung aus der Verformungsebene nur abschnittsweise möglich.

Da in [87] darüber hinaus für die beiden Iterationen aufgrund der Komplexität der Beziehungen keine geschlossen lösbar Verfahren entwickelt werden konnten, ist eine Vereinfachung der Berechnungsverfahren durch eine geschlossene Lösung der den Berechnungsverfahren zugrundeliegenden Gleichgewichtsbedingungen nicht möglich.

Damit kann ein vereinfachtes Verfahren nur auf empirischem Weg auf der Grundlage von Parameterstudien der nachfolgenden veränderlichen Parameter entwickelt werden :

1. Stärke der inneren gefügedichten Betondeckschicht,
2. Stärke der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton,
3. Stärke der äußeren gefügedichten Betondeckschicht,
4. Festigkeit der inneren gefügedichten Betondeckschicht,
5. Festigkeit der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton,
6. Festigkeit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht,
7. äußere Normalkraftbeanspruchung,
8. äußere Momentenbeanspruchung,
9. Ausbildung der Horizontalfuge nach Bild 4.10.

Aufgrund der Tatsache, daß

- die Anzahl dieser zu berücksichtigenden Parameter nicht reduziert werden kann (z.B. durch Erfassung der geometrischen und stofflichen Parameter durch einheitliche Größen) [34, 85],
- eine Parameterstudie auf der Grundlage von neun veränderlichen Parametern nur mit einem erheblichen rechnerischen und zeitlichen Aufwand durchgeführt werden kann [34, 85],

muß festgestellt werden, daß eine grundlegende Vereinfachung der beiden Berechnungsverfahren nicht möglich ist.

4.7 Verbundproblematik

4.7.1 Einfluß des Verbundes zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton

Für die Anwendung der beiden Berechnungsverfahren

- Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte für Systeme mit geschlossener Horizontalfuge,
- Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung für Systeme mit offener Horizontalfuge

wurde das Vorhandensein eines vollständigen Verbundes zwischen den einzelnen Schichten vorausgesetzt.

Während von einem vollständigen Verbund zwischen der inneren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton ausgegangen werden kann [74], wurden Schädigungen des Verbundes zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton an einer Vielzahl von Gebäuden festgestellt [42, 55, 74]. Die Ursachen für diese Verbundschädigungen sind in den nachfolgenden Punkten zu sehen :

Zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton können extreme Festigkeitsunterschiede von B 5 ... B 50 für die äußere gefügedichte Betondeckschicht und < LB2 ... LB 8 für die Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton vorhanden sein (siehe Kapitel 3).

Aufgrund der Tatsache, daß

- der Temperaturexpansionskoeffizient des Betons vom Anteil des Zementsteins und der Art der Zuschlagstoffe abhängig ist [8],
- die äußere gefügedichte Betondeckschicht vor Fassadensanierungsmaßnahmen extremen Temperaturdifferenzen von $\Delta T = - 20 \dots + 80 \text{ }^\circ \text{C}$ ausgesetzt wird [24],
- die Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton infolge der Fugenausbildung und der Verschweißungen allseitig gehalten ist [40],

treten wegen des somit vorhandenen differenten Verformungsverhaltens der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton in der Grenzfläche zwischen diesen beiden Schichten Schubbeanspruchungen auf [42].

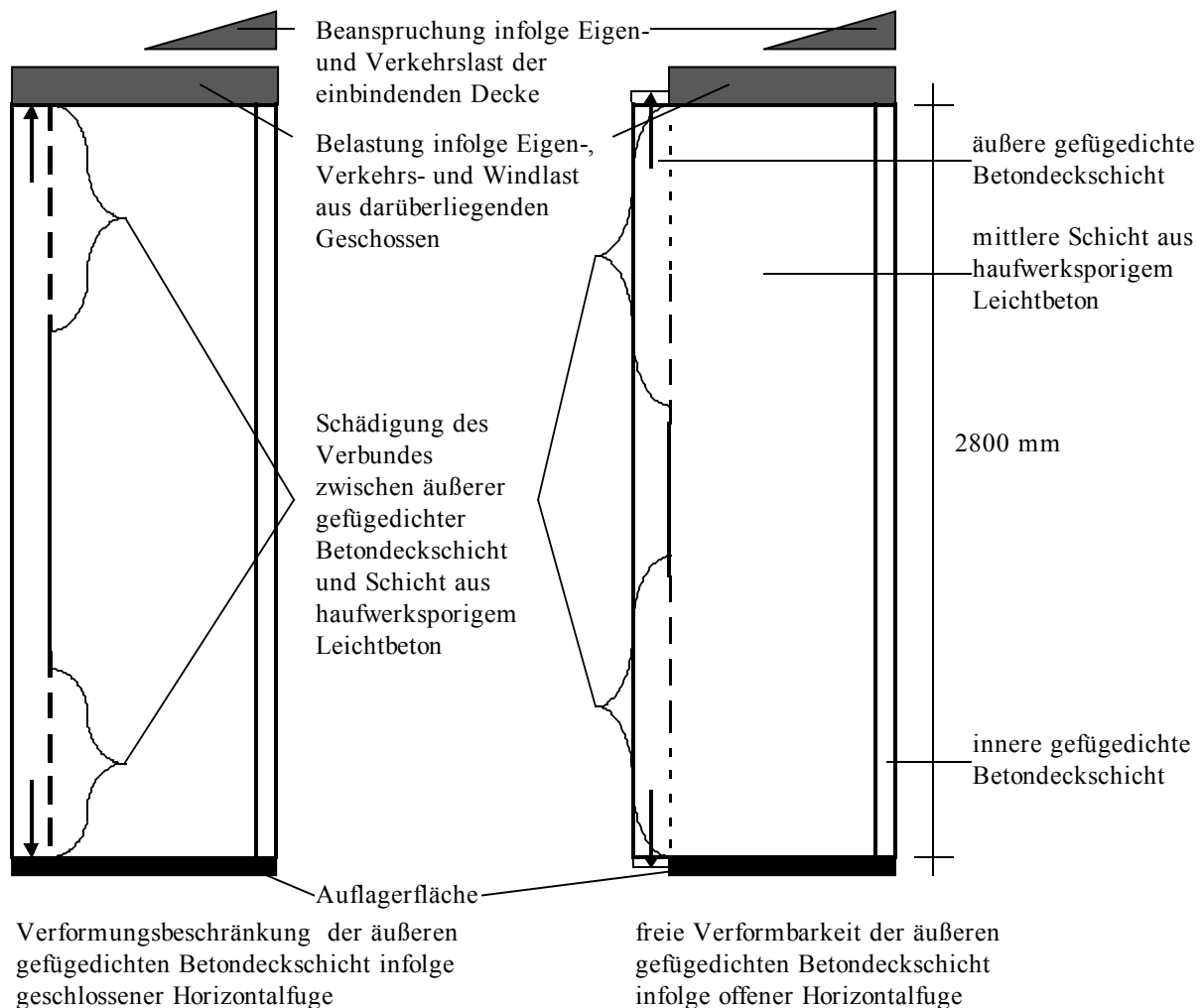
Geht man nun von einem Verformungsnullpunkt in der Mitte der Verbundfläche aus, so wird die Beanspruchung in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton zu den Plattenrändern zunehmen, was in diesen Bereichen zu einer Schädigung des Verbundes führen kann [95].

Diese erste Stufe der Verbundschädigung bildet aufgrund der daraus resultierenden Ribbildung an den Stirnflächen des Außenwandelementes die Grundlage für eine Durchfeuchtung infolge des eindringenden Niederschlagswassers (siehe Bild 1.1).

Die darauffolgenden Frost-Tauwechsel-Prozesse können als zweite Stufe der Verbundschädigung angesehen werden und führen zwangsläufig zu einer weiteren Zerstörung der Konstruktion.

Eine Schädigung des Verbundes zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton führt dazu, daß in der Grenzfläche zwischen diesen beiden Schichten keine oder nur eine eingeschränkte Beanspruchungsübertragung möglich ist.

In Bild 4.24 ist eine solche Verbundschädigung dargestellt.



System mit geschlossener Horizontalfuge

System mit offener Horizontalfuge

Bild 4.24 : Mögliche Schädigung des Verbundes zwischen der äußeren gefügedichteten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton infolge Temperaturbeanspruchung

Da die Verformbarkeit der äußeren gefügedichteten Betondeckschicht infolge von Temperaturbeanspruchung bei Systemen mit offener Horizontalfuge größer ist als bei Systemen mit geschlossener Horizontalfuge, muß bei diesen Systemen auch die mögliche Verbundschädigung zwischen der äußeren gefügedichteten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton größer sein.

Für Systeme mit geschlossener Horizontalfuge ergeben sich folgende Schlußfolgerungen :

- Bis zu einer bestimmten Größe der Verbundschädigung ist eine direkte Einleitung der Beanspruchung in die äußere gefügedichtete Betondeckschicht ohne Veränderung des Tragverhaltens der gesamten Konstruktion möglich.

-
-
- Ist eine größere Schädigung des Verbundes vorhanden, ergibt sich aufgrund der Schlankheit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht ein Stabilitätsproblem, welches zum vollständigen Versagen und zum Herabfallen dieser Schicht führen würde.

Für Systeme mit offener Horizontalfuge treten infolge einer Schädigung des Verbundes zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton zwei für das Tragverhalten der Gesamtkonstruktion gegenläufige Effekte ein :

- Da in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton keine Beanspruchungen übertragen werden können, entsteht eine Verminderung der Lasteinleitungsproblematik im Kopf- und Fußbereich der Konstruktion.

Daraus ergibt sich eine Erhöhung der Beanspruchbarkeit.

- Da aufgrund des geschädigten Verbundes keine Beanspruchungen auf die äußere gefügedichte Betondeckschicht übertragen werden können, kommt es zu einer Schwächung des statisch wirksamen Querschnitts.

Dies führt zu einer Verringerung der Beanspruchbarkeit.

Um den Einfluß dieser beiden Effekte auf das Tragverhalten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten zu ermitteln, wurde ein Großplattenversuch mit einem Außenwandelement mit geschädigtem Verbund zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton in Anlehnung an DIN EN 1740 [28] durchgeführt [78]. In diesem Versuch wurde

- die Versagensbeanspruchung eines Originalelementes aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten und geschädigtem Verbund zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton bestimmt, wobei die Lasteintragung den real am Bauwerk vorhandenen Gegebenheiten eines Systems mit offener Horizontalfuge entsprach,
- diese Versagensbeanspruchung mit Festigkeitskennwerten aus zylindrischen Probekörpern verglichen, welche dem Element nach dem Versuch entnommen wurden,
- das Bruchverhalten des Elementes dokumentiert,
- die Spannungs-Verformungs-Beziehung des Elementes erfaßt,
- die Biegelinie des Elementes unter Lasteinwirkung bestimmt,
- mittels Schallemissionsanalyse die Beanspruchung bestimmt, mit welcher eine irreversible Formänderung (Beginn der instabilen Mikrorißbildung) eingeleitet wird,
- aus den genannten Punkten Rückschlüsse auf das Versagenskriterium gezogen.

Die detaillierten Untersuchungsergebnisse können [75, 78, 83] entnommen werden. In Tabelle 4.22 sind die für die Beurteilung des Einflusses der Schädigung des Verbundes charakteristischen Parameter zusammengefaßt.

<i>Charakteristischer Parameter</i>	<i>Platte 4</i>
Stärke der inneren gefügedichten Betondeckschicht [mm]	5
Stärke der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton [mm]	290
Stärke der äußeren gefügedichten Betondeckschicht [mm]	25
Betonfestigkeitsklasse der inneren gefügedichten Betondeckschicht	nicht ermittelbar
Betonfestigkeitsklasse der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	LB 6
Betonfestigkeitsklasse der äußeren gefügedichten Betondeckschicht	durch Kernbohrungen zerstört
eingetragene äußere Beanspruchung im Bruchzustand [kN/m]	2304.0
Exzentrizität der eingetragenen Beanspruchung gegenüber dem Gesamtquerschnitt [mm]	+ 30
Verformung auf der Oberfläche der inneren gefügedichten Betondeckschicht im Bruchzustand [‰]	- 0.50 ... - 1.30
Verformung auf der Oberfläche der äußeren gefügedichten Betondeckschicht im Bruchzustand [‰]	0.01 ... 0.05
Verhältniswert von äußerer Beanspruchung im irreversiblen Verformungszustand und äußerer Beanspruchung im Bruchzustand [-]	0.60 ... 0.61
Versagenskriterium	Überschreitung der diametralen Zugspannungen im haufwerksporigen Leichtbeton
Bruchbild	Aufreißen der Konstruktion über die Plattenhöhe in Plattenebene in der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton, und zwar gleichzeitig von unten und von oben
f_{Platte} nach Gleichung 4.35 [-]	0.62
eingetragene äußere Normalkraft im rechnerischen Versagenszustand [kN/m]	1428.0
eingetragenes äußeres Moment im rechnerischen Versagenszustand [kNm/m]	43.0

Tabelle 4.22 : *Charakteristische Parameter der im Großplattenversuch untersuchten Konstruktion mit geschädigtem Verbund*

Tabelle 4.22 kann entnommen werden, daß auch bei Platte 4 analog zu den Platten 1 ... 3 (siehe Tabelle 4.6) als Versagenskriterium die Überschreitung der diametralen Zugspannungen des haufwerksporigen Leichtbetons festgestellt wurde und ein Aufreißen der Konstruktion in Plattenebene stattfand.

Obwohl die Versagenskriterien von Konstruktionen mit ungeschädigtem und geschädigtem Verbund zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton damit gleich sind, werden sie durch unterschiedliche Versagensmechanismen ausgelöst.

Während, wie in Abschnitt 4.3.4.2 beschrieben, bei den Platten 1 ... 3 die im Lasteinleitungsbereich eingetragenen Zugbeanspruchungen das Versagen auslösen, erfolgt das Aufreißen der

Platte 4 durch das charakteristische Versagenskriterium des auf Druck beanspruchten haufwerksporigen Leichtbetons [71].

<i>Charakteristischer Parameter</i>	<i>Platte 1</i>	<i>Platte 2</i>	<i>Platte 3</i>	<i>Platte 4</i>
Verbund zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	ungeschädigt	ungeschädigt	ungeschädigt	geschädigt
Betonfestigkeitsklasse der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	LB 3	LB 4	LB 8	LB 6
Stärke der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton [mm]	230	230	290	290
eingetragene äußere Beanspruchung im Bruchzustand [kN/m]	998.0	1264.0	2470.0	2304.0
Exzentrizität der eingetragenen Beanspruchung gegenüber dem Gesamtquerschnitt [mm]	+ 30	+ 30	+ 30	+ 30
eingetragene äußere Normalkraft im rechnerischen Versagenszustand [kN/m]	579.0	733.0	1531.0	1428.0
eingetragenes äußeres Moment im rechnerischen Versagenszustand [kNm/m]	17.4	22.0	46.0	43.0

Tabelle 4.23 : Vergleich charakteristischer Parameter der Platten 1 ... 4

Betrachtet man nun die in Tabelle 4.23 dargestellten experimentell ermittelten Versagensbeanspruchungen und die Beanspruchungen im rechnerischen Versagenszustand im Verhältnis zur Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons der Platten 1 ... 4, können folgende Aussagen getroffen werden :

- Obwohl der experimentellen Untersuchung die extremste Art einer Verbundschädigung, die vollständige Zerstörung der äußeren gefügedichten Betondeckschicht, zugrundegelegt wurde, entspricht die Beanspruchbarkeit des experimentell untersuchten Außenwandelementes mit geschädigtem Verbund zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton der Beanspruchbarkeit der experimentell untersuchten Außenwandelemente, welche keine Verbundschädigungen zwischen diesen Schichten aufwiesen.
- Es kann damit von einer Kompensierung der Einflüsse aus Verringerung der Beanspruchbarkeit infolge Querschnittsschwächung und Erhöhung der Beanspruchbarkeit infolge Verminderung der Lasteinleitungsproblematik für die experimentell untersuchte Konstruktion ausgegangen werden.

Somit ist aufgrund nachfolgender Tatsachen die Verbundfestigkeit zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton im Hinblick auf die Standsicherheit der Gesamtkonstruktion nicht von Bedeutung :

- Werden im Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung für Systeme mit offener Horizontalfuge alle Schichten des Querschnitts in Ansatz gebracht,

obwohl der Verbund zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton geschädigt ist, kann aufgrund der im Versuch nachgewiesenen Kompensierung der Einflüsse aus Verringerung der Beanspruchbarkeit infolge Querschnittsschwächung und Erhöhung der Beanspruchbarkeit infolge Verminderung der Lasteinleitungsproblematik von einer auf der sicheren Seite liegenden Nachweisführung ausgegangen werden.

- Bei Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten kann bei Systemen mit geschlossener Horizontalfuge unabhängig von der Größe des Verbundes von einer Abtragung der Beanspruchungen über die äußere gefügedichte Betondeckschicht ausgegangen werden, solange diese Schicht an der Außenwandplatte vorhanden ist. Das Tragverhalten der Gesamtkonstruktion wird somit durch die Größe der vorhandenen Verbundfestigkeit nicht beeinflusst.

Von Bedeutung ist dagegen die Beurteilung des Verbundes zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton hinsichtlich der Standsicherheit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht. Zu beurteilen sind dabei vor allem die Teile des äußeren Randbereiches (siehe Bild 4.24).

4.7.2 Prüfverfahren zur Bestimmung des Verbundes

Da vor Fassadensanierungsmaßnahmen infolge von Temperaturbeanspruchungen Schädigungen des Verbundes zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton möglich sind, welche zu einer Standsicherheitsgefährdung der äußeren gefügedichten Betondeckschicht führen können, ist

- im Sinne der Erkennung und Verhinderung einer Gefährdung der öffentlichen Ordnung und Sicherheit,
- hinsichtlich einer Beurteilung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten als gesichertem Verankerungsuntergrund für die nach Kapitel 1 erforderlichen Fassadensanierungsmaßnahmen [83]

die Prüfung des an bestehenden Gebäuden vorhandenen Verbundes zwischen diesen Schichten erforderlich.

In DIN EN 1742 [29] wird ein Verfahren zur Ermittlung der Scherfestigkeit zwischen den verschiedenen Schichten mehrschichtiger Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton vorgeschlagen. Dieses Verfahren beruht auf der labortechnischen zerstörenden Untersuchung von Einzellementen.

Für die zerstörungsfreie oder zerstörungsarme Prüfung des Verbundes der einzelnen Schichten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten an bestehenden Bauwerken existiert kein genormtes Prüfverfahren.

—

Aus diesem Grund wird die Anwendung der folgenden beiden Verfahren an bestehenden Gebäuden vorgeschlagen :

Abklopfverfahren

Die möglichen Schädigungen des Verbundes können durch Abklopfen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht mit einem Hammer und Beurteilung des Klages erkannt werden. Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit, mit geringem Aufwand zuverlässige Aussagen darüber zu treffen, ob ein Verbund zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton vorhanden ist [58]. Eine gesicherte Aussage zur Größenordnung der vorhandenen Verbundfestigkeit ist mit diesem Verfahren jedoch nicht möglich.

Verbundfestigkeitsprüfung

Die tatsächlich vorhandene Verbundfestigkeit zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton wird durch Anwendung folgender Prüfmethodik direkt ermittelt :

1. Herstellen eines kreisförmigen Schnittes des Durchmessers 100 mm von der Außenseite der zu betrachtenden Außenwandplatte bis in die Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton, wobei die Einschnitttiefe in die Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton 30 ... 50 mm betragen sollte. Dieser Schnitt wird zweckmäßigerweise mit einem Kernbohrgerät durchgeführt.
2. Mittiges Einkleben einer Ankerstange in den entstandenen Zylinder, wobei die Einbindetiefe der Ankerstange der halben Schichtstärke der äußeren gefügedichten Betondeckschicht entspricht.
3. Eintragen einer zentrischen Zugkraft auf die Ankerstange bis zum Versagen.

In Bild 4.25 ist diese Prüfmethodik schematisch dargestellt.

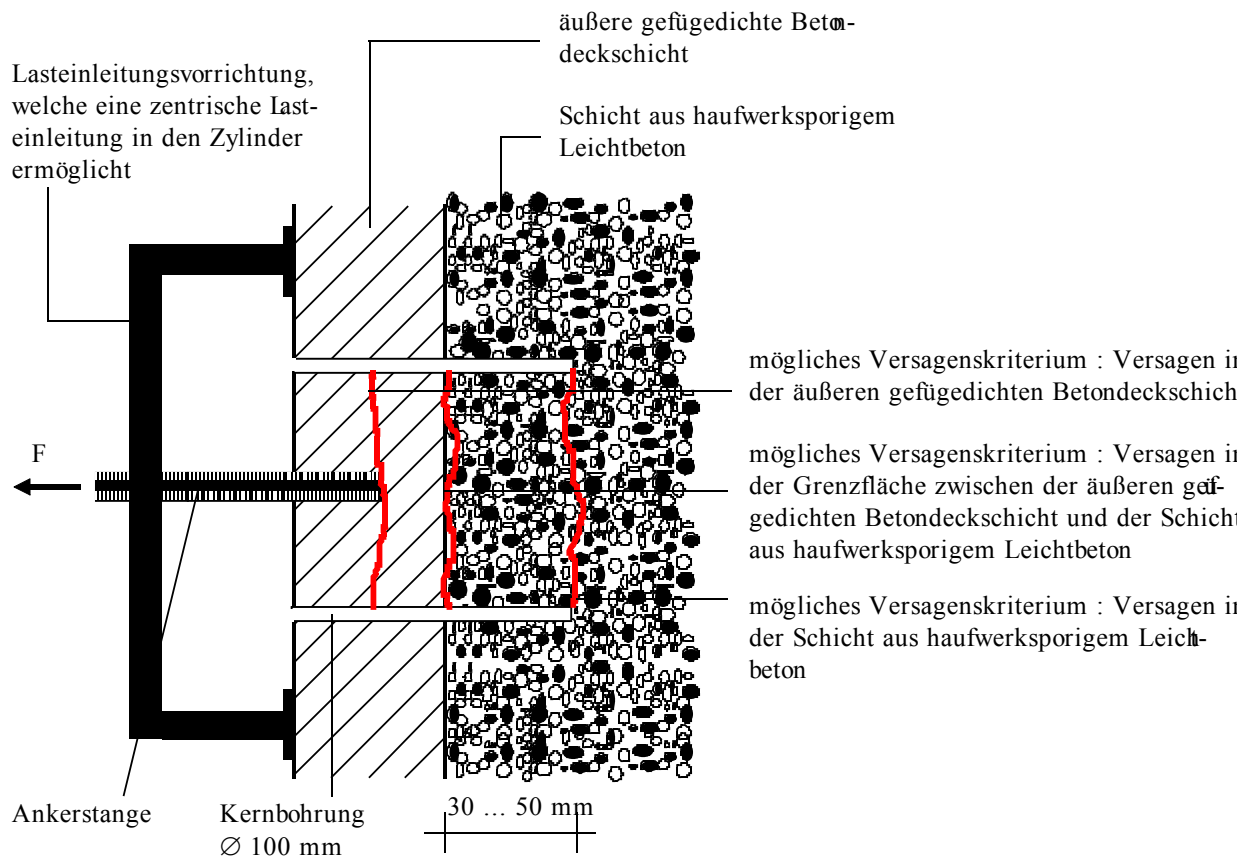


Bild 4.25 : Schematische Darstellung der Verbundfestigkeitsprüfung

Im Ergebnis dieser Prüfung wird man eines der folgenden drei möglichen Versagenskriterien erhalten :

- Das Versagen erfolgt in der äußeren gefügedichteten Betondeckschicht. Da die tatsächlich vorhandene Verbundfestigkeit in diesem Fall größer ist als der ermittelte Wert, wird die Verbundfestigkeit auf der sicheren Seite liegend erfaßt.
- Das Versagen erfolgt in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichteten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton. Der in diesem Fall ermittelte Wert entspricht der tatsächlich vorhandenen Verbundfestigkeit.
- Das Versagen erfolgt in der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton. Dieses Versagenskriterium stellt das typische Versagenskriterium bei Anwendung der Verbundfestigkeitsprüfung dar [74]. Da in diesem Fall aufgrund des Lastflusses die Last über die Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichteten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton in den haufwerksporigen Leichtbeton eingetragen wird, wird auch in diesem Fall die Verbundfestigkeit auf der sicheren Seite liegend erfaßt.

Mit dem durch Anwendung der Verbundfestigkeitsprüfung erhaltenen Wert für die Verbundfestigkeit ist eine Beurteilung der vorhandenen Standsicherheit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht möglich.

Bei dieser Beurteilung hat sich eine Differenzierung in unterschiedliche Schadensbereiche A_i des betrachteten Außenwandelementes nach Bild 4.26 als gerechtfertigt herausgestellt, wobei eine erste Kontrolle der Schadensbereiche mit dem Abklopffverfahren möglich ist [74].

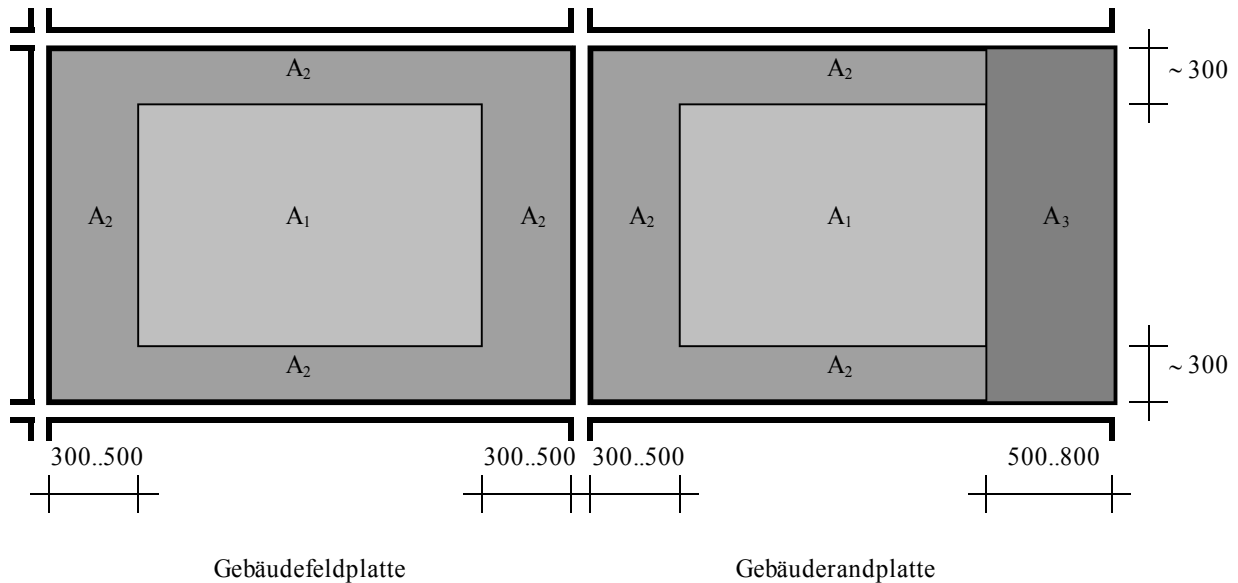


Bild 4.26 : Darstellung der zu differenzierenden Schadensbereiche für eine Beurteilung der Verbundfestigkeit

Zur quantitativen Bestimmung der Verbundfestigkeit mit der Verbundfestigkeitsprüfung sind in jedem Schadensbereich A_i mindestens sechs Einzelwerte zu bestimmen, aus denen die Verbundspannungen, welche in den Schadensbereichen vorhanden sind, ermittelt werden können :

$$\sigma_{v,i} = \bar{\sigma}_i - s \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.38)$$

mit

- $\sigma_{v,i}$ - vorhandene Verbundspannung im betrachteten Schadensbereich A_i [N/mm²]
- $\bar{\sigma}_i$ - Mittelwert der in A_i mit der Verbundfestigkeitsprüfung erhaltenen Verbundspannungen [N/mm²]
- s - Standardabweichung der in A_i mit der Verbundfestigkeitsprüfung erhaltenen Verbundspannungen [N/mm²]
- A_i - Größe des Schadensbereiches nach Bild 4.26 [mm²]

In Abhängigkeit eventuell vorhandener Plattenrisse sind die Teilflächen einzeln oder in ihrer Summation den angreifenden Beanspruchungen gegenüberzustellen :

$$\sigma_{V,i} \geq F_{B,i} / A_i \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.39)$$

bzw.

$$\Sigma \sigma_{V,i} \geq \Sigma (F_{B,i} / A_i) \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.40)$$

Die Gesamtbeanspruchung $F_{B,i}$ ist dabei bei der statisch-konstruktiven Beurteilung aufgrund von Fassadensanierungsmaßnahmen nach folgender Beziehung zu berücksichtigen :

$$F_{B,i} = \sqrt{(F_{G,i}^2 + F_{W,i}^2)} \quad [\text{N}] \quad (4.41)$$

mit

- $F_{G,i}$ - Beanspruchung in der Grenzfläche von A_i infolge Eigengewicht der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der anzuordnenden Fassadenkonstruktion [N]
- $F_{W,i}$ - Beanspruchung in der Grenzfläche von A_i infolge Windlast [N]

In Abhängigkeit der Art der Fassadenkonstruktion kann der Anteil aus Windlastbeanspruchung in Gleichung (4.41) reduziert werden oder entfallen, so daß vielfach eine spezielle Sicherung der äußeren gefügedichten Betondeckschicht nicht erforderlich ist. Unter anderem konnte in [42, 55] nachgewiesen werden, daß die angreifenden Beanspruchungen trotz teilweiser völliger Zerstörung des Verbundes zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton innerhalb der Schadensbereiche A_2 und A_3 über die Schadensbereiche A_1 aufnehmbar sind.

Soll in Ausnahmefällen eine Fassadensanierung zunächst nicht erfolgen, so sind in Gleichung (4.41) zusätzliche Teilbeanspruchungen in der Grenzfläche von A_i infolge von Temperatureinwirkung und Frost-Tauwechsel-Prozessen zu berücksichtigen. Aufgrund der Tatsache, daß insbesondere die Beanspruchungen infolge der Frost-Tauwechsel-Prozesse rechnerisch nicht erfaßt werden können, ist eine Beurteilung der Standsicherheit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht in diesen Fällen nur schwer möglich. Aus diesem Grund wird empfohlen, für bereits geschädigte Bereiche bis zur Ausführung einer Fassadensanierungsmaßnahme eine jährliche Kontrolle der Anbindung der äußeren gefügedichten Betondeckschicht an die Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton mit dem Abklopffverfahren durchzuführen.

Bis zum heutigen Zeitpunkt ist es zu einem plötzlichen Versagen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht nur dann gekommen, wenn im Schadensbereich A_1 bereits in der Fertigung maßgebliche Verbundfestigkeitsreduzierungen entstanden sind (siehe Bild 4.27). Ein vorzeitiges Erkennen ist dabei visuell nicht möglich.

Darüber hinaus steigt das Schadensrisiko allerdings mit dem Zeitraum, in welchem die Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten der zweiten Stufe der Verbundschädigung ausgesetzt sind.



Bild 4.27 : *Plötzliches Versagen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht als Folge von in der Fertigung entstandenen Verbundfestigkeitsreduzierungen im Schadensbereich A₁*

4.8 Zusammenfassung der statisch - konstruktiven Beurteilung

Während der Entstehungszeit von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten auf dem Gebiet der ehemaligen DDR waren eine Reihe von unterschiedlichen Berechnungsverfahren, verbunden mit differenten Prüfverfahren zum Nachweis und zur statistischen Auswertung der Druckfestigkeit von Beton, auf der Grundlage des Vorschriftenwerkes der TGL gültig.

Diese Berechnungsverfahren, zusammen mit dem derzeit gültigen Berechnungsverfahren auf der Grundlage des Vorschriftenwerkes der DIN, können für eine Nachbewertung der vorhandenen Bausubstanz genutzt werden und sind in Tabelle 4.2 zu Berechnungskomplexen zusammengefaßt dargestellt. Ihnen ist gemeinsam, daß sie auf dem Nachweis eines einschichtigen Querschnitts unter Zugrundelegung eines homogenen und isotropen Materials beruhen.

Die betrachteten Außenwandelemente bestehen jedoch aus einem mehrschichtigen Querschnitt aus haufwerksporigem Leichtbeton und gefügedichten Betondeckschichten (siehe Bild 2.1).

Da während der Entstehungszeit der Gebäude keine genormten Berechnungsverfahren für den Nachweis solcher mehrschichtigen Verbundkonstruktionen aus Betonen verschiedener Festigkeiten existierten, wurden bei der ursprünglichen Planung auch die gefügedichten Betondeckschichten mit den Materialparametern der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton in Ansatz gebracht.

Damit wurden die tatsächlich gegebenen stofflichen und geometrischen Parameter wie

- unterschiedliche Druckfestigkeiten,
- unterschiedliche Dehn- und Biegesteifigkeiten,
- unterschiedliches Spannungs-Verformungs-Verhalten,
- vorhandene Verbundfestigkeit zwischen den Schichten,
- unterschiedliche Temperaturbeanspruchungen der einzelnen Schichten

nicht oder nur unzureichend erfaßt.

Aufgrund der Tatsache, daß die geplanten Parameter der Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons in der Fertigung oft nicht erreicht wurden (siehe Kapitel 3) und zusätzliche Beanspruchungen infolge von Fassadensanierungsmaßnahmen zu berücksichtigen sind (siehe Kapitel 1), kann der Standsicherheitsnachweis unter Zugrundelegung eines solchen einschichtigen Querschnitts heute allerdings nur selten erbracht werden. Teilweise ergeben sich rechnerische Standsicherheitsniveaus von $\gamma_{\text{vorh}} \leq 1.0$.

Da es jedoch bis zum heutigen Zeitpunkt nicht zum Versagen eines solchen Gebäudes kam, muß davon ausgegangen werden, daß der Ansatz eines einschichtigen Querschnitts sehr stark auf der sicheren Seite liegt. Um das tatsächliche Tragverhalten erfassen zu können, ist demzufolge die Berücksichtigung der Besonderheiten des real vorhandenen mehrschichtigen Querschnitts erforderlich.

Da keine genormten Berechnungsverfahren für den Nachweis mehrschichtiger Querschnitte existieren und auch in Auswertung der Literatur kein sofort nutzbares Verfahren gefunden werden konnte, mußte ein Verfahren angewendet werden, welches die spezifischen Gegebenheiten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten in statisch-konstruktiver Hinsicht beschreibt.

An dieses Berechnungsverfahren wurde die Anforderung gestellt, daß es

- einfach handhabbar ist und somit einem praxisgerechten Nachweisverfahren entspricht,
- das Tragverhalten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten so exakt wie möglich erfaßt.

Dazu wurde vorausgesetzt :

- ebene Querschnitte bleiben unter Beanspruchung eben (Hypothese von Bernoulli ist gültig),
- die Spannungs-Verformungs-Beziehungen der Materialien der einzelnen Schichten sind mathematisch beschreibbar.

Für die Spannungs-Verformungs-Beziehungen wurden aufgrund von Vorschriftenanalysen und durchgeführten Versuchen die in Tabelle 4.24 dargestellten Beziehungen als gültig angenommen.

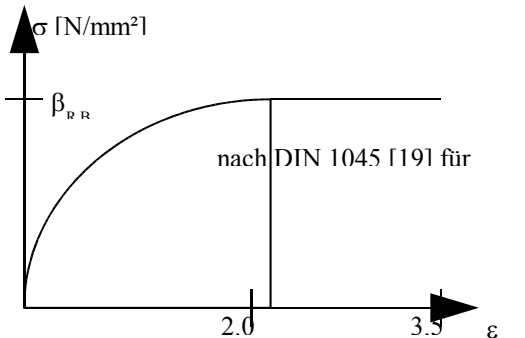
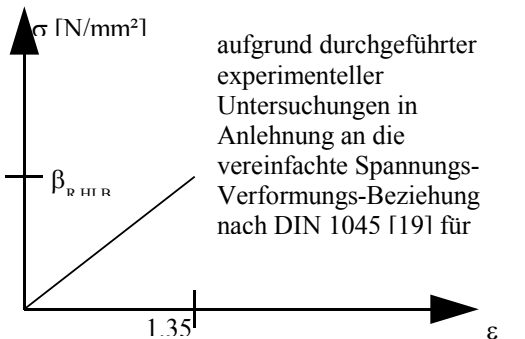
betrachtete Schicht	analytische Beziehung	grafische Darstellung
innere gefügedichte Betondeckschicht äußere gefügedichte Betondeckschicht mit ε - Verformung des Betons [‰] σ_B - rechnerische Spannung für die im Beton herrschende Verformung [N/mm ²] $\beta_{R,B}$ - Rechenwert der Druckfestigkeit des Betons nach Gleichung (4.13) [N/mm ²]	$\varepsilon \geq 0 \text{ ‰} : \sigma_B = 0$ $0 \text{ ‰} \geq \varepsilon \geq -2 \text{ ‰} : \sigma_B = \beta_{R,B} * (\varepsilon - \varepsilon ^2 / 4)$ $-2 \text{ ‰} \geq \varepsilon \geq -3.5 \text{ ‰} : \sigma_B = \beta_{R,B}$ $\varepsilon \leq -3.5 \text{ ‰} : \sigma_B = 0$	
Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton mit ε - Verformung des haufwerksporigen Leichtbetons [‰] σ_{HLB} - rechnerische Spannung für die im haufwerksporigen Leichtbeton herrschende Verformung [N/mm ²] $\beta_{R,HLB}$ - Rechenwert der Druckfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons nach Gleichung (4.31) [N/mm ²]	$\varepsilon \geq 0 \text{ ‰} : \sigma_{HLB} = 0$ $0 \text{ ‰} \geq \varepsilon \geq -1.35 \text{ ‰} : \sigma_{HLB} = \beta_{R,HLB} / 1.35 * \varepsilon $ $\varepsilon \leq -1.35 \text{ ‰} : \sigma_{HLB} = 0$	

Tabelle 4.24 : Spannungs-Verformungs-Beziehungen der äußeren und inneren gefügedichten Betondeckschichten und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton

Für das Berechnungsverfahren wurde folgender Rechengang angewendet (siehe Abschnitt 4.2.4) :

1. Der Querschnitt wird in einzelne Elemente unterteilt und es wird eine Verformungsebene des Querschnitts angenommen.
2. Aus der damit für jedes Flächenelement bekannten Verformung werden aus der Kenntnis der Spannungs-Verformungs-Beziehung die in jedem Flächenelement herrschenden Spannungen ermittelt.
3. Summiert man diese Spannungen über den Querschnitt, so erhält man die inneren Schnittreaktionen, welche mit den angreifenden Beanspruchungen im Gleichgewicht stehen müssen.
4. Da die Verformungsebene angenommen wurde, werden die inneren und die äußeren Beanspruchungen zunächst nicht im Gleichgewicht stehen. Durch Ausführung einer Iteration in Anlehnung an das Newtonsche Näherungsverfahren kann jedoch das Gleichgewicht hergestellt werden.

Dieses beschriebene Verfahren, das *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte*, kann auf Gebäude mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten mit geschlossener Horizontalfuge nach Bild 4.10 angewendet werden.

Für Systeme mit offener Horizontalfuge nach Bild 4.10 gilt dies aufgrund der Tatsache, daß die Voraussetzung des Ebenbleibens der Querschnitte im Lasteinleitungsbereich nicht gewährleistet ist, nicht ohne eine weitere Modifizierung des Berechnungsverfahrens.

Erforderlich war dafür die Entwicklung des *Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung*. Der Grundgedanke dieses Verfahrens ist, daß nicht unbegrenzt Beanspruchungen in die äußere gefügedichte Betondeckschicht über die Grenzfläche zwischen dieser Schicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton übertragen werden können und eine Überschreitung der Beanspruchbarkeit in dieser Grenzfläche zum Versagen der Konstruktion führt.

Auf der Grundlage theoretischer Betrachtungen und durchgeführter experimenteller Untersuchungen an großformatigen Elementen wurde nachgewiesen, daß es durch eine Beschränkung der Verformung in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton möglich ist, den Einfluß der nicht ebenen Querschnittsverformung im Lasteinleitungsbereich zu erfassen und damit das Berechnungsverfahren auf Systeme mit offener Horizontalfuge nach Bild 4.10 anwendbar zu machen (siehe Abschnitt 4.3.4).

Mit diesen beiden Berechnungsverfahren kann der Forderung nach einer praxisorientierten Nachweisführung bei hinreichend exakter Erfassung des tatsächlichen Tragverhaltens von Au-

ßenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten besser entsprochen werden als mit dem in [94] entwickelten *Vergleichsflächenverfahren* und dem in [62, 94] entwickelten *Steifigkeitsverfahren*.

Aufgrund der Tatsache, daß für mehrschichtige Verbundquerschnitte auf der Grundlage des gültigen Vorschriftenwerkes der DIN kein globaler Sicherheitsfaktor angegeben werden kann, war für den Nachweis von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten mit dem *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte* und dem *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung* die Entwicklung eines auf Teilsicherheitsfaktoren beruhenden Sicherheitskonzeptes erforderlich (siehe Abschnitt 4.5).

Anhand von Beispielbetrachtungen wurde an einem repräsentativen Objekt nachgewiesen, daß durch Nachweisführung mit dem *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte* bzw. dem *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung* gegenüber einer Nachweisführung mit einem genormten Berechnungsverfahren auf der Grundlage eines einschichtigen Querschnitts eine Erhöhung des rechnerischen Standsicherheitsniveaus um bis zu 130 % möglich ist.

Darüber hinaus konnte festgestellt werden, daß eine grundlegende Vereinfachung des *Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte* und des *Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung* weder durch eine geschlossene Lösung der diesen Berechnungsverfahren zugrundeliegenden Gleichgewichtsbedingungen noch durch Entwicklung eines empirischen Verfahrens auf der Grundlage von Variantenanalysen möglich ist (siehe Abschnitt 4.6).

Auf der Grundlage dieser Betrachtungen konnte die in Tabelle 4.25 dargestellte zweistufige Nachweisführung von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten entwickelt werden, für welche auch ein differenzierter Aufwand in der bauwerksdiagnostischen Ermittlung der vorhandenen geometrischen und stofflichen Parameter besteht.

Es wird empfohlen, diese zweistufige Nachweisführung sukzessive anzuwenden.

Verfahren	Anwendung	Beschreibung	Bauwerksdiagnostik	Nachweisführung
Stufe 1				
Planungsgrundlage	Auf Systeme mit offener und geschlossener Horizontalfuge nach Bild 4.10.	Der gesamte tragfähige Querschnitt wird mit den Materialparametern der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton angesetzt. Um dem gültigen Vorschriftenwerk der DIN zu entsprechen, wird die Anwendung des Berechnungskomplexes 5 nach Tabelle 4.2 empfohlen.	Bestimmung der Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons nach Abschnitt 3.1.3.4.	$\gamma \geq 3.0$ mit $\gamma = \beta_{R,HLB} / \sigma_{vorh}$ $\sigma_{vorh} = N/A + M/W$ $\beta_{R,HLB}$ nach Gl. (4.31) N - einwirkende Normalkraft A - tragfähige Querschnittsfläche M - einwirkendes Moment W - Widerstandsmoment des tragfähigen Querschnitts
Stufe 2				
Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte	Auf Systeme mit geschlossener Horizontalfuge nach Bild 4.10.	Es wird von der Gültigkeit der Hypothese von Bernoulli ausgegangen. Die Beanspruchungen werden den tragfähigen Schichten des Querschnitts in Abhängigkeit ihrer Spannungs-Verformungs-Beziehung zugewiesen.	Bestimmung der Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons nach Abschnitt 3.1.3.4, der Festigkeit der gefügedichten Betondeckschichten nach Abschnitt 3.2.3 und der	$\xi \geq 1.0$ mit ξ nach dem in Tabelle 4.16 angegebenen Rechenweg unter Verwendung der in Tabelle 4.20 angegebenen Teilsicherheitsfaktoren
Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung	Auf Systeme mit offener Horizontalfuge nach Bild 4.10.	Es wird von der Gültigkeit der Hypothese von Bernoulli ausgegangen. Die Beanspruchungen werden den tragfähigen Schichten des Querschnitts in Abhängigkeit ihrer Spannungs-Verformungs-Beziehung zugewiesen und es erfolgt eine Verformungsbeschränkung infolge Lasteinleitungsproblematik nach Abschnitt 4.3.3.	Art der Ausbildung der Horizontalfuge nach Bild 4.10	

Tabelle 4.25 : Berechnungsverfahren der zweistufigen Nachweisführung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten

Einen entscheidenden Einfluß auf das vorhandene Standsicherheitsniveau bei einer Nachweisführung mit dem *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte* und dem *Berechnungsverfahren*

ren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung hat die Exzentrizität der äußeren Beanspruchung (siehe Abschnitt 4.3.5).

Da die Annahme einer maximalen Exzentrizität bei Verwendung dieser Berechnungsverfahren nicht zwangsläufig zum maßgebenden Standsicherheitsniveau führt, ist in jedem Einzelfall die vorhandene Exzentrizität im Rahmen der statischen Nachweisführung zu beurteilen und in Ansatz zu bringen.

Obwohl die vorhandene Verbundfestigkeit zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton keinen Einfluß auf die Standsicherheit des gesamten Außenwandelementes hat (siehe Abschnitt 4.7.1), ist die Verbundfestigkeit im Hinblick auf die Standsicherheit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht von Bedeutung.

Da kein genormtes Prüfverfahren zur Bestimmung des vorhandenen Verbundes existiert, wurde in Abschnitt 4.7.2 das *Abklopffverfahren* erläutert und die *Verbundfestigkeitsprüfung* entwickelt, mit welcher eine gesicherte Aussage zur vorhandenen Verbundfestigkeit möglich ist. Die Beurteilung der Standsicherheit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht ist damit möglich.

Auf der Grundlage der in diesem Kapitel entwickelten Nachweis- und Prüfverfahren können Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten in statisch-konstruktiver Hinsicht beurteilt werden.

5 Beurteilung von Verfahren zur Erhöhung der Standsicherheit

5.1 Veranlassung

Wie in Kapitel 4 dieser Arbeit beschrieben, kann der Standsicherheitsnachweis von Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten nur erbracht werden, wenn in Abhängigkeit von den geometrischen Parametern des Gebäudes die Festigkeiten der Materialien der einzelnen Schichten der Außenwandelemente bestimmten Anforderungen genügen.

Von besonderem Interesse ist dabei die Festigkeit der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton. Aufgrund der Tatsache, daß die geplanten Parameter der Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons nicht immer erreicht wurden (siehe Kapitel 3) und zusätzliche Beanspruchungen infolge von Fassadensanierungsmaßnahmen zu berücksichtigen sind (siehe Kapitel 1), kann der Standsicherheitsnachweis auch mit den in Kapitel 4 entwickelten und angewendeten Nachweisverfahren für mehrschichtige Querschnitte zum Teil nicht erbracht werden.

Dies gilt besonders für Gebäude mit einer großen Anzahl von Geschossen, wie beispielsweise die Typenserie P2 (siehe Tabelle 2.2). Wird für solche Gebäude das vorhandene Standsicherheitsniveau geschoßweise ausgewiesen (siehe Abschnitt 4.5), so wird ersichtlich, daß das vorhandene Standsicherheitsniveau aufgrund der abnehmenden Beanspruchung aus Eigen- und Verkehrslast mit der betrachteten Höhe am Gebäude zunimmt.

Es kann also davon ausgegangen werden, daß das geforderte Sicherheitsniveau oberhalb eines bestimmten Geschosses vorhanden ist. In den Bereichen, welche unterhalb dieses Geschosses liegen und für die das geforderte Sicherheitsniveau somit nicht nachweisbar ist, müssen standsicherheitserhöhende Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden. Abgesehen von einer generellen Reduzierung der einwirkenden Verkehrslasten, insbesondere bei Gebäuden, deren Dachkonstruktionen nutzbare Verkehrsflächen aufweisen, wäre die Anwendung der in Tabelle 5.1 dargestellten Sanierungsverfahren denkbar.

<i>Statisch-konstruktive Sanierungsverfahren</i>	<i>Baustoffliche Sanierungsverfahren</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützung der Geschoßdecken durch Stützen mit separater Gründung oder durch Unterzüge zur Reduzierung der auf die Außenwandelemente einwirkenden Eigen- und Verkehrslasten, • Auswechslung der nichttragfähigen Außenwandelemente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkung der Außenwandelemente durch auf der Innen- bzw. Außenseite vorzusehende Schichten aus Stahlbeton oder Epoxidharzbeton in Anlehnung an die in [11, 32, 33, 106] beschriebenen technologischen Vorgehensweisen, • Erhöhung der Festigkeit der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton durch eine Zementleiminjektage.

Tabelle 5.1 : *Mögliche Sanierungsverfahren zur Erhöhung der Standsicherheit von Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten*

Im Hinblick auf eine Reduzierung des Sanierungsaufwandes und unter Berücksichtigung der Tatsache, daß es sich im Regelfall um eine auszuführende Sanierungsmaßnahme im bewohnten Zustand des betreffenden Gebäudes handelt, sollten die beschriebenen statisch-konstruktiven Sanierungsverfahren nur in Ausnahmefällen angewendet werden. Dies gilt ebenso für eine Sanierung der betreffenden Außenwandelemente mit nachträglich vorzusehenden Stahlbeton- oder Epoxidharzbetonschichten, da die Anordnung einer solchen Schicht insbesondere bei Gebäuden mit offener Horizontalfuge nach Bild 4.10 aufgrund der vorhandenen Last-einleitungsproblematik (siehe Abschnitt 4.3.3) nur an der Elementinnenseite sinnvoll ist.

Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten eignen sich jedoch aufgrund der vorhandenen Haufwerksporesporosität und dem Vorhandensein von innerer und äußerer gefügedichteter Betondeckschicht als „Schalung“ besonders für eine baustoffliche Verstärkung durch eine Zementleiminjektage [92]. Mit dieser kann durch Festigkeitserhöhung des haufwerksporigen Leichtbetons das vorhandene Sicherheitsniveau erhöht und die Standsicherheit im Sinne einer gesicherten und dauerhaften Sanierung wiederhergestellt werden.

5.2 Stand der Technik

Der Grundgedanke einer Zementleiminjektage im haufwerksporigen Leichtbeton besteht darin, den Haufwerksporenraum durch einen Zementleim mit sehr hoher Eigenfestigkeit auszufüllen. Es entsteht nach der Injektage ein Verbundmaterial aus haufwerksporigem Leichtbeton und Zementleim, welches gegenüber dem nicht verfüllten haufwerksporigen Leichtbeton eine erhöhte Festigkeit besitzt.

Für eine Festigkeitserhöhung von gefügedichtem Beton nach DIN 1045 [19] mittels Zementleiminjektage existieren eine Reihe von bauaufsichtlich zugelassenen Produkten. Für den Baustoff haufwerksporiger Leichtbeton nach DIN 4232 [23] existiert ein solches bauaufsichtlich zugelassenes Produkt nicht.

Aufgrund der Tatsache, daß nach einer erfolgten Zementleiminjektage bei Nichterreichen der geplanten Zielfestigkeit keine Möglichkeit besteht, durch weitere Injektage eine Festigkeitserhöhung zu erhalten, müssen dem Anwender Produktinformationen über ein zu verwendendes Injektagematerial hinsichtlich

- einer gesicherten erreichbaren Endfestigkeit in Abhängigkeit der stofflichen Parameter des haufwerksporigen Leichtbetons (siehe Kapitel 3),
- der veränderten Parameter in wärme- und schallschutztechnischer Hinsicht nach der Injektage,
- der einzusetzenden technologischen Vorgehensweise,
- durchzuführender Prüfungen im Vorfeld der Sanierung und nach erfolgter Sanierung im Sinne einer Qualitätssicherung

vorliegen.

5.3 **Beurteilung von Zementleiminjektage auf der Grundlage durchgeführter experimenteller Untersuchungen**

5.3.1 **Beurteilung in baustofflicher Hinsicht**

Auf der Grundlage der in Kapitel 3 erfolgten baustofflichen Beurteilung des haufwerksporigen Leichtbetons wurden experimentelle Untersuchungen mit dem Zementleim StoCrete ZL 100 durchgeführt [79], welche eine Beurteilung

- der Anwendbarkeit von Injektageverfahren im haufwerksporigen Leichtbeton,
- der Parameter des Verbundmaterials aus haufwerksporigem Leichtbeton und StoCrete ZL 100 nach erfolgter Injektage

ermöglichen.

Betrachtet man zunächst die Rohdichte vor und nach der Injektage, so wird eine Erhöhung der Rohdichte infolge der Zementleiminjektage festgestellt. Bei der durchgeführten Zementleiminjektage mit StoCrete ZL 100 wurde der Mittelwert der Rohdichte um 15 % erhöht, wobei in Einzelfällen eine Erhöhung um bis zu 32 % festgestellt wurde.

Da der Zementleim infolge seiner Fließeigenschaften nur den Haufwerksporenraum ausfüllen kann, ergibt sich die Erhöhung der Rohdichte infolge der Reduzierung der Haufwerksporosität. In den durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden Reduzierungen der Haufwerksporosität um bis zu 52 % ermittelt.

Festgestellt wurde darüber hinaus, daß die Reduzierung der Haufwerksporosität von der Größe der Haufwerksporen abhängig ist. So konnte der verfügbare Haufwerksporenraum bei einem haufwerksporigen Leichtbeton mit relativ hoher Haufwerksporosität, welche durch viele kleine Poren gebildet wurde, nur wenig ausgefüllt werden. Bei einem haufwerksporigen Leichtbeton mit geringerer Haufwerksporosität, welche durch wenige große Poren entstanden ist, wurde der vorhandene Haufwerksporenraum dagegen wesentlich mehr mit Zementleim ausgefüllt.

Ursache dafür sind die spezifischen Fließeigenschaften des verwendeten Zementleimes, welche vor der Anwendung zu bestimmen sind und damit den Nachweis der Brauchbarkeit des Injektagematerials liefern. Kann der Zementleim nicht in die vorhandenen Porenstrukturen eindringen, ist eine Festigkeitserhöhung nicht möglich.

Die erreichte Festigkeitserhöhung infolge der Zementleiminjektage ist desweiteren abhängig von der Ausgangsfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons. Während haufwerksporige Leichtbetone mit geringer Ausgangsfestigkeit eine sehr starke Erhöhung der Festigkeit erfahren können, wird eine Zementleiminjektage bei haufwerksporigen Leichtbetonen mit einer hohen Ausgangsfestigkeit nicht zu einer Erhöhung der Festigkeit führen. Der Grund dafür ist in den beiden Versagensarten des haufwerksporigen Leichtbetons zu sehen, welche in Tabelle 5.2 dargestellt sind.

<i>Versagensart</i>	<i>Versagensmechanismus</i>
1	Das Versagen wird durch das Auseinanderbrechen der Verkittungsstellen zwischen den Zuschlagstoffkörnern bestimmt. Bauteilbereiche aus haufwerksporigem Leichtbeton, für die dieser Versagensmechanismus maßgebend ist, besitzen eine geringe Ausgangsfestigkeit. Durch zusätzliche Verkittung der Zuschlagstoffkörner und Bildung eines Traggerüsts aus Zementstein infolge einer Zementleiminjektage kann die Festigkeit des Verbundbaustoffes aus haufwerksporigem Leichtbeton und Zementleim gesteigert werden. Eine solche Steigerung ist jedoch nur möglich, bis die Versagensart 2 das maßgebliche Versagenskriterium darstellt.
2	Das Versagen wird bestimmt durch das Auseinanderbrechen der Zuschlagstoffkörner. Diese Bauteilbereiche besitzen eine höhere Ausgangsfestigkeit, da hier bereits ein Traggerüst aus Zementstein vorhanden ist. Eine weitere Verstärkung des Traggerüsts durch eine Zementleiminjektage kann zu keiner weiteren Festigkeitssteigerung führen, da die Festigkeit der Zuschlagstoffkörner durch eine Zementleiminjektage nicht beeinflusst wird.

Tabelle 5.2 : Übersicht über die Versagensarten des haufwerksporigen Leichtbetons

Das Spektrum der Festigkeitserhöhungen schwankt aus diesem Grund sehr stark. In den durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden Festigkeitserhöhungen um 0 ... 300 % festgestellt.

Da aufgrund der auch innerhalb eines Gebäudes sehr stark streuenden Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons (siehe Abschnitt 3.1.3.4) nicht vorhersehbar ist, welche Versagensart des haufwerksporigen Leichtbetons das maßgebliche Versagenskriterium darstellt, ist während des Injektageprozesses immer ein höchstmöglicher Verfüllgrad anzustreben, da nur dann gewährleistet wird, daß nach erfolgter Injektage Versagensart 1 nach Tabelle 5.2 als Versagenskriterium ausgeschlossen werden kann.

Ausschlaggebend für eine Beurteilung ist jedoch nicht die erreichte Festigkeitserhöhung, sondern die vorhandene Endfestigkeit nach der Zementleiminjektage. Infolge der in [79] durchgeführten statistischen Auswertung wurde für eine Zementleiminjektage mit StoCrete ZL 100 unabhängig von

- der Ausgangsfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons,
- der Art der Zuschlagstoffe,
- der Form der Haufwerksporen

und bei Vorliegen einer Haufwerksporosität von $HP \geq 20\%$ vor der Injektage ein gesicherter LB 8 nach DIN 4232 [23] erreicht.

Zu beachten ist desweiteren, daß während des Injektageprozesses eine Festigkeitsreduzierung des haufwerksporigen Leichtbetons eintritt. Dies ist dadurch bedingt, daß der haufwerksporige Leichtbeton bei Feuchtigkeitseinwirkung an Festigkeit verliert [89]. Um eine Standsicherheitsgefährdung von zu sanierenden Gebäuden während des Injektageprozesses auszuschließen, sind somit geeignete Maßnahmen wie z.B.

-
-
- Reduzierung der Verkehrslast während der Injektage,
 - abschnittsweise Verfüllung,
 - gesonderte Aussteifungskonstruktionen

vorzusehen.

5.3.2 Beurteilung in statisch-konstruktiver Hinsicht

Um den Einfluß einer Zementleiminjektage auf das Tragverhalten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten zu ermitteln, wurden experimentelle Untersuchungen an einer großformatigen vorgefertigten Platte aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten, bei welcher der in der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton vorhandene Haufwerksporenraum mit StoCrete ZL 100 verfüllt wurde, in Anlehnung an DIN EN 1740 [28] durchgeführt [80].

In diesen experimentellen Untersuchungen wurde

- die Versagensbeanspruchung eines Originalelementes aus mit StoCrete ZL 100 verfülltem haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten bestimmt, wobei die Lasteintragung den real am Bauwerk vorhandenen Gegebenheiten eines Systems mit offener Horizontalfuge entsprach,
- diese Versagensbeanspruchung mit Festigkeitskennwerten aus zylindrischen Probekörpern verglichen, welche dem Element nach dem Versuch entnommen wurden,
- das Bruchverhalten des Elementes dokumentiert,
- die Spannungs-Verformungs-Beziehung des Elementes erfaßt,
- die Biegelinie des Elementes unter Lasteinwirkung bestimmt,
- mittels Schallemissionsanalyse die Beanspruchung bestimmt, mit welcher eine irreversible Formänderung (Beginn der instabilen Mikrorißbildung) eingeleitet wird,
- aus den genannten Punkten Rückschlüsse auf das Versagenskriterium gezogen.

Die detaillierten Untersuchungsergebnisse können [75, 80, 83] entnommen werden.

In Tabelle 5.3 sind die experimentell ermittelten Parameter dieser Platte (Platte 5) im Vergleich zu den in Abschnitt 4.3.4.2 erhaltenen Parametern für Platten aus haufwerksporigem Leichtbeton, welche nicht mit Zementleim verfüllt wurden (Platte 1 ... 3), dargestellt.

<i>Charakteristischer Parameter</i>	<i>Platte 1</i>	<i>Platte 2</i>	<i>Platte 3</i>	<i>Platte 5</i>
Haufwerksporenraum der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	im Originalzustand	im Originalzustand	im Originalzustand	mit StoCrete ZL 100 verfüllt
Stärke der inneren gefügedichten Betondeckschicht [mm]	50	50	5	5
Stärke der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton [mm]	230	230	290	270
Stärke der äußeren gefügedichten Betondeckschicht [mm]	40	40	25	45
Betonfestigkeitsklasse der inneren gefügedichten Betondeckschicht	B 13	B 8.5	nicht ermittelbar	nicht ermittelbar
Betonfestigkeitsklasse der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	LB 3	LB 4	LB 8	LB 8 (nach der Injektage)
Betonfestigkeitsklasse der äußeren gefügedichten Betondeckschicht	B 47	B 30	B 46	B 36
eingetragene äußere Beanspruchung im Bruchzustand [kN/m]	998.0	1264.0	2470.0	2680.0
Exzentrizität der eingetragenen Beanspruchung gegenüber dem Gesamtquerschnitt [mm]	+ 30	+ 30	+ 30	+ 30
Verformung auf der Oberfläche der inneren gefügedichten Betondeckschicht im Bruchzustand [%]	- 0.20 ... - 0.31	- 0.35 ... - 0.85	- 0.08 ... - 1.30	- 0.25 ... - 1.50
Verformung auf der Oberfläche der äußeren gefügedichten Betondeckschicht im Bruchzustand [%]	- 0.10 ... - 0.22	0.05 ... - 0.28	0.10 ... - 0.40	0.02 ... - 0.55
Verhältniswert von äußerer Beanspruchung im irreversiblen Verformungszustand und äußerer Beanspruchung im Bruchzustand [-]	0.42 ... 0.45	0.63 ... 0.64	0.42 ... 0.46	0.92 ... 0.97
Versagenskriterium	Überschreitung der diametralen Zugspannungen im haufwerksporigen Leichtbeton			
Bruchbild	Aufreißen der Konstruktion über die Plattenhöhe in Plattenebene in der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton, und zwar von unten nach oben von unten nach oben gleichzeitig von unten und von oben von unten nach oben			

Tabelle 5.3 : *Charakteristische Parameter der mit Zementleim verfüllten Platte im Vergleich zu unverfüllten Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten*

Anhand dieser Ergebnisse können folgende Aussagen getroffen werden :

-
-
- Die erreichte Versagensbeanspruchung der mit dem Zementleim StoCrete ZL 100 verfüllten Platte entspricht der Versagensbeanspruchung einer nicht verfüllten Platte mit vergleichbaren geometrischen und stofflichen Parametern (Platte 3).
 - Die Versagensursache und das Bruchbild der mit StoCrete ZL 100 verfüllten Platte und den Platten im Originalzustand entsprechen einander.
 - Die äußere Beanspruchung, welche zu einem irreversiblen Verformungszustand führt, beträgt bei der mit StoCrete ZL 100 verfüllten Platte 92 ... 97 % der Versagensbeanspruchung und übersteigt damit das Spektrum für nicht verfüllte Platten von 42 ... 64 %.

Aufgrund der Tatsache, daß die Beanspruchung im irreversiblen Verformungszustand für die mit StoCrete ZL 100 verfüllte Platte praktisch der Versagensbeanspruchung entspricht, sind folgende Schlußfolgerungen für die statische Nachweisführung nach Kapitel 4 zu ziehen :

- Da die rechnerische Versagensbeanspruchung nach Gleichung (4.34) und (4.35) zu 30 ... 75 % der Versagensbeanspruchung angenommen wird, ergibt sich für den rechnerischen Nachweis von mit StoCrete ZL 100 verfüllten Platten nach Abschnitt 4.3 eine zusätzliche Sicherheit gegenüber dem tatsächlichen Versagenszustand.
- Der Grund für die Verbesserung des Tragverhaltens ist neben der Erhöhung der Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons in der Vergrößerung der Verbundfestigkeit zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton zu sehen. Da somit eine größere Beanspruchungsübertragung über die Verbundfuge zwischen diesen beiden Schichten möglich ist, muß im Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung (siehe Abschnitt 4.3.4) ein veränderter Wert für die repräsentative Festigkeitsdifferenz $\Delta\sigma_r$ wirksam werden.

Auf eine rechnerische Bestimmung des Wertes für $\Delta\sigma_r$ kann an dieser Stelle jedoch verzichtet werden, da nach einer Zementleiminjektage mit StoCrete ZL 100 das Tragverhalten von nicht verfüllten Platten mit einer Festigkeit der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton von LB 8 nach DIN 4232 [23] erreicht wird. Da diese Festigkeit der geplanten Festigkeit der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton entweder entspricht oder diese überschreitet, ist für solche Konstruktionen in der Regel das erforderliche Standsicherheitsniveau bereits durch Anwendung der ersten Stufe der Nachweisführung nach Tabelle 4.25 nachweisbar.

Sollen die Verfahren der zweiten Stufe der Nachweisführung nach Tabelle 4.25 dennoch zur Anwendung kommen, kann für das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung der Wert von $\Delta\sigma_r = 5.00 \text{ N/mm}^2$ entsprechend Abschnitt 4.3.4.3 auf der sicheren Seite liegend in Ansatz gebracht werden.

5.3.3 Zusammenfassung der Beurteilung von Zementleiminjektagen

Im Ergebnis der durchgeführten experimentellen Untersuchungen kann festgestellt werden, daß eine Zementleiminjektage, bei der der Haufwerksporenraum der Schicht aus haufwerksporigem

Leichtbeton mit einem Zementleim hoher Eigenfestigkeit ausgefüllt wird, grundsätzlich für eine Erhöhung der Festigkeit von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten und damit für eine Erhöhung der Standsicherheit geeignet ist.

Nachzuweisen ist im Vorfeld der Anwendung eines Zementleimes

- daß das Produkt aufgrund seiner Eigenschaften und der einzusetzenden Technologie anwendbar ist,
- welche gesicherte Endfestigkeit der Verbundbaustoff aus haufwerksporigem Leichtbeton und Zementleim in Abhängigkeit der Parameter des haufwerksporigen Leichtbetons nach der Injektage erreicht,
- die Größe der Verringerung der Haufwerksporosität und die damit verbundene Erhöhung der Rohdichte im Hinblick auf wärmeschutztechnische Aspekte,
- das tatsächliche Tragverhalten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten, bei denen der Haufwerksporenraum mit dem einzusetzenden Zementleim verfüllt wurde.

Mit dem Zementleim StoCrete ZL 100 liegt ein nach diesen Parametern geprüftes Produkt vor, welches für eine Standsicherheitserhöhung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten anwendbar ist und in Abhängigkeit der am zu sanierenden Gebäude vorliegenden Parameter eine Endfestigkeit des Verbundmaterials aus haufwerksporigem Leichtbeton und StoCrete ZL 100 erreichen kann, welche der Betonfestigkeitsklasse eines LB 8 nach DIN 4232 [23] entspricht.

5.4 Zusammenfassung der Beurteilung von Verfahren zur Erhöhung der Standsicherheit

Aufgrund der Tatsache, daß der Standsicherheitsnachweis von Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten nicht immer für alle Geschosse erbracht werden kann, müssen für die Bereiche, für die der Standsicherheitsnachweis nicht erfüllt ist, standsicherheitserhöhende Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Es existieren eine Reihe von statisch-konstruktiven und baustofflichen Sanierungsverfahren zur Erhöhung der Standsicherheit (siehe Tabelle 5.1), welche allerdings im Regelfall einen unbewohnten Zustand des Gebäudes voraussetzen. Da es sich jedoch bei der Sanierung von Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten um eine auszuführende Sanierungsmaßnahme im bewohnten Zustand des betref-

—

fenden Gebäudes handelt, sollten Sanierungsverfahren, welche vorrangig im Bereich der Innenseite der Außenwandelemente durchgeführt werden, nur im Ausnahmefall eingesetzt werden.

Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten eignen sich jedoch aufgrund der vorhandenen Haufwerksporosität besonders für eine von der Außenseite des Elementes ausführbare baustoffliche Verstärkung durch eine Zementleiminjektage. Mit dieser kann durch Festigkeitserhöhung des haufwerksporigen Leichtbetons das vorhandene Sicherheitsniveau erhöht und die Standsicherheit damit im Sinne einer gesicherten und dauerhaften Sanierung wiederhergestellt werden.

Generell auszuschließen ist vor der Anwendung von Zementleimen jedoch, daß durch die Injektage, welche die chemische Zusammensetzung, den Wassergehalt und die Porenstruktur des haufwerksporigen Leichtbetons entscheidend verändert, Schäden an haufwerksporigen Leichtbetonen infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) hervorgerufen werden [65].

Aufgrund der Tatsache, daß die Abklärung eventueller Spätfolgen durch AKR in mit Zementleim verfülltem haufwerksporigem Leichtbeton den Rahmen und die Zielstellung der vorliegenden Arbeit übersteigt, wird die Bearbeitung dieses Themenkomplexes in einer weiterführenden Arbeit durchgeführt [37].

Die Anwendung von Zementleimen für eine Festigkeitserhöhung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton ist bis zum Vorliegen der Ergebnisse dieser Arbeit jedoch möglich, wenn im Vorfeld durch eine chemische Analyse des vorhandenen haufwerksporigen Leichtbetons Spätfolgen durch AKR ausgeschlossen werden können.

Weiterhin ist es möglich, bei Gebäuden mit offener Horizontalfuge nach Bild 4.10 durch vollständiges Schließen der offenen Fuge mit einem geeigneten Material und damit Herstellung einer kontinuierlichen Abtragung der Beanspruchungen über die Querschnittsbreite eine Erhöhung der Tragfähigkeit der Außenwandelemente zu erzielen (siehe Abschnitt 4.3 ... 4.5).

Bei Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten, bei denen eine Minimierung der Zusatzlasten infolge Injektage erforderlich ist (z.B. bei geringen Sicherheitsreserven der vorhandenen Fundamente) oder die Verschlechterung des Wärmeschutzes durch die Erhöhung der Rohdichte nicht durch eine Zusatzwärmedämmung kompensiert werden kann, ist der Einsatz eines Injektionsschaummörtels mit geringer Rohdichte (z.B. nach [105]) denkbar.

Für diese Anwendungsbereiche sollte in weiterführenden Arbeiten untersucht werden, welche gesicherte Endfestigkeit des Verbundmaterials aus haufwerksporigem Leichtbeton und Injektionsschaummörtel erreicht werden kann.

6 Anwendung der entwickelten Verfahren im Rahmen von Fassadensanierungsmaßnahmen

Das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte und das Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung, welche in Kapitel 4 dieser Arbeit angewendet und entwickelt wurden, und die in Kapitel 5 dieser Arbeit beurteilten Sanierungsverfahren konnten bereits mit Erfolg an einer Reihe von Gebäuden im Rahmen von Fassadensanierungsmaßnahmen eingesetzt werden [50, 51, 52, 56]. Im Rahmen dieser Arbeit soll über die Anwendung der Verfahren am Gebäude Gerberstraße 18-20, 04105 Leipzig [50], berichtet werden.

Bei diesem Gebäude handelt es sich um ein 11-geschossiges Wohngebäude des Sonderbautyps Wohnungskomplex Gerberstraße GE1 (siehe Bild 6.1), bei dem die anstehenden Lasten über die Querwände abgetragen werden. Die somit tragenden Giebelwände und die nichttragenden Längsäußenwände bestehen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit äußerer und innerer gefügedichter Betondeckschicht, die innenliegenden Querwände bestehen aus gefügedichtem Beton. Die Besonderheit dieses Bautyps besteht darin, daß sich unter den Vollgeschossen zwei aus Stahlbeton monolithisch gefertigte Geschosse befinden (Erdgeschoß und Zwischengeschöß), so daß die vorgefertigten Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichteten Betondeckschichten erst ab einer Höhe von $h = 5.60$ m über der Geländeoberfläche zum Einsatz kamen.



Bild 6.1 : Süd- und Ostansicht des Gebäudes Gerberstraße 18-20, 04105 Leipzig

In einer durchgeführten Bauwerksdiagnostik konnten für das Gebäude die in Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 dargestellten geometrischen und stofflichen Parameter diagnostiziert werden.

<i>Charakteristischer Parameter</i>	<i>Diagnostizierter Wert am Gebäude</i>
Gebäuelänge [m]	136.15
Gebäudebreite [m]	18.05
Gebäudehöhe [m]	32.20
Anzahl der Vollgeschosse [-]	9
Geschoßhöhe der Vollgeschosse [m]	2.80
Knicklänge der Außenwandelemente der Vollgeschosse [m]	2.80
Höhe der Unterkante des ersten Vollgeschosses über Gelände [m]	5.60
Geschoßhöhe des Drempegelgeschosses [m]	1.40
Ausbildung der Horizontalfuge der Außenwandelemente [-]	System der offenen Fugen nach Bild 4.10

Tabelle 6.1 : Diagnostizierte geometrische Parameter des betrachteten Gebäudes

	<i>Schichtstärke</i> [mm]	<i>Rohdichte ρ_r</i> [g/cm ³]	<i>Festigkeit β_{WN}</i> [N/mm ²]	<i>Rechenfestigkeit β_R</i> [N/mm ²]
innere gefügedichte Betondeckschicht	25	2.07	15	10.50
Schicht aus haufwerksporrigem Leichtbeton	270	1.16	1.2	aufgrund der geringen Nennfestigkeit β_{WN} DIN 4232 [23] nicht entnehmbar
äußere gefügedichte Betondeckschicht	25	2.07	15	10.50

Tabelle 6.2 : Diagnostizierte geometrische und stoffliche Parameter der tragenden Außenwandelemente des betrachteten Gebäudes

Da die der Errichtung des Gebäudes zugrundeliegenden Planungsunterlagen nicht auf der Grundlage des derzeit gültigen Vorschriftenwerkes der DIN erstellt wurden, war es erforderlich, anhand von diagnostizierten Parametern und Untersuchungen zu vergleichbaren Objekten [5, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49] die auf die tragenden Giebelscheiben einwirkenden Lasten nach DIN 1055 [22] neu zu erfassen. Die Giebelscheibe unterliegt dabei nach Abschnitt 4.3.2 der nachfolgenden maßgebenden Einwirkungskombination :

1. Eigenlast der Giebelscheibe, Eigen- und Verkehrslast der in die Giebelscheiben einbindenden Decken und Eigen-, Verkehrs- und Schneelast der Dachkonstruktion,
2. Windlast in Giebelscheibenebene.

Eine Zusammenstellung der einwirkenden Lasten enthält Tabelle 6.3.

<i>Einwirkende Last</i>	<i>Wert</i>
<i>Eigenlasten</i>	

ungewollte Lastübertragung eines Streifens von 0.5 m Breite auf die tragende Giebelwand durch Eigenlast des Schmetterlingsdaches [kN/m]	2.75
Drempelgeschoßdecke [kN/m]	8.50
Vollgeschoßdecke [kN/m]	8.90
vorhandenes Außenwandelement zuzüglich eines neu anzubringenden Fassadensystems [kN/m ²]	4.55
<i>Verkehrs- und Schneelasten</i>	
ungewollte Lastübertragung eines Streifens von 0.5 m Breite auf die tragende Giebelwand durch Verkehrslast und Schneelast des Schmetterlingsdaches [kN/m]	1.00
Drempelgeschoßdecke [kN/m]	1.80*
Vollgeschoßdecke [kN/m]	5.50*
<i>Windlasten (maßgebend : Einwirkung in Giebelscheibenebene)</i>	
Höhenbereich 0.. 8 m [kN/m]	8.85 ⁺
Höhenbereich 8.. 20 m [kN/m]	14.16 ⁺
Höhenbereich 20..100 m [kN/m]	19.47 ⁺

* Diese maximalen Verkehrslasten wurden nach DIN 1055 [22] in Abhängigkeit des betrachteten Geschosses nach folgender Tabelle abgemindert :

betrachtetes Geschoß	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Abminderungsfaktor	0.60	0.65	0.71	0.80	0.88	0.95	1	1	1

+ Da die auf die Gebäudelängsseite einwirkende Windbelastung sowohl von den Giebel- als auch den Querwandscheiben abgetragen werden muß, erfolgte eine Beanspruchungsverteilung in Abhängigkeit der Steifigkeiten der einzelnen Scheiben. Auf die Giebelscheiben ergibt sich damit ein Anteil von jeweils 10% der auf die Gebäudelängsseite einwirkenden Windbelastung.

Tabelle 6.3 : Zusammenstellung der einwirkenden Lasten für das betrachtete Gebäude

Mit diesen Lastannahmen kann nun die zweistufige Nachweisführung der Standsicherheit des Gebäudes nach Tabelle 4.25 erfolgen.

Diese Nachweisführung erfolgte rechnergestützt [84] und es ergeben sich zunächst für die erste Stufe der Nachweisführung (Anwendung der Planungsgrundlage) die in Tabelle 6.4 dargestellten Werte für γ_{vorh} . Da jedoch das geforderte Standsicherheitsniveau bei Anwendung dieses Verfahrens nicht für alle Geschosse des Gebäudes nachweisbar war, wurde die zweite Stufe der Nachweisführung (Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung) durchgeführt. Die erhaltenen Werte für ξ_{vorh} können ebenfalls Tabelle 6.4 entnommen werden.

Da die Rechenfestigkeit der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton der DIN 4232 [23] nicht entnommen werden konnte, wurde die Nachweisführung zunächst unter Annahme der Nachweisbarkeit eines LB 2 nach DIN 4232 [23] durchgeführt und es erfolgte dann auf der sicheren Seite liegend eine Abminderung des Standsicherheitsniveaus nach folgender Beziehung :

$$\gamma_{\text{vorh}}, \xi_{\text{vorh}} = (\gamma_{\text{LB2}}, \xi_{\text{LB2}}) * \beta_{\text{WN,vorh}} / \beta_{\text{WN, LB2}} \quad [-] \quad (6.1)$$

mit

γ_{vorh} - nachweisbares γ bei Anwendung der ersten Stufe der Nachweisführung unter Berücksichtigung der

		vorhandenen Festigkeit der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	[-]
ξ_{vorh}	-	nachweisbares ξ bei Anwendung der zweiten Stufe der Nachweisführung unter Berücksichtigung der vorhandenen Festigkeit der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	[-]
γ_{LB2}	-	nachweisbares γ bei Anwendung der ersten Stufe der Nachweisführung unter Annahme eines vorhandenen LB 2	[-]
ξ_{LB2}	-	nachweisbares ξ bei Anwendung der zweiten Stufe der Nachweisführung unter Annahme eines vorhandenen LB 2	[-]
$\beta_{\text{WN,vorh}}$	-	Nennfestigkeit der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton	[N/mm ²]
$\beta_{\text{WN,LB2}}$	-	Nennfestigkeit der Betonfestigkeitsklasse LB 2	[N/mm ²]

		<i>Stufe 1 der Nachweisführung</i> Anwendung der Planungsgrundlage (Berechnungskomplex 5 nach Tabelle 4.2)				<i>Stufe 2 der Nachweisführung</i> Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Ver- formungsbeschränkung				
berücksichtigte Außermittigkeit der einwirkenden Normalkraft [mm]		nicht diagnostiziert, deshalb + 30 nach Abschnitt 4.3.5				nicht diagnostiziert, deshalb - 10 nach Abschnitt 4.3.5				
Ge- schoß	betrachtete Höhe über Gelände [m]	<i>N</i> [kN/m]	<i>M</i> [kNm/m]	γ_{vorh} [-]	γ_{erf} [-]	<i>N</i> [kN/m]	<i>M</i> [kNm/m]	ξ_{vorh} [-]	ξ_{erf} [-]	
1	UK	5.6	348.43	10.45	0.47	3.00	348.43	-3.48	0.32	1.00
	OK	8.4	314.22	9.43	0.52	3.00	314.22	-3.14	0.35	1.00
2	UK	8.4	304.04	9.12	0.54	3.00	304.04	-3.04	0.37	1.00
	OK	11.2	271.60	8.15	0.60	3.00	271.60	-2.71	0.41	1.00
3	UK	11.2	261.21	7.84	0.62	3.00	261.21	-2.61	0.43	1.00
	OK	14.0	230.81	6.92	0.71	3.00	230.81	-2.30	0.49	1.00
4	UK	14.0	220.64	6.62	0.74	3.00	220.64	-2.20	0.50	1.00
	OK	16.8	192.29	5.77	0.85	3.00	192.29	-1.92	0.58	1.00
5	UK	16.8	180.90	5.43	0.91	3.00	180.90	-1.81	0.62	1.00
	OK	19.6	154.59	4.64	1.06	3.00	154.59	-1.55	0.73	1.00
6	UK	19.6	142.13	4.26	1.16	3.00	142.13	-1.42	0.79	1.00
	OK	22.4	118.14	3.54	1.37	3.00	118.14	-1.18	0.95	1.00
7	UK	22.4	104.67	3.14	1.57	3.00	104.67	-1.05	1.07	1.00
	OK	25.2	83.49	2.50	1.94	3.00	83.49	-0.83	1.34	1.00
8	UK	25.2	69.09	2.07	2.35	3.00	69.09	-0.69	1.62	1.00
	OK	28.0	50.73	1.52	3.19	3.00	50.73	-0.51	2.20	1.00
9	UK	28.0	36.33	1.09	4.43	3.00	36.33	-0.36	3.08	1.00
	OK	30.8	20.77	0.62	7.98	3.00	20.77	-0.21	5.38	1.00

Tabelle 6.4 : Nachweisbare Werte für γ und ξ für das Gebäude Gerberstraße 18-20, 04105 Leipzig
Bild 6.2 enthält eine grafische Darstellung der ermittelten Werte.

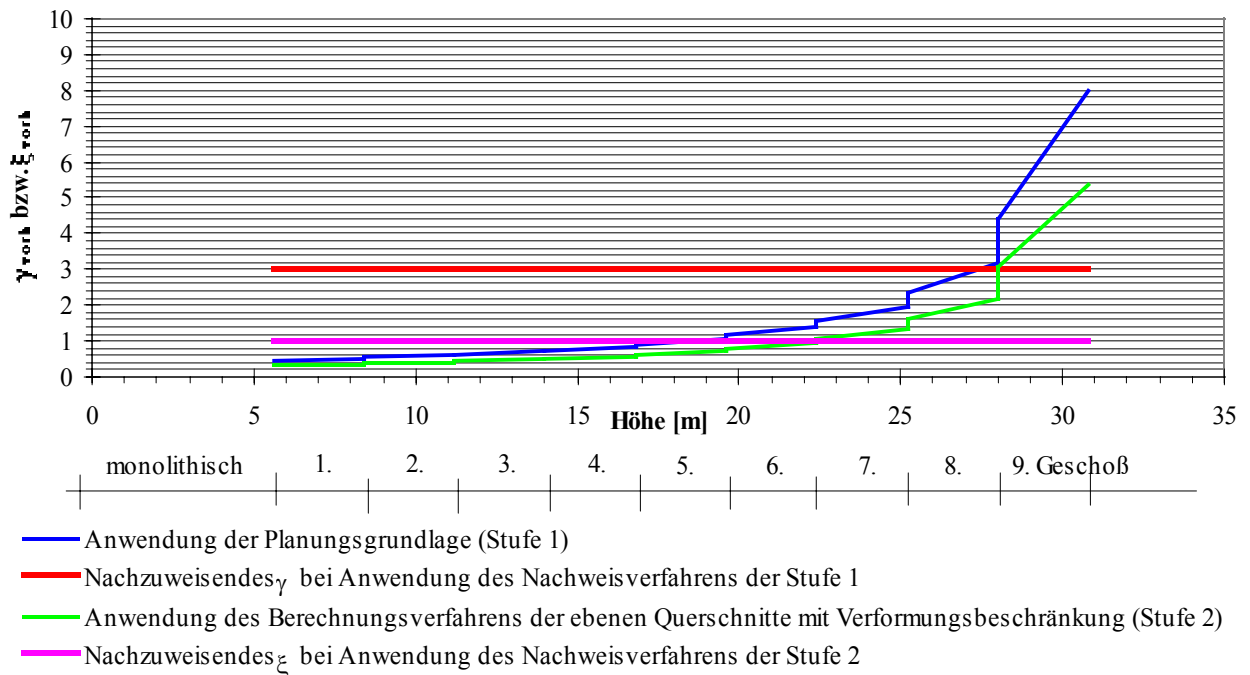


Bild 6.2 : Grafische Darstellung der nachweisbaren Werte für γ und ξ für das Gebäude Gerberstraße 18-20, 04105 Leipzig

Tabelle 6.4 und Bild 6.2 kann entnommen werden, daß auch bei der zweiten Stufe der Nachweisführung (Anwendung des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung) das geforderte Standsicherheitsniveau nicht für alle Geschosse des Gebäudes nachgewiesen werden konnte. Aus diesem Grund wurde eine standsicherheitserhöhende Maßnahme in Form einer Zementleiminjektage bis zur Oberkante der 6. Etage durchgeführt, um die Festigkeit der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton zu erhöhen (siehe Kapitel 5). Nach erfolgter Zementleiminjektage konnte für die verfüllten Geschosse für die Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton ein LB 8 nach DIN 4232 [23] nachgewiesen werden. Mit dieser Festigkeit der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton ist nun bei Anwendung der zweiten Stufe der Nachweisführung das erforderliche Standsicherheitsniveau für alle Geschosse nachweisbar.

Bei alleiniger Anwendung der ersten Stufe der Nachweisführung (Planungsgrundlage) wäre diese Zementleiminjektage bis zur Oberkante der 8. Etage erforderlich gewesen.

Durch die Anwendung der zweiten Stufe der Nachweisführung (Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung) konnten somit der Sanierungsaufwand und damit die Sanierungskosten für das Gebäude gesenkt und die erforderlichen Bauzeiten entscheidend verkürzt werden.

7 Zusammenfassung

7.1 Vorhandene Schädigungen von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton

Auf dem Territorium der ehemaligen DDR ist heute ein Gebäudebestand von rund 2.100.000 Wohneinheiten in industrieller Bauweise vorhanden. Etwa 50 % dieser Gebäude besitzen Außenwände aus haufwerksporigem Leichtbeton.

Entsprechend dem Bauschadensbericht des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau [17] und umfangreichen bauwerksdiagnostischen Untersuchungen an Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton im Vorfeld konkreter Sanierungsmaßnahmen [74] kann für diese Außenwandkonstruktionen ausgesagt werden, daß durch

- großflächige Makrorißstrukturen als Erscheinungsbild von möglichen Standsicherheitsgefährdungen,
- in der Fertigung nicht erreichte Parameter der geplanten Festigkeit,
- Undichtigkeiten im Fugen- und Fensterbereich,
- unzureichenden Wärmeschutz

kurz- bzw. mittelfristig die Dauerhaftigkeit oder die Nutzbarkeit des Einzelbauteils bzw. des gesamten Gebäudes in Frage zu stellen ist.

Aufgrund dieser Dringlichkeit der Problematik ist die Beantwortung zweier grundlegender Fragestellungen hinsichtlich einer umfassenden und dauerhaften Sanierung von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton erforderlich :

- 1. In welchem Umfang und auf welche Art und Weise ist eine Erfüllung des Wärme- und Feuchtigkeitsschutzes entsprechend der 3. Wärmeschutzverordnung für diese Gebäude möglich und sinnvoll ?**
- 2. Sind die Wohngebäude mit industriell vorgefertigten Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton der ehemaligen DDR auch nach der Einleitung von zusätzlichen Beanspruchungen infolge der erforderlichen Fassadensanierungsmaßnahmen standsicher bzw. auf welchem Wege kann eine Herstellung der Standsicherheit erfolgen ?**

In [83] erfolgte bereits eine umfassende Beantwortung dieser beiden Fragestellungen.

Da im Rahmen dieser Arbeit die Problematik der **statisch-konstruktiven Beurteilung von mehrschichtigen Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten** in wissenschaftlicher Hinsicht im Mittelpunkt stand, soll im folgenden noch einmal auf die Beantwortung der zweiten Fragestellung eingegangen werden.

7.2 Beurteilung der Standsicherheit von Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten

7.2.1 Entwickelte und Nachweis- und Prüfverfahren

Um die Frage nach der Standsicherheit der Gebäude mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten beantworten zu können, waren zunächst die baustofflichen Parameter dieser Außenwandelemente zu beurteilen.

Aufgrund der Tatsache, daß Gebäude mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten in ihrer Entstehungszeit von 1970 - 1990 auf der Grundlage einer Vielzahl von Vorschriften geplant und gefertigt wurden (siehe Abschnitt 3.1.1 und 4.1), ist eine globale Zuordnung der geplanten und der vorhandenen baustofflichen Parameter zu einer einheitlichen Beurteilungsgrundlage, z.B. zum derzeit gültigen Vorschriftenwerk der DIN, mit genormten Prüfverfahren nicht möglich.

Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit Prüf- und Berechnungsverfahren entwickelt, mit denen es möglich ist, die an einem Gebäude vorhandenen Parameter

- der Druckfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons der DIN 4232 [23] zuzuordnen (*Statistische Auswertung*, siehe Abschnitt 3.1.3.4.1),
- der Druckfestigkeit der gefügedichten Betondeckschichten der DIN 1045 [19] zuzuordnen (*Verfahren zur Festigkeitsermittlung dünnschichtiger Betonbauteile*, siehe Abschnitt 3.2.3.1),
- der Haufwerksporosität, der Feststoffporosität und der Gesamtporosität des haufwerksporigen Leichtbetons dem in dieser Arbeit dargestellten Spektrum der baustofflichen Parameter (siehe Abschnitt 3.1.3.7) zuzuordnen (*Flüssigkeitsaufnahmeverfahren*, siehe Abschnitt 3.1.2.2).

Darüber hinaus wurden in dieser Arbeit die auf der Grundlage von umfangreichen bauwerksdiagnostischen Untersuchungen [74] erhaltenen Spektren und Korrelationen der in Tabelle 7.1 dargestellten baustofflichen Parameter ausgewiesen (siehe Kapitel 3).

<i>Parameter der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton</i>		<i>Parameter der gefügedichten Betondeckschichten</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Schichtstärke • Karbonatisierungstiefe • Zuschlagstoffarten • Druckfestigkeit • Zugfestigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Rohdichte • Haufwerksporosität • Feststoffporosität • Gesamtporosität 	<ul style="list-style-type: none"> • Schichtstärke • Karbonatisierungstiefe • Druckfestigkeit

Tabelle 7.1 : *Baustoffliche Parameter, für welche in der vorliegenden Arbeit Spektren und Korrelationen ausgewiesen wurden*

Damit war auf der Grundlage dieser Bestimmung und Einordnung der baustofflichen Parameter in das Vorschriftenwerk der DIN eine Beurteilung bestehender Gebäude mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten in statisch-konstruktiver Hinsicht möglich.

Wird nun die statische Nachweisführung mit einem Berechnungsverfahren durchgeführt, welches auf dem Nachweis eines einschichtigen Querschnitts beruht (was dem in der ursprünglichen Planung der Gebäude angewendeten Verfahren, im nachfolgenden *Planungsgrundlage* genannt, entspricht), kann der Standsicherheitsnachweis von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten besonders für Gebäude mit hoher Geschoßanzahl heute nur selten erbracht werden (siehe Abschnitt 4.1). Teilweise ergeben sich rechnerische Standsicherheitsniveaus von $\gamma_{\text{vorh}} \leq 1.0$.

Begründet ist dies darin, daß die geplanten Parameter der Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons in der Fertigung nicht immer erreicht wurden (siehe Kapitel 3) und zusätzliche Beanspruchungen infolge von Fassadensanierungsmaßnahmen zu berücksichtigen sind (siehe Kapitel 1).

Da es jedoch bis zum heutigen Zeitpunkt nicht zum Versagen eines solchen Gebäudes kam, muß davon ausgegangen werden, daß der Ansatz eines einschichtigen Querschnitts sehr stark auf der sicheren Seite liegt. Um das tatsächliche Tragverhalten erfassen zu können, ist demzufolge die Berücksichtigung der Besonderheiten mehrschichtiger Querschnitte erforderlich.

Aus diesem Grund wurden auf der Grundlage von theoretischen Betrachtungen und durchgeführten experimentellen Untersuchungen die beiden Berechnungsverfahren

- *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte* (siehe Abschnitt 4.2.4),
- *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung* (siehe Abschnitt 4.3.4)

angewendet und entwickelt, welche in Abhängigkeit der Ausbildung der Horizontalfuge der Außenwandelemente das tatsächliche Tragverhalten von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten genauer beschreiben als die Planungsgrundlage (siehe Kapitel 4).

Da diese Verfahren die Tragreserven des real vorhandenen mehrschichtigen Querschnitts erschließen, konnte bei Anwendung dieser Nachweisverfahren in vorliegender Arbeit das rechnerische Standsicherheitsniveau um bis zu 130 % erhöht werden.

Dargestellt wurde jedoch auch, daß auch mit diesen Berechnungsverfahren das erforderliche Standsicherheitsniveau möglicherweise nicht für alle Geschosse eines Gebäudes nachgewiesen werden kann (siehe Abschnitt 4.5), so daß damit die Entwicklung und Beurteilung von Verfahren zur nachträglichen Erhöhung der Standsicherheit notwendig war.

Anhand von experimentellen und theoretischen Untersuchungen mit einem Injektageverfahren wurde nachgewiesen, daß eine Zementleiminjektage grundsätzlich für eine Erhöhung der Standsicherheit von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten geeignet ist (siehe Kapitel 5).

Einzuschränken ist diese Aussage nur durch die Tatsache, daß durch eine Zementleiminjektage, welche die chemische Zusammensetzung, den Wassergehalt und die Porenstruktur des haufwerksporigen Leichtbetons entscheidend verändert, Schäden infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) nicht ausgeschlossen werden können [65].

Um eventuelle Spätfolgen abzuklären, wird die Bearbeitung dieses Themenkomplexes in einer weiterführenden Arbeit durchgeführt [37]. Die Anwendung von Zementleimen für eine Festigkeitserhöhung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton ist bis zum Vorliegen der Ergebnisse dieser Arbeit jedoch möglich, wenn im Vorfeld durch eine chemische Analyse des vorhandenen haufwerksporigen Leichtbetons Spätfolgen durch AKR ausgeschlossen werden können.

Eine Erhöhung der Standsicherheit ist ebenfalls durch den Einsatz von Injektionsschaummörteln (z.B. nach [105]) möglich. Die Anwendung eines solchen Injektagematerials mit geringer Rohdichte ist insbesondere bei Gebäuden, bei denen aufgrund von geringen Sicherheitsreserven der vorhandenen Fundamente eine Minimierung der Zusatzlasten erforderlich ist oder die Verschlechterung des Wärmeschutzes durch die Erhöhung der Rohdichte nicht durch eine Zusatzwärmedämmung kompensiert werden kann, sinnvoll.

An einer Reihe von Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten wurden in [74] Schädigungen des Verbundes zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton infolge Temperaturbeanspruchung der äußeren gefügedichten Betondeckschicht diagnostiziert.

Durch experimentelle Untersuchungen wurde nachgewiesen, daß die vorhandene Verbundfestigkeit zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton keinen Einfluß auf die Standsicherheit des gesamten Außenwandelementes hat (siehe Abschnitt 4.7.1) und somit für eine Nachweisführung von Außenwandelementen

aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten nicht von Bedeutung ist.

Von Bedeutung ist die vorhandene Verbundfestigkeit jedoch im Hinblick auf die Standsicherheit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht. Da kein genormtes Prüfverfahren zur Bestimmung des vorhandenen Verbundes existiert, wurden die Prüfverfahren

- *Abklopffverfahren,*
- *Verbundfestigkeitsprüfung*

beurteilt bzw. entwickelt, mit denen eine gesicherte Aussage zur vorhandenen Verbundfestigkeit zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton möglich ist (siehe Abschnitt 4.7.2).

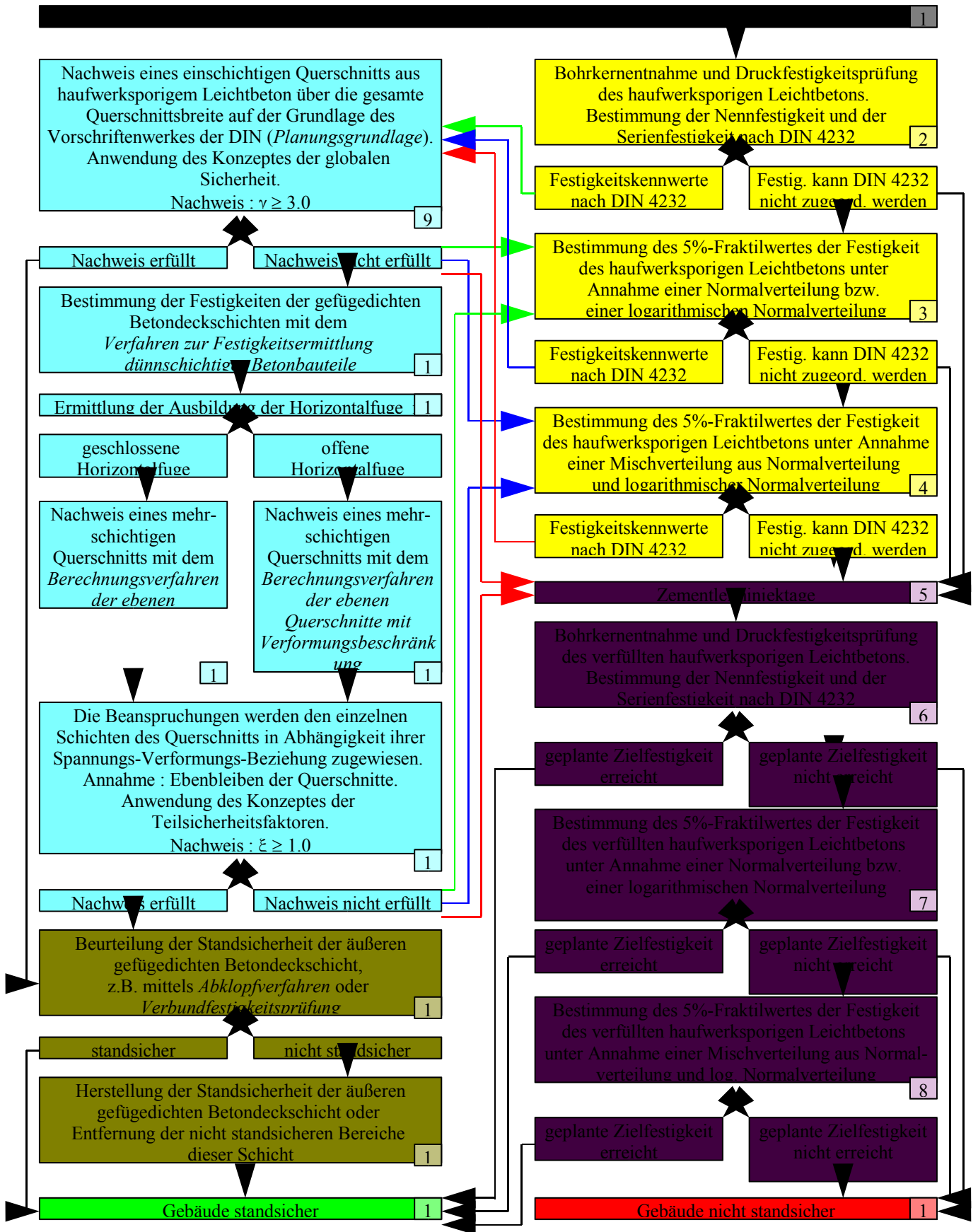
7.2.2 Nachweisführung von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten

Auf der Grundlage dieser in vorliegender Arbeit entwickelten Nachweis- und Prüfverfahren und den an realen Gebäuden und repräsentativen Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten durchgeführten theoretischen und experimentellen Untersuchungen kann die Fragestellung nach der Standsicherheit der Gebäude beantwortet werden :

- **Die Aussage zur Standsicherheit der auf dem Gebiet der ehemaligen DDR errichteten Gebäude mit industriell vorgefertigten Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten ist zu differenzieren.**
- **Erforderlich ist eine tragwerksplanerische Beurteilung der vorhandenen Standsicherheit jedes einzelnen Gebäudes mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton.**

Die Beurteilung der Standsicherheit auf der Grundlage dieser Arbeit erfolgt dabei zweckmäßigerweise nach dem nachfolgend dargestellten *Ablaufplan zur tragwerksplanerischen Beurteilung von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton* mit den im Anhang angegebenen Erläuterungen zu den durchzuführenden Nachweis- und Prüfverfahren.

Dieser Ablaufplan enthält eine dreistufige statistische Auswertung (siehe Abschnitt 3.1.3.4.1) und eine zweistufige statisch-konstruktive Nachweisführung (siehe Abschnitt 4.4 und 4.5), welche sukzessive ausführbar sind und bereits mit Erfolg an einer Reihe von Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten im Rahmen von Fassadensanierungsmaßnahmen angewendet wurden (siehe Kapitel 6).



7.3 Vorschläge für weiterführende Arbeiten

Obwohl die in vorliegender Arbeit beschriebenen Nachweis- und Prüfverfahren insbesondere für die Beurteilung von bestehenden Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten auf dem Gebiet der ehemaligen DDR entwickelt wurden, ergeben sich eine Reihe weiterer Anwendungsfälle.

Das *Verfahren zur Festigkeitsermittlung dünnenschichtiger Betonbauteile*, welches zur Ermittlung der Festigkeit der inneren und äußeren gefügedichten Betondeckschicht von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten entwickelt wurde, ist ohne weitere Modifizierung zur nachträglichen Bestimmung der Festigkeit von dünnen Betonschichten (z.B. bei Schalentragwerken aus Beton, Estrichen etc.) anwendbar. In weiterführenden Arbeiten wäre eine Erweiterung dieses Verfahrens für Konstruktionen aus hochfestem Beton denkbar.

Da das Prinzip des *Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte* uneingeschränkt auf andere mehrschichtige Konstruktionen übertragbar ist, kann auf der Grundlage von experimentellen Untersuchungen auch das *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung* auf Konstruktionen mit Parametern, welche von den dieser Arbeit zugrundeliegenden Parametern abweichen, übertragen werden. Erforderlich ist dafür eine Anpassung des Wertes für $\Delta\sigma_r$ in Abhängigkeit sowohl der vorhandenen stofflichen und geometrischen Parameter als auch der Art der Lasteintragung. Da die Lasteintragung teilflächenhaft erfolgen kann, ist eine Anwendung dieses Verfahrens bei der Bemessung von nachträglich durch Ummantelung verstärkten Stahlbetonstützen und anderen nachträglich verstärkten Konstruktionen denkbar.

Möglich ist es ebenfalls, durch die Anwendung dieser beiden Berechnungsverfahren mehrschichtige Konstruktionen zu entwickeln, welche einen in statisch-konstruktiver, wärme- und brandschutztechnischer Hinsicht optimierten Querschnitt aufweisen. In weiterführenden Arbeiten können somit auf der Grundlage der in dieser Arbeit entwickelten Prüf- und Berechnungsverfahren in Zusammenarbeit mit der Deutschen Bauindustrie technisch verbesserte Baustoffe geplant und zur Anwendung gebracht werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Ackermann, G., Raue, E., Ebel, L., Setzpfand, G.; Spannungsumlagerungen in Verbundquerschnitten aus Fertigteilen und Ort beton statisch bestimmter Träger infolge Kriechen und Schwinden unter Berücksichtigung der Rißbildung; Deutscher Ausschluß für Stahlbeton, Heft 431; Beuth Verlag GmbH Berlin Köln; Berlin 1992

- [2] Aicher, S.; Bemessung biegebeanspruchter Sandwichbalken mit dem modifizierten Gamma-Verfahren; Bautechnik 64, 1987

- [3] Aicher, S.; Berechnung und Bemessung axial gedrückter Sandwich-Wandscheiben mit Holzwerkstoffbeplankungen; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften; Berlin, 1989

- [4] Altenbach, J., Altenbach, H., Nast, E.; Aspekte der theoretischen Modellierung und der numerischen Berechnung mehrschichtiger Platten und Schalen; Finite Elemente - Anwendung in der Baupraxis; Vorträge anläßlich einer Tagung an der Universität Karlsruhe im September 1991; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften

- [5] Andersch, U.; Ermittlung der Standsicherheit von Plattenbauten aus Leichtbeton; Diplomarbeit an der Technischen Hochschule Leipzig; Leipzig, Juli 1994

- [6] Bode, H.; Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Sandwichplatten; Ruhr-Universität Bochum; Mitteilung Nr. 74-10.1974

- [7] Bonzel, J.; Beton; Betonkalender; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften; Berlin, 1989

- [8] Bonzel, J., Hilsdorf, H. K.; Beton; Betonkalender; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften; Berlin, 1991

- [9] Bonzel, J.; Zur Gestaltsabhängigkeit der Betondruckfestigkeit; Beton und Stahlbeton 54, 1959
- [10] Bornath, I.; Erfassung des Tragverhaltens von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten mit der Methode der finiten Elemente; Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Leipzig, 1996 (unveröffentlicht)
- [11] Böttiger, U.; Ein Beitrag zur Tragfähigkeitserhöhung geschädigter, zentrisch gedrückter Stahlbetonstützen mittels Reaktionsharzbeton; Technische Hochschule Leipzig; Leipzig, 1985 (Diss.)
- [12] Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau; Leitfaden für die Instandsetzung und Modernisierung von Wohngebäuden in der Plattenbauweise, Blockbauart 0.8 t; Bonn - Bad Godesberg, Februar 1992
- [13] Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau; Leitfaden für die Instandsetzung und Modernisierung von Wohngebäuden in der Plattenbauweise, Typenserie P2 5.0 t; Bonn - Bad Godesberg, November 1992
- [14] Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau; Leitfaden für die Instandsetzung und Modernisierung von Wohngebäuden in der Plattenbauweise, Blockbauart 1.1 t; Bonn - Bad Godesberg, Juni 1993
- [15] Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau; Leitfaden für die Instandsetzung und Modernisierung von Wohngebäuden in der Plattenbauweise, Streifenbauart 2.0 t; Bonn - Bad Godesberg, November 1993
- [16] Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau; Leitfaden für die Instandsetzung und Modernisierung von Wohngebäuden in der Plattenbauweise, WHH Wohnhochhäuser; Bonn - Bad Godesberg, Dezember 1993
- [17] Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau; Wohnbauten in Fertigteilbauweise in den neuen Bundesländern - Ausmaß und Schwerpunkte der Bauschäden; Bonn - Bad Godesberg, August 1993

-
-
- [18] DAMW-VW 968; Nachweis der Druckfestigkeit bei Beton; Deutsches Amt für Meßwesen und Warenprüfung; Berlin, 1969
- [19] DIN 1045; Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung; Normenausschuß Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Beuth-Verlag Berlin, 07/1988
- [20] DIN 1048 T2; Prüfverfahren für Beton; Fachnormenausschuß Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin, 1976
- [21] DIN 1053 T1; Mauerwerksbau, Bemessung und Ausführung; Fachnormenausschuß Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin, 02/1990
- [22] DIN 1055; Lastannahmen für Bauwerke; Fachnormenausschuß Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin, 07/1978
- [23] DIN 4232; Wände aus Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge, Bemessung und Ausführung; Normenausschuß Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin, 09/1987
- [24] DIN 18516; Außenwandbekleidungen, hinterlüftet, Anforderungen, Prüfgrundsätze; Normenausschuß Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin, 01/1990
- [25] DIN 52102; Bestimmung von Dichte, Trockenrohddichte, Dichtigkeitsgrad und Gesamtporosität; Normenausschuß Materialprüfung im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin, 1988
- [26] DIN EN 1354; Bestimmung der Druckfestigkeit von haufwerksporigem Leichtbeton (Normentwurf); Normenausschuß Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin, 02/1994
- [27] DIN EN 1520; Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton (Normentwurf); Normenausschuß Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin, 10/1994
-
-

- [28] DIN EN 1740; Bestimmung des Tragverhaltens von vorgefertigten bewehrten Bauteilen aus dampfgehärtetem Porenbeton oder haufwerksporigem Leichtbeton unter vorwiegend in Längsrichtung wirkender Belastung (vertikale Bauteile) (Normentwurf); Normenausschuß Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin, 02/1995
- [29] DIN EN 1742; Bestimmung der Scherfestigkeit zwischen den verschiedenen Schichten mehrschichtiger Bauteile aus dampfgehärtetem Porenbeton oder haufwerksporigem Leichtbeton (Normentwurf); Normenausschuß Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin, 02/1995
- [30] DIN V 18932 T1 Eurocode 2; Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau (Vornorm); Normenausschuß Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin, 10/1991
- [31] Duda, A.; Berechnung dreischichtiger Platten und Schalen; Verlag für das Bauwesen; Berlin, 1963
- [32] Eibl, J., Bachmann, H.; Nachträgliche Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Spritzbeton; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften; Berlin 1990
- [33] Fiedler, L.; Tragfähigkeitserhöhung von Stahlbetonstützen - ein Beitrag zur Lösung von Rekonstruktionsbaumaßnahmen; Technische Hochschule Leipzig; Leipzig, 1985 (Diss.)
- [34] Fischer, R.; Entwicklung eines vereinfachten Berechnungsverfahrens zur statischen Nachweisführung von Platten aus haufwerksporigem Leichtbeton; Diplomarbeit an der Technischen Hochschule Leipzig; Leipzig, Juni 1996
- [35] FSB-Entwurf Nr. 112-0318; Montagebauweise-Platten; Deutsche Bauakademie, 1961
- [36] Gaede, K.; Einfluß der Größe der Proben auf die Würfeldruckfestigkeit von Beton; Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 144, 1962

[37] Gesellschaft für Materialprüfung und Baustofforschung GmbH am Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V.; Baukostensenkung durch gesicherte Schadensbeurteilung an haufwerksporigen Leichtbetonelementen der industriell errichteten Wohnbauten der ehemaligen DDR, Teil 2 : Einfluß von Zementleiminjektage auf haufwerksporigen Leichtbeton; Forschungsantrag beim Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau; Berlin, April 1996 (unveröffentlicht)

[38] Habig, H.; Institut für Städtebau und Architektur der Deutschen Bauakademie; Bauten in Wandkonstruktion - Grundlagen für Konstruktion und Berechnung; Reihe Städtebau und Architektur Heft 16; Berlin, Deutsche Bauinformation 1967

Habig, H.; Institut für Städtebau und Architektur der Deutschen Bauakademie; Richtlinie für die Projektierung von Bauten in Wandkonstruktion in Montagebauweise; Reihe Städtebau und Architektur Heft 11; Berlin, Deutsche Bauinformation 1967

1. Nachtrag vom März 1970

[39] Helff, D.; Festigkeit und Rohdichte haufwerksporiger Leichtzuschlagstoffbetone; Technische Universität Dresden; Dresden, 1969 (Diss.)

[40] Informationskatalog 1976-1980; VE Wohnungsbaukombinat 'Wilhelm Pieck', Karl-Marx-Stadt; Karl-Marx-Stadt, März 1976 (unveröffentlicht)

[41] Ingenieurbüro Hafranke, Leipzig-Projekt; Tragwerksplanung zur Sanierung der Fassade Alters- und Pflegeheim „Am Kirschberg“, Karlsruher Allee 31, 04209 Leipzig; Leipzig, März 1994 (unveröffentlicht)

[42] Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Gutachterliche Stellungnahme zum Objekt Richard-Wagner-Straße 12, 13 und 14; Leipzig, November 1993 (unveröffentlicht)

[43] Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Nachweis der Standsicherheit des Gebäudes Alters- und Pflegeheim „Am Kirschberg“, Karlsruher Allee 31, 04209 Leipzig; Leipzig, August 1994 (unveröffentlicht)

- [44] Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Nachweis der Standsicherheit der Gebäude Scharnhorststraße 4-12, Clausewitzstraße 1-9, Chemnitz; Leipzig, September 1994 (unveröffentlicht)
- [45] Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Nachweis der Standsicherheit der Gebäude Bernsdorferstraße 130-136, Clausewitzstraße 21-33, Chemnitz; Leipzig, November 1994 (unveröffentlicht)
- [46] Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Nachweis der Standsicherheit des Gebäudes Yorckstraße 50-58, Chemnitz; Leipzig, November 1994 (unveröffentlicht)
- [47] Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Nachweis der Standsicherheit der Gebäude Bernsdorferstraße 130-136, Clausewitzstraße 21-33, Chemnitz; 1. Nachtrag; Leipzig, Januar 1995 (unveröffentlicht)
- [48] Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Nachweis der Standsicherheit des Gebäudes Yorckstraße 50-58, Chemnitz; 1. Nachtrag; Leipzig, März 1995 (unveröffentlicht)
- [49] Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Nachweis der Standsicherheit der Gebäude Ernst-Reinke-Straße 1-9, Gustav-Zahnke-Straße 1-9, 11-19, 21-29, Erich-Kuttner-Straße 10-16, 18-24, Berlin-Lichtenberg; Leipzig, Juni 1995 (unveröffentlicht)
- [50] Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Nachweis der Standsicherheit des Gebäudes Gerberstraße 18-20, 04105 Leipzig; Leipzig, Juli 1996 (unveröffentlicht)
- [51] Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Nachweis der Standsicherheit des Gebäudes Phillip-Rosenthal-Straße 29-33, 04103 Leipzig; Leipzig, Juli 1996 (unveröffentlicht)
- [52] Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Nachweis der Standsicherheit des Gebäudes Mainzer Straße 2, 04109 Leipzig; Leipzig, Juli 1996 (unveröffentlicht)

-
-
- [53] Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Projektunterlagen zu den Objekten Bernsdorferstraße 130-136, Augsburgerstraße 52-58 und Clausewitzstraße 21-33, 09130 Chemnitz; Leipzig, Oktober 1994 (unveröffentlicht)
- [54] Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Projektunterlagen zum Objekt Yorckstraße 50-58, Chemnitz; Leipzig, Juni 1994 (unveröffentlicht)
- [55] Ingenieur- und Architektengemeinschaft Sahlmann & Partner; Zusammenfassende Begutachtung zum bauwerksdiagnostischen Zustand der Studentenwohnheime Arno-Nitsche-Straße und Johannes-R.-Becher-Straße, 04279 Leipzig; Leipzig, Januar 1993 (unveröffentlicht)
- [56] Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V.; Nachweis der Standsicherheit des Gebäudes Karl-Marx-Allee 5-11, 10178 Berlin; Berlin, August 1996 (unveröffentlicht)
- [57] Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V.; Teilbericht Nr. 1-1/1996 im Rahmen des Forschungsthemas „Haufwerksporiger Leichtbeton“ an der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Druckfestigkeits-, Rohdichte-, Haufwerksporositäts-, Elastizitätsmodul- und Spaltzugfestigkeitsprüfungen an Bohrkernen aus haufwerksporigem Leichtbeton; Berlin, Dezember 1995 (unveröffentlicht)
- [58] Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V.; Teilbericht Nr. 1-11/1995 im Rahmen des Forschungsthemas „Haufwerksporiger Leichtbeton“ an der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Standsicherheitsnachweis an 5geschossigen WBS 70-Gebäuden mit Giebelwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton - Standort Schwerin - (erweiterte Version); Berlin, März 1995 (unveröffentlicht)
- [59] Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V.; Teilbericht Nr. 1-13/1996 im Rahmen des Forschungsthemas „Haufwerksporiger Leichtbeton“ an der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Druckfestigkeitsuntersuchungen an Fensterpfeilern aus Außenwandelementen mit einer Kernschicht aus
-
-

haufwerksporigem Leichtbeton und Deckschichten aus Zementmörtel; Berlin, Mai 1996 (unveröffentlicht)

- [60] Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V.; Teilbericht Nr. 1-16/1995 im Rahmen des Forschungsthemas „Haufwerksporiger Leichtbeton“ an der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Empfehlungen zur experimentellen Untersuchung von haufwerksporigem Leichtbeton in bestehenden Fertigteilbauten; Berlin, Juni 1995 (unveröffentlicht)

- [61] Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V.; Teilbericht Nr. 1-19/1995 im Rahmen des Forschungsthemas „Haufwerksporiger Leichtbeton“ an der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Anleitung zur statistischen Auswertung von Prüfergebnissen - 5%-Quantil und Mittelwert; Berlin, Juni 1995 (unveröffentlicht)

- [62] Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V.; Teilbericht Nr. 1-21/1995 im Rahmen des Forschungsthemas „Haufwerksporiger Leichtbeton“ an der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Berechnungsvorschlag zur Bemessung von einschichtigen Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton unter Einbeziehung der Tragfähigkeitserhöhung durch die Deckschichten; Berlin, Juni 1995 (unveröffentlicht)

- [63] Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V.; Teilbericht Nr. 1-21/1995 im Rahmen des Forschungsthemas „Haufwerksporiger Leichtbeton“ an der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Prüfungen zum Einfluß unterschiedlicher Prüfkörperabmessungen auf die Druckfestigkeit und Untersuchungen zur Tragkraftherhöhung durch die Deckschichten; Berlin, Dezember 1995 (unveröffentlicht)

- [64] Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V.; Teilbericht Nr. 1-8/1996 im Rahmen des Forschungsthemas „Haufwerksporiger Leichtbeton“ an der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Sicherheitstheoretische Untersuchungen für Außenwände aus haufwerksporigem Leichtbeton aus DDR-Produktion; Berlin, April 1996 (unveröffentlicht)

- [65] Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V.; Teilbericht Nr. 4-63/1995 im Rahmen des Forschungsthemas „Haufwerksporiger Leichtbeton“ an der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Bestimmung der

-
-
- Porosität und ausgewählter chemischer Eigenschaften an haufwerksporigen Leichtbetonen; Berlin, Februar 1996 (unveröffentlicht)
- [66] Johannsen, K.; Nachweise und Bemessung von abschnittsweise hergestellten Querschnitten; Beton- und Stahlbetonbau 72, 1977
- [67] Jungbluth, O.; Verbund- und Sandwichtragwerke; Springer-Verlag, 1986
- [68] Klein, B.; Leichtbaukonstruktionen; Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft; Braunschweig, Wiesbaden, 1989
- [69] Kolleger, J.; Algorithmus zur Bemessung von Flächentragwerkelementen unter Normalkraft- und Momentenbeanspruchung; Beton- und Stahlbetonbau 86; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften; Berlin, 1991
- [70] Krause, H.-J.; Zum Tragverhalten und zur Bemessung nachträglich verstärkter Stahlbetonstützen unter zentrischer Belastung; Verlag Shaker; Aachen, 1993 (Diss.)
- [71] Leonhardt, F., Mönnig, F.; Vorlesungen über Massivbau, Teil 1, Grundlagen zur Bemessung im Stahlbetonbau; Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo, 1984
- [72] Lewandowski, R.; Beziehungen zwischen Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit des Betons; Betonstein-Zeitung, Heft 9, 1971
- [73] Manns, W., Zeus, K.; Die nachträgliche Bestimmung der Betondruckfestigkeit; Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 8, 1977
- [74] Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; 59 Untersuchungsberichte über 110 Objekte mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton der Länder Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Sachsen und Thüringen im Vorfeld von konkreten Fassadensanierungsmaßnahmen; Leipzig, 1992 - 1994 (unveröffentlicht)
-
-

- [75] Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Untersuchungsbericht Nr. FB/III/96-352; Schallemissionsanalyse bei Bruchversuchen an Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton; Leipzig, März 1996 (unveröffentlicht)
- [76] Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Untersuchungsbericht Nr. U/III/94-062, Teilbericht 1; Last-Verformungs-Verhalten von großformatigen vorgefertigten Platten aus haufwerksporigem Leichtbeton; Leipzig, August 1995 (unveröffentlicht)
- [77] Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Untersuchungsbericht Nr. U/III/94-062, Teilbericht 2; Kennwerte von zylindrischen Probekörpern aus haufwerksporigem Leichtbeton unter zentrischer Zugbelastung; Leipzig, August 1995 (unveröffentlicht)
- [78] Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Untersuchungsbericht Nr. U/III/94-062, Teilbericht 3; Last-Verformungs-Verhalten von großformatigen vorgefertigten Platten aus haufwerksporigem Leichtbeton mit geschädigtem Verbund zwischen der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton und der äußeren Deckschicht aus gefügedichtem Schwerbeton; Leipzig, März 1996 (unveröffentlicht)
- [79] Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Untersuchungsbericht Nr. UU/V/96-490, Teilbericht 1; Festigkeitserhöhung von haufwerksporigem Leichtbeton durch Injektage mit StoCrete ZL 100; Leipzig, März 1996 (unveröffentlicht)
- [80] Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Untersuchungsbericht Nr. UU/V/96-490, Teilbericht 2; Last-Verformungs-Verhalten von mit StoCrete ZL 100 verfüllten großformatigen Platten aus haufwerksporigem Leichtbeton; Leipzig, März 1996 (unveröffentlicht)
- [81] Müller, G., Rehfeld, J.; FEM für Praktiker; Expert-Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1993
- [82] Müller, K. F.; Beitrag zur Berechnung der Tragfähigkeit wandbewehrter Stahlbetonsäulen - Eine kritische Literatursichtung, Darstellung des derzeitigen Wissensstandes und Auswertung bisher veröffentlichter Versuche aus neuer Sicht; Technische Universität München; München, 1995 (Diss.)

-
-
- [83] Neumann, M., Reuschel, M.; Baukostensenkung durch gesicherte Schadensbeurteilung an haufwerksporigen Leichtbetonelementen der industriell errichteten Wohnbauten der ehemaligen DDR; Abschlußbericht des vom Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau geförderten Forschungsvorhabens an der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Bauforschung für die Praxis, Band 35; Fraunhofer IRB Verlag; Stuttgart, 1997
- [84] Neumann, M.; Computerprogramm zum tragwerksplanerischen Nachweis von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton unter Berücksichtigung differenzierter Querschnittskennwerte mit den verschiedenen Nachweisverfahren; Leipzig, Februar 1995 - April 1996 (unveröffentlicht)
- [85] Neumann, M.; Parameterstudien zur Entwicklung eines empirischen Verfahrens auf der Grundlage des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte und des Berechnungsverfahrens der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung zur statischen Nachweisführung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten; Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig, Leipzig, Januar 1996 (unveröffentlicht)
- [86] Owen, D. B.; Handbook of Statistical Tables; Addison-Wesley Publishing Company, 1962
- [87] Peresson, A.; Entwicklung eines vereinfachten Berechnungsverfahrens zur statischen Nachweisführung von Platten aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Deckschichten; Diplomarbeit an der Technischen Hochschule Leipzig; Leipzig, Juli 1996
- [88] Petersen, C.; Statik und Stabilität der Baukonstruktionen; Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft; Braunschweig, Wiesbaden, 1982
- [89] Plank, A., Weber, D.; Ziegelsplitt-Schüttbeton - Untersuchung eines Schadensfalles; Bautechnik 5/1986; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften; Berlin, 1986
-
-

- [90] Reuschel, M., Neumann, M.; Ein Beitrag zur Ermittlung der Druckfestigkeit von zylindrischen Probekörpern aus Beton; Arbeit im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik; Leipzig, April 1995 (unveröffentlicht)
- [91] Reuschel, M., Neumann, M.; Ein modifiziertes Berechnungsverfahren zur Nachweisführung von Platten aus haufwerksporigem Leichtbeton; Arbeit im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik; Leipzig, September 1995 (unveröffentlicht)
- [92] Reuschel, M., Neumann, M.; Injektageverfahren als gesicherte Verfahren zur Sanierung der Block- und Plattenbauten der ehemaligen DDR; Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Leipzig, Oktober 1995 (unveröffentlicht)
- [93] Reuschel, M., Neumann, M.; Klassifizierung und Prüfung von haufwerksporigem Leichtbeton; Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Arbeit im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik; Leipzig, April 1995 (unveröffentlicht)
- [94] Reuschel, M., Neumann, M.; Statisch-konstruktive Betrachtungen zur realitätsbezogenen Nachweisführung von haufwerksporigen Leichtbetonelementen der ehemaligen DDR; Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Arbeit im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik; Leipzig, April 1995 (unveröffentlicht)
- [95] Reuschel, M., Neumann, M.; Zur Problematik des Verbundes von Schichten aus haufwerksporigem Leichtbeton und gefügedichtem Schwerbeton; Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig; Leipzig, Juni 1995 (unveröffentlicht)
- [96] Richtlinie Wandbauten in Montagebauweise, Tafel-, Streifen- und Blockkonstruktionen, Bauliche Durchbildung und Berechnung; Bauakademie der DDR
- [97] Richtlinien für die Blockbauweise und für die Ausführung von Fugen in Außenwänden der Block- und Plattenbauweise; KB 815.21; 1963
- [98] Rüscher, H., Sell, R., Rackwitz, R.; Statistische Analyse der Betonfestigkeit; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 206; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften; Berlin, 1969

-
-
- [99] Sauter, J., Puchinger, M.; FE-Seminar für den Konstrukteur; Institut für Maschinenkonstruktionslehre, Universität Karlsruhe; Karlsruhe, 1991
- [100] Schenck, G.; Untersuchung des Tragverhaltens von Außenwandplatten aus haufwerkporigem Leichtbeton unter statisch-konstruktiven Gesichtspunkten; Diplomarbeit an der Technischen Hochschule Leipzig; Leipzig, September 1996
- [101] Schlaeger, H.-U., Oberbeck, H.-J.; CAD MITRA - Bemessung und Nachweisführung nach ETV Beton; Bauplanung-Bautechnik, 43. Jg. Heft 2; 1989
- [102] Schwarz, S.; Erstellung von Nachweismöglichkeiten zur Untersuchung der Tragfähigkeit von Wohngebäuden des Typs WBS 70 / P2 mit Außenwänden aus Leichtbeton; Diplomarbeit an der Technischen Hochschule Leipzig, Februar 1995
- [103] Schwarze, K.; Numerische Methoden zur Berechnung von Sandwichelementen; Stahlbau 53, 1984
- [104] Stamm, K., Witte, H.; Sandwichkonstruktionen; Springer-Verlag Wien-New York, 1974
- [105] Stark, J., Mielke, I.; Injektionsschaummörtel in der Mauerwerkssanierung; Sonderdruck aus Bauwirtschaftliche Informationen, Sonderausgabe Bauwerkserhaltung; Heidelberger Zement Aktiengesellschaft, Oktober 1994
- [106] Tassios, T. P.; The mechanics of columns repair with reinforced concrete jacket; 7 E.C.E.E.; Athens 1982
- [107] TGL 0-1045; Bauwerke aus Stahlbeton, Projektierung und Ausführung; Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung; Berlin, 1963, 1973
- [108] TGL 0-1047; Bauwerke aus Beton, Projektierung und Ausführung; Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung; Berlin, 1963
-
-

- [109] TGL 0-1048; Betonprüfungen; Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung; Berlin, 1963

- [110] TGL 11422; Bauwerke und Fertigteile aus Beton und Stahlbeton, Berechnungsgrundlagen, Traglastverfahren; Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung; Berlin, 1961, 1964

- [111] TGL 21094; Prüfung des erhärteten Betons, Grundsätze, Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit; VVB Beton; Dresden, 1969

- [112] TGL 21096; Prüfung des Leichtbetons, Frischbeton, Erhärteter Beton; VEB Betonleichtbaukombinat; Dresden, 1973

- [113] TGL 33403; Betonbau, Festigkeits- und Formänderungskennwerte; Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung; Berlin, 1980

- [114] TGL 33405; Betonbau, Nachweis der Trag- und Nutzungsfähigkeit, Konstruktionen aus Beton und Stahlbeton; Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung; Berlin, 1980

- [115] TGL 33406; Betonbau, Hilfsmittel für die Nachweisführung, Konstruktionen aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Ministerium für Bauwesen; Berlin, 1983

- [116] TGL 33411/01/02/03; Beton und Leichtbeton, Klassifizierung, Technische Forderungen, Prüfung; Ministerium für Bauwesen; Berlin, 1979

- [117] TGL 33433; Prüfung des erhärteten Betons, Bestimmung der Druckfestigkeit; VEB Betonleichtbaukombinat; Dresden, 1979

- [118] Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung); BGBL I, 1994

- [119] Voellmy, A.; Festigkeitskontrolle von Betonbelägen; Betonstraßen-Jahrbuch 1957/58 des Fachverbandes Zement e.V. Köln, Band 3

-
-
- [120] Vorschrift Nr. 50/76 der Staatlichen Bauaufsicht; Bauten in Wandkonstruktion in Montagebauweise; Schriftenreihe der Bauforschung, Heft 34
- [121] Wesche, K., Mängel, S.; Beitrag zur Beurteilung der Festigkeitsverteilung des Betons in Bauwerken; Beton 3/1969
- [122] Wiedemann, J.; Leichtbau; Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo, 1986

Zusammenfassung

In vorliegender Arbeit werden Verfahren zur baustofflichen und statisch-konstruktiven Beurteilung von bestehenden Gebäuden mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten entwickelt und beurteilt.

Zunächst werden die an 110 Objekten auf der Grundlage von entwickelten Prüfverfahren diagnostizierten baustofflichen Parameter dieser Außenwandelemente dem Vorschriftenwerk der DIN zugeordnet und Spektren bzw. Korrelationen ausgewiesen.

Im Ergebnis der baustofflichen Beurteilung werden Berechnungsverfahren, welche das tatsächliche Tragverhalten dieser mehrschichtigen Außenwandelemente erfassen, entwickelt und angewendet. Auf der Grundlage theoretischer und experimenteller Untersuchungen werden diese Berechnungsverfahren beurteilt und den der ursprünglichen Planung der Gebäude zugrundeliegenden genormten Berechnungsverfahren für einschichtige Querschnitte gegenübergestellt.

Desweiteren werden standsicherheitserhöhende Maßnahmen für diese Gebäude diskutiert und der Einfluß von Zementleiminjektagen auf die baustofflichen und statisch-konstruktiven Parameter beschrieben. Darüber hinaus werden die baustofflichen Voraussetzungen für eine Anwendbarkeit von Zementleiminjektagen im haufwerksporigen Leichtbeton ausgewiesen.

Die Ergebnisse der Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Prüf- und Berechnungsverfahren auf vorhandene Gebäude im Rahmen von Fassadensanierungsmaßnahmen werden dargestellt und beurteilt.

Summary

In the present treatise testing and calculating procedures for the assessment of construction material parameters and for the static-structural assessment of existing buildings with outer wall elements of no-fines lightweight concrete with close-textured concrete facing are developed and assessed.

First of all, construction material parameters of these outer wall elements diagnosed at 110 buildings on the basis of developed testing procedures are categorised into the DIN regulations and spectrums or correlations are demonstrated.

Via the results of the assessment of the construction material parameters calculating methods, with which the actual load bearing performance of multi-layered outer wall elements can be determined, are developed and applied. On the basis of theoretical and experimental investigations these calculating methods are assessed and compared to the standardised procedures for single-layered cross-sections, which used to be the basis for the original planning of the buildings.

Furthermore, measures for increasing the stability of these buildings are discussed and the influence of cement paste injections on the construction material parameters and the static-structural parameters are described. Moreover, the construction material requirements of the applicability to cement paste injection in no-fines concrete are outlined.

The results of the application of the testing and calculating procedures developed in this treatise to existing buildings in the framework of facade reconstruction measures are represented and assessed.

Anhang Erläuterungen zu den im Ablaufplan zur tragwerksplanerischen Beurteilung von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton dargestellten Nachweis- und Prüfverfahren

Nachfolgend sind bezugnehmend auf den in Abschnitt 7.2.2 dargestellten *Ablaufplan zur tragwerksplanerischen Beurteilung von Gebäuden mit Außenwänden aus haufwerksporigem Leichtbeton* Erläuterungen zu den anzuwendenden Nachweis- und Prüfverfahren angegeben.

Alle Gebäude, deren Außenwände aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten im Zuge von Fassadensanierungsmaßnahmen entscheidende Veränderungen hinsichtlich der in sie eingetragenen äußeren Beanspruchungen (z.B. durch Zusatzlasten infolge von vorgehängten hinterlüfteten Fassadenkonstruktionen oder Wärmedämmverbundsystemen) erfahren, sind in bezug auf ihre Standsicherheit tragwerksplanerisch zu beurteilen.

Bei Wohnbauten mit tragenden und nichttragenden Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten, welche den in Tabelle A.1 dargestellten Parametern entsprechen, kann ohne weitere Nachweisführung von einer ausreichenden Standsicherheit des Gebäudes ausgegangen werden. Die Notwendigkeit der Beurteilung der Standsicherheit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht nach 1 wird davon jedoch nicht berührt.

<i>Charakteristischer Parameter</i>	<i>Wert</i>
Maximale Geschoßanzahl [-]	5
Maximales Gebäuderaster [m]	3.60
Mindestbetonfestigkeitsklasse des haufwerksporigen Leichtbetons nach DIN 4232 [23]	LB 2
Mindeststärke der tragfähigen Schichten der Außenwand [mm]	240
Maximale Zusatzlast infolge Fassadensanierungsmaßnahmen [kN/m ²]	0.35

Tabelle A.1 : Parameter, bei deren Vorliegen von einer ausreichenden Standsicherheit des Gebäudes ohne weitere Nachweisführung ausgegangen werden kann

Bei Wohnbauten, deren Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten ausschließlich nichttragende Funktionen besitzen, kann unabhängig von der Geschoßanzahl und dem Gebäuderaster ohne weitere Nachweisführung von einer ausreichenden Standsicherheit dieser nichttragenden Außenwände ausgegangen werden, wenn die verbleibenden Parameter nach Tabelle A.1 erfüllt sind. Unabhängig davon muß auch hier eine Beurteilung der Standsicherheit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht nach 1 erfolgen.

**Bohrkernentnahme und Druckfestigkeitsprüfung des haufwerksporigen Leichtbetons.
Bestimmung der Nennfestigkeit und der Serienfestigkeit nach DIN 4232**

2

Aus dem betrachteten Gebäude ist zunächst die in Tabelle A.2 enthaltene Anzahl von prüffähigen Kernen aus der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton zu entnehmen. Als prüffähiger Kern gilt der Teil eines Bohrkernes, dessen Höhe dem Durchmesser entspricht und welcher als repräsentativ für die Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton des betreffenden Gebäudes angesehen werden kann.

<i>Art der Außenwand</i>	<i>Anzahl der zu entnehmenden prüffähigen Kerne pro Plattentyp [-]</i>	<i>Mindestanzahl der zu entnehmenden prüffähigen Kerne pro Gebäude [-]</i>	<i>Bohrkerndurchmesser [mm]</i>
nichttragend	1	3	100
tragend	3	6	100

Tabelle A.2 : *Anzahl und Durchmesser der aus der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton zu entnehmenden prüffähigen Kerne in Anlehnung an [60]*

Mit den erhaltenen prüffähigen Kernen ist eine zerstörende Druckfestigkeitsprüfung nach DIN 1048 [20] bzw. DIN EN 1354 [26] durchzuführen.

Aus den erhaltenen Druckfestigkeiten wird, getrennt nach tragenden und nichttragenden Außenwänden, der Kleinstwert und der Mittelwert ermittelt und es erfolgt eine Einordnung des haufwerksporigen Leichtbetons in eine Betonfestigkeitsklasse nach Tabelle A.3.

<i>Betonfestigkeitsklasse nach DIN 4232 [23]*</i>	<i>Erforderliche Nennfestigkeit (entspricht dem Kleinstwert) [N/mm²]</i>	<i>Erforderliche Serienfestigkeit (entspricht dem Mittelwert) [N/mm²]</i>	<i>Erforderlicher 5%-Fraktilwert bei statistischer Auswertung [N/mm²]</i>
LB 2	2	4	2
LB 5	5	8	5
LB 8	8	11	8

* Werden am Bauwerk Zwischengrößen der Druckfestigkeit diagnostiziert, so dürfen Festigkeitskennwerte und Betonfestigkeitsklassen ausgewiesen werden, welche durch lineare Interpolation zwischen den in dieser Tabelle angegebenen Werten erhalten werden.

Tabelle A.3 : *Kennwerte der Betonfestigkeitsklassen des haufwerksporigen Leichtbetons nach DIN 4232 [23]*

**Bestimmung des 5%-Fraktilwertes der Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons unter
Annahme einer Normalverteilung bzw. einer logarithmischen Normalverteilung**

3

Erforderlich ist dazu eine weitere Entnahme von prüffähigen Kernen, so daß mindestens 10 Druckfestigkeitswerte vorliegen. Auf der Grundlage dieser Werte erfolgt eine statistische Auswertung der erhaltenen Druckfestigkeiten des haufwerksporigen Leichtbetons.

Nach [61] wird der Variationskoeffizient und der 5%-Fraktilwert unter Annahme folgender Verteilungsfunktionen gebildet :

- Variationskoeffizient ≤ 20 Normalverteilung
- Variationskoeffizient > 20 logarithmische Normalverteilung

Nach Abschnitt 3.1.3.4.1 dürfen bei der Ermittlung des 5%-Fraktilwertes die sogenannten Überfestigkeiten, welche oberhalb eines bestimmten Grenzwertes liegen, unberücksichtigt bleiben.

Diesen Grenzwert erhält man, beginnend mit der höchsten Einzelfestigkeit, durch schrittweises Aussortieren der Festigkeitswerte bis zum Erreichen des Maximalwertes der 5%-Fraktilfestigkeit.

Ein Aussortieren von Festigkeitswerten, beginnend mit der kleinsten Einzelfestigkeit, ist jedoch auf keinen Fall zulässig.

Auf der Grundlage dieses 5%-Fraktilwertes kann der haufwerksporige Leichtbeton in eine Betonfestigkeitsklasse nach Tabelle A.3 eingeordnet werden.

Bestimmung des 5%-Fraktilwertes der Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons unter Annahme einer Mischverteilung aus Normalverteilung und logarithmischer Normalverteilung

4

Die erhaltenen Druckfestigkeiten des haufwerksporigen Leichtbetons werden auf der Grundlage eines weiteren Verfahrens statistisch ausgewertet. In diesem Verfahren wird der 5%-Fraktilwert unter Annahme einer Mischverteilung aus Normalverteilung und logarithmischer Normalverteilung gebildet [61]. Auch bei dieser Art der statistischen Auswertung dürfen die Überfestigkeiten nach Abschnitt 3.1.3.4.1 unberücksichtigt bleiben.

Auf der Grundlage dieses 5%-Fraktilwertes kann der haufwerksporige Leichtbeton in eine Betonfestigkeitsklasse nach Tabelle A.3 eingeordnet werden.

Zementleiminjektage

5

Da die Standsicherheit des Gebäudes aufgrund der vorhandenen Materialparameter rechnerisch nicht für alle Geschosse nachweisbar ist, muß eine Erhöhung der Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons erfolgen. Dazu kann der vorhandene Haufwerksporenraum mit einem Zementleim hoher Eigenfestigkeit verfüllt werden (siehe Kapitel 5).

Erforderlich ist im Vorfeld der Zementleiminjektage die Bestimmung der erforderlichen Zielfestigkeit des Verbundmaterials aus haufwerksporigem Leichtbeton und Zementleim für die Geschosse, für welche das erforderliche Standsicherheitsniveau rechnerisch nicht nachweisbar ist.

Die Bestimmung der erforderlichen Zielfestigkeit und der Anzahl der zu verfüllenden Geschosse erfolgt dabei zweckmäßigerweise mit den Verfahren [9](#) oder [1](#) [1](#) .

Generell auszuschließen ist vor der Anwendung von Zementleimen, daß durch die Injektage Schäden an haufwerksporigen Leichtbetonen infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) hervorgerufen werden.

Bis zum Vorliegen der Untersuchungsergebnisse aus [37] ist die Anwendung von Zementleimen für eine Festigkeitserhöhung von Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton nur möglich, wenn im Vorfeld durch eine chemische Analyse des vorhandenen haufwerksporigen Leichtbetons Spätfolgen durch AKR ausgeschlossen werden können.

Bohrkernentnahme und Druckfestigkeitsprüfung des verfüllten haufwerksporigen Leichtbetons.
Bestimmung der Nennfestigkeit und der Serienfestigkeit nach DIN 4232

6

Die Bohrkernentnahme und die Druckfestigkeitsprüfung des Verbundmaterials aus haufwerksporigem Leichtbeton und Zementleim erfolgt frühestens nach 28 Tagen nach Abschluß der Zementleiminjektage in Anlehnung an [2](#) .

Bestimmung des 5%-Fraktilwertes der Festigkeit des verfüllten haufwerksporigen Leichtbetons unter Annahme einer Normalverteilung bzw. einer logarithmischen Normalverteilung

7

Auswertung der Druckfestigkeiten des Verbundmaterials aus haufwerksporigem Leichtbeton und Zementleim und Einordnung in eine Betonfestigkeitsklasse nach DIN 4232 [23] in Anlehnung an [3](#) .

Bestimmung des 5%-Fraktilwertes der Festigkeit des verfüllten haufwerksporigen Leichtbetons unter Annahme einer Mischverteilung aus Normalverteilung und log. Normalverteilung

8

Auswertung der Druckfestigkeiten des Verbundmaterials aus haufwerksporigem Leichtbeton und Zementleim und Einordnung in eine Betonfestigkeitsklasse nach DIN 4232 [23] in Anlehnung an [4](#) .

Nachweis eines einschichtigen Querschnitts aus haufwerksporigem Leichtbeton über die gesamte Querschnittsbreite auf der Grundlage des Vorschriftenwerkes der DIN (*Planungsgrundlage*).
Anwendung des Konzentes der globalen Sicherheit. Nachweis : $\gamma \geq 3.0$

9

Der gesamte tragfähige Querschnitt wird mit den Materialparametern der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton in Ansatz gebracht. Diese Art der Nachweisführung entspricht prinzipiell der Nachweisführung, welche bei der ursprünglichen Planung der Gebäude mit Außenwandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit gefügedichten Betondeckschichten angewendet wurde (siehe Abschnitt 4.1).

Der Nachweis erfolgt auf der Grundlage des in Bild A.1 dargestellten idealisierten statischen Systems für einen Schnitt in Plattenmitte nach folgender Beziehung :

$$\gamma \geq 3.0 \quad (A.1)$$

mit

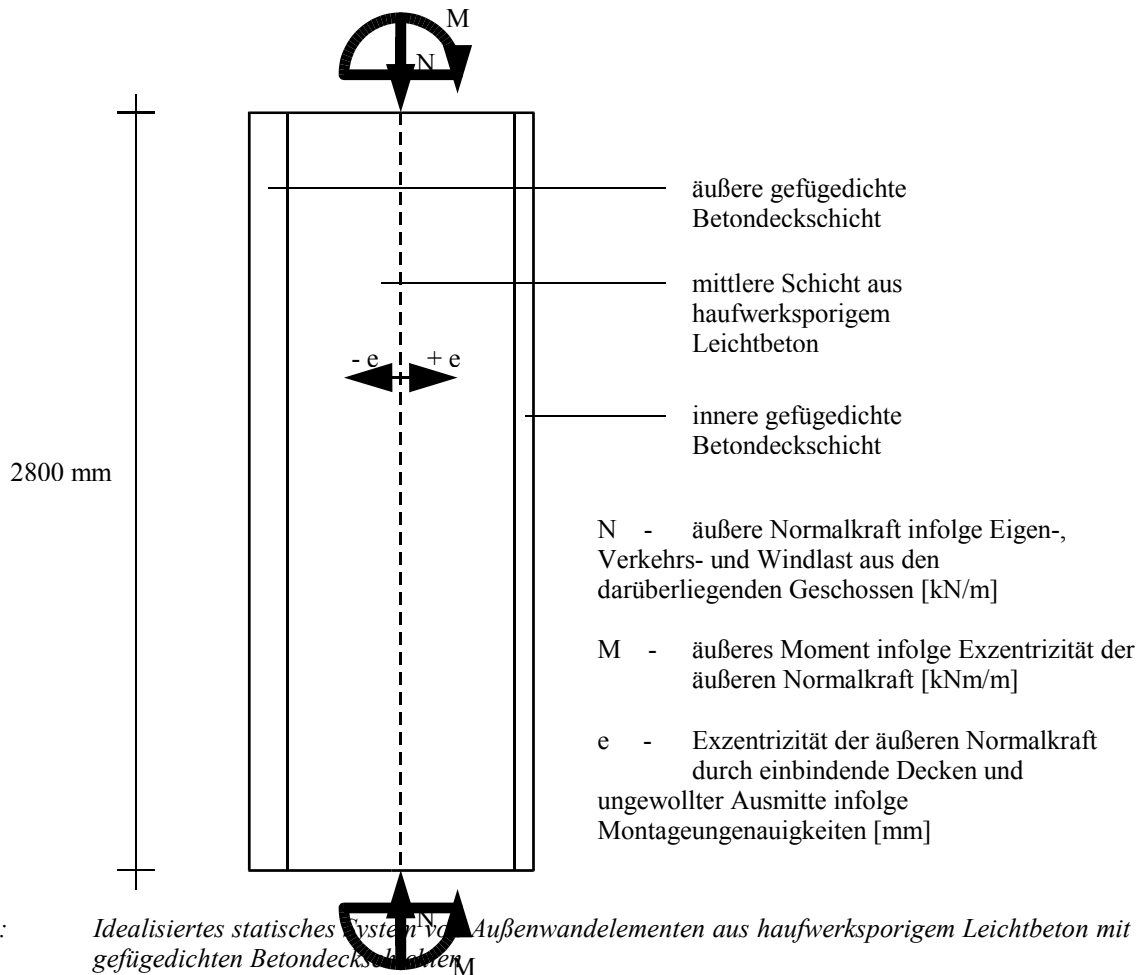
γ	=	$\beta_{R,HLB} / \sigma_{vorh}$	[-]
$\beta_{R,HLB}$	=	$f_{HLB} * \beta_{WN,HLB}$	
$\beta_{WN,HLB}$	-	Nennfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons nach Tabelle A.3	[N/mm ²]
f_{HLB}	-	Abminderungsfaktor nach Tabelle A.4 zur Erfassung der verminderten Druckfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons bei hoher und dauernd einwirkender Spannung und zum Ausschließen eines Stabilitätsproblems [23]	[-]
σ_{vorh}	=	$N/A + M/W$	[N/mm ²]
N	-	äußere einwirkende Normalkraft aus Eigen-, kehrs- und Windlast	Ver- [N/m]
A	-	tragfähige Querschnittsfläche	[mm ² /m]
M	=	$N * e$	[Nmm/m]
e	-	Exzentrizität der äußeren einwirkenden Normalkraft nach Bild A.1, für die ursprüngliche Planung wurde folgender Wert angesetzt : $e = + 30$	[mm]
W	-	Widerstandsmoment des Querschnitts	[mm ³ /m]

Abminderungsfaktor f_{HLB}	h_k / d			
	≤ 5	10	15	20
Betonfestigkeitsklasse nach DIN 4232 [23]				
LB 2	0.75	0.68	0.53	0.30
LB 5	0.72	0.60	0.48	0.30
LB 8	0.71	0.62	0.47	0.30

Tabelle A.4 : Abminderungsfaktoren zur Bestimmung der Rechenfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons nach DIN 4232 [23]

mit

h_k	-	Knicklänge der betrachteten Konstruktion, für Außenwandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit einer Geschoßhöhe von 2.80 m gilt : $h_k = 2800$ [88]	[mm]
d	-	Stärke der Schicht, die mit den Materialparametern des haufwerksporigen Leichtbetons angesetzt wird	[mm]



Bestimmung der Festigkeiten der gefügedichten Betondeckschichten mit dem
Verfahren zur Festigkeitsermittlung dünn-schichtiger Betonbauteile

1

Um die Festigkeiten der gefügedichten Betondeckschichten zu ermitteln, ist die in Tabelle A.5 angegebene Anzahl von prüffähigen Kernen aus den gefügedichten Betondeckschichten zu entnehmen. Als prüffähig gelten Kerne, deren Höhen in einem Spektrum von 20 ... 50 mm liegen und welche als repräsentativ für die jeweilige Deckschicht angesehen werden können.

Art der Außenwand	Anzahl der zu entnehmenden prüffähigen Kerne pro Plattentyp und Deckschicht [-]	Mindestanzahl der zu entnehmenden prüffähigen Kerne pro Deckschicht und Gebäude [-]	Bohrkerndurchmesser [mm]
nichttragend	1	3	50

tragend	3	6	50
---------	---	---	----

Tabelle A.5 : Anzahl und Durchmesser der aus den gefügedichten Betondeckschichten zu entnehmenden Bohrkern in Anlehnung an [60]

Mit diesen prüffähigen Kernen ist eine zerstörende Druckfestigkeitsprüfung nach DIN 1048 [20] durchzuführen. Die erhaltenen Druckfestigkeiten sind daraufhin mit den in Tabelle A.6 angegebenen Abminderungsfaktoren zu multiplizieren (*Verfahren zur Festigkeitsermittlung dünn-schichtiger Betonbauteile* nach Abschnitt 3.2.3.1).

Prüfkörperhöhe [mm]	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40
Abminderungsfaktor	0.900	0.886	0.872	0.858	0.844	0.830	0.816	0.802	0.788	0.774	0.760
Prüfkörperhöhe [mm]	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30
Abminderungsfaktor	0.760	0.746	0.732	0.718	0.704	0.690	0.676	0.662	0.648	0.634	0.620
Prüfkörperhöhe [mm]	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20
Abminderungsfaktor	0.620	0.600	0.580	0.560	0.540	0.520	0.500	0.480	0.460	0.440	0.420

Tabelle A.6 : Abminderungsfaktoren für zylindrische Probekörper aus Beton eines Durchmessers von 50 mm und einer Höhe von 20 ... 50 mm zur Einordnung in eine Betonfestigkeitsklasse nach DIN 1045 [19] nach dem Verfahren zur Festigkeitsermittlung dünn-schichtiger Betonbauteile

Aus den somit berechneten Druckfestigkeiten wird, getrennt nach tragenden und nichttragenden Außenwänden und der jeweiligen Deckschicht, der Kleinstwert und der Mittelwert ermittelt und es erfolgt eine Einordnung des Betons der gefügedichten Betondeckschichten in eine Betonfestigkeitsklasse nach Tabelle A.7.

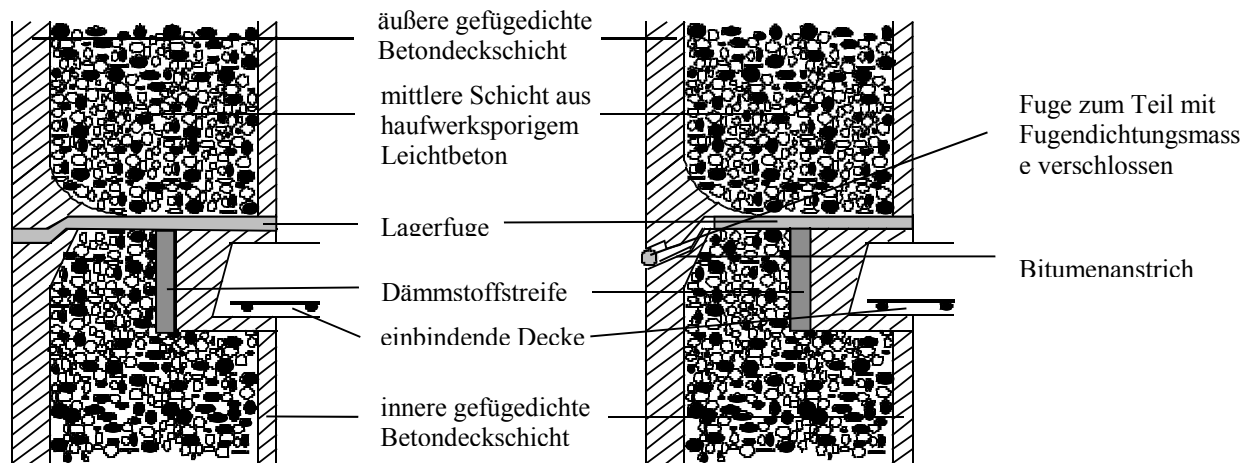
Betonfestigkeits- klasse nach DIN 1045 [19]*	Erforderliche Nennfestigkeit (entspricht dem Kleinstwert) [N/mm ²]	Erforderliche Serienfestigkeit (entspricht dem Mittelwert) [N/mm ²]
B 5	5	8
B 10	10	15
B 15	15	20
B 25	25	30
B 35	35	40
B 45	45	50
B 55	55	60

* Werden am Bauwerk Zwischengrößen der Druckfestigkeit diagnostiziert, so dürfen Festigkeitskennwerte und Betonfestigkeitsklassen ausgewiesen werden, welche durch lineare Interpolation zwischen den in dieser Tabelle angegebenen Werten erhalten werden.

Tabelle A.7 : Kennwerte der Betonfestigkeitsklassen der gefügedichten Betondeckschichten nach DIN 1045 [19]

Ermittlung der Ausbildung der Horizontalfuge	1
--	---

Die Ausbildung der Horizontalfuge ist bauwerksdiagnostisch auf der Grundlage des Bildes A.2 zu ermitteln.



a) System mit geschlossener Horizontalfuge

b) System mit offener Horizontalfuge

Bild A.2 : Schematische Darstellung der offenen und geschlossenen Horizontalfuge

Nachweis eines mehrschichtigen Querschnitts mit dem
Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte

1

Das *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte* nach Abschnitt 4.2.4 ist 1 anzuwenden.

Nachweis eines mehrschichtigen Querschnitts mit dem
Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung

1

Das *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung* nach Abschnitt 4.3.4 ist in 1 anzuwenden.

Die Beanspruchungen werden den einzelnen Schichten des Querschnitts in Abhängigkeit ihrer Spannungs-Verformungs-Beziehung zugewiesen. Annahme : Ebenbleiben der Querschnitte.
Anwendung des Konzertes der Teilsicherheitsfaktoren. Nachweis : $\xi \geq 1.0$

1

Es wird von der Gültigkeit der Hypothese von Bernoulli vom Ebenbleiben der Querschnitte unter Beanspruchung ausgegangen. Die äußeren Beanspruchungen werden den tragfähigen Schichten des Querschnitts in Abhängigkeit ihrer Spannungs-Verformungs-Beziehung zugewiesen. Der Nachweis erfolgt auf der Grundlage des in Bild A.1 dargestellten idealisierten statischen Systems für einen Schnitt in Plattenmitte nach folgender Beziehung :

$$\xi \geq 1.0 \quad (\text{A.2})$$

Dazu wird folgender Rechengang verwendet (siehe Abschnitt 4.2.4 und Abschnitt 4.3.4) :

1. Rechenschritt : *Aufteilung des Querschnitts in Flächenelemente und Vorgabe einer Verformungsebene*

Der Querschnitt wird zunächst in Flächenelemente nach Bild A.3 aufgeteilt und eine Verformungsebene des Querschnitts wird angenommen.

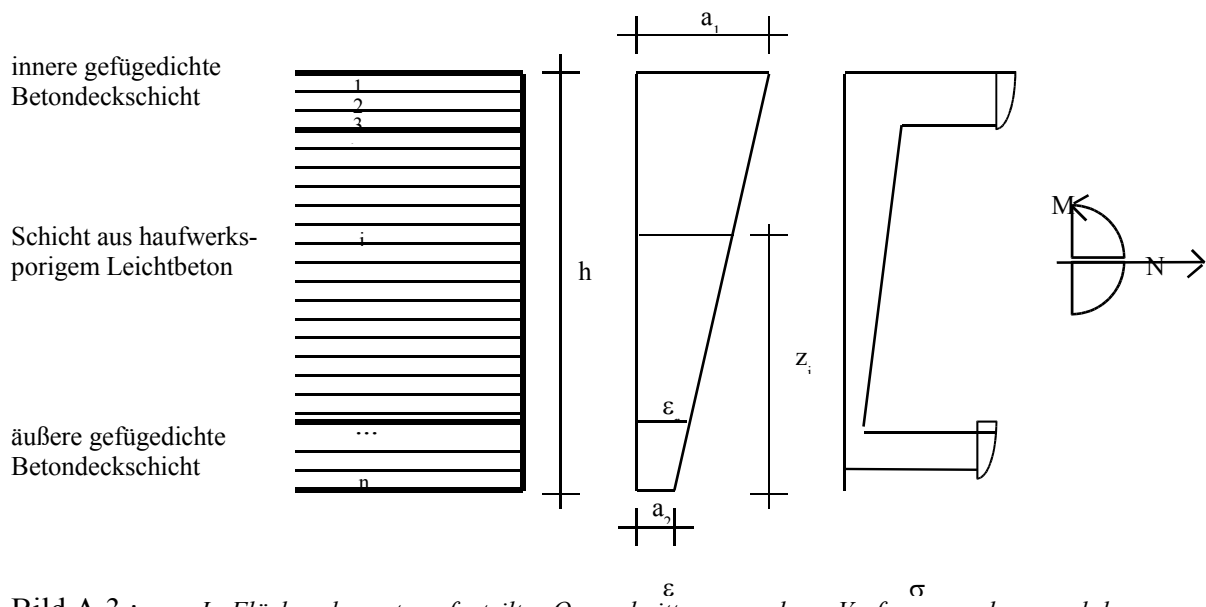


Bild A.3 : *In Flächenelemente aufgeteilter Querschnitt, vorgegebene Verformungsebene und daraus resultierende Spannungen*

Die Verformungsebene kann durch die Beziehung

$$\varepsilon_i = (a_1 - a_2) * z_i / h + a_2 \quad (A.3)$$

mit

ε_i	-	Verformung im Schwerpunkt des Flächenelements	[‰]
a_1	-	Verformung am inneren Rand des Querschnitts	[‰]
a_2	-	Verformung am äußeren Rand des Querschnitts	[‰]
h	-	Querschnittsstärke	[mm]
z_i	-	geometrischer Ort des Flächenelements	[mm]

beschrieben werden. Dabei werden die Koeffizienten a_1 und a_2 zunächst geschätzt.

2. Rechenschritt : *Ermittlung der Spannungen in jedem Flächenelement*

Infolge der angenommenen Verformungsebene ist für jedes Flächenelement die Verformung bekannt. Aus den für die Materialien der einzelnen Schichten spezifischen Spannungs-Verformungs-Beziehungen können die Spannungen in den einzelnen Flächenelementen ermittelt wer-

den. Für das Berechnungsverfahren sind die in Tabelle A.8 angegebenen Spannungs-Verformungs-Beziehungen als gültig anzunehmen.

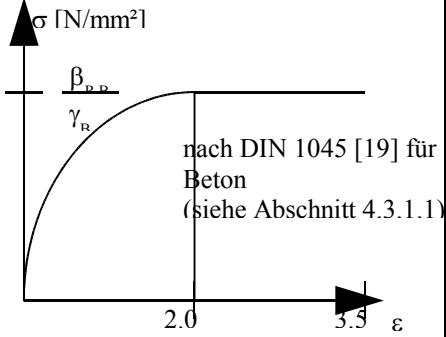
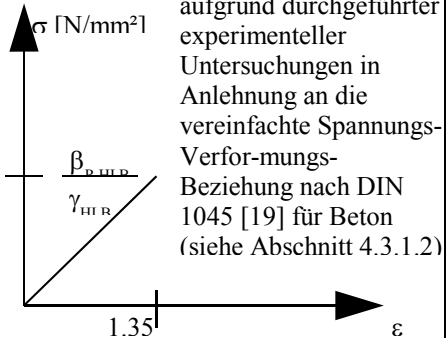
<i>betrachtete Schicht</i>	<i>analytische Beziehung</i>	<i>grafische Darstellung</i>
innere gefügedichte Betondeckschicht äußere gefügedichte Betondeckschicht mit ε - Verformung des Betons [‰] σ_B - rechnerische Spannung für die im Beton herrschende Verformung [N/mm ²] $\beta_{R,B}$ - Rechenwert der Druckfestigkeit des Betons nach Gleichung (A.4) [N/mm ²] γ_B - Teilsicherheitsfaktor für Beton, nach Abschnitt 4.5 gilt : $\gamma_B = 1.5$ [-]	$\varepsilon \geq 0 \text{ ‰} \quad : \sigma_B = 0$ $0 \text{ ‰} \geq \varepsilon \geq -2 \text{ ‰} \quad : \sigma_B = \beta_{R,B} * (\varepsilon - \varepsilon ^2 / 4) / \gamma_B$ $-2 \text{ ‰} \geq \varepsilon \geq -3.5 \text{ ‰} \quad : \sigma_B = \beta_{R,B} / \gamma_B$ $\varepsilon \leq -3.5 \text{ ‰} \quad : \sigma_B = 0$	 <p>nach DIN 1045 [19] für Beton (siehe Abschnitt 4.3.1.1)</p>
Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton mit ε - Verformung des haufwerksporigen Leichtbetons [‰] σ_{HLB} - rechnerische Spannung für die im haufwerksporigen Leichtbeton herrschende Verformung [N/mm ²] $\beta_{R,HLB}$ - Rechenwert der Druckfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons nach Gleichung (A.5) [N/mm ²] γ_{HLB} - Teilsicherheitsfaktor für haufwerksporigen Leichtbeton, nach Abschnitt 4.5 gilt : $\gamma_{HLB} = 2.0$ [-]	$\varepsilon \geq 0 \text{ ‰} \quad : \sigma_{HLB} = 0$ $0 \text{ ‰} \geq \varepsilon \geq -1.35 \text{ ‰} \quad : \sigma_{HLB} = \beta_{R,HLB} / 1.35 * \varepsilon / \gamma_{HLB}$ $\varepsilon \leq -1.35 \text{ ‰} \quad : \sigma_{HLB} = 0$	 <p>aufgrund durchgeführter experimenteller Untersuchungen in Anlehnung an die vereinfachte Spannungs-Verformungs-Beziehung nach DIN 1045 [19] für Beton (siehe Abschnitt 4.3.1.2)</p>

Tabelle A.8 : Im Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitt und dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitt mit Verformungsbeschränkung anzuwendende Spannungs-Verformungs-Beziehungen

Der Rechenwert der Druckfestigkeit des Betons der gefügedichten Betondeckschichten ermittelt sich nach folgender Beziehung :

$$\beta_{R,B} = f_B * \beta_{WN,B} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{A.4})$$

mit

$$\beta_{WN,B} \quad - \quad \text{Nennfestigkeit des Betons nach Tabelle A.7, ermittelt in } \boxed{1} \quad [\text{N/mm}^2]$$

f_B - Abminderungsfaktor nach Tabelle A.9 zur Erfassung der verminderten Druckfestigkeit des Betons bei hoher und dauernd einwirkender Spannung [19] [-]

Betonfestigkeitsklasse nach DIN 1045 [19]	B 5	B 10	B 15	B 25	B 35	B 45	B 55
Abminderungsfaktor f_b	0.70	0.70	0.70	0.70	0.65	0.60	0.55

Tabelle A.9 : Abminderungsfaktoren zur Bestimmung der Rechenfestigkeit des Betons nach DIN 1045 [19]

Der Rechenwert der Druckfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons ermittelt sich nach folgender Beziehung :

$$\beta_{R,HLB} = f_{HLB} * \beta_{WN,HLB} \quad [N/mm^2] \quad (A.5)$$

mit

$\beta_{WN,HLB}$ - Nennfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons nach Tabelle A.3, ermittelt in **2**, **3** oder **4** [N/mm²]
 f_{HLB} - Abminderungsfaktor nach Tabelle A.4 zur Erfassung der verminderten Druckfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons bei hoher und dauernd einwirkender Spannung und zum Ausschließen eines Stabilitätsproblems [23] [-]

Ist das *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung* anzuwenden, ist folgende Bedingung einzuhalten :

$$\varepsilon \leq \varepsilon_r \quad (A.6)$$

mit

ε - Verformung in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton [%o]
 ε_r - repräsentative Verformung, entspricht dem oberen Grenzwert der in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton aktivierbaren Verformung, nach Abschnitt 4.3.4.1 gilt :
 $\Delta\sigma_r \leq (0.894 * \beta_{R,B} - \beta_{R,HLB}) : \varepsilon_r = - a + \sqrt{(a^2 - b)}$ [%o]
 $\Delta\sigma_r > (0.894 * \beta_{R,B} - \beta_{R,HLB}) : \varepsilon_r = - 1.35$ [%o]
 mit

a	=	$2 - (2 * \beta_{R,HLB}) / (1.35 * \beta_{R,B})$	[‰]
b	=	$4 * \Delta\sigma_r / \beta_{R,B}$	[‰]
$\Delta\sigma_r$	-	repräsentative Festigkeitsdifferenz, entspricht dem oberen Grenzwert der in der Grenzfläche zwischen der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton aktivierbaren Festigkeitsdifferenz, nach Abschnitt 4.3.4.3 gilt : $\Delta\sigma_r = 5.00$	[N/mm ²]
$\beta_{R,B}$	-	Rechenfestigkeit des Betons der äußeren gefügedichten Betondeckschicht nach Gleichung (A.4)	[N/mm ²]
$\beta_{R,HLB}$	-	Rechenfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons nach Gleichung (A.5)	[N/mm ²]

Ist die Gleichung (A.6) nicht erfüllt, so sind im Berechnungsverfahren die Spannungen in allen Flächenelementen zu Null zu setzen.

Ist das *Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte* anzuwenden, ist eine Überprüfung der Erfüllung der Gleichung (A.6) nicht erforderlich.

Die auf diesem Wege ermittelten Spannungen werden nun über den Querschnitt aufsummiert und ergeben den Vektor der Schnittreaktionen k .

3. Rechenschritt : Gleichgewichtskontrolle

Da die Verformungsebene im 1. Rechenschritt angenommen wurde, wird der Vektor der Schnittreaktionen k zunächst nicht mit dem Vektor der angreifenden Beanspruchungen s im Gleichgewicht stehen :

$$s \neq k \quad (A.7)$$

mit

$$s = \begin{pmatrix} N \\ M \end{pmatrix}$$

$$k = \begin{pmatrix} N_0 \\ M_0 \end{pmatrix}$$

N_0	-	im Querschnitt erzeugte Normalkraft	[N/m]
M_0	-	im Querschnitt erzeugtes Moment	[Nmm/m]
N	-	mit den Teilsicherheitsfaktoren γ_G bzw. γ_Q nach Tabel-	

- le A.10 und dem Faktor ξ behaftete angreifende Normalkraft aus Eigen-, Verkehrs- und Windlast [N/m]
- M - angreifendes Moment, es gilt : $M = N * e$ [Nmm/m]
- e - Exzentrizität der äußeren einwirkenden Normalkraft nach Bild A.1. Da die Annahme einer maximalen Exzentrizität nicht zwangsläufig zum maßgebenden Standsicherheitsniveau führt, kann nach Abschnitt 4.3.5 ohne bauwerksdiagnostische Beurteilung von folgenden Richtwerten ausgegangen werden :
- offene Horizontalfuge : - 10
- geschlossene Horizontalfuge : + 30 [mm]

Ständige Einwirkung (Eigenlast)	Veränderliche Einwirkung (Verkehrslast, Windlast)
$\gamma_G [-]$	$\gamma_Q [-]$
1.35	$\psi * 1.50^*$

* Liegen mehrere veränderliche Einwirkungen vor, so ist der ungünstigere Wert aus der größten veränderlichen Einwirkung mit $\psi = 1.0$ und der

Summe aller veränderlichen Einwirkungen mit $\psi = 0.9$ maßgebend (Anwendung der vereinfachten Kombinationsregel nach [30]).

Tabelle A.10 : Im Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte und dem Berechnungsverfahren der ebenen Querschnitte mit Verformungsbeschränkung anzuwendende Teilsicherheitsfaktoren

4. Rechenschritt : Korrektur der Verformungsebene

Die Rechenschritte 1 bis 3 ergaben die Schnittkräfte N_0 und M_0 . Diese Schritte werden zweimal für geänderte Koeffizienten a_1 und a_2 wiederholt. Man erhält

- mit $a_1 + \delta$ und a_2 die Schnittreaktionen N_1 und M_1 ,
- mit a_1 und $a_2 + \delta$ die Schnittreaktionen N_2 und M_2 .

Für den konstanten Parameter δ werden Werte zwischen 10^{-2}‰ und 10^{-4}‰ empfohlen. Die somit korrigierten Schnittreaktionen werden zur Matrix B zusammengefaßt :

$$B = \begin{pmatrix} N_1 & N_2 \\ M_1 & M_2 \end{pmatrix} \quad (\text{A.8})$$

Die Matrix C ermittelt sich wie folgt :

$$C = \begin{pmatrix} N_1 - N_0 & N_2 - N_0 \\ M_1 - M_0 & M_2 - M_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} \quad (\text{A.9})$$

Ist G der Wert der Matrix C, so ermitteln sich die verbesserten Koeffizienten a_1 und a_2 zu

$$a_{1,neu} = a_{1,alt} + \delta / G * (C_{22} * (N - N_0) - C_{12} * (M - M_0)) \quad (A.10)$$

$$a_{2,neu} = a_{2,alt} + \delta / G * (-C_{21} * (N - N_0) + C_{11} * (M - M_0)) \quad (A.11)$$

Diese angegebenen Rechenschritte werden iterativ solange wiederholt, bis der Vektor der Schnittreaktionen mit dem Vektor der angreifenden Beanspruchungen im Gleichgewicht steht.

Wird nun für den Faktor ξ zunächst ein sehr großer Wert angenommen, wird der Querschnitt nicht in der Lage sein, die vorgegebene äußere Beanspruchung aufzunehmen. Ein Gleichgewicht zwischen äußerer und innerer Beanspruchung ist dann nicht möglich. Durch schrittweise Reduzierung von ξ kann jedoch der Wert ermittelt werden, welcher zum Gleichgewicht der äußeren und inneren Beanspruchungen führt.

Damit ist eine Nachweisführung nach Gleichung (A.2) möglich.

Der angegebene Rechengang kann rechentechnisch leicht umgesetzt werden [84] und führt bereits nach wenigen Iterationsschritten zur Lösung der Aufgabenstellung.

Beurteilung der Standsicherheit der äußeren gefügedichteten Betondeckschicht,
z.B. mittels *Abklopffverfahren* oder *Verbundfestigkeitsprüfung*

1

Aufgrund der Tatsache, daß infolge von Temperaturbeanspruchungen der äußeren gefügedichteten Betondeckschicht eine Schädigung des Verbundes zwischen dieser Schicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton nicht generell ausgeschlossen werden kann, ist die dauerhafte Standsicherheit der äußeren gefügedichteten Betondeckschicht zu beurteilen.

Zunächst erfolgt eine Differenzierung in unterschiedliche Schadensbereiche A_i des betrachteten Außenwandelementes nach Bild A.4, wobei eine erste Kontrolle der Schadensbereiche mit dem *Abklopffverfahren* (siehe Abschnitt 4.7.2) möglich ist.

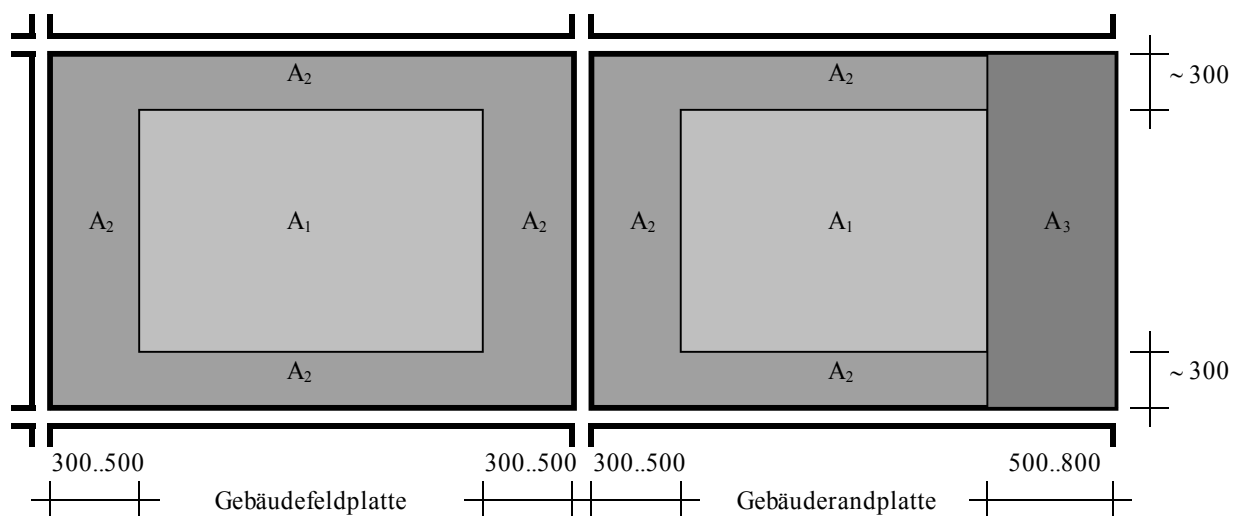


Bild A.4 : *Darstellung der zu differenzierenden Schadensbereiche für eine Beurteilung der Verbundfestigkeit*

Zur anschließenden quantitativen Bestimmung der Verbundfestigkeit mit der *Verbundfestigkeitsprüfung* (siehe Abschnitt 4.7.2) sind in jedem Schadensbereich A_i mindestens sechs Einzelwerte zu bestimmen, aus denen die Verbundspannungen, welche in den Schadensbereichen vorhanden sind, ermittelt werden können :

$$\sigma_{V,i} = \bar{\sigma}_i - s \quad [\text{N/mm}^2] \quad (\text{A.12})$$

mit

$\sigma_{V,i}$	-	vorhandene Verbundspannung im betrachteten Schadensbereich A_i	$[\text{N/mm}^2]$
$\bar{\sigma}_i$	-	Mittelwert der in A_i mit der Verbundfestigkeitsprüfung erhaltenen Verbundspannungen	$[\text{N/mm}^2]$
s	-	Standardabweichung der in A_i mit der Verbundfestigkeitsprüfung erhaltenen Verbundspannungen	$[\text{N/mm}^2]$
A_i	-	Größe des Schadensbereiches nach Bild A.4	$[\text{mm}^2]$

In Abhängigkeit eventuell vorhandener Plattenrisse sind die Teilflächen einzeln oder in ihrer Summation den angreifenden Beanspruchungen gegenüberzustellen :

$$\sigma_{V,i} \geq F_{B,i} / A_i \quad (\text{A.13})$$

bzw.

$$\Sigma \sigma_{V,i} \geq \Sigma (F_{B,i} / A_i) \quad (\text{A.14})$$

Die Gesamtbeanspruchung $F_{B,i}$ ist dabei bei der statisch-konstruktiven Beurteilung infolge von Fassadensanierungsmaßnahmen nach folgender Beziehung zu berücksichtigen :

$$F_{B,i} = \sqrt{(F_{G,i}^2 + F_{W,i}^2)} \quad [\text{N}] \quad (\text{A.15})$$

mit

$F_{G,i}$	-	Beanspruchung in der Grenzfläche von A_i infolge Eigengewicht der äußeren gefügedichten Betondeckschicht und der anzuordnenden Fassadenkonstruktion	$[\text{N}]$
$F_{W,i}$	-	Beanspruchung in der Grenzfläche von A_i infolge Windlast	$[\text{N}]$

In Abhängigkeit der Art der Fassadenkonstruktion kann der Anteil aus Windlastbeanspruchung in Gleichung (A.15) reduziert werden oder entfallen, so daß vielfach eine spezielle Sicherung der äußeren gefügedichten Betondeckschicht nicht erforderlich ist.

Soll in Ausnahmefällen eine Fassadensanierung zunächst nicht erfolgen, so wird empfohlen, für bereits geschädigte Bereiche bis zur Ausführung einer Fassadensanierungsmaßnahme eine jährliche Kontrolle der Anbindung der äußeren gefügedichten Betondeckschicht an die Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton mit dem *Abklopffverfahren* durchzuführen.

Herstellung der Standsicherheit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht oder
Entfernung der nicht standsicheren Bereiche dieser Schicht

1

Die Herstellung der Standsicherheit der äußeren gefügedichten Betondeckschicht kann in Abhängigkeit der Schädigung des Verbundes zwischen dieser Schicht und der Schicht aus haufwerksporigem Leichtbeton durch nachträgliche Anbindung der abgelösten Bereiche der äußeren gefügedichten Betondeckschicht erfolgen.

Eine solche nachträgliche Anbindung ist möglich durch eine Zementleiminjektage oder durch Verankerungen.

Ist die Ausführung einer solchen nachträglichen Anbindung aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll, ist die Entfernung der nicht standsicheren Bereiche der äußeren gefügedichten Betondeckschicht erforderlich.

Gebäude nicht standsicher

1

Wird festgestellt, daß das Gebäude nicht standsicher ist, sind im Hinblick auf die Herstellung der öffentlichen Ordnung und Sicherheit die beiden nachfolgenden Maßnahmen möglich :

- Umnutzung des Gebäudes und Reduzierung der Beanspruchungen aus Eigen- und Verkehrslast,
- Anwendung weiterer Sanierungsverfahren zur Standsicherheitserhöhung (siehe Kapitel 5),
- Abriß des Gebäudes.

Gebäude standsicher

1

Die Standsicherheit des Gebäudes wurde auf der Grundlage

-
-
- des gültigen Vorschriftenwerkes der DIN,
 - der in dieser Arbeit entwickelten Nachweis- und Prüfverfahren

nachgewiesen.

Lebenslauf

Name	Mirko Neumann
Geburtsdatum	27.05.1967
Geburtsort	Leipzig
Anschrift	Zeisigweg 5 04463 Großpösna
Familienstand	verheiratet
Schulbildung	09/73 - 08/83 Polytechnische Oberschule, Abschlußprüfung mit „Auszeichnung“ bestanden 09/83 - 06/86 Berufsausbildung mit Abitur, Abitur mit Note „sehr gut“ bestanden
Berufsausbildung	09/83 - 6/86 Berufsausbildung als Baufacharbeiter, Lehrabschlußprüfung mit Note „gut“ bestanden 11/86 - 04/88 Grundwehrdienst 09/88 - 07/93 Studium an der Technischen Hochschule Leipzig, Fachbereich Bauingenieurwesen, mit Spezialisierungs- richtung „Konstruktiver Ingenieurbau“ und an der Pais- ley University of Technology in Glasgow, Diplom mit Note „sehr gut“ bestanden
Berufliche Tätigkeit	07/86 - 10/86 Tätigkeit als Baufacharbeiter im VEB Baukombinat 05/88 - 08/88 Leipzig seit 09/93 Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Referat Fassaden- und Befestigungstechnik der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig und freiberufli- cher Mitarbeiter in der Ingenieur- und Architektenge- meinschaft Sahlmann & Partner, Leipzig seit 10/96 Leiter der Überwachungsstelle „Hinterlüftete Fassaden- konstruktionen“ und stellvertretender Leiter der Prüf- stelle „Niet- und schraubenartige Verbindungen und niet- und schraubenartige Befestigungen für Außen- wandbekleidungen“ an der Materialforschungs- und Prüfungsanstalt für Bauwesen Leipzig