

Forschungsberichte

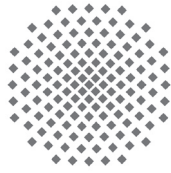
itke

33

Alexander Hub

Integriertes Konzept
zur nachhaltigen
Errichtung von Gebäuden
in massiver
Elementbauweise





Forschungsberichte

itke

aus dem Institut für Tragkonstruktionen
und Konstruktives Entwerfen,
Universität Stuttgart

Herausgeber:
Professor Dr.-Ing. Jan Knippers

Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen:
Forschungsbericht 33

Alexander Hub:

Integriertes Konzept zur nachhaltigen Errichtung
von Gebäuden in massiver Elementbauweise

Stuttgart, Februar 2012

ISBN 978-3-922302-33-9

D 93

© Institut für Tragkonstruktionen
und Konstruktives Entwerfen
Universität Stuttgart
Keplerstraße 11
D-70174 Stuttgart



Alle Rechte, insbesondere der Übersetzung, bleiben
vorbehalten. Vervielfältigung jeglicher Art, auch auszugs-
weise, ist nicht gestattet.

Integriertes Konzept zur nachhaltigen Errichtung von Gebäuden in massiver Elementbauweise

von der Fakultät Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Alexander Hub
aus Karlsruhe

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans Wolf Reinhardt

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Januar 2012

Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen
Januar 2012

Vorwort

Diese Arbeit entstand während der Zeit meiner wissenschaftlichen Mitarbeit am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen an der Fakultät für Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart. Die thematischen Grundlagen, auf denen diese Arbeit aufbaut, stammen aus dem Forschungsprojekt „HOMES (24)“, gefördert durch das Ministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers, Leiter des Instituts für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der Universität Stuttgart, für die Betreuung und die stetige Unterstützung dieser Arbeit sehr herzlich bedanken. Die wohl platzierten Anregungen und motivierenden Gespräche gaben für die inhaltliche Entwicklung der Arbeit wichtige Impulse. Zugleich bedanke ich mich für die zugestandene Freiheit, dieses abseits vom thematischen Schwerpunkt des Instituts angesiedelte Thema aufzugreifen und bearbeiten zu dürfen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Wolf Reinhardt möchte ich meinen herzlichen Dank für die Übernahme des Mitberichts aussprechen. Durch seine langjährige Forschungsarbeit im Bereich demontierbarer Betonkonstruktionen erhielt ich durch ihn wertvolle Impulse.

Mein Dank gilt besonders Herrn Michael Tondera, Werkstattleiter der Fakultätswerkstatt Architektur, der durch seine motivierte Mitarbeit bei der Konzeption von Versuchsaufbauten und deren Durchführung wesentlich zum Gelingen des praktischen Teils der Arbeit beigetragen hat.

An dieser Stelle muss auch unbedingt der stetige Beitrag der vielen studentischen Hilfskräfte erwähnt werden, die wertvolle Zuarbeiten geleistet haben. Namentlich möchte ich mich dafür ganz besonders bei Andreas Conzelmann, Felix Eiffler, Manfred Hammer, Jennifer Kremsler, Nikolas Reinke, Kim Schopf und Ziheng Wu bedanken.

Meinen Institutskollegen danke ich für die freundschaftliche Atmosphäre und die zahlreichen fachlichen Diskussionen sowie für das Verständnis, das sie mir in der letzten Phase der Fertigstellung entgegengebracht haben.

Gleichwohl eine Promotion als Einzelleistung betrachtet wird, gibt es ein ganz wichtiges Team, das wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Durch den großen Rückhalt in meiner Familie und hierbei ganz besonders bei meiner lieben Frau Katja und meinen beiden Kindern Leonie und Philipp, der sich sowohl in mahnenden als auch in motivierenden und mitunter tröstenden Worten äußerte, ist dieser Beitrag als ein ganz Wesentlicher neben dem Fachlichen zu werten, der zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei Frau Getraude Epple und Ihrem Mann Herrn Dr. Michael Stolle für ihre wertvolle Zeit Bedanken, die sie aufgewendet haben, um der Arbeit den letzten sprachlichen Schliff zu geben.

Kurzfassung

Die Arbeit stellt ein integriertes Konzept aus einem hoch dämmenden Leichtbetonmaterial und einer vergussfreien Verbindungstechnik vor, die unter der Voraussetzung der trockenen Fügung der Bauteile den Ansprüchen eines nachhaltigen und wieder verwendbaren Bausystems für Wohngebäude in massiver Elementbauweise gerecht wird.

Heutige Fertigteilbauweisen sehen die Verbindung der Bauteile über Verguss vor, die zu einem monolithischen Baukörper führen. Eine Nachnutzung ist am wirtschaftlichsten durch die Wiederverwertung zerkleinerten Abbruchmaterials möglich. Ein Weg, die Nachhaltigkeit von Betonfertigteilbauweisen zu steigern, besteht in der trockenen Fügung von Elementen, um diese nach einem abgeschlossenen Nutzungszyklus unbeschädigt zu trennen und der Wiederverwendung auf Bauteilebene zuführen zu können. Die notwendige Infrastruktur für diesen Nutzungsweg wurde in den letzten Jahren aus Anlass des Rückbaus von Plattenbausiedlungen erforscht und aufgebaut.

Die Verbindung der Elemente erfolgt mit Hilfe eines Stecksystems, das im Zuge der Montage sowohl eine kraftschlüssige Verbindung der Elemente als auch die Übertragung von Medien (Wasser, Strom) über die Fuge ermöglicht. Im Rahmen eines durch das BMBF geförderten Forschungsprojekts wurde das bestehende System für den Einsatz als statisch wirksames Verbindungsmittel untersucht und in dieser Arbeit weiterentwickelt. Dies geschah insbesondere unter Berücksichtigung der im Betonbau auftretenden Toleranzen.

Um die im Rückbau gewonnenen Elemente in gleichwertiger Nutzung wiederverwenden zu können, müssen diese einen fortschrittlichen energetischen Standard erfüllen. Die Arbeit befasst sich im ersten Teil mit aerogelhaltigen Leichtbeton, welcher aufgrund seiner extrem niedrigen Wärmeleitfähigkeit einschalige Außenwände ohne zusätzliche Dämmung ermöglicht. Dieses Vorgehen beinhaltet ein großes Vereinfachungspotential in der Planungs- und Fertigungsphase, und gewährleistet ausreichend Bauraum für die Integration der Leitungsführung im Element. Die erforderliche Steigerung der Festigkeitseigenschaften des Werkstoffs erfolgt durch eine Gefügeoptimierung auf der Grundlage des ultrahochfesten Betons. Um die besonderen Unterschiede und Gemeinsamkeiten dieses neuen Materials mit herkömmlichem Leichtbeton zu verdeutlichen, erfolgt eine gegenüberstellende Betrachtung der Werkstoffgrundlagen beider Materialien.

Für die Ausbildung einer trockenen und demontierbaren Fuge zwischen den Elementen wird ausgehend vom Stand der Technik ein konstruktiver und lösbarer Fugenaufbau vorgeschlagen, der modular und montagegerecht konzipiert ist. Es werden Empfehlungen ausgesprochen, um die Elemente nach statischen und montagetechnischen Gesichtspunkten optimiert zu fügen.

Durch experimentelle Belastungstests wurde die Tragfähigkeit und Steifigkeit des Verbindungssystems Munitec ermittelt, um dessen Anwendbarkeit als statisch wirksames Verbindungsmittel zu beurteilen. Anhand der Finite-Elemente Simulation eines Beispielgebäudes wird der Vergleich zwischen der herkömmlichen Bauweise mit Fugenverguss und einer Bauweise mit punktuell eingesetzten Verbindungsmitteln gezogen.

Das untersuchte Verbindungssystem Munitec leistet nur in Kombination mit Verguss die erforderliche statische Wirksamkeit. Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen erfolgt eine Neuentwicklung des Systems unter der Vorgabe des sofortigen Kraftschlusses und der reversiblen Einsatzmöglichkeit. Die FE-Simulation bestätigt die Funktionsweise dieses Konzepts und liefert Parameter für die Dimensionierung des Systems. Die Simulation des Tragwerks mit ausgefallenen Bauteilen erlaubt eine Aussage zur Robustheit des Systems.

Abstract

The work presents an integrated approach for a high-insulating lightweight concrete material and a non grouted connection technology. Dry conditions when connecting the elements fulfill sustainable, and re-usable building systems for accommodation, suitable for massive construction elements.

Current pre-fabricated constructions are connected through grouting resulting in monolithic structures. Re-use of such pre-fabricated elements is most economical through recycling of the crushed material. A dry connecting of the elements increases the sustainability of precast concrete construction through undamaged separation and re-use of the elements at the end of their life-cycle. In the recent years, the deconstruction of prefabricated housing estates has created the necessary infrastructure for the research and development of the re-utilisation of these elements.

The connecting of the elements takes place with a fast fit connecting system, which combines force fitting of the elements and the transmission of water and electricity through the joint during assembly. The existing system was examined as part of a research project supported by BMBF and further developed in the presented study for use in a functioning static connecting system. The consideration of tolerances in concrete constructions were an important focus in this work.

In order to be able to equivalently re-use the elements gained through deconstruction they have to fulfil advanced energy standards. The first part of this thesis focuses on aerogel containing lightweight concrete which enables monolithic exterior walls which do not necessitate additional insulation due to its extremely low thermal conductivity. The use of this material offers considerable simplification in the planning and manufacturing processes and at the same time enables the integration of conduits. The necessary increase in mechanical strength of the material takes place through an optimisation of microstructures based on the attributes of ultra high performance concrete. A comparison of the material properties is undertaken in order to underline the differences and similarities between the new materials and conventional lightweight concrete.

Based on the state of the art connection technology a detachable connector was suggested for the dry joint. The joints are modular and optimised for easy mounting. A set of rules was made to arrange the connectors in optimised positions based on static and mounting requirements.

In order to quantify the usability of a statically effective connector, the load bearing capacity and stiffness of the connection system was tested through experimental load tests. Through finite element simulations of a sample building structure a standard construction technique with grouted joints was compared to a construction method using individual connectors. It was shown that the latter only provides the necessary load bearing when combined with grout joints. Based on these findings a new type of connector was developed with sufficient load bearing capacity and the possibility of re-utilisation. Finite element simulations prove the functionality of this concept and give

the dimensioning parameters for the system. Finally, the robustness of the system was tested by simulating failure of individual wall panels in the system.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Historischer Abriss	3
3 Grundlagen des integrierten Bauens	7
3.1 Zielsetzung der Arbeit.....	7
3.1.1 Ökologische Faktoren.....	7
3.1.2 Wirtschaftliche Grundlagen.....	8
3.1.3 Gesellschaftliche Faktoren.....	10
3.2 Integriertes Konzept.....	11
3.2.1 Lösbare Verbindungselemente.....	13
3.2.2 Einschalige Wandbauweise.....	20
4 Mesoporöser Leichtbeton	23
4.1 Grundlagen.....	23
4.1.1 Porosität.....	23
4.1.2 Porige Zuschläge.....	24
4.1.3 Wasseraufnahme.....	28
4.2 Tragverhalten korporiger Leichtbetonwerkstoffe.....	29
4.2.1 Verbundtragverhalten.....	29
4.2.2 Tragverhalten des Zuschlags.....	30
4.2.3 Tragverhalten der Matrix.....	31
4.3 Porige Leichtbetonwerkstoffe.....	31
4.3.1 Schaumbeton.....	31
4.3.2 Porenbeton.....	32
4.4 Zusammenfassung.....	33
5 Nanoporöser Leichtbeton	35
5.1 Aerogele.....	35
5.1.1 Allgemeines.....	35
5.1.2 Herstellung und Aufbau.....	35
5.1.3 Materialeigenschaften.....	38
5.2 Grundlagen aus der UHPC-Forschung.....	40
5.2.1 Granulometrie.....	41
5.2.2 Packungsdichte.....	41

5.2.3	Wasseranspruch	42
5.3	Packungsdichteoptimierung eines aerogelhaltigen Verbundwerkstoffs	43
5.3.1	Tragverhalten	43
5.3.2	Untersuchung zur Steigerung der Packungsdichte	44
5.4	Materialeigenschaften	48
5.4.1	Probekörper	49
5.4.2	Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$	50
5.4.3	Festigkeit f_u	52
5.4.4	Ergebnisse der Untersuchung	53
5.5	Sichtbetoneigenschaften und Oberflächenqualität	53
5.5.1	Versuchsprogramm	54
5.5.2	Pigmentierung	55
5.5.3	Bearbeitungsmethoden	56
5.5.4	Weitere Gestaltungsmöglichkeiten	59
5.6	Zusammenfassung	60
6	Elementfugen	61
6.1	Fugenanforderungen	61
6.2	Toleranzen im Fertigteilbau	64
6.2.1	Wirksame Toleranz nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz	65
6.2.2	Normative Vorgaben	67
6.2.3	Evaluation der Fertigung	67
6.2.4	Zusammenfassung	75
6.3	Aufbau und Funktion einer lösbaren Fuge	76
6.3.1	Fugenaufbau	77
6.3.2	Bauphysikalische Wirksamkeit	78
6.3.3	Lastabtrag	81
6.3.4	Elementmontage	83
7	Tragfähigkeitsuntersuchung der Verbindungselemente von Munitec	87
7.1	Prüfgerät und Prüfbedingungen	87
7.2	Traglastversuche PowerCon	88
7.2.1	Versuchsprogramm	88
7.2.2	Versuchsergebnisse	90
7.2.3	Bewertung der Ergebnisse	100
7.3	Traglastversuche PowerClip	101
7.3.1	Versuchsprogramm	101
7.3.2	Versuchsergebnisse	102
7.3.3	Bewertung der Ergebnisse	104
8	Verbindungselemente für trocken gefügte Betonbauteile	105
8.1	Toleranzaufnahme durch Exzenterprinzip	105
8.2	PowerClip-tr	107
8.3	PowerCon-tr	109

8.4	Modularer Aufbau des Verbindungssystem	111
8.5	Zusammenfassung	111
9	FE-Simulation des Tragverhaltens	113
9.1	Aufbau der Berechnungsserien	113
9.2	Modellaufbau	114
9.2.1	Allgemeines	114
9.2.2	Lastannahmen	115
9.2.3	Vorverformung	116
9.3	FE-Simulation des hybriden Tragverhaltens – Serie 2	116
9.3.1	Modellierung der Verbindungsmittel	116
9.3.2	Auswertung der Lastfälle 100-131	120
9.3.3	Auswertung der Lastfälle 141-146 – Erdbebeneinwirkung	127
9.3.4	Zusammenfassung und Bewertung	131
9.4	FE-Simulation des trockenen Tragverhaltens – Serie 3	132
9.4.1	Modellierung der Verbindungsmittel	132
9.4.2	Auswertung der Lastfälle 100-131	133
9.4.3	Auswertung der Lastfälle 141-146 – Erdbebeneinwirkung	138
9.4.4	Besonderheiten des punktuellen Lastabtrags.....	142
9.4.5	Zusammenfassung und Bewertung	143
9.5	Analyse der Systemrobustheit	143
10	Zusammenfassung und Ausblick.....	147
11	Literatur	149
	Abbildungsverzeichnis.....	155
	Tabellenverzeichnis	161
A	Anhang.....	163
A.1	Referenzwerte Kapitel 4.4.....	163
A.2	Anhang Lastannahmen.....	163
A.2.1	Temperaturbelastung.....	163
A.2.2	Verkehrslasten	164
A.2.3	Windlasten	164
A.2.4	Schneelasten	165
A.2.5	Temperaturlast.....	165
A.2.6	Erdbebenlast.....	166
A.3	Anhang Pläne Versuchsgebäude „HOMES (24)“	167

1 Einleitung

Die Arbeit stellt ein integriertes Konzept aus einem hoch dämmenden Leichtbetonmaterial und einer vergussfreien Verbindungstechnik vor, die unter der Voraussetzung der trockenen Fügung der Bauteile den Ansprüchen eines nachhaltigen und wieder verwendbaren Bausystems für Wohngebäude in massiver Elementbauweise gerecht wird. Das Konzept umfasst zwei voneinander unabhängige Schwerpunkte. Ein Fokus liegt auf der Entwicklung einer lösbaren Verbindung von Fertigteilen. Der zweite Themenbereich behandelt die einschalige Ausbildung von Betonelementen aus einem hochdämmenden, gefügedichten Leichtbeton der nächsten Generation ohne zusätzlichen Dämmbau. Die Kombination beider Ansätze ermöglicht Synergieeffekte, welche die Grundlage für die propagierte, nachhaltige Bauweise bilden. Den Ausgangspunkt dieser Arbeit stellt das vom BMBF geförderte Forschungsvorhabens „HOMES (24)“ dar.

Die bauphysikalischen und konstruktiven Vorteile einer einschaligen Hüllkonstruktion sind allgemein anerkannt. Mit den bekannten wärmedämmenden Leichtbetonwerkstoffen stand bis vor Kurzem noch ein Material für diese Bauaufgabe zur Verfügung. Die erhöhten wärmeschutztechnischen Anforderungen machen jedoch die Suche nach einem leistungsfähigeren Material erforderlich. Die Arbeit erläutert die Funktionsweise der herkömmlichen Dämmbetontechnologie um die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu einem neuen Leichtbetonwerkstoff mit Aerogelzuschlag vergleichend zu betrachten.

Das Baugewerbe sieht sich mit der stetig zunehmenden Forderung nach einem umweltgerechten und energieoptimierten Bauen konfrontiert. Mit dem in sich geschlossenen Konzept wird ein neuer Ansatz aus dem Bereich des Massivbaus zur Erfüllung dieser Ansprüche vorgestellt. Derzeitige Konzepte zur Steigerung der Nachhaltigkeit sehen entweder Strukturen mit flexibler Nutzung, oder das Recycling von Beton auf Werkstoffebene vor. Eine weitere, bisher nur am Rande in Betracht gezogene Möglichkeit, stellt die Wiederverwendung ganzer Elemente dar. Besonders typische Betoneigenschaften, wie die Dauerhaftigkeit und Materialbeständigkeit werden bei diesem Ansatz vorteilhaft genutzt. Der reversible Montageprozess einer Struktur statt deren Abbruch reduziert darüber hinaus die Umweltbelastung durch die Vermeidung von Lärm- und Staubemissionen.

Der Einsatz eines punktuell wirkenden Verbindungssystems aus Stahl wirft die Frage nach der Ausbildung eines geeigneten statischen Systems auf. Herkömmliche Konstruktionen übertragen die auftretende Kraft über großflächig vermörtelte Fugen. Im Gegensatz dazu müssen die Kräfte über die Verbindungselemente aus Stahl punktuell konzentriert abgetragen werden. Zur Beurteilung des Tragverhaltens wird das Last-Verformungsverhalten des Verbindungssystems Munitec experimentell untersucht. Die Ergebnisse fließen in eine Finite-Elemente Simulation eines Beispielgebäudes ein, um das Tragwerk einer parametrischen Analyse zu unterziehen.

Da das System Munitec nur in Verbindung mit einem Fugenverguss trägt, erfolgt die Entwicklung einer trocken verwendbaren, kraftschlüssigen und justierbaren Stahlver-

bindung, um den Forderungen des integrierten Konzepts nachzukommen. Dazu wird eine Fertigungskontrolle einer Elementproduktion durchgeführt, um eine zuverlässige Aussage zu den zu berücksichtigenden Toleranzen zu erhalten. Die konstruktive Ausbildung der Fuge zwischen den Elementen muss sich ausgehend vom Stand der Technik ebenfalls an der Forderung der Lösbarkeit ausrichten.

Das derartig konstruierte Gebäude wird einer Belastungssimulation unterzogen und mit dem herkömmlichen Lastabtragungsprinzip über eine vermörtelte Fuge verglichen. Abschließend erfolgt eine Beurteilung der Strukturrobustheit, um eine Aussage zur Versagenswahrscheinlichkeit der Gesamtsystems zu gewinnen.

2 Historischer Abriss

Mit der beginnenden Industrialisierung Europas im 19. Jahrhundert setzte ein flächen-deckender Paradigmenwechsel bei der Herstellung von Gütern ein. Wurden sie ursprünglich in geringer Stückzahl durch aufwendige und teure Handarbeit gefertigt, konnten sie jetzt wesentlich preiswerter und massenhaft produziert werden. Diese Entwicklung ermöglichte es, den Bedürfnissen einer stetig wachsenden Bevölkerung nachzukommen. Die neuartigen Produktionsmethoden und Werkstoffe eröffneten auch für Bauaufgaben neue Wege.

Einen vorläufigen Höhepunkt fand diese Entwicklung 1851 in Joseph Paxtons Kristallpalast als Austragungsort der Weltausstellung in London. Vorgefertigte Elemente aus Eisen und eine strenge modulare Ordnung der Konstruktion ermöglichten die Errichtung des Bauwerks in der Rekordzeit von nur acht Monaten. Bereits in der Ausschreibung wurde ein temporäres Gebäude gefordert, welches nach der Ausstellung vollständig zu demontieren sein sollte. Dies konnte der gelernte Gärtner Paxton mit seinem Entwurf einer riesigen Stahl-Glas-Kathedrale erfüllen. Das Grundprinzip des Gebäudes bestand darin, möglichst wenig verschiedene, standardisierte Elemente zu verwenden, die durch einen lösbaren Mechanismus mit Keilen kraftschlüssig miteinander verbunden werden konnten. Nach der Demontage konnte der Bau erweitert in Sydenham bei London wiedererrichtet werden [73]. Diese Leistung war im Wesentlichen auf die industrielle Produktion der Bauteile, das elementierte Bausystem und den durchgeplanten Bauablauf zurückzuführen.

Fand man die industrialisierte Fertigung von Bauteilen anfangs vor allem in Verbindung mit dem Werkstoff Eisen, weitete sich die Methode der Vorfertigung sehr schnell auf alle bekannten Baumaterialien aus. Insbesondere im Holzbau kam es zu der Entwicklung von Bausystemen. Die Kolonialisierung der USA war der Grund für den Bedarf an besonders leichten und einfach zu montierenden Bausystemen. Das Balloon-Frame-System von George W. Snow basiert auf der traditionellen Holzständerbauweise. Die Weiterentwicklung gelang durch den Einsatz maschinell gesägter Bretter, die mit industriell hergestellten und dadurch massenhaft verfügbaren Nägeln zu Elementen verbunden werden konnten. Durch die Verwendung des uneingeschränkt verfügbaren Rohstoffs Holz konnte die Anforderung mit leichten und billigen Bauelementen erfüllt werden. Der Erfolg des Systems wirkt bis heute nach und zeigt sich durch die ungebrochene Dominanz der Holzbauweise in Amerika.

Vor allem die Baukosten lieferten ein wichtiges Motiv, sich mit der industriellen Vorfertigung von Bauelementen zu befassen. Der starke Zuzug in die Städte erzeugte einen zunehmenden Druck, das Wohnungsproblem zu lösen. Anders als in den USA, musste die Aufgabe in europäischen Ländern weniger flächenintensiv bewerkstelligt werden, so dass mehrstöckige, massive Bauwerke auch in Hinblick auf den notwendigen Brandschutz gefordert waren. Durch die Anwendung des weitgehend unbekanntes Materials Eisenbeton, dem späteren Stahlbeton, wurde ein bedeutender Entwicklungsschritt vollzogen. War bisher die leichte Transportfähigkeit von besonderer Bedeutung, rückte damit verstärkt die preisgünstige Errichtung dauerhafter und ortsfester Gebäude

in den Mittelpunkt. Erste Vorfertigungsansätze wurden bei dem Versuch, den gebrannten Mauerziegel durch Betonwerksteine zu ersetzen, angewendet. Den extremsten Ansatz vertrat 1906 Thomas A. Edinson mit seinem Vorhaben, ein ganzes Haus am Stück zu gießen [44]. Obwohl sich die Idee aus technischen Gründen nicht durchsetzen ließ, nahm er mit dem Betonguss die bis heute praktizierte, wirtschaftlichste Verarbeitungsmethode für Beton vorweg. Erfolgreicher erwiesen sich die Versuche, vorgefertigte, geschosshohe Platten zu verwenden. Um die Jahrhundertwende standen die Hebezeuge zur Verfügung, um die ersten Projekte in Plattenbauweise zu realisieren. Als gießfähiger und gut formbarer Werkstoff, der nach seiner Erhärtung brandsicher, verrottungsfest und tragfähig war, erwies sich Beton als der aussichtsreichste Werkstoff für die Vorfertigung. Für eine ausreichende Standsicherheit der Konstruktion wurden die Elemente durch Ausmörteln oder Vergießen der Fugen dauerhaft miteinander verbunden. Die an der Elementbauweise mit anderen Materialien so hoch geschätzten Eigenschaften der Zerleg- und Wiederverwendbarkeit wurden somit von Beginn an zugunsten einer dauerhaften Verbindung von Platten aus Beton aufgegeben und später nur ganz vereinzelt thematisiert.

Als erster Architekt in Deutschland führte Walter Gropius in seiner Denkschrift von 1910 die Argumente für eine industrialisierte Fertigung von Häusern auf [63]. Er betonte vor allem die verbesserte Qualität derartiger Bauwerke, da jedes Detail, anders als bei einem Unikat einem Entwicklungsprozess unterzogen wird. Unabdingbare Voraussetzung war die Einführung einer Maßordnung, um den summierten Bedarf von Einfamilienhäusern wirtschaftlich produzieren zu können. Erst mit Gründung des Normungsausschusses der Deutschen Industrie 1917 nahm auch der Unterausschuss für das Bauwesen, unter anderem besetzt mit Peter Behrens, diesbezüglich seine Arbeit auf [5].

Als Ausdruck ihres sozialen Verantwortungsbewusstseins verstanden auch andere Architekten die Vorfertigung als Chance zur Verbilligung lebenswerten Wohnraums insbesondere für die Bevölkerung niedriger Einkommensklassen. Martin Wagner führte in seiner Eigenschaft als Direktor der Deutschen Wohnbaugesellschaft (Dewog) erstmals die schwere Vorfertigung als Bauweise in Deutschland ein. Die Erfahrungen mit dem bereits erprobten System Atterbury in der Versuchssiedlung in Berlin-Friedrichsfelde blieben jedoch weit hinter den Erwartungen zurück [44]. Durch einen aufwendigen zweischaligen Wandaufbau mit Schlackenfüllung wurde bereits eine gewisse Wärmedämmung in die Wand integriert. Auch spätere Versuche, darunter so bekannte Beispiele wie die Siedlung Praunheim von Ernst May in Frankfurt oder Dessau-Törten von Walter Gropius, zeigten, dass mit den damaligen technischen Möglichkeiten und Materialien die geschosshohe Platte mit der Ziegelbauweise weder wirtschaftlich noch technisch konkurrieren konnte. Durch das hohe Versatzgewicht der Elemente war ein hoher Grad an Mechanisierung der Baustelle erforderlich, der die Baukosten deutlich verteuerte. Durch eine weitere Unterteilung der Elemente versuchte man deshalb mit kleineren und flexibleren Hebezeugen arbeiten zu können. Auch die angestrebte Witterungsunabhängigkeit konnte nicht erreicht werden. Da die Bauteile häufig vor Ort hergestellt wurden, war man sogar stärker von guter Witterung abhängig als konventionelle Baustellen in Ziegelbauweise.

Neben den technischen Problemen wurde das Prinzip der Vorfertigung von den Nationalsozialisten als Angriff auf das Handwerk grundsätzlich abgelehnt. Nach der Macht-

ergreifung 1933 kam es daher in Deutschland zu einem vollständigen Stillstand der Entwicklungsbemühungen, so dass die Hauptprotagonisten wie Ernst May, Bruno Taut oder Walter Gropius ins Ausland emigrierten, um sich vor den drohenden Repressalien der neuen Machthaber zu schützen.

Nach dem Zweiten Weltkrieg stellte die schwere Vorfertigung die Grundlage für ein beispielloses Wiederaufbauprogramm dar, um die entstandenen Kriegsschäden zu beseitigen, aber vor allem, um neue Wohnsiedlungen in den Vororten zu errichten. Wandgroße Tafeln aus Stahlbeton erwiesen sich als besonders geeignet, um mehrstöckige Wohngebäude aus dem Boden schießen zu lassen. Der Entwicklungsfokus richtete sich dabei hauptsächlich auf technische Aspekte wie etwa eine möglichst schnelle Errichtung und beschäftigte sich weniger mit Fragen der Gestaltung. Als Pulsgeber müssen in erster Linie Frankreich mit den Systemen von Camus und Coignet sowie Skandinavien, aber vor allem die ehemalige UdSSR genannt werden [72]. Die dabei gefertigten Wohnbauten prägten weltweit das Bild des Systembaus in Plattenbauweise. Bereits Walter Gropius warnte vor der Gefahr der Monotonie durch eine falsch verstandene Rationalisierung. Die Erweiterung des Vorfertigungsgedankens von Bauprodukten auf Bauelemente ohne einer entsprechenden architektonischen Reflektion führte zu den monotonen Wohnwüsten, die heute einen hohen Leerstand aufweisen und dadurch Gegenstand expliziter Forschungsbemühungen sind, um deren Rückbau unter der Vorgabe der weitgehenden Wiederverwendung der Bauteile zu entwickeln. Die der Logik des Elementbaus zugrunde liegende Demontierbarkeit wird in diesen Fällen suboptimal ausgenutzt, da diese Funktionalität in der Planungsphase noch keine Berücksichtigung fand. Die Fähigkeit der Demontierbarkeit, die in zukünftigen Konzepten des nachhaltigen Bauens eine zentrale Rolle spielen wird, ist in den heute vorhandenen Stahl- und Holzbauweisen wesentlich ausgeprägter vorhanden als im Betonbau. Hier hält man aus wirtschaftlichen Gründen an dem anfänglich eingeschlagenen Weg des Vergusses der Bauteile fest. Erst eine Weiterentwicklung des Betonelements über den Status eines Rohbauteils hinaus zu einem hochwertigeren, vorgefertigten Bauelement eröffnet die Möglichkeit, technisch aufwendigere, aber lösbare Verbindungen in Betracht zu ziehen.

Heute erleben Systembauweisen eine bemerkenswerte Renaissance, was die beiden Ausstellungen von 2008 „Home Delivery“, [4], und „Wendepunkte im Bauen“ von 2010 [58], sowie zahlreichen Veröffentlichungen zeitgenössischer Architekten [1] belegen. All diese Aktivitäten gründen in der Anerkennung, welche umfassende Veränderungen mit der Einführung des Computers und digitaler Methoden im Bauwesen stattgefunden haben. Diese Entwicklung wird in Anlehnung an das 1959 von Konrad Wachsmann erschienene Buch „Wendepunkt im Bauen“ [80], welches die mechanisierte Produktion als den Ausgangspunkt einer neuen Art zu bauen sieht, als der zweite Wendepunkt im Bauen bezeichnet. Die Digitalisierung ermöglicht dem Serienbau durch das konsequente Zusammenspiel von CAD und CAM (computerbasierte Planung und Fertigung) die wirtschaftliche Fertigung von individuellen Bauteilen, statt der seriellen Fertigung gleichförmiger Elemente. Neben der zunehmenden Verzahnung von Fertigung und Planung erhält auch der Planungsprozess selbst durch die Digitalisierung neue Impulse. Die Leistungen der Fachplaner werden anhand eines dreidimensionalen digitalen Modells integriert. Diese Vorgehensweise ist für größere und komplexe Bauvorhaben bereits etabliert. Die Softwarehersteller reagieren auf diese Entwicklung und bieten in

Ergänzung zu Ihren CAD-Programmen Datenbanksysteme an, die eine Vielzahl von Zusatzinformationen mit den geometrischen Daten des Modells kombiniert verwalten. Durch den Einsatz zentraler Projektserver, können alle Beteiligten auch ortsfern über das Internet auf die Daten zugreifen. Auf Basis einer derartig durchgeführten Planung kann auch eine integrierte Fertigung von Bauteilen durchgeführt werden.

Die ursprünglich mit der Einführung von industriellen Vorfertigungsmethoden verbundene Hoffnung auf eine Verbilligung des Wohnungsbaus konnte auch unter heutigen Voraussetzungen nur unzureichend erfüllt werden. Die industrielle Vorfertigung und die Prinzipien des Elementbaus bieten jedoch eine aussichtsreiche Ausgangsbasis, um weiterführende Aspekte der Nachhaltigkeit im Betonbau umzusetzen. Um die Wiederverwendung hochwertiger Elemente zu etablieren, ist eine zerstörungsfreie Demontage unabdingbare Voraussetzung. Skelettbauten aus Stahlbeton bieten bereits durch den Einsatz von Stahleinbauteilen diese Option. Für massive Wandbaumethoden gibt es hingegen noch keine befriedigende Lösung.

Ziel dieser Arbeit ist mit den heute vorhandenen Möglichkeiten der Planung und Produktion ein Konzept zu entwickeln, mit dem eine Wiederverwendung von flächigen Massivbauteilen attraktiv wird. Da der recyclinggerechte Ansatz gleichzeitig wirtschaftliche Vorteile bietet, ist die Etablierung dieser Vorgehensweise in der heutigen Baubranche aussichtsreich.

3 Grundlagen des integrierten Bauens

3.1 Zielsetzung der Arbeit

Der Begriff „Nachhaltigkeit“ stammt ursprünglich aus der Forstwirtschaft. Er bezeichnet den pfleglichen Umgang mit der Ressource Wald, damit dieser dauerhaft im kontinuierlichen Umfang seine Leistungen erbringt. Die Erhaltung einer beständigen Funktions- und Leistungsfähigkeit eines Systems ist das Ziel eines nachhaltigen Wirtschaftens. Die Natur erhält die Stabilität des Ökosystems aufrecht, indem die Abfälle einer abgeschlossenen Vegetationsperiode zu 100% der Wiederverwertung im nachfolgenden Zyklus zugeführt werden. Bei der Umsetzung dieses Prinzips in der Bauwirtschaft kommt dem Recycling, also der Kreislaufführung von Stoffströmen nach dem Vorbild der Natur eine grundlegende Bedeutung zu. Im DAfStb-Heft „Nachhaltiges Bauen mit Beton“ [69] werden Entwicklungsrichtlinien postuliert, die einen bedeutenden, darüber hinausgehenden Beitrag zur Erfüllung von Nachhaltigkeitskriterien leisten können. In diesem Zusammenhang werden das Demontable Bauen mit Betonfertigteilen und die Optimierung von Baustoffen in Hinblick auf Ihre Umweltauswirkung hervorgehoben. Die vorliegende Arbeit greift beide Aspekte auf, und stellt in einem integrierten Konzept einen Lösungsansatz vor, welcher eine möglichst gleichrangige Berücksichtigung ökologischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Faktoren zum Ziel hat.

3.1.1 Ökologische Faktoren

Eine Kreislaufführung kann auf verschiedenen Ebenen erfolgen. Die Wiederverwendung (re-use) von Bauteilen stellt dabei den hochwertigsten Prozess dar, da er mit geringen Aufwendungen an Primärenergie und Transporten eine deutliche Verlängerung der Nutzungsphase ermöglicht. Dabei werden zwei Fälle unterschieden. Bei der primären Wiederverwendung werden Bauteile in einer gleichwertigen Nutzung eingesetzt. Dies ist in der Praxis jedoch aus bauphysikalischen und konstruktiven Gründen sowie architektonischen Defiziten mit den heute verfügbaren ausschließlich aus früheren Plattenbauten wieder gewonnenen Elementen nur durch eine Aufbereitung möglich. Häufig handelt es sich bei diesen Elementen um Sandwichbauteile mit einem völlig veralteten energetischen Standard. Für sie kommt eher eine sekundäre Wiederverwendung in Bauwerken mit geringen bauphysikalischen und konstruktiven Anforderungen in Frage [79]. Dies sind beispielsweise Anlagen für den ruhenden Verkehr, Böschungssicherungen oder Lärmschutzwände. Andere Forschungsprojekte [9] zogen durchaus eine positive Bilanz für eine primäre Wiederverwendung dieser Teile. Die ökologische Wirkung ergibt sich vor allem durch die Primärenergieeinsparung aufgrund der eingesparten Neuproduktion. Aus bauphysikalischer Sicht wird die vorhandene Dämmung berücksichtigt, so dass sich in der Kombination mit ungedämmten Bauteilen verschieden starke, zusätzliche Dämmstärken ergeben.

Um hochwertige Bauteile für eine zukünftige, primäre Weiternutzung zur Verfügung zu haben, müssen sie einen fortschrittlichen energetischen Standard aufweisen, der sich an den Anforderungen an Passivhäuser orientieren muss, um auch die kommenden

Novellierungen der EnEV zu überdauern. Eine weitere Voraussetzung für eine erfolgreiche Wiederverwertung stellt die unversehrte Wiedergewinnung der Bauteile aus dem zu demontierenden Gebäude dar. Um diese Situation grundlegend zu verbessern sind bereits heute in der Planung eines Gebäudes durch die Verwendung lösbarer Verbindungsmechanismen entsprechende Maßnahmen vorzusehen, um Bauteile zerstörungsfrei zu trennen, und voll funktionsfähig wieder zusammenfügen zu können. Dieses Vorgehen kommt der Umwelt bereits infolge der Reduktion von Lärm- und Staubemissionen während der Rückbauphase zugute.

Die erforderliche Infrastruktur, für die Rückführung dieser Bauteile in den Bauprozess, wurde grundlegend im Rahmen des Forschungsprojektes „Bauteilnetz“ erarbeitet [10]. Ein auf Länderebene organisiertes System ermöglicht den Transport, die Aufbereitung und Lagerung der Elemente. Über eine Internetbasierte Plattform werden die Elemente verwaltet und einer Neunutzung zugeführt. Das Entwicklungsszenario geht von einzelnen Bauteilen aus, könnte jedoch prinzipiell auch zur Wiederverwertung ganzer Bauwerke genutzt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt ist in der Materialauswahl unter ökologischen Gesichtspunkten gesetzt. Die Qualität eines Baustoffs wird zunehmend nach der Nachhaltigkeit der verwendeten Rohstoffe und deren Recyclingfähigkeit beurteilt werden.

3.1.2 Wirtschaftliche Grundlagen

Die Anwendung industrieller Arbeitsmethoden im heutigen Bauwesen ist allgegenwärtig. Der damit verbundene Anspruch ist die Erstellung von Wohnraum in angemessener Qualität und ausreichender Quantität zu benutzergerechten Kosten. In [82] werden in diesem Zusammenhang grundlegende Begriffe erläutert. Der Industrialisierungsgrad wird durch den Umfang der Mechanisierung und Automatisierung der Bauleistungen gekennzeichnet. Der Vorfertigungsgrad ist definiert durch den Anteil vorgefertigter Bauleistung an der Gesamtbauleistung und unabhängig vom Industrialisierungsgrad. Die Automatisierung beschreibt den Anteil der computergesteuerten Prozesse in einer Produktion. Aufgrund der kleinen Serien im Bauwesen hat sich eine flexible Automatisierung etabliert, um auf vielseitig einsetzbaren Maschinen ähnliche Bauteile wirtschaftlich produzieren zu können. Die Mechanisierung beschreibt den Anteil der maschinellen Unterstützung der menschlichen Arbeitskraft.

Tab. 3-1 gibt einen noch immer aktuellen Überblick über die unterschiedliche Ausprägung dieser Faktoren in verschiedenen Baubereichen. Den höchsten Vorfertigungsgrad weisen bis heute unverändert Fertighäuser in Holztafelbauweise auf. Dies liegt in der kompletten Vorinstallation und der Fertigstellung der Elemente inklusive Dämmung bis zum Grundputz begründet. Der Maschineneinsatz zu deren Herstellung ist sehr hoch, aber aufgrund der individuellen Installationsarbeiten mit einem großen Anteil manueller Arbeit nur sehr gering automatisiert. Da Fertighäuser immer noch einen deutlichen Anteil an Ausbau- und Fertigstellungsaufwand nach der Montage erfordern, fällt der maximale Industrialisierungsgrad mit 70% relativ niedrig aus. In anderen Baubereichen ist der Anteil handwerklicher Bauleistungen deutlich höher, so dass Fertighäuser durchaus eine Vorreiterstellung einnehmen. Der Massivbau unterscheidet sich vorfertigungstechnisch hauptsächlich dadurch, dass nur die Leerrohre und Leerdosen für Installationen in den Wänden eingebaut werden, die gesamten Installationsarbeiten

aber erst nach der Montage auf der Baustelle erfolgen. Nur Heizungsleitungen werden in der Regel vollständig vorinstalliert und im Bereich von Montageausparungen miteinander verbunden. Dies gilt auch für Fertigteile für den Rohbau. Aufgrund des fehlenden Fassadenaufbaus reduziert sich der Vorfertigungsgrad für diese Elemente um 10-20%.

Tab. 3-1 Ausprägungsunterschiede der Vorfertigung, Mechanisierung, Automatisierung und Industrialisierung in verschiedenen Baubereichen (nach [82])

Bereich des Bauens	Vorfertigung	Mechanisierung	Automatisierung	Industrialisierung
Rationalisierter Wohnbau	25 – 35	40 – 50	0 – 5	10 – 25
Industrielle Baustellenverfahren	20 – 30	60 – 80	10 – 20	30 – 50
Fertigteile (Stahlbeton, Stahl, Holz)	40 – 60	50 – 70	10 – 20	40 – 60
Fertighäuser (Holz, Massiv)	50 – 80	60 – 90	15 – 25	50 – 70

Im Segment des Systemhausbaus gibt es neben den Markt dominierenden Holzhauskonstruktionen eine Vielzahl von Herstellern, die Häuser aus Massivbauelementen anbieten. Massivbaumethoden haben in Europa eine lange Tradition, die in der großen Leistungsfähigkeit dieser Bauweise begründet liegt. So weisen sie neben einer hohen Dauerhaftigkeit bauphysikalische Vorteile im Bereich des Schallschutzes und des sommerlichen Wärmeschutzes auf. Reine Betonbauteile verfügen jedoch über keinerlei Wärmeschutz. Während Stein- und Holzbauweisen ihre Dämmwirkung zunehmend durch die Integration von hochdämmenden Materialien innerhalb des Tragwerkquerschnitts steigern können, kann der entsprechende Wärmeschutz bei Betonelementen nur über die Addition einer separaten Dämmschicht mit Verputzung erzielt werden. Das erfolgt am wirtschaftlichsten unter Aufbringung eines Wärmedämmverbundsystems. Unter der Bedingung einer Sichtbetonwand kann die Integration einer Dämmschicht durch eine Sandwich-, eine Doppelwandkonstruktion, oder in Form einer Kerndämmung erfolgen. Diese sind infolge des erhöhten Fertigungsaufwands teuer und meist nur unter bestimmten ortsbedingten oder gestalterischen Anforderungen wirtschaftlich.

Der Werkstoff Leichtbeton bietet eine integrierte Dämmfunktion aufgrund des hohen eingebrachten Luftporenanteils. Die in den letzten Jahren vereinzelt errichteten Bauwerke in monolithischer Leichtbetonausführung stellen einen Idealzustand in der Verbindung von Material und Konstruktion dar. Der Werkstoff ist in der Lage sowohl die Dämm- als auch die statischen Funktionen im Bauwerk zu übernehmen. Mit dieser Bauart sind einige wertvolle Vorteile verbunden:

- + hochwertiges Gestaltungspotential in Sichtbeton
- + einschalige Herstellung der Wandbauteile; wirtschaftliche Herstellung
- + einfache Detailausbildung aufgrund der fehlenden ausgeprägten Dämmebene

Mit dem Inkrafttreten der EnEV 2007 wurde aber mit der Senkung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von Wandbauteilen der Nachteil deutlich, dass die Wärmeleitfähigkeit von Leichtbeton nicht in der gleichen Größenordnung reduziert werden kann, so dass die Einhaltung der Vorgaben nur mit steigenden Wandstärken erfüllt werden kann. Einschalige Leichtbetonwände müssen daher zur Erfüllung des Standards in einer unwirtschaftlichen Mindeststärke von 70 cm ausgeführt werden [74]. Die Industrie reagierte auf diese Situation mit der Addition einer Kerndämmung. Damit geht jedoch sowohl der Vorteil der einschaligen und damit einfachen Herstellung als auch die konstruktive Einfachheit des Wandaufbaus verloren. Beide Faktoren tragen maßgeblich zur Wirtschaftlichkeit der Bauweise bei. Die hervorragenden raumklimatischen und akustischen Eigenschaften bleiben davon unberührt.

Für die Herstellung oberflächenfertiger Sandwichelemente müssen höhere Preise als für Rohbaufertigteile kalkuliert werden. Dies liegt zum einen in einer erhöhten Genauigkeitsanforderung, die in der Folge zu einem erhöhten Schalungsaufwand führt. Zum anderen wird die Schalung oft nur einmal verwendet, um die Oberflächenqualität optimal kontrollieren zu können. Darüber hinaus entstehen zusätzlichen Kosten wegen der höheren Empfindlichkeit der Elemente bezüglich Lagerung, Transport und Montage. Andererseits entfallen die Kosten für den bauseitigen Fassadenbau.

Um weiterhin die aufgeführten Fertigungs- und Produktionsvorteile einschaliger Bauweisen unter der Bedingung wirtschaftlicher Wandstärken nutzen zu können, ist die Entwicklung einer leistungsfähigeren Leichtbetongeneration erforderlich. Dieses Material muss eine für die Fertigteilproduktion ausreichende Festigkeit sowie eine deutlich verringerte Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Ähnlich der Stein- und Holzbauweisen lassen sich auch im Betonfertigteilbau durch die Integration der Dämmfunktion zusätzliche wirtschaftliche Vorteile schaffen. Erklärtes Ziel ist die Entwicklung eines einfachen und kosteneffizienten Massiv-Bauverfahrens. Kann die angestrebte Qualitätssteigerung unter dem gleichzeitigen Gewinn wirtschaftlicher Vorteile erzielt werden, ist eine optimale Ausgangsposition für eine Markteinführung gegeben.

3.1.3 Gesellschaftliche Faktoren

In den vergangenen Jahren wurde Beton im Verwaltungs- und Wohnungsbau zunehmend in Sichtqualität zum Einsatz gebracht. Auch Fertigteile kommen in einem breit gefächerten Größenspektrum als Fassadenelemente zum Einsatz. Sogenannte Architekturbetonelemente zeichnen sich durch eine besonders sorgfältige Oberflächengestaltung aus. Fertigteile sind geradezu prädestiniert, die gestalterische Vielfalt von Beton zu nutzen, da die Randbedingungen im Werk für einen wirtschaftlichen Einsatz entsprechender Bearbeitungsverfahren besonders geeignet sind. In der Regel werden Fertigteile liegend hergestellt. Für die Herstellung einer besonderen Oberflächenqualität reicht es aus, nur die äußerste 2-3 cm starke Schale, den Vorsatzbeton mit den entsprechenden Zuschlägen, dem Zement bzw. der Einfärbung herzustellen, den Kernbeton jedoch in normaler Qualität auszuführen. Durch dieses Vorgehen kann ein erhebliches Volumen teuren Materials eingespart werden, ohne Qualitätseinbußen hinnehmen zu müssen. Wände in Ortbetonbauweise werden stehend hergestellt, so dass eine Betonqualität über die geschalte Wandstärke durchgehalten werden muss. Da eine Nachbearbeitung von Fertigteilen am noch mobilen Element erfolgt, werden

sie im Werk zu speziellen Stationen gebracht, wo die Arbeiten durchgeführt werden. Durch Absaugvorrichtungen und ein geschlossenes Prozesswassersystem kann umweltschonend sandgestrahlt, gewaschen und gesäuert werden. Auch sehr komplexe Gestaltungsanforderungen, wie fein gerasterte Auswaschungen für bildliche Darstellungen auf der Betonoberfläche können ausschließlich mit Fertigteilen realisiert werden. Die hohen Verfahrensanforderungen verlangen kontrollierbare Fertigungsbedingungen, wie sie auf einer Baustelle niemals gegeben sind.

Diese gestalterischen Möglichkeiten lassen Beton als Fassadenwerkstoff in einen Konkurrenzkampf mit anderen Fassadenverkleidungen treten, und nicht selten aufgrund seiner Vielseitigkeit gewinnen. So weisen eingefärbte und gesäuerte Betonoberflächen die Qualität einer Sandsteinoberfläche auf und ergänzen die bekannte Sprache des Sichtbetonbaus mit ihren möglichst glatten und einheitlichen Flächen. Die erzielbare Präzision und die Festigkeit des Werkstoffs lassen auch großformatige Elemente mit reduziertem Fugenanteil zu. Der Einsatzbereich erstreckt sich über alle Fertigteiltypen, von der dünnen Vorhangplatte für die Fassadengestaltung bis zum oberflächenfertigen Sandwichelement.

Diese neue materielle Qualität verhilft Beton zu einer intensivierten Anwendung bei repräsentativen Bauaufgaben wodurch auch das öffentliche Bild des Betonbaus beeinflusst wird. Ermutigt durch die Gestaltungsmöglichkeit und überzeugt von den wirtschaftlichen Vorteilen des vorgefertigten Elements greifen Planer verstärkt auf gestaltete Fertigteile zurück, und schaffen mit sorgfältig geplanten Wohnprojekten wie beispielsweise dem Projekt „PileUp“ in Rheinfelden oder einer 2008 neu errichteten Wohnanlage in Neu-Ulm (Abb. 3-1) Objekte von herausragender Qualität. So trifft man oberflächenfertige Betonelemente zunehmend im hochwertigen städtischen Umfeld an, und verhilft im Gegenzug dem Fertigteilbau in anspruchsvollen Projekten zur Ausführung.

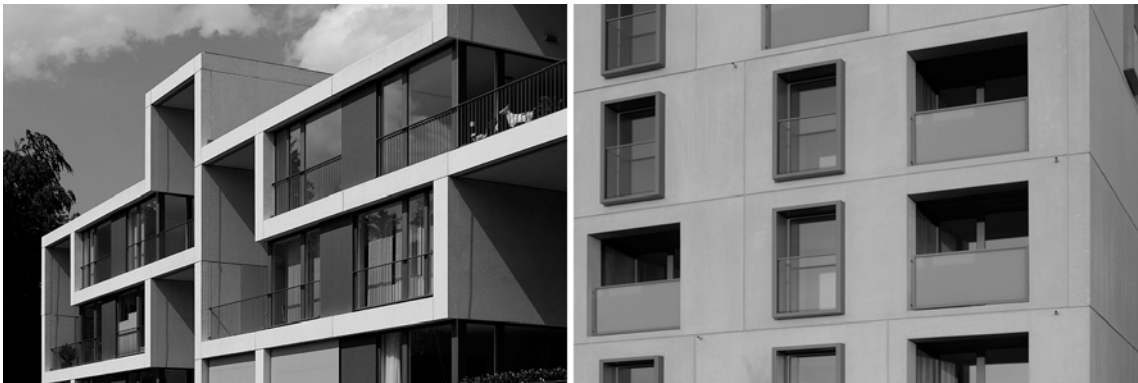


Abb. 3-1 Wohnbauprojekt PileUp (links) und Wohnbau in Neu-Ulm mit fassadenfertigen Bauteilen

3.2 Integriertes Konzept

Die Nachhaltigkeit eines Bauwerks definiert sich über verschiedene Faktoren. Einen großen Einfluss übt dass zum Einsatz kommende Material und die damit verbundene

Konstruktionsform des Bauwerks aus. Beton ist aufgrund des in der Herstellung energieintensiven Zementanteils von ca. 300-350 kg/m³ ein nur mäßig nachhaltiger Baustoff. Die Bilanz lässt sich jedoch durch die Beeinflussung anderer Faktoren deutlich verbessern. Eine Betonspezifische Eigenschaft ist dessen hohe Dauerhaftigkeit und damit einhergehend eine lange Lebensdauer der daraus gefertigten Bauteile. Durch flexible Nutzungskonzepte, die auf weitgespannten Räumen basieren, wird die Nutzungsdauer eines Gebäudes wesentlich verlängert, da sich nach einem abgeschlossenen Nutzungszyklus mit vergleichsweise geringem Umbauaufwand ein weiterer anschließen kann. Dadurch lässt sich der vollständige Primärenergieanteil, der für die Erstellung eines neuen Gebäudes erforderlich ist, einsparen.

Das in dieser Arbeit behandelte Konzept geht von der Prämisse aus, dass ein nachfolgender Nutzungszyklus nicht zwangsläufig durch eine neue Nutzung, sondern auch durch eine gleichartige Nutzung an einem anderen Ort gegeben sein kann. Dieser Ansatz impliziert die Demontage- und Remontagefähigkeit eines Gebäudes. Damit eine Wiederverwendung von Bauteilen wirtschaftlich ist, müssen vergleichsweise hohe Mindestanforderungen an Qualität und Dauerhaftigkeit erfüllt werden. Dieser Vorgabe wird durch den konstruktiven Aufbau und der Materialwahl der Elemente Rechnung getragen.

Mit der Plattenbau-Konstruktionsmethode steht die Grundlage für die Entwicklung eines lösbaren Verbindungskonzepts zur Verfügung. Bereits seit 40 Jahren werden einzelne Entwicklungsbemühungen für lösbare Verbindungen im Stahlbetontafelbau unternommen. Bisher war die Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Bauweise durch eine effektivere Montage die maßgebliche Triebfeder. Die Entwicklung einer lösbaren Verbindung aus dem Aspekt der Nachhaltigkeit stellt einen gesteigerten Anspruch an das Verbindungskonzept. Die Planung erfolgt nach den Anforderungen einer vollständigen Lebenszyklusbetrachtung des Bauteils, angefangen mit einer schnellen und effektiven Herstellung sowie Erstmontage aber genauso wichtig mit einer zerstörungsfreien Demontage und Remontage. Die postulierten Ansprüche führen im Vergleich zu bestehenden Verbindungstechniken zu wesentlich komplexeren Verbindungskonstruktionen.

Der Mehraufwand kann durch eine Aufwertung des Bauteils von einem Rohbauelement zu einem hochwertigen Montagebauteil aufgefangen werden. Ein erhöhter Vorfertigungsgrad wird durch die Integration zusätzlicher Funktionen erzielt. Die Hauptanforderungen an eine Wand werden durch die Statik, die Bauphysik, der Gebäudetechnik und der Gestaltung gestellt. Unter dem Leitmotiv der Nachhaltigkeit führt das integrierte Konzept die Ansprüche der genannten Bereiche durch die Möglichkeiten neuer Werkstoffe und Konstruktionen weitgehend synergetisch zusammen.

Auf der konstruktiven Seite lässt sich durch die Integration einer vollständig verlegten Medieninfrastruktur Zeit im Ausbau des Gebäudes sparen. Am Markt steht ein System zur Verfügung, das eine reversible Verbindung von Leitungssegmenten über die Fuge ermöglicht (siehe Abschnitt 3.2.1.1). Im Rahmen dieser Systematik wird auch die statische Verbindung der Bauteile organisiert. Die zerstörungsfreie Lösbarkeit liefert einen wichtigen Beitrag zur angestrebten Steigerung der Nachhaltigkeit.

Der Werkstoff Beton erfüllt in vielerlei Hinsicht die gestellten Anforderungen an das Bauteil. Durch den Einsatz von Leichtbeton erzielt man zusätzlich eine Reduzierung

des Eigengewichts, was sich günstig auf die Transport- und Versatzmöglichkeiten der Elemente auswirkt. Gleichzeitig eröffnet Leichtbeton die Möglichkeit, Anforderungen des Wärmeschutzes in der Wand zu integrieren. Im Rahmen des integrierten Konzepts kommt ein neuartiges Material zum Einsatz, welches die aktuellen Wärmeschutzvorschriften in monolithischer Bauweise mit wirtschaftlichen Wandstärken erfüllt (siehe Kap. 5). Durch den Wegfall eines mehrschaligen Aufbaus ergeben sich produktionstechnische Vorteile, wie eine einfache Herstellung und die leichtere Integration von Leitungsquerschnitten in einem Vollwandquerschnitt. Die Gefügedichtigkeit des Werkstoffs ermöglicht die Herstellung von oberflächenfertig und hochwertig gestalteten Betonelementen (siehe Abschnitt 5.5). Das Entfallen von Gewerken des Fassadenbaus beinhaltet somit ein weiteres Einsparpotential. Auf der anderen Seite müssen jedoch zusätzliche Aufwendungen aus dem erhöhten Nachbearbeitungsaufwand sowie der qualitativ anspruchsvolleren Herstellung und Produktlogistik berücksichtigt werden.

Die Fuge als Verbindungselement zwischen den Elementen spielt im integrierten Konzept eine zentrale Rolle. Unter der Vorgabe der Lösbarkeit hat sie zusätzlich alle bauphysikalischen Ansprüche des Wandelements auf engstem Raum zu erfüllen. Hier ist im Detail darauf zu achten, die Fuge zwischen den Elementen so zu konzipieren, dass keinerlei Nacharbeiten von außen erforderlich werden (siehe 6.3).

Abb. 3-2 zeigt die zu berücksichtigenden Anforderungen, die Eigenschaften der Elemente und die sich daraus ergebende Beeinflussung verschiedener Nutzparameter.

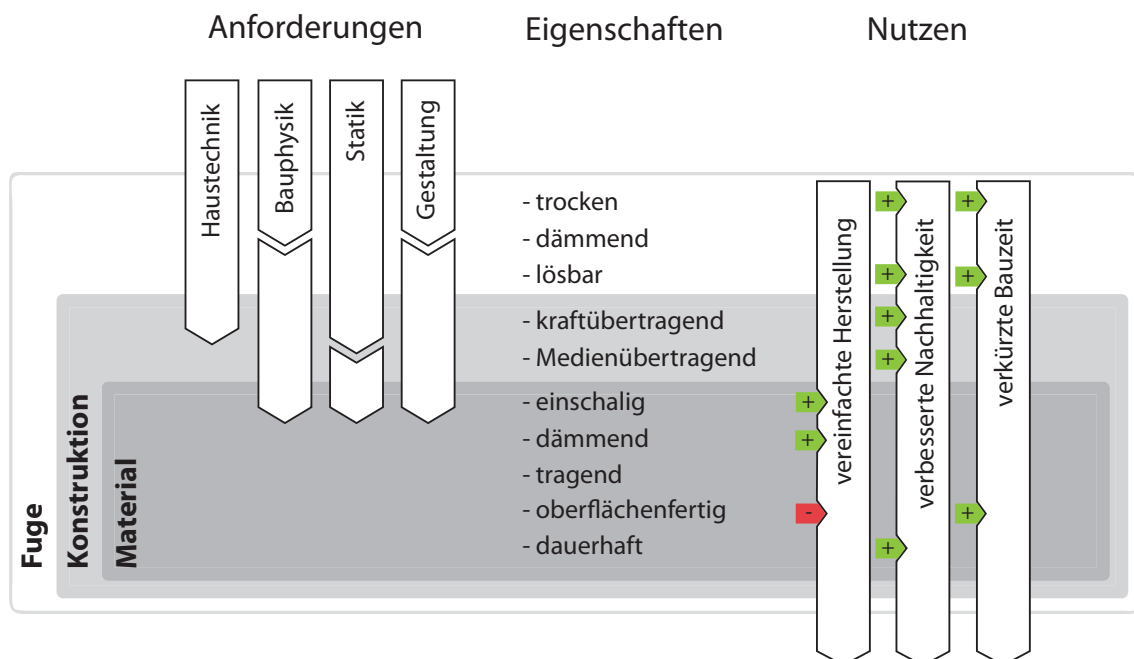


Abb. 3-2 Bausteine des Integrierten Konzepts

3.2.1 Lösbare Verbindungselemente

Die Lösbarkeit einer Verbindung ist schon immer ein wesentlicher Konstruktionsanspruch für temporär errichtete Gebäude gewesen. Diese Bauten werden planmäßig so konzipiert, dass sie nach einer festgelegten Lebensdauer demontiert und sehr häufig

auch wiederverwendet werden können. Generell ist damit auch eine Transportaufgabe verbunden, weshalb für diese Bauwerke eher leichte Materialien zur Anwendung kommen. Man spricht von mobilen oder fliegenden Bauten. Der Begriff „temporär“ kann sehr relativ verstanden werden. Dehnt man die betrachtete Zeitspanne nur lang genug aus, fällt nahezu jedes Bauwerk unter diese Betrachtungsweise. Aus den verschiedensten Gründen ist es sinnvoll, Bauwerke als temporär anzusehen. Aufgrund sich beschleunigender Modernisierungszyklen veralten Gebäude immer schneller. Entweder weisen sie eine ausreichende Flexibilität für Modernisierungs- und Umnutzungsmaßnahmen auf, oder sie werden abgebrochen, wobei eine recyclinggerechte Nachnutzung obligatorisch ist. Bevor eine stoffliche Verwertung erfolgt, sollte unbedingt eine Wiederverwendung der Bauteile in Betracht gezogen werden.

Betonfertigteile gelten grundsätzlich als demontagefähig. Die DIN 18007 [13] stuft ein Bauteil als demontierbar ein, wenn die Verbindungen leicht lösbar und zugänglich sind. Nach [41] werden Verbindungen im Stahlbetontafelbau als lösbar klassifiziert, wenn:

- die Entfernung des Mörtels ohne Beschädigung des Bauteils möglich ist.
- es sich um eine Schraubverbindung handelt.
- es sich um eine Schweißverbindung handelt.

Je hochwertiger das Vergussmaterial gewählt wurde, umso schwieriger ist die Freilegung der Verbindungsstelle. Wurde die Verbindung direkt über den Fugenverguss hergestellt, ist meist die Zerstörung der Fuge unumgänglich. Die Einstufung als lösbare Verbindung beruht auf Versuchsergebnissen [9]. In der Planungsphase wurde eine spätere Lösbarkeit der Verbindungen in keiner Weise berücksichtigt. Die Bedingungen zur Durchführung einer Demontage sind daher auch nicht ideal und führen immer wieder zu Beschädigungen der Bauteile. Viele Rückbaumaßnahmen an Plattenbauten konnten auch nur deswegen erfolgreich durchgeführt werden, da der Vergussmörtel von minderwertiger Qualität war und zu keinem Zeitpunkt die planmäßige Festigkeit aufwies [49]. Für Neubauten wird die Demontage ein fester Abschnitt des vorgesehenen Lebenszyklus. Daher muss auch die Verbindungstechnik der verwendeten Bauteile auf diese Anforderung hin abgestimmt sein.

Für die Ausbildung einer lösbaren Verbindung bei Fertigteilen gibt es bereits zugelassene Systeme auf dem Markt [61]. Sie beschränken sich in Ihrer Anwendung fast ausschließlich auf Skeletttragwerke. Dieser Tragwerkstyp ist vermehrt im Industrie- und Logistikbau anzutreffen und stellt den Trivialfall dar, da die Knotenpunkte meist allseitig zugänglich sind, und nur die Aufgabe der Kraftübertragung haben [81]. Aufgrund des hohen Kostendrucks wird jedoch nur bei besonderen Anforderungen an das Bauwerk und den Bauablauf auf Einbauteile zurückgegriffen, da deren Verwendung mit erheblichen Mehrkosten verbunden ist. Aus wirtschaftlichen Gründen wird eine Verbindung technisch möglichst einfach durch Verguss ausgeführt. Eine Entscheidung für Einbauteile fällt immer aus Gründen der Montage oder besonderen statischen Anforderungen, da verschraubte oder geschweißte Verbindungen im Gegensatz zu Verguss einen sofortigen Kraftschluss gewährleisten und damit keine Verzögerungen durch einzuhaltende Aushärtungszeiten auf den Fortgang der Montagearbeiten ausüben. Aus Brandschutz- und Korrosionstechnischen Gründen werden auch diese Verbindungen vergossen. Das Entwicklungsziel dieser Verbindungen ist auf die Herstellung eines

schnellen Kraftschlusses unter Berücksichtigung der erforderlichen Toleranzen ausgerichtet. Aspekte der Nachhaltigkeit wurden dabei nicht in Betracht gezogen.

Im Forschungsprojekt PRODOMO (1997-2001) des IFF Weimar wurden erstmals lösbare Bauteilverbindungen sowohl für den Skelettbau als auch für Wandbauteile im Hinblick auf die Anforderungen des Rückbaus und der Wiederverwertung entwickelt (Abb. 3-3). Die damit verbundenen Bauteile wurden erstmals oberflächennah mit einem RFID-Chip ausgestattet, der technische Informationen der Bauteile speichert. Dadurch wird auch nach vielen Jahren das berührungslose Auslesen der wichtigsten Bauteileigenschaften möglich sein [49]. Bei der Ausführung des Pilotprojekts mit Wandbauteilen wurde als Nebeneffekt eine deutlich beschleunigte Bauausführung beobachtet.

Seit Mitte der 70er Jahre wurden für Wandbauteile vereinzelt Konzepte untersucht, die eine spätere Demontierbarkeit der Gebäude bereits in der Planungsphase berücksichtigen. Da der Planer auf keine gebrauchsfertige Lösung zurückgreifen kann, wurden nur einige wenige Demonstrationsprojekte realisiert (z.B. [38]). Die bisherigen Bemühungen beschränkten sich auf die Entwicklung von Systemen zur lösbaren Verbindung von Tragwerkselementen im Rohbau.

Erschwerend wirkt sich dabei die Tatsache aus, dass es keinerlei technische Regeln gibt, die sich speziell mit der Wiederverwendung von Bauteilen befasst. Die Verwendung gebrauchter Bauteile ist mit einem wiederholten Nachweis der Trag- und Gebrauchsfähigkeit verbunden. Da Materialeigenschaften jedoch einer zeitlichen Änderung unterliegen, müssten als Voraussetzung zeitabhängige Werte als Grundlage der Neubewertung ermittelt werden. Am einfachsten erfolgt eine Wiederverwendung deshalb unter gleichbleibender Nutzungsanforderung [49].

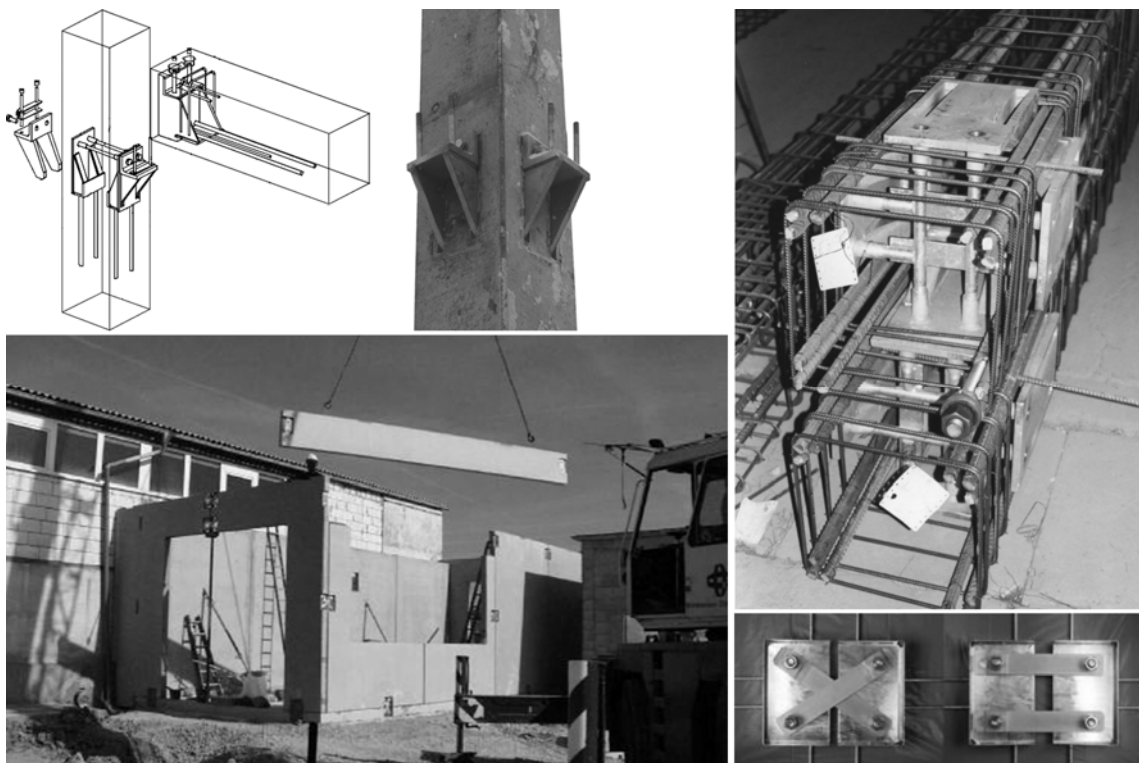


Abb. 3-3 Lösbare Verbindungen des IFF-Projekts PRODOMO für Skelett- und Wandbauteile [49]

2008 wurde in Spanien das Konzepthaus „Casa Kyoto“ aus Betonfertigteilen realisiert. Der Entwurf des Hauses folgt einem bioklimatischen Konzept mit reduzierter Sonneneinstrahlung und der Ausnutzung der hohen thermischen Masse von Beton. Die Energiegewinnung erfolgt durch die Kopplung von Solarthermie und Photovoltaik mit Erdwärme. Die Betonelemente wurden auf Neoprenstreifen gelagert und mit Hilfe von verschraubten Stahllaschen lösbar miteinander verbunden (Abb. 3-4). Die Demontierbarkeit unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit war ein Kriterium der Projektentwicklung [62].



Abb. 3-4 Casa Kyoto (HP Pich-Aguilera) - Demontierbares Gebäude aus Betonfertigteilen (aus [28])

3.2.1.1 System Munitec

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde ab 2001 ein Verbindungssystem für die kombinierte Kraft- und Medienübertragung entwickelt [64]. Während für die Herstellung einer kraftschlüssigen Verbindung bereits eine Vielzahl an baulichen Lösungen existiert, bietet dieses Konzept eine Komplettlösung für die Verbindungsaufgabe im Fertigteilbau mit dem Ziel, die Gesamtbauzeit von Gebäuden deutlich zu verkürzen. Neben einer Beschleunigung des Bauablaufs wird auch die Demontierbarkeit als Entwicklungsziel genannt. Diese neue Systematik wurde Anfangs auf die Bedürfnisse des Holzbaus ausgerichtet. Erst mit der Ausgründung als Unternehmen folgte die erweiterte Anwendung auf Betonfertigteile, wobei der entwickelte Statik-Verbinder PowerCon nur für eine temporäre Fixierung des Bauteils während der Montage vorgesehen ist. Die dauerhafte Herstellung der Verbindung erfolgt auch in diesem Fall über einen Fugenverguss. Das Verbindungssystem Munitec stellt jedoch aufgrund seiner Funktionalität einen wichtigen Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung im Rahmen des in dieser Arbeit vorgestellten integrierten Konzepts dar. Mit Hilfe von experimentellen Bauteiluntersuchungen (siehe Kap.7, S.87) und einer ergänzenden numerischen Simulation eines Beispielgebäudes wird deshalb untersucht, inwieweit das System zu einer vollständigen Ausbildung der statisch wirksamen Bauteilverbindung herangezogen werden kann.

Fertigteile können mit diesem System im Werk statt nur mit Leerrohren mit konfektionierten Kabelsträngen und Installationsleitungen vorgefertigt werden. Die Kopplung der Einzelstränge erfolgt während der Montage durch das Zusammenstecken von Verbinderpaaeren in der Elementfuge (Abb. 3-5). Zu diesem Zweck werden Medienverbinder entlang der Fugenkante des Elements übereinander angeordnet. Bei der Montage fahren alle Verbinder gleichzeitig ineinander und stellen damit den Leitungsschluss zwi-

schen den Bauteilen her. Die sichere Fügung der Bauteile wird durch die Kraft übertragenden Verbinder PowerCon hergestellt, die zuerst in eine Führung einfädeln. Erst im Anschluss erfolgt die Fügung der empfindlicheren Medienverbinder mit den integrierten Steckern [65]. Durch die Anwendung dieses Verbindungssystems wird eine Erhöhung des Vorfertigungsgrades und eine Verkürzung der Ausbaueiten vor Ort möglich.

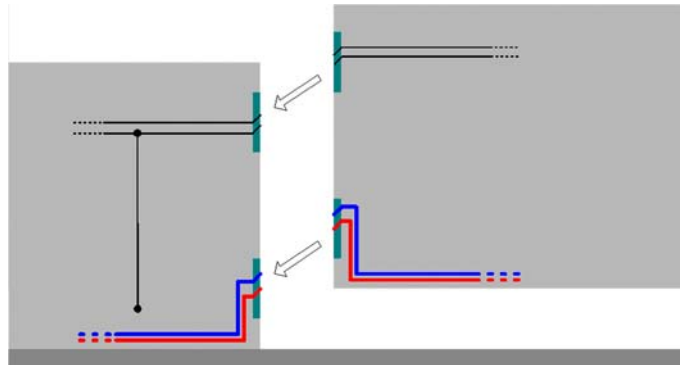

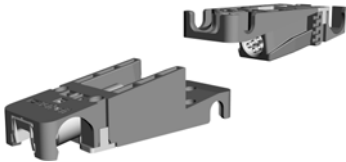


Abb. 3-5 Fügungsprinzip der Leitungsführung in der Fuge (aus [65])

Das System Munitec stellt einen geschlossenen Baukasten mit funktional unterschiedlichen Elementen dar. Tab. 3-2 gibt eine Übersicht der existierenden Elemente und deren Funktion. Die jeweiligen Typen werden nach Bedarf an den Schnittstellen eingesetzt wobei die Anordnung der Verbinder nach einer strikten Systematik zu erfolgen hat, um deren einwandfreie Passung am Nachbarelement zu gewährleisten. Aufgrund der Funktionsweise des Systems entsteht eine Abhängigkeit der beiden zu verbindenden Bauteile bezüglich der Montagereihenfolge. Da die Verbinder nur in eine Richtung gefügt werden können, ist die richtige Orientierung der Elemente von großer Bedeutung. Die Montageplanung muss daher gemeinsam mit der Fertigungsplanung erfolgen, um die festgelegte Reihenfolge auch in der Fertigung zu berücksichtigen. Die zuverlässige Verarbeitung der Informationen ist eine wichtige Anforderung an das verwendete CAD-System.

Tab. 3-2 Komponenten des Munitec Verbindersystems

Komponente	Bezeichnung/Aufgabe	Einbaulage
	PowerCon Stahlbauteil zur Kraftübertragung zwischen Wandtafeln und Deckenplatten	Vertikalfuge Wand Horizontalfuge Decke
	EnerCon Kunststoffbauteil mit Stecker für Übertragung von Strom, TV-Signal, Internet	Vertikalfuge Wand Horizontalfuge Decke

	<p>AquaCon Kupplung zur Übertragung von Flüssigmedien (Frischwasser Heizung; Kollektor)</p>	<p>Vertikalfuge Wand Horizontalfuge Decke</p>
	<p>Sanicon (in Ø 50 mm und Ø 90 mm) Übertragung von Flüssigmedien (Abwasser, Regenablauf)</p>	<p>Vertikalfuge Wand Horizontalfuge Decke</p>
	<p>PowerClip Kraftübertragung von Platte – Scheibe und Scheibe – Platte</p>	<p>Fuge Wandfuß Fuge Wandkopf</p>

3.2.1.2 Einfluss der Digitalisierung

CAD stellt für die heutige Planungsarbeit ein unverzichtbares Werkzeug dar. Die Software unterstützt den Planer nicht nur beim Entwurf sondern auch bei der Organisation und der Verwaltung der Bauteile. Innerhalb eines Büros werden Projektdaten zentral auf einem Server gespeichert, um deren Zugänglichkeit durch mehrere Mitarbeiter sicherzustellen. Das Internet ermöglicht die Ausdehnung dieser Organisationsstruktur über örtliche Grenzen hinaus auf beteiligte Projektpartner, so dass eine integrale Planung mit den heutigen technischen Standards problemlos möglich ist. Neben der Hardware muss jedoch auch die Software eine vernetzte Planungsstruktur unterstützen.

Um einen konsistenten und fehlerfreien Planungsprozess zu ermöglichen, erfolgt die Modellierung von Objekten zunehmend in 3D. Obwohl sich diese Vorgehensweise zuerst bei geometrisch komplexen Projekten etabliert hat, lassen sich dadurch auch bei einfachen Projekten effektiv Fehler vermeiden. Alle relevanten Informationen werden somit innerhalb eines Modells verwaltet. Der anspruchsvolle sowie Zeit- und kostenintensive Teil einer Planung ist die Anpassung und Übersetzung der Bauteile in für die Fertigung lesbare Formate. Dazu zählt sowohl die Erstellung von Plänen als auch die Generierung direkt lesbarer Datensätze für CNC gesteuerte Maschinen. In diesen beiden Bereichen ist der Anteil manueller Arbeit sehr groß [33]. Die Entwicklungstendenz für den Verwertungsprozess der CAD-Daten wird daher durch eine zunehmende Automatisierung und Parametrisierung gekennzeichnet. Dies wird durch die Ergänzung der rein geometrischen CAD-Daten mit zusätzlichen Informationen ermöglicht.

Die Organisation der Daten erfolgt in einer zentralen Datenbank die dem CAD-Modell übergeordnet ist. Auf dieser Ebene lassen sich die einzelnen Elemente des vollständigen Bauwerks in einen logischen Bezug zueinander bringen. Dies kann sehr vielseitig für die gesamte Projektsteuerung genutzt werden. Ein besonderer Vorteil ergibt sich jedoch durch die Möglichkeit der Rückkopplung von Informationen, die aus einer daraus abgeleiteten Planung gewonnen werden. Im Beispiel der Montageplanung werden die festgelegte Reihenfolge und die Topologie der Elemente bauteilbezogen abgespei-

chert (Abb. 3-6). Diese Informationen können bei der Erstellung von Werkplänen dazu verwendet werden, die in den Fugen angeordneten Verbinderelemente korrekt zu orientieren (Informationsfluss dargestellt durch die grünen Pfeile). Die logische Verknüpfung ermöglicht auch bei Änderungen eine konsistente Behandlung der Verbindungssystematik. Die Gliederung des Verbindungssystems in Kraft übertragende Bauteile und in Elemente des technischen Ausbaus hat deren Implementierung durch unterschiedliche Planungssegmente zur Folge. Alle gesetzten Elemente unterliegen jedoch der Verknüpfung mit den nachfolgenden Planungsebenen, so dass immer eine fehlerfreie Orientierung gewährleistet ist.

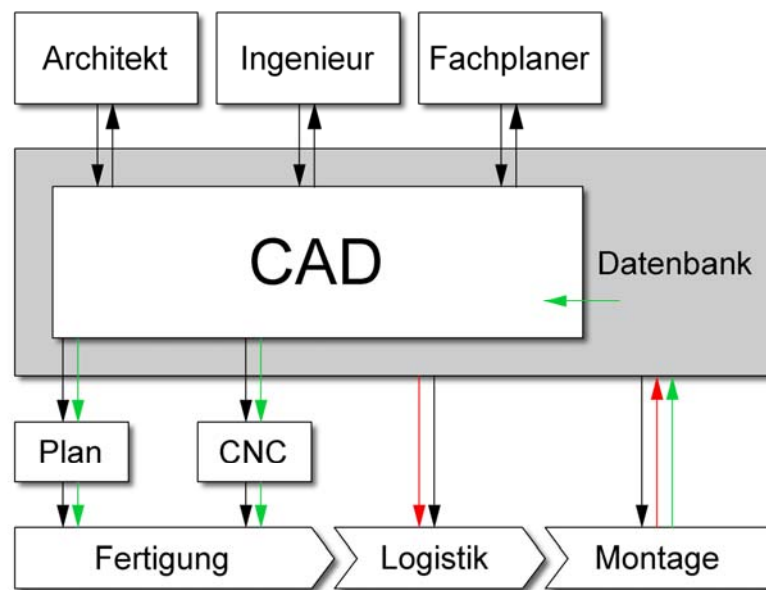


Abb. 3-6 Ablauf eines integrierten Planungsprozesses

Eine derartige Datenbank ermöglicht die umfassende Abstimmung und Kontrolle von nacheinander abfolgenden Planungsprozessen. Diese Entwicklungstendenz wurde durch Bedürfnisse des Qualitätsmanagements angestoßen und ist bereits heute in einzelnen Softwarelösungen umgesetzt. Um ein Schnittstellensystem, wie das vorgestellte, wirtschaftlich einsetzen zu können, stellt diese Entwicklung eine notwendige Voraussetzung dar. Da diese Form der Rückkopplung in der Praxis bislang noch nicht erforderlich war, wird diese Systematik in Zusammenarbeit mit der Firma Nemetschek entwickelt und in das Programmsystem Allplan Precast implementiert. Das Produkt weißt bereits eine hochgradige Ausrichtung auf die Anforderungen moderner Fertigteilwerke auf. Dies äußert sich in einer Vielzahl automatischer Abwicklungsprozesse zur Werkplanerstellung bis hin zur automatischen Generierung von CNC-Datensätze für die maßgeschneiderte Produktion von Bewehrungsmatten oder dem Setzen der Seitenabsteller durch einen Schalroboter.

Durch die Integration der Ausbaugewerke Wasser- und Elektroinstallation in den Fertigungsprozess muss deren Planung früher als bisher erfolgen. Als Grundlage steht das dreidimensionale CAD-Modell zur Verfügung, um die erforderlichen Informationen zu ermitteln. Dies schließt ebenfalls die Planung der aus der Wandebene führenden

Schnittstellen mit ein. Darunter fallen beispielsweise Solarmodule, Heizungsanlagen aber auch Bad- und Küchenanschlüsse.

3.2.2 Einschalige Wandbauweise

In [72] stuft der Autor den Betongroßplattenbau aufgrund seiner mangelnden Flexibilität als nicht fortschrittlich ein. Er räumt dem Skelettbau aus diesem Grund mehr Chancen ein, sich als Bausystem am Markt durchzusetzen. Diese Einschätzung erfolgte zu einem Zeitpunkt, als digitale Werkzeuge noch keine Rolle spielten und Bauwerke aus Betonplatten einem starken Rasterzwang unterworfen waren. Tatsächlich zeigten sich in den Folgejahren Entwicklungstendenzen in Richtung Skelettbau, die einen Höhepunkt in den Bauten Otto Steidles fanden. Eine große Stärke von Beton ist jedoch seine Raum bildende Qualität. Seine Verarbeitung mit Gussmethoden lässt sich am einfachsten in liegenden und flächigen Bauteilen durchführen. Unter dem Aspekt der Multifunktionalität von Wänden, ist die „Platte“ durchaus als ein sehr fortschrittliches Element zu sehen. Digitale Planungswerkzeuge ermöglichen heute in Verbindung mit halbautomatischen Fertigungsverfahren die Herstellung individualisierter Bauteile.

Ein weiterer großer Vorteil liegt in der additiven Vorgehensweise bei der Herstellung von Bauteilen. Anstatt Aussparungen für Einbauten in einem bereits bestehenden Bauteil vorsehen zu müssen, erfolgt im Betonbau zuerst der lagenweise Bewehrungseinbau in die leere Schalung. Dazwischen erfolgt der Einbau der Leitungsführung, die an der Bewehrung fixiert werden kann. Erst durch das Betonieren wird das bereits voll integrierte Bauteil erstellt. Flächige Bauteile bieten für die Leitungsführung maximale Flexibilität. Einschränkungen müssen nur durch Öffnungen und durch die vorhandene Schichtstärke hingenommen werden. Die Leitungen müssen sowohl innerhalb der Dämmebene als auch innenwandnah geführt werden, so dass geometrisch dafür nur die Tragschale in Frage kommt (Abb. 3-7). Zieht man den Platzbedarf für Bewehrung und deren Überdeckung ab, bleibt bei regulären Tragwandstärken nur wenig Platz, um alle Leitungsquerschnitte zu integrieren. Die Trennung der Wand in Funktionsschichten verbietet eine schichtübergreifende Leitungsführung. Nur durch eine Zusammenfassung von Funktionen in einem Wandaufbau durch einen Werkstoff kann die definierte Trennung der Schichten aufgehoben werden. Dies hat den Vorteil, dass für die Integration der Leitungen ein vergrößerter Bauraum zur Verfügung steht. Des Weiteren sind einschalige Wandbauteile sehr wirtschaftlich herzustellen, da Sie jeden Prozessschritt nur einmal durchlaufen müssen. Monolithische Wandaufbauten findet man bspw. bei Bauwerken aus Leichtbeton. In den letzten Jahren sind interessante Beispiele aus gefügedichtem Leichtbeton entstanden, die sowohl eine tragende als auch eine dämmende Funktion erfüllen. Dies wird durch eine zunehmende Reduktion der Rohdichte erreicht, die eine Absenkung der Wärmeleitfähigkeit und damit des U-Werts der Wand bewirkt.

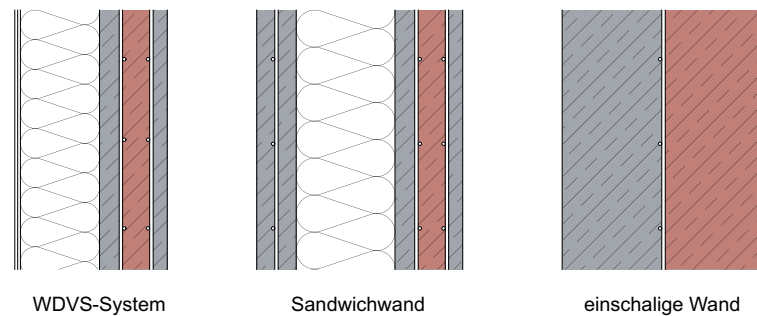


Abb. 3-7 Bauraum (dunkelgrau) für Leitungsführung in verschiedenen Wandaufbauten

Leichtbeton wird in Deutschland erst seit ca. 50 Jahren im konstruktiven Ingenieurbau eingesetzt. Ging es zunächst hauptsächlich um die Reduktion des Eigengewichts zur Optimierung statischer Reserven, erkannte man recht schnell die verbesserte Dämmfähigkeit des Materials als Vorteil bei der Errichtung besonders einfach konstruierter Bauwerke. Da mit Leichtbeton ohne Wärmebrücken monolithisch gebaut werden konnte, kam der Werkstoff bereits in den 70er Jahren bei ersten Siedlungsbauten (Siedlung Thalmatt, Atelier 5) zum Einsatz [31]. Die Energiekrisen dieses Jahrzehnts und die daraus resultierende Verschärfung der Wärmeschutzverordnung ließen diese Bauweise eine unbedeutende Randerscheinung bleiben. Vor 10 Jahren wurde von der Firma Liapor ein Isolationsbeton entwickelt, der den damaligen Vorgaben des Wärmeschutzes mit Wandstärken von 50 cm genügte und einige interessante Bauten mit einem monolithischen Wandaufbau aus Leichtbeton ermöglichte. Dieser Beton wurde erstmals im Haus Gartmann in Chur zum Einsatz gebracht (Abb. 3-8). 2006 wurde erneut die Rezeptur von gefügedichtem Leichtbeton den gestiegenen gesetzlichen Anforderungen angepasst und beim Bau des Wohnhauses Schlaich in Berlin eingesetzt [71].



Abb. 3-8 Gebaute Beispiele in monolithischer Leichtbetonbauweise (von links): Haus Gartmann - Haus Trager - Haus Schlaich (Quelle Liapor)

Diese Entwicklung zeigte bereits die Grenzen der technischen Machbarkeit auf, die durch den Einsatz poröser Zuschläge in Kombination mit einer poroisierten Matrix erreicht werden kann. Derzeit gibt es keinen lufthärtenden Leichtbetonwerkstoff, der die Errichtung eines einschaligen Gebäudes mit einer wirtschaftlich vertretbaren Wandstärke verordnungsgerecht zulässt. Mit einer fortschreitenden Steigerung des Luftporenvolumens der Matrix relativiert sich nicht nur deren Festigkeit, sondern auch deren

Gefügedichtigkeit, was als weitere Problematik eine beschleunigte Carbonatisierung und den damit verbundenen Verlust des Korrosionsschutzes der Bewehrung nach sich zieht.

Der Grenzwert des Wärmeschutzes für Außenbauteile liegt mit der EnEV 2009 bei $0,24 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Dieser Wert soll mit der nächsten Anpassungsstufe 2012 voraussichtlich um weitere 30% gesenkt werden, und liegt damit im Anforderungsbereich für Passivhäuser (vgl. Abb. 5-13 S.53). Selbst neueste Leichtbetonentwicklungen sind unter diesen Voraussetzungen nur mit der Addition einer Zusatzdämmung in der Lage, die geforderten Grenzwerte einzuhalten.

2008 stellte das DLR [66] einen neuen Leichtbetonwerkstoff vor, der mit Aerogelen als Zuschlag eine außerordentlich verbesserte Dämmwirkung aufweist. Aerogele können vereinfacht als nanoporöser Glasschaum betrachtet werden, so dass dieser speziell als Brandschutzelement entwickelte Werkstoff über einen rein mineralischen Aufbau verfügt. Die grundlegende Idee, Aerogele in einer Zementmatrix zu einem Verbundwerkstoff zu binden, wurde erstmals in den 90er Jahren von der Firma Hoechst patentiert [36].

In dieser Arbeit wird dieser Ansatz als Ausgangspunkt zur Entwicklung eines tragfähigen und hochdämmenden Leichtbetonwerkstoffs für die Anwendung im Wohnungsbau genutzt. Die Entwicklungsgrundlagen und erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 5 beschrieben. Kapitel 4 gibt eine Übersicht der erzielten Leistungsparameter der heute zur Verfügung stehenden Leichtbetonmaterialien und erläutert deren Funktionsweise.

4 Mesoporöser Leichtbeton

Ein gemeinsames Merkmal aller Leichtbetone ist die gegenüber Normalbeton deutlich reduzierte Rohdichte. Mit der Rohdichte korrelieren einige wichtige Materialeigenschaften. Beispielsweise reduziert sich mit sinkender Rohdichte die Wärmeleitfähigkeit von Beton. Damit nehmen jedoch auch die Festigkeit und der E-Modul ab. Eine anwendungsbezogene Einteilung von Leichtbeton in konstruktiv, konstruktiv-wärmedämmend und ausschließlich wärmedämmend wird in nachfolgender Tabelle über festgelegte Rohdichtebereiche definiert.

Tab. 4-1 Anwendungsbezogene Einteilung von Leichtbeton (aus [83])

Bezeichnung	Trockenrohddichte [kg/dm ³]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Wärmeleitfähigkeit λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
Konstruktiv	2,0 – 1,2	60 - 15	1,2 – 0,5
Konstruktiv-wärmedämmend	1,2 – 0,6	15 – 2,5	0,5 – 0,2
wärmedämmend	0,6 – 0,2	2,5 – 0,2	0,2 – 0,05

4.1 Grundlagen

4.1.1 Porosität

Das Gesamtporenvolumen eines Leichtbetons ist ein maßgeblicher Indikator für dessen Dämmeigenschaft, da Luftporen aufgrund ihrer schlechten Wärmeleitfähigkeit eine isolierende Wirkung haben. Als Luftporen werden Poren mit einem $\varnothing > 1\text{mm}$ bezeichnet. Das Einbringen dieser Poren erfolgt über verschiedene Mechanismen.

- Haufwerksporiger Beton entsteht durch das Weglassen von Mittel- und Feinkornfraktionen und einer gleichzeitigen Reduktion der Zementleimmenge. Die vereinheitlichte Kornfraktion wird nur punktuell miteinander verklebt und bildet Hohlräume zwischen dem Korn aus. Aufgrund der durchgehenden Vernetzung der Hohlräume ist der Beton gasdurchlässig, so dass eine eingelegte Bewehrung nicht korrosionsgeschützt ist (Abb. 4-1 links).
- Für kornporige Betone werden bestimmte Kornfraktionen durch poröse Zuschläge ersetzt. Diese können natürlicher Herkunft (Perlit, Bims, Tuffstein) oder künstlich hergestellt (Blähton, Blähglas) sein. Korn und Zementleim bilden wie bei Normalbeton ein geschlossenes Gefüge (Abb. 4-1 Mitte).
- Luftporen können über Schäume auf Protein-Basis direkt in das Mörtelgemisch eingebracht werden. Mit dieser Methode kann über die exakt definierte Luftmenge die Rohdichte sehr genau eingestellt werden. Bei Schaumbeton werden aufgrund der Entmischungsfahr keine groben Zuschläge verwendet. Da sich der Schaum mit bestimmten Zusatzmitteln instabil verhält, ist eine Beeinflussung der Betonei-

genschaften mit weiteren Additiven immer mit einer Verträglichkeitsprüfung verbunden.

- Durch die Zugabe eines Luftporenbildners (LP) wird im Zuge des Mischprozesses ein fein verteiltes Porennetzwerk im Zementstein gebildet (matrixporig). Für einen wärmedämmenden Leichtbeton wird ein maximaler LP-Einsatz angestrebt, der nur durch eine zu starke Porenbildung an der Oberfläche oder durch die erheblichen Festigkeitsverluste der Matrix begrenzt ist. Die geschlossenen Poren verbinden sich bei höherer Konzentration zu offenporigen Bereichen, weshalb eine wesentlich höhere Karbonatisierung beobachtet wird, als es sonst bei gefügedichtem Leichtbeton zu erwarten ist. Die Abgrenzung zur Haufwerksporigkeit ist nicht geregelt.
- Für die Herstellung von Porenbeton wird Aluminiumpulver als Treibmittel benutzt [40]. Das bei dem chemischen Prozess entstehende Wasserstoffgas lässt ein geschlossenzelliges und fein verteiltes Porennetzwerk entstehen (Abb. 4-1 rechts).

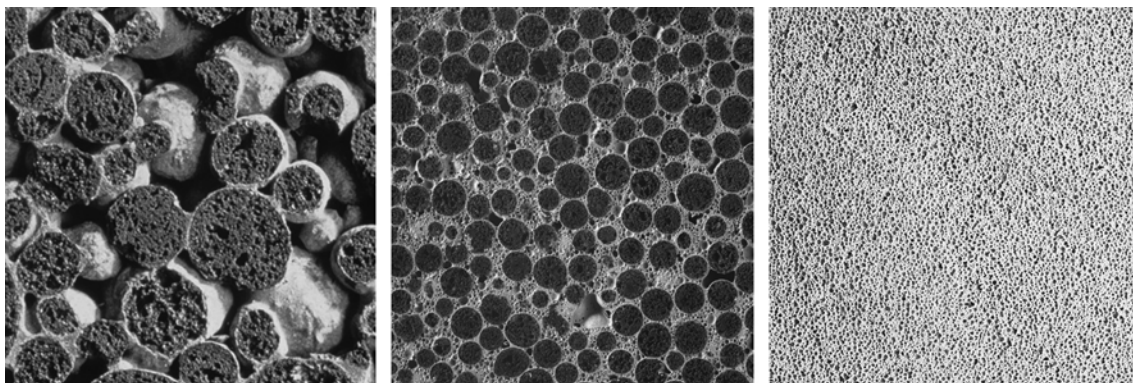


Abb. 4-1 Porigkeit von Leichtbeton (Quelle: Liapor, BV Porenbeton)

Die beschriebenen Mechanismen werden auch in Kombination angewendet. So werden besonders wärmedämmende, haufwerksporige Betone mittels poröser Zuschläge hergestellt. Um die Festigkeitseigenschaften ohne Beeinträchtigung der Wärmeleitfähigkeit zu verbessern, werden die Haufwerksporen volumenstabil mit Schaumbeton gefüllt, was zu einer Strukturhomogenisierung führt [34]. Die Steigerung der Matrixporigkeit bei gefügedichtem Leichtbeton verringert neben der Wärmeleitfähigkeit auch den Dichteunterschied zwischen Zuschlag und Matrix und reduziert damit die Gefahr der Entmischung.

Neben dem absoluten Porenanteil ist auch noch die Porenstruktur von großem Interesse für die Klassifizierung eines Zuschlags. Die anteilige Verteilung an geschlossenen und offenen Poren bestimmt einige wichtige Eigenschaften des Zuschlags, wie beispielsweise das Saugvermögen.

4.1.2 Porige Zuschläge

Die verwendeten porigen Zuschläge können natürlicher oder künstlicher Herkunft sein. Natürliche Zuschläge weisen eine sehr unregelmäßig gestreute Kornform auf, was die Festigkeitseigenschaften des fertigen Betons stärker streuen lässt, als es bei Beton mit industriell und damit gleichförmiger hergestellten Zuschlägen der Fall ist. Als Standard-

zuschläge für den konstruktiven und konstruktiv-wärmedämmenden Einsatzbereich haben sich geschäumtes Glas- und Blähtongranulat etabliert. Natürliche Leichtzuschläge werden in großen Mengen hauptsächlich zur Herstellung von Leichtbetonprodukten wie Mauersteine eingesetzt.

4.1.2.1 Kornrohddichte

Ein wichtiges Kriterium für die Charakterisierung der Korneigenschaften ist die Kornrohddichte. Abb. 4-2 gibt eine Übersicht der Rohdichtebandbreite der am häufigsten in Deutschland und der Schweiz verwendeten Zuschläge. Für Betone mit einer besonders niedrigen Wärmeleitfähigkeit können nur Zuschläge von geringer Dichte verwendet werden. Umgekehrt können hohe Druckfestigkeiten nur mit einem festen Korn erzielt werden. Der Blähton Liapor erfüllt aufgrund der weiten Produktionsbandbreite beide Anforderungen, ist tendenziell aber eher auf die Anwendung im konstruktiven Bereich ausgerichtet. Wärmedämmende Betone nutzen daher die Kombination von Glas- (Liaver) und Blähtongranulat (Liapor). Diese Ergänzung scheint auch im Hinblick auf die Verteilung der Korndurchmesser günstig (siehe Tab. 4-2), da eine homogenere Verteilung des porösen Zuschlags über die Sieblinie erreicht werden kann. Auf die grundsätzlichen Zusammenhänge der Tragfähigkeit von Leichtbeton geht der Abschnitt 4.2 näher ein.

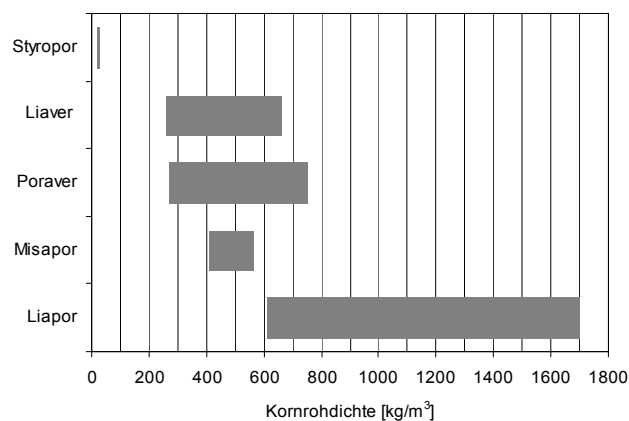


Abb. 4-2 Kornrohddichtebereiche ausgewählter Zuschläge

Schaumglaszuschläge (Liaver, Poraver, Misapor) sind aufgrund ihrer geringeren Dichte eher für Wärmedämmende Einsatzbereiche prädestiniert. Wie Abb. 4-3 zeigt, weist Glasschaumgranulat trotz der geringeren Dichte ein ganz erhebliches Festigkeitspotential auf. Das Produkt Misapor sticht hierbei besonders hervor. Dieser Zuschlag vereint große Festigkeit mit einer besonders niedrigen Wärmeleitfähigkeit und dient deshalb als Zuschlag für den wärmedämmenden Misapor- bzw. Technolith-Beton, der hauptsächlich in der Schweiz und Österreich bei einigen Projekten zur Anwendung kommt. Zum Vergleich weisen EPS-Zuschläge dagegen praktisch keine Festigkeit auf, verfügen jedoch über ein hervorragendes Dämmvermögen. Sie werden ausschließlich für Isolationsanwendungen ohne oder sehr geringe konstruktive Anforderungen eingesetzt. Da sich im Beton ein Verbundtragverhalten von Zuschlag und Matrix einstellt,

haben die Korneigenschaften einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften wie Druckfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit und die Rohdichte.

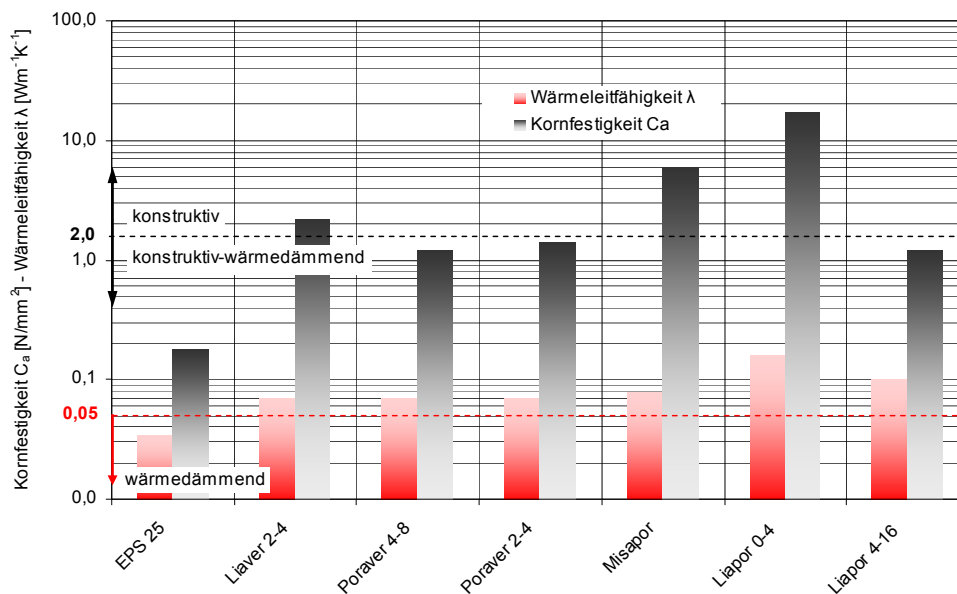


Abb. 4-3 Kornfestigkeit C_a und Wärmeleitfähigkeit λ ausgewählter Zuschläge

4.1.2.2 Kornaufbau

Zur Herstellung industrieller Leichtzuschläge wird zu Mehl gemahlener Ton- bzw. Glas durch Zugabe eines Treibmittels aufbereitet. In einem thermischen Prozess wird das Granulat infolge der Gas- bzw. Dampfentwicklung im Korninneren auf das 4-5 fache Volumen aufgebläht. Aufgrund eines vorgelagerten Granuliertvorgangs entsteht bei Blähton ein nahezu perfekt rundes Korn. Glasschaumgranulate, die auf diesen Arbeitsschritt verzichten, weisen eine erhebliche Abweichung von der runden Form auf. Die meisten Körner sind oval bis unregelmäßig gedrungen geformt - es gibt Einzelfälle mit einem Längen zu Breitenverhältnis von bis zu 2:1. Abhängig vom Ausgangsdurchmesser des Granulats entstehen die geblähten Zuschläge immer in Kornbändern, die über nachgeschaltete Siebprozesse in Fraktionen aufgeteilt werden. Die äußere Kornhülle wird durch die direkte Hitzeeinwirkung gesintert. Charakteristisch für derartig hergestellte Leichtzuschläge sind die Ausbildung einer harten, nahezu geschlossenen Außenhaut und einer porösen inneren Struktur. Die produktionstechnisch unvermeidbare Durchlässigkeit der Außenhaut hat eine Interaktion der inneren Porenstruktur mit der Zementmatrix zur Folge. Da sich die Porenstruktur mit schwankenden Verhältnissen aus offenen und geschlossenen Poren zusammensetzt, ergeben sich variierende Transportvorgänge der in das Korn eindringenden Medien. Die Ergebnisse der Vakuumsättigungsmethode mit Wasser zeigen, dass der Anteil geschlossener Poren mit sinkender Rohdichte steigt [30]. Mit sich reduzierendem Korndurchmesser nimmt der Anteil der dichten Kornhülle zu, so dass die Kornrohichte umgekehrt proportional zum Korndurchmesser ansteigt. Je nach Anwendungsbereich kann die Porigkeit über den Herstellungsprozess beeinflusst werden. Beträgt der Porenanteil im konstruktiven Anwendungsbereich ca. 30%, kann dieser Anteil für wärmedämmende Anwendungen bis auf

70% gesteigert werden [83]. Tab. 4-2 gibt eine Übersicht der aufgeführten Merkmale marktüblicher Zuschläge.

Tab. 4-2 Kornform, übliche Durchmesser, Oberflächenbeschaffenheit und innere Struktur ausgewählter, marktüblicher Zuschläge

Material	Kornform	Ø min-max [mm]	Oberfläche	innere Struktur
Liapor	rund	1 - 16	geschlossen/ permeable	geschlossen-/ offenporig
Liaver	oval	0,1 - 4	geschlossen/ permeable	geschlossen-/ offenporig
Poraver	oval	0,1 - 16	geschlossen/ permeable	geschlossen-/ offenporig
Misapor	gedrungen gebrochen	0,1 - 32	porenrauh/ geschlossen	geschlossen

Um die Rohdichte gefügedichter Leichtbetone weiter reduzieren zu können, wird die Sandfraktion durch Leichtsand ersetzt. Der Leichtsand wird durch das Brechen des mittels Siebung getrennten Über- und Unterkorns hergestellt. Aufgrund der aufgebrochenen Kornhülle und der dadurch freiliegenden Porenstruktur weist Leichtsand neben einer enorm vergrößerten Oberfläche ebenfalls ein stark verändertes Wasseraugverhalten auf. Grundsätzlich stellt die Eigenschaft des Saugens der porösen Körnung für die Herstellung und Verarbeitung von Leichtbeton den größten Unsicherheitsfaktor dar und erfordert große Erfahrung auf der Seite des verarbeitenden Betriebs.

Das Glasgranulat Misapor wird durch das Brechen und Sieben eines kontinuierlich hergestellten Schaumglasstrangs hergestellt. Aufgrund dieses Prozesses weist das Material eine porige Oberfläche auf (Abb. 4-4). Da die innere Porenstruktur jedoch geschlossenzellig ist, erstreckt sich der Bereich der Oberfläche nur über die unmittelbar anstehende Porenschicht. Die ähnlich dem Leichtsand vergrößerte Oberfläche erhöht den Zementleimanspruch und erhöht die Festigkeit der Kontaktzone von Korn und Zementleim. Beim Brechen fällt als Unterkorn eine beträchtliche Menge Kleinstmaterial im Bereich der Sandfraktion aus. Für die Anwendung als Zuschlag in Leichtbeton kann aus dem Bruchmaterial eine durchgehende Körnung nach der erforderlichen Sieblinie zusammengesetzt und dem Beton zugeschlagen werden.

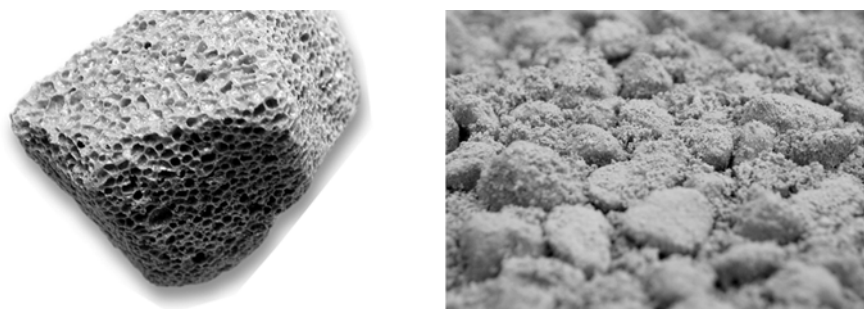


Abb. 4-4 Misapor-Einzelkorn (Misapor) und Zuschlagsmischung

4.1.3 Wasseraufnahme

Die Eigenschaften einer Betonmischung hängen in erheblichem Maße vom w/z -Wert der Mischung ab. Bei einem Normalbeton setzt sich das wirksame Wasser für die Festigkeitsentwicklung des Zementsteins aus dem Zugabewasser und der Oberflächenfeuchte der Zuschläge zusammen (Abb. 4-5). Bei Leichtbeton muss zusätzlich der Effekt des kapillaren Saugens der porösen Zuschläge beachtet werden. Da die Leichtzuschläge einen Teil des zugegebenen Wassers aufsaugen werden, ist ein Mehrbedarf an Zugabewasser erforderlich, der unter Berücksichtigung der Eigenfeuchte (Oberflächen- und Kernfeuchte) und der Saugfähigkeit des Zuschlags ermittelt werden muss. Dieser Wert kann in einem Versuch mit Temperatur- und Zeitabhängigkeit ermittelt werden. Um die Wasserabsorption des Zuschlags abschätzen zu können, wird das Material im Anfangsfeuchtezustand (Lagerzustand) gemäß DIN 1097-6 [59] einem 60-minütigen Wasserbad unterzogen. Der größte Teil des Sättigungswassers wird in den ersten 30 Minuten aufgenommen, wobei der Zeitraum in Abhängigkeit zum geprüften Korndurchmesser steht. Die genaue Erfassung der aufgeführten Parameter macht das Arbeiten mit Leichtbeton sehr aufwendig. Eine exakte Bestimmung der Zugabewassermenge ist aufgrund der ständigen Veränderung der Ausgangswerte kaum zu realisieren. Die daraus resultierende Schwankung des wirksamen w/z -Wertes ist die Hauptursache für die zum Teil stark streuende Leichtbetoneigenschaften. Aus diesem Grund sind für Leichtbeton grundsätzlich Erstprüfungen erforderlich [83]. Auch muss hinsichtlich einer späteren Verarbeitbarkeit die Konsistenz des Betons fließfähiger eingestellt werden als benötigt, da die Zuschläge die Konsistenz der Mischung durch Wasserentzug zunehmend ansteifen lassen. Die Verarbeitung von Leichtbeton im Werk ist als werkstoffgerechter einzustufen, da die Transportzeiten des Betons und damit auch die Wasserzugabe auf ein Minimum beschränkt werden können.

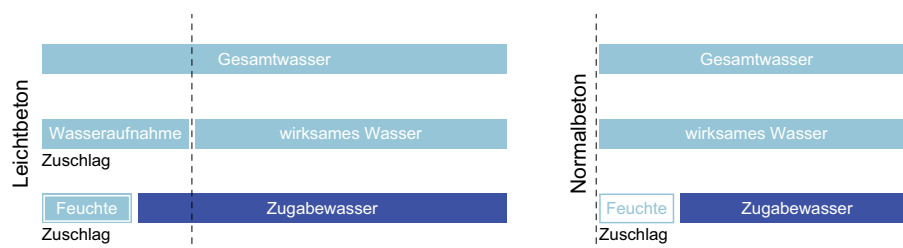


Abb. 4-5 Unterschied in der Wasserzugabe von Leichtbeton und Normalbeton (nach [77])

Da sowohl die Frischbeton- als auch die Festbetoneigenschaften in erheblichem Maße vom richtigen Umgang mit der Wasseraufnahmekapazität und dem Ausgleichszeitbedarf der verwendeten Zuschläge abhängen, stellt dieser Zusammenhang ein zentrales Thema der Leichtbetontechnologie dar.

4.2 Tragverhalten kornporiger Leichtbetonwerkstoffe

4.2.1 Verbundtragverhalten

Leichtbeton ist ein Mehrkomponentenwerkstoff, dessen Tragverhalten durch die Festigkeit und Steifigkeit der Einzelkomponenten bestimmt wird. Aufgrund der hohen Steifigkeit und Festigkeit der Zuschläge im Normalbeton wird das Tragverhalten allein durch die Eigenschaften der Zementmatrix bestimmt. Bei Leichtbeton hingegen liegt ein sehr ähnliches Steifigkeitsverhältnis der beiden Komponenten vor. Diese ausgewogene elastische Kompatibilität hat eine minimierte Beanspruchung der Kontaktzone zur Folge, was sich in zwei für Leichtbeton besonders charakteristischen Verhaltensweisen widerspiegelt:

- Leichtbeton weist eine nahezu lineare Spannungs-Dehnungsbeziehung auf, da die Ausbildung von Mikrorissen und somit eine mit der Belastung zunehmende Gefügeschädigung in der Kontaktzone deutlich reduziert ist ([30]).
- Leichtbeton versagt häufig aufgrund eines Zugversagens des Zuschlags. Das Bruchbild verläuft gleichermaßen durch Zuschlag und Matrix

Als Bedingung für das beobachtete Bruchbild muss die Kontaktzone zwischen Korn und Matrix sehr stark ausgebildet sein. Leichtbeton kann deshalb vereinfachend als ein Zwei-Stoff-System zwischen Zuschlag und Matrix betrachtet werden.

Unter Druckbeanspruchung können drei Zustände unterschieden werden, die aufgrund der Steifigkeitsverhältnisse von Matrix und Zuschlag auftreten. Druckspannungen werden vornehmlich über die steifere Komponente eines Verbundwerkstoffs übertragen. Bei einer steiferen Körnung ergibt sich aufgrund der Kornverteilung eine Umlenkung des Kraftflusses, der Querkzug zur Folge hat (Abb. 4-6 Bild links). Dieses Tragverhalten ist für Normalbeton die Regel. Bei einer sehr ähnlichen Steifigkeit von Korn und Matrix stellt sich trotz der unterschiedlichen Komponenten ein quasi homogener Kraftfluss ein (Bild Mitte). Handelt es sich um sehr weiche Zuschläge, werden die Druckspannungen hauptsächlich über die steifere Zementmatrix übertragen, was ebenfalls Querkzug zur Folge hat. In den beiden heterogenen Gefügeszenarios werden Zugbänder sowohl über die Matrix (Zustand 1) als auch über das Korn (Zustand 3) gebildet. Für die Tragfähigkeit von Leichtbeton kommt sowohl der Ausbildung der Kontaktzonen von Korn und Matrix als auch der Zugfestigkeit der Komponenten eine besondere Bedeutung zu (Bild rechts). Eine effiziente Ausnutzung des Werkstoffs erzielt man durch eine geringe Steifigkeitsvarianz, da lokale Spannungsspitzen und damit auftretende Schädigungen auf diese Weise vermieden werden können.

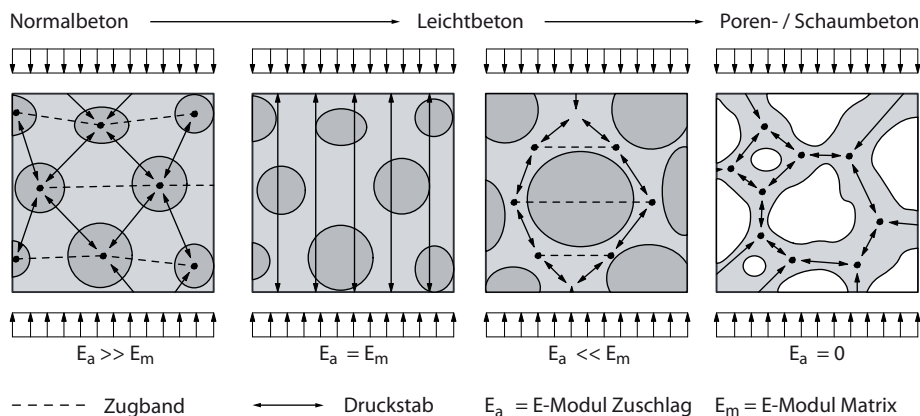


Abb. 4-6 Tragverhalten in Abhängigkeit vom E-Modul (nach [30])

Die erzielbare Festigkeit eines Leichtbetons ist bilinear ausgeprägt. Im ersten Abschnitt dominiert die Festigkeitsentwicklung der Matrix. In diesem Bereich zeigt der Leichtbeton ein dem Normalbeton gleichwertiges Verhalten. Der E-Modul des Zuschlags ist in diesem Bereich wesentlich steifer als der der Matrix. Im Bereich der Grenzfestigkeit ist die Matrixfestigkeit gleichwertig der Zuschlagsfestigkeit. Hier liegen die E-Module beider Komponenten in einer ähnlichen Größenordnung. Oberhalb der Grenzfestigkeit übt der Zuschlag einen festigkeitsbegrenzenden Einfluss aus, so dass die Festigkeitsentwicklung hinter der Matrixfestigkeit zurückbleibt. Sowohl die Grenzfestigkeit als auch die erzielte Leichtbetondruckfestigkeit steht in signifikanter Abhängigkeit von der Festigkeit des verwendeten Zuschlags (Abb. 4-7).

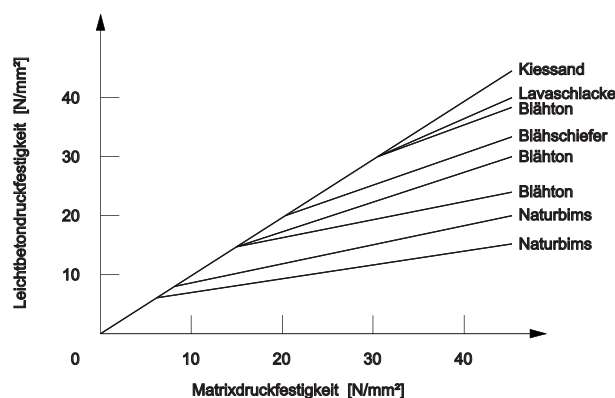


Abb. 4-7 Bilineare Leichtbetondruckfestigkeit (nach [83])

4.2.2 Tragverhalten des Zuschlags

Kornporiger Zuschlag in Leichtbeton hat die Aufgabe, eine möglichst hohe Gewichtersparnis bei höchstmöglicher Festigkeit einzubringen (Abb. 4-3). Neben der Druckfestigkeit des Kornes spielt auch die Zugfestigkeit für das Gesamttragverhalten eine entscheidende Rolle. Herstellungsbedingt weisen die meisten kornporigen Zuschläge eine hohe Oberflächenrauigkeit auf, die zu einer hervorragenden Verzahnung der Matrix mit dem Zuschlag führt (vgl. Tab. 4-2).

4.2.3 Tragverhalten der Matrix

Infolge der Einbringung eines höheren Porenvolumens reduziert sich der Anteil an tragender Struktur. In einer hoch poroisierten Mörtelmatrix bildet sich eine schaumartig (geschlossene Poren) bis schwammartige (offene Poren) Struktur aus. Bei geschlossenen Poren liegt in der Matrix ein gewölbeartiges Tragverhalten vor. Sobald sich die Poren zu einem offenen System verbinden, verändert sich das Tragverhalten hin zu einem räumlichen Fachwerk.

Da die luftgefüllten Poren keinen Beitrag zur Umlenkung der Kräfte leisten, ist ein gewölbeartiges Tragsystem nur unter Ausnutzung der Zugfestigkeit des Materials möglich. Diese liegt deutlich niedriger als die Druckfestigkeit. Ein großer Einflussfaktor ist die geometrische Ausbildung der Poren. Für ein ungestörtes Tragverhalten ist eine möglichst gleichmäßig verteilte, kugelhähnliche Porenform von Vorteil. Unregelmäßig ausgebildete Poren behindern die Ausbildung eines idealen Schalentragverhaltens.

Das Mörtelgerüst in einem offenporigen System muss die Lasten über stabähnliche Verbindungen abtragen. Hier besteht vor allem die Gefahr eines Stabilitätsversagens unter Druckbeanspruchung. Durch die Einstellung der Porengröße und des Porenvolumens kann eine gezielte Manipulation der Matrixeigenschaften erfolgen. Ziel sollte eine Homogenisierung des Werkstoffgefüges wie in Abb. 4-6 Mitte sein, um die Umlenkung des Kraftflusses und damit das Auftreten von Zugspannungen zu minimieren.

4.3 Porige Leichtbetonwerkstoffe

4.3.1 Schaumbeton

Niedrigste Rohdichten $<600 \text{ kg/m}^3$ können über das direkte Einbringen von Porenvolumen in den Beton erreicht werden. Wie unter 4.1.1 aufgeführt, ist dies beispielsweise durch die Verwendung einer Schaummischung auf Proteinbasis möglich. Schaumbeton wurde Ende der 80er Jahre im Rahmen eines Forschungsvorhabens für den Einsatz als tragender und dämmender Werkstoff im Wohnungsbau untersucht [29]. Die erzielte Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10,\text{tr}} = 0,15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bei einer Rohdichte von $\rho_{\text{tr}} = 600 \text{ kg/m}^3$ korreliert mit einer niedrigen Festigkeit von 2 N/mm^2 . Da die eingebrachten Luftporen im Frischbeton leicht zerstört werden können, muss die Verarbeitung von Schaumbeton sehr vorsichtig erfolgen. Das beinhaltet Maßnahmen wie die Vermeidung freier Fallhöhen beim Betonieren oder die wasserdichte Abdichtung von Transportgefäßen und Schalung, um ein Ausfließen des Betons zu verhindern. Allein aufgrund des hydrostatischen Drucks in der stehenden Schalung kann eine Verdichtung am Wandfußpunkt von bis zu 15% über dem Wandmittel gemessen werden. Eigene Versuche, einen Schaumbeton ausschließlich für den Dämmeinsatz herzustellen, ergaben ein $\lambda_{10,\text{tr}} = 0,075 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ bei einer Rohdichte von $\rho_{\text{tr}} = 200 \text{ kg/m}^3$. Diese Rohdichte stellt nach Auskunft des Schaumproduzenten die derzeit niedrigste noch zielsicher herstellbare Größenordnung dar.

Der von der TU Dortmund entwickelte Schaumbeton Ultraporcrete vereint eine hohe Festigkeit mit einer relativ niedrigen Wärmeleitfähigkeit [54]. Das Porenvolumen wird hier identisch zur Porenbetonherstellung durch einen chemischen Treibprozess eingebracht. Im Gegensatz zu Porenbeton härtet das Material aber an der Luft aus und kann

wie Beton verarbeitet werden. Interessant ist die Tatsache, dass der Werkstoff einer Gefügeoptimierung nach den Grundsätzen der ultrahochfesten Betone unterzogen wurde [45]. Die Größe und Verteilung der Luftporen wird durch die Partikelgrößenverteilung und Gesamtmenge des Treibmittels Aluminiumpulver gezielt gesteuert (Abb. 4-8). Messungen ergaben eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10, \text{tr}} = 0,14 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ für eine Trockenrohddichte von 450 kg/m^3 .

Aufgrund der relativ hohen Wärmeleitfähigkeit ist dessen wirtschaftliche Anwendung als monolithischer Wandbaustoff unter den gültigen gesetzlichen Vorgaben zum Wärmeschutz in Industrieländern kaum möglich. Verantwortlich dafür ist das verbleibende Feststoffgerüst, welches zur Erzielung der Druckfestigkeit erforderlich ist. Die einfache Herstellung und weitreichende Verfügbarkeit der Komponenten machen jedoch den Einsatz des Materials in Entwicklungs- und Schwellenländern sowie als Baustoff für die Selbsthilfe nach Naturkatastrophen attraktiv. Das Ziel der aktuellen Werkstoffentwicklung bleibt die Materialoptimierung für eine Anwendung als monolithischer Wandbaustoff.

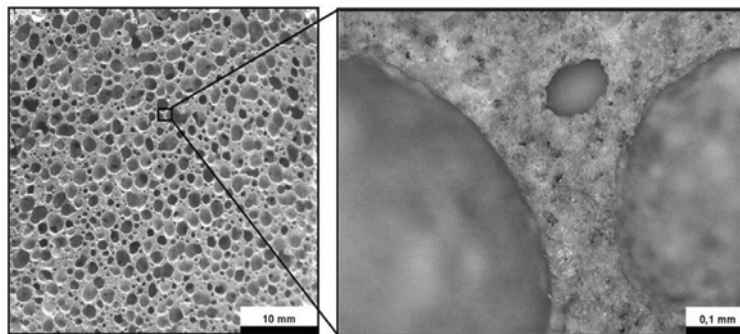


Abb. 4-8 optimierte Porenstruktur Ultraporcrete (aus [53])

4.3.2 Porenbeton

Porenbeton ist das einzige Betonmaterial, das den Passivhausstandard mit einem monolithischen Wandaufbau in wirtschaftlichen Stärken erfüllt. Verantwortlich für die hohe Dämmwirkung ist der große Porenanteil von bis zu 80% des Gesamtvolumens. Die Poren werden durch Wasserstoffgas infolge der chemischen Reaktion des Treibmittels Aluminiumpulver mit den mineralischen Bestandteilen und dem Wasser der Mischung gebildet. Jedes Aluminiumpartikel ist für die Bildung einer Pore zuständig, wobei das eingesetzte Aluminiumvolumen durch den Treibprozess um das bis zu 3600-fache vergrößert wird [45]. Für gleichmäßige Materialeigenschaften ist die intensive Durchmischung der Suspension außerordentlich wichtig. Das wichtigste Merkmal von Porenbeton ist dessen hohe Festigkeit bei geringer Rohddichte, die ein Resultat der Nachbehandlung des Materials im Autoklav ist. Im Unterschied zu Schaumbeton, der ausschließlich unter normalen Klimabedingungen aushärtet, erfolgt bei diesem Prozessschritt unter hohem Druck (11bar) und hoher Temperatur (190°) eine Härtung des Materials durch die Bildung von Calciumsilikathydrat über einen Zeitraum von 6-12h. Dieses entspricht dem natürlich vorkommenden Mineral Tobermorit, welches für die hohe Festigkeit des Porenbetons verantwortlich [40] ist. Die aktuelle Generation weist eine

charakteristische Druckfestigkeit von $1,6 \text{ N/mm}^2$ bei einer Mindesttrockenrohichte von 250 kg/m^3 auf. Damit ist Porenbeton der konstruktive Werkstoff mit der niedrigsten Rohdichte.

Aufgrund der notwendigen Dampfhärtung kann Porenbeton nur stationär hergestellt werden und als Fertigteil oder Bauelement verarbeitet werden. Die maximalen Bauteilabmessungen werden durch die Abmessungen des Autoklaven begrenzt. Grundsätzlich können bewehrte und unbewehrte Bauteile hergestellt werden. Trotz der geschlossenzelligen Porenstruktur ist ein Korrosionsschutz der Bewehrung erforderlich. Porenbeton ist ein Rohbaumaterial und muss durch geeignete Systeme wie Putze oder Beschichtungen vor Feuchtigkeitseinfluss innen wie Außen geschützt werden.

4.4 Zusammenfassung

Die Verbesserung der Dämmwirkung von Baustoffen auf Grundlage einer luftgefüllten mesoporösen Struktur hat die Grenze des Machbaren erreicht. Gefügedichter Leichtbeton mit porigem Zuschlag und einer poroisierten Matrix weist einen ausgesprochen hohen Feststoffanteil auf, über den der Großteil der Wärmeleitung erfolgt. Die Reduktion der Matrix auf das punktuelle Verkleben der kornporigen Zuschläge in einem haufwerksporigen Beton ermöglicht eine weitere Abminderung der Wärmeleitfähigkeit unter der Aufgabe der Gefügedichtigkeit des Werkstoffs. Der Vorstoß zu noch geringeren Rohdichten macht die Verwendung poriger Zuschläge unmöglich und erfordert die direkte Einbringung der Luftporen in den Beton. Diese Vorgehensweise ist mit einem Feinkornbeton wie Schaum- und Porenbeton möglich. Um bei einer weiterführenden Reduktion der Rohdichte mit einem reduzierten Feststoffgerüst weiterhin konstruktive Aufgaben übernehmen zu können, ist eine sehr hohe Festigkeit, wie sie von Porenbeton erreicht wird, erforderlich. Dieses Potential trägt soweit, dass die Reduktion der Rohdichte auf 90 kg/m^3 für eine Anwendung ausschließlich zu Dämmzwecken Stand der Technik ist (Abb. 4-9). Aus konstruktiver Sicht liegt die Grenze für tragende Werkstoffe bei einer Rohdichte von $250\text{-}400 \text{ kg/m}^3$. Die Schwankungsbreite hängt vom betrachteten Baustoff ab. Für hochfeste Porenbetone gilt die untere Schranke, die durch zukünftige Forschungstätigkeit noch auf 200 kg/m^3 abgesenkt werden dürfte. Für lufthärtende Baustoffe definiert das niedrigere Festigkeitsniveau des Feststoffgerüsts die Machbarkeitsgrenze für eine weitere Steigerung des Porengehalts. Inwieweit sich die Rohdichte der lufthärtenden Materialien aufgrund der Möglichkeiten zur Festigkeitssteigerung durch eine Gefügeoptimierung reduzieren lässt, werden die Ergebnisse der laufenden Forschungsvorhaben zeigen.

Die Wärmeleitfähigkeit eines Materials hängt maßgeblich vom Gesamtporengehalt und der Wärmeleitfähigkeit der Luft, sowie des Feststoffgerüsts ab. Weiterhin spielt die Verteilung der Poren eine große Rolle. Je feiner das Porensystem verzweigt ist, umso länger werden die Wege der direkten Wärmeleitung über das Feststoffgerüst. Dieses stellt mit der höchsten Wärmeleitfähigkeit immer die Schwachstelle im Werkstoffgefüge dar.

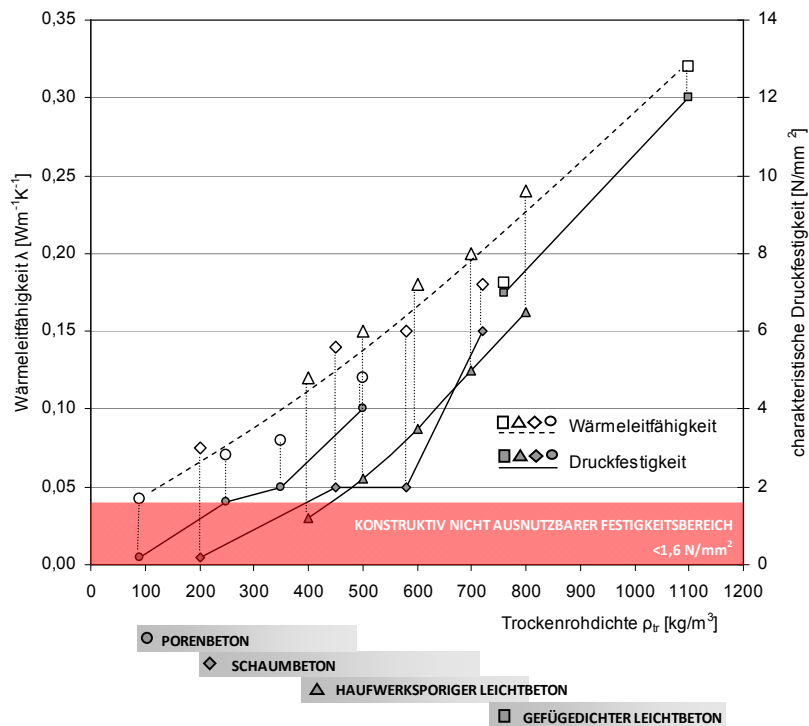


Abb. 4-9 Herstellerangaben und Forschungsergebnisse der Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit verschiedener Leichtbetonprodukte im Vergleich (Referenzierung der Einzelwerte siehe Anhang A.1; S.163)

Ein monolithischer Wandaufbau aus einem Material, welcher statischen und bauphysikalischen Anforderungen gerecht wird, ist ein Anspruch den derzeit nur Porenbeton wirtschaftlich erfüllt. Die Entwicklung, die in den letzten 10 Jahren im Bereich der Dämmbetone gemacht wurde, ist durch die aktuelle Festlegung der gesetzlichen Wärmeschutzvorgaben überholt worden. Abb. 4-9 zeigt, dass eine Wärmeleitfähigkeit unter $0,1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ nur mit einem erheblichen Verlust an Festigkeit einhergeht.

5 Nanoporöser Leichtbeton

Eine neue Generation von Leichtbeton macht sich die bemerkenswerten Materialeigenschaften von Aerogele zu Nutze, um eine verbesserte Dämmwirkung im Werkstoffgefüge zu erreichen. Der auf diese Weise hergestellte Verbundwerkstoff kann Wärmeleitfähigkeiten unter $0,07 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ erreichen. Aerogele weisen eine Reihe struktureller Besonderheiten auf, die sie für den Einsatz als Zuschlag insbesondere im Anwendungsbereich der wärmedämmenden Leichtbetone sehr interessant machen. Aerogele eröffnen erstmals die Anwendung der festigkeits- und dauerhaftigkeitssteigernden Erkenntnisse aus der Forschung an Ultrahochfesten Betonen (UHPC) auf Leichtbetone. Damit lässt sich der bekannte Zusammenhang von Festigkeit und Dämmfähigkeit heutiger Leichtbetonwerkstoffe deutlich verbessern.

5.1 Aerogele

5.1.1 Allgemeines

Per Definition werden Materialien als Aerogele bezeichnet, bei denen die Porenflüssigkeit eines Gels unter weitestgehender Beibehaltung der Vernetzung gegen Luft ausgetauscht werden. Die Herstellung des ersten Aerogels wurde durch S.S. Kistler 1931 beschrieben. Ihm gelang die Herstellung, indem er die Flüssigkeit im überkritischen Zustand aus den Poren austrocknete. Gele, die als Ausgangsbasis für das Material dienen, können aus allen Metall- und Halbmetalloxiden gebildet werden. Ebenso ist es möglich Aerogele aus anorganischen und organischen Ausgangsmaterialien herzustellen. Aerogele zeichnen sich vor allem durch ihren hohen Porenanteil aus, der zwischen 90–99% liegt. Der mittlere Porendurchmesser liegt in einer Größenordnung von $\approx 20 \text{ nm}$. Insbesondere die Porengröße ist der Grund für eine Vielzahl von hochinteressanten Materialeigenschaften. Aerogele zählen aufgrund dessen zu der Gruppe der Nanomaterialien [51].

5.1.2 Herstellung und Aufbau

Aerogele werden in einem nasschemischen Prozess synthetisch hergestellt. Der Prozess umfasst im Wesentlichen zwei Schritte. Das in einer wässrigen Lösung dispergierte, kolloide Sol wird im sogenannten Sol-Gel-Prozess zu einem dreidimensionalen und weitverzweigten Gelnetzwerk kondensiert. Dieser chemische Prozess lässt sich durch eine Vielzahl von Einflussmöglichkeiten steuern, so dass man von einem Designerwerkstoff sprechen kann. Im Anschluss daran erfolgt dessen volumenstabile Trocknung. Obwohl Aerogele aus einer Vielzahl von Ausgangsverbindungen synthetisiert werden können, haben Silica-Aerogele den mit Abstand größten Anteil am weltweiten Produktionsvolumen. Diese Gruppe findet ihre Einsatzfelder auch im Bauwesen z.B. als transluzente Tageslichtdämmung oder als Dämmstoff in der Altbausanierung und stellt in der hier vorgestellten Materialentwicklung eine wichtige Komponente dar. Aus

diesem Grund konzentrieren sich die folgenden Erläuterungen ausschließlich auf die Herstellung von SiO₂-Aerogele.

5.1.2.1 Sol-Gel-Prozess

In der Vorstufenlösung liegen die Reaktionspartner in einem Lösungsmittel dispergiert vor. Das Lösungsmittel beeinflusst wesentlich die Art des ausgebildeten Netzwerks. Durch die Konzentration der Vorstufe in der Lösung kann beispielsweise die Dichte des Aerogels präzise bestimmt werden, da eine weitestgehend volumenstabile Trocknung des nassen Gelkörpers zum Aerogel erfolgt. In diesem Stadium ist die größte Einflussnahme auf das endgültige Werkstoffdesign möglich. Einige generelle, variierbare Parameter sind:

- Art und Konzentration der Vorstufe
- Art des Lösungsmittels
- H₂O zu Alkoxygruppenverhältnis
- Einstellung des pH-Werts und der Prozesstemperatur

Die durch die Gelierung entstehende Mikrostruktur liegt zwischen denen kolloider und polymerer Gele. Diese beiden Varianten stellen bezüglich Ihrer Mikrostruktur die beiden Extrema dar. Während in kolloiden Gelen die Netzwerkstruktur wie eine Perlenkette durch die Verknüpfung kolloider Partikel erfolgt, entstehen bei polymeren Gelen lineare oder verzweigte Ketten aus einzelnen Clustern. Polymerartige Gele sind jedoch aufgrund Ihrer kleineren Porengrößen sehr schwierig zu trocknen. Deshalb werden Aerogele üblicherweise im Basischen aus Tetraethoxysilan (TEOS) oder Tetramethoxysilan (TMOS) katalysiert. Die Cluster wachsen hauptsächlich durch Ankondensieren von Monomereinheiten. Dieses Modell wird als RLMC (Reaction Limited Monomer Cluster Growth) beziehungsweise Eden-Wachstum bezeichnet. Das dabei entstehende amorphe Netzwerk ist geprägt durch einen partikularen Charakter mit großen Teilchen und großen Poren. Idealerweise entstehen bei diesem Prozess Strukturen mit gleichmäßiger Dichte. Als Katalysator kommt Ammoniak zum Einsatz [76].

5.1.2.2 Trocknung

Die Trocknung stellt den komplexesten Abschnitt im Herstellungsprozess dar, der in mehrere Schritte gegliedert werden kann. Im Anfangsstadium der Trocknung schrumpft das noch sehr elastische Gelnetzwerk um das Volumenäquivalent der entzogenen Flüssigkeit. Dabei entstehen neue Verbindungen (Siloxanbrücken), welche zu einer Versteifung des Gelkörpers führen. Die zweite Trocknungsstufe beginnt, sobald keine weitere Schrumpfung des Netzwerks zu beobachten ist. An diesem Punkt ist die Gefahr der Rissbildung im Netzwerk am größten, da die auftretenden Spannungen stark ansteigen. Die Flüssigkeit zieht sich durch Verdampfung weiter in den Gelkörper zurück und übt an der Grenzfläche große Kapillarkräfte aus. Das Kollabieren des Netzwerks in diesem Stadium hat im Wesentlichen zwei Gründe. Durch das langsamere Schrumpfen des nassen Gelkörpers entsteht ein Druckgradient, der zu Rissen führen kann. Ein weiterer Grund ist, dass größere Poren sich schneller entleeren als kleine. Die Porenwandung ist somit unterschiedlichem Druck ausgesetzt und kann brechen. Aus diesem Grund sind weitestgehend gleichmäßige Poren bei der Herstellung anzu-

streben. Grundsätzlich gilt für den Trocknungsprozess, die auftretenden Kapillarkräfte möglichst klein zu halten, um die Netzstruktur schonend zu trocknen. Im Laufe der Entwicklung von Aerogelen wurden dafür unterschiedliche Strategien entwickelt.

5.1.2.2.1 Überkritische Trocknung

Die ersten Aerogele wurden durch überkritische Trocknung erzeugt. Dadurch wird das Auftreten von Grenzflächen zwischen flüssig-gasförmig und den damit verbundenen Kapillarkräften vermieden. Der kritische Punkt ist physikalisch durch die Dichtegleichheit des Mediums sowohl in der Gas- als auch in der Flüssigphase definiert. Dieser Prozess ist abhängig von der Wahl des Lösungsmittels mit einer Steigerung von Temperatur und Druck verbunden. Die möglichen Temperaturen liegen zwischen 31°C (CO₂) und 374°C (H₂O). Man unterscheidet deshalb in eine „hot“ und eine „cold“ Trocknung. Der Druck variiert in der Bandbreite von 4,7 MPa (Aceton) und 22,1 MPa (H₂O). Technisch wird der Prozess im Autoklav durchgeführt. Das Verfahren ist aufwendig und risikobehaftet, stellt jedoch die einzige Möglichkeit dar, Aerogele auch in größeren Abmessungen am Stück herzustellen [76]. Die heiße Trocknung von Aerogelen kann unerwünschte Nebenwirkungen haben, da sich aufgrund der hohen Prozess-temperatur Oberflächenmodifikationen und beschleunigte Alterungsvorgänge einstellen können. Eine Alternative stellt die kalte Trocknung mit CO₂ dar. Strukturelle Veränderungen sind bei dieser Methode nicht zu erwarten. Da aber nicht jedes Lösungsmittel mit CO₂ mischbar ist, ist ein Lösungsmittelaustausch evtl. mit Zwischenstufen erforderlich.

5.1.2.2.2 Unterkritische Trocknung

Um eine Trocknung unter Normalbedingungen zu ermöglichen, muss entweder das Netzwerk gestärkt oder die Oberflächen modifiziert werden, damit die auftretenden Kapillarkräfte aufgenommen werden können. 1992 wurden von Smith et al. erstmals Aerogele unter Normalbedingungen hergestellt, indem die Oberfläche mit OH-Gruppen modifiziert wurde (Silylierung). Dadurch können bei der Trocknung keine irreversiblen Verengungen der Poren durch Ausbildung von Si–O–Si Bindungen entstehen. Sind die Kapillarkräfte des sich zurückziehenden Flüssigkeitskörpers nicht mehr in der Lage, den Gelkörper weiter zusammen zu ziehen, ist der Punkt der maximalen Schrumpfung erreicht.

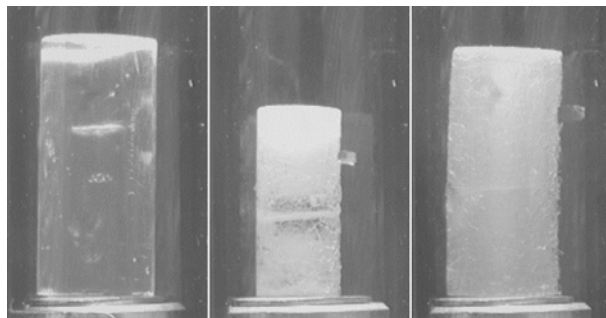


Abb. 5-1 Stadien der unterkritischen Trocknung (von links) – nasser Gelkörper – maximale Schrumpfung aufgrund Trocknung – getrockneter Gelkörper nach Springback (Fa. Cabot)

Das Netzwerk dehnt sich ähnlich einer gespannten Feder wieder nahezu in das Ausgangsvolumen zurück (Springback Effekt). Da die dabei auftretenden, elastischen Verformungen bis zu 28% betragen, zerfällt der Körper in kleinere Bruchstücke, so dass durch dieses Verfahren nur Aerogelgranulat bis zu einem maximalen Korndurchmesser von 4 mm hergestellt werden kann (Abb. 5-1). Als wichtigster Nebeneffekt dieser Produktionsmethode ist das Aerogel aufgrund der Oberflächenbehandlung durchgehend hydrophobiert. Damit wird die Dämmeigenschaft der Aerogele gegenüber Feuchtigkeitseinflüssen langzeitstabilisiert. Hydrophile Aerogele müssen noch durch eine technische Kapselung beispielsweise innerhalb einer Isolierverglasung dauerhaft vor Feuchtigkeit geschützt werden. Die Hydrophobierung ermöglicht ebenfalls die Anwendung des Materials als direkt einmischbare Komponente in eine Wasser-Zement-Suspension ohne dass sich die Aerogele mit dem benetzenden Anmachwasser vollsaugen. Bei einer Leichtbetonmischung mit Aerogelzuschlägen muss daher im Gegensatz zu normalen, makroporösen Zuschlägen keine Wasserabsorption berücksichtigt werden (vgl. dazu 4.1.3).

Die unterkritische Trocknung mit Hilfe von modifizierten Oberflächen stellt die technische Produktionsgrundlage der heute auf den Markt drängenden Aerogel-Generation dar. Seit 2003 werden in prototypischen Produktionsanlagen die Prozessparameter erforscht, die eine zukünftige großtechnische Fertigung von Aerogelen wirtschaftlich ermöglicht. Mittlerweile werden immer mehr Anwendungsbereiche für Aerogele im Baubereich identifiziert (siehe Scobatherm[®], Aerowolle[®]), so dass sich dieses Material zunehmend etabliert.

5.1.3 Materialeigenschaften

5.1.3.1 Mechanismen des Wärmetransports

Aerogele weisen die niedrigste Wärmeleitfähigkeit aller Festkörper auf. Diese setzt sich aus drei verschiedenen Mechanismen zusammen. Im Einzelnen sind das der Wärmetransport über die Gasphase, die Wärmeleitung über das Festkörpergerüst und der Anteil durch Wärmestrahlung. In Abb. 5-2 lässt sich erkennen, dass sowohl die Wärmeleitung als auch der Wärmetransport eine deutliche Abhängigkeit von der Dichte des Aerogels aufweisen. Für die Wärmestrahlung spielt die Dichte nur eine untergeordnete Rolle. Die Festkörperleitung des Aerogels verhält sich proportional, der Wärmetransport hingegen umgekehrt proportional zur Aerogeldichte. In Summe ergibt sich das Minimum aller Transportmechanismen bei einer Dichte von ca. 150 kg/m^3 . Besonders interessant ist die Tatsache, dass Aerogele unter normalem Luftdruck (nicht evakuiert) eine Leitfähigkeit bis zu $12 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ erreichen können. Damit ist Ihre Wärmeleitfähigkeit etwa halb so groß wie die einer stehenden Luftschicht (ca. $26 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$) und ca. doppelt so groß wie die einer Vakuumdämmung (ca. $5\text{-}6 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$).

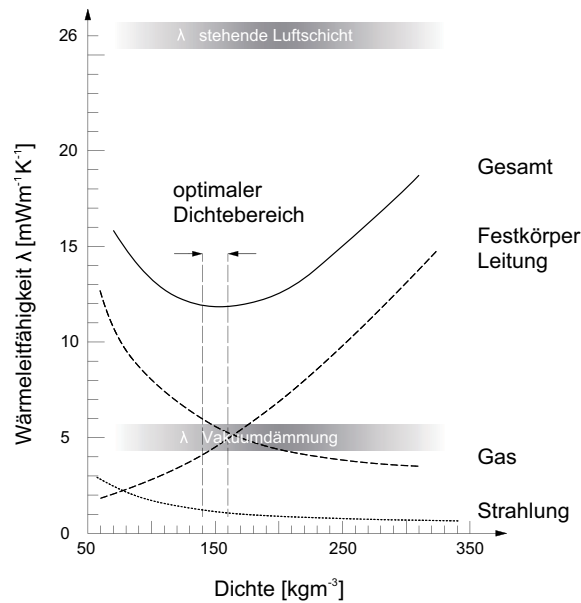


Abb. 5-2 Wirksamkeit der drei Wärmetransportmechanismen in Abhängigkeit von der Aerogel-dichte (nach [32])

Die Wärmeleitfähigkeit von Aerogelen als Betonwerkstoffkomponente wird hauptsächlich durch die Festkörpereigenschaften des Materials bestimmt. Bei optimalen Dichteverhältnissen setzt sich die resultierende Wärmeleitfähigkeit zu gleichen Anteilen aus der Konvektion und der Wärmeleitung über das Festkörpergerüst zusammen [46]. Die außerordentlich niedrige Wärmeleitfähigkeit von Aerogele liegt in deren Aufbau begründet.

Die Primärstruktur eines Silika-Aerogels besteht aus normaldichten Quarzglaskugeln von einem Durchmesser < 1 nm. Diese Kugeln berühren sich punktuell und bilden die 1-2 nm großen, porösen Sekundärteilchen. Die daraus gebildete lineare Tertiärstruktur verkettet sich über Verzweigungen zu der für Aerogele typischen Netzstruktur mit einem variierenden Porendurchmesser von ca. 50 nm (Abb. 5-3). Auf dieser Tertiärstruktur beruhen die extreme Porosität sowie die Isotropie der Aerogel-Eigenschaften [75]. Die Wärmeleitung im Festkörper erfolgt mittels atomarer Gitterschwingungen.

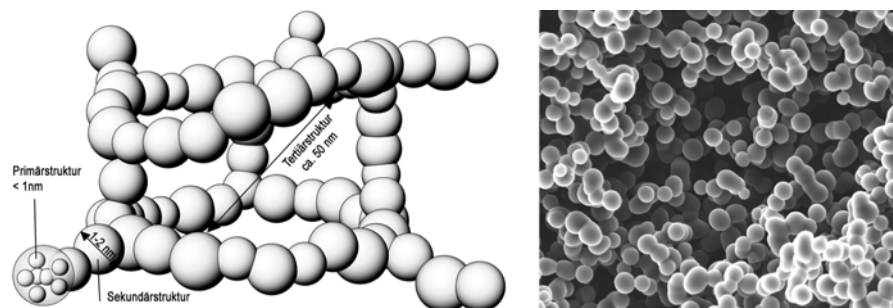


Abb. 5-3 Qualitativer Aufbau (nach [39]) - REM-Aufnahme (HP DLR) einer Aerogelstruktur

Der amorphe Aufbau von Silica-Aerogelen stört die Ausbreitung dieser Schwingungen aufgrund der mangelnden Periodizität des Atomgerüsts. Des Weiteren ermöglicht die Kugelform eine Verkettung der Teilchen mit einer minimalen Berührungsfläche unter-

einander. Auf diese Weise reduziert sich die Schwingungsanregung auf ein rein lokales Phänomen [39].

Der Gaswärmetransport erfolgt über den Stoß von Molekülen. Die Strecke, die im Mittel zwischen zwei Stößen liegt, wird „mittlere freie Weglänge“ genannt. Diese beträgt für Stickstoffmoleküle bei Zimmertemperatur unter Atmosphärendruck ca. 70nm [2]. Da die mittlere freie Weglänge und die Porengröße von Aerogelen in einer ähnlichen Größenordnung liegen, wird die Wärmeübertragung durch Molekülschwingung aufgrund der begrenzenden Netzstränge wirkungsvoll eingeschränkt. Im Gas kann sich kein thermodynamisches Gleichgewicht einstellen, was größere Temperaturgradienten als in einem freien Gas zur Folge hat [39].

Durch die Einbettung der Aerogele als Betonzuschlag in eine opake Zementmatrix wird der Wärmestrahlungsanteil vollständig unterbunden. Dieser Transportmechanismus ist vielfach untersucht worden, da er bei der vorherrschenden Anwendung von Aerogelen als Dämmmaterial für transluzente Fenster- und Fassadenelemente einen Anteil von 20% hat [68]. In der vorliegenden Anwendung spielt dieser Effekt aufgrund der beschriebenen Randbedingungen keine Rolle.

Die Eigenschaften von Aerogelen können sehr gezielt während des Sol-Gel Prozesses durch die Kontrolle der Herstellungsparameter manipuliert werden. Es handelt sich hierbei definitionsgemäß um ein Nanomaterial. Die Nanoskaligkeit bezieht sich auf die Porengröße des Materials. Die kleinsten Aerogelpartikel werden durch einen Mahlprozess hergestellt, und erreichen einen mittleren Korndurchmesser von $d_{50} = 8\mu\text{m}$.

5.1.3.2 Mechanische Eigenschaften

Aerogele weisen eine dichteabhängige Druckfestigkeit von $0,15 - 0,30 \text{ N/mm}^2$ bei einer elastischen Stauchung von 2-4% auf [75]. Diese Werte ermöglichen eine einwandfreie Lagerung, den Transport und die Handhabung des Produkts. Die Zugfestigkeit liegt um eine Zehnerpotenz niedriger bei $0,02 \text{ N/mm}^2$ [76]. Der E-Modul schwankt ebenfalls dichteabhängig in einem Bereich zwischen 2 kPa – 2 MPa [67].

Aufgrund der extrem niedrigen Steifigkeit der Aerogelpartikel werden diese keinerlei Beitrag zu den Festigkeitseigenschaften eines zementgebundenen Verbundwerkstoffs leisten. Da die umgebende Matrix um Potenzen steifer ist, wird diese maßgebend für die Festigkeit des Verbundmaterials sein.

5.1.3.3 Ausdehnungskoeffizient α_T

Messungen an hydrophilen, monolithischen Aerogele der Firma Airglass ergaben ein α_T von $2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Es zeigt sich eine starke Temperaturabhängigkeit der Messwerte im gemessenen Bereich von 30° bis 130°C [37].

5.2 Grundlagen aus der UHPC-Forschung

„Die Gefügeentwicklung, die Gesamtporosität und speziell der Kapillarporenanteil eines Betons oder Mörtels hängen nicht nur vom w/z-Wert, dem Hydratationsgrad, der verwendeten Zementart und -menge ab, sondern werden auch maßgeblich durch die Reaktivität, die Kornform und die Korngrößenverteilung des Zements und anderen Zu-

satzstoffen beeinflusst“ [78]. Wissenschaftliche Untersuchungen bestätigen den großen Einfluss der Gefügeoptimierung einer Betonzusammensetzung auf die genannten Werkstoffeigenschaften. Dieser Abschnitt erläutert kompakt die wichtigsten Zusammenhänge und Begriffe der UHPC-Forschung, um das methodische Vorgehen der Entwicklung eines Leichtbetons mit Aerogelzuschlag in Bezug setzen zu können.

5.2.1 Granulometrie

Unter dem Begriff Granulometrie werden die Kornform und die Korngrößenverteilung der festen Betonbestandteile zusammengefasst. Bei UHPC erfolgt eine spezielle Betrachtung der Feinstoffe $\leq 0,125\text{mm}$ Durchmesser, die bei einem Betonentwurf sonst nicht differenziert betrachtet werden. Gerade in der Abstimmung dieser Korngrößenverteilung liegt die technische Begründung für die besonderen Eigenschaften eines UHPC. Siehe dazu auch [35].

5.2.2 Packungsdichte

Durch die physikalische Füllerwirkung eines aufeinander abgestimmten Stützkorns und Füllkorns wird eine signifikant erhöhte Packungsdichte erzielt. Der dadurch verringerte Hohlraumanteil senkt ebenfalls den Wasseranspruch des Frischbetons. Die zu überbrückenden Hohlräume für die Hydratationsprodukte werden reduziert, so dass die Festigkeitseigenschaften erheblich verbessert werden. Es gilt zu beachten, dass eine zu hohe Packungsdichte die Verarbeitbarkeit verschlechtert und keinen ausreichenden Platz für die entstehenden Hydratationsprodukte der Festigkeitsentwicklung gewährleistet, was zu Gefügeschädigungen führen kann.

Eine optimierte Packungsdichte hat einen sehr positiven Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung und die Dauerhaftigkeit des Betons. Das tragende Stützkorn bildet eine Vielzahl von Kontaktpunkten aus; dadurch reduzieren sich örtliche Spannungen und die Neigung zur Rissbildung. Der minimierte Porenanteil und das deutlich dichtere Betongefüge unterbinden Transportvorgänge im Material.

Die Fullerparabel zur Erzeugung höherer Packungsdichten gründet auf der theoretischen Überlegung am ebenen Kreisscheibenmodell. Betrachtet man drei gleich große Scheiben, so kann der dazwischen entstehende Hohlraum durch einen weiteren Kreis optimal ausgefüllt werden, wenn er einen um den Faktor 6,5 kleineren Durchmesser hat. Bei einer dreidimensionalen Betrachtung ist der Zwischenraum in einem aus vier gleich großen Kugeln gebildeten Tetraeder wesentlich größer. Hier muss für die dichteste Lagerung der Durchmesser des nächst kleineren, passenden Korns um den Faktor 4,3 reduziert werden. Ausschlaggebend für die Füllung des Hohlräume ist jedoch die Öffnungsweite zum Hohlraum. Nur Teilchen, deren mittlerer Radius deutlich unter dem Öffnungsradius liegt, können auch zur Füllung des Hohlräume und damit zur Steigerung der Packungsdichte beitragen. Daher werden nur Partikel, die sich mindestens um den Faktor 6,5 unterscheiden, als packungswirksam betrachtet [78]. In der Praxis kommen Partikel mit einem größeren Verhältnis von Stützkorn zu Füllkorn zum Einsatz. Aufgrund der Kornform, die in der Regel gebrochen und scharfkantig ausfällt, wird die dadurch erfolgende Behinderung der Partikel untereinander ausgeglichen. Je feiner der Füller wird, umso stärker steigt das optimale Verhältnis an. Damit trägt man der gestiegenen Agglomerationsneigung des Füllers Rechnung (Abb. 5-4 links). Die Zu-

sammenmischung der Komponenten in einem aus der Analyse ermittelten Verhältnis zeigt als Ergebnis eine deutlich erhöhte Packungsdichte gegenüber den Ausgangskomponenten (Abb. 5-4 rechts). Die Ermittlung einer optimierten Sieblinie durch Kombination der unterschiedlichen Fraktionen in schrittweise sich verändernden Mischungsverhältnissen erfolgt sowohl experimentell als auch mit Hilfe eines mathematischen Algorithmus nach Schwanda.

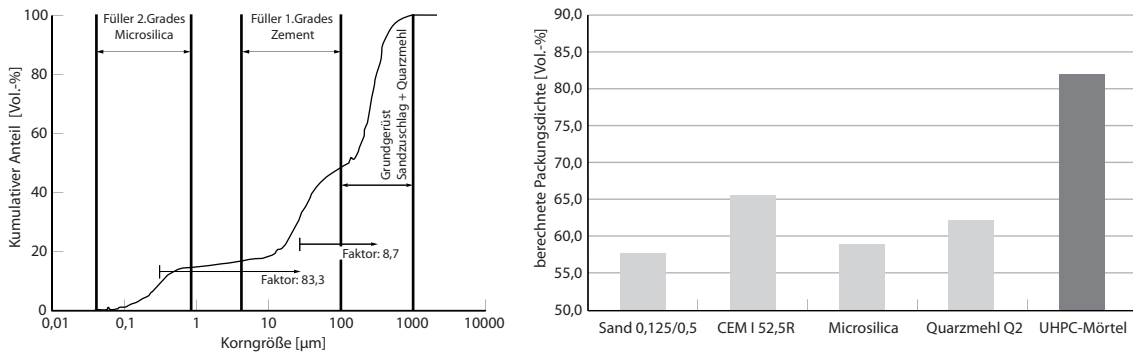


Abb. 5-4 Einfluss einer Füllkörnung auf die Sieblinie (links) und die Packungsdichte (rechts) nach [35]

5.2.3 Wasseranspruch

Der Grundwasserbedarf bestimmt sich aus dem verbleibenden Hohlraumanteil der optimierten Kornzusammensetzung. Dieser ist deutlich reduziert, wenn die Hohlräume größerer Partikel durch kleinere gefüllt werden, wie es bei einer gut korngestufenen Mischung der Fall ist (Abb. 5-5 links). Eine Steigerung der Packungsdichte ist nur bis zu einem bestimmten Zugabevolumen eines packungswirksamen Füllstoffes zu beobachten. Bei einer Überfüllung der Hohlräume wird das Korngerüst auseinandergetrieben und das Stützkorn beginnt im Füllkorn zu schwimmen. In diesem Stadium steigt der Wasserbedarf der Mischung aufgrund der wesentlich höheren Oberfläche des Füllers erneut an.

Für die Verarbeitung kommt die Wassermenge hinzu, die erforderlich ist, um die Körner voneinander zu trennen und gegeneinander verschiebbar zu machen. Diese Wassermenge ist von der Form der Körner abhängig. Sie fällt umso größer aus, je stärker die Körnung von der idealen Kugelform abweicht.

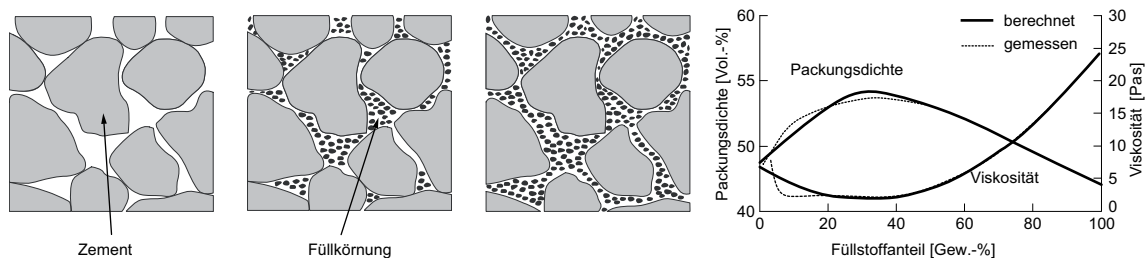


Abb. 5-5 Optimierung der Packungsdichte [78] - Beeinflussung der Viskosität [35]

Die Kornform kann mit Hilfe eines Formfaktors ϕ beschrieben werden. Der Faktor beschreibt das Verhältnis der gemessenen Kornoberfläche eines unregelmäßigen Teilchens zur Oberfläche einer volumengleichen Kugel und dient als Anpassungsfaktor zwischen dem Rechenmodell und der Messung. Als Datengrundlage zur Bestimmung des Faktors werden beispielsweise die Messergebnisse der Lasergranulometrie verwendet (siehe Abschnitt 5.3.2.1). Die Messwerte werden in 128 Kornklassen unterteilt, was auch die sichere Erfassung un stetiger Körnungsverläufe möglich macht.

Die Erhöhung der Packungsdichte sorgt für eine stärkere Verzahnung der Mischung, was sich negativ auf deren Verarbeitbarkeit auswirkt. Infolge der hochfeinen Füllkörnung steigt auch die innere Oberfläche überproportional stark an, was die Wasserfilmdicke auf den Partikeln stark reduziert. Nur in Verbindung mit einem Hochleistungsfließmittel ist die minimierte Wasserzugabe in der Lage, die notwendigen Verarbeitungseigenschaften zu erzielen. Verlässt die Mischung den Bereich einer ausreichend dichten Packung, verliert sich das Wasser in einer zunehmenden Hohlraumfüllung, was die Viskosität der Mischung über den optimalen Punkt hinaus stark ansteigen lässt (Abb. 5-5).

5.3 Packungsdichteoptimierung eines aerogelhaltigen Verbundwerkstoffs

Ein Verbundmaterial mit Aerogelen als Komponente bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber mesoporösen Leichtbeton. Nachstehende Liste fasst nochmals die drei wichtigsten Eigenschaften von Aerogelen zusammen.

- Aerogele sind in ihren Eigenschaften isotrop und weisen keine strukturelle Unterscheidung in Kern und Hülle auf. Bricht ein Aerogel bei der Bearbeitung auseinander, weist die Bruchfläche die Eigenschaften einer Oberfläche auf.
- Aerogele sind aufgrund der Oberflächenmodifikation infolge der unterkritischen Herstellung durchgehend hydrophobiert. Trotz ihrer hohen Porosität nehmen Sie keinerlei Feuchtigkeit aus ihrer Umgebung auf. Für die Betonherstellung verhalten sie sich in Bezug auf die Wasseraufnahme wie Normalzuschlag.
- Aufgrund ihrer unter 5.1.3.1 beschriebenen Struktur ist die Wärmeleitfähigkeit gegenüber Luft nur halb so groß. Die erzielbare Wärmeleitfähigkeit des Verbundwerkstoffs ist damit wesentlich günstiger als mit Luft.

5.3.1 Tragverhalten

Wegen ihrer geringen Steifigkeit leisten Aerogele keinen Beitrag zur Festigkeit des Verbundwerkstoffs. Gemäß der Betrachtung unter Abschnitt 4.2.1 beteiligen sich die Leichtzuschläge deutlich an einem Verbundtragverhalten, sobald diese eine identische oder höhere Steifigkeit als die umgebende Matrix aufweisen. Das Tragverhalten eines aerogelhaltigen Verbundwerkstoffs stellt sich vergleichbar eines Schaumbetons ein, da der Lastabtrag ausschließlich über die Zementmatrix erfolgt. Im Vergleich zu Schaumbeton ergeben sich zwei wesentliche Unterschiede.

1. Das Porenvolumen wird nicht durch Luftporen eingebracht, sondern durch eingemischte poröse Feststoffpartikel. Damit liegt ein durchgehend dichtes Gefüge wie bei gefügedichtem Leichtbeton vor. Die Aerogele üben trotz ihrer geringen Steifigkeit eine elastische Bettungswirkung auf die tragende Matrix aus. Es ist anzunehmen, dass dieser Effekt sich stabilisierend und Laststeigernd auf die Tragstruktur auswirkt. Aufgrund der Aerogeldichte von $140 - 160 \text{ kg/m}^3$ wird die Trockenroh-dichte grundsätzlich höher liegen als bei einem Schaumbeton mit vergleichbarem Porenvolumen.
2. Die Aerogel-Kornbandbreite umfasst produktionsbedingt eine durchgehende Körnung von $0,01 - 4 \text{ mm}$ Durchmesser. Dadurch ist es möglich, die Zwischenräume der größten Körnung wiederum durch kleinere Aerogelpartikel zu füllen. Diese Abstufung lässt sich bis zum Durchmesserbereich des Zements durchführen. Durch die definierte Korngrößenverteilung der Aerogele innerhalb der Mischung wird eine dichteste Packung der Porenverteilung angestrebt. Dies ergibt umgekehrt ein extrem reduziertes und sehr fein verzweigtes Matrixnetz. Die Erfassung und Berücksichtigung der Kornform spielt bei der rechnerischen Ermittlung der optimalen Packungsdichte eine zentrale Rolle, da das mathematische Modell auf der Basis der Kugelgeometrie entwickelt wurde. Da Aerogele produktionsbedingt kantig und gebrochen sind, muss der Einfluss der Formabweichung mathematisch erfasst werden (Abb. 5-6 links). Mit Hilfe des Algorithmus nach Schwanda erfolgt die gegenseitige Verrechnung von je zwei Kornfraktionen, wobei eine Fraktion als Stützkorn und die andere als Füllkorn angenommen wird. Dieser Berechnungsdurchgang wird mit allen Fraktionen durchgeführt, bis eine optimierte Sieblinie aus allen Kornfraktionen ermittelt worden ist.

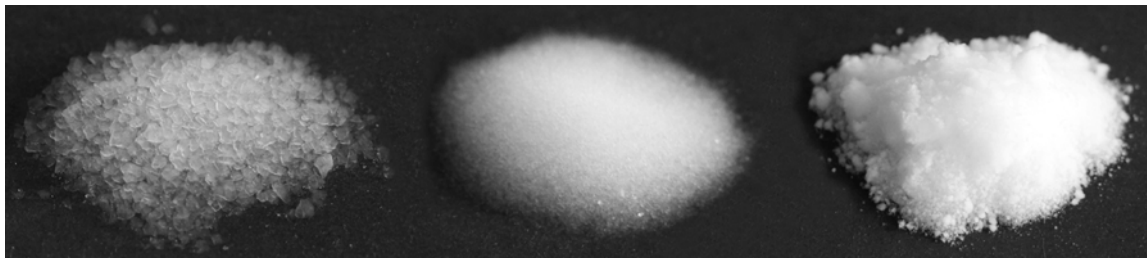


Abb. 5-6 Aerogelpartikel: Grade TLD 302 (links), Grade TLD 102 (Mitte), Grade Enova MT1100

5.3.2 Untersuchung zur Steigerung der Packungsdichte

Die in dieser Arbeit verwendeten Aerogele werden in einem kontinuierlichen Fertigungsprozess hergestellt. Aufgrund der unterkritischen Trocknung fallen Partikel in der Durchmesserbandbreite von $0,01$ bis 4 mm an. Die untere Schranke wird durch einen nachträglichen Mahlprozess erreicht, mit dem Aerogele bis zu einem mittleren Teilchendurchmesser von $8 \mu\text{m}$ aufbereitet werden können. Dieses Material kommt in Lacken und Farben als Mattierung zur Anwendung. Neue Produkte nutzen zusätzlich die hohe Wärmedämmung als Brandschutzbeschichtung aus. Tab. 5-1 gibt eine Übersicht der aktuell vom Hersteller erhältlichen Durchmesserabstufung.

Tab. 5-1 Verfügbare Durchmesserabstufung von Aerogelgranulat [8]

Bezeichnung	Enova MT1100	TLD 100	TLD 101	TLD 102	TLD 301	TLD 302
Bandbreite Körnung [mm]	$d_{50} = 8 \mu\text{m}$	0,01 – 4,0	0,01 – 0,7	0,01 – 1,2	0,7 – 1,2	1,2 – 4,0

Die Durchmesserverteilung des Granulats variiert aufgrund der technischen Produktionsbedingungen innerhalb eines Kornbandes relativ stark. So ergibt sich aus drei durchgeführten Probemessungen für die Klasse TLD 301 eine maximale Schwankung des Siebdurchgangs von 8,4 % um den Mittelwert. Ein einfacher Vergleich der gemessenen Summenkurve gegenüber dem Verlauf der Fullerparabel zeigt, dass innerhalb einer Aerogelfraktion insbesondere für den Durchmesserbereich unterhalb 1,2 mm die Kornanteile weit hinter einer idealen Verteilung zurückbleiben. Für TLD 101 liegen derartige Messwerte zurzeit nicht vor. Laut Firmenangabe ist jedoch eine wesentlich höhere Verteilungsschwankung zu erwarten.

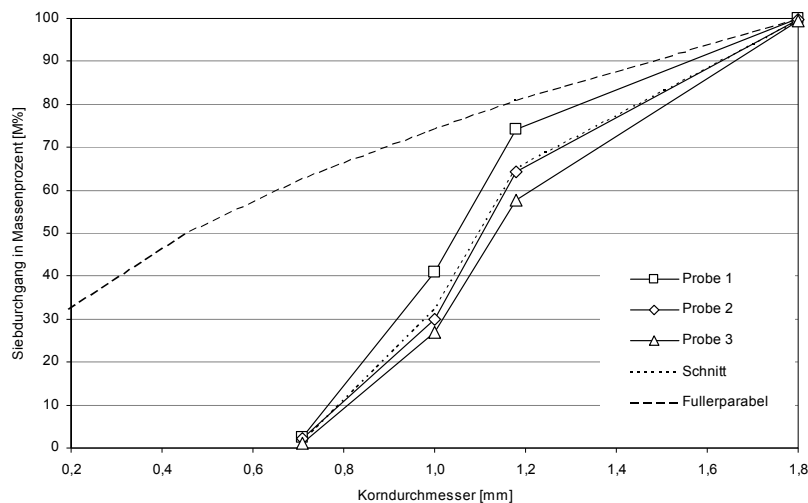


Abb. 5-7 Summenkurve des Siebdurchgangs für TLD 301 - Proben 1-3 (Messwerte Cabot)

Für die durchgeführten Materialuntersuchungen kommen die Fraktionen TLD 101 und TLD 301 zur Anwendung. Damit ist eine durchgehende Kornverteilung von 0,01 – 1,2 mm aufgeteilt in zwei Fraktionen gewährleistet.

5.3.2.1 Untersuchungsmethoden für Kornform und Größenverteilung

Für die Bestimmung der Form und Größe von Partikeln in einem Durchmesserbereich von 1 nm – 10 mm stehen verschiedene Messtechniken zur Verfügung (Abb. 5-8). Im relevanten Durchmesserbereich von 1 μm – 4 mm werden vor allem die Bildanalyse und die Laserbeugung eingesetzt. Da eine Dispergierung von Aerogele in Wasser nicht möglich ist, erfolgt die Messung trocken über einen Schwerkraftdispergierer. Die benötigte Probenmenge gegenüber einer Nassmessung nimmt damit deutlich zu, die Ergebnisse sind jedoch repräsentativ und zuverlässig.

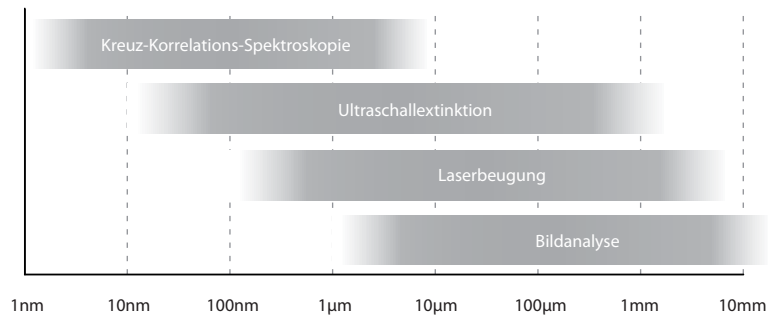


Abb. 5-8 Anwendungsbereiche verschiedener Analysemethoden der Kornform und -größe

5.3.2.1.1 Bildanalyse

Die Bildanalyse ermittelt direkt die Anzahlverteilung eines Partikelstroms, indem die aufgenommenen Bilder der Partikel über einen Kontrastabgleich ausgewertet werden. Die Belichtung erfolgt über eine gepulste Lichtquelle mit einer Leuchtdauer unter einer 1 ns. Die kurze Belichtung ermöglicht einen hohen Partikeldurchsatz ohne dynamische Unschärfen, was zu enorm kurzen Messintervallen unter 30 s führt. Die Abbildung der Partikel wird in Echtzeit auf Größe und Form durch mathematische Algorithmen analysiert. Die zufällige Lage der Partikel bei Eintritt in den Messbereich ist zur Vermeidung systematischer Fehler von großer Wichtigkeit. Die Partikel werden mit parallel geführtem Licht beleuchtet, was auch hochtransparente Stoffe in einem starken Kontrast darstellt. Als Bedingung muss sich der Brechungsindex vom Umgebungsmedium unterscheiden.

5.3.2.1.2 Laserbeugung

Die Laserbeugung ist ein indirektes Verfahren, welches die entstehenden Interferenzmuster aufgrund der Beugung des Laserstrahls durch die zu messenden Partikel ausgewertet. Mit diesem Verfahren kann eine Größenanalyse und bedingt eine Formanalyse durchgeführt werden. Aufgrund der kleinen Wellenlänge des Lasers können auch Partikelgrößen unter 1 µm gemessen werden.

Die Dispergierung der Aerogele erfolgt für beide Messmethoden trocken über eine Freifalleinheit. Im Fall eines aneinander Haftens des Materials wird die Größe des Agglomerats und nicht der Primärpartikel gemessen. Aufgrund der Oberflächenmodifikation der Aerogele stoßen sich die einzelnen Partikel jedoch so stark ab, dass keine Gefahr einer Verklumpung besteht. In der mathematischen Analyse wird neben einer Verteilungsermittlung der Korngrößen ebenfalls der Kornformfaktor ϕ bestimmt.

5.3.2.2 Messmethodenvergleich Bildanalyse – Laserbeugung

Abb. 5-9 zeigt die ermittelten Summenkurven der Fraktionen TLD101 und TLD301 mittels einer Bildanalyse und einer Laserbeugung im Vergleich. Für die gröbere Fraktion TLD301 kommen beide Verfahren zu einem sehr ähnlichen Ergebnis. Große Diskrepanzen ergeben sich jedoch für die feine Fraktion TLD101. Da beide Proben aus der gleichen Entnahme stammen, kann eine produktionsabhängige Schwankung ausgeschlossen werden. Die starke Abweichung liegt in der Struktur der Aerogele begründet. Diese verfügen nicht über eine geschlossene Partikeloberfläche, sondern weisen eine

extrem porige Oberfläche auf, die durch die strangförmige Sekundärstruktur der Aero-gele (vgl. Abb. 5-3) ähnlich einem Gitterfachwerk charakterisiert wird. Durch die höhere Auflösung erfährt der Laserstrahl während der Messung eine starke Beeinflussung durch diese Substruktur. Die diffusere Beugung spiegelt deshalb eine größere Anzahl kleinerer Partikel vor, während eine photooptische Analyse aufgrund des konstanten Brechungsindex der Partikel für diesen Durchmesserbereich ein scharfes Abbild der Proben aufnimmt.

Für die granulometrische Auswertung des Aerogelgranulats ist daher aufgrund der höheren Aussageverlässlichkeit und des zulässigen Anwendungsbereichs die Bildanalyse der Laserbeugung vorzuziehen.

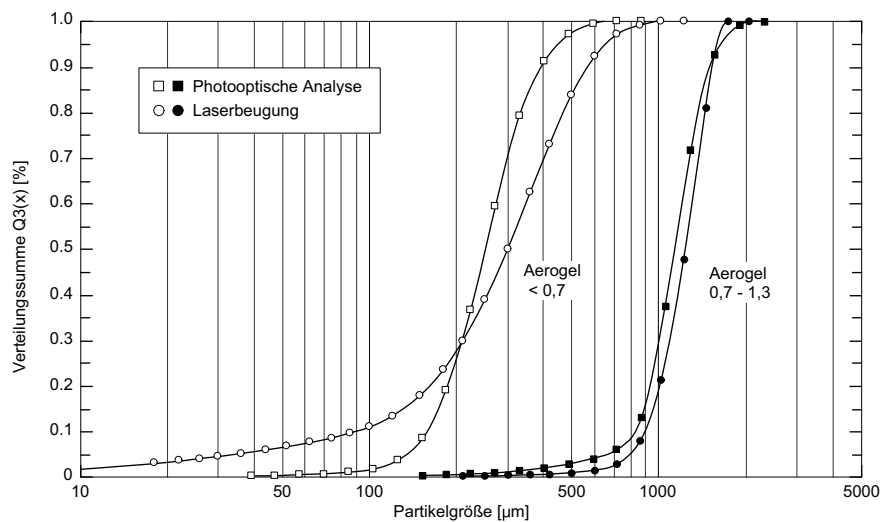


Abb. 5-9 Vergleich von Bildanalyse und Laserbeugung anhand der Summenkurven zweier verschiedener Aerogelfraktionen (Analysevergleich der Fa. Sympatek)

5.3.2.3 Erfassung der packungswirksamen Partikelgrößenunterschiede

Aus der Summenverteilung können die statistisch relevanten Korndurchmesser d_{10} , d_{50} und d_{90} entnommen werden. Der Faktor zwischen Gerüst- und Füllkorn wird auf der Basis des d_{50} - Werts bestimmt.

Tab. 5-2 Mittlere Korndurchmesserhältnisse für mögliche Gerüst - Füller Kombinationen

Füller	Gerüst	Quarzmehl fein	ENOVA MT1100	Zement	Aerogel <0,7	Aerogel 0,7 – 1,3
	d_{50} [µm]	2,5	8	18	230	1200
	Quelle	[78]	[7]	[78]	aus Abb. 5-9	aus Abb. 5-9
Quarzmehl fein	-	-	3,2	7,2	92	480
ENOVA MT1100	-	-	-	2,3	29	150
Zement	-	-	-	-	12,8	67
Aerogel <0,7	-	-	-	-	-	5,2

Tab. 5-2 gibt eine Übersicht der mittleren Korndurchmesser-Verhältnisse für die Betrachtung der Komponenten als Füllkorn und Gerüstkorn. Alle Verhältnisse, die über 6,5 liegen, verhalten sich gegenüber der gröberen Komponente packungswirksam. Das hochfeine Quarzmehl eignet sich noch nicht für das hochfein gemahlene Aerogelpulver, sondern erst für den Zement als Füller. Mit dem hochfeinen Aerogelpulver wird die Absicht verfolgt, in die Matrix, bestehend aus Zement und Quarzmehl, ein packungswirksames Material einzubringen, welches gleichzeitig zur Steigerung des Porenvolumens beiträgt. Das Verhältnis beider Komponenten fällt mit dem Faktor 2,3 für diesen Zweck jedoch deutlich zu niedrig aus. Der Zement weist gegenüber der feinen Aerogelfraktion $<0,7\text{mm}$ einen nutzbaren Verhältniswert von 12,8 auf, so dass sich hier eine wirksame Strukturverdichtung erzielen lässt. Die mittleren Durchmesser der feinen und der groben Aerogelfraktion liegen für eine effektive Steigerung der Lagerdichte zu eng beisammen. Dies lässt sich jedoch durch die Erzeugung einer Ausfallkörnung verbessern.

Die experimentelle Überprüfung zeigt, ob und unter welchem Mischungsverhältnis sich eine verdichtungssteigernde Wirkung der beiden Aerogelfraktionen erzielen lässt.

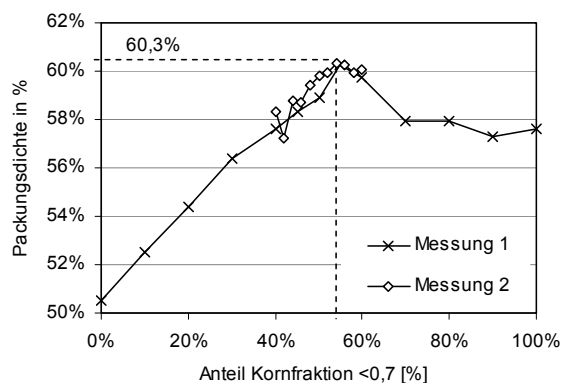


Abb. 5-10 Experimentelle Packungsdichteermittlung für zwei Aerogelfraktionen

Vorbereitend dazu wurde die Packungsdichte der Lieferfraktion $0,7 - 1,3\text{ mm}$ als der Ausgangswert für 0% bestimmt. In der ersten Messung wurde die grobe Fraktion in Schritten von 5 und 10 Vol.-% vollständig durch die feine Fraktion ersetzt. Hier konnte ein Maximum der Packungsdichte für ein Austauschvolumen von 55% beobachtet werden. In einer zweiten Messung wurde der Bereich zwischen 40 - 60% Austauschvolumen mit einer kleineren Schrittweite erneut untersucht. Das dabei ermittelte Maximum lag bei einem Anteil von 54% und bestätigte die bereits bei der ersten Messung erzielte maximale Packungsdichte von 60,3%.

5.4 Materialeigenschaften

Mit der Steigerung der Gefügedichtigkeit wird vor allem die Festigkeitseigenschaft eines Leichtbetons beeinflusst. Dieser Effekt wirkt sich in erster Linie auf die Strukturoptimierung der Matrix, dem tragenden Gerüst des Betons aus. Die Aerogele mit ihrer

extrem niedrigen Wärmeleitfähigkeit tragen hauptsächlich zur Verbesserung der bauphysikalischen Eigenschaften bei. Aufgrund des kornoptimierten Aufbaus der Gesamtstruktur liegen die Aerogele gleichmäßig dispergiert im Werkstoffgefüge vor. Die in der Folge fein verzweigte Matrix reduziert ihre Wärmebrückenwirkung auf ein Minimum.

5.4.1 Probekörper

5.4.1.1 Vorversuche

Aufgrund der Hydrophobierung und der geringen Rohdichte der Aerogele ist es nicht möglich, diese direkt in Wasser zu dispergieren. Für die Herstellung einer Betonmischung ist daher nicht nur die Rezeptur, sondern auch der Ablauf des Mischvorgangs von Bedeutung. Als praktikable Methode erweist sich unter anderem das Einmischen der Aerogele in eine vorab hergestellte Wasser-Zementsuspension. Die Suspension ist ausreichend zäh, um die Aerogele zu umhüllen, zu binden und deren Aufschwimmen in der Mischung zu verhindern.

Die anwendungsnahe Entwicklung ist ein Ziel dieser Arbeit. Alle Versuche wurden mit der Laborausstattung eines lokal ansässigen Fertigteilproduzenten durchgeführt. Für die Herstellung der Probekörper wurde ein Zyklus Zwangsmischer des Typs ZZ 75 HE verwendet (Abb. 5-11).



Abb. 5-11 Herstellung der Aerogelprobekörper im Betonlabor

5.4.1.2 Probekörperserien

Tab. 5-3 gibt eine Übersicht der Mischungszusammensetzung der hergestellten Probekörper AE-1 bis AE-3. Mit den Versuchen wurde die Entwicklung der Festigkeits- und Wärmeleitfähigkeitseigenschaften mit steigendem Aerogelanteil unter dem Aspekt der Verarbeitbarkeit untersucht. Die Angaben beziehen sich auf 1 m³ Beton.

Die Proben der Serie AE-1 wurde mit einem Mischungsverhältnis von groben (0,7-1,3) zu feinen (<0,7) Aerogelen im Verhältnis 8 zu 1 erstellt. Dieser Verhältniswert resultiert aus Vorversuchen, in denen die Menge des feinen Aerogels bestimmt wurde, die ohne Volumenzuwachs einer groben Schüttung zugegeben werden kann. Für die Probeserie AE-2 wurde für die Rezeptur ein auf 43 Vol.-% erhöhter Feinanteil zu Grunde gelegt, der sich aus der umgekehrten Zugabe der groben Aerogelfraktion in ein festes Volumen feiner Aerogele experimentell bestimmen ließ.

Für die Vorbereitung der Proben AE-3 wurde das Verfahren der Packungsdichtebestimmung wie in Kap. 5.3.2.3 beschrieben auf der Grundlage der Schüttdichteermittlung nach DIN EN 1097-3 [12] durchgeführt. Eine umfassende Dokumentation der Versuchsdurchführung findet man in [42]. Die in diesem Versuch ermittelten Verhältniswerte liegen bei einem Anteil von 54 Vol.-% für die feine Aerogelfraktion. Rechnerisch wurde dieser Fraktion der vollständige Zementanteil zugeschlagen, so dass der feine Aerogelanteil auf 30,4 Vol.-% des Gesamtvolumens reduziert wurde.

Tab. 5-3 Rezeptur der Probekörper

Komponente		AE-1	AE-2	AE-3
Anteil Aerogel < 0,7	[Vol.-%]	6,5	26,2	30,4
Anteil Aerogel 0,7 - 1,3	[Vol.-%]	51,7	34,7	43,7
Anteil Aerogel gesamt	[Vol.-%]	58,2	60,9	74,1
Zement (z)	[kg]	362,0	330,0	220,0
Wasser (w)	[kg]	181,0	165,0	124,0
w/z eff	[1]	0,51	0,52	0,66
Fließmittel	[Gew.-%]	1,5	2,5	15,0
Frischbetonwichte ρ_{frisch}	[kg/m ³]	820,0	771,0	521,0

Der Fließmittelanteil wurde in Gew.-% auf den Zementanteil der Mischung berücksichtigt und dient der Sicherstellung der Verarbeitbarkeit auch bei geringem w/z-Wert <0,4. Bei der Herstellung musste jedoch bei allen drei Serien deutlich Wasser zugegeben werden, bis sich eine verarbeitbare Konsistenz einstellte, so dass sich ein effektiver w/z-Wert von über 0,5 ergab. Dies deutet auf eine noch ungenügend präzise Mischungsabstimmung in Hinsicht auf die Packungsdichteoptimierung hin, um einen für hochfesten Beton charakteristisch niedrigen Wassergehalt zum Ansatz zu bringen.

5.4.2 Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,\text{tr}}$

Die Wärmeleitfähigkeit der Probekörper wurde mit dem Zwei-Plattenprüfverfahren nach [14] durch das Institut für Bauphysik (IBP) in Stuttgart (AE-1 und AE-3) und der EMPA (AE-2) in Dübendorf (CH) bestimmt.

5.4.2.1 Probentrocknung

Zur Vorbereitung wurden die Proben im Trockenschrank bei 105°C bis auf Gewichtskonstanz getrocknet. Abb. 5-12 zeigt Gewichtsverluste der Probekörper AE-1 und AE-2 infolge des Trocknungsvorgangs in einer Größenordnung von 20-25 Gew.-%. Diese Proben hatten zum Zeitpunkt der Trocknung ein Alter von 36 bzw. 67 Tagen. Probe AE-3 zeigte bei einem Alter von 78 Tagen trotz des höchsten w/z-Wertes aller drei Proben einen wesentlich geringeren Trocknungsverlust von 1,6 Gew.-%.

Aufgrund des hohen w/z-Werts weisen die Probekörper einen hohen Anteil nicht gebundenen Wassers auf, der ungehindert austrocknen kann. Im Gegensatz zu Blähton haben Aerogele aufgrund ihrer Hydrophobierung keinerlei Pufferwirkung, so dass die Zusatzfeuchtigkeit, die ausschließlich in der Matrix enthalten ist, extrem schnell und restlos abgegeben wird. Damit entfällt der bei Leichtbeton bekannte Effekt der „inneren Nachbehandlung“. Je älter die Probe ist, umso stärker ist der Feuchtegehalt bereits ohne zusätzliche Trocknung reduziert.

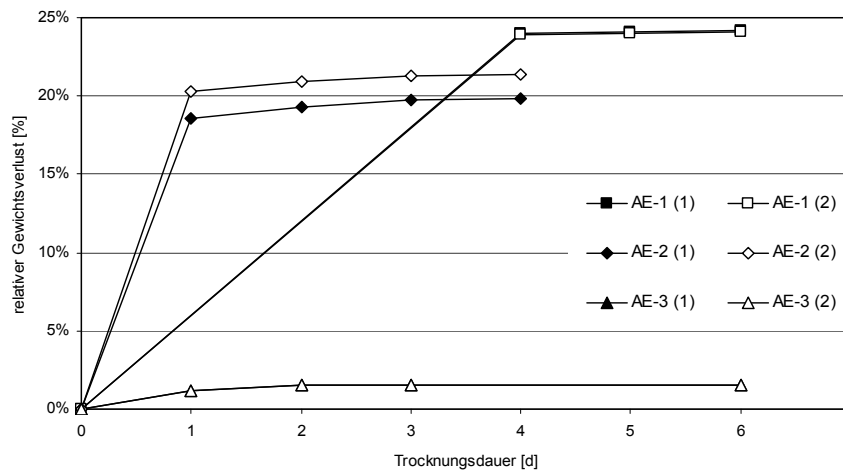


Abb. 5-12 Kumulierter Gewichtsverlust (relativ) der Proben bei Trocknung

Alle Probekörper wurden bis zur Messung im geschlossenen Foliensack aufbewahrt. Der nach drei Monaten gemessene Feuchtegehalt von AE-3 liegt mit 0,016 kg/kg deutlich unter dem in DIN V 4108-4 [22] tabellierten Wert von 0,13 kg/kg für einen gefügedichten Leichtbeton. Innerhalb von 6 Trocknungstagen konnte bei allen Probekörpern die Massenkonstanz erreicht werden. Die Messergebnisse zeigen, wie wichtig ein reduzierter Wassergehalt in Verbindung mit einer sorgfältigen Nachbehandlung ist, um ein zu starkes Austrocknen und die damit verbundenen Schwindrisse zu vermeiden.

5.4.2.2 Wärmeleitfähigkeit λ

Tab. 5-4 gibt eine Übersicht der gemessenen $\lambda_{10, \text{tr}}$ – Werte der hergestellten Probekörper. Hier zeigt sich zwischen der Trockenrohddichte des Probekörpers und der gemessenen Wärmeleitfähigkeit ein linearer Zusammenhang.

Durch die Trocknung, verlieren die Proben der Serie AE-1 mehr Gewicht als die Proben der Serie AE-2, so dass sich das Verhältnis der Trockenrohddichten gegenüber der Frischbetondichten umkehrt. Dies ist eine Folge des hohen Wasseranteils, der austrocknet und stattdessen eine Struktur unerwünschter Kapillar- und Gelporen zurücklässt. Sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch die Festigkeit der Proben wird dadurch nachteilig beeinflusst.

Zum Vergleich werden in Tab. 5-4 Zeile 4 die mit Gleichung 1 [50] berechneten Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{10, \text{tr}}$ für Porenbeton gleicher Rohdichte aufgeführt. Gleichung 1 wurde anhand experimentell ermittelter Messwerte empirisch abgeleitet.

$$\lambda_{10, \text{tr}} = 0,028 + 0,180 \cdot 10^{-3} \cdot \rho \quad \text{mit } \rho \text{ in kg/m}^3$$

Gleichung 1

Tab. 5-4 $\lambda_{10, \text{tr}}$ und Trockenrohddichte der Probekörper

		AE-1	AE-2	AE-3
Rohddichte trocken ρ_{tr}	[kg/m ³]	582,0	637,0	367,0
Dichteverhältnis $\rho_{\text{tr}}/\rho_{\text{frisch}}$	[1]	0,710	0,826	0,704
$\lambda_{10, \text{tr}}$ AE-Proben (Messwerte)	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	0,1275	0,1370	0,0613
$\lambda_{10, \text{tr}}$ Porenbeton (berechnet)	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	0,1328	0,1427	0,0941

Die Proben AE-1 und AE-2 zeigen eine gering verbesserte Wärmeleitfähigkeit von 4% gegenüber dem Porenbeton vergleichbarer Trockenrohddichte. Probe AE-3 weist jedoch eine signifikante Reduktion der Wärmeleitfähigkeit von 35% gegenüber einem Porenbeton gleicher Rohddichte auf.

Das Dichteverhältnis von Trockenrohddichte zu Frischbetonrohddichte der Proben AE-1 und AE-3 ist praktisch gleich, so dass sich in beiden Proben derselbe Luftporenanteil infolge Austrocknung auswirkt. Der Feinanteil an Aerogele fällt in Probe AE-3 gegenüber AE-1 wesentlich höher aus, so dass sich hier sehr deutlich der Einfluss der fein verzweigten Matrix bemerkbar macht. Die dadurch verlängerten Leitungswege, wirken sich wie eine erhöhte Bauteildicke aus.

5.4.3 Festigkeit f_u

Tab. 5-5 zeigt die stichprobenartig ermittelte Festigkeit der Probenserien. Die Festigkeitsangabe für Probe AE-1 beruht auf dem Ergebnis einer einzelnen Würfelprüfung. Für die Serie AE-2 stand nicht ausreichend Material für die Herstellung von Würfelprobekörper für Festigkeitsuntersuchungen zur Verfügung, so dass auf diese Prüfung verzichtet werden musste. Der ermittelte Festigkeitswert für Serie AE-3 repräsentiert den Mittelwert aus drei Würfelprüfungen.

Tab. 5-5 Festigkeit f_u der Probekörper AE-1 bis AE-3 und Ultraporcrete [45]

		AE-1	AE-2	AE-3
Probenalter bei Prüfung	[d]	26	67	28
ρ_{trocken}	[kg/m ³]	813,0	764,0	509,0
Festigkeit f_u	[N/mm ²]	3,55	-	0,93
Vergleichswerte mit Ultraporcrete (Versuchsserie A; min – max Werte von 4 Proben)				
ρ_{trocken}	[kg/m ³]	760 - 780	760 - 780	440 - 500
Festigkeit f_u	[N/mm ²]	6,3 – 6,6	6,3 – 6,6	1,8 – 3,9

Aufgrund der in Kap. 5.3.1 theoretischen Überlegungen über das zu erwartende Tragverhalten ist ein Vergleich mit dem ebenfalls lufthärtenden Schaumbeton „Ultraporcrete“ möglich. Dabei bleibt die erzielte Festigkeit bei gleicher Rohdichte in der Größenordnung 50-75% hinter den erzielten Festigkeitswerten des Schaumbetons zurück [45]. Der w/z-Wert der Ultraporcrete-Proben der Versuchsserie A liegt dabei mit 0,6 vergleichbar hoch.

5.4.4 Ergebnisse der Untersuchung

Ein gefügedichter Leichtbeton mit Aerogelzuschlag erzielt Wärmeleitfähigkeiten, die deutlich unterhalb poriger Werkstoffe mit vergleichbarer Rohdichte liegen. Die im Rahmen der Vorversuche experimentell abgeleiteten Rezepturen entwickeln noch ungenügend die charakteristischen Merkmale einer packungswirksam optimierten Mischung. Deutlich wird das durch den hohen Wasserbedarf, gekennzeichnet durch den w/z-Wert von 0,5-0,66, um eine ausreichende Verarbeitbarkeit einzustellen und dem hohen Massenverlust der Proben beim Trocknen bis auf Gewichtskonstanz. Der dadurch generierte Porenanteil wirkt sich sowohl auf die Festigkeit als auch auf die Wärmeleitfähigkeit nachteilig aus. Über den Gesamtvolumenanteil der Aerogele lässt sich eine bedarfsgerechte Abstimmung zwischen der Festigkeit und der Wärmeleitfähigkeit des Materials erzielen. Ein für Dämmaufgaben nutzbarer Aerogelgehalt bewegt sich in einem Bereich von 60-75 Vol.-%.

Legt man die erzielte Wärmeleitfähigkeit der Probe AE-3 mit einem Aerogelgehalt von 74% zugrunde, lässt sich eine einschalige Wand bereits mit 40 cm Stärke mit einem U-Wert von 0,15 W/m²K (Passivhausstandard) ausführen (Abb. 5-13). Der U-Wert wurde dazu ohne Feuchtezuschlag nach [22] bestimmt.

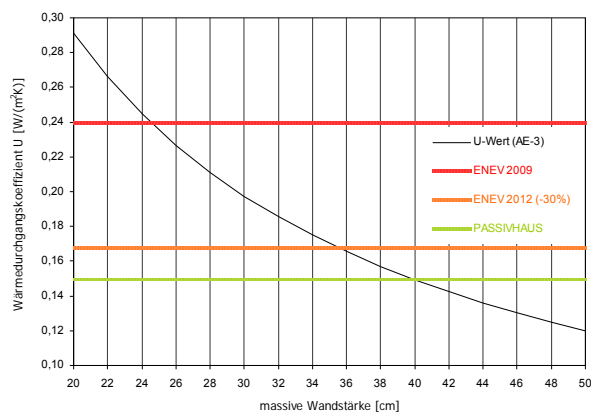


Abb. 5-13 U-Wert einer Modellwand mit 74 Vol.-% Aerogelgehalt in Abhängigkeit von der Wandstärke mit derzeit gültigen Grenzwerten

5.5 Sichtbetoneigenschaften und Oberflächenqualität

Leichtbeton mit Aerogelzuschlag zeichnet sich neben der niedrigen Wärmeleitfähigkeit ebenfalls durch eine gefügedichte Struktur und ein homogenes Erscheinungsbild aus. Aufgrund der Materialeigenschaften ist nicht nur eine schalungsglatte Oberfläche, son-

dem auch die vollständige Bandbreite der Nachbearbeitungsmöglichkeiten einer Betonoberfläche möglich. Durch die fehlende explizite Dämmschicht ist die oberflächenfertige Gestaltbarkeit der Betonoberfläche eine besonders interessante Eigenschaft des Materials. Entfällt doch damit die Notwendigkeit eines Putzaufbaus oder anderweitiger Fassadenaufbauten, zum Schutz der Dämmschicht.

Sichtbetonflächen erhöhen die Bauwerkskosten aufgrund des mehrschaligen Wandaufbaus und dem damit verbundenen Konstruktionsaufwand. Monolithische Wandaufbauten aus Leichtbeton sind trotz der Konstruktionsvorteile ebenfalls teurer, da das Material beim Einsatz unter Sichtanforderungen erhebliche qualitätssichernde Maßnahmen erfordert [57]. Grundsätzlich ist eine Herstellung der Bauteile vor Ort immer mit einem höheren Aufwand an Qualitätssicherung verbunden als bei einer Herstellung im Werk, wo eine Reihe von Unsicherheitsfaktoren bereits von vornherein ausgeschlossen werden können. Leichtbeton mit Aerogelbeton zeigt sich vom Aspekt der Verarbeitung dem Normalbeton gleichwertig. Da der Wasseranspruch des Materials exakt bestimmbar ist, können auch hier wesentliche Unsicherheiten in Bezug auf die Gestaltung ausgeschlossen werden (vgl. Kap. 4.1.3). Für einen einschaligen Wandaufbau stellt die oberflächenfertige Ausbildung der Wand aus diesem Material die wirtschaftlichste Lösung dar, da nachfolgende Gewerke im Zusammenhang mit dem Fassadenaufbau vollständig entfallen können. Die Verarbeitung im Werk ermöglicht die präzise Herstellung und den Einbau des Materials unter gleichbleibenden Bedingungen. Zusätzlich steht eine Reihe von Bearbeitungsmöglichkeiten zur Verfügung, die vor Ort nicht oder nur unter schwierigen Bedingungen möglich sind.

5.5.1 Versuchsprogramm

Mit Studenten wurde im Rahmen des Forschungsseminars facelT im SS 2010 die Anwendbarkeit der gebräuchlichsten Bearbeitungsmöglichkeiten experimentell nachgewiesen. Tab. 5-6 zeigt die der Auswahl der Probekörper zu Grunde liegende Systematik. Die Serien wurden primär durch die Schalungseigenschaften saugend – nicht saugend – strukturiert gegliedert, wobei in die letzte Kategorie Reliefausbildungen fallen, die sowohl saugend als auch nicht saugend ausgeführt wurden. Für die Herstellung der Probekörper wurden ein Weißzement und ein grauer CEM III Hochofenzement verwendet. Der Aerogelgehalt betrug 50 Vol.-%. Als Pigmente kamen 4 ausgewählte Farbtöne zum Einsatz, wobei die kräftigen Farbtöne (Rot und Terrakottabraun) in Verbindung mit dem Weißzement und die dunklen Pigmente (Schwarz-Anthrazit und Schwarz) in Kombination mit dem Grauzement verwendet wurden. Insgesamt sind 14 kleine Proben der Größe 10cm x 10cm ohne weitere Nachbearbeitung hergestellt worden, die ausschließlich die Wirkung der Einfärbung in Kombination mit verschiedenen Schalungen zeigen. Diese Proben weisen im Durchschnitt ein $\rho_{\text{trocken}} = 900 \text{ kg/m}^3$ auf. Alle weiteren Probekörper wurden den verschiedenen Nachbearbeitungsmethoden unterzogen, um die kombinierte Wirkung von Einfärbung und Zuschlag sowie der Bearbeitungsmethode beurteilen zu können. Diese Probekörper wurden im Format 20 cm x 20 cm hergestellt. Der farbige Glasgranulat-Zuschlag bewirkt infolge der Nachbearbeitung einen Kontrast mit der Matrix. Die Trockenrohddichte von $\rho_{\text{trocken}} = 1100 \text{ kg/m}^3$ liegt aufgrund des dichteren Zuschlags um ca. 23% höher als die der kleinen Probekörper.

Tab. 5-6 Anzahl und Art der Probekörper sowie Nachbearbeitungsmethode

Schalung	Saugend		nicht saugend		strukturiert	
	Zement	Pigmente	Zement	Pigmente	Zement	Pigmente
Farbgebung durch						
Färbung	-	4	-	4	2	4
Waschen	3	-	3	-	1	1
Photobeton	1	-	1	-	-	-
Sandstrahlen	2	1	2	-	3	-
Säuern	1	1	1	-	1	1
Mech. Bearbeitung			Polieren 1x	Schleifen 2x		
				Stocken 1x		

Für die Vorbereitung der Schalung kamen Hochleistungstrennmittel auf der Basis von Wachs, Öl oder Lösungsmittel zum Einsatz. In Vorversuchen wurde die Wirksamkeit der Produktpalette in Wechselwirkung mit dem aerogelhaltigen Leichtbeton und den verschiedenen Schalhäuten getestet. Im Rahmen dieser Untersuchung kamen ausschließlich Produkte eines Herstellers zum Einsatz.

5.5.2 Pigmentierung

Die in Abb. 5-14 dargestellten Probekörper zeigen die Wirkung der Pigmentfärbung auf das Material. Die Zugabe von Pigmentierung bewegt sich zwischen 3 – 5 Gew.-% des Zementanteils und hängt von der zu erzielenden Farbintensität ab. Die erzeugten Oberflächen auf nichtsaugendem Schalungsmaterial zeichnen sich durch eine sehr glatte und farblich gleichförmige Gestaltung aus. Trotz Entlüftung ist ein fein verteiltes Porennetzwerk auf der Oberfläche für alle Probekörper charakteristisch.

Die Holzstruktur der saugenden Schalung ist aufgrund der variierenden Saugfähigkeit des Materials gut erkennbar. Das entweichende Wasser entzieht der Mischung Feinanteile, die sich fest an der Schalung anlagern. Trotz eines abgestimmten Trennmiteleinsetzes ist die Haftung an der Schalung größer als die Materialverbundfestigkeit, so dass sich beim Ausschalen die gezeigte Struktur (2. v. l.) einstellt.

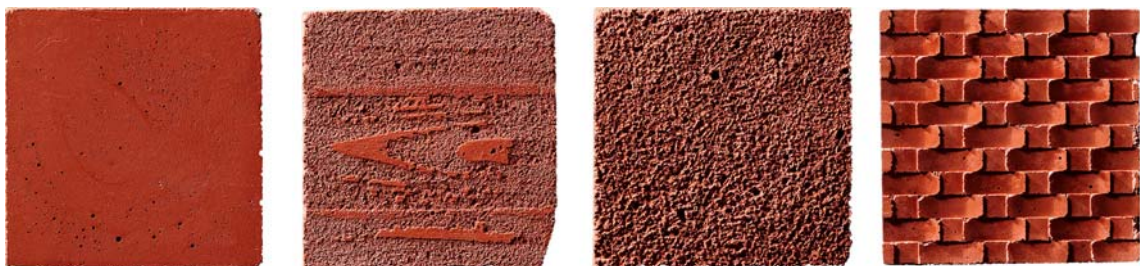


Abb. 5-14 rot pigmentierte Probekörper (Bayanian, Huang, Schneider, Yan, Zheng) Pigmentanteil 4,5 % (von links) nicht saugend - saugend - gestrahlt - nicht saugend strukturiert (Fotos: Miklautsch)

5.5.3 Bearbeitungsmethoden

In DIN V 18500 [21] wird die vollständige Bandbreite möglicher Nachbearbeitungsmethoden aufgeführt und begrifflich definiert. Die folgenden Unterkapitel fassen die Erfahrungen und Ergebnisse aus der Anwendung der in Tab. 5-6 aufgelisteten Nachbearbeitungsmethoden auf Leichtbeton mit Aerogelzuschlag zusammen.

5.5.3.1 Waschen

Durch Einsatz eines Verzögerers wird die Aushärtung der obersten Zementschicht chemisch gebremst. Dazu wird das Mittel vor dem Betonieren direkt auf die Schalhaut aufgebracht. Die Konzentration des Verzögerers bestimmt bei einer festgelegten Einwirkzeit die Tiefenwirkung und damit auch die Stärke der beabsichtigten Auswaschung. Die Wirkung wird über die Konzentration des Produkts gesteuert, um die Einwirkzeit konstant zu halten. Für die Anwendung abtragender Nachbearbeitungsmethoden wie z.B. Waschen gelingt die Erzielung eines Kontrasts mit der Matrix nur durch einen farblich unterschiedlichen Zuschlag. Die verwendeten Aerogele sind transluzent und heben sich farblich nicht von der Matrix ab. Diese Eigenschaft ist für eine homogene Flächenwirkung von großem Vorteil.

Für eine Kontrastwirkung müssen deshalb zusätzliche Zuschläge in den Beton eingemischt werden, die jedoch die erzielte Wärmeleitfähigkeit aufgrund ihrer hohen Dichte erheblich verschlechtern. Dieser ausschließlich aus optischen Gründen erforderliche Zuschlag wird in einer möglichst dünnen Schicht, dem Vorsatzbeton eingebracht. Die Stärke dieser Schicht hängt von der verwendeten Kornfraktion ab. Mindestabmessungen werden ebenfalls nach DIN V 18500 [21] geregelt. Die Vorsatzbetonschicht wird aufgrund der erhöhten Wärmeleitfähigkeit für die U-Wertbestimmung nicht berücksichtigt. Weiterhin besteht in der Norm die Forderung nach einer festen Verbindung von Vorsatz- und Kernbeton. Trotz des unberücksichtigt bleibenden Vorsatzbetons ist ein Aerogelanteil in dieser Schicht notwendig, um ein abgestimmtes Materialverhalten beider Schichten zur Sicherstellung des Verbunds insbesondere bezüglich Temperatureinflüsse zu gewährleisten.

5.5.3.2 Photobeton

Waschen bildet auch die technische Grundlage für die bildhafte Nachbearbeitung des Betons. Hierbei wird über eine mit Verzögerer bedruckte Folie sehr gezielt die Aushärtung des Zements unterbunden. Die in einem Punktraster erfolgte Auswaschung ergibt aufgrund der Kontrastwirkung zwischen der Matrixfarbe und der Zuschlagfarbe mit einem ausreichenden Betrachtungsabstand ein entsprechend dem gewählten Motiv entstehendes Abbild. Wie in Abb. 5-15 gezeigt, wurde eine mit dem Laser geschnittene Vorlage verwendet, um den Verzögerer gezielt auf die Schalung aufbringen zu können.



Abb. 5-15 Photobetonmotiv (Fahlbusch, Ruppert) gelaserte Schablone - Einbringung des Verzögerers – Endergebnis (Foto rechts: Miklautsch)

5.5.3.3 Sandstrahlen

Beim Sandstrahlen wird durch mit Luftdruck beschleunigte Hochofenschlacke (Korndurchmesser 0,2-0,8 mm) die oberste Betonschicht abgeschlagen. Bei dieser abtragenden Nachbearbeitungsmethode muss die geringe Materialhärte der Matrix in Betracht gezogen werden, um einen zu starken und unregelmäßigen Abtrag zu verhindern. Je nach Strahlstärke lässt sich das Arbeitsergebnis zwischen angeraut und stark zerklüftet variieren (siehe Abb. 5-14 2. v. r.). Mit Hilfe einer Klebefolie können Bereiche abgedeckt werden, die durch das Sandstrahlen nicht beeinträchtigt werden sollen (Abb. 5-16). Versuche ergaben, dass die abgedeckten Bereiche eine Mindestbreite von 10mm nicht unterschreiten sollten, da sonst die Klebefolie im Strahlprozess abgetragen wird. Eine Folienstärke von 180 μm ist für einen Arbeitsdruck von 1-2 bar mindestens notwendig. Zur genauen Abstimmung von Folienstärke und Strahl Druck sind Vorversuche empfehlenswert.



Abb. 5-16 sandgestrahlter Probekörper (Pelzer) – abgeklebter und gestrahlter Probekörper - Strahlpistole und Strahlmittelreservoir – Endergebnis (Foto rechts: Miklautsch)

5.5.3.4 Säuern

Durch die kurzzeitige Einwirkung einer Säure (ca. 30 min) wird die oberste Zementschicht angelöst und durch eine mechanische Einwirkung wie Abbürsten oder Waschen entfernt. Diese Nachbearbeitung erfolgt erst nach dem Ausschalen auf dem jungen Beton. Durch diese Methode kann ein maximaler Abtrag von 0,5mm erzielt werden. Die Oberfläche wird dadurch nur angeraut, was der Optik und Haptik eines Sandsteins gleichkommt. Da der Zuschlag minimal freigelegt wird, ist damit auch ein Effekt auf die Farbigkeit des Materials verbunden. Durch die chemische Reaktion mit dem alkalischen Zement, wird die Säure neutralisiert. Diese Nachbearbeitungsmethode wird nur auf kleineren Flächen und ausschließlich im Werk verwendet, um eine Umweltbelastung ausschließen zu können [60]. Auch mit dieser Methode lässt sich durch den Wechsel von behandelten und unbehandelten Bereichen gestalterisch auf das Material einwirken (Abb. 5-17).

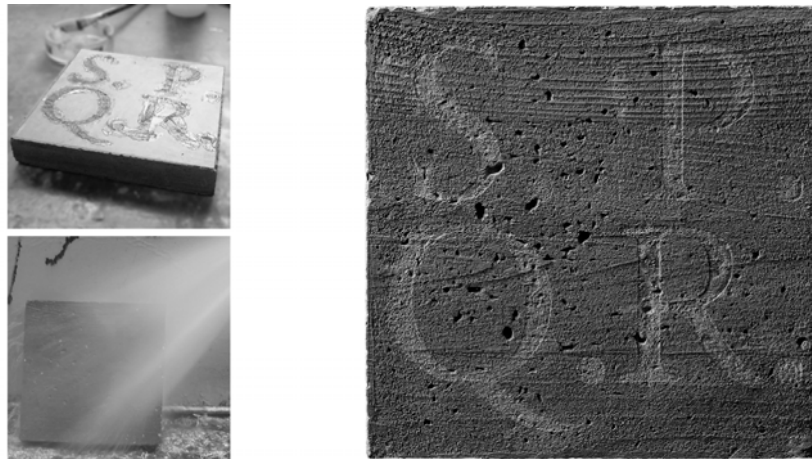


Abb. 5-17 Gesäuerter Probekörper (Bischofberger, Popovic) - Aufbringen der Säure – Abwaschen – Endergebnis (Foto rechts: Miklautsch)

5.5.3.5 Mechanische Nachbearbeitung

Darunter ist die handwerkliche Nachbearbeitung einer Betonoberfläche zu verstehen. Es kommen die gleichen Methoden und Werkzeuge wie zur Bearbeitung von Natursteinflächen zur Anwendung. Ziel ist die Strukturierung einer schalungsglatten Betonoberfläche, indem die Oberfläche rauer und dadurch einem Naturstein ähnlicher bearbeitet wird. Scharrieren, Stocken und Bossieren von Oberflächen sind die am häufigsten angewendeten Methoden. Die Bearbeitung erfolgt hauptsächlich maschinell und ist auch großflächig einsetzbar. Je nach geforderter Präzision und Komplexität kommen auch computergesteuerte Werkzeuge zum Einsatz.

Auch der gegenteilige Effekt in Form einer Glättung und Politur der Betonoberfläche fällt in diese Kategorie. Durch Abschleifen um bis zu 4 mm wird die Oberfläche geebnet. An diesen Vorgang werden durch die DIN die niedrigsten Qualitätsansprüche gestellt. Durch einen anschließenden Feinschliff kann die Oberflächenqualität des Arbeitsergebnisses mittels eines zusätzlichen Abtrags mit Feinkorn weiter erhöht werden. Beim Polieren steht die Erzielung eines Oberflächenglanzes im Fokus. Dabei erfolgt

kein weiterer Abtrag der Oberfläche. Es handelt sich hierbei um eine Nachbehandlung und keine Nachbearbeitung mehr. Die erforderlichen Arbeitsschritte und Qualitätsmerkmale werden durch die DIN V 18500 [21] geregelt.

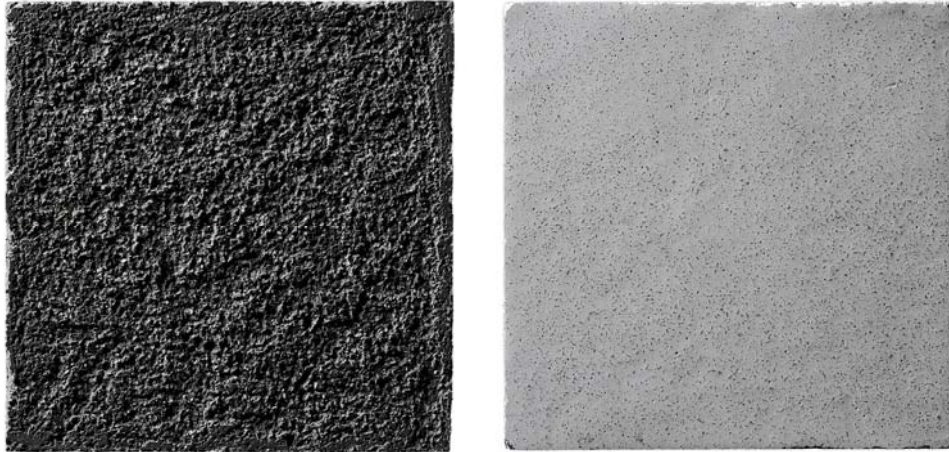


Abb. 5-18 Mechanisch bearbeitete Probekörper (Bozza) – gestockt (links) und poliert (rechts); (Fotos Miklautsch)

5.5.4 Weitere Gestaltungsmöglichkeiten

Der einschalige Wandaufbau mit einem dämmenden und tragenden Werkstoff bietet neuartige Gestaltungsmöglichkeiten. Bei der Herstellung der Elemente können über die Bauteildicke transparente Kunststoffe in die Schalung eingelegt werden, die die Funktion eines Lichtleiters durch den Beton übernehmen (Abb. 5-19). Aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit stellen die verwendeten Kunststoffe keine Wärmebrücke dar. Da kein Fassadenaufbau berücksichtigt werden muss, können die Lichtleiter bereits oberflächenfertig integriert werden. Im Unterschied zu LiTraCon™ tritt das Licht durch lineare Elemente aus. Der Lichteintritt erfolgt auf der Oberfläche nicht sichtbar punktuell auf der Rückseite des Bauteils.

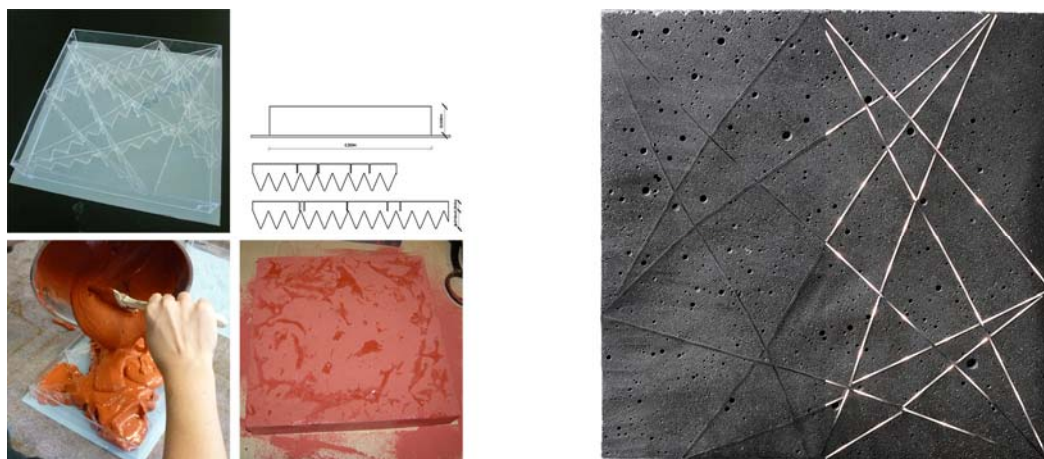


Abb. 5-19 Lichtleitender Probekörper (Hermann) durch Einlegen transparenter Kunststoffprofile – Oberfläche geschliffen – Endergebnis (Foto rechts: Miklautsch)

Die unterbrochene Formgebung des Lichtleiters gewährleistet einen ausreichenden Querschnitt für die Bewehrungsführung und die durchgehende Verbindung des Betonkörpers.

5.6 Zusammenfassung

Leichtbeton mit Aerogelzuschlag erreicht aufgrund des hohen Dämmvermögens der Aerogele eine exzellente Wärmeleitfähigkeit, die signifikant unter der des Porenbetons vergleichbarer Rohdichte liegt. Das Material hat, wie Porenbeton, einen rein mineralischen Aufbau. Trotz des hohen Porenvolumens handelt es sich um einen gefügedichten Leichtbeton im Rohdichtebereich von 500-700 kg/m³. Das Material weist ein hohes Schalldämmmaß und herausragende Brandschutzeigenschaften auf [66]. Die Verarbeitung erfolgt wie bei selbstverdichtenden Beton (SVB). Da die verwendeten Aerogele hydrophobe Eigenschaften haben, und daher keinerlei Wasser aufnehmen, kann der Wasserbedarf der Mischung präzise ermittelt und eingestellt werden. Die erzielten Materialeigenschaften sind somit verlässlich reproduzierbar.

Der Einfluss einer Rezepturoptimierung zur Festigkeitssteigerung des Materials unter dem Gesichtspunkt der Packungsdichteoptimierung, konnte mit den durchgeführten Voruntersuchungen noch nicht bestätigt werden. Der Nachweis erfolgt im Rahmen weiterführender Forschungsprojekte, welche die Nutzung der erforderlichen Entwicklungsinfrastruktur möglich macht. In diesem Rahmen können erstmals eine Reihe wichtiger Materialeigenschaften experimentell erfasst werden, die eine Klassifikation des Materials ermöglicht.

Die gefügedichte Materialstruktur und die Unempfindlichkeit der Aerogele gegenüber Feuchtigkeitseinfluss ermöglicht auch die Anwendung einer breit gefächerten Nachbearbeitungspalette. Damit sind einschalige Betonelemente herstellbar, die sowohl aktuellen bauphysikalischen Anforderungen, als auch den Qualitäts- und Gestaltungsanforderungen eines oberflächenfertigen Fassadenelements gerecht werden.

6 Elementfugen

Der Fuge kommt im Beton- und Fertigteilbau eine große Bedeutung zu. Hier findet der Ausgleich aller auftretenden Toleranzen der Bauteile untereinander statt. Die Betonfertigteile werden bei der Montage durch geeignete Hilfskonstruktionen in ihrer Solllage gehalten. Das Setzen erfolgt in ein Mörtelbett, oder die Fuge wird nachträglich mit Hilfe eines Mörtels verfüllt. Das plastische bis fließfähige Material passt sich dabei zuverlässig den variablen geometrischen Erfordernissen der Fuge an, und verschließt diese dauerhaft. Nach der Aushärtung sind die Bauteile kraftschlüssig miteinander verbunden. Diese höchst einfache wie zuverlässige Verbindungsmethode von Fertigteilen wurde von Anfang an für das Bauen mit Elementen angewendet. Das historische Vorbild dafür ist im Mauerwerksbau zu finden.

Die Fuge konzentriert in einem sehr kleinen Raum eine Reihe wichtiger Funktionen, deren zuverlässige Erfüllung maßgeblich die Qualität des Bauwerks mitbestimmt. Die technischen Anforderungen sind demnach besonders hoch, was auch das Bestreben erklärt, mit möglichst wenig Fugen auszukommen. Ein Großteil der zu erfüllenden Anforderungen kann dabei durch den Mörtel übernommen werden.

Im Rahmen des integrierten Konzepts wird der Anspruch einer lösbaren Fugenausbildung postuliert, um eine verbesserte Wiederverwendung der Bauteile zu erzielen. Da der Einsatz von Mörtel zu einem Verkleben der Bauteile führt, wird eine trockene Fugenausführung als Lösung propagiert. Durch die Einbringung einer chemischen oder physikalischen Sollfuge ließe sich Demontierbarkeit auch mit einer Mörtelfuge sicherstellen, aber vor dem Hintergrund eine möglichst verschmutzungsarme Montagetechnik für Elemente mit einem höherem Vorfertigungsgrad zu entwickeln, wird einer trockenen und lösbaren Fugenausführung der Vorzug gegeben.

Gedämmte und einschalige Wandelemente aus Leichtbeton kommen ausschließlich als Außenwände zum Einsatz. Da für tragende Innenwände keine besonderen thermischen Anforderungen bestehen, werden diese wegen der besseren Schallschutzeigenschaften und der höheren Wärmespeicherkapazität aus Normalbeton hergestellt. In Bezug auf bauphysikalische Anforderungen muss zwischen Innen- und Außenwandfugen unterschieden werden. Die statischen Anforderungen müssen von beiden Fugentypen erfüllt werden. Derzeit wird dies zuverlässig und preiswert durch ein Mörtelbett erfüllt. Soll aus den genannten Gründen darauf verzichtet werden, muss eine Materialalternative gefunden werden, welche die statischen und bauphysikalischen Anforderungen gleichwertig oder besser erfüllt. Ist das mit einem Material nicht möglich, muss eine Aufteilung der Funktionen auf mehrere Materialien bzw. Elemente erfolgen. Hier gerät man mit der Forderung nach einem günstigen, wirtschaftlichen sowie montagefreundlichen System in Konflikt.

6.1 Fugenanforderungen

Fugen stellen für das elementierte Bauen die anfälligsten Punkte hinsichtlich der Abdichtung dar. Um eine zuverlässige Fugenausbildung unter dem Aspekt der Lösbarkeit

konzipieren zu können, muss die umfassende Leistungsanforderung an eine Fugenkonstruktion beachtet werden. In [6] wurde eine ausführliche Zusammenstellung der relevanten Punkte vorgenommen (Tab. 6-1).

Tab. 6-1 Anforderungen an Fugenkonstruktionen im Elementbau

Aspekt	Kriterien
Statik	<ul style="list-style-type: none"> – Aufnahme von Druck-, Zug- und Schubspannungen aus auftretenden Lastkombinationen – Gewährleistung der Standsicherheit
Toleranzen und Justierung	<ul style="list-style-type: none"> – Aufnahme von Maßabweichungen aus Fertigung und Montage – Ausgleich Fertigungs- und Montagetoleranzen durch Justiermöglichkeit – Zulassung von Verformungen im Gebrauchszustand
Ästhetik	<ul style="list-style-type: none"> – Lage und Art der Ausbildung (Tiefe, Farbgebung) – Breite und Maßhaltigkeit – Sichtbar - unsichtbar
Wirtschaftlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> – Ausnutzung der Grenzabmessungen (Reduktion des Fugenanteils) – Rationelle und schnelle Montageausführung – Produktivitätsvorteil bei Steigerung des Vorfertigungsgrades – Ganzjährige Fertigung und Montage – Etablierung von Planungsabläufen und Produktionsabläufen für elementiertes Bauen
Dichtigkeit	<ul style="list-style-type: none"> – Gegen Sicht, gasförmige und flüssige Medien
Schallschutz	<ul style="list-style-type: none"> – Schallschutz nach DIN 4109
Wärmeschutz	<ul style="list-style-type: none"> – Wärmeschutz nach DIN V 4108
Brandschutz	<ul style="list-style-type: none"> – Brandschutz nach DIN 4102
Herstellung	<ul style="list-style-type: none"> – Witterungsunabhängig

Zur Ausbildung der Fuge im elementierten Bauen wird heute im Wesentlichen auf zwei Systeme zurückgegriffen.

- Abdichtung der Fuge mit einem dauerelastischen Fugendichtstoff

In DIN 18540 [20] wird die Anwendung elastischer Dichtstoffe geregelt. Zur Herstellung werden die Fugen durchgehend mit einem Hinterfüllmaterial gestopft, die als innenseitige Begrenzung des Fugendichtstoffs dient. Die Fugenflanken der Elemente müssen für diese Fugenausbildung parallel verlaufen. Die Einbringung des Dichtstoffs ist sowohl an klimatische Bedingungen als auch an Herstellervorgaben geknüpft und erfordert eine sorgfältige Verarbeitung. Die Einbringung erfolgt von der Gebäudeaußenseite, so dass ein entsprechender Zugang der Fugen über eine Arbeitsplattform oder ein Gerüst gewährleistet sein muss [3].

– Konstruktiv ausgebildete Fugen

Die Fugen werden offen und belüftet ausgeführt. Die Abdichtung erfolgt durch das Zusammenwirken verschiedener Dichtungsebenen. Die vorderste Ebene wird durch eine Regensperre gebildet. Der dahinterliegende Zwischenraum ist belüftet und dient der Drainage von eventuell eingedrungenen Wassers zur Horizontalfuge. Durch die rückversetzte Horizontalfuge kann das abgeleitete Wasser problemlos nach außen abfließen. Deren schwellenförmige Ausbildung verhindert den tieferen Eintritt von Wasser in die Fuge. Eine Windsperre stellt die Winddichtigkeit der Fuge sicher. Bei Verwendung von Mineralfaserwolle kann damit gleichzeitig die Wärmedämmung und der Brandschutz übernommen werden. Bei der Herstellung der Windsperre durch eine Mörtelschicht können auch statische Funktionen übernommen werden. In diesem Fall ist zusätzlich die Einbringung einer Wärmedämmung erforderlich. Konstruktive Fugen sind aufgrund ihrer Konzeption vergleichsweise Toleranz- und Verformungsunempfindlich.

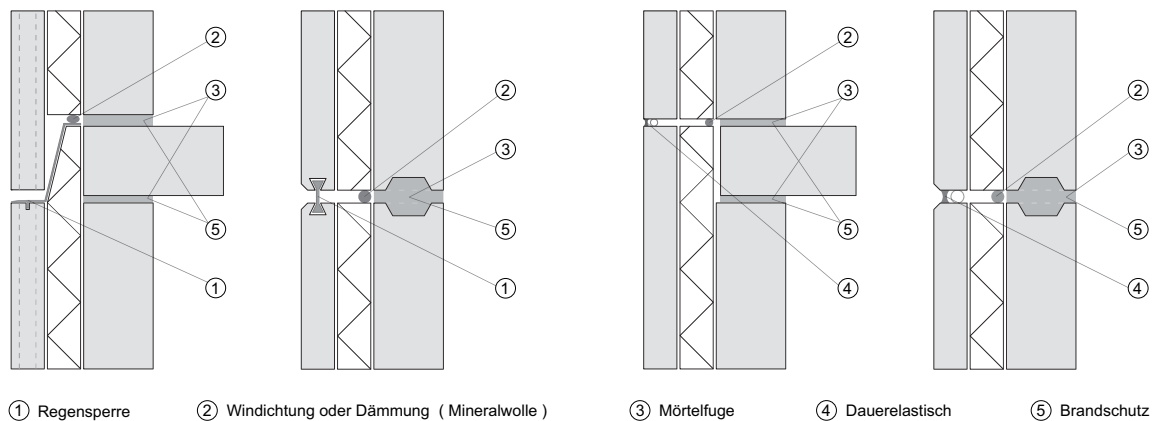


Abb. 6-1 Konstruktive (links) und dauerelastisch gedichtete (rechts) Fugenausbildung (Prinzip)

Weitere Alternativen, die nicht so häufig angewendet werden, stellen die Abdichtung der Fugen mit aufgeklebten Elastomerband und mit vorkomprimierten Fugenband aus imprägniertem Polyurethan-Schaumstoff dar. Während das Elastomerband ebenfalls nach der Montage von Außen aufgeklebt werden muss, kann das komprimierte Fugenband unmittelbar vor der Montage auf die Fuge geklebt werden. Das Band dekomprimiert sich witterungsabhängig innerhalb von 30-60 min und dichtet die Fuge ab [26]. Die erzielte Dichtwirkung hängt wesentlich vom Kompressionsgrad des Bandes ab, so dass sich zu große Toleranzen direkt auf die Funktionalität der Abdichtung auswirken können.

Die beschriebenen Ausführungen erfüllen hauptsächlich die bauphysikalischen Anforderungen der Fuge. Die statische Funktion wird in der Regel durch die Mörtelschicht übernommen, die sowohl die auftretenden Druck- als auch die Schubkräfte übertragen kann. In [6] und [49] wird als praktikabler Ersatz für den Verguss von Fertigteilen eine punktförmige, stahlbaumäßige Verbindung für wandartige Bauteile vorgeschlagen. Diese Verbindungsart schafft aufgrund ihrer zerstörungsfreien Lösbarkeit die Voraussetzung für die Wiederverwendbarkeit von Bauteilen.

Um eine ausreichende Passung der sehr viel präziseren Stahlbauverbindungen zu gewährleisten ist auf die Ausbildung einer ausreichenden Toleranzaufnahme zu achten. Da eine Verschärfung der Toleranzanforderungen an Stahlbetonfertigteile aufgrund gegebener Produktionsrandbedingungen mit einem hohen Investitionsbedarf in die Fertigungsanlage verbunden ist, ist die wirtschaftlichere Alternative, entsprechende Verbindungsmittel für die Aufnahme der auftretenden Toleranzen zu konstruieren.

6.2 Toleranzen im Fertigteilbau

Mit der Festlegung von Toleranzen wird eine zulässige Spanne für die unvermeidliche Maßstreuung eines Bauteils definiert. Diese Festlegung ist mit großer Sorgfalt zu treffen. Bei einer zu engen Fassung laufen aufgrund zu hoher Genauigkeitsanforderungen sehr hohe Kosten in der Produktion auf. Sind Toleranzen zu groß, ist die Bauteilpassung nicht mehr gewährleistet. Die Verbindungen der Elemente sind konstruktiv so auszulegen, dass eine Aufnahme der Toleranzen in der Fuge möglich ist. Auf diese Weise wird eine sichere Montage und Verbindung der Elemente sichergestellt. Ausgehend von einem planmäßig festgelegten Nennmaß ist aufgrund der zulässigen Maßtoleranz eine positive und eine negative Grenzabweichung erlaubt, die ein Mindest- und ein Höchstmaß des Bauteils zur Folge hat (Abb. 6-2). Das Istmaß des Bauteils muss sich innerhalb dieser festgelegten Grenzen befinden. Der Unterschied zwischen Nennmaß und Istmaß ist die tatsächlich vorhandene Maßabweichung.

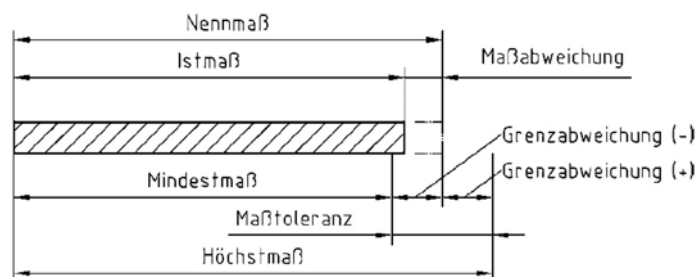


Abb. 6-2 Begriffe und deren Anwendung nach DIN 18202 [18]

Die Toleranzbetrachtung im Bauwesen gründet auf der Beobachtung, dass man eine Verteilung der Streuung mathematisch durch die Gaußsche Häufigkeitsverteilung beschreiben kann [47]. Damit lässt sich eine Toleranzbetrachtung nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitslehre und den Methoden der Statistik durchführen.

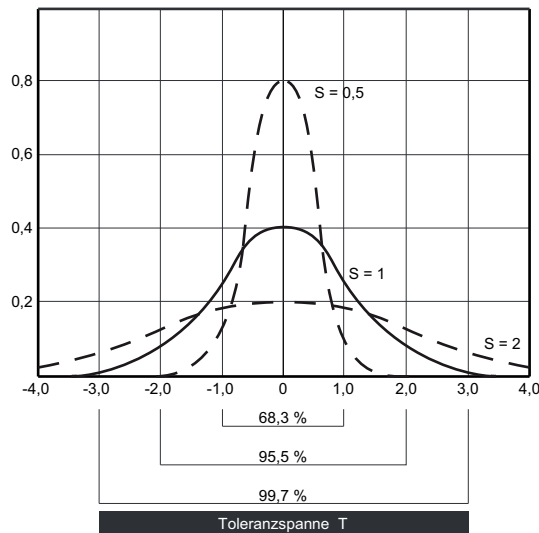


Abb. 6-3 Gaußsche Normalverteilung – Ableitung der Toleranzspanne

Die Form einer Normalverteilung wird durch den arithmetischen Mittelwert μ und der zugehörigen Standardabweichung σ bestimmt. Dabei legt der Mittelwert das Zentrum der Verteilung fest. In Abhängigkeit von der Standardabweichung können sich engere ($s < 1$) oder weitere Verteilungen ($s > 1$) als in der Standardform mit $s = 1$ einstellen. Eine enggefaste Toleranzgrenze erfordert eine kleine Standardverteilung. Nur bei einer zufälligen Verteilung fallen positive und negative Abweichungen gleichmäßig aus. Systematische Fehler bewirken eine schiefe Verteilung und können auf diese Weise ermittelt werden.

Aus der Formel der Gaußschen Normalverteilung lässt sich ableiten, dass 99,73% aller Werte innerhalb eines Intervalls mit der Mindestbreite der sechsfachen Standardabweichung liegen. Umgekehrt darf also die Standardverteilung σ nur 1/6 der Toleranz betragen. Aufgrund der subjektiven Unterschätzung der tatsächlich vorhandenen Toleranzspanne sollte eine regelmäßige Fertigungskontrolle in Kombination mit einer statistischen Auswertung der Ergebnisse durchgeführt werden.

6.2.1 Wirksame Toleranz nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz

Die vom Maschinenbau bekannte Additionsregel zur Ermittlung der Gesamttoleranz basiert auf der Betrachtung ungünstig wirkender Maßtoleranzkombinationen in den jeweils äußeren σ -Intervallen. Das gleichzeitige Auftreten extremer Maßabweichungen ist bereits ab drei Teilen so unwahrscheinlich, dass deren Berücksichtigung als Grundlage für die Ermittlung einer Endtoleranz aus wirtschaftlichen Gründen in Frage gestellt werden muss.

Für die Bestimmung von Baupassungen muss aus der Toleranz der Einzelteile die Endtoleranz des gesamten Systems mit der gleichen Wahrscheinlichkeit für die Ausschussgrenzen berechnet werden können [48]. Mit Hilfe des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes kann das Zusammenwirken einzelner Teilfehler zu einem Endfehler bei gleichbleibender Wahrscheinlichkeit mathematisch ausgedrückt werden. Das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz kann unter direkter Einbeziehung der Einzeltoleranzen in folgender Anwendungsform aufgestellt werden.

$$T_P = \sqrt{T_1^2 + T_2^2 + T_3^2 + \dots + T_n^2}$$

Gleichung 2

Für den Fall, dass Bauteile (z.B. Deckenelemente) so angeordnet werden können, dass die entstehende Endtoleranz sich in einer Fuge addieren darf, ergibt sich aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz, dass sich die wirksame Endtoleranz auf bis zu 25% der Einzeltoleranz reduzieren kann. Die Reduktion fällt umso deutlicher aus, je mehr Elemente in der Bauteilkette vorhanden sind, da durch die fortlaufende Anordnung ein gegenseitiger Ausgleich der extremen Maßabweichungen erfolgen kann. In dieser Rechnung werden sowohl die Bauteiltoleranz als auch die auftretende Fugentoleranz berücksichtigt.

Falls die Elemente in einem vorgegebenen Achsraster angeordnet werden, erfolgt der Ausgleich der Toleranzen in jeder einzelnen Fuge. Hierbei entfällt die Möglichkeit, extreme Maßtoleranzen über die Bauteilkette auszugleichen, so dass die wirksame Endtoleranz deutlich größer ausfällt. In diesem Fall werden somit die Achsmaßtoleranz und die Bauteiltoleranz jeweils zur Hälfte an beiden Bauteilseiten berücksichtigt (Abb. 6-4). Gleichung 3 beschreibt den Zusammenhang mathematisch.

$$T_P = \sqrt{2 \cdot (T_{\text{Bauteil}} / 2)^2 + T_{\text{Achsmaß}}^2}$$

Gleichung 3

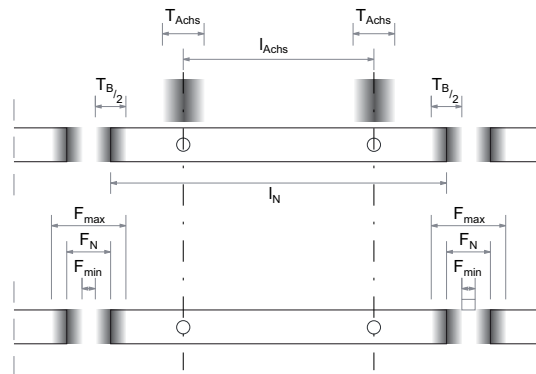


Abb. 6-4 auftretende Toleranzen und deren Wirksamkeit nach Gleichung 3

Die Fugendicke ist nicht von den Toleranzen der Einzelteile, sondern von der wirksamen Passung nach Gleichung 2 abzuleiten. Da die Verbindung der Stahlbetonbauteile über eine diskrete, punktförmige Verbindungsanordnung erfolgt, ist für die Ermittlung der wirksamen Passung die Berücksichtigung eines vorgegebenen Achsrasters notwendig. Dieses wird durch die festgelegte Lage der Verbindungspunkte am Wandfußpunkt vorgegeben. Um die Toleranzaufnahme in dieser Verbindung möglichst klein zu halten, hat der Ausgleich der ermittelten Passtoleranz somit in jeder Fuge zu erfolgen.

6.2.2 Normative Vorgaben

Als wichtige Information für die Ermittlung der Passung muss die erzielbare Fertigungstoleranz eines Bauteils bekannt sein.

Die Produktion von Betonfertigteilen im Werk erfolgt innerhalb der zulässigen Grenzabweichung nach DIN 18202 [18] und DIN 18203-1 [11]. Tab. 6-2 gibt einen Auszug der minimalen und maximalen Grenzabmaße der Längen und Breiten, der Querschnitte und der Winkeltoleranzen für vorgefertigte Bauteile aus Beton. Die Grenzabmaße sind in Abhängigkeit der absoluten Nennmaße des Bauteils in mehrere Klassen unterteilt.

Tab. 6-2 Herstellungstoleranzen von Betonfertigteilelementen nach DIN 18203-1 und DIN EN 14992

Bauteile	Grenzabmaße in [mm] für				
	Länge und Breite			Dicke	Winkeltoleranz
	für Nennmaße [m]				
	1,5 – 3	3 – 6	6 – 10	0,15 – 0,6	1,5 - 3
Platten, Wandtafeln Rohbau	± 8	± 10	± 12	± 6 – 10	± 8
Platten, Wandtafeln oberflächenfertig Fassadentafeln	± 6	± 8	± 10	± 5 – 8	± 6
Wandtafeln nach DIN EN 14992 Klasse A	± 5	± 6	± 8	± 3	-

DIN EN 14992 [23] beinhaltet nach der Einteilung von Bauteilen in Klasse A eine erhöhte Toleranzanforderung für die Herstellung von Wandelemente als Betonfertigteile. Einbauteile, die für Verbindungen vorgesehen sind, müssen in Klasse A mit einer Genauigkeit von $\pm 10\text{mm}$ eingebaut werden (für Klasse B $\pm 15\text{mm}$). Hier gibt die Norm dem Planer die Möglichkeit, eine erhöhte Genauigkeit zu fordern. Ansonsten sind diese Toleranzen auf jeden Fall durch die Verbindungsmittel aufzunehmen.

6.2.3 Evaluation der Fertigung

Zur Überprüfung der Einhaltung der vorgegebenen Maßtoleranzen im normalen Produktionsablauf ist eine Fertigungskontrolle nach mathematisch-statistischen Methoden durchzuführen. Die normativen Vorgaben stellen eine verpflichtende Größe dar, die durch den Hersteller einzuhalten sind bzw. unterschritten werden können. Im Herstellungsprozess treten eine Vielzahl von Faktoren auf, die sich auf die Endtoleranz der Bauteile während der Fertigung auswirken:

- Setzen der Schalung durch den Roboter (Lagerspiel, Verschleiß)
- Palettentransport (Erschütterungen durch die Rollenbahn)
- Betonieren (Schalungsrütteln, einseitig wirkender Frischbetondruck)
- Schalungszustand (Dellen und Aufkantungen infolge gewaltsamen LöSENS)

Die Messungen stellen sicher, dass sich die genannten Einflüsse in Summe innerhalb der vorgegebenen Grenzwerte nach Tab. 6-2 bewegen.

6.2.3.1 Messdurchführung

Zur Erfassung der Gesamttoleranz wurde jeweils eine Tagesproduktion aus der Umlauffertigung eines Fertigteilerwerks in zwei aufeinanderfolgenden Wochen im März 2010 evaluiert. Mit Hilfe des Laser-Entfernungsmessers PLR30 der Firma Bosch wurden alle Längenmessungen an den Schalungen durchgeführt. Von Herstellerseite wird für die Messung eine Genauigkeit von ± 2 mm auf bis zu 30 m Länge angegeben. Sämtliche Längen wurden zweimal gemessen, und erst dann protokolliert, als beide Werte innerhalb der Toleranz lagen. Andernfalls wurde die Messung wiederholt. Da die Messbedingungen durch die relativ dunkle und blendfreie Halle ideal waren, erfüllten meist die ersten Messungen das Übereinstimmungskriterium.

Die Messung wurde durch zwei Personen durchgeführt. Auf der Schalungsoberkante wurden jeweils zwei Winkel bündig mit der Schalungsinenseite aufgesetzt. Ein Winkel diente als Anlagefläche für das Messgerät, der zweite Winkel als Reflektionsfläche für den Laserstrahl (Abb. 6-5). Diese Vorgehensweise hat mehrere Vorteile. Sowohl die leere als auch die ausbetonierte Schalung kann nach der gleichen Systematik gemessen werden. Mit Hilfe der Winkel lassen sich auch die Diagonalmäße der Schalung bis in die Ecken präzise bestimmen. Die helle und ebene Oberfläche des Winkels stellt eine optimale Reflektionsfläche für den Laser dar.



Abb. 6-5 Durchführung der Laserentfernungsmessung - Anlage von Winkel und Messgerät auf das Reflektionsziel

6.2.3.2 Messprogramm

Durch die Untersuchung wurden folgende Größen erfasst:

1. Längenmessung der vier Schalungsseiten sowie beider Diagonalen
2. Messung des Stichmaßes S entlang der Schalungslängsseiten

In der Regel erfolgt der Aufbau der langen Schalungsseite durch mehrere Schalungselemente. Diese Elemente werden durch den Roboter gesetzt und im Zuge der Schalungsvorbereitung für den Betoniervorgang nochmals manuell gerichtet. Trotzdem kommt es an diesen Stellen zu Ungenauigkeiten, indem die Schalelemente ein Stich-

maß nach innen oder außen bezüglich der ideal geraden Verbindung zwischen zwei Schalungseckpunkten aufweisen (Abb. 6-6). Es kann ebenfalls vorkommen, dass in der Stoßfuge ein Versatz beider Elemente auftritt, weshalb bei der Messung jeweils ein Maß für die linke und für die rechte Stoßseite protokolliert wurde. Abb. 6-7 gibt eine Übersicht über Lage und Bezeichnung der evaluierten Maße.



Abb. 6-6 Erscheinungsformen von Stoßfugen – passgenau (links) – Versatz (Mitte) – Eindellung (rechts)

Alle Messungen wurden an zwei festgelegten Zeitpunkten des Produktionsablaufs durchgeführt. Die erste Messung erfolgte im Zuge des Bewehrungseinbaus in die Schalung unmittelbar nach dem Setzen der Schalelemente durch den Roboter. Die zweite Messung wurde direkt nach dem Betonieren und Rütteln der Bauteile durchgeführt. Hierdurch sollte der Einfluss des Palettentransports, des Betonierens und des Rüttelns auf die Maßhaltigkeit der Schalung untersucht werden. Aufgrund des eng getakteten Produktionsablaufs konnte nur für einen Teil der Elemente das vollständige Messprogramm durchgeführt werden.

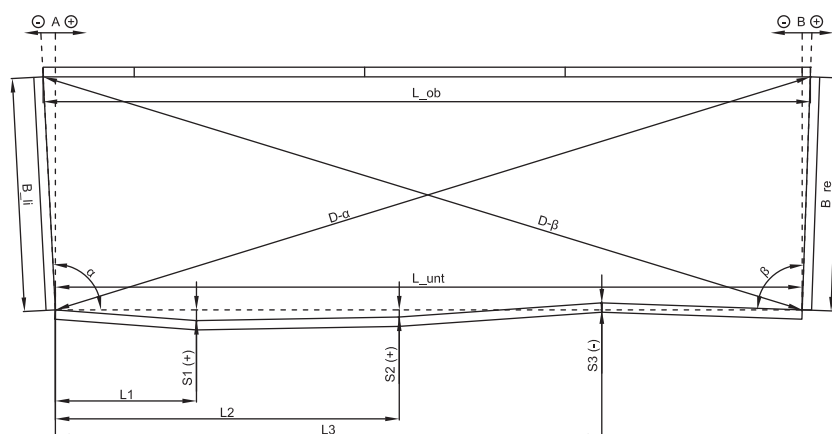


Abb. 6-7 Übersicht über die ermittelten Meßgrößen durch die Bauteilevaluation

6.2.3.3 Aufbereitung der Messgrößen

Auf Basis der gemessenen Werte wurden eine Reihe von Größen für die Einschätzung der Maßhaltigkeit der Elemente nach DIN 18203-1 [11] berechnet. Als rechnerische

Grundlage werden die Trapez-Gleichungen verwendet, da diese alle Sonderfälle der allgemeinen Vierecksgeometrie wie den Rhombus, das Rechteck und das Parallelogramm mit einschließen. Als Voraussetzung müssen die Schalungslängsseiten parallel verlaufen. Dies gilt in der Praxis als hinreichend genau erfüllt. Da mehr Messwerte aufgenommen wurden, als zur Berechnung der Zielgrößen erforderlich sind, konnten mit Hilfe von Referenzberechnungen die Ergebnisse kontrolliert werden (grüne Felder).

Abb. 6-8 zeigt beispielhaft für ein Bauteil die Berechnung der gewünschten Größen aus den Messergebnissen. Das Sollmaß wurde den zugehörigen Planunterlagen entnommen. Berechnet werden die Stichmaße A und B nach der Vorzeichendefinition nach Abb. 6-7 zur Bestimmung der Winkelabweichung im Bauteil. Zusätzlich wird die Soll-Ist-Differenz in Länge und Breite bestimmt.

Sollmaß	nach Setzen der Schalung					nach Betonieren & Rütteln					
	Plan	Maße	Istmaß	Messung-1			Maße	Istmaß	Messung-2		
				Kontrolle	Auswert	unt			ob	Kontrolle	Auswert
Länge L_unt	10,100	10,092	10,092	ΔL	-8,0	-8,0	10,092	10,093	ΔL	-8,0	-7,0
Länge L_ob	10,100	10,092		ΔB	5,0	5,0	10,093		ΔB	7,0	7,0
Breite B_li	2,434	2,439	90,16	α [°]	90,16	2,441	90,17	α [°]	90,17		
Breite B_re	2,434	2,439	89,84	β [°]	89,84	2,441	89,85	β [°]	89,85		
Diagonal D- α	10,389	10,376	-13	A [mm]	-6,6	10,377	-12	A [mm]	-7,2		
Diagonal D- β	10,389	10,389	0	B [mm]	-6,7	10,390	1	B [mm]	-6,2		

Abb. 6-8 Tabelle zur Auswertung des Bauteilaufmaßes

Die oberen Diagramme in Abb. 6-9 zeigen die Stichmaße der Schalung über die Bauteillängsseiten. Die Stoßpunkte werden entlang der x-Achse in fortlaufender Reihe angeordnet. Die Stichmaße werden ausschließlich im Zuge der ersten Messung erhoben.

Die unteren Diagramme zeigen die berechnete Winkelabweichung des Elements in einer 100-fach überhöhten Darstellung. Links wird die Schalungsverformung infolge Messung 1 (nach dem Setzen der Schalung) dargestellt. Rechts zeigt die berechnete Schalungsverformung nach dem Abschluss des Betoniervorgangs. Mit diesen Angaben kann eine Aussage über den kombinierten Einfluss des Palettentransports und des Betoniervorgangs auf die Maßhaltigkeit der Schalung getroffen werden.

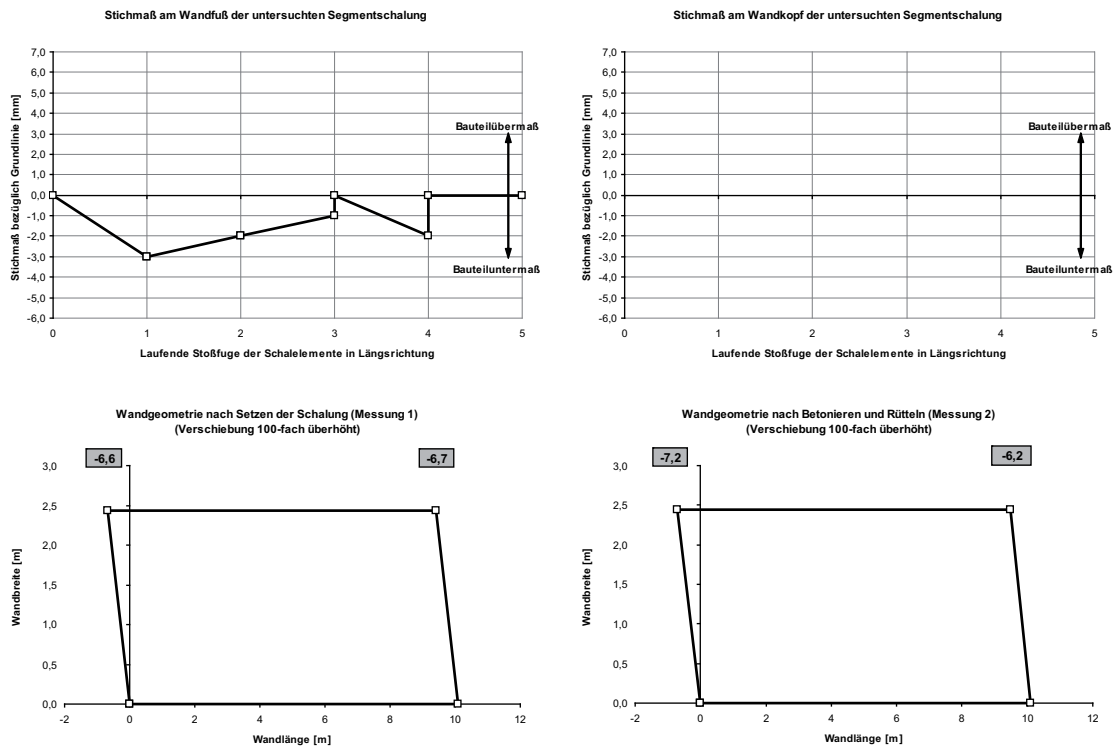


Abb. 6-9 Stichmaße S_i an den gestoßenen Schalelementen und Winkelabweichung A und B der Wand jeweils für Messung 1 und 2

6.2.3.4 Zusammenfassung und Ergebnisauswertung

6.2.3.4.1 Stichmaße der gestoßenen Schalelemente

Die Abweichungen an den einzelnen Stößen treten zufällig auf und beeinflussen sich nicht gegenseitig. Statistisch betrachtet stellt jedes Stichmaß eine unabhängige Stichprobe dar. Aus diesem Grund können alle Messungen der Stichmaße S_i in einer Auswertung zusammengefasst analysiert werden. Es wurden ausschließlich Messungen der unbetonierten Schalung (Messung 1) ausgewertet, da der zügige Produktionsablauf eine komplette Vermessung der befüllten Schalung nicht zuließ. An jedem Stoß wurde für beide Absteller das Maß $S_{i\text{links}}$ und $S_{i\text{rechts}}$ aufgenommen, um ebenfalls eine Aussage zum gegenseitigen Versatz der Schalelemente am Stoß treffen zu können. Diese Situation lässt sich in Abb. 6-9 oben links an Stoßfuge 3 und 4 erkennen.

Die Messwertverteilung aus Abb. 6-10 zeigt eine leichte Tendenz zum Bauteiluntermaß, die auch durch den negativen Mittelwert von $-0,15$ bestätigt wird. Das Ergebnis basiert auf der Auswertung von 49 Fugen. Aufgrund der Aussage aus Abschnitt 6.2 kann eine Toleranzspanne von ± 4 mm für Fugen am Wandfuß und am Wandkopf infolge der Polygonzugartigen Anordnung der Schalelemente in Bauteillängsrichtung angenommen werden.

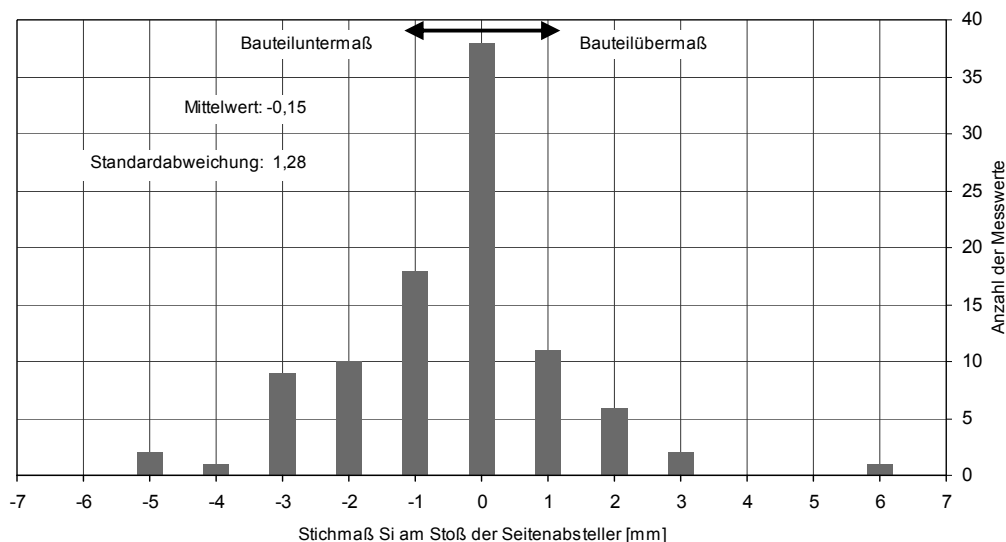


Abb. 6-10 Häufigkeitsverteilung gemessener Stichmaße Si am Schalungsstoß

6.2.3.4.2 Bauteillänge

Die Maßtoleranz der Bauteillänge L muss in den jeweils benachbarten Fugen aufgenommen werden (siehe Abb. 6-4). Durch eine einstellbare Verbindung am Wandfußpunkt ist es möglich, die Toleranz der Bauteillänge gleichmäßig auf beide Fugen zu verteilen. Für die Auswertung in Abb. 6-11 werden alle gemessenen Längen am Wandfuß und am Wandkopf berücksichtigt. Insgesamt wurden 20 Bauteile analysiert. Der Mittelwert der Ist-Längen von $-3,1$ mm zeigt, dass die Bauteile tendenziell mit Untermaß gefertigt werden. Nach dem Betonieren erhöht sich der Mittelwert um 1 mm bei nahezu gleichbleibender Standardabweichung. Durch den Frischbetondruck werden die Schalelemente beim Rütteln nach außen gedrückt, so dass mit der Messung 2 eine Verlängerung der Elemente beobachtet werden kann. Die Toleranzspanne kann mit $18,3$ mm angegeben werden. Alle betrachteten Elemente sind länger als 3 m, so dass die normative Vorgabe von ± 10 mm eingehalten wird.

Aus Abb. 6-12 geht die Verteilung der gemessenen Bauteilbreiten hervor. Hier deutet der Mittelwert von $3,5$ mm auf ein erhöhtes Breitenmaß der Betonelemente hin. Auch in der Elementbreite zeigt sich die bereits in der Länge beobachtete Tendenz, dass die Elemente durch das Betonieren und Rütteln größer werden. In beiden Fällen lässt sich im Mittel ein Plus von 1 mm beobachten. Die Toleranz von ± 7 mm, die sich aus der sechsfachen Standardverteilung ermitteln lässt, liegt innerhalb der in der Norm geltenden Grenze von ± 8 mm für Rohbauteile unter 3 m Breite.

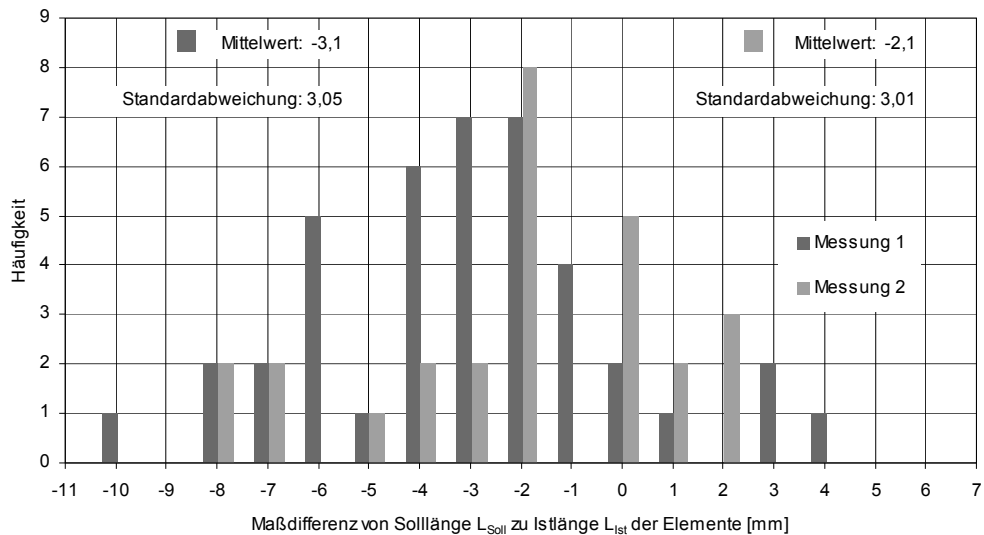


Abb. 6-11 Häufigkeitsverteilung der Längenmaßdifferenz L_{unt} und L_{ob} von Solllänge – Istlänge für Messung 1 und Messung 2

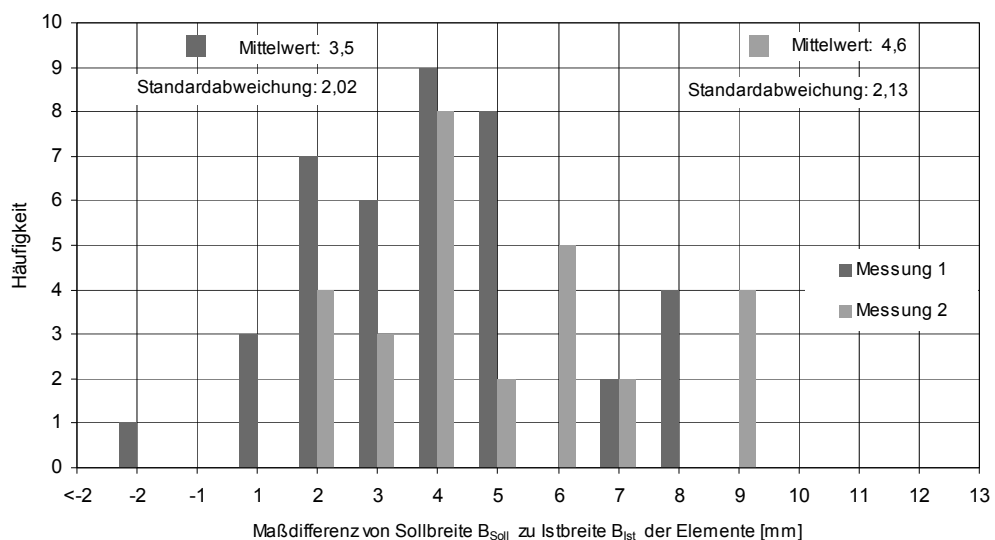


Abb. 6-12 Häufigkeitsverteilung der Breitenmaßdifferenz B_{re} und B_{li} von Sollbreite – Istbreite für Messung 1 und Messung 2

6.2.3.4.3 Winkelabweichung

Neben der Längenmaßdifferenz muss auch das Stichmaß infolge der Winkelabweichung in den Vertikalfugen ausgeglichen werden. Das einseitig auftretende Stichmaß beeinflusst das Erscheinungsbild einer Fuge wesentlich stärker, als eine variierende Fugenbreite, da das menschliche Auge sehr genau den parallelen Verlauf zweier Kanten beurteilen kann. Fugen mit variabler Breite über die Länge müssen auch bei der Abdichtung beispielsweise mit einem vorkomprimierten Fugenband genauestens überprüft werden, da die Abdichtungseigenschaft des Bandes wesentlich von dessen Komprimierungsgrad abhängt.

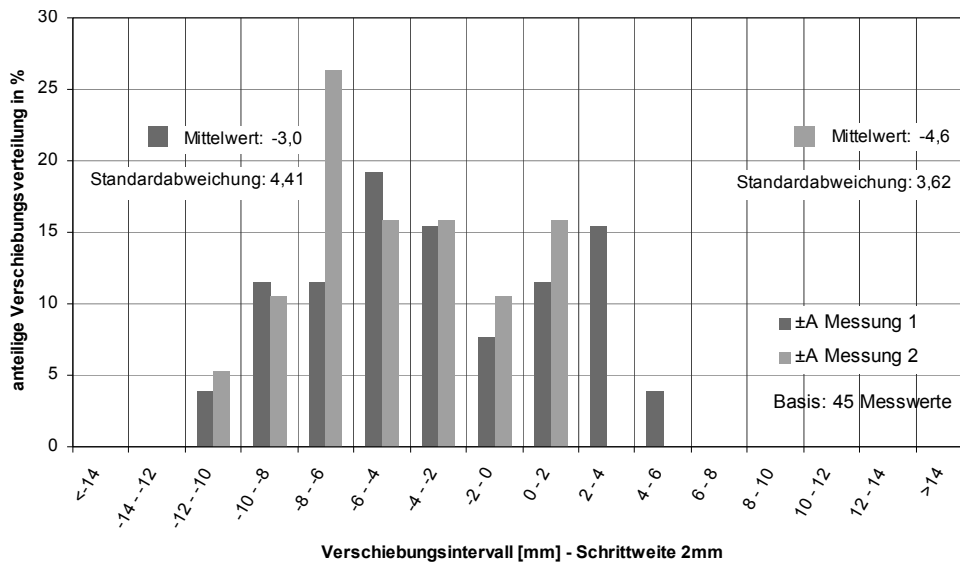


Abb. 6-13 Prozentuale Stichmaßverteilung A an der linken Schalungsseite

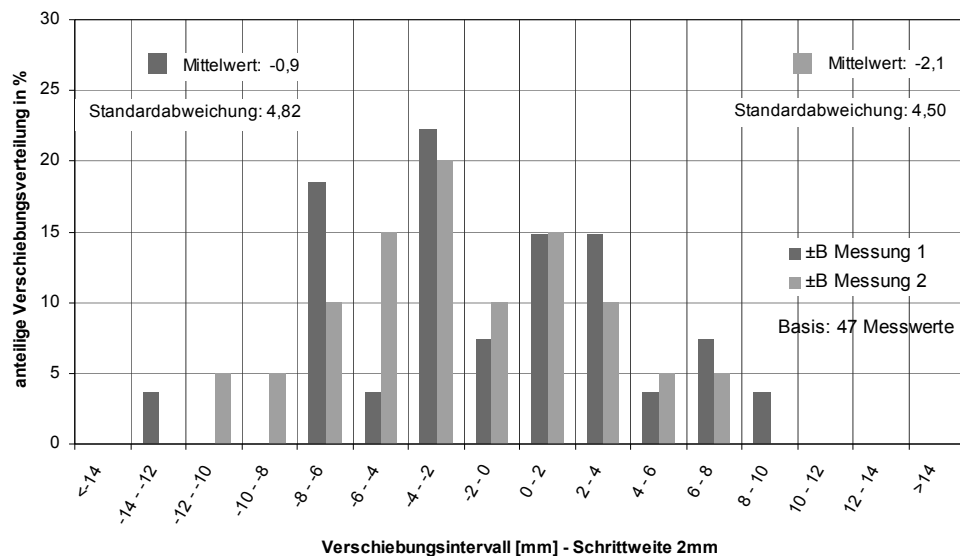


Abb. 6-14 Prozentuale Stichmaßverteilung B an der rechten Schalungsseite

Die seitliche Verschiebung A und B fällt im Mittel jeweils negativ aus, was gemäß der Definition von A und B nach Abb. 6-7 eine parallelogrammartige Verschiebung der Schalung bedeutet. Gemäß den Ergebnissen aus Messung 2 vergrößert sich diese Verschiebung aufgrund der dazwischen liegenden Einflüsse wie Transport und Betonieren. Infolge der gleichsinnigen Verschiebung ergibt sich die Differenz der Werte A und B zu -2,1 für Messung 1 und -2,5 für Messung 2 als jeweils wirksamer Mittelwert in der Fuge.

Bei der Auswertung von Abb. 6-13 und Abb. 6-14 fällt die hohe Standardabweichung auf, die sich aus den Messergebnissen ableiten lässt. Die Verteilung der Messwerte weist eine Abweichung von der Normalverteilung auf. Dies hat eine erhöhte Standardabweichung und damit auch eine vergrößerte Toleranzspanne von ± 15 mm zur Folge. Dieser Wert ist doppelt so groß wie der zulässige Normwert.

Für die Ermittlung der Toleranzspanne einer vertikalen Fuge muss die kombinierte Wirkung aus Winkelabweichung und Längenabweichung betrachtet werden. Die wirksame Toleranz kann nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz gemäß Gleichung 3 bestimmt werden.

6.2.4 Zusammenfassung

Eine punktförmige, kraftschlüssige Verbindung für Fertigteile muss in der Lage sein, die auftretenden Toleranzen aus der Längen- und Breitenabweichung sowie aus der Winkeltoleranz des Bauteils auszugleichen. Daraus folgt der Bedarf einer Einstellmöglichkeit in allen drei Raumrichtungen. Tab. 6-3 gibt eine Übersicht der im vorangegangenen Kapitel ermittelten Werte. Für den Fall, dass die Messung innerhalb der Normgrenzen lag, wird für die vorzusehende Toleranzspanne auf die Grenzwerte aus Tab. 6-2 zurückgegriffen. Für die Winkelabweichung wurden größere Werte ermittelt, als sie nach Norm zulässig sind. Hier erfolgt die Definition der Toleranzspanne auf Basis der Messergebnisse. Für die ermittelten Stichmaße an den Schalungselementen gibt es keine normativen Vorgaben, so dass hier auf jeden Fall die ermittelten Messergebnisse herangezogen werden.

Tab. 6-3 Vergleich der Normwerte aus Tab. 6-2 und den Messergebnissen aus Abschnitt 6.2.3

Messgröße	Mittelwert		aus Norm	aus Messung	Toleranzspanne aus	
	M ₁	M ₂				
Länge	-3,1	-2,1	± 10	± 9	T _L = 20	Norm
Winkel	-2,1	-2,5	± 8	± 15	T _W = 30	Messung
Breite	3,5	4,6	± 8	± 7	T _B = 16	Norm
Stichmaß	≈ 0	k.A.	k.A.	± 4	T _{ST} = 8	Messung

Die seitliche Verschiebung (Stichmaß) der Schalelemente weist mit einer Toleranz von ±4 mm eine nicht zu vernachlässigende Größenordnung bei der Dimensionierung der Fugenbreite auf. Die wirksame Gesamttoleranz der horizontalen Fuge wird aus der Maßabweichung der Elemente in der Breite und der Toleranz des Stichmaßes berechnet.

Der Einfluss der Winkelabweichung wirkt sich sowohl auf ästhetische als auch auf funktionale Aspekte der Fuge nachteiliger aus, als die Längen- oder Breitentoleranz. Die Winkelabweichung sollte daher durch geeignete Maßnahmen wie beispielsweise einen festgelegten, einseitigen Anschlag auf der Palette praktisch ausgeschaltet werden. Gerade im Hinblick auf die Herstellung oberflächenfertiger Elemente hat man keine Möglichkeit mehr, die variierenden Fugenbreiten auszugleichen. Für die wirksame Toleranz in der vertikalen Fuge sind die Einflüsse aus der Längenabweichung mit der entstandenen Toleranz aus der Winkelabweichung zu kombinieren.

Später auftretende Einflüsse, wie die Formänderung der Bauteile durch Schwinden, muss ebenfalls in der einstellbaren Toleranz mit berücksichtigt werden.

6.3 Aufbau und Funktion einer lösbaren Fuge

Auf der Grundlage der durchgeführten Bauteilevaluation in Abschnitt 6.2.3 werden die wirksamen Toleranzen für die Vertikal- und Horizontalfuge unter der Bedingung einer minimalen Fugenbreite F_{\min} von 5 mm nach Gleichung 4 rechnerisch bestimmt. T_1 und T_2 stellen dabei die Toleranzspannen der Teileinflüsse aus Tab. 6-3 dar. m_1 und m_2 berücksichtigen den Einfluss einer von 0 verschiedenen Mittelwertslage.

$$T_p = \sqrt{2 \cdot (T_1/2 + m_1)^2 + 2 \cdot (T_2/2 + m_2)^2}$$

Gleichung 4

Tab. 6-4 zeigt die ermittelten Werte für die effektive Toleranz für jeweils die Horizontal- und Vertikalfuge.

Tab. 6-4 erforderliche Fugennenddicke F_N - min und max Fugendicke in [mm]

Fuge	Toleranzeinfluss aus	F_N	F_{\min}	F_{\max}
horizontal	Stichmaß, Breite	14	5	23
vertikal	Winkelabweichung, Länge	15	5	25

Tab. 6-5 stellt den Forderungskatalog an die Fugenausführung nach [6] zusammen. In der Hochphase des elementierten Bauens bestand das primäre Entwicklungsziel in einer Produktivitätssteigerung der Bauweise. Dies konnte nur durch die Erhöhung des Vorfertigungsgrades erzielt werden. Dieser Entwicklung steht jedoch die bestehende Verbindungsmethodik der Bauteile durch Nassverfugung entgegen. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Kriterien haben bis heute ihre Gültigkeit.

Tab. 6-5 Anforderungen an die Fugenkonstruktion [6]

Aspekt	Erläuterung
Systematik	Austauschbarkeit innerhalb der Systemgrenzen
Vielseitigkeit	Anwendbar auf verschiedene Elementtypen und beliebige Grundrisse
Handhabung	Normale Handhabung der Elemente nicht beeinträchtigt (Herstellung, Lagerung, Transport)
Integration	Keine Verzögerungen im Montageablauf durch Vorbereitung der Verbindung
Ablauf	Keine Verzögerungen im Montageablauf durch Herstellung der Verbindung
Prüfbarkeit	Die Funktion der Verbindung muss überprüfbar sein
Tragfähigkeit	Sofort kraftschlüssig
Dauerhaftigkeit	Korrosionsbeständig
<i>Nachhaltigkeit</i>	<i>zerstörungsfreie Lösbarkeit der Verbindung – trockener Aufbau</i>

Durch die gestiegene Bedeutung der Nachhaltigkeit im Betonelementbau kommt ein weiterer Aspekt hinzu, Bauteilverbindungen trocken und lösbar zu konzipieren. Der erarbeitete Katalog wird um diese zentrale Forderung ergänzt. Der Verzicht auf den Mörtel als Fugenfüllstoff zwingt den Planer eine Materialalternative für die Funktionen des Lastabtrags, des Brandschutzes und des Korrosionsschutzes zu finden.

Abb. 6-15 bezeichnet die Funktionszonen einer konstruktiv und einer dauerelastisch abgedichteten Fuge unter der Voraussetzung eines einschaligen Wandaufbaus. Die Balken zeigen die Bereiche an, die für die Anordnung der entsprechenden Funktionen nutzbar sind. Zu bevorzugende Bereiche werden durch den dunkleren Verlauf hervorgehoben. Der wesentliche Unterschied zwischen beiden Ausführungsarten besteht bei der dauerelastischen Fugendichtung in der vorteilhaften Zusammenfassung der abdichtenden Funktionen in einem Element. Als nachteilig erweist sich dagegen die aufwendigere Herstellung infolge des notwendigen Zugangs der Fuge von außen und der stärkeren Witterungsabhängigkeit. Grundsätzlich erfüllen beide Varianten die Anforderung an eine lösbare Fuge.

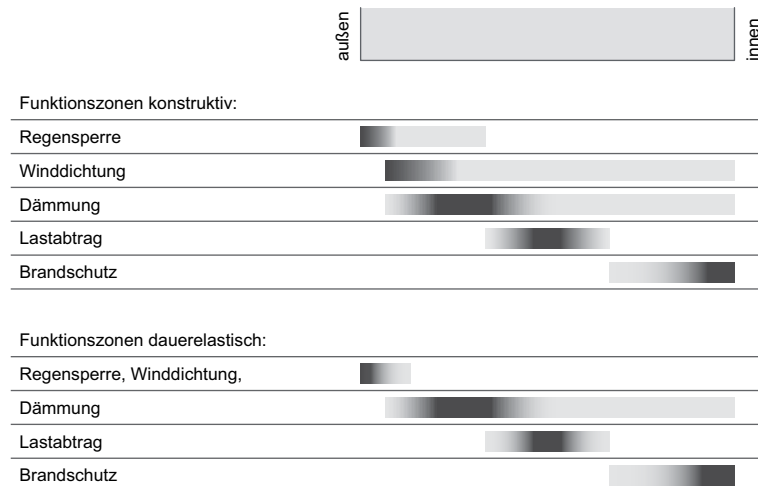


Abb. 6-15 Funktionszonen für die konstruktiv und dauerelastisch abgedichtete Fuge

Die Analyse berücksichtigt bereits die funktionale und materielle Trennung von Lastabtrag und Brandschutz. Aufgrund des einschaligen Aufbaus verschiebt sich der Bereich des Lastabtrags zur Wandmitte. Um Zusatzmomente aufgrund einer außermittigen Lagerung der Wand gering zu halten, ist eine Übertragung der Kräfte im Bereich der Kernzone anzustreben.

6.3.1 Fugenaufbau

Tab. 6-6 beschreibt den Aufbau einer lösbaren Außenwandfuge mit vier Funktionsebenen. Die Schlagregensperre in Form eines Dichtstreifens verhindert die direkte Bewitterung des vorkomprimierten Fugenbandes. Diese kann aus Metall oder Kunststoff bestehen, da die einbetonierte Führungsschiene die Austauschbarkeit der Sperre sicherstellt. Die reduzierte Witterungsbeanspruchung ermöglicht den Einbau eines Bandes des Qualitätsstandards BG2. Fugenbänder übernehmen wichtige Funktionen wie die Wärmedämmung, die Luftdichtheit und den Schallschutz. Sie passen sich flexibel und

zuverlässig den planmäßigen Toleranzen an. Die punktuelle statische Verbindung der Elemente wird mit dem System Munitec (vgl. Kap. 7) untersucht. Als raumseitiger Abschluss der Fuge muss zur Gewährleistung des Brandschutzes ein zugelassenes Produkt zur Übernahme dieser Funktion eingebaut werden. Da eine Brandlast hauptsächlich von der Innenseite auftritt, ist diese Fugenseite abschließend mit einer Brandschutzschnur bis zur geforderten Feuerwiderstandsklasse zu schließen. Sichtbare Fugen finden durch eine dauerelastische Verfüllung einen sauberen Abschluss nach innen. Bei verdeckten Fugen beispielsweise im Bereich des Fußbodenaufbaus ist diese Maßnahme nicht notwendig. Tragende Innenwände nach diesem System benötigen keine Dicht- und Dämmebene, aber stattdessen einen beidseitig wirksamen brandschutztechnischen Abschluss.

Tab. 6-6 funktionaler Aufbau einer trocken konzipierten Außenwandfuge

Funktion	Konstruktive Lösung
Dichtebene 1	Belüftete Schlagregensperre
Dichtebene 2 + Dämmung	Kompriband BG2 (Winddichtung und Wärmedämmung)
Lastabtragung	Punktuell angeordnete Verbindungselemente aus Stahl
Brandschutz	Raumseitig eingelegte Brandschutzschnur mit Fugenverfüllung

Der beschriebene Produkteinsatz zeigt bereits, dass ein derartiger Fugenaufbau keinesfalls preislich mit der herkömmlichen Verfüllung im Elementbau durch den Einbau einer Mörtelfuge konkurrieren kann. Der Mehrwert einer derartigen Fugenkonstruktion erschließt sich nur über eine Lebenszyklusbetrachtung des gesamten Bauwerks. Trotzdem ist es notwendig, die Kosten für eine trockene Fugenkonstruktion durch einfache Systeme möglichst gering zu halten. Eine derartige Fügungstechnologie vereinfacht die Anwendung hochwertiger Elemente, für die erhöhte Fügungskosten im Verhältnis zu einem höheren Gesamtwert weniger stark ins Gewicht fallen. Eine vergleichbare Situation besteht im Fassadenbau, wo mit hochentwickelten Fugen- und Verbindungskonstruktionen eine sehr komplexe und thermisch voll funktionsfähige Gebäudehülle zusammengesetzt wird.

6.3.2 Bauphysikalische Wirksamkeit

Aufgrund des monolithischen Wandaufbaus fungiert die Wand über die vollständige Stärke als Dämmebene. Werden Elemente darin integriert, die eine höhere Wärmeleitfähigkeit als der Wandbaustoff aufweisen, kommt es an diesen Stellen zu einer Wärmebrückenwirkung innerhalb des Querschnitts. Mit Hilfe einer Simulation wird dieser Effekt für die eingesetzten metallischen Verbindungselemente untersucht, um den Einfluss auf die raumseitigen Oberflächentemperaturen zu erfassen. Die Berechnungen wurden als zusätzliche Variante von solites im Rahmen des Forschungsprojekts „HOMES (24)“ in Zusammenarbeit mit dem ITKE durchgeführt [52]. Solites ist ein Steinbeis Forschungsinstitut, dessen Themenschwerpunkt im Bereich der solaren und zukunftsfähigen thermischen Energiesysteme liegt. Die Berechnungen erfolgten an einem 2D-

Schnittmodell mit dem Wärmebrückenprogramm THERM 5.2 unter der Einhaltung der normativen Vorgaben und Randbedingungen der DIN V 4108 [22].

6.3.2.1 Modellaufbau

Tab. 6-7 listet die für die Berechnung verwendeten Materialien und deren angesetzte Wärmeleitfähigkeit auf. Insgesamt wurden vier verschiedene Ausführungsvarianten der Fuge betrachtet. Die Simulation berechnet die minimale Oberflächentemperatur der Innenwand unter der Vorgabe einer Außentemperatur $q_e = -5 \text{ °C}$ und einer Innentemperatur $q_i = 20 \text{ °C}$. Der Wandbaustoff wurde mit einem wirkenden Wert der Wärmeleitfähigkeit von $0,12 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ abgeschätzt. Zum Zeitpunkt der Simulation lagen noch keine experimentellen Werte des Aerogelbetons vor. Durch die Annahme eines konservativen Wertes für die Wärmeleitfähigkeit sollte der Aussagewert der Simulation sichergestellt werden. Der außenseitige Wärmeübergangswiderstand R_{se} wurde mit $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ konventionell festgelegt. Innerhalb der Fugenflanke wurde aufgrund der reduzierten Windgeschwindigkeit $0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$ angesetzt. Der raumseitige Wärmeübergangswiderstand R_{si} wurde mit $0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ gemäß der Vorgabe für beheizte Räume festgelegt. Die getroffenen Vereinfachungen unterstützen eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung der Situation.

Tab. 6-7 Materialien und angesetzte Wärmeleitfähigkeit

Material	Wärmeleitfähigkeit [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]
Stahl	50,0
Aerogelhaltiger Leichtbetonwerkstoff	0,12
vorkomprimiertes Fugenband	0,70
stehende Luftschicht mit Emissionsgrad = 0,9 (vereinfacht)	Berechnet nach DIN EN ISO 6946:2008-4 (Anhang B.4)

6.3.2.2 Ergebnis – Fuge mit durchgehendem Abdichtband

In der ersten Variante wurde die Fuge mit einem über die Wandbreite durchgehenden Fugenband modelliert. Diese Ausführung gewährleistet die zuverlässige Dämmung und Abdichtung der Fuge. Nachteilig ist der aufgrund der Sonderbreite des Fugenbandes erhöhte Preis und der Materialmehraufwand.

Abb. 6-16 rechts zeigt deutlich die Wärmebrückenwirkung des Verbinders, die sich durch die einheitliche Grünfärbung in Form der Kontur des Verbinders darstellt. Dadurch erfährt die Temperaturverteilung in der Innenecke eine deutliche Eindellung. Insgesamt ist jedoch der Mindestwärmeschutz zur Vermeidung von Schimmelbildung sicher erfüllt.

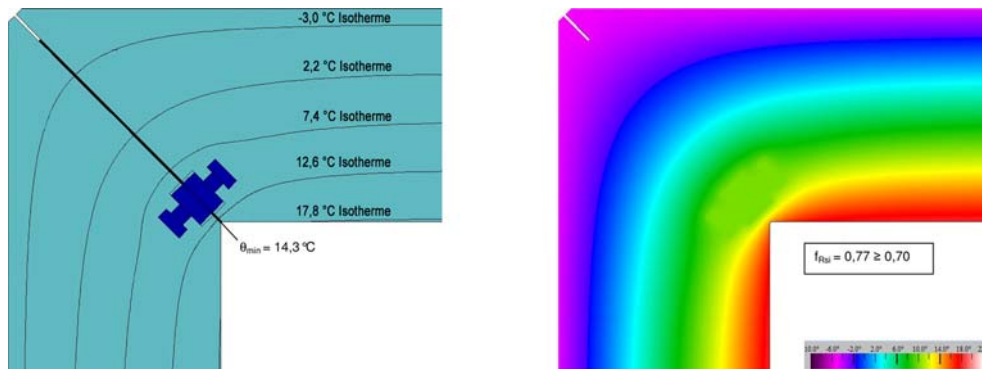


Abb. 6-16 Isothermen- und Farbplot der Wanddecke mit Verbinder - durchgehendes Fugenband

6.3.2.3 Ergebnis – Fuge mit stehender Luftschicht

Das zweite Modell betrachtet den Fall einer durch einen schmalen Dichtbandstreifen geschlossenen Fuge. Hier hat man den Vorteil auf handelsübliche Materialbreiten des Fugenbandes zurückgreifen zu können. Die in der Fuge verbleibende Luftschicht wird in der Simulation als nicht im ständigen Austausch mit der Umgebungsluft stehend betrachtet. Diese Bedingung muss auch durch eine entsprechende konstruktive Ausbildung gewährleistet werden. Abb. 6-17 rechts zeigt die Wärmebrückenwirkung des Verbinders. Auch in diesem Fall konnte mit Hilfe der Simulation die sichere Einhaltung des Mindestwärmeschutzes nachgewiesen werden.

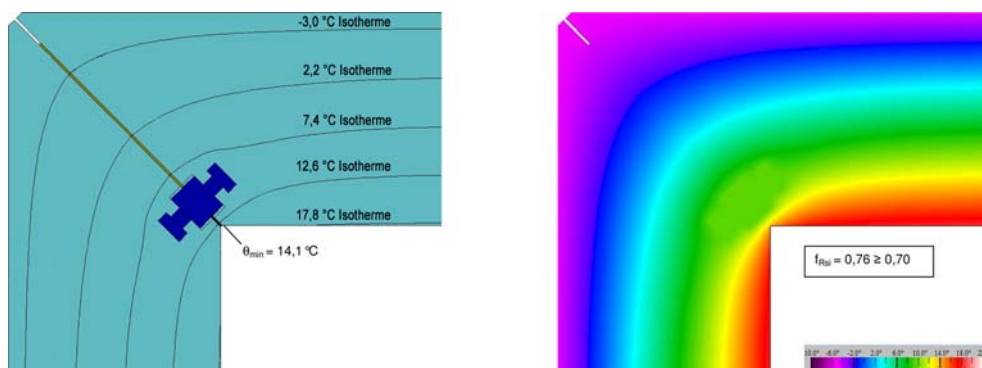


Abb. 6-17 Isothermen- und Farbplot der Wanddecke mit Verbinder – durch schmales Fugenband abgetrennte Luftschicht

6.3.2.4 Zusammenfassung

Mit Hilfe eines luftdichten Abschlusses lässt sich eine ausreichend gedämmte Fuge herstellen. Die Abdichtung kann durch ein schmales Fugenband mit minimalen Materialeinsatz erfolgen. Dessen Breite wird ausschließlich durch die erforderliche Luftdichtigkeit bestimmt. Die in der Fuge stehende Luftschicht gewährleistet eine ausreichende Dämmwirkung.

Das statische Verbindungselement aus Stahl weist aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit eine deutliche Wärmebrückenwirkung auf. Jedoch selbst im Fall der extrem ungünstigen Platzierung des Verbinders in der Simulation wird für beide Abdichtungssi-

tuationen der erforderliche Wärmeschutz der Fugenausbildung erfüllt. Unter Berücksichtigung des in Abschnitt 6.3 geforderten Einbaus der statischen Verbindungsmittel in der Wandkernzone vermindert sich der direkte Einfluss der Wärmebrückenwirkung auf die Oberflächentemperatur der Wand deutlich.

6.3.3 Lastabtrag

Statisch betrachtet sind Bauwerke aus Betonelementen ein räumliches Faltnetz aus ebenen Scheiben und Platten. Infolge äußerer Lasteinwirkung können alle Elemente als Scheibe und/oder als Platte beansprucht werden. In der Statik wird ein in der Ausdehnungsrichtung belastetes Element als Scheibe bezeichnet. Eine Platte wird senkrecht zu ihrer Ausdehnungsrichtung beansprucht. Das Zusammenwirken der Elemente erfolgt über die Fuge. Im Großtafelbau gibt es drei grundlegende Aussteifungsmechanismen, die in Abb. 6-18 aufgeführt sind. Am häufigsten findet dabei in der Praxis das rechts dargestellte Aussteifungsprinzip Anwendung, da sich damit die in Bezug auf die flexible Grundrissgestaltung günstigste Bauweise realisieren lässt. Die statisch beanspruchten Fugenflächen infolge Horizontallasten sind durch eine graue Färbung gekennzeichnet. Die Beanspruchung wird in Zug $\leftarrow\rightarrow$, Druck $\rightarrow\leftarrow$, und Schub $\uparrow\downarrow$ unterschieden, wobei die resultierende Querkraft sich aus längs und quer in der Fugenebene wirkende Komponenten zusammensetzt. Beanspruchungen infolge von Vertikallasten treten in allen drei Modellen hauptsächlich in Form von Druckkräften in den horizontalen Fugen auf (ungefüllte Kreise).

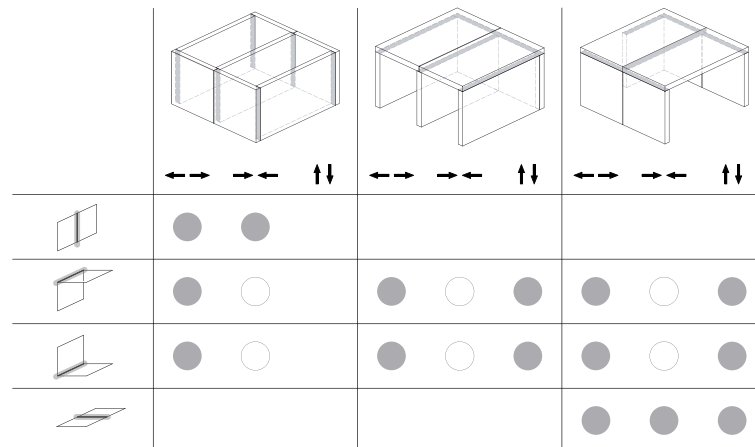


Abb. 6-18 Schnittkräfte in den Fugen aufgrund horizontaler und vertikaler Lasten

Vertikalfugen werden nur in der Aussteifungsvariante ohne Aktivierung der Deckenscheibe (l.) statisch beansprucht. Es sind vor allem die horizontalen Fugen, die sowohl durch Vertikal- als auch Horizontallasten beansprucht sind, sobald eine Aussteifung über die Deckenscheibe (m. und r.) erfolgt. Die Übertragbarkeit von Querkraften stellt daher eine zentrale Forderung an das statische Verbindungsmittel dar. Zur Ausbildung der Scheibenwirkung in der Deckenplatte ist überdies die Übertragung von Zug- und Druckkräften erforderlich. Nach [6] eignen sich alle dargestellten statischen Systeme gleich gut für eine Ausführung mit vergussfreien, punktförmigen Verbindungen.

Die als Bestandteil des integrierten Konzepts beabsichtigte Aktivierung der Fuge zur Vernetzung bereits in der Wand integrierter Medienleitungen kann durch das System Munitec (vgl. 3.2.1.1) geleistet werden. Die statischen Komponenten PowerClip und PowerCon bringen eine Reihe produktspezifischer Randbedingungen mit sich, die bei der Adaption des Lastabtrags eines Wohngebäudes von einer großflächigen Pressung auf eine punktuell konzentrierte Kraftübertragung berücksichtigt werden müssen. Da die Verbindungsmittel einen hohen Anteil an den Gesamtkosten des Fugenaufbaus haben, ist deren Einsatz auf das statisch und montage-technisch erforderliche Minimum zu beschränken. Folgende Aspekte müssen bei der Einplanung der Verbindungspunkte unter statischen Aspekten berücksichtigt werden.

6.3.3.1 Fuge Wandfuß

Für eine sichere Lagerung eines Wandelements sind mindestens zwei Fußpunkte erforderlich. Diese werden mit einem Randabstand von 200-300 mm an den Elementstirnflächen vorgesehen. Längere Wandelemente benötigen ein Zwischenauflager. Damit wird die Spannweite der als wandartiger Träger belasteten Elemente reduziert und von einem Einfeld- in ein Mehrfeldsystem überführt. Zusätzlich gilt die Wand als oben und unten punktförmig gehalten, wodurch sich die Knicklänge in Längs- und Breitenrichtung reduziert.

6.3.3.2 Fuge Wandkopf

Am Wandkopf richtet sich die Lage der Punkte nach der Deckenplatte und den aufgehenden Wänden. Die Verbindung muss so angeordnet sein, dass die Deckenplatte gleichmäßig unterstützt wird und sowohl von deren Rand als auch vom Rand der darunterliegenden Wand mit einem Abstand von 200-300 mm platziert ist. Die Lagerpunkte der darüberliegenden, aufgehenden Geschosswände werden nach den aufgeführten Kriterien des vorangegangenen Abschnitts angeordnet, und zur Minimierung der Biegebeanspruchung der Platte direkt auf der darunterliegenden Wand gelagert. An diesen Stellen liegen somit zwei Verbindungspunkte in einer Achse, welche die auftretenden Lasten unmittelbar durch die Deckenebene durchleiten. Diese Punkte funktionieren ebenfalls als Lager für die Deckenplatte (Abb. 6-19).

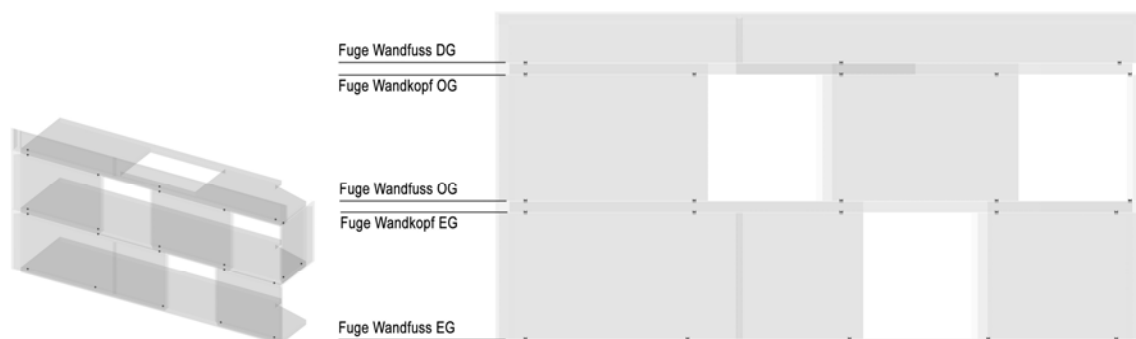


Abb. 6-19 Wandaufbau Prototyp: zwei Stockwerke und Dachgeschoss mit optimiert platzierten PowerClips

6.3.3.3 Vertikale Wandfugen

Obwohl eine kraftschlüssige Verbindung in der vertikalen Wandfuge bei aktivierter Deckenscheibe nicht erforderlich ist, ist deren Ausführung dennoch sinnvoll. Für den statischen Nachweis kann die Wand als drei oder vierseitig gehalten betrachtet werden. Für den Nachweis außergewöhnlicher Lastfälle bietet eine statische Verbindung in der vertikalen Wandfuge eine redundante Tragfunktion. Das ermöglicht die Ausbildung alternativer Lastpfade im Falle eines unplanmäßigen Ausfalls eines tragenden Bauteils. Für die Montage ergeben sich ebenfalls Vorteile, die in Abschnitt 6.3.4.3 erläutert werden.

6.3.3.4 Horizontale Deckenfugen

Für die Aussteifung des Gebäudes über die Deckenelemente ist es erforderlich, eine zusammenhängende Scheibenwirkung zu aktivieren. Konventionelle Methoden, wie die Herstellung der Scheibenwirkung durch Aufbeton oder der statisch wirksame Verguss der Fuge widerspricht der angestrebten Lösbarkeit. Mit Hilfe von PowerCons wird eine kraftschlüssige Verbindung der Elemente in allen Achsrichtungen bewirkt. Im Gegensatz zu der vergossenen Fuge wirkt diese Verbindung punktuell. Die Kopplung von Durchbiegungen wird durch die Anordnung eines PowerCons im Feld erreicht. Eine flexible Fugendichtung erlaubt die Relativverschiebung im Bereich der freien Fugenkante. Die Anordnung von PowerCons im Randbereich der Elemente ermöglicht die Ausbildung eines in der Deckenscheibe integrierten Ringzugankers. Abhängig von der Fugenlänge werden zwischen 2-3 PowerCons in der Fugenkante zur Übertragung der auftretenden Lasten in der Deckenebene benötigt.

6.3.4 Elementmontage

6.3.4.1 Fuge Wandfuß

Die Fußpunkte (PowerClip) dienen neben der Herstellung der statischen Verbindung während der Montagephase ebenfalls der Justierung. Das Wandelement kann damit in allen drei Raumrichtungen gerichtet werden. Gleichzeitig ist damit auch eine geringfügige Verdrehung des Elements um die Hochachse möglich. Mit der Verwendung eines dritten Lagerpunktes kann bei einem längeren Element der Wandvorverformung infolge Schüsseln entgegengewirkt werden.

6.3.4.2 Fuge Wandkopf

Bei der Montage werden zum Anschlagen der Elemente auch die Verbindungspunkte am Wandkopf verwendet. Dadurch lassen sich temporäre Anker einsparen, die in der Nutzungsphase keinen Zweck mehr erfüllen. Mit Hilfe einer Traverse mit verstellbarem Anschlag kann die ungleichmäßige Lage der PowerClips bezüglich des Wandschwerpunkts ausgeglichen werden.

6.3.4.3 Vertikale Wandfugen

Bis das vollständige statische System mit Deckenelementen errichtet ist, werden die Wandelemente bereits in der Montagephase durch eine Verbindung in der vertikalen Fuge gehalten. Dadurch entfällt die Notwendigkeit einer temporären Abstützung der

Elemente durch Sprieße. Die Verbinder sichern ebenfalls das einwandfreie Zusammenfahren der Wandelemente bei der Montage, um die in der Fuge angeordneten Medienverbinder vor Zwängungen zu schützen. Das Anhängen weiterer Wandelemente an bereits montierte Wände ermöglicht die Verwendung nur eines Fußpunktes in Analogie an das statische System des Gerberträgers.

6.3.4.4 Montageabfolge einer horizontalen Fuge

Abb. 6-20 zeigt den Montageablauf einer horizontalen Fuge mit vier Funktionsebenen gemäß Tab. 6-6 mit einer konstruktiv ausgeführten Abdichtung. Im ersten Abschnitt (1) wird das Deckenelement auf die PowerClips der unteren Wand abgesetzt. Über die zur Wandinnenseite geöffnete Fuge kann mit einem Werkzeug die Justierung der Elemente in der Höhenlage erfolgen (2). Von der Decke aus wird der Aufbau der Regensperre durch Einstecken eines L-Profiles in die einbetonierte Nut vorgenommen (3). Dieses Prinzip wird in [43] vorgestellt und basiert auf dem bewährten konstruktiven Fugendichtungssystem Eurofit. Eigene Untersuchungen mit Solites, die im Rahmen des Forschungsprojekts HOMES (24) erfolgten, bestätigten die Wirksamkeit des Konzepts [52]. Unmittelbar vor dem Versetzen der aufgehenden Wand werden die vorkomprimierten Fugenbänder auf die Deckenplatte und an die Flanke der Vertikalfuge der Nachbarwand aufgeklebt (4).

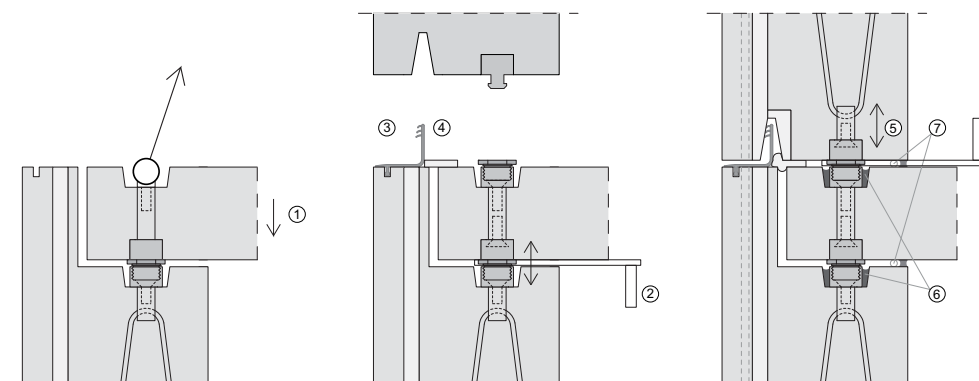


Abb. 6-20 Montageabfolge einer horizontalen Wandfuge

Nach dem Setzen der aufgehenden Wand erfolgt deren Höhenjustierung mit dem Werkzeug (5). Horizontale Toleranzen nehmen die PowerClips durch größere Aussparungen auf der Wand- und Deckenoberseite auf. Um einen Kraftschluss mit dem Element nach erfolgter Justierung herzustellen, ist eine Verfüllung der Aussparung mit Mörtel vorzunehmen (6). Abschließend wird die Fuge unter- und oberhalb der Decke mit einer Brandschutzschnur geschlossen (7). Der optisch saubere Abschluss kann bei einer sichtbaren Fuge durch eine dauerelastische Verfugung erfolgen.

6.3.4.5 Montageabfolge einer vertikalen Fuge

Der Montageablauf einer gleichwertig aufgebauten vertikalen Fuge erfolgt gemäß Abb. 6-21 in der gleichen Schrittfolge. Ein wesentlicher Unterschied ergibt sich in der Aufnahme von Toleranzen, die vom PowerCon mit Hilfe von untergelegten Distanzplatten erfolgt. Es ist daher erforderlich, bereits vor der Montage die Fugendicke auf die vor-

handene Maßabweichung einzustellen. Dazu werden von Seiten des Herstellers Elastomer-Distanzelemente vorgesehen, die eine gewisse Verbindungsadaptivität zulassen. Die PowerCons werden in den vorgesehenen Aussparungen mit der entsprechenden Kombination der Unterlagen montiert (1). Unmittelbar vor der Montage der auf die gleiche Weise vorbereiteten, zu montierenden Wand wird das vorkomprimierte Fugenband (vgl. (4) in 6.3.4.4) auf die vertikale Wandfuge durchgehend aufgeklebt (2). Nach dem Setzen des Wandelements wird von der Wandoberkante aus die Schlagregensperre in die einbetonierten Fugenprofile eingeschoben (3). Zur Herstellung des Kraftschlusses in Einschubrichtung des PowerCons muss dieser durch die Fuge hindurch mit einem Sperrbolzen verriegelt werden.

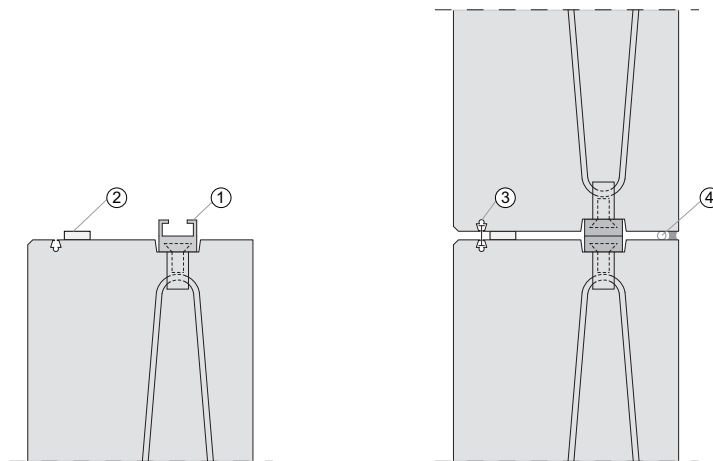


Abb. 6-21 Montagefolge einer vertikalen Wandfuge

Auch die vertikale Fuge wird durch Einlage einer Brandschutzschnur geschlossen (4). Der optisch saubere Abschluss kann ebenfalls durch eine dauerelastische Verfugung der Innenseite erfolgen.

7 Tragfähigkeitsuntersuchung der Verbindungselemente von Munitec

Die Elemente PowerCon und PowerClip des Verbindungssystem Munitec sind zur temporären kraftschlüssigen Verbindung von Stahlbetonfertigteilelementen während des Montagevorgangs entwickelt worden. Die Verbinder werden in China aus lokalen Stahlerzeugnissen im Gussverfahren gefertigt. Tab. 7-1 gibt Auskunft über die Qualität und Eigenschaften des Werkstoffs. Der Korrosionsschutz wird durch eine Vollverzinkung hergestellt.

Tab. 7-1 Werkstoffinformationen Material PowerCon und PowerClip

Werkstoffbezeichnung China	Referenz Deutschland	$R_{0,2}$	R_m
Quality Carbon structural steel 45	C45 bzw. 1.0503	490 N/mm ²	700-850 N/mm ²

Ziel der durchgeführten Belastungsversuche ist die Bewertung dieser bestehenden Verbindungselemente bezüglich ihrer Eignung für eine ständige Aufnahme der auftretenden Beanspruchung in einem Gebäude.

Die Verbindungselemente wurden in verschiedenen Belastungsszenarien bis zum Bruch belastet, um die Grenztragfähigkeit zu ermitteln. Im Anschluss daran wurde mittels einer festgelegten Be- und Entlastung das System- und Verbindungsspezifische Last-Verformungsverhalten ermittelt.

7.1 Prüfgerät und Prüfbedingungen

Die Versuche wurden mit einem Schenck Hydropuls-Prüfzylinder mit einer Nennkraft von 400 kN durchgeführt (Abb. 7-1). Die hydraulisch angetriebene Prüfmaschine für Zug- Druck- und Biegeversuche verfügt über einen Nennhub von 250 mm. Die Versuche wurden weggesteuert gefahren. Der Prüfzylinder liefert über die eingebaute Kraftmessdose und die Kolbenwegmessung die aktuelle Belastung und den gefahrenen Kolbenweg. Diese Werte werden durch weitere Wegmessungen direkt am Prüfkörper ergänzt. Der Versuchsspezifische Messaufbau wird im entsprechenden Abschnitt eingangs erläutert. Im Versuchslabor ist eine konditionierte Klimatisierung nicht möglich. Die Temperierung erfolgt über Heizkörper und lag im Versuchszeitraum von Januar bis Februar mit ca. 20 °C bei normaler Raumtemperatur.

Für die Aufnahme der Prüfkörper wurde ein Stahladapter angefertigt, der gelenkig an den Prüfzylinder angeschlossen werden kann. Der zentrische und exzentrische Anschluss ermöglicht die verschiedenen Prüfkonstellationen. Zentrisch wurden die Zug- und Druckprüfungen vorgenommen. Durch den exzentrischen Anschluss wurde das Moment-Rotationsverhalten des Verbindungsmittels untersucht. Abschließend wurden kombinierte Zug-Scherversuche durchgeführt.

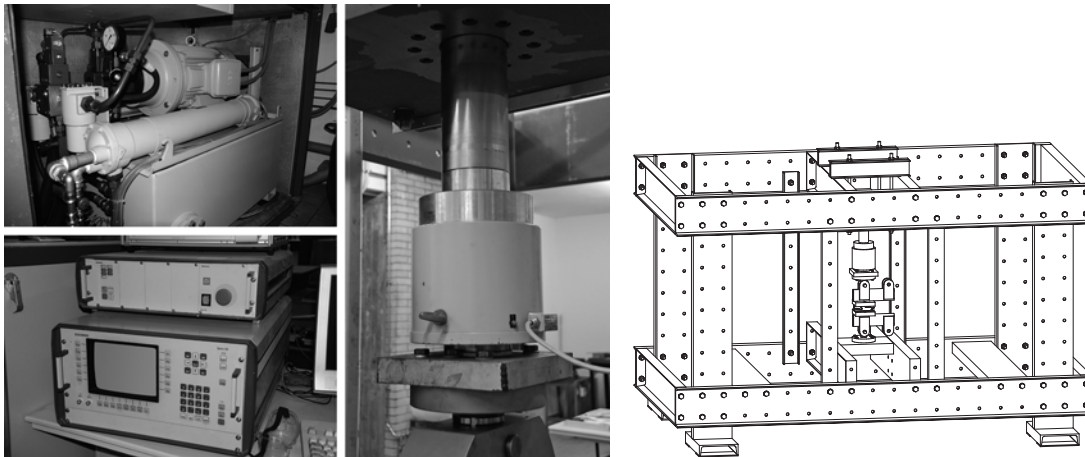


Abb. 7-1 Komponenten der Prüfmaschine Schenck Hydropuls – Rahmen mit Prüfzylinder

7.2 Traglastversuche PowerCon

7.2.1 Versuchsprogramm

PowerCons kommen an den Vertikalfugen von Wänden sowie an den Horizontalfugen zwischen Deckenplatten zum Einsatz. Ihre Abmessung beträgt LxBxH 200x70x60mm.

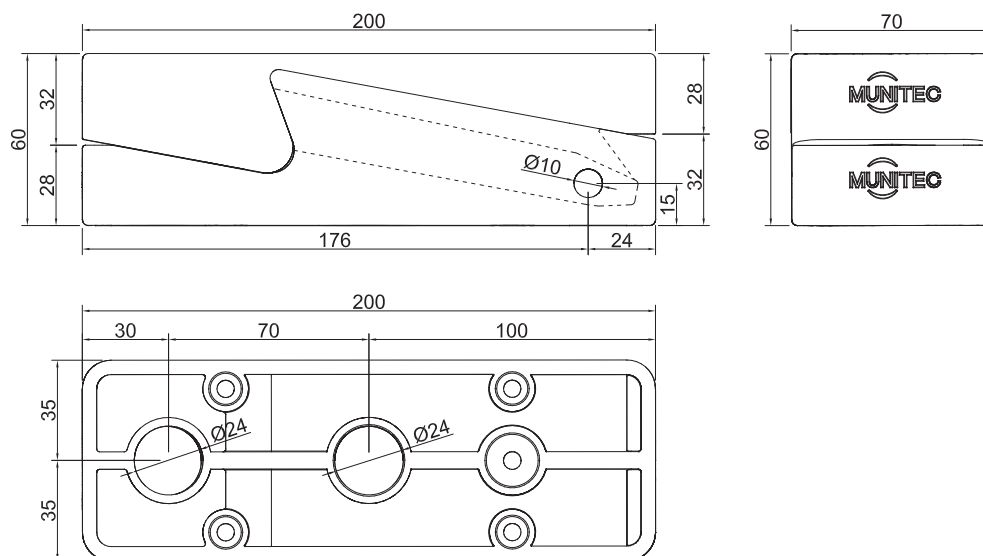


Abb. 7-2 Aufbau und Maße des Munitec PowerCon

Um Toleranzen aufnehmen zu können, werden Distanzplatten aus Gummi zwischen dem Bauteil und dem Verbinder unterlegt. Durch den Einbau eines Gummirings zwischen Schraubenkopf und Verbinder wird eine Reduktion der Verbindungssteifigkeit in Zugrichtung erreicht (Abb. 7-3). Aus diesen zwei Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Verbindungssteifigkeit ergeben sich verschiedene Kombinationsmöglichkeiten, die experimentell untersucht wurden.



Abb. 7-3 PowerCon (m) und (f) mit Distanzplatte (d=5 mm) und O-Ringe (schwarz)

Tab. 7-2 zeigt eine Auswahl relevanter Steifigkeitskombinationen und den prinzipiellen Verbindungsaufbau. Dabei nimmt die Verbindungssteifigkeit kontinuierlich von V1 bis V7 ab. Mit den Versuchen V1-V3 wurden Kombinationen ohne Distanzplatten und mit den Versuchen V5-V7 mit beiden Distanzplatten untersucht. Die Verwendung von nur einer Distanzplatte liegt von der erwarteten Steifigkeit zwischen diesen beiden Extremen. Es wurde deshalb nur ein Versuch (V4) zur Ermittlung des Last-Verformungsverhaltens unter Druck durchgeführt. Für die Versuche V2 und V6 wurde wegen des Einflusses der unterschiedlichen Lage der O-Ringe eine zusätzliche Fallunterscheidung getroffen.

Jede Konstellation wurde zweimal in unmittelbarer Abfolge belastet, so dass man das Verhalten der Verbindung unter Wiederbelastung erfassen konnte. Beide Versuche wurden mit denselben Distanzplatten und O-Ringen durchgeführt. Ein Wechsel der Distanzelemente erfolgte jeweils zu Beginn eines neuen Doppelversuchs. Die zentrischen Versuche (z-l) wurden als Zug (Z)- und Druckversuche (D) gefahren. Aufgrund der definierten Wirkung der Ausgleichselemente wurden die Distanzplatten ausschließlich auf Druck und die O-Ringe unter Zugbelastung getestet. Die Ergebnisse des auf Biegung konzipierten exzentrischen Versuchsaufbaus werden durch beide Ausgleichselemente beeinflusst, so dass die Verbinder um die starke Achse (e-l) für alle Kombinationen getestet wurden. Aufgrund des unsymmetrischen Aufbaus wurde die Verbindung durch positiv und negativ wirkende Momente infolge einer aufgebrachten Zug- bzw. Druckkraft am exzentrischen Anschluss belastet. Um die schwache Achse (e-q) konnten die Verbinder wegen des symmetrischen Versuchsaufbaus unter Einwirkung eines positiven Moments untersucht werden.

Tab. 7-2 Bezeichnung, Aufbau und Versuchsanzahl der untersuchten Verbindungsvarianten

	V1		V2.1		V2.2		V3		V4		V5		V6.1		V6.2		V7	
längs																		
quer																		
	Z	D	Z	D	Z	D	Z	D	Z	D	Z	D	Z	D	Z	D	Z	D
z-l	2	2	2	-	2	-	2	-	-	2	-	2	-	-	-	-	-	-
e-l	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
e-q	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-	2	-
g-l; g-q	2+2																	

7.2.2 Versuchsergebnisse

7.2.2.1 Last-Verformung unter zentrischer Zug- und Drucklast

7.2.2.1.1 Versuchsaufbau

An den in Abb. 7-4 dargestellten Versuchsaufbau wurden zwei Wegtaster vom Typ HBM WA 50MM-T angebracht, mit denen die Relativverschiebung u_a und u_i der beiden Verbinderhälften in Belastungsrichtung gemessen wurde. Rechnerisch erfolgte die Trennung der Messwerte in einen zentrischen Verschiebungsanteil u_m und in einen Verschiebungsanteil $\pm u_\varphi$ infolge der überlagerten Verdrehung.

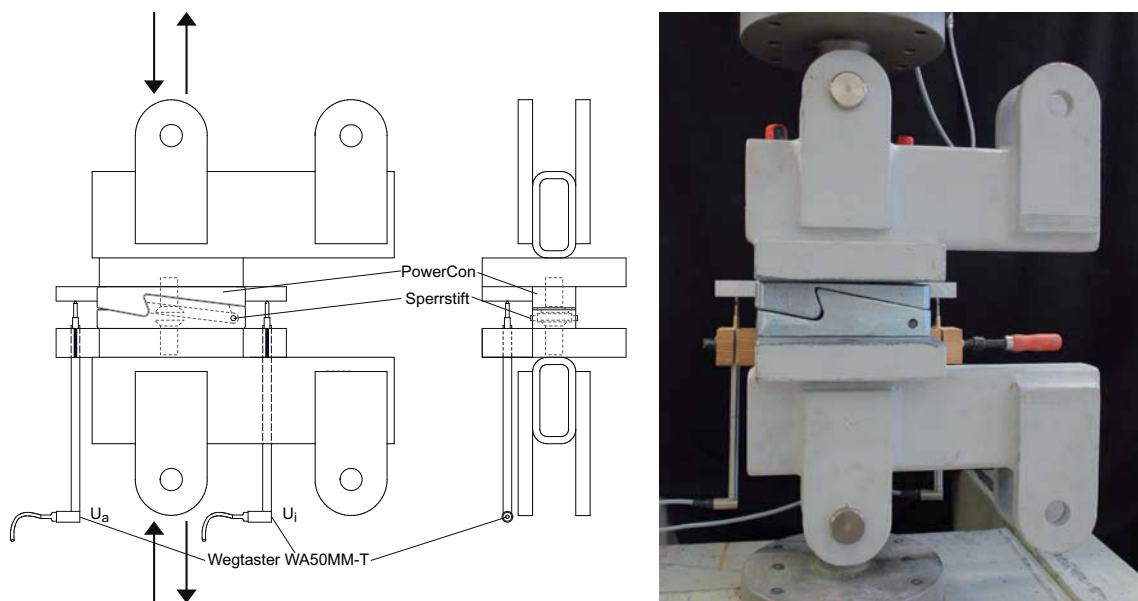


Abb. 7-4 Versuchsaufbau - PowerCon längs unter zentrischer Zug- und Drucklast

7.2.2.1.2 Ergebnisse

Die Zugversuche wurden mit einer Höchstlast von 50 kN durchgeführt. In Vorversuchen wurden die Verbinder bis zum Bruch belastet, der sich bei 80 kN einstellte. Die Zugversuche werden mit maximal 60% dieser Last durchgeführt, um dauerhafte plastische Verformungen des Verbinders ausschließen zu können. Aufgrund eines Datenverlusts der Messaufzeichnungen muss auf die Wiedergabe der Last-Verformungskurven an dieser Stelle verzichtet werden. Abb. 7-5 zeigt, dass die Verbindung ohne Distanzelemente sowohl unter Zug- als auch unter Drucklast die höchste Steifigkeit aufweist. Die Addition der O-Ringe hat eine schrittweise Steigerung der Verformungskapazität bis zu 7 mm zur Folge. Unter wiederholter Belastung kommt es aufgrund der starken Vorkompression der Distanzelemente zu einer weiteren Steigerung der Verformung. Die unterschiedliche Einbausituation der O-Ringe, die durch die Versuche V2.1 und V2.2 untersucht wurde, zeigt keinen Einfluss auf die Verbindungssteifigkeit und auf die Verformungszunahme während der Wiederholungsbelastung. Unter Druckbelastung kann aus Abb. 7-6 ebenfalls eine Verformungszunahme unter Wiederholungslast festgestellt werden. Aufgrund einer Überkompression treten bereits lokale

Schädigungen der Distanzelemente für das getestete Belastungsniveau auf, die dafür verantwortlich gemacht werden können.

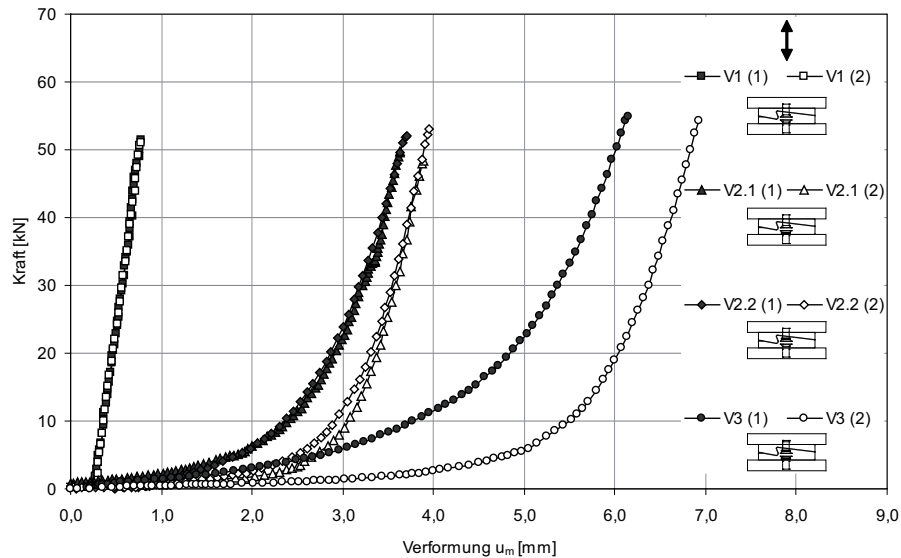


Abb. 7-5 Kraft-Verformungskurven unter zentrischer Zugbelastung

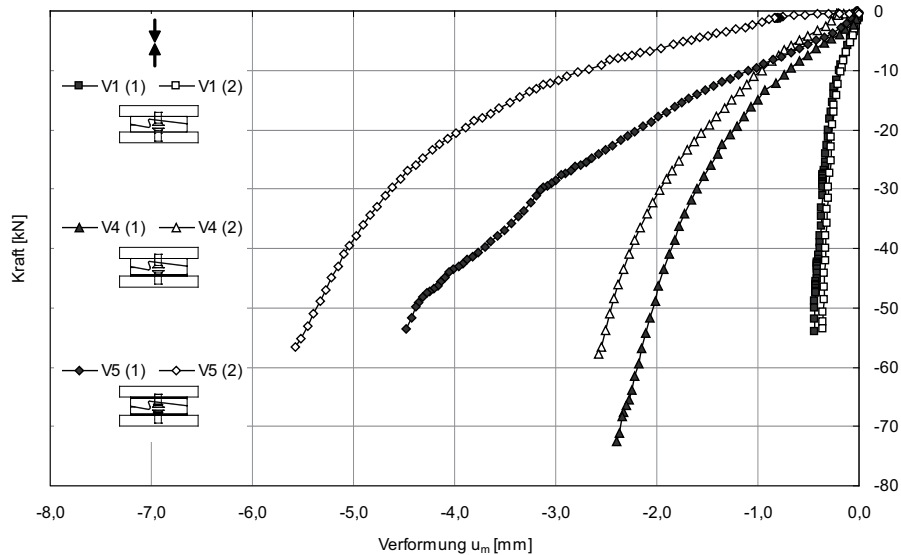


Abb. 7-6 Kraft-Verformungskurven unter zentrischer Druckbelastung

Abb. 7-7 zeigt das Verformungsverhalten der Verbindung in der Ausführung ohne Distanzelemente unter einer unmittelbaren Wechselbeanspruchung von Druck- auf Zuglast. Insgesamt wurden zwei Versuche durchgeführt. Beim Übergang weist die Verbindung einen Schlupf von 0,7 mm auf. Dieses Spiel beruht auf dem konstruktiv vorgesehenen Spiel zwischen den beiden Verbinderhälften, um die einwandfreie Passung während der Montage sicherzustellen.

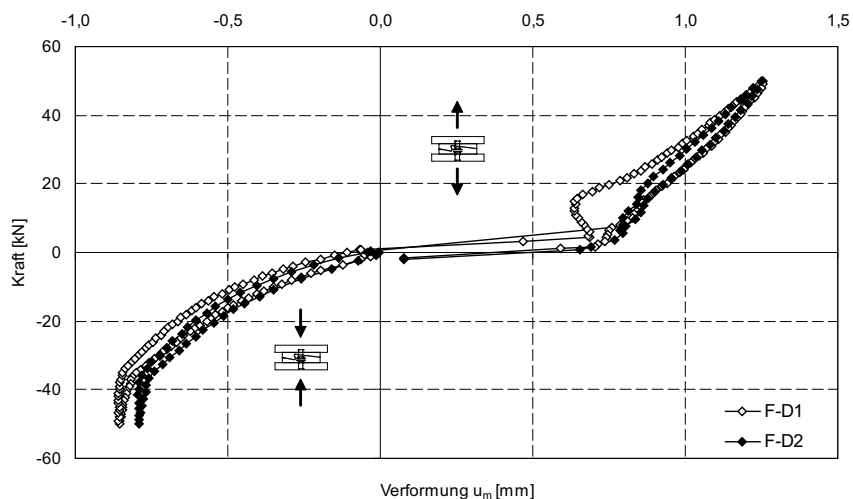


Abb. 7-7 Zentrische Druck-Zug Wechselbeanspruchung eines PowerCons

7.2.2.1.3 Lastübertragung innerhalb der Verbindung

Die kraftschlüssige Verbindung im PowerCon wird durch das Ineinander-Fahren der beiden Verbinderhälften, dem „(m)ale“-Teil (siehe Abb. 7-3 l.) in das „(f)emale“-Teil (siehe Abb. 7-3 r.) während des Montagevorgangs hergestellt. Der hinterschnittene Dorn verankert sich über die komplette Einschublänge von 12 cm mit den ebenfalls hinterschnittenen Flanken des Gegenstücks. Aufgrund des Spiels der beiden Teile kommt es zu einer indifferenten Lastübertragung innerhalb der Verbindung. Abb. 7-8 zeigt, dass im Schnitt 0 im Bereich der Verbinderbefestigung durch die Schrauben der direkten Lastübertragung die geringste Kontaktfläche zur Verfügung steht. Mit zunehmendem Abstand zur Schraubenachse (20 und 40) vergrößert sich die Kontaktfläche der beiden Verbinderhälften. Die Versuche ergaben, dass bei Erreichen der Bruchlast immer das Element PowerCon (f) (dunkelgrau) versagte. Die ungünstige Materialverteilung führt zu einem Aufbiegen der hinterschnittenen Flanken beginnend am stärksten beanspruchten Schnitt -20. Die Lastumlagerung infolge der voranschreitenden Verformung hin zu den steiferen Querschnitten (20, 40) führt schließlich zu einem duktilen Versagen der Verbindung (c).

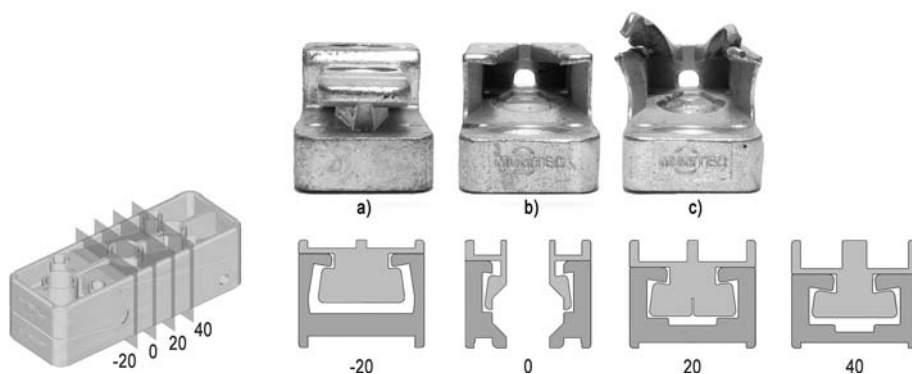


Abb. 7-8 Querschnitte eines PowerCon von -20 mm bis +40 mm in der Schrittweite 20 mm

Trotz der zentrischen Belastung kommt es zu einer messbaren Verdrehung der beiden Verbinderhälften, die sich aus der Summe der Verformungen der drei Fugen 1. Adapterplatte oben – Verbinder(m), 2. Verbinder(m) – Verbinder(f) und 3. Verbinder(f) – Adapterplatte unten zusammensetzt. Dies hat eine lastabhängige Verschiebung der Gleichgewichtslage bezüglich der Nulllage definiert durch die Schraubennachse zur Folge. Abb. 7-9 zeigt die sich einstellende Exzentrizität für verschiedene Distanzelemente unter Zuglast und Abb. 7-10 unter Drucklast.

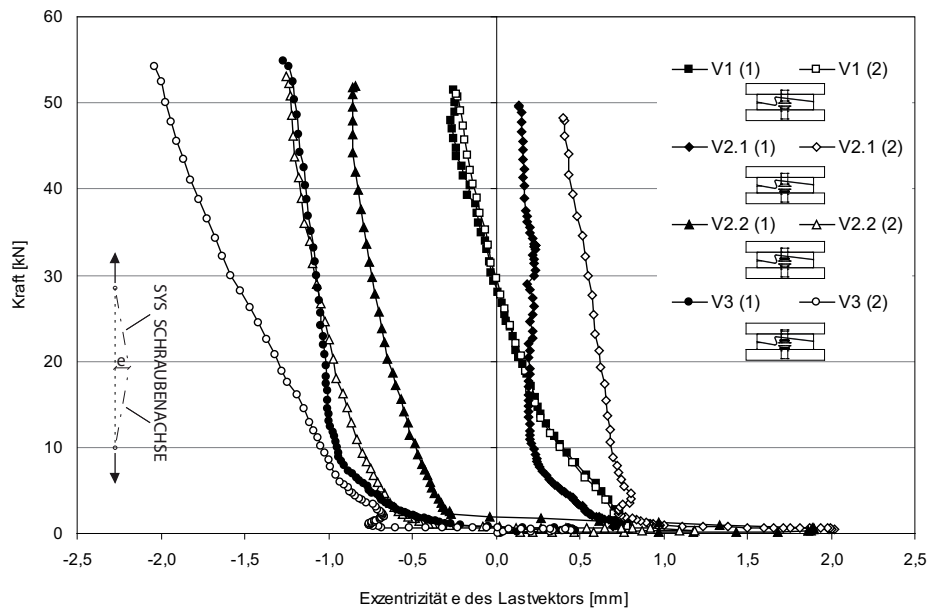


Abb. 7-9 Exzentrizität e des Lastvektors über die Zuglast

Die geringste Exzentrizität tritt bei der steifsten Verbindungsausführung auf. Hier bewegen sich die Werte mit einer hohen Wiederholpräzision um die Nulllage. Je weicher die Verbindung wird, umso größere Exzentrizitäten sind zu beobachten. Der Einfluss des mittig liegenden O-Rings ist größer, da die Versuche V2.2 und V3 im Ergebnis eng zusammen liegen, Versuch V2.1 hingegen die gegenteilige Tendenz aufweist. Allen Versuchen ist gemeinsam, dass sich nach einer gewissen Phase der Einpendelung bis zu 10 kN Belastung für höhere Lasten eine stetig ansteigende Kurve ausbildet. Da die Kraftübertragung im Verbinder nicht auf direktem Wege geschieht, entzieht sich der PowerCon bei zunehmender Weichheit durch die Distanzelemente durch eine Verdrehung der zusätzlichen Belastung. Je steifer die Verbindung ist, umso größer fällt die zusätzliche Belastung infolge einer exzentrischen Lastübertragung aus.

Es fällt auf, dass unter Drucklast die Lastexzentrizitäten nur einseitig auftreten. Die steife Verbindung des Versuchs V1 findet eine Gleichgewichtslage, die ab einer Drucklast von 20 kN unabhängig von der weiteren Auflast konstant bleibt. Der Wiederholungsversuch zeigt das identische Verhalten bei unterschiedlicher Ordinate. Ein starker Einfluss der nachgiebigen Unterfütterung ist bei V4 zu beobachten. Dies kommt durch die unterschiedliche Flächenpressung infolge der rückseitigen Ausbildung des Verbinders(f) zustande. Die zweite Unterfütterung in V5 führt aufgrund der homogen verteilten

Flächenpressung des Verbinders(m) zu einer Dämpfung des bei V4 zu beobachtenden Effekts.

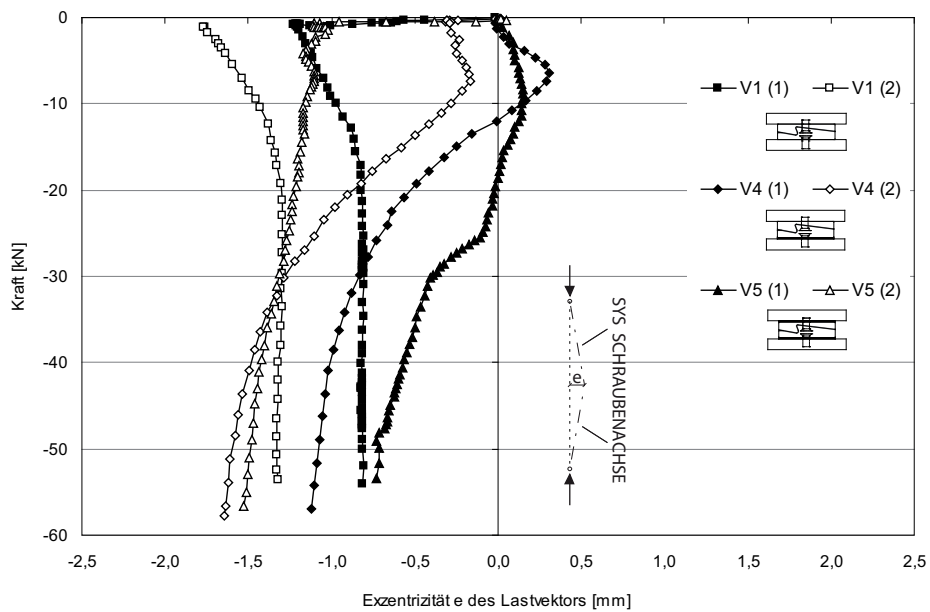


Abb. 7-10 Exzentrizität e des Lastvektors über die Drucklast

7.2.2.2 Moment-Rotation unter exzentrischer Zug- und Drucklast Verbinderlage längs – starke Achse

7.2.2.2.1 Versuchsaufbau

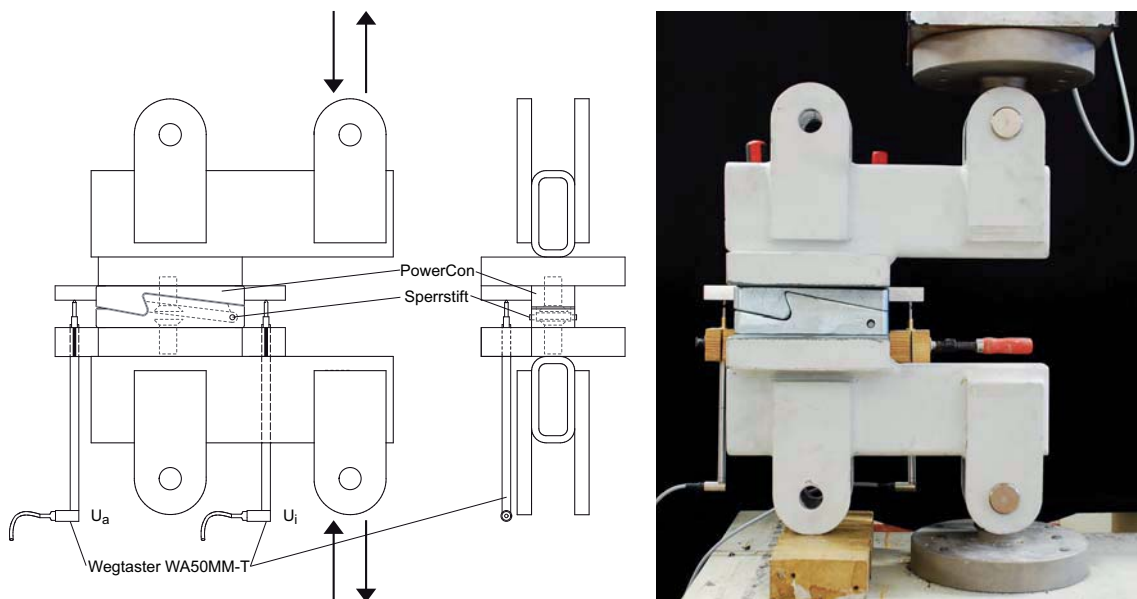


Abb. 7-11 Versuchsaufbau - PowerCon längs unter exzentrischer Zug- und Drucklast

7.2.2.2.2 Ergebnisse

Wie in Tab. 7-2 dargestellt, wurde aufgrund des unsymmetrischen Aufbaus der PowerCon für eine Biegebelastung um die starke Achse eine umfassende Versuchsserie zur Ermittlung der Moment-Rotationskapazität durchgeführt. Die Belastung erfolgte analog zu der zentrischen Belastung mit 60% der ermittelten Bruchlast. Die hohe Rotationskapazität insbesondere unter Einfluss der Distanzelemente führt zu starken Verdrehungen aufgrund des aufgebracht positiven Moments.

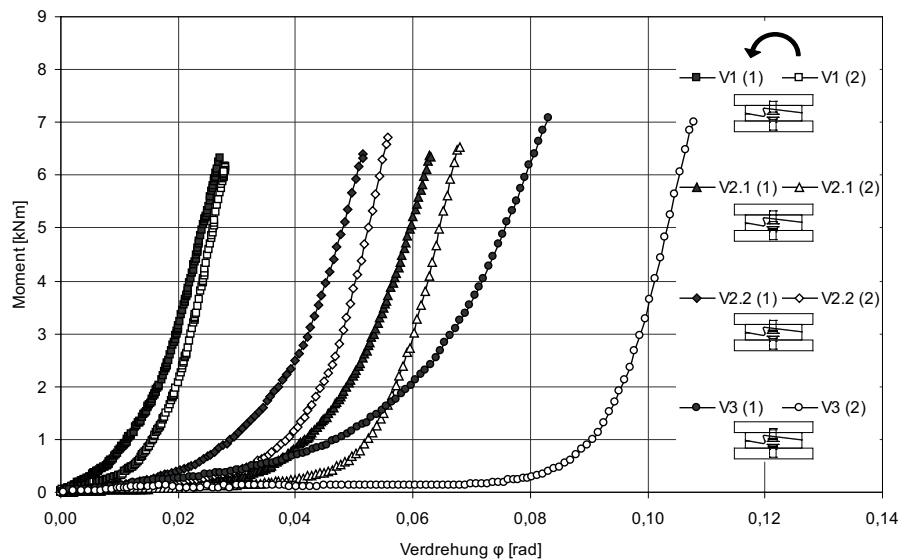


Abb. 7-12 Moment-Rotationskapazität der Verbindung V1-V3 positives Moment – längs

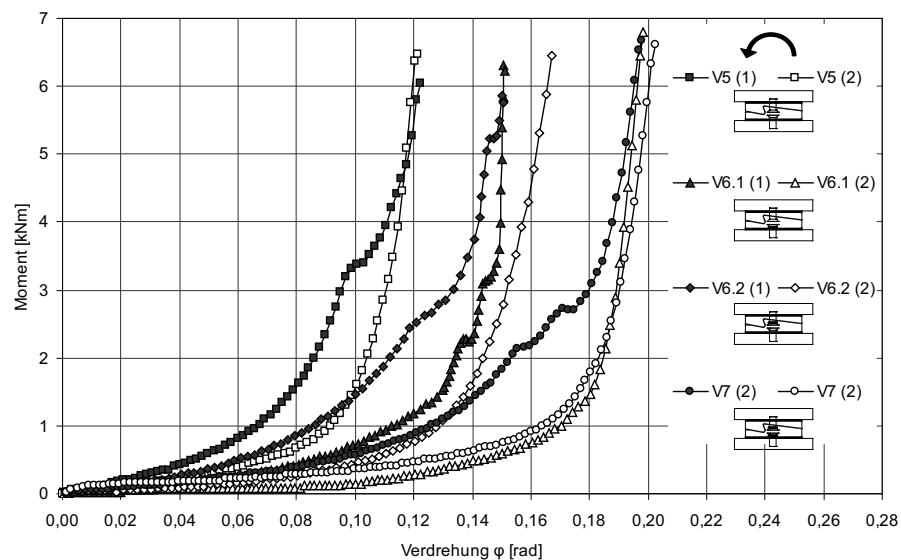


Abb. 7-13 Moment-Rotationskapazität der Verbindung V5-V7 positives Moment – längs

Für die gegensinnige Momentenbelastung weisen die jeweiligen Verbindungskonstellationen eine mehr als doppelt so hohe Steifigkeit auf. Dieses Ergebnis liegt in der stark inhomogenen Flächenpressung des Verbinders(f) auf die darunterliegende Distanzplat-

te begründet (vgl. 7.2.2.1.3). Durch die vollflächige Auflage weist der Verbinder unter der Momentenbelastung nach Abb. 7-14 eine um den Faktor 3,5 größere Pressfläche auf als durch die Versteifungsrippen der offenen Rückseite. Der wesentlich höhere Widerstand bewirkt eine reduzierte Verdrehfähigkeit. Dieser Einfluss ist auf der Videodokumentation der Versuche deutlich zu erkennen.

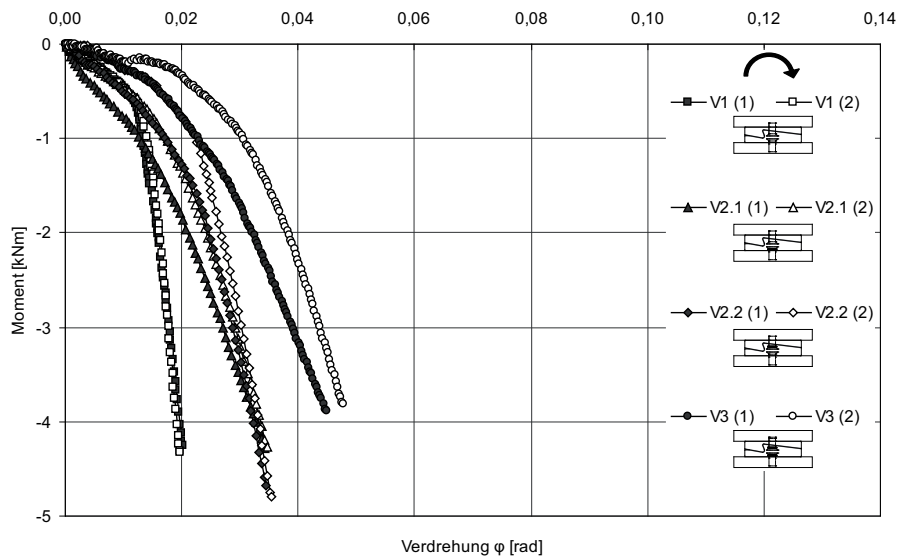


Abb. 7-14 Moment-Rotationskapazität der Verbindung V1-V3 negatives Moment – längs

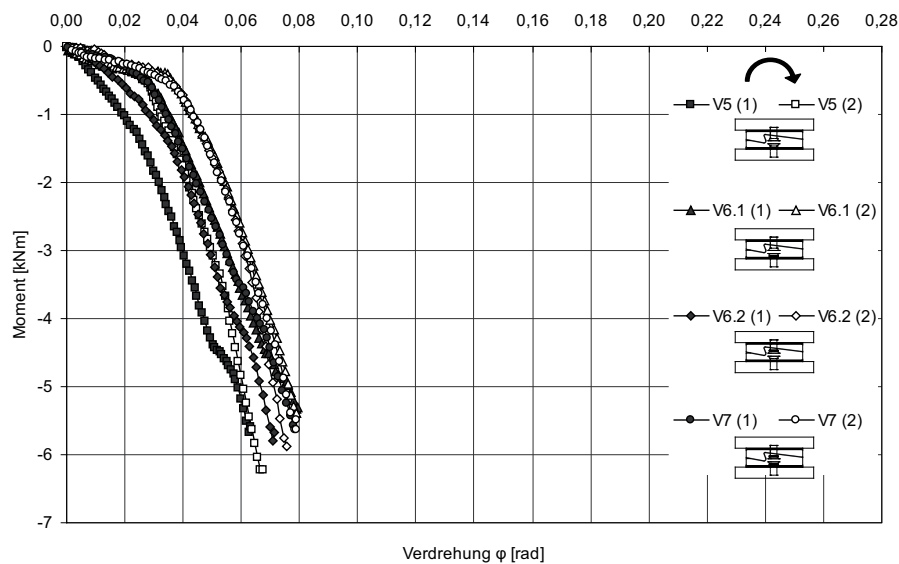


Abb. 7-15 Moment-Rotationskapazität der Verbindung V5-V7 negatives Moment – längs

7.2.2.3 Moment-Rotation unter exzentrischer Zuglast Verbinderlage quer – schwache Achse

7.2.2.3.1 Versuchsaufbau

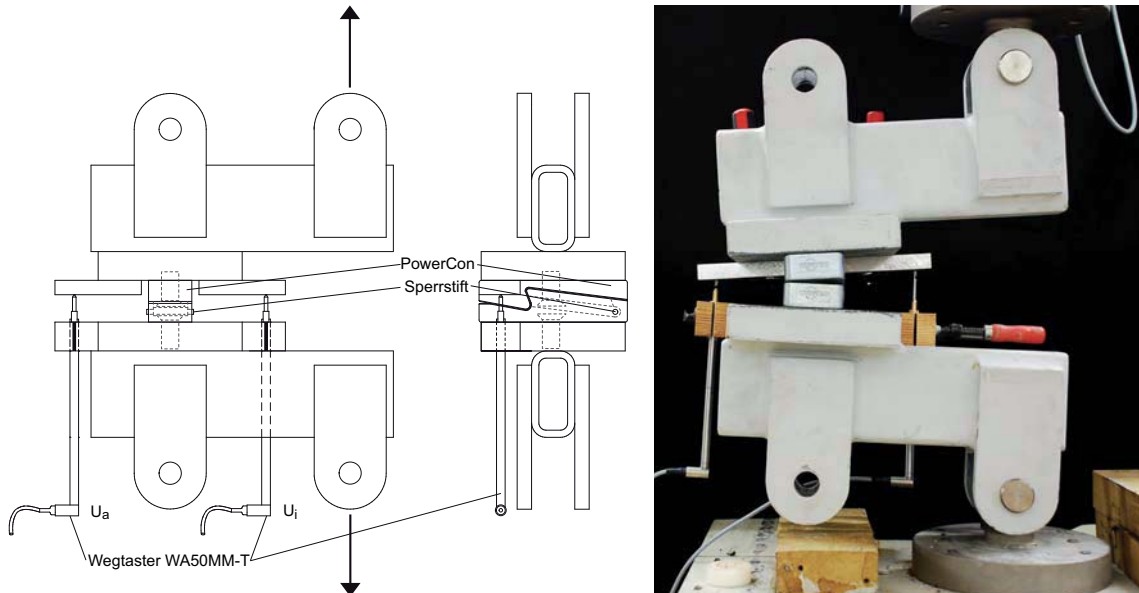


Abb. 7-16 Versuchsaufbau - PowerCon quer unter exzentrischer Drucklast

7.2.2.3.2 Ergebnisse

Die Moment-Rotationskapazität des Verbinders um die schwache Achse fällt trotz der Verwendung von Distanzelementen über alle Versuche sehr gleichmäßig aus. Der Einsatz von Gummipplatten führt zu einer gewissen Streuung der Ergebnisse.

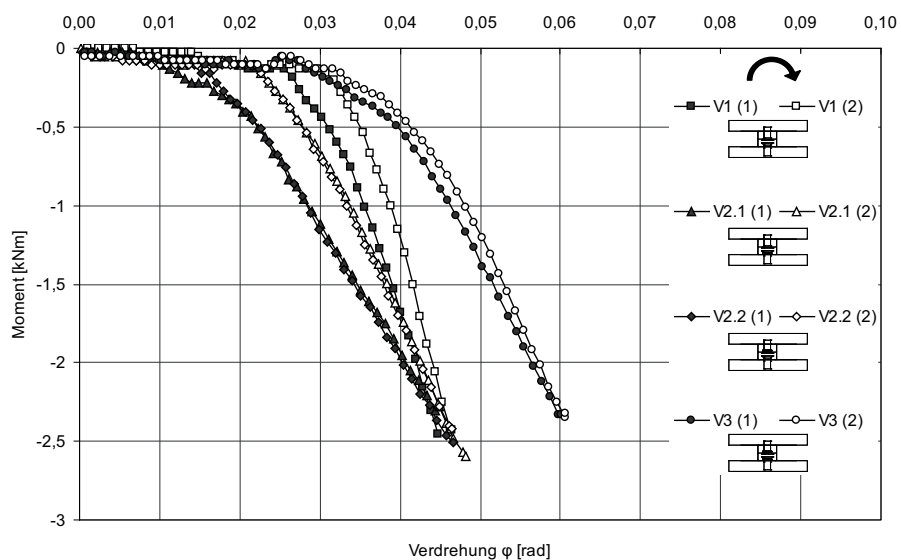


Abb. 7-17 Moment - Rotationskapazität der Verbindung V1-V3 negatives Moment – quer

Der Hauptanteil der gemessenen Verdrehung findet in Querrichtung aufgrund des großen Spiels zwischen den beiden Verbinderhälften direkt in der Fuge statt, so dass der Einfluss der Distanzelemente in dieser Konstellation weitgehend ausgeschaltet wird.

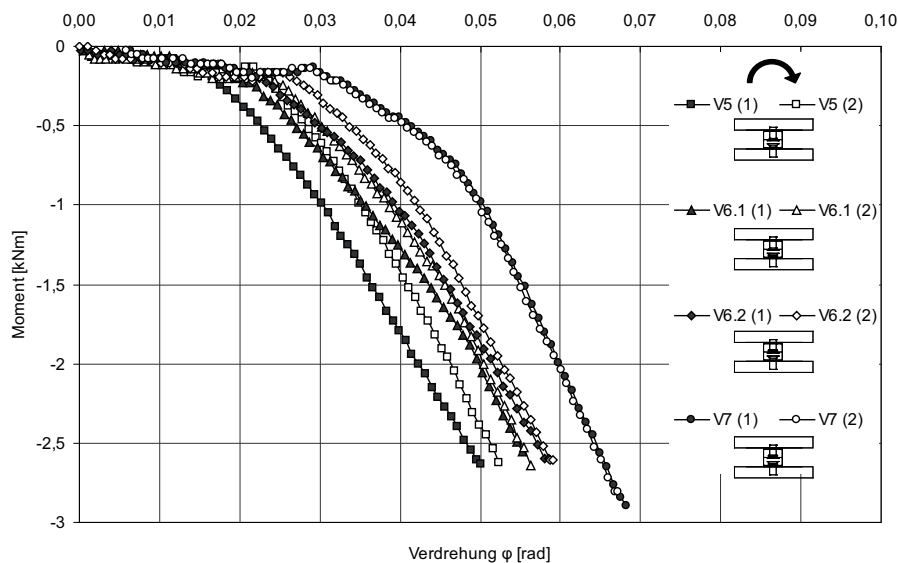


Abb. 7-18 Moment - Rotationskapazität der Verbindung V5-V7 negatives Moment – quer

7.2.2.4 Querkzugfestigkeit in Einschubrichtung

Konstruktiv bedingt ist der PowerCon in allen Achsrichtungen außer der Einschubrichtung kraftschlüssig. Diese Komponente kann nur mittels eines Sperrstifts aufgenommen werden, der die beiden Verbinderhälften gegeneinander verbolzt. Der Sperrstift aus Edelstahl (1.4301 – Ø 9 mm) muss sowohl die Umlenkkomponenten der Zugbelastungen aufgrund der geneigten Kontaktfläche von 10° als auch vollständig die in Einschubrichtung auftretende Querkraft übertragen. Der Stift wird zum Abschluss des Montagevorgangs gesetzt und erfordert den passgenauen Sitz der beiden Verbinderhälften.

7.2.2.4.1 Versuchsaufbau

Gemäß Abb. 7-19 wird der PowerCon unter einem Einbauwinkel von $43,6^\circ$ auf Zug belastet. Für diesen Versuch wurde ein weiterer Wegaufnehmer des Typs HBM 1-WA/20MM-L als Tauchanker installiert, der die Verschiebung u_q der beiden Verbindungselemente entlang der Einschubrichtung aufzeichnet.

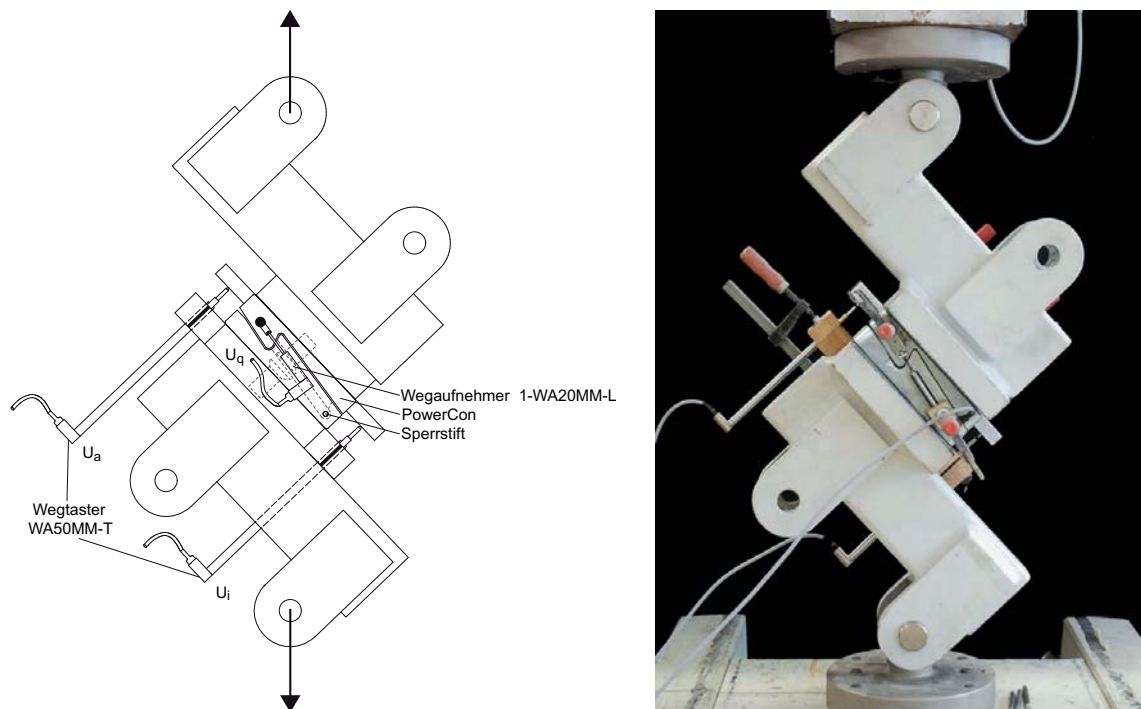


Abb. 7-19 Versuchsaufbau PowerCon längs unter schräg angreifender Zugbelastung

7.2.2.4.2 Ergebnisse

In einem Vorversuch wurde die Bruchlast des Sperrstifts ermittelt. Der Bolzen versagte duktil in der Scherfuge bei einer Kolbenlast von 125 kN. Das entspricht einer Belastung von 90 kN parallel zur Einschubrichtung (siehe Abb. 7-20).

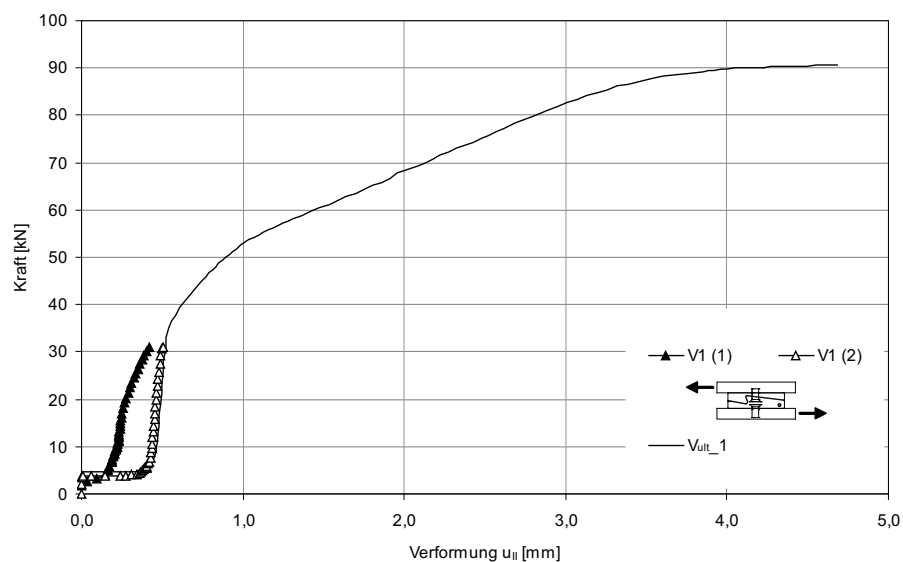


Abb. 7-20 Kraft-Verformung des Sperrstifts für PowerCon unter Schrägzug

Bei Belastungsbeginn muss ein Lochspiel von 0,5 mm abgebaut werden, ehe eine Kraftaufnahme über den Sperrstift erfolgen kann. Die Wiederholungsbelastung wurde im Bereich der elastischen Verformung bis 30 kN durchgeführt.

Die Scherfuge zwischen PowerCon(f) und (m) weist einen Abstand s von 2,7 mm auf. Nach Element 817 der DIN 18800-1 [25] führt dies zu einer zusätzlichen Momentenbelastung von 18% im Vergleich zu einer geschlossenen Scherfuge. Dadurch wird die Tragfähigkeit des Bolzens unter Zunahme der Verformung reduziert.

7.2.3 Bewertung der Ergebnisse

Die Formgebung des Verbindungsmittel PowerCon entwickelte sich hauptsächlich aus den Vorgaben des Montagekonzepts. Die Übertragung statischer Kräfte ist aus verschiedenen Gründen nicht optimal berücksichtigt:

1. Das große Spiel zwischen den beiden Verbinderhälften von 1-2,5 mm verhindert eine kraftschlüssige Wechselbeanspruchung in allen Krafrichtungen.
2. Infolge der 12 cm langen, kraftschlüssigen Verzahnung der beiden Verbinderhälften in geschlossenem Zustand weisen diese keinen definierten Lastübertragungsbereich auf.
3. Die Addition elastomerer Distanzelemente führt unter Last zu hohen Verformungen und Verdrehungen des Gesamtsystems. Dies hat Konsequenzen auf den Lastfluss innerhalb der Verbindung.
4. Die hohen lokalen Pressungen durch die Belastung führen schnell zu bleibenden Deformationen der Gummiringe bzw. zum Ausstanzen der Distanzplatten aufgrund lokaler Überbeanspruchung.

Die vorab zu treffende Festlegung auf eine bestimmte Distanzeinstellung ist nur durch einen zusätzlichen Messaufwand vor Ort praktikabel. Durch die Ausführung mit elastischen Distanzelementen ist sie jedoch nachgiebig und weniger fehleranfällig. Die nachträgliche Fugenverfüllung mit Mörtel gewährleistet auf diese Weise eine statische Verbindung der Bauteile. Bei Verzicht auf eine Verfüllung kann über die trockene Verbindung nur eine deutlich reduzierte Last übertragen werden.

Da PowerCons als Verbindungsmittel in großer Zahl in einem Bauwerk zum Einsatz kommen, ist deren effektive und Material sparende Konstruktion eine wirtschaftliche Notwendigkeit. Dies lässt sich durch eine Überarbeitung der Elemente nach ingenieurmäßigen Gesichtspunkten erreichen. In einem weiteren Schritt kann die Formgebung durch einen rechnerischen Optimierungsprozess unter definierten Belastungsszenarien verbessert werden.

Die experimentellen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die bestehenden PowerCon-Verbinder des System Munitec nicht für eine dauerhafte Anwendung als statisches Verbindungsmittel geeignet sind. Die grundsätzliche Verbindungssystematik des PowerCon wird jedoch in Kap. 8 adaptiert und unter der Berücksichtigung der Anforderungen einer justierbaren und Kraft übertragenden Verbindung als ein Schwerpunkt dieser Arbeit zu einem statisch wirksamen Verbindungsmittel weiterentwickelt.

7.3 Traglastversuche PowerClip

7.3.1 Versuchsprogramm

PowerClips werden als Verbindungsmittel in den horizontalen Wandfugen am Fuß- und Kopfpunkt eingesetzt. Abb. 7-21 zeigt die Abmessungen und den konstruktiven Aufbau des munitec-PowerClip.

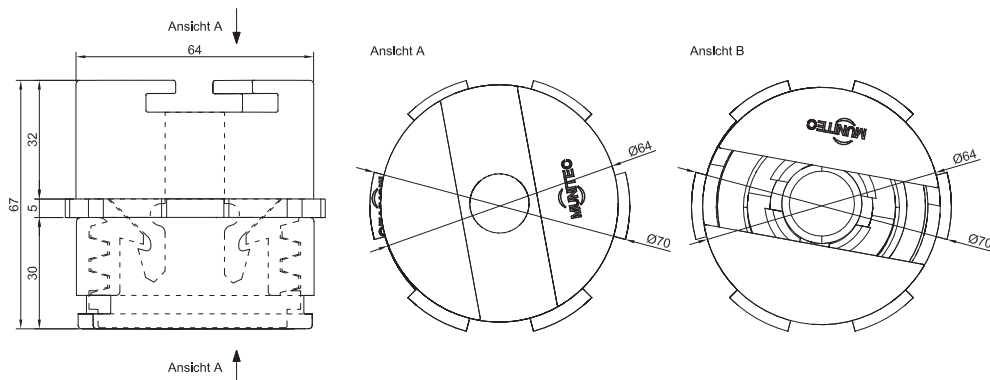


Abb. 7-21 Aufbau und Maße des Munitec-PowerClip

Der PowerClip (f) justiert während des Montagevorgangs die Lage des Wandelements um ± 7 mm in der Höhe und um bis zu $\pm 7,5$ mm zu jeder Seite. Die Höhenverstellung erfolgt durch das eingeschraubte Gewindeteil, das sich mittels eines Hakenschlüssels auch nach der Montage justieren lässt. Die horizontale Justierung erfolgt durch Verdrehung und Verschiebung des PowerClip (f) in der Betonaussparung. Die kraftschlüssige Verbindung in horizontaler Richtung entsteht erst durch den Verguss der Montageaussparung (vgl. Abb. 6-20; S. 84). Jedes Element der zweiteiligen Verbindung ist mit einem Bauteil verschraubt. Während des Montagevorgangs verrasten beide Hälften kraftschlüssig und unlösbar miteinander.



Abb. 7-22 PowerClip (f) mit Gewindeteil in Justierstellung 14mm, 7mm und 0mm sowie PowerClip (m) mit Rückverankerungsschraube

PowerClips werden gemäß Abb. 6-18 in den statisch am stärksten belasteten Fugen eingesetzt. In trocken konzipierten Fugen übernehmen diese Elemente vollständig sowohl die vertikalen Lasten als auch die Querkräfte aus horizontal angreifenden Lasten, die in konventionellen Konzepten über eine vermörtelte Fuge übertragen werden. Es wurden Versuche zur Ermittlung der Traglast und Last-Verformungskurven für drei verschiedene Justierzustände untersucht.

7.3.2 Versuchsergebnisse

7.3.2.1 Last-Verformung unter zentrischer Drucklast

7.3.2.1.1 Versuchsaufbau

Für diese Versuche wurde auf die Versuchskonstellation mit zwei Wegrastern wie in Abschnitt 7.2.2.1.1 beschrieben zurückgegriffen (Abb. 7-23). Mit Hilfe eines Ausgleichsgewichts wurde das hängende Anbauteil in den Gleichgewichtszustand gebracht, um eine gleichmäßige zentrische Belastung zu ermöglichen.

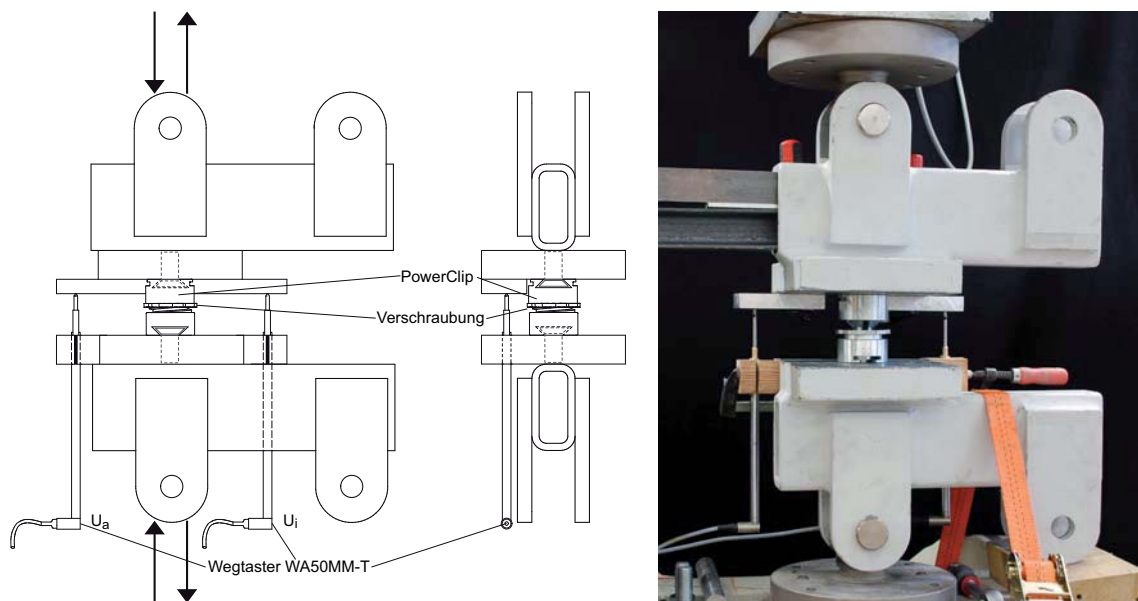
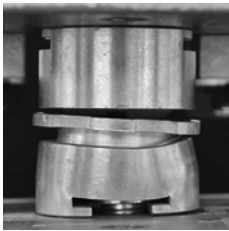
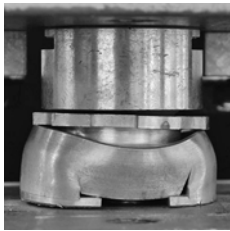


Abb. 7-23 Versuchsaufbau - PowerClip unter zentrischer Zug- und Drucklast

7.3.2.1.2 Ergebnisse Traglastversuche

In Vorversuchen wurde die Traglast der PowerClip-Verbinder für zwei verschiedene Justierzustände untersucht. Die Versuche wurden in der Justierstellung 7 mm und 14 mm als Vielfaches einer Ganghöhe von 7 mm durchgeführt. Die PowerClip-Verbindung in Justierstellung 7 mm versagte infolge eines Stabilitätsversagens des justierbaren PowerClip (f)-Elements bei 185,7 kN.

Tab. 7-3 Bruchlasten und Versagensbilder PwClip verschiedener Justierzustände

Bruchlast 7mm	Versagensbild	Bruchlast 14mm	Versagensbild
185,7 kN		223,4 kN	

Die Justierstellung 14 mm konnte bis zu einem Systemversagen infolge Zugversagen des Zugrings des PowerClip (f)-Elements belastet werden (beide Ergebnisse in Tab. 7-3). Die starke Streuung der Ergebnisse ist auf die hohe Empfindlichkeit des Versuchsaufbaus bezüglich der Schiefstellung des Versuchsadapters zurückzuführen.

Die Ermittlung von Kraft-Verformungslinien für die FE-Analyse erfolgte für die drei Justierstellungen 0 mm, 7 mm, und 14 mm. Abb. 7-24 zeigt, dass sich die verschiedenen Justierstellungen mit unterschiedlichen Anfangsverformungen bis ca. 20 kN bemerkbar machen. Mit weiter zunehmender Drucklast verläuft die Kraft-Verformungslinie aller drei Stellungen nahezu parallel. Die Steifigkeit der Verbindung ist unabhängig von der Justierstellung der PowerClips.

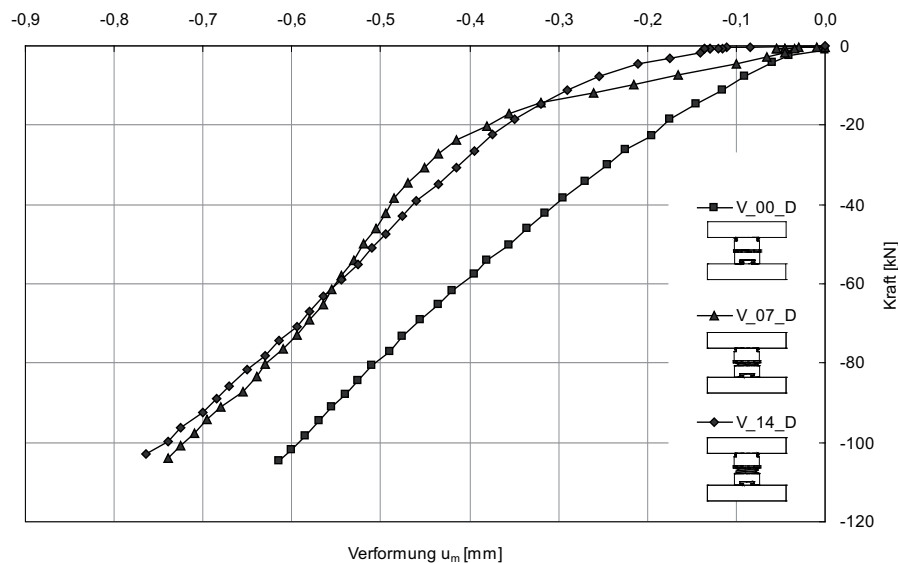


Abb. 7-24 Kraft-Verformungslinien unter Drucklast für PowerClips in verschiedenen Justierstellungen

7.3.2.1.3 Ergebnisse Montageversuche

Ein besonderer Nutzen des PowerClip besteht darin, ein bereits montiertes Element durch Drehen des Gewindeteils über einen Hakenschlüssel in der Höhenstellung zu justieren. Der eingebaute PowerClip wurde in einer Versuchsserie in Stufen von 5, 10, 20 und 30 kN kraftgesteuert durch den Prüfzylinder belastet. Tab. 7-4 gibt einen Überblick der erzielten Ergebnisse.

Tab. 7-4 Ergebnisübersicht der Montageuntersuchungen

Versuchslast	5 kN	10 kN	20 kN	30 kN
Drehbarkeit des Hakenschlüssels	leicht	leicht	schwer - Verlängerung des Hebelarms	schwer - Verlängerung des Hebelarms
Lagesicherheit PowerClip	dreht durch – Erhöhung des Reibbeiwerts durch Sandstreuung zwischen PowerClip und Adapter			

Die interne Reibung des Gewindes nimmt mit zunehmender Auflast stark zu. Für geringfügige Lasten bis 10 kN ist die Justierung mit dem Werkzeug (Hebelarm 60 cm) gut durchführbar. Das erforderliche Drehmoment war für hohe Lasten nur mit Hilfe eines wesentlich längeren Hebelarms (2 m) möglich. Die fehlende Torsionssichere Verankerung des PowerClip am Bauteil führt jedoch zu Verdrehungen der kompletten Verbindung. Erst die Zugabe von Sand zwischen Adapter und PowerClip erhöhte die Reibung und ermöglichte die Gewindeeinstellung.

7.3.3 Bewertung der Ergebnisse

PowerClips wurden zur Übertragung der statischen Kräfte einzelner Wandelemente während der Montagephase entwickelt. Die durchgeführten Versuche zeigen, dass PowerClips über ein weitaus höheres Tragvermögen verfügen. Ihr Einsatz als Verbindungsmittel in trockenen Fugen ist jedoch nicht ohne Weiterentwicklung möglich:

1. Der notwendige Kraftschluss zwischen Bauteil und PowerClip erfordert aufgrund des erforderlichen Spielraums zur Toleranzaufnahme einen Verguss der Aussparung.
2. Das Rastsystem muss für die Aufnahme großer Zug- und Querkräfte ausgelegt werden.
3. Die PowerClips müssen verdrehsicher auf dem Bauteil befestigt werden, um die Einstellbarkeit des Gewindeteils zu gewährleisten. Die freie Dreh- und Verschiebbarkeit für die Toleranzaufnahme muss jedoch weiterhin möglich sein.

Um als trockenes Verbindungssystem eingesetzt werden zu können, muss eine sichere innere Kraftübertragung über die Verrasterung und die sofortige kraftschlüssige Einleitung der Kräfte in das Bauteil sichergestellt werden.

Auch dieses Verbindungsmittel wird im Kap. 8 mit dem zentralen Verbindungsmechanismus adaptiert und zu einer dauerhaft tragfähigen Verbindung weiterentwickelt. Die bestehende Höhenjustierung wird um einen kraftschlüssigen Justiermechanismus in den zwei verbleibenden Raumrichtungen ergänzt, um den dauerhaften Lastübertrag über eine trocken ausgeführte Fuge auch ohne Verguss zu gewährleisten.

8 Verbindungselemente für trocken gefügte Betonbauteile

Die zentralen Forderungen an eine trockene Verbindung ergeben sich aus den Erläuterungen der vorangegangenen Kapitel. Tab. 8-1 fasst die Aspekte nochmals zusammen.

Tab. 8-1 Anforderungen an das Verbindungselement

Aspekt	Erläuterung
Kraftübertragung	Sofort kraftschlüssig ohne Mörtel; Übertragung aller auftretenden Kräfte durch die Verbindung
Toleranzen	einstellbar auf die auftretenden Toleranzen
Nachhaltigkeit	Montage sowie Demontage der Verbindung gut möglich Wiederverwendung der Verbindungselemente möglich
Prüfbarkeit	Kontrolle der Verbindungsfunktion möglich
Brandschutz	F90

Dübelverbindungen sind vor allem aus dem Holz- und Möbelbau bekannt. Das Verbindungsmittel überbrückt die Fuge zwischen zwei Bauteilen, und überträgt Querkräfte durch eine Scherbeanspruchung des Verbindungselements über Lochleibung in das angrenzende Bauteil. Stahl eignet sich aufgrund seiner ausgezeichneten Scherfestigkeit besonders gut als Werkstoff. Dieser Verbindungsart wird in der Bewertung verschiedener trockener Verbindungsmethoden in [6] eine sehr hohe Tragfähigkeit zugesprochen. Über eine Dübelverbindung lassen sich große punktuell wirkende Kräfte in das Bauteil einleiten.

8.1 Toleranzaufnahme durch Exzenterprinzip

Die zylindrischen Vertiefungen einer Dübelverbindung werden bereits werkmäßig durch den Einbau einer Stahldose in das Bauteil integriert. Die Dose ermöglicht die sehr genaue Passung des Dübels in die Aussparung und gewährleistet eine gleichmäßige Kraftübertragung auf den Beton. Diese erfolgt über Lochleibung bzw. über die Rückverankerung mit an der Dose angeschweißten Bewehrungsstäben.

Um die Toleranzen aus der Herstellung und der Montage aufnehmen zu können, wird der Dübel gemäß Abb. 8-1 mittig in zwei Hälften getrennt (1) und über eine mit der Exzentrizität e angeordneten Primärverbindung drehbar und kraftschlüssig miteinander gekoppelt (2). Durch die Verdrehung der oberen Scheibenhälfte um 180° ergibt sich deren Versatz um die doppelte Exzentrizität (3). Dreht man die untere Hälfte um 180° verdoppelt sich der Versatz auf das Vierfache der ursprünglichen Exzentrizität (4). Durch dieses Prinzip können Toleranzen der Größenordnung $\pm 2e$ ausgeglichen wer-

den, wobei e für den Versatz der Primärverbindung gegenüber der Mittelachse des Exzenterdübels steht. Somit erhält man für eine Exzentrizität von 5mm einen Toleranzbereich von $\pm 10\text{mm}$.

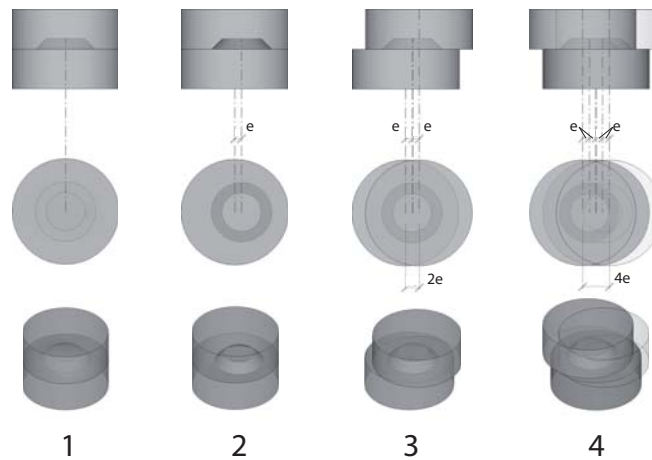


Abb. 8-1 Toleranzausgleich durch Exzenterprinzip

Mit Hilfe dieser Systematik ist der Dübel in jeder beliebig einstellbaren Position voll kraftschlüssig mit der einbetonierten Dose verbunden. Dieses Prinzip dient als Grundlage für die Toleranzeinstellung des in dieser Arbeit entwickelten, trockenen Verbindungssystems.

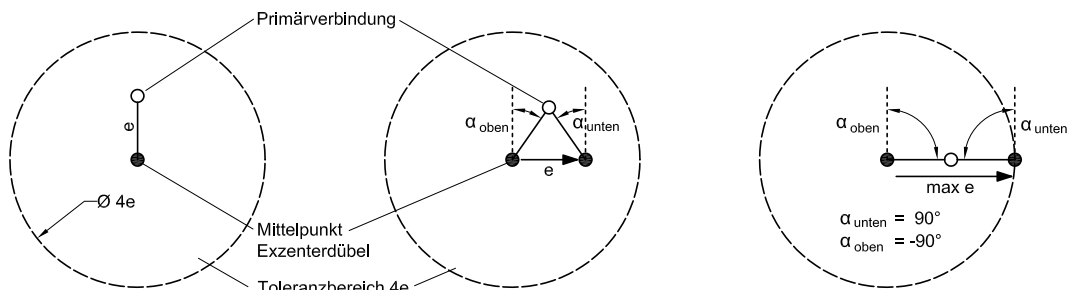


Abb. 8-2 Darstellung der Abhängigkeit von Verdrehung der Dübelhälften und der daraus resultierenden Verschiebung

Die Justierung erfolgt über ein Werkzeug, das über eine Nut die Verdrehung des Exzenterdübels von außen über die Fuge ermöglicht. Für eine geradlinige Verschiebung ist die gleichmäßige und gegensinnige Verdrehung beider Dübelhälften, wie in Abb. 8-2 dargestellt, erforderlich. Bei einer Verdrehung beider Dübel um 90° ergibt sich die maximal einstellbare Exzentrizität der Verbindung in einer Richtung.

Die Ausgleichsrichtung wirkt sich senkrecht zur Versatzrichtung der exzentrisch angeordneten Primärverbindung aus. Standardmäßig erfolgt der Einbau der Dübel mit der Exzenterichtung in Richtung der Wandachse des Bauteils. So sind ohne weitere Vorarbeiten Verschiebungen quer zur Wandebene möglich. Falls eine andere Ausgleichsrichtung erforderlich ist, sollte zuerst eine gleichsinnige Verdrehung der beiden Dübel-

hälften für die gewünschte Richtungseinstellung und danach die gegensinnige Verdrehung für eine Verschiebungsbewegung in die eingestellte Richtung erfolgen (Abb. 8-3).

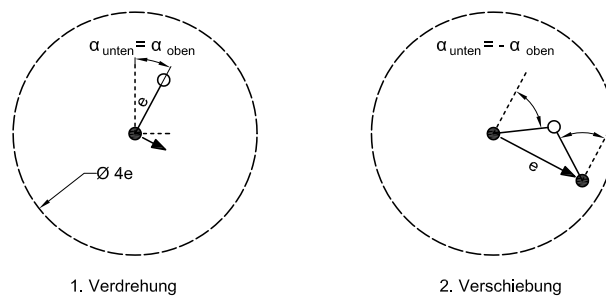


Abb. 8-3 freie Toleranzeinstellung durch eine kombinierte Verdrehung (1) und Verschiebung (2) der Dübel

Dadurch kann auch eine nachträgliche Justierung durchgeführt werden, solange die Fuge eine Mindestbreite einhält. Die angesetzte Höhe von 5mm (siehe Abschnitt 6.3) ist ebenfalls bedingt durch die Werkzeughöhe, um den Schlüssel durch die Fuge an den Dübel ansetzen zu können. Außerdem darf die Fuge noch nicht vollständig verschlossen sein, um den Zugang von außerhalb an das Einbauteil zu gewährleisten.

8.2 PowerClip-tr

Der Einbau der Stahldose erfolgt oberflächenbündig mit dem Bauteil, so dass bei der Herstellung keine Schalungsdurchbrüche notwendig sind. Die Rückverankerung der Verbindung wird fest mit der Dose verschraubt, damit die Anker während der Betonierarbeiten sicher positioniert bleiben. An der Öffnungsseite ist die Dose mit einem Deckel verschlossen, um eine Verschmutzung des Inneren durch Frischbeton und sonstige Verunreinigungen bis zur Montage der Verbindungselemente zu vermeiden. Über den Deckel erfolgt auch die Befestigung der Dose an der Schalungsinenseite (1).

Für die Montage des Verbindungssystems wird der Deckel abgenommen und die Fixierschrauben der Verankerung genutzt, um die Exzenterdübel zu befestigen (2). Dies erfolgt frühestens nach dem Ausschalen des Fertigteils. Es empfiehlt sich mit einer Schutzkappe die Verbindungselemente anschließend wieder zu kapseln, um diese bis unmittelbar vor der Montage vor Umwelteinwirkungen und Stößen zu schützen. Diese Kappen können bei ausreichend robuster Ausführung ebenfalls als Fußpunkte bei der stehenden Lagerung der Fertigteilelemente genutzt werden.

Sowohl der Dorn als auch das Gewindeteil sind mit einer Exzentrizität in den Dübel integriert, um auch in horizontaler Richtung eine Justierung gemäß Abschnitt 8.1 vornehmen zu können (3). Die Höhenjustierung erfolgt über das vom Powerclip (System Munitec) bekannte Gewindeteil (4). In dieses fährt bei der Montage der zylindrische Dorn des Gegenstücks ein. Sprengringe sorgen für ein sicheres Einrasten der Verbindung, damit auch Zugkräfte übertragen werden können.

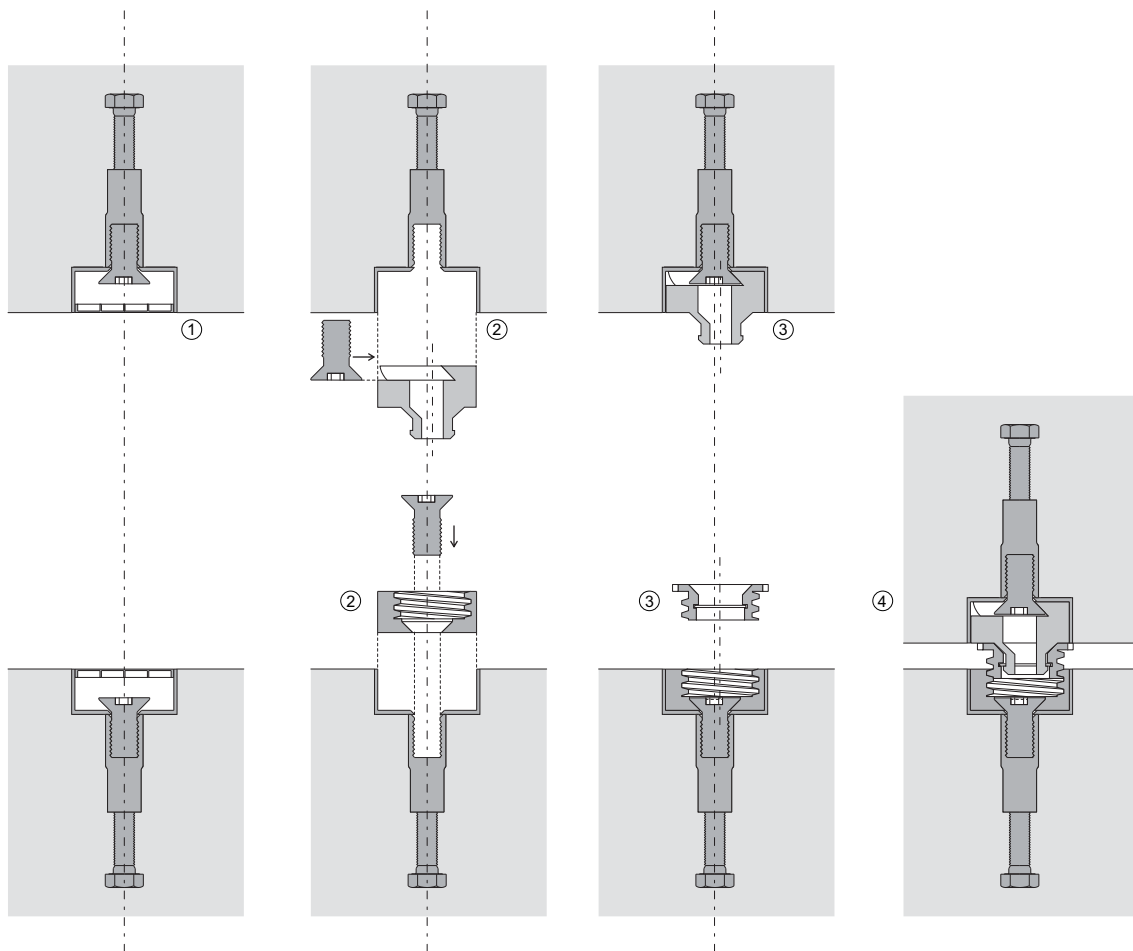


Abb. 8-4 Montagesequenz eines PowerClip-tr

Die Verbindungsausführung erlaubt sowohl die Übertragung hoher Schubkräfte als auch zentrischer Zug- und Druckkräfte und eignet sich daher besonders zum Einsatz in den horizontalen Fugen zwischen Wand und Boden- bzw. Deckenplatten. Die Beton-elemente werden über diese Verbindung gelenkig miteinander verbunden. Die resultierende Betonpressung infolge zentrischer Druckkräfte kann durch eine Vergrößerung der Einbaudose beeinflusst werden. Die Exzentrizität bewegt sich je nach Genauigkeitsanforderung des Bauteils zwischen 5-10 mm. Das entspricht einer Toleranzspanne von $\pm 10 - \pm 20$ mm.

Für den Montageprozess ergibt sich durch das Excenter-Prinzip ein weiterer Vorteil. Der Versatz der Drehachse des Gewindeteils zur Drehachse des Dübelelements hat bei der Höhenjustierung mit dem Werkzeug eine Arretierwirkung ähnlich der eines gehaltenen Hebels zur Folge. Infolgedessen kann sich während des Justiervorgangs nur das Gewindeteil und nicht der Exzenterdübel drehen. Damit ist die Voraussetzung für eine zuverlässige Höheneinstellung nach diesem Prinzip gegeben.

Die konstruktive Umsetzung erfolgte in Zusammenarbeit mit der Firma Munitec. Abb. 8-5 zeigt den neu entwickelten ersten Prototypen eines PowerClip-tr.

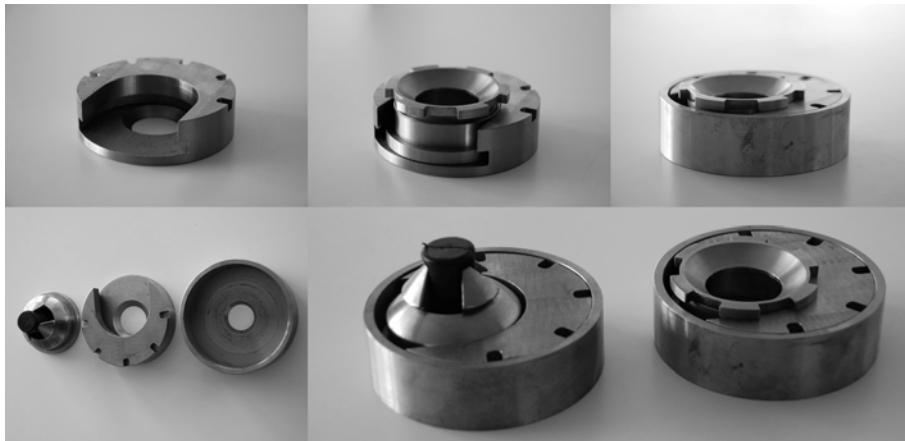


Abb. 8-5 PowerClip-tr (m) und (f) mit Exzenterdübel und Einbaudose

8.3 PowerCon-tr

Die Vorgehensweise beim Einbau des Verbinders deckt sich weitgehend mit dem beim Einbau des PowerClips beschriebenen Vorgehen. Die Art der Rückverankerung der Dose im Bauteil kann je nach Bemessungslast variiert werden. Der Anschluss erfolgt über die zentrisch angeordnete Senkkopfschraube. Die Übertragung der Zugkraft erfolgt über ein Einbauteil oder eine Gewindehülse mit Bewehrung, an die der Exzenterdübel mit einer Senkkopfschraube angeschlossen wird. Die Querkraft wird über Lochleibung direkt in den Beton eingeleitet. Diese Krafteinleitung kann über eine am Dosenboden angeschweißte Bewehrung in Vorzugsrichtung verstärkt werden.

Die Herstellung der Verbindung erfolgt ebenfalls nach der Systematik des schräg geführten Einschlebens nach der Einschubsystematik des PowerCons. Um eine definierte Kraftübertragung zu generieren, kommt der Kraftschluss zwischen Dorn und Kralle definiert am Ende des Einschubvorgangs zustande. Während dieses Vorgangs gewährleistet die Kralle jedoch über den Dorn die notwendige Führung der Bauteile, um eine schadfreie Fügung der Medienverbinder sicherzustellen.

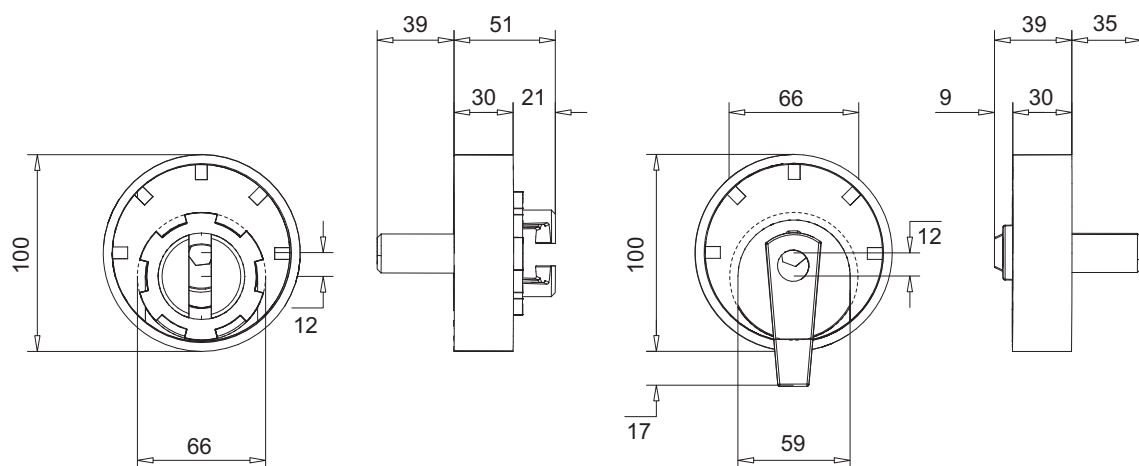


Abb. 8-6 Aufbau und Maße des PowerCon-tr

Durch einen Adapter für das Gewindeteil wird die Drehbarkeit der Kralle unabhängig von der Dübelstellung ermöglicht. Der Dorn ist ebenfalls drehbar mit dem Exzenterdübel verbunden. Während des Einschubvorgangs wird diese Drehung über eine Rastung gesperrt und erst mit dem Schließen der Verbindung gelöst, da bei diesem Vorgang die seitliche Fixierung durch den Dorn notwendig ist. Die unabhängige gegenseitige Verdrehung der Exzenterdübel kann erst mit der Rotationsfreiheit der Primärverbindung (Dorn und Kralle) erfolgen. Diesen Freiheitsgrad beinhaltet der PowerClip bereits aufgrund der rotationssymmetrischen Ausbildung der Primärverbindung.

Mit dem vollständigen Einfahren des Dorns in die Kralle verrasten beide Teile durch einen Sperrbolzen, der durch einen vorgespannten Federmechanismus in die Aussparung des Zentrierdorns gedrückt wird. Das zuverlässige Einrasten dieses Bolzens ist durch die Fuge über einen seitlichen Schlitz in der Kralle kontrollierbar. Über diesen Schlitz erfolgt auch das Lösen der Sperre im Zuge der Demontage des Gebäudes.

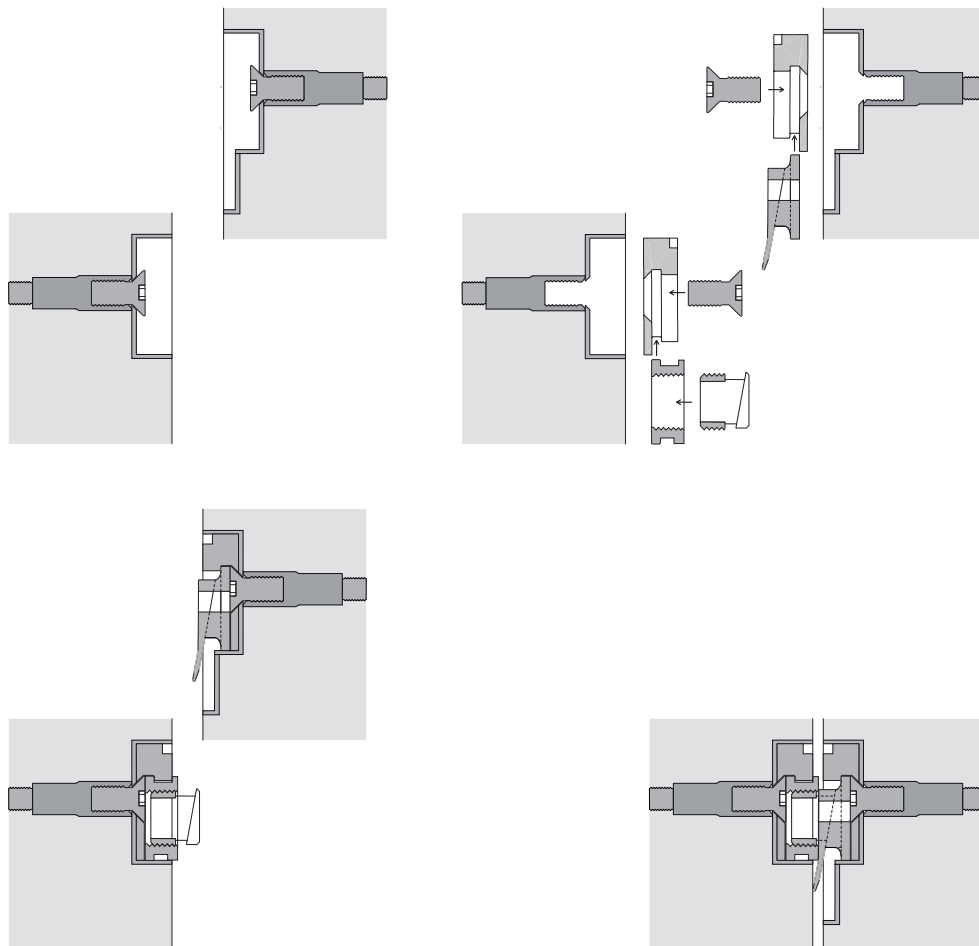


Abb. 8-7 Montagesequenz eines PowerCon-tr

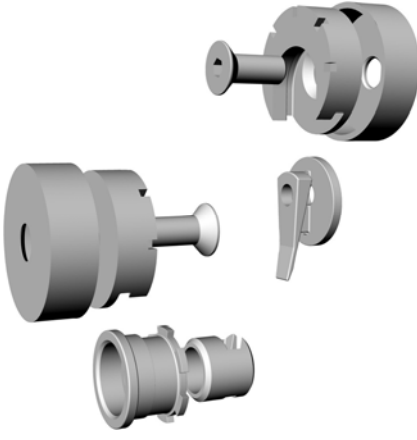
Zur Gewährleistung des Korrosionsschutzes sind alle Verbindungselemente voll verzinkt oder aus nicht rostendem Stahl hergestellt. Die Verbindung ist jeweils an der Stirnseite eines Betonelements platziert so dass sie nach der Montage nur noch in der Fuge sichtbar ist. Durch den Fugenabschluss mit einer Brandschutzschnur wird eine ausreichende Feuerwiderstandsdauer der Verbindung erreicht. Die Brandschutzschnur

kann gleichzeitig als Hinterfüllmaterial zur Herstellung einer dauerelastisch gedichteten Fuge für den optisch sauberen Fugenabschluss dienen.

8.4 Modularer Aufbau des Verbindungssystem

Bei der Entwicklung des Systems wurde ein weitgehend modularer Aufbau der Komponenten zugrunde gelegt. Tab. 8-2 zeigt die Komponenten und deren Einsatzfelder. Sowohl die Einbaudosen als auch die Exzenterdübel mit Einschuböffnung stellen mehrfach verwendbare Basiselemente dar. Da die Dosen die gleichen Abmessungen haben, können die Deckel und Transportabdeckungen für beide Verbindungen genutzt werden. Die weiteren Bauteile dienen der Erfüllung spezieller Randbedingungen, und können deshalb nur an bestimmter Stelle verwendet werden. Insgesamt umfasst das gesamte Verbindungssystem acht verschiedene Hauptbaugruppen, die bis auf zwei Ausnahmen aus jeweils einem Bauteil bestehen. Der PowerCon-tr ist aufgrund der größeren Anzahl zu erfüllender Freiheitsgrade das komplexere Verbindungselement. Vollständig ausgeführt umfasst die Verbindung 10 Bauteile. Eine PowerClip-tr Verbindung kommt hingegen mit 5 Bauteilen aus.

Tab. 8-2 Übersicht über die Verbindungskomponenten und deren Mehrfachverwendung

Explosion PowerCon-tr	Element	PwClip f	PwClip m	PwCon f	PwCon m
	Einbaudose	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Exzenterdübel mit Einschub			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Exzenterdübel (Gewinde)	<input checked="" type="checkbox"/>			
	Exzenterdübel mit Dorn		<input checked="" type="checkbox"/>		
	Gewindeteil (Innengewinde)			<input checked="" type="checkbox"/>	
	Gewindeteil (Außengewinde)	<input checked="" type="checkbox"/>			
	Kralle mit Außengewinde +vorgespannter Sperrstift			<input checked="" type="checkbox"/>	
	Dorn auf Drehplatte +Arretierung				<input checked="" type="checkbox"/>

8.5 Zusammenfassung

Die vorgestellte Entwicklung für ein statisch aktives Verbindungssystem stellt einen qualitativen Lösungsvorschlag dar, um die aufgestellten Randbedingungen an ein trockenes Verbindungssystem zu erfüllen. Nur durch weiterführende Entwicklungsarbeit kann das Verbindungselement bis zur Anwendungsreife gebracht werden. Ziel ist ein materialeffizient dimensioniertes Bauteil, da es in großen Stückzahlen zur Anwendung kommen wird. Diese Schritte sprengen den Rahmen dieser Arbeit und müssen in nachfolgenden Entwicklungsarbeiten in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner durchgeführt werden.

Die numerische Simulation eines Gebäudes, das unter Verwendung dieser Verbindungselemente konstruiert wurde, kann die statischen Randbedingungen für eine weiterführende Entwicklung liefern.

9 FE-Simulation des Tragverhaltens

Mit Hilfe der FE-Simulation wird das Tragverhalten eines aus Betonelementen bestehenden Versuchsgebäudes untersucht, welches im Rahmen des BMBF-Forschungsprojekts „HOMES (24)“ geplant wurde. Die Simulation liefert einen Beitrag zu der Frage, in welcher Größenordnung punktuell eingesetzte Verbindungsmittel in derartig konzipierten Tragwerken Lasten zu übertragen haben. Die Ergebnisse dienen als Entwicklungszielvorgabe.

9.1 Aufbau der Berechnungsserien

Wie in Tab. 9-1 dargestellt, wurden Modellserien aufgebaut, die sich in der Art des wirksamen Tragverhaltens unterscheiden.

Serie 1 dient ausschließlich der Modellentwicklung und weist aufgrund der Anwendung von Balkenelemente einen sehr starken Vereinfachungsgrad auf. Diese Serie wird nicht in die Auswertungen mit einbezogen.

Serie 2 simuliert das Tragverhalten des geplanten Forschungsgebäudes. Der Lastabtrag erfolgt nach einem hybriden Konzept mit vermörtelten Fugen und punktuell eingesetzten Verbindungsmitteln. PowerCons werden zur Verbindung von Wandelementen über die Vertikalfugen sowie zur Verbindung der Deckenscheiben untereinander eingesetzt. PowerClips kommen in der Fuge unterhalb der Dachfläche als Justierelemente in Kombination mit einem Mörtelbett zum Einsatz, welches die Lastabtragende Funktion übernimmt. Die verschiedenen Steifigkeitskombinationen auf Basis der experimentellen Ergebnisse aus Kap. 7 aufgrund der Berücksichtigung von Distanzelementen führen zu einer Unterscheidung in vier Fälle (S21-S24). Bei den verwendeten Verbindungsmitteln handelt es sich um das Original Munitec-System.

Serie 3 simuliert ein Betontragwerk mit vollständig trockener Verbindungsausführung. Alle auftretenden Kräfte werden über Verbindungselemente des Typs PowerClip-tr und PowerCon-tr übertragen. Für die Übertragung der Kräfte in S30 werden unterschiedliche Kraft-Verformungslinien der Federelemente in Achs- und Querrichtung zur Abschätzung des noch unbekanntes Schlupfverhaltens der Verbindung angesetzt. Die Serie S31 untersucht die Robustheit des Systems bei vollständigem Ausfall tragender Elemente. Die Randbedingungen werden im weiteren Verlauf genauer beschrieben.

Tab. 9-1 Übersicht der Modellserien für die Simulationsberechnung

Serie	Kraftübertragung in der Fuge			Modellierung		Modelle	
	vertikal	horizontal Dach	horizontal sonstige	PwCon	PwCli	unverformt uv	vorverformt vv
S1	PwCon	PwCli	Mörtelfuge	3D Balken	3D Balken	ja	ja
S21 – 24	PwCon	PwCli	Mörtelfuge	Federelement	Federelement	ja	ja
S30 – 31	PwCon-tr	PwCli-tr	PwCli-tr	Federelement	Federelement	ja	ja

Für alle Serien wurde eine Vorverformung der Betonbauteile nach DIN 1045-1 [24] berücksichtigt. Aufgrund der verwendeten Kontakttechnologie und der nichtlinearen Federelemente wurden alle Berechnungen nichtlinear durchgeführt.

9.2 Modellaufbau

9.2.1 Allgemeines

Das Objekt wurde in CoCreate und AutoCAD 2008 als Volumen- und als Flächenmodell entwickelt. Der Import der Geometrie erfolgte über eine Schnittstelle im Dateiformat .sat in das kommerzielle Finite-Elemente-Programm ANSYS® Mechanical APDL 12.0 [55]. Der nachfolgende Aufbau des FE-Modells auf Basis der Geometrie wurde durch Makros gesteuert. Die aus dem CAD exportierten Koordinaten der Verbinder wurden in Datenfelder eingelesen und dienten während des Modellaufbaus der logischen Verknüpfung der geometrischen und FE-spezifischen Informationen.

Die Scheiben und Platten des FE-Modells interagieren ausschließlich über Kontaktelemente und nichtlineare Federn. Die Modellierung des Modells mit Schalenelementen, wurde durch die zu berücksichtigende Momenten-Rotationskapazität der Power-Cons bestimmt. Dieser Freiheitsgrad steht für Schalenelemente zur Verfügung. Mit den Kontaktelementen wurde die Mörtelfuge modelliert. Diese übertragen Druck- und Reibungs- jedoch keine Zugkräfte. Abb. 9-1 zeigt eine Gegenüberstellung des Versuchsgebäudes als CAD- und als FE-Modells.

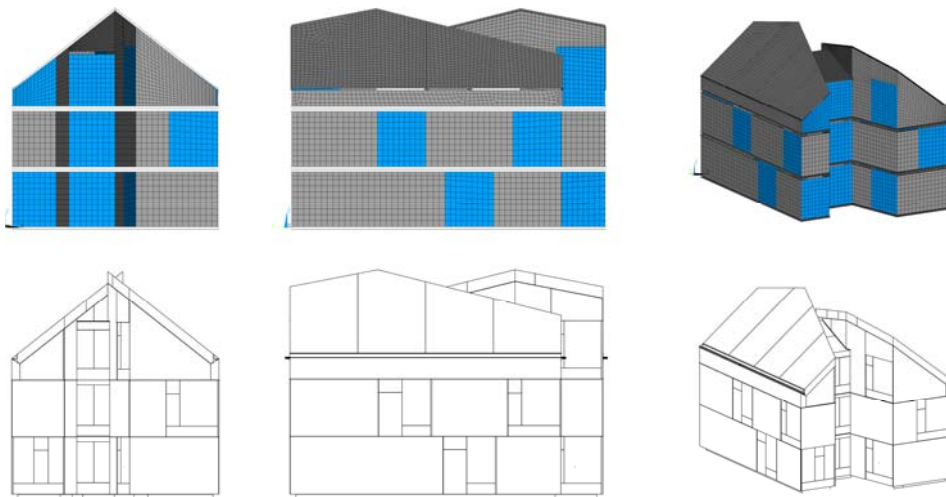


Abb. 9-1 Versuchsgebäude HOMES (24) Gegenüberstellung von FE- und CAD-Modell

Das zweistöckige Gebäude mit Dachgeschoß besteht aus zwei identischen Baukörpern, die um 180° gegeneinander verdreht und versetzt über einen innen liegenden Kern miteinander gekoppelt werden. Ausführliche Planunterlagen zum Gebäude finden sich im Anhang ab Seite 167. An dieser Stelle sollen nur einige Eckdaten des Gebäudes umreißen. Die Grundrissfläche erstreckt sich auf 13,3m · 9,3m. Die Firsthöhe des Gebäudes beträgt 10,1m. Die Traufhöhe liegt bei 6,2m. Die vollflächigen Wandelemente (grau) werden durch eine raumhohe Verglasung (blau) unterteilt. Die verwendeten Ma-

terialien und deren Eigenschaften sind in Tab. 9-2 zusammengestellt. Das Sandwich-element des Daches wird nur mit der Dicke der Tragschale in Ansatz gebracht, um die Bauteilsteifigkeit nicht zu überschätzen. Um das Bauteilgewicht dennoch korrekt erfassen zu können, wird eine bezogene Dichte angesetzt. Die reale Dichte der Dachelemente liegt im Durchschnitt bei 1425 kg/m^3 . Die Fensterflächen werden mit ihrem Eigengewicht und ihrer Lastangriffsfläche in der Berechnung berücksichtigt, haben aber keinerlei tragende Funktion.

Tab. 9-2 Materialparameter der Bauteile

Bauteil	Material	Dichte [kg/m^3]	E-Modul [N/mm^2]	Querdehnzahl ν
Bodenplatte Deckenplatten	Normalbeton C20/25	2500	29000	0,2
Sandwich Dachelement	Normalbeton C20/25 xella multipor	4890	29000	0,2
Außenwand	Leichtbeton	600	3000	0,2

9.2.2 Lastannahmen

Für die Berechnung der Schnittkräfte wurden Lastannahmen nach DIN 1055 getroffen. Berücksichtigt wurden Eigengewicht, Temperatur, Verkehrslasten, Schnee- und Windlasten, sowie deren Kombinationen. Zusätzlich wurde aufgrund des gewählten Standorts für das Versuchsgebäude in Erdbebenzone 1 eine Horizontalbeschleunigung angesetzt. Eine Übersicht der Einzelannahmen findet sich in Anhang Lastannahmen.

Tab. 9-3 Übersicht der angesetzten faktorisierten Lastfallkombinationen

Num LK	LK	EG	Temp	P_1	P_2	P_3	W_0	W_{90}	S	EQ_{0-150}
100	EG	1,35								
101	EG+Temp	1,35	1,0							
111	EG+ P_1	1,35		1,5						
112	EG+ P_2	1,35			1,5					
113	EG+ P_3	1,35				1,5				
121	EG+ W_0	1,35					1,5			
122	EG+ W_{90}	1,35						1,5		
123	EG+ W_0 +S	1,35					1,5		0,9	
124	EG+ W_{90} +S	1,35					1,5		0,9	
125	EG+ W_{90} +S ¹	1,35					1,5		0,9	
131	EG+S	1,35							1,5	
141-146	EG+ EQ_0	1,0								1,0

¹einseitige Schneelast auf einer Dachhälfte (125)

Tab. 9-3 gibt eine Übersicht der angesetzten Lastfallkombinationen. Die Erdbebebelastung wurde in 6 verschiedenen Lastfällen untersucht. Diese unterscheiden sich durch die Angriffsrichtung der Horizontalbeschleunigung. Um ein möglichst vollständiges Antwortspektrum des Gebäudes zu erhalten, wurde die horizontale Belastung mit einer Schrittweite von 30° in einem Winkel von $0-150^\circ$ angesetzt.

9.2.3 Vorverformung

Für die Simulation des Gesamttragverhaltens wurden die Imperfektionen von Tragwerkselementen für die Berechnung nach Theorie II. Ordnung berücksichtigt. Die mit einer Modalanalyse bestimmten Eigenformen der einzelnen Elemente sind auf eine maximale Schiefstellung von $1/200$ gemäß DIN 1045-1 [24] skaliert worden.

9.3 FE-Simulation des hybriden Tragverhaltens – Serie 2

9.3.1 Modellierung der Verbindungsmittel

9.3.1.1 PowerCon

Für den Bau des Versuchsgebäudes wurde die Anwendung von PowerCon und PowerClip des Systems Munitec geplant. Die Wandelemente werden über PowerClips justiert. Der statische Verbund kommt über eine vermörtelte Fuge zustande. Für die vertikalen Fugen wurde eine Verbindung ausschließlich über die PowerCon-Verbinder vorgesehen, da sie statisch nur von untergeordneter Bedeutung sind. Statisch relevant hingegen ist die PowerCon-Verbindung in den horizontalen Fugen zwischen den Deckenplatten eingesetzt. Diese Untersuchung basiert auf einer möglichst wirklichkeitsgetreuen Nachbildung des Tragverhaltens. Der Einsatz von vermörtelten Fugen stellt einen Widerspruch mit dem erklärten Ziel der Arbeit dar, ist jedoch als Komponente zur Lastabtragung erforderlich, um das System Munitec in seiner Originalkonfiguration einsetzen zu können.

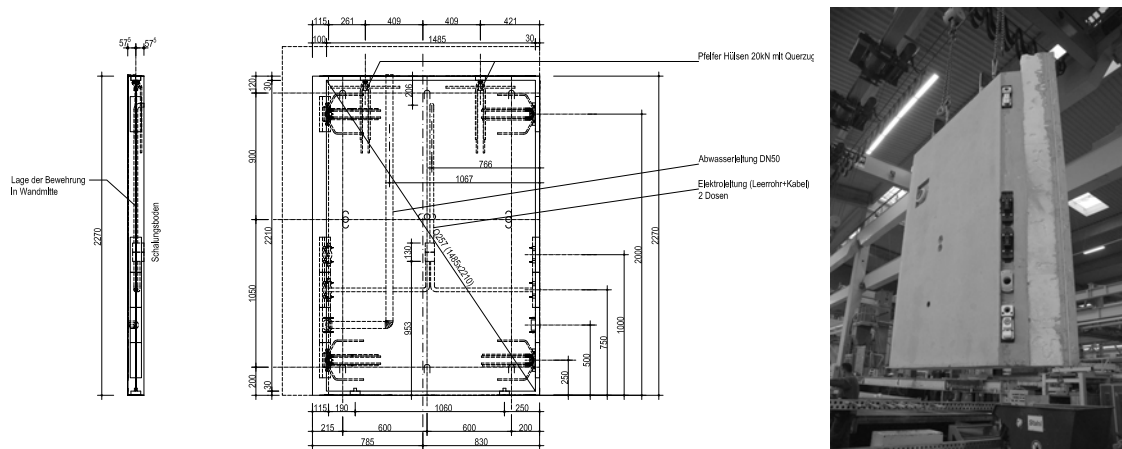


Abb. 9-2 Integriertes Wandbauteil mit PowerCon und Medienverbinder in den seitlichen Fugen

Abb. 9-2 zeigt die Planung und eine fertig gestelltes, integriertes Wandbauteil. Die Verbinder des Typs PowerCon sind für die Verbindung der Wände untereinander jeweils am untersten und am obersten Einbauplatz in der vertikalen Fuge platziert. Dadurch wird eine einwandfreie Führung des Wandbauteils während der Montage garantiert. Auch dem Kippen oder Wegrutschen der Wand wird dadurch optimal entgegen gewirkt. Es besteht jedoch die Gefahr des Schüsseln oder Beulen der Wand, da in der Mitte keine weitere Stabilisierung mehr stattfindet.

In Kap. 7 wurden Belastungsversuche durchgeführt, die der Ermittlung von Last-Verformungskurven dienen. Mit Hilfe nichtlinearer Federelemente des Typs COMBIN 39 kann dieses Verhalten in ein FE-Modell implementiert werden. Die in den Versuchen ermittelte Messkurve wird mit Hilfe von drei linearen Abschnitten je Belastungsrichtung in ihrem wesentlichen Verlauf erfasst. Abb. 9-3 zeigt eine Zusammenstellung der reduzierten Kurvenverläufe von zentrisch belasteten PowerCons in Druck- und Zugrichtung. In Druckrichtung treten durch die Konstellation von 0-1-2 Distanzelementen drei verschiedene Kraft-Verformungslinien auf. Die Kurvenverläufe in Zugrichtung werden durch die Anzahl und Lage der eingebauten O-Ringe bestimmt. Da die konstruktiven Bedingungen, die zu den verschiedenen Kraft-Verformungslinien führen, in Zug- und Druckrichtung voneinander unabhängig sind, können beliebige Kombinationen der Äste gebildet werden. Dadurch ergeben sich 12 Kombinationsmöglichkeiten für Kraft-Verformungskurven.

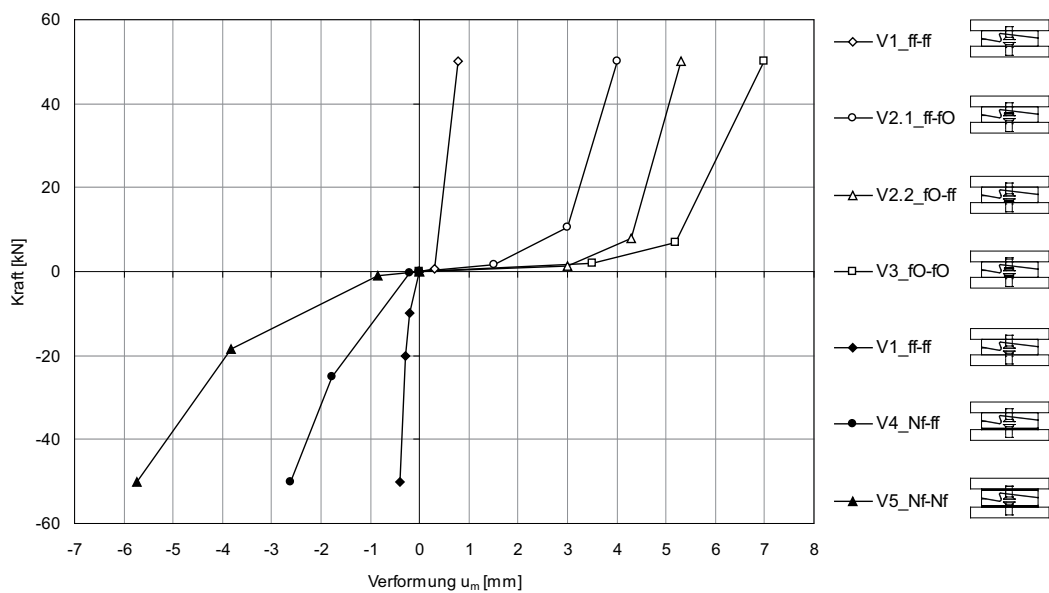


Abb. 9-3 Idealisierte Kraft-Verformungslinien für nichtlineare Federn im FE-Programm

Der Toleranzausgleich in der Fuge wird über die Anzahl der eingelegten Distanzplatten eingestellt. Im Fall einer rein zufälligen Verteilung liegen das Istmaß und das Zielmaß μ häufig eng zusammen ($|\Delta L| < \pm\sigma$). Das Zielmaß entspricht dem Nennmaß des Bauteils zuzüglich der Stärke einer Distanzplatte. Mit wesentlich geringerer Häufigkeit tritt ein deutliches Über- oder Untermass der Fuge auf ($|\Delta L| > \pm\sigma$). In diesem Fall muss die Distanzplatte entfernt, oder eine zweite Platte ergänzt werden. Diese Maßnahmen wirken sich jedoch auf die Steifigkeit der Verbindung aus. Der Toleranzausgleich kann

durch mitgelieferte Distanzplatten in den drei Schrittweiten 0 mm – 5 mm – 10 mm variiert werden. Zwischengrößen interpolieren sich durch die Pressung der Elastomerplatten.

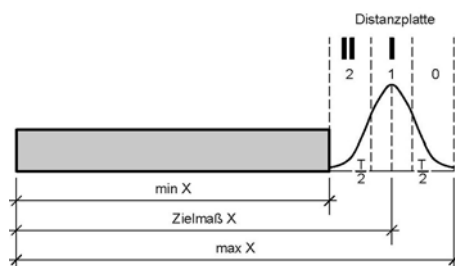


Abb. 9-4 Toleranzausgleich in der Fuge - dreistufiges System durch Distanzplatten

Diesem Effekt wurde mit einer stochastischen Modellierung Rechnung getragen. Darunter ist zu verstehen, dass die Steifigkeitsmodelle der Federelemente gemäß ihrer Auftrittswahrscheinlichkeit mit Hilfe eines Zufallgenerators im Modell platziert wurden. Die Aufteilung des Toleranzbereichs gemäß der dreistufigen Einstellmöglichkeit (Abb. 9-4) ergibt eine Häufigkeitsverteilung für keine und 2 Distanzplatten von je 15,85% und entspricht der Istmaß-Auftrittswahrscheinlichkeit eines Elements das länger bzw. kürzer ist als die einfache Standardabweichung σ . Der Bereich um den Mittelwert tritt mit einer Häufigkeit von 68,3% auf. Diese Verteilungen konnten mit vereinzelt Abweichungen bis zu +10% zugunsten der Randzone umgesetzt werden. Um den Einfluss der zufälligen Verteilung der Distanzelemente über die Simulation erfassen zu können, wurde die statistisch erforderliche Mindestanzahl von drei zufällig modellierten Systemen berechnet (z.B. S21-1, S21-2 und S21-3). Dadurch kann auch eine Aussage zu der auftretenden Ergebnisstreuung getroffen werden. Die Zuordnung der Kraft-Verformungslinien zu den Modellvarianten der Serie 2 kann der Tab. 9-4 entnommen werden.

Tab. 9-4 Zuordnung der experimentellen Kraft-Verformungslinien zu den Modellvarianten der Serie 2

	S21-			S22-			S23-			S24-		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
PwCon Zug	V1	V1	V1	V2.1	V2.1	V2.1	V2.2	V2.2	V2.2	V3	V3	V3
PwCon Druck	V1	V4	V5	V1	V4	V5	V1	V4	V5	V1	V4	V5

Zur Modellierung des Kraft-Verformungsverhaltens in Einschubrichtung des PowerCons wurde die ermittelte Kraft-Verformungslinie gemäß Abschnitt 7.2.2.4 zugrunde gelegt. Die übrigen Querrichtungen wurden durch einen Ergänzungsversuch gemäß des Versuchsaufbaus in 7.2.2.4.1 ermittelt. Im Übergang zwischen Druck- und Zugast wurde ein Lochspiel von 2mm berücksichtigt. Diese vereinfachte Konstellation ermöglicht die Abschätzung der auftretenden Lasten zur sicheren Seite, da die Versuchsdaten auf einer steifen Modellkonfiguration beruhen.

9.3.1.2 PowerClip

Die PowerClips dienen als Fußpunkte dem Höhentoleranzausgleich von Bauteilen in der horizontalen Fuge. In dieser Versuchsserie kommen PowerClips ausschließlich in der Fuge zwischen der Dachgeschoßwand und den Dachplatten tragend zum Einsatz. Die in Abschnitt 7.3 ermittelten Messkurven werden mit linearen Segmenten in ihrem Verlauf idealisiert (Abb. 9-5). Da in Zugrichtung keine Versuchsdaten verfügbar sind, wurde dieser Ast mit einem Schlupf von 0,3mm und einer dem Druck-Ast angepassten Last-Verformung angenommen.

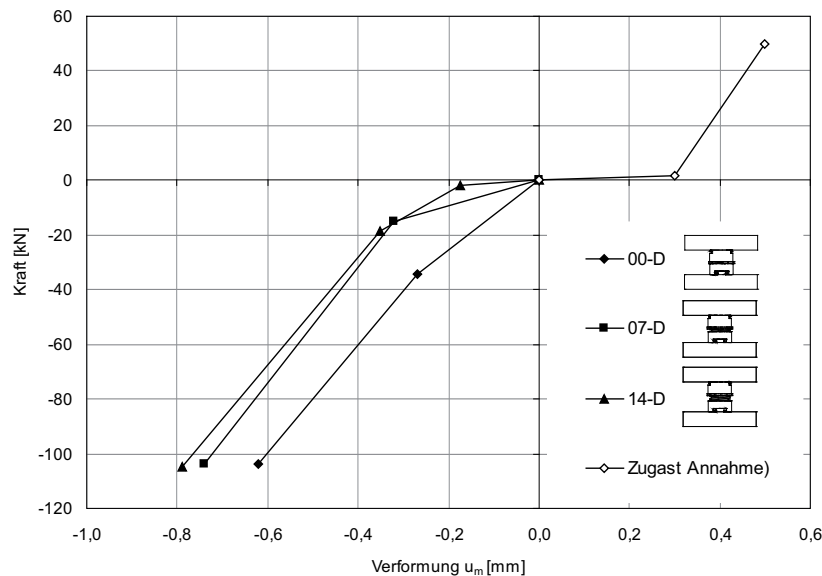


Abb. 9-5 Idealisierte Kraft-Verformungslinien für die FE-Modellierung der PowerClips

In Querrichtung wird ebenfalls eine hohe Steifigkeit ohne Berücksichtigung von Schlupf angesetzt, um eine Beteiligung der Verbinder am Gesamtlastabtrag in dieser Fuge rechnerisch nicht zu unterschätzen.

9.3.1.3 Vermörtelte Fugen

Das Tragverhalten der Mörtelfugen wird mit Hilfe der Kontaktelementtechnologie vom Typ „surface to surface“ abgebildet. Bei dieser Modellierungsart wird eine mechanische Interaktion zwischen zwei Knoten in Abhängigkeit ihres Abstands voneinander definiert. Vor dem Berechnungsstart werden die Kontaktflächen aufeinander justiert und geschlossen. Damit ist die volle Kraftübertragung über die Fuge gewährleistet. Die aufnehmbare Schubkraft steht über den Haftreibungsbeiwert mit der Auflast in Abhängigkeit. Während der Berechnung ergeben sich aufgrund der Steifigkeit der Wandbauteile unterschiedlich belastete Fugenbereiche (Abb. 9-6). Dort, wo sich Knoten voneinander entfernen, entstehen klaffende Fugen, die für den Lastabtrag rechnerisch nicht mehr berücksichtigt werden. Kontaktelemente können nur Druck- und Schub- aber keine Zugkräfte übertragen. Bei dem vorliegenden Platte-Wand-Kontakt stößt immer eine Elementkante auf eine Elementfläche. Um die Auflagerfläche realistisch abbilden zu können, wurden die Wandelemente am Fuß- und Kopf mit einer ideal biegesteif angeschlossenen, T-förmigen Auflagerfläche in der Breite der Mörtelfuge versehen. Die mit

Kontaktelementen belegte Fläche steht jeweils mit den „Target“-Elementen der benachbarten Platte in Interaktion.

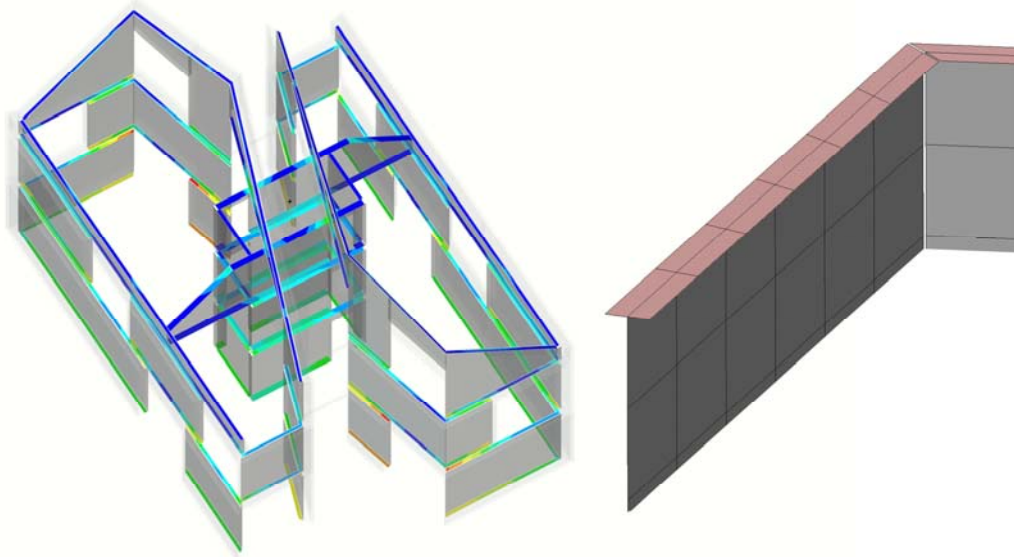


Abb. 9-6 Spannungsverteilung in den Mörtelfugen ermittelt über Kontaktelemente (rot)

9.3.2 Auswertung der Lastfälle 100-131

9.3.2.1 Maximale Schnittkräfte

Bei der Auswertung interessieren vor allem die durch den PowerClip und PowerCon zu übertragenden Axial- und Querkräfte. Die Vorversuche haben gezeigt, dass die Wandrotation so gering ist, dass sich keinerlei Aufnahme eines Moments über die Verbinder ergibt. Dieser Effekt kommt erst bei größeren Verdrehungen zum Tragen, und ist für die Berechnung des Tragwerks ohne Relevanz. Die Verbindung wird daher ohne Rotationsfedersteifigkeit als ideal gelenkig modelliert. Bei der senkrecht zur Fugenfläche wirkenden Axialkraft N (F_x) wird bei der Auswertung eine Unterscheidung in Zug- und Druckkraft getroffen, da die jeweilige Komponente über unterschiedliche Mechanismen im Verbindungselement übertragen wird.

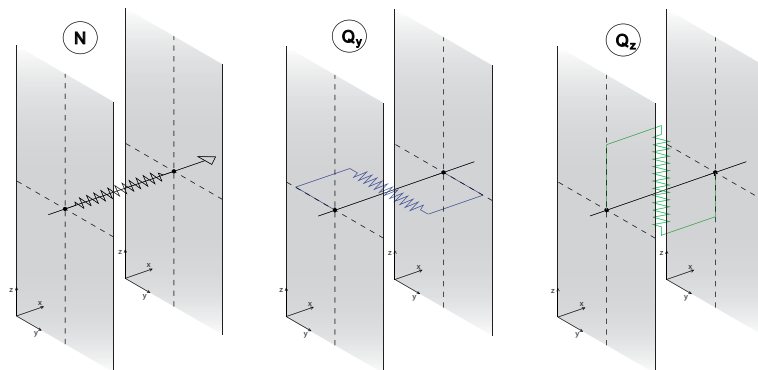


Abb. 9-7 Anordnung der nichtlinearen Federkomponenten COMBIN 39 in der Fuge

Die resultierende Querkraft Q wird aus den orthogonal zueinander stehenden und in der Fugenebene wirkenden Q_y - und Q_z -Komponenten berechnet. Die Angabe erfolgt betragsmäßig ohne Richtung. Abb. 9-7 zeigt die Orientierung der Federelementkomponenten in der Fuge. Die in Abb. 9-8 dargestellten Einzelwerte beruhen auf der Berechnung der steifsten Modellvariante S21-1 (nach Tab. 9-4) und zeigen die Verteilung der auftretenden Quer- und Axialkräfte für die Lastfälle 100-131 nach Tab. 9-3 auf S.115.

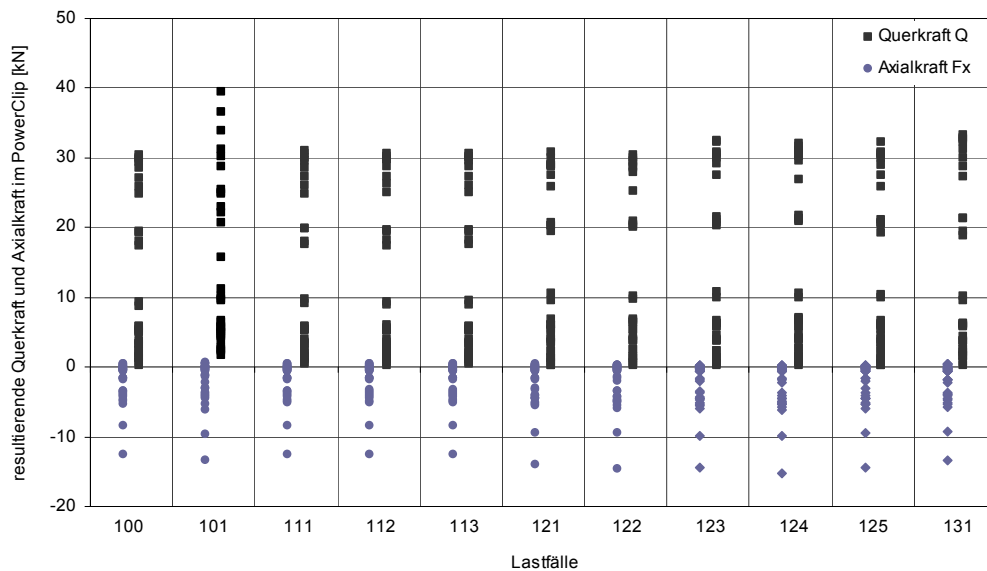


Abb. 9-8 PowerClip: Einzelwerte der Axialkraft F_x - und der Querkraft Q für die Lastfälle 100-131 in der Fuge Wand Dachgeschoß – Dachplatte

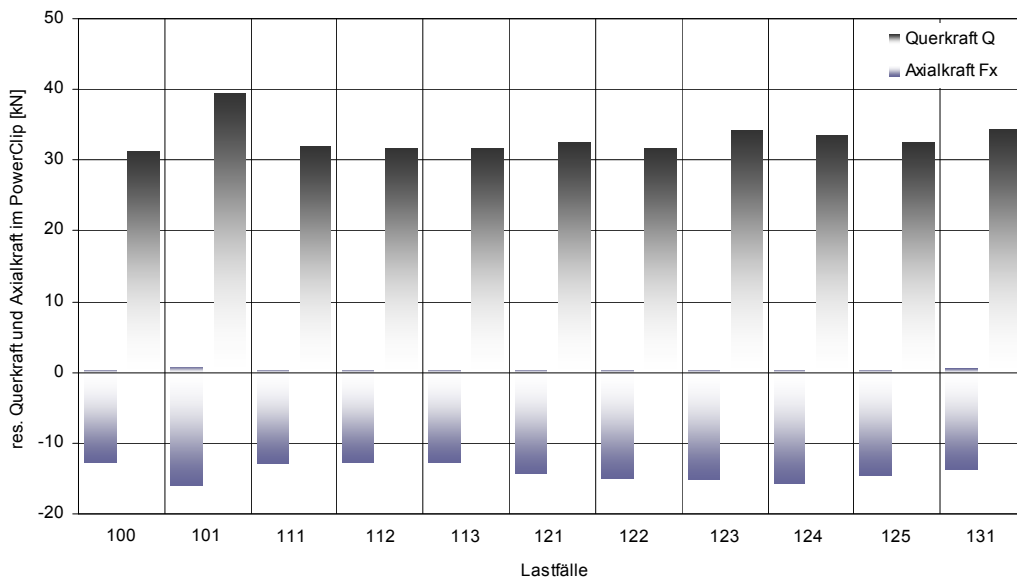


Abb. 9-9 PowerClip: Maximale Axialkraft F_x - und Querkraft Q der Lastfälle 100-131 in der Fuge Wand Dachgeschoß – Dachplatte

Jeder Punkt stellt die berechnete Schnittkraft in einem PowerClip dar. Die Verteilung zeigt, ob es sich um eine gleichmäßige Auslastung der Elemente handelt, oder ob es zu vereinzelt auftretenden Lasten kommt.

Abb. 9-9 stellt die maximal auftretende Axial- und Querkraft als Balkendiagramm dar. Es fällt auf, dass in keinem Lastfall nennenswerte Zugkräfte im PowerClip zu übertragen sind. Die Einwirkungen durch Wind und Schnee führen nur zu geringen Schwankungen der zu übertragenden Kräfte gegenüber dem Lastfall Eigengewicht. Der Lastfall 101 liefert mit dem Eigengewicht in Kombination mit Temperaturbelastung die maximale Beanspruchung. Infolge der Temperaturdehnung erhöht sich die Querkraft in Fugenlängsrichtung aufgrund der Zwängung zwischen zwei festen PowerClip Lagerpunkten. Die Ausdehnung der Wand macht sich ebenfalls durch eine erhöhte Haftreibung in der Kontaktfuge/Mörtelfuge bemerkbar (Abb. 9-10 rechts). Die geringe Steifigkeit der Außenwand begrenzt jedoch die zusätzliche Beanspruchung.

Abb. 9-10 zeigt die maximal auftretende Pressung und Haftreibung in den Kontaktfugen des Modells. Die Ergebnisse werden nach Fugen gegliedert aufgeführt. Die Dachplattenfuge wird am stärksten durch Pressung belastet. Die vergleichsweise hohe Haftreibung liegt in der Neigung der Fuge von 38° begründet. Die Pressung der horizontalen Fugen nimmt infolge der zunehmenden Lasten zur Bodenplatte hin zu. Die geringere Pressung in der Bodenplattenfuge (bop_o) ist auf die Festlagerung der Plattenknoten im FE-Modell zurückzuführen.

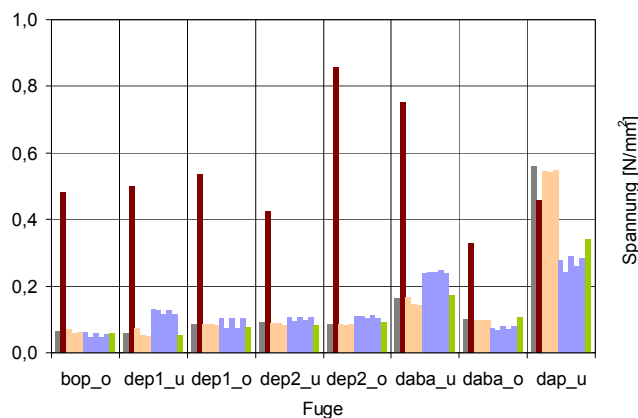
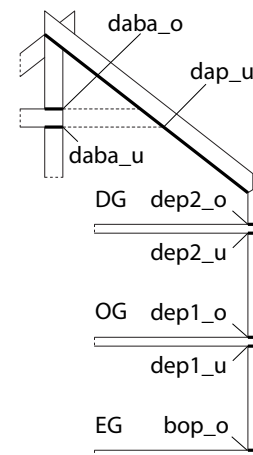
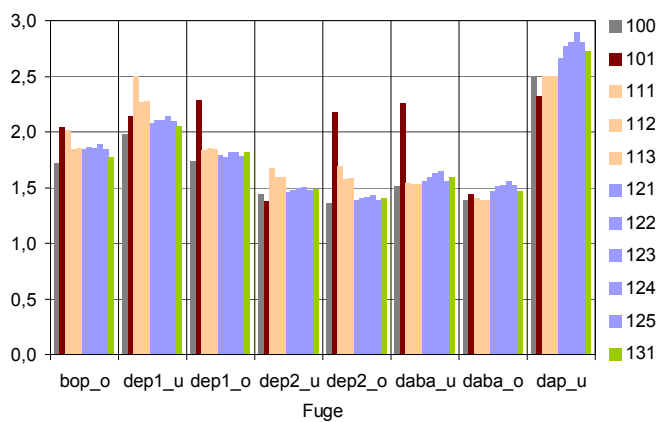


Abb. 9-10 Fugenpressung (oben) und Haftreibung (unten) in der Mörtelfuge gegliedert nach Fugenebenen

Der Lastfall Temperatur sorgt für stark ansteigende Pressungs- und Reibungswerte. Verkehrslastfälle führen tendenziell zu höheren Fugenpressungen. Horizontale Lasten haben eine leicht erhöhte Haftreibung zur Folge. Insgesamt lässt sich der Lastfall Temperatur als bedeutendster Einfluss auf die Fuge identifizieren.

Die Darstellung der Berechnungsergebnisse der PowerCons erfolgt analog zu den PowerClips. Die Ergebnisse werden nach vertikalen und horizontalen Fugen getrennt ausgewertet. Abb. 9-11 zeigt die Belastung der PowerCons in den vertikalen Wandfugen. Zusätzlich wurden die Ergebnisse nach den Stockwerken gegliedert. Die maximalen Belastungen treten im Dachgeschoß (DG) auf. Diese Tendenz ist bereits beim Vergleich von EG und OG zu erkennen. Der extremere Unterschied im DG ist jedoch den konstruktiven Besonderheiten des Beispielgebäudes geschuldet.

Die höchsten Axialkräfte treten als Zugkräfte in der vertikalen Fuge auf. Aufgrund des Temperatureinflusses entstehen dort die größten Zug- und Druckkräfte (Abb. 9-11, LF101-DG). Die höchsten Querkräfte ergeben sich infolge der Belastung durch Wind- und Schnee in der Dachplatte (Abb. 9-12). Die Ausbildung eines Ringzugankers in den Plattenelementen lässt sich nicht beobachten.

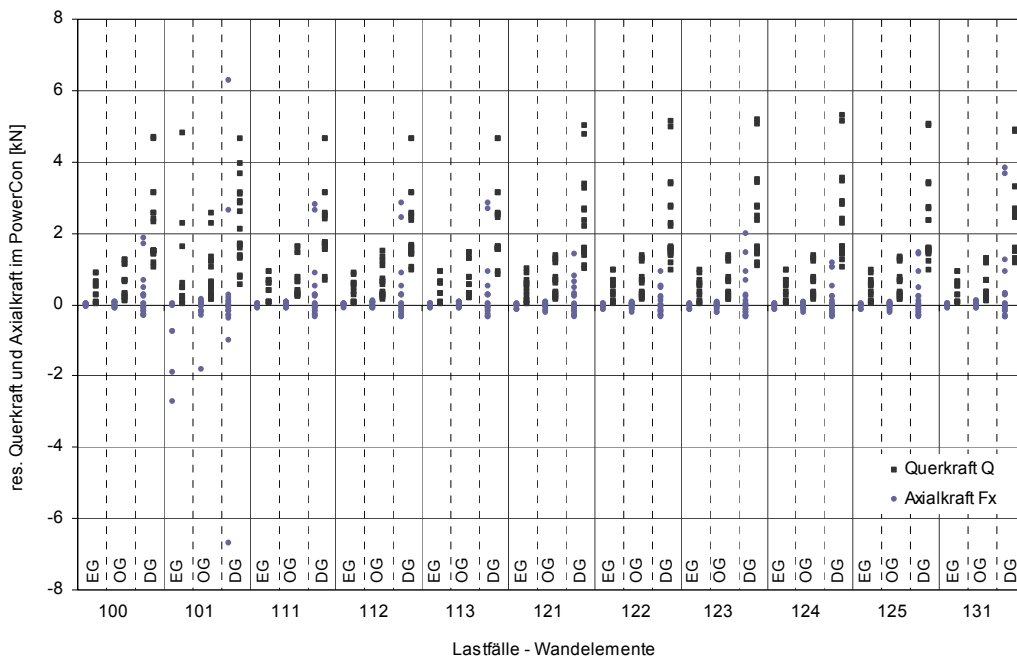


Abb. 9-11 Vertikale Wandfuge mit PowerCon – Einzelwerte gegliedert nach Stockwerk

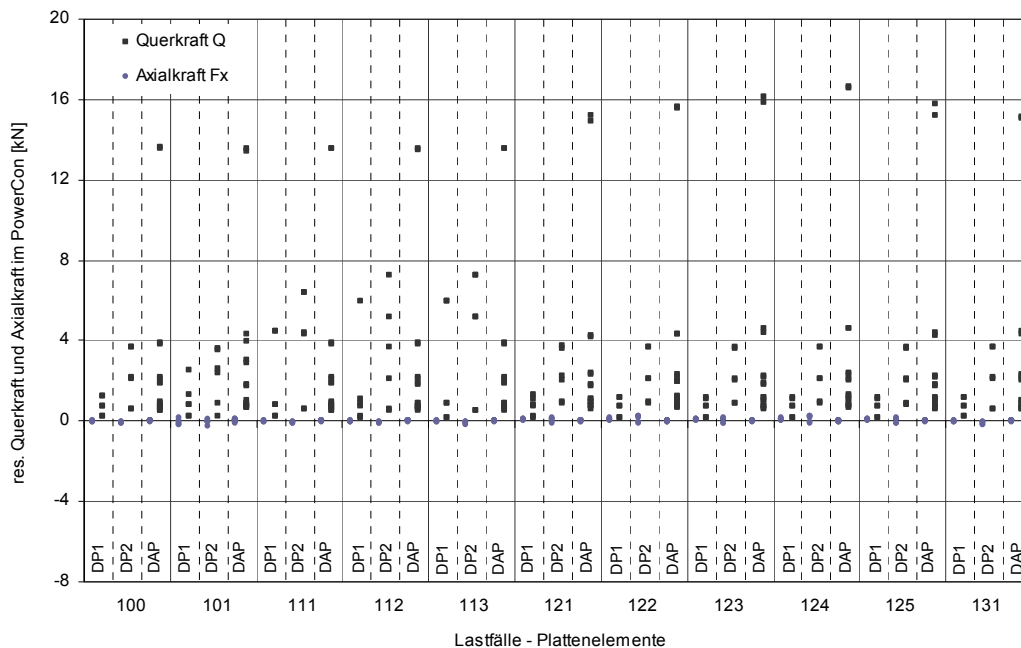


Abb. 9-12 Horizontale Deckenfuge mit PowerCon - Einzelwerte gegliedert nach Ebenen

Abb. 9-13 fasst die Ergebnisse als Darstellung der Maximalwerte in Balkenform nochmals zusammen. Demnach treten größere Axialkräfte nur in den vertikalen Fugen der Wandelemente und dort besonders infolge der Temperaturbelastung auf. Maximale Querkräfte treten in der Dachplatte auf. Insgesamt bewegt sich die Höchstbelastung der Verbinder in einer Größenordnung, die sicher übertragen werden kann.

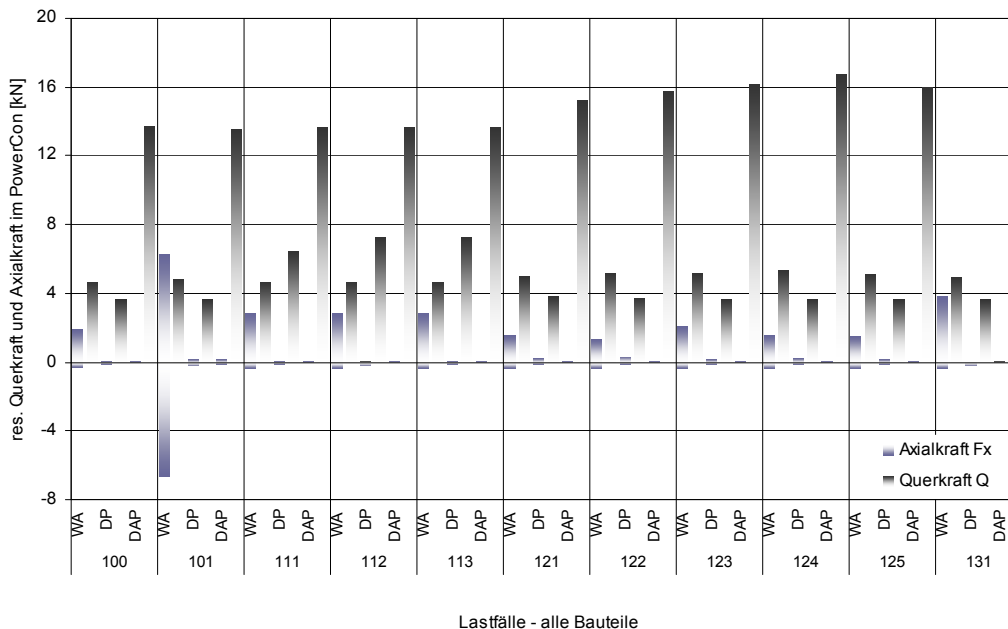


Abb. 9-13 PowerCon: Maximale Axialkraft Fx und Querkraft Q der Lastfälle 100-131 kombiniert dargestellt für Wandelemente (WA), Deckenplatten (DP) und Dachplatten (DAP)

9.3.2.2 Ergebnisstreuung infolge der stochastischen Modellierung

In Serie 2 werden Verbindungspunkte durch die stochastische Modellierung mit variierender Steifigkeit erzeugt. Eine vergleichende Betrachtung an jeweils drei zufällig erstellten FE-Modellen erlaubt die Abschätzung dieses Einflusses auf die Berechnung der Schnittgrößen im PowerClip und im PowerCon. Die Angabe der auftretenden Streuung erfolgt in % auf den jeweils ermittelten Maximalwert der betrachteten Federkomponente.

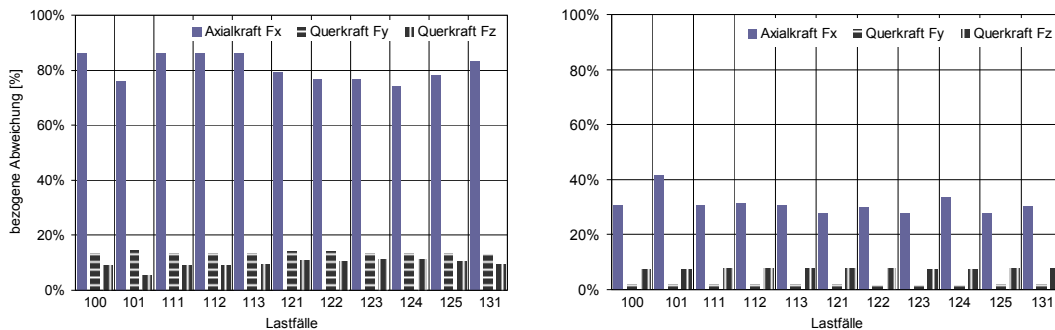


Abb. 9-14 Abweichung der Schnittkräfte im PowerClip (links) und PowerCon (rechts)

Die starke Streuung der Axialkraft von 82% der ermittelten Höchstdruckkraft im PowerClip liegt in dessen größerer Empfindlichkeit aufgrund seiner Steifigkeit begründet. Das Verformungsverhalten der darunterliegenden Dachgeschoßwand wird in erheblichem Maße vom Last-Verformungsverhalten der stabilisierenden PowerCons beeinflusst. In Querrichtung fällt die ermittelte Streuung wesentlich geringer aus und verhält sich über die angesetzten Lastfälle vergleichsweise konstant. Die definierten Federeigenschaften in Querrichtung werden im Gegensatz zur Axialrichtung nicht variiert.

Die ermittelte Streuung der PowerCons fällt mit 31% deutlich geringer aus. Dies liegt vor allem an der geringen statischen Relevanz der PowerCon Verbinder. Die berechneten Axialkräfte sind gemäß Abb. 9-13 sehr gering. Infolge der abnehmenden Steifigkeit in den weiteren Modellen der Serie wird praktisch keine Axiallast mehr über diese Elemente übertragen. In Querrichtung wird wie bei den PowerClips die definierte Federeigenschaft nicht variiert, was ebenfalls zu einer konstant niedrigen Streuung über die Lastfälle führt.

9.3.2.3 Ergebnisvergleich – alle Modelle S21-S24

Abb. 9-15 zeigt die maximalen PowerCon Schnittkräfte der Wand-, der Decke- und der Dachplattenfuge der Serie S21-S24 im direkten Vergleich. Der Ausfall der Zugkraftübertragung im PowerCon infolge der Variation der Last-Verformungslinie lässt sich deutlich erkennen. Die konstante Druckkraft der Wandelemente resultiert aus dem Lastfall Temperatur. Eine Scheibenwirkung der Decken- und Dachplatten entfaltet sich nur innerhalb der Elemente. Eine Scheibenwirkung der Decke in Ihrer Gesamtheit über die PowerCons in den Fugen gibt es nicht (Werte für Platte Fx und Dachplatte Fx praktisch 0). Die maximale Querkraft bleibt über die komplette Serie konstant. Dies liegt in der gleichbleibenden Last-Verformungslinie der Quertragfähigkeit der Verbindung be-

gründet. Die Berechnungen am vorverformten Modell (vv) lieferten marginal unterschiedliche Ergebnisse. Eine erkennbare Zusatzbelastung ergab sich lediglich für die PowerCon Zugkraft in der steifsten Modellkonfiguration. Andererseits lässt sich vereinzelt sogar eine erkennbare Reduktion der Maximalbelastung ausmachen.

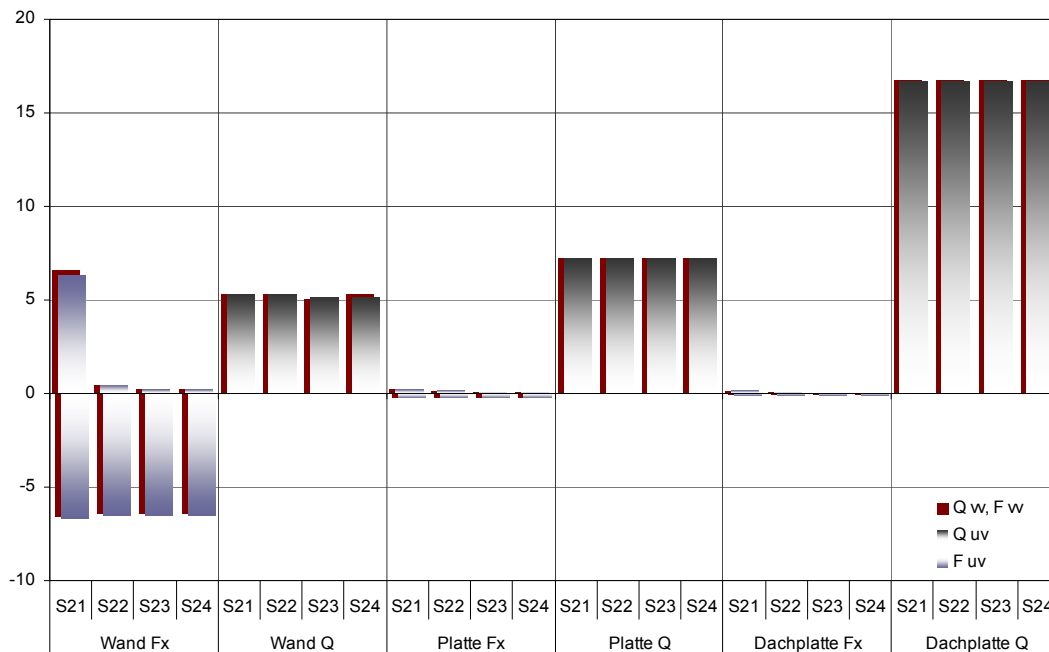


Abb. 9-15 Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerCons - Modelle S21-S24 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell

Abb. 9-16 zeigt, dass sowohl die maximalen Axialkräfte als auch die zu übertragenden Querkräfte der PowerClips über die Modellvariation gleich bleiben. Dieses Ergebnis liegt vor allem im Zusammenwirken mit der vermörtelten Fuge begründet.

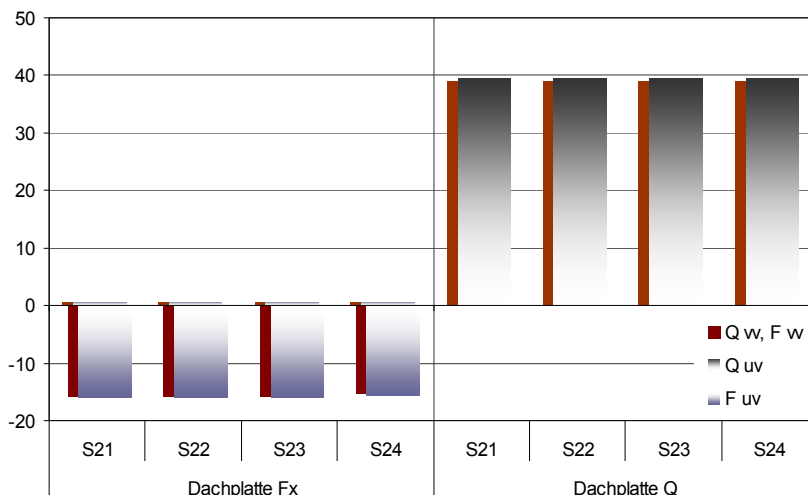


Abb. 9-16 Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerClips – Modelle S21-S24 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell

Die Spannungsauslastung der Mörtelfugen bleibt ebenfalls über die Variation identisch. Die maximalen Ergebnisse variieren mit 0,4% im Bereich der Berechnungsgenauigkeit. Der Ausfall der PowerCon in den vertikalen Fugen auf Zug wurde durch den Fugenkontakt kompensiert.

9.3.3 Auswertung der Lastfälle 141-146 – Erdbebeneinwirkung

9.3.3.1 Maximale Schnittkräfte

Durch die Möglichkeit der schnellen Errichtung von Bauwerken mit diesem System ist auch der Einsatz in Katastrophengebieten von großem Interesse. Dazu gehören insbesondere Erdbeben gefährdete Gebiete. Aus diesem Grund wurde die Struktur zusätzlich unter Erdbebenlast simuliert. Die Lastannahmen wurden gemäß den Angaben der DIN 4149 [16] ermittelt und vereinfacht als statische Ersatzlast auf die vorverformte Geometrie in Ansatz gebracht. Um die grundsätzliche Tauglichkeit der Struktur zur Abtragung hoher Lasten infolge dynamischer Anregung nachzuweisen, wurden die Lastannahmen der stärksten deutschen Erdbebenzone 3 der Simulation zugrunde gelegt. Genauere Informationen zu den Lastannahmen finden sich unter Erdbebenlast.

Um ein möglichst genaues Bild des Antwortverhaltens des Gebäudes zu erhalten, wurde die Last in einem Winkel von 0° , 30° , 60° , 90° , 120° und 150° in Form eines auf die Struktur wirkenden Beschleunigungsvektors angesetzt. Durch die Symmetrie des Gebäudes waren damit alle Richtungen abgedeckt.

Abb. 9-17 zeigt die Verteilung der Normal- und Querkräfte aller PowerClip Verbinder in der Dachfuge. Die Verteilung zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Angriffsrichtung der Belastung. Die minimalen und maximalen Schnittkräfte treten aufgrund der ungewöhnlichen Gebäudeform abweichend der in der Regel berücksichtigten 0° - 90° Richtungen auf.

Die Belastung der Mörtelfuge, dargestellt in Abb. 9-18, erhöht sich um ca. 50% gegenüber den Bemessungslastfällen. Die sechs in einer Fuge zusammengefassten Diagrammbalken stellen die Ergebnisse der Belastungsvariation von 0° - 150° dar. Die berechneten Pressungen steigern sich kontinuierlich bis zur Bodenplatte. Ebenso steigt auch die Haftreibung nach unten hin an. Eine Ausnahme bildet die Dachplattenfuge, die sowohl eine höhere Pressung als auch eine höhere Haftreibung zu übertragen hat.

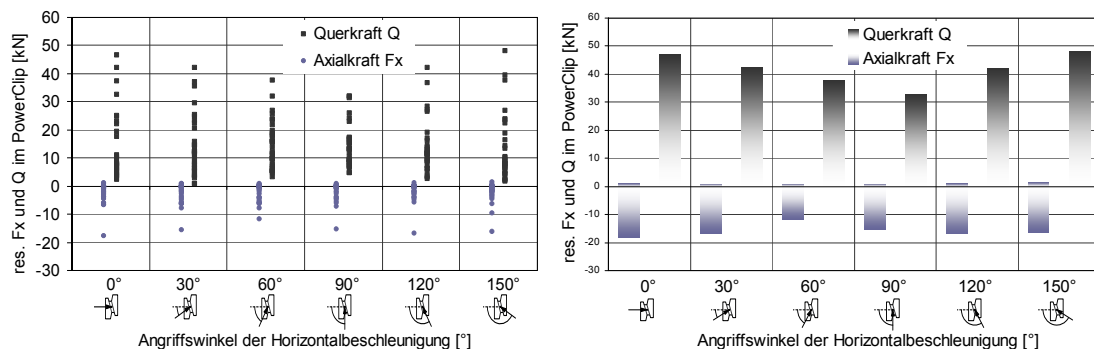


Abb. 9-17 Einzelwertverteilung (links) und Maximalwertdarstellung (rechts) von Fx und Q im PowerClip für unterschiedliche Angriffsrichtungen der Horizontalbeschleunigung

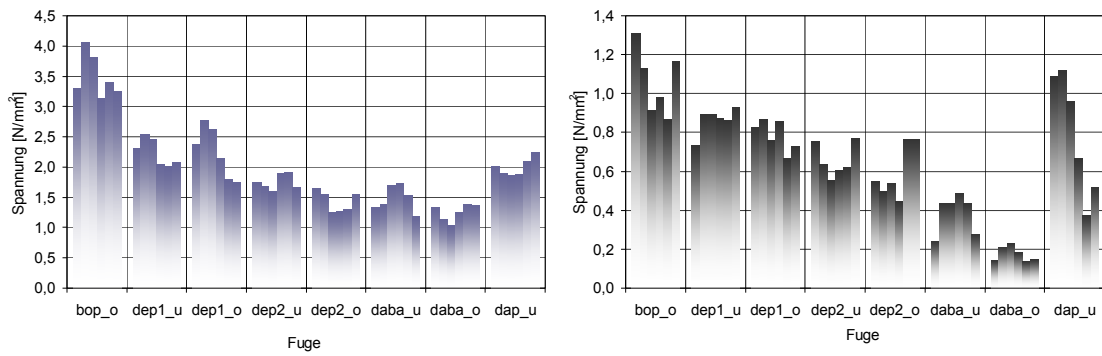


Abb. 9-18 Fugenpressung (links) und Haftreibung (rechts) in der Mörtelfuge gegliedert nach Fugenebenen

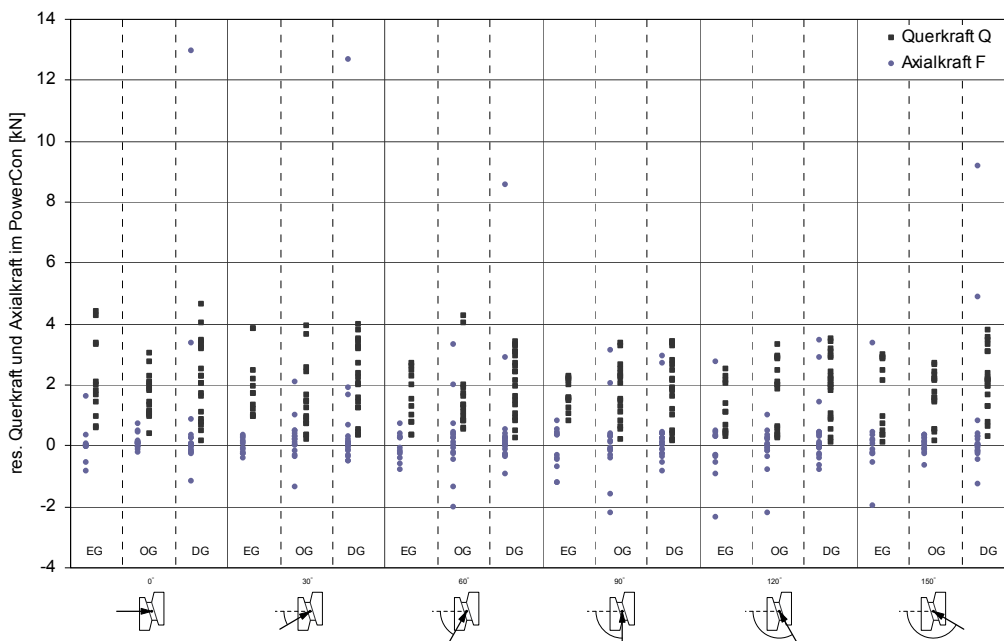


Abb. 9-19 Vertikale Wandfuge mit PowerCon - Einzelwerte gegliedert nach Stockwerken

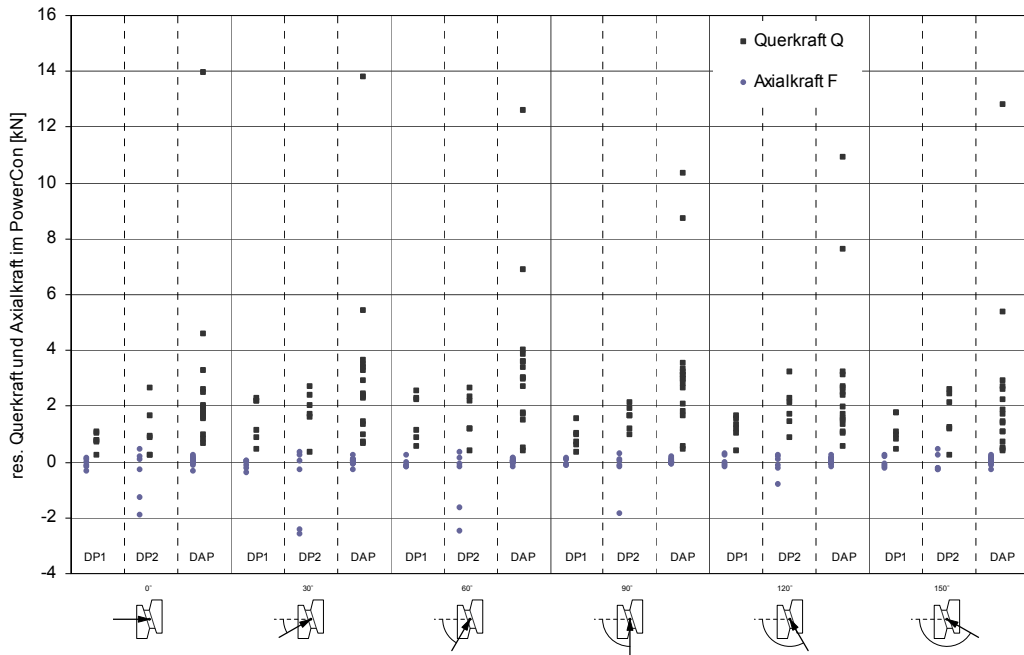


Abb. 9-20 Horizontale Deckenfuge mit PowerCon - Einzelwerte gegliedert nach Ebenen

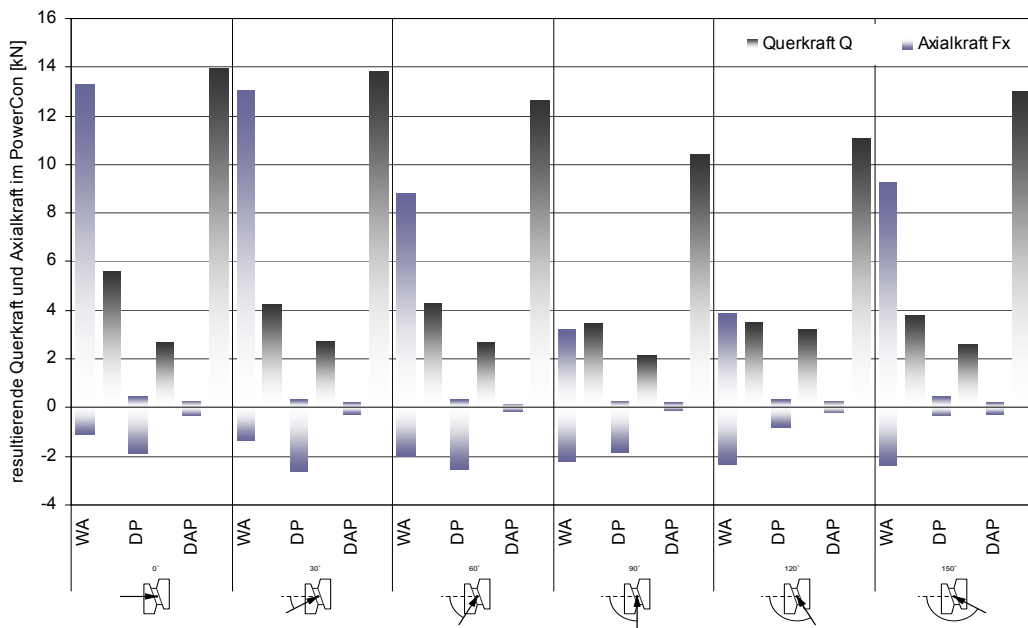


Abb. 9-21 PowerCon: Maximale Axialkraft N und Querkraft Q der Lastfälle 141-146 gegliedert nach Wandelemente (WA) - Deckenplatten (DP) - Dachplatte (DAP)

Abb. 9-21 zeigt, dass die PowerCon Verbinder unter Horizontallast in den vertikalen Wandfugen auf Zuglast beansprucht werden. Aufgrund der Neigung werden Dachplatten durch die Horizontalbeschleunigung stark auf Biegung beansprucht. Die Verformung wird durch die Verbinder über Querkräfte gekoppelt, was ebenfalls zu hohen Kräften führt. Die geringste Beanspruchung tritt in diesen Fugen folgerichtig bei einem Lastangriffswinkel von 90° auf.

In der Darstellung der Einzelwerte in Abb. 9-19 und Abb. 9-20 lässt sich gut erkennen, dass der Großteil der Verbinder nur gering belastet ist. Die Maximalbelastung entsteht nur für einzelne Verbinder. Derartige Konstellationen deuten auf eine ungeschickte Verteilung der Verbindungsmittel hin und sollten Anlass zu einer Überprüfung geben.

9.3.3.2 Ergebnisstreuung infolge der stochastischen Modellierung

Die horizontalen Kräfte der Lastfälle 141-146 rufen sowohl in den PowerClips als auch in den PowerCons eine deutliche Belastung hervor (siehe Abb. 9-17 rechts und Abb. 9-21). Die in Abb. 9-22 beschriebene Streuung der Axialkraft bezieht sich auf die Druckkomponente, da nur diese im Rahmen der stochastischen Modellierung variiert wird. Für beide Elemente ergibt sich unter Erdbebeneinwirkung eine ähnliche Streuungsintensität. Die maximale Streuung über alle Serien liegt für die PowerClips bei 86,7% und für die PowerCons bei 80,7%. Die Streuung der Querkräfte zeigt aufgrund der konstanten Kraft-Verformungsbeziehung eine vergleichbare Größenordnung, wie für die Lastfälle 100-131 ermittelt. Sie unterliegt jedoch einer ausgeprägten Abhängigkeit der Belastungsangriffsrichtung.

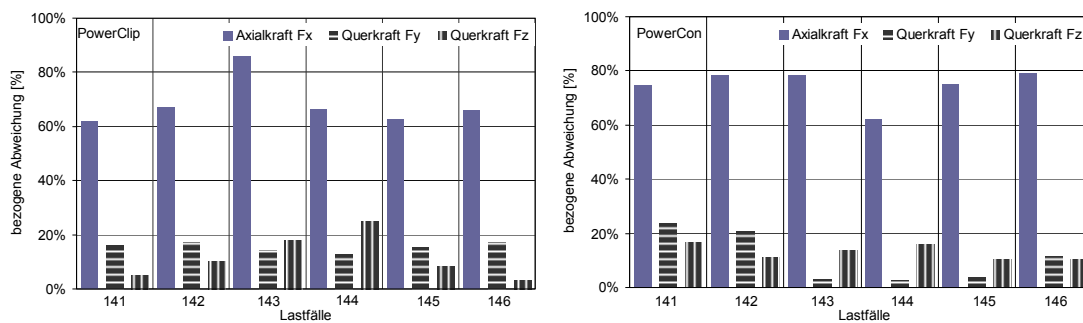


Abb. 9-22 Streuung der Schnittkräfte im PowerClip (links) und PowerCon (rechts)

9.3.3.3 Ergebnisvergleich der Modelle S21-S24

Abb. 9-23 zeigt die maximalen Schnittkräfte der Wand, der Decke und der Dachplatte der FE-Modelle S21 bis S24 im Vergleich. Die größte Veränderung ist für die Zugkraftübertragung der PowerCon in der Wandfuge infolge der Variation der Last-Verformungslinie auszumachen. Für das allgemeine Lastniveau gilt zu beachten, dass die Lastfälle 141-146 ohne Temperatureinfluss gerechnet wurden. Infolge der dominierend horizontalen Einwirkung findet eine kombinierte Wirkung der Deckenelemente in Form einer Druckkraftübertragung über die PowerCons statt. Eine Scheibenwirkung der Dachplatten entfaltet sich nur innerhalb der Elemente, da weder Zug- noch Druckkräfte über die PowerCons übertragen werden. Die maximale Querkraft zeigt vor allem in den Wandelementen eine stärkere Abhängigkeit von den Variationsparametern der Serie. Die maximalen Querkräfte der Platten- und Dachelemente zeigen sich weitgehend konstant. Eine Zusatzbelastung infolge der Vorverformung des Berechnungsmodells zeigt sich am deutlichsten an der Erhöhung der Axialkräfte der PowerCons in der vertikalen Wandfuge. Die Querkräfte erfahren keine signifikante Erhöhung.

Abb. 9-24 zeigt, dass auch unter dieser Belastungssituation sowohl die maximalen Axialkräfte als auch die zu übertragenden Querkräfte der PowerClips über die Modellvariation gleich bleiben. Die Spannungsauslastung der Mörtelfuge verändert sich ebenfalls über alle Modelle mit einer Änderung von nur 0,1% praktisch nicht.

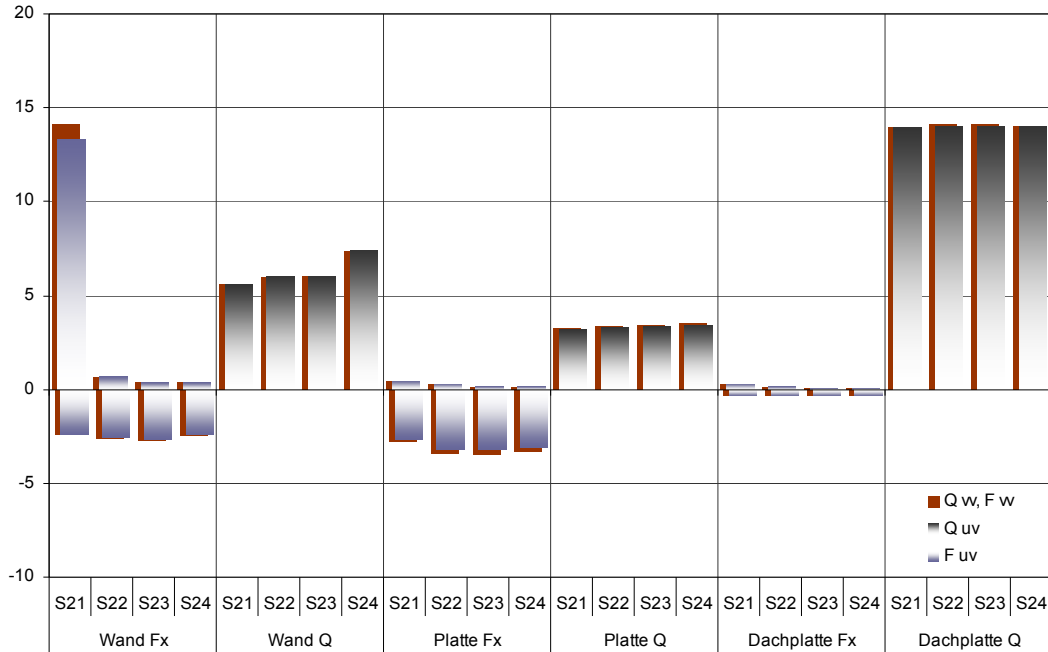


Abb. 9-23 Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerClips – Modelle S21-24 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell

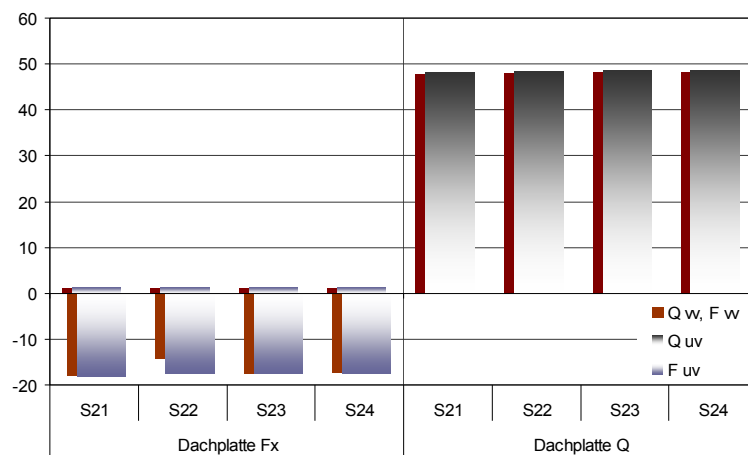


Abb. 9-24 Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerClips – Modelle S21-S24 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell

9.3.4 Zusammenfassung und Bewertung

Die Auswertung der Ergebnisse hat gezeigt, dass mit dem Verbindungssystem Munitec Gebäude nach der dargestellten Anwendung standsicher errichtet werden können. Die

Belastung der Verbindungsmittel bewegt sich unter der Prämisse der angesetzten Lastfälle in einer Größenordnung, die gemäß den experimentellen Versuchen (vgl. Kap 7) übertragen werden kann. Eine Tragfähigkeit des Systems ist jedoch nur im Zusammenwirken mit einer vermörtelten Fuge zu erzielen. Ein hybrides Konzept bietet jedoch weder für den Montageprozess noch für die angestrebte Nachhaltigkeitssteigerung eine Lösung.

9.4 FE-Simulation des trockenen Tragverhaltens – Serie 3

Der Grundgedanke des integrierten Konzepts besteht darin, über stahlbaumäßige, punktförmig wirkende Verbindungsmittel ein Gebäude aus Fertigteilelementen zu montieren und darüber abzutragen. Die in Kapitel 8 vorgestellten, neuentwickelten Verbindungsmittel werden für diese Aufgabe eingesetzt. Abb. 9-25 zeigt die im Versuchsgebäude nach den Vorgaben aus Kap. 6.3.4 angeordneten PowerClip-tr und PowerCon-tr sowie das FE-Modell der Serie S30. Die vermasste Lage der einzelnen Verbindungselemente ist den Planunterlagen im Anhang A.3 ab S.167 zu entnehmen.

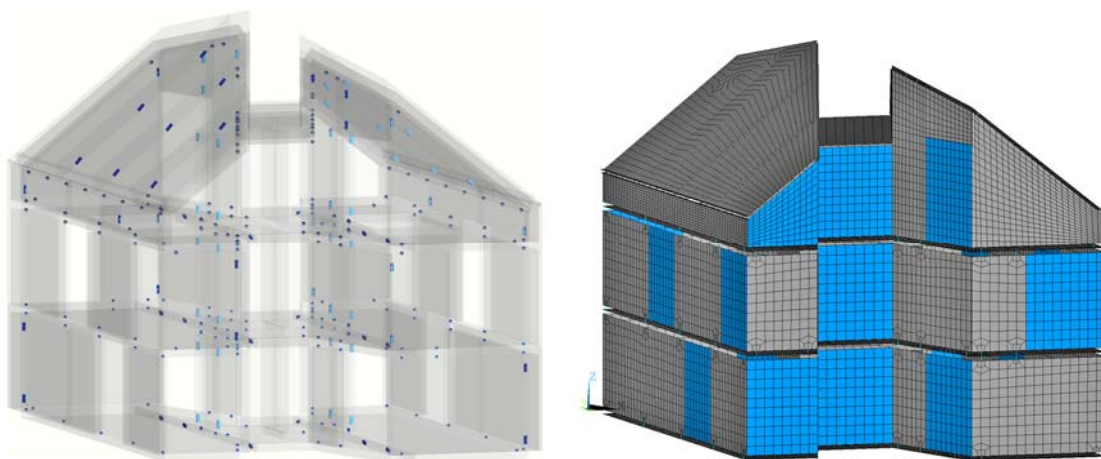


Abb. 9-25 3D-Isometrie des Beispielgebäude HOMES (24) mit punktuellen Verbindungsmitteln und FE-Modell S30

9.4.1 Modellierung der Verbindungsmittel

9.4.1.1 PowerCon-tr und PowerClip-tr

Für die entwickelten Verbindungsmittel liegen noch keine versuchstechnischen Untersuchungen bezüglich Ihres Last-Verformungsverhaltens vor. Für eine realistische Einschätzung wurde deshalb eine Annahme getroffen, die um eine Kleinst- und Größtwertabschätzung ergänzt wurde.

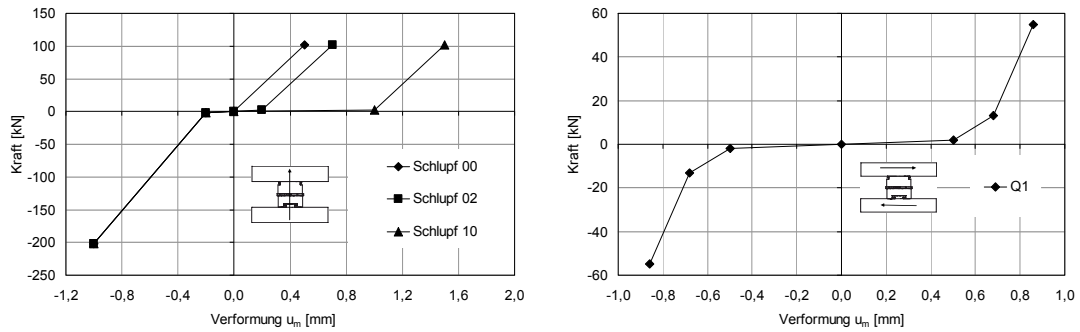


Abb. 9-26 Annahmen zur Last-Verformungslinie in Achs- und Querrichtung für den PowerClip-tr

Die drei Verschiebungs-Freiheitsgrade am Knoten werden erneut durch drei nichtlineare Zug-Druckfedern der COMBIN 39 Elemente modelliert. Die Verbindung wird ebenfalls als ideal gelenkig angesehen. Die Feder normal zur Fugenebene wird in Druckrichtung mit dem nichtlinearen Kraft – Verschiebungsverhalten der zentrischen Belastungsversuche der PowerClip Verbinder modelliert. An der Primärverbindung kommt es durch den Rastmechanismus zu einem Spiel im Zug-Druck Wechselbereich. Für die Aufnahme der Zugkraft wird die ideelle Steifigkeitsannahme der PowerClip Verbinder angesetzt. Um den Einfluss des Verbindungsspiels zu erfassen, wird bei gleichbleibenden Druckbereich folgender Verbindungsschlupf im Zugbereich berücksichtigt (Abb. 9-26-links):

4. S 00: kein Spiel mit $d=0,0$ mm (Mindestwert)
5. S 02: realistisches Spiel $d=0,2$ mm (normale Maschinenbautoleranz)
6. S 10: Größtspiel mit $d=1,0$ mm (Maximalwert)

Der PowerCon-tr und PowerClip-tr ist vom Prinzip der Lastübertragung identisch konzipiert. Die Übertragung der Querkraft erfolgt für beide Elemente über Dübeltragwirkung. In den zwei orthogonal zueinander stehenden Querrichtungen der Fuge wird das Federelement mit einem beidseitigen Verbindungsschlupf von $0,5$ mm modelliert. Der Zug- und Druckast wurde unter Verwendung der ermittelten Powerclip Versuchswerte modelliert (Abb. 9-26-rechts).

9.4.2 Auswertung der Lastfälle 100-131

9.4.2.1 Maximale Schnittkräfte

Für die Darstellung der Einzelwerte der PowerClips-tr werden die Berechnungsergebnisse der steifsten Modellvariante S30-q1-s00 ausgewertet.

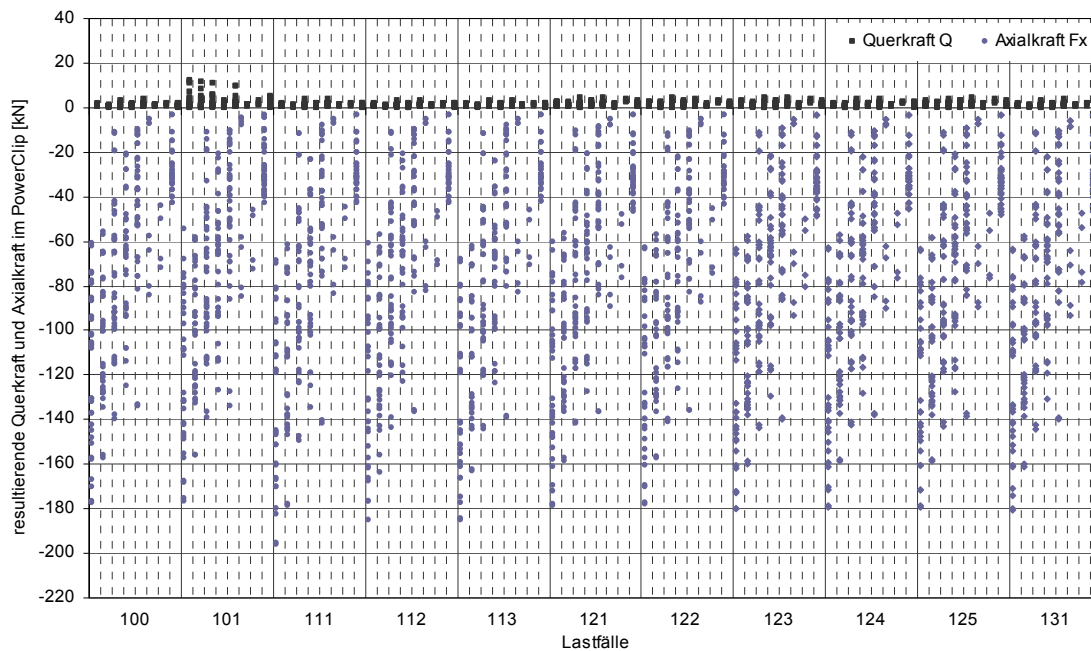


Abb. 9-27 PowerClip-tr: Einzelwerte der Axialkraft Fx und der Querkraft Q für die Lastfälle 100-131 gegliedert nach Fugen (Einteilung der Fugen gemäß Abb. 9-34)

Abb. 9-27 zeigt die Verteilung der berechneten Normal- und Querkräfte für den einzelnen Verbinder. Die Darstellung erfolgt analog zu Serie 2. Um eine Bewertung vornehmen zu können, werden die Einzelwerte einer Fuge in jeweils einer Spalte zusammengefasst. So stellt die linke Spalte im LF100 die Ergebnisse der Fuge Bodenplatte – Wandfuß EG (bop_o) dar. Die Lage der Fugen steigt in Abb. 9-10 von links nach rechts an. Dadurch ergibt sich eine treppenförmige Anordnung der Werte. Je geringer die Spreizung der Werte ausfällt, desto wirtschaftlicher erfolgt die Auslastung der Verbindungsmittel.

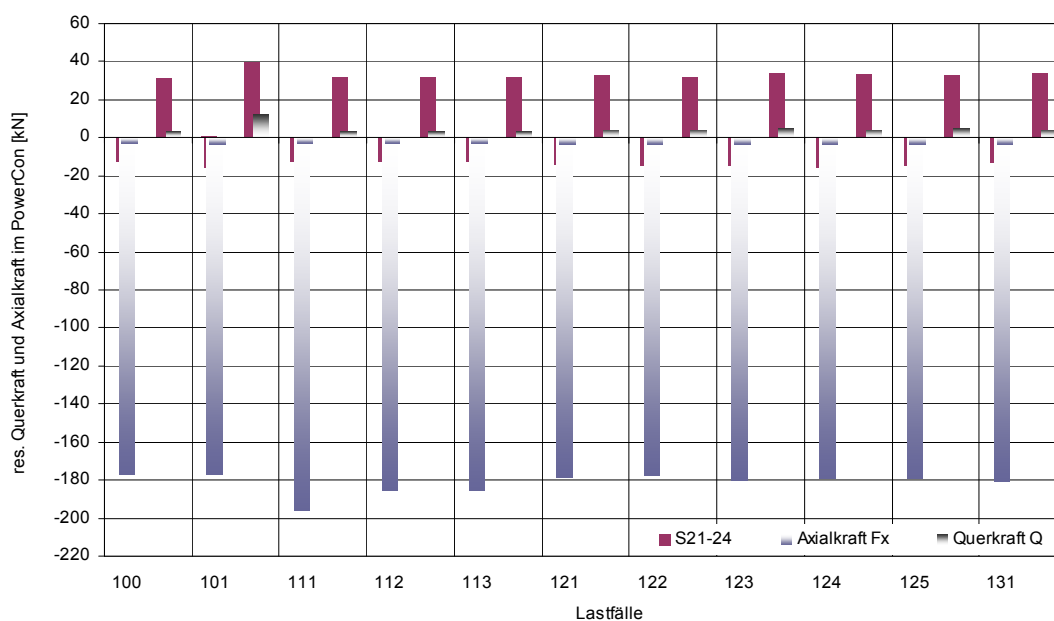


Abb. 9-28 PowerClip-tr: Maximale Axialkraft Fx und Querkraft Q der Lastfälle 100-131; Vergleichende Betrachtung mit den Maximalwerten aus S21-24

Im Verhältnis zu den auftretenden Axialkräften sind die auftretenden Querkräfte sehr gering. Die Verteilung liegt ebenfalls sehr eng zusammen. Wie in Serie 2 ergibt sich die maximale Querkraft für Lastfall 101-Temperatureinfluss. Die Einwirkungen aus Wind und Schnee führen nur zu geringen Schwankungen der Ergebnisse gegenüber dem Lastfall Eigengewicht.

Gemäß Abb. 9-28 sind die PowerClips-tr ausschließlich auf Druck belastet. Die maximal auftretende Axialkraft ist ebenfalls negativ. Durch das Fehlen einer großflächigen Mörtelfuge müssen die gesamten Gebäudelasten über die PowerClips-tr abgetragen werden. Dies hat eine wesentlich höhere Einzelkraft im Verbinder zur Folge als es bisher für die PowerClips zu beobachten war.

Im Vergleich zur Serie 2 ist die Belastung der PowerClips auf Querkraft stark reduziert. Dieser Effekt ist auf die in Serie 3 fehlende Vermörtelung der Fuge zurückzuführen. Aufgrund der Fugeneigung von 38° entstehen bei der Abtragung der vertikalen Lasten über das Mörtelbett Abtriebskräfte, die von den PowerClips als Querkraft aufgenommen werden. Diese Umlenkung entfällt bei einer trockenen Fuge, da die vertikalen Kräfte ausschließlich über die PowerClips-tr abgetragen werden.

Die Auswertung der Einzelkräfte der PowerCon-tr erfolgt getrennt in vertikale und horizontale Fugen, die in Abb. 9-29 und Abb. 9-30 dargestellt sind. Die berechneten Schnittkräfte sind sehr inhomogen verteilt, was sich bei einzelnen Verbindungsmitteln durch sehr hohe Maximalwerte äußert. Der Großteil der Verbindungsmittel hingegen ist sowohl in Querrichtung als auch in Axialrichtung deutlich geringer belastet.

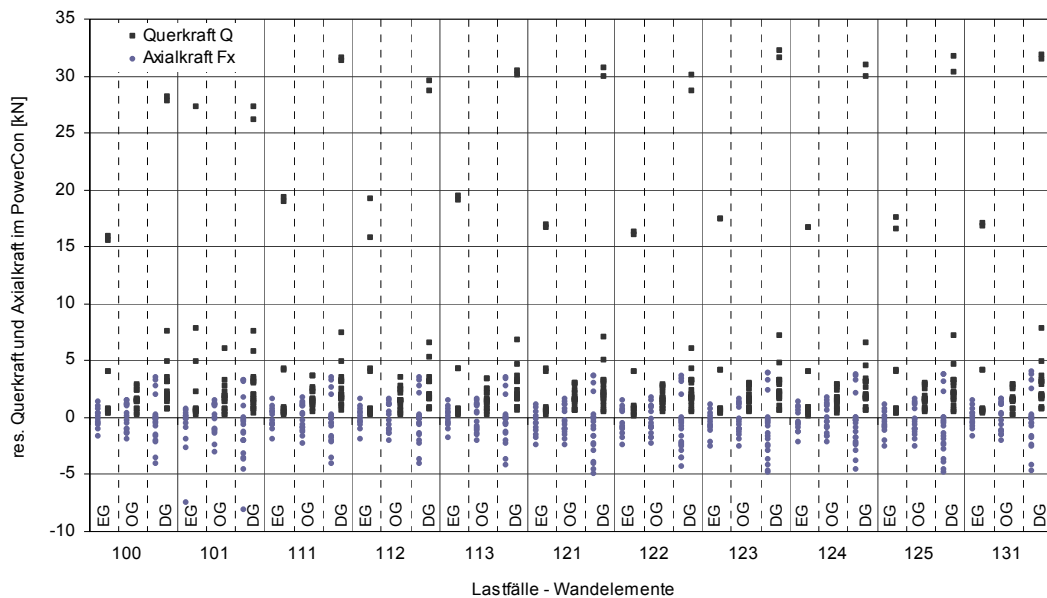


Abb. 9-29 PowerCon-tr - vertikale Wandfuge - Einzelwerte gegliedert nach Stockwerken

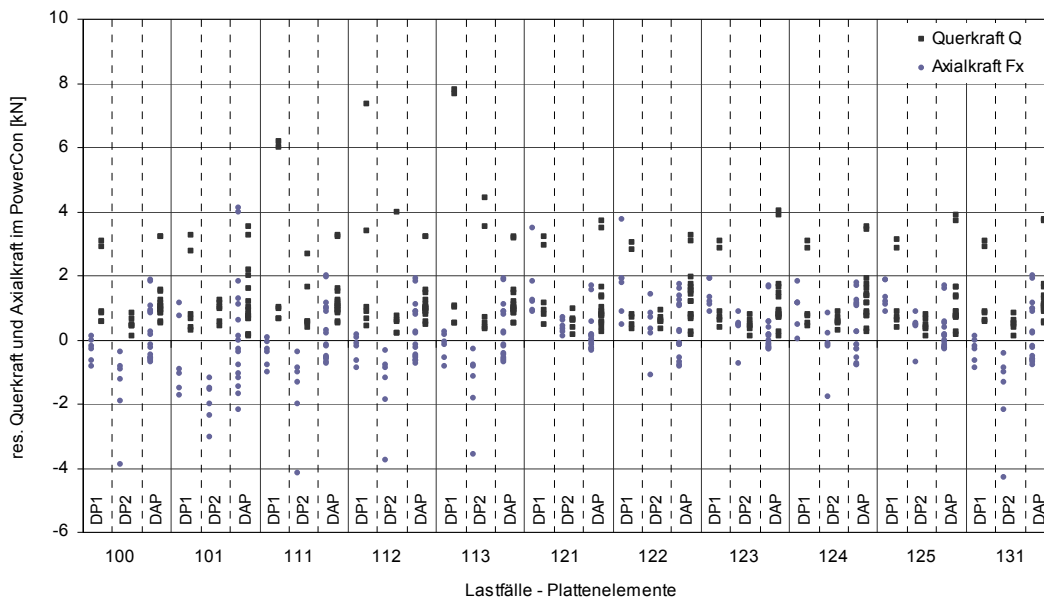


Abb. 9-30 PowerCon-tr - Horizontale Deckenfuge - Einzelwerte gegliedert nach Ebenen

Die maximalen Ergebnisse beider Tabellen werden in Abb. 9-31 kombiniert als Wand-, Decken- und Dachplattenfuge dargestellt. Maximale Axialkräfte entstehen infolge der thermischen Dehnung in Form von Druckkraft in der vertikalen Wandfuge. Die maximale Zugbelastung tritt über die Lastfälle unbestimmt verteilt in Wand- und Dachplattenfuge auf. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Serie S21-24 fallen zwei Effekte besonders auf:

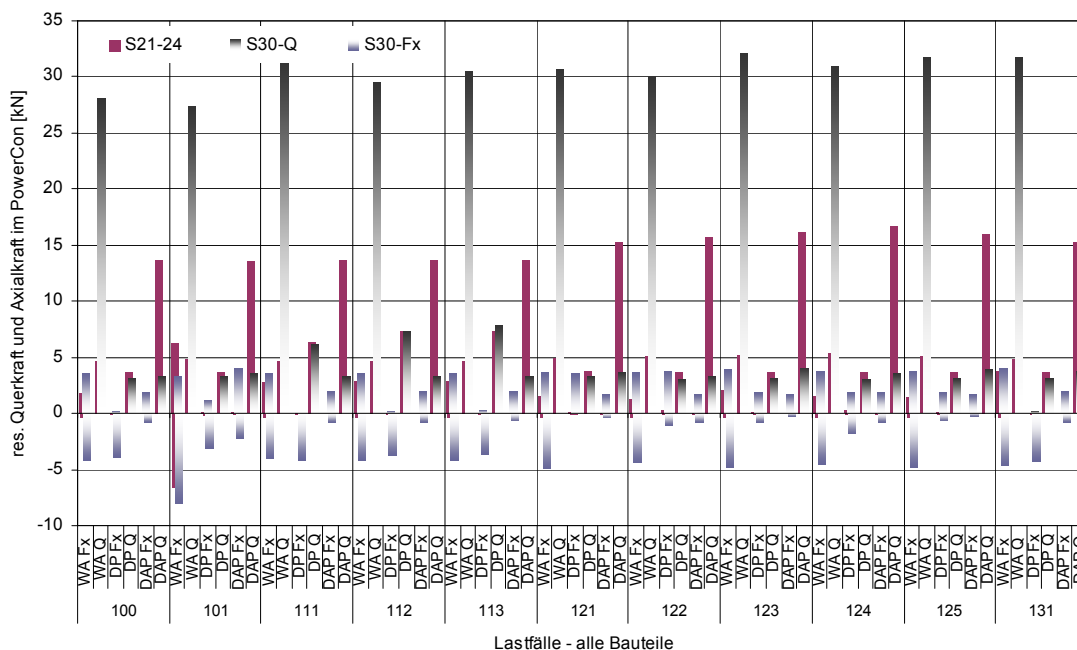


Abb. 9-31 PowerCon-tr: Maximale Axialkraft Fx und Querkraft Q der Lastfälle 100-131 kombiniert dargestellt für Wandelemente (WA), Deckenplatten (DP) und Dachplatten (DAP)

1. Die Querkraft der vertikalen Wandfuge steigt in Serie 3 um ein Vielfaches an. Der Zuwachs erfolgt aufgrund einer stark erhöhten Querkraftkomponente F_z in Fugenlängsrichtung. Bei einem trockenen Lastabtrag kommt es in Abhängigkeit der Steifigkeitsverhältnisse von PowerCon-tr zu PowerClip-tr zu einer Querverteilung der Vertikallast über die Wandfugen. Dies hat eine stärkere Belastung der vertikalen Fugen zur Folge.
2. Die Querkraft der Verbinder zwischen den Dachplatten reduziert sich von Serie 2 auf Serie 3 auf ca. 30%. Die Punkt gehaltenen Dachplatten der Serie 3 biegen sich wesentlich homogener durch als die liniengelagerten Dachplatten der Serie 2. Die geringeren Durchbiegungsdifferenzen an den Plattenkanten haben die deutlich geringere Belastung der PowerCons zur Folge.

9.4.2.2 Ergebnisvergleich der Modelle s00-s10

Abb. 9-32 zeigt einen Vergleich der maximalen PowerCon-tr Schnittkräfte in der Wand-, der Decke- und der Dachplattenfuge der Variationsserie axialer Schlupf in der Primärverbindung (s00-s10). Die Axialkräfte zeigen die größte Änderung, jedoch in geringer Größenordnung. Insgesamt hat die Variation des Schlupfes einen sehr geringen Einfluss auf die Schnittkräfte der PowerCons-tr.

Mit der Vorverformung des Tragwerks ist nur ein geringer Anstieg der Belastung der Verbindungselemente zu verzeichnen. Das Niveau der auftretenden Kräfte bleibt praktisch konstant oder reduziert sich in Einzelfällen sogar.

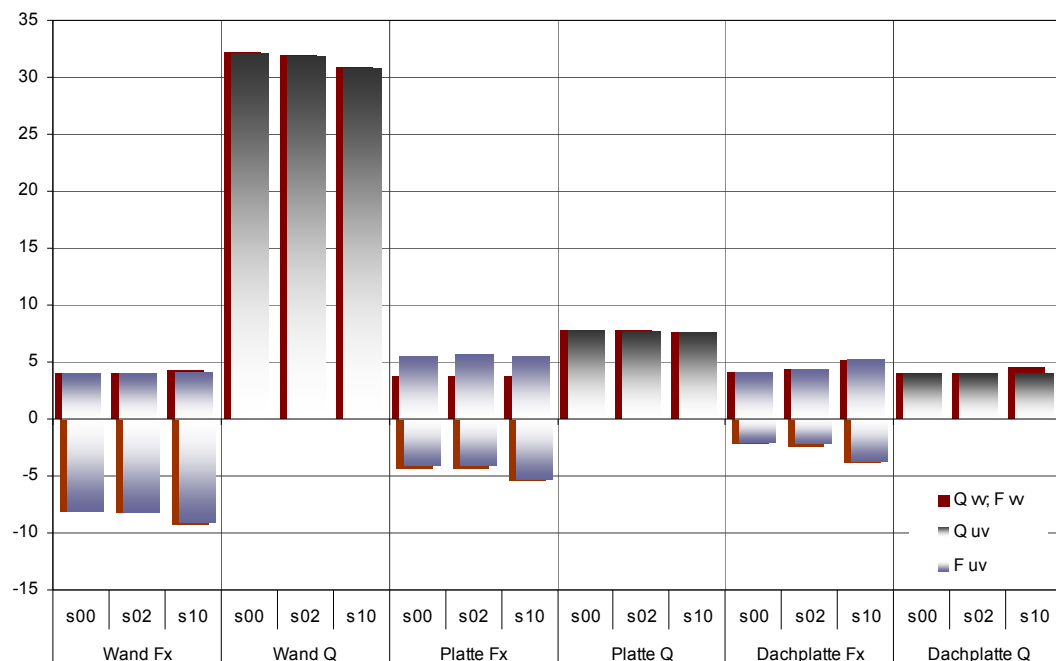


Abb. 9-32 Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerCons – Modelle s00-s10
Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell

Der Lastabtrag über einzelne punktuelle Verbindungen statt über eine große Fugenfläche hat auch eine wesentlich höhere Druckbelastung der Verbindungselemente zur Folge. Da auch mit höherem Schlupf kein alternativer Lastpfad im System zur Verfü-

gung steht, bleibt die Drucklast sowie die wesentlich geringere Querkraft weitgehend konstant.

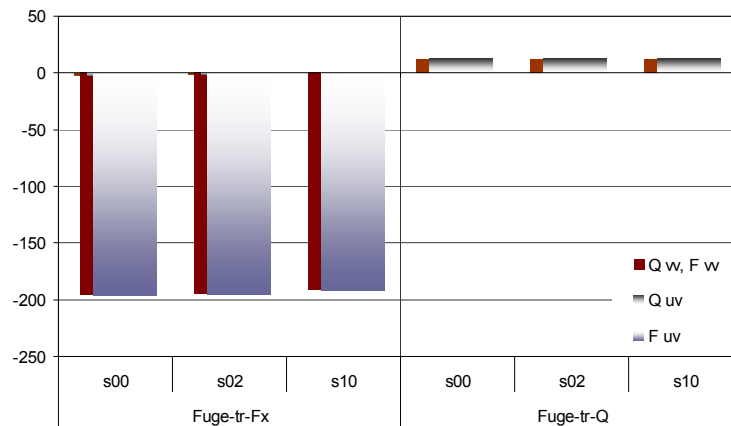


Abb. 9-33 Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerClips tr – Modell s00-s10 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell

9.4.3 Auswertung der Lastfälle 141-146 – Erdbebeneinwirkung

9.4.3.1 Maximale Schnittkräfte

Für die durchgeführten Berechnungen gelten die gleichen Annahmen wie sie bereits unter Abschnitt 9.3.3.1 aufgeführt wurden. In diesem Kapitel werden PowerClips-tr als wesentliches Tragwerkselement auf Ihr Verhalten unter hohen horizontalen Lasten untersucht.

Abb. 9-34 zeigt die Einzelwertverteilung der Schnittgrößen gegliedert nach den Gebäudefugen. Die PowerClips-tr sind einer wesentlich höheren Belastung durch Querkraft ausgesetzt, die zur Bodenplatte hin zunimmt.

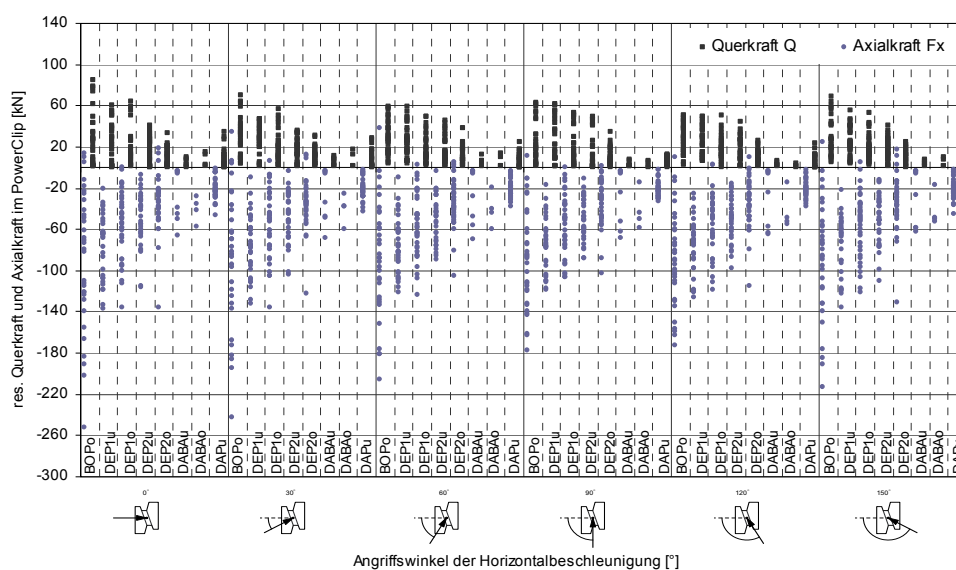


Abb. 9-34 Einzelwertverteilung von Fx und Q Im PowerClip-tr unter Erdbebenlast

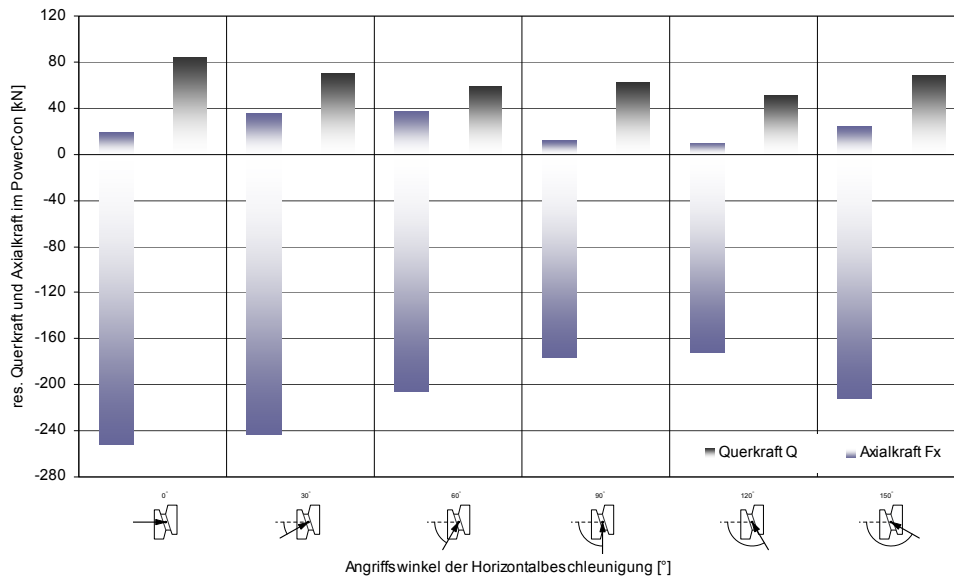


Abb. 9-35 Maximalwertdarstellung von Fx und Q im PowerClip-tr für unterschiedliche Angriffsrichtungen der Horizontalbeschleunigung

In Abb. 9-35 lässt sich aus der Maximalwertdarstellung eine Richtungsabhängigkeit der Belastung erkennen. In diesem Lastfall wird eine erhebliche Zuglast über die Power-Clip-tr übertragen. Die höchste Querkraft tritt bei Lastangriffsrichtung 0° auf. In dieser Richtung steift sich das Gebäude effektiv nur über den Kern aus. In Angriffsrichtung 90° stehen lange Wandscheiben zur Aufnahme der Lasten zur Verfügung.

Auch das Belastungsniveau der PowerCons steigt in diesem Lastfall wesentlich an. Hier lässt sich erneut eine starke Streuung der Einzelwerte beobachten. Nur 3% der Verbindungsmittel müssen eine Belastung von mehr als 50% der Maximallast aufnehmen.

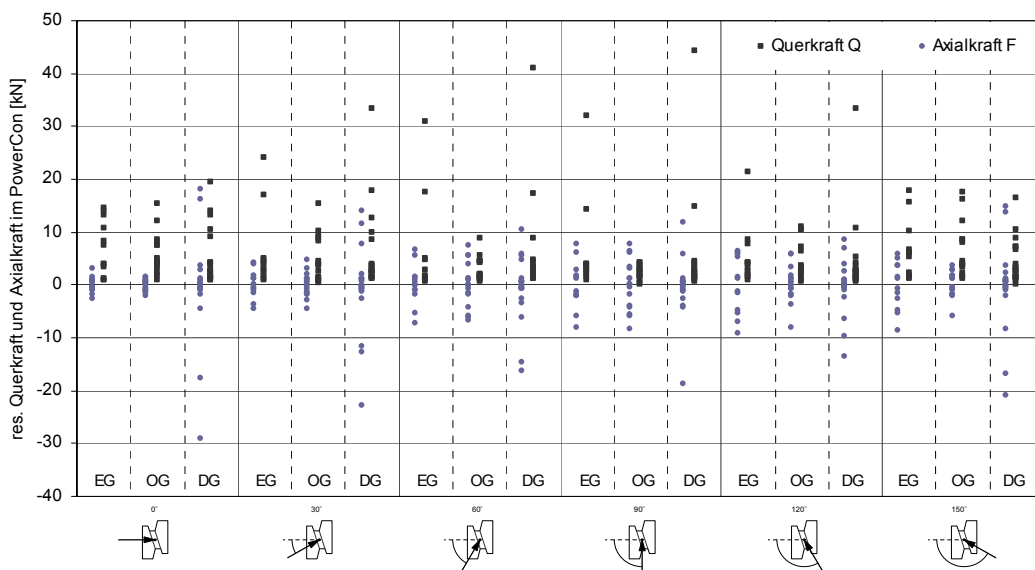


Abb. 9-36 Vertikale Wandfuge mit PowerCon-tr - Einzelwerte gegliedert nach Stockwerken

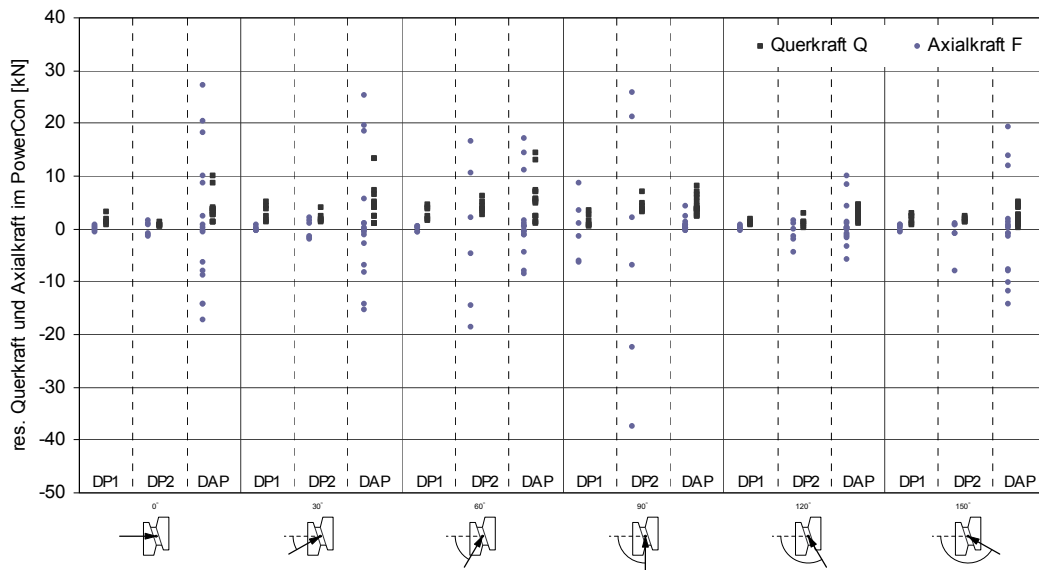


Abb. 9-37 Horizontale Deckenfuge mit PowerCon-tr - Einzelwerte gegliedert nach Ebenen

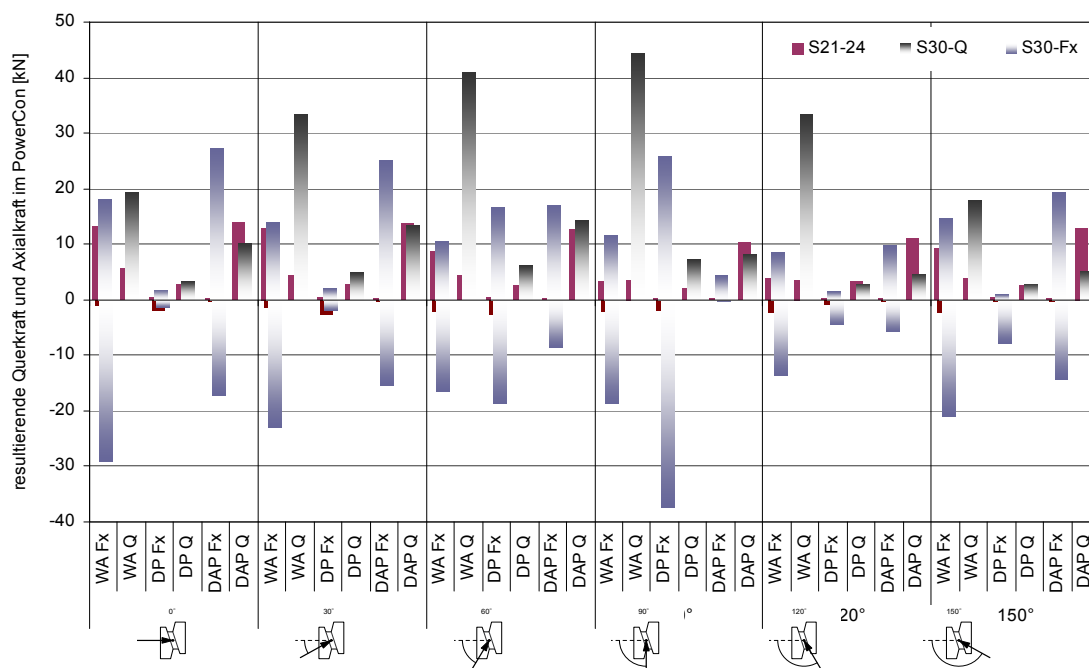


Abb. 9-38 PowerCon-tr: Maximale Axialkraft Fx und Querkraft Q der Lastfälle 141-146 kombiniert dargestellt für Wandelemente (WA), Deckenplatten (DP) und Dachplatten (DAP)

Der Wegfall der Mörtelfuge als Lastabtragendes Element hat eine wesentlich gesteigerte Beanspruchung der PowerCons-tr zur Folge. Die Axiallastübertragung steigt gleichermaßen über Zug und Druck an. Ein besonders starker Anstieg der Querkraft ist vor allem in der vertikalen Wandfuge zu bemerken.

9.4.3.2 Ergebnisvergleich der Modelle s00-s10

Abb. 9-39 zeigt die maximalen Schnittkräfte der Wand, der Decke und der Dachplatte der FE-Modelle s00, s02 und s10 im Vergleich. Die Variation des axialen Schluffes

unter hohen horizontalen Lasten zeigt nur einen geringen Einfluss auf die maximalen Schnittkräfte der PowerCon-tr. Die vorgegebene Tendenz wird durch die Ergebnisse an der vorverformten Struktur weitgehend bestätigt. Durch die gleichbleibende Gesamtstabilität des vorverformten Gebäudes ergeben sich keine zusätzlichen Belastungen für die Verbindungselemente.

Die Zugkraftaufnahme der PowerClips-tr wird durch den zunehmenden Verbindungsschlupf deutlich reduziert. Sowohl die maximale Querkraft- als auch die maximale Druckkraft bleibt über die weitere Variation konstant. Dies gilt ebenso für die Berechnung am vorverformten System.

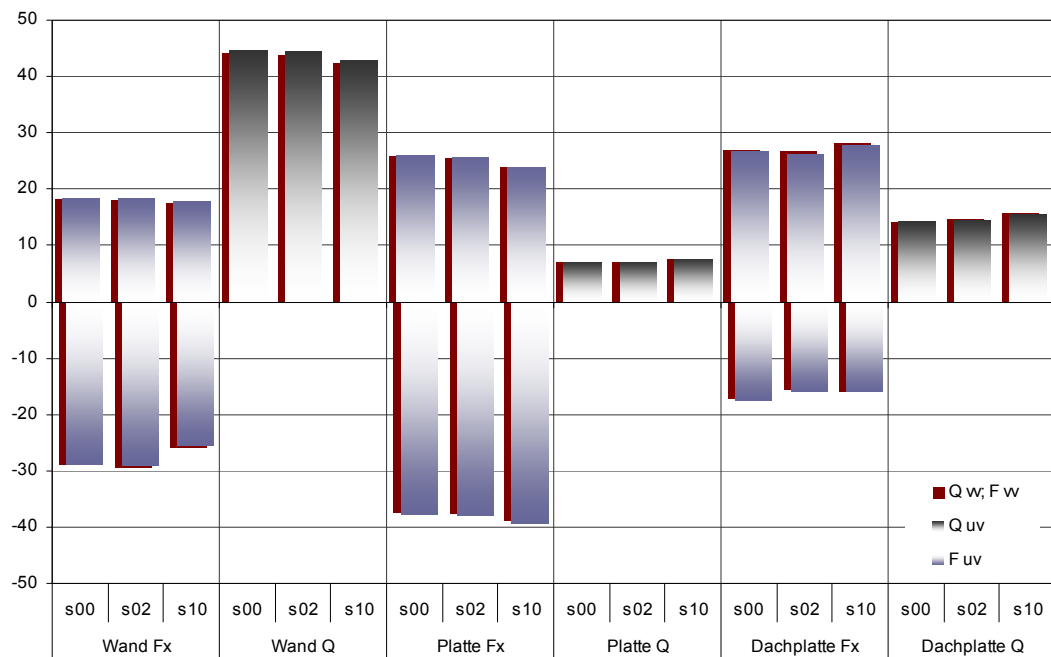


Abb. 9-39 Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerCons-tr – Modelle s00-s10 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell

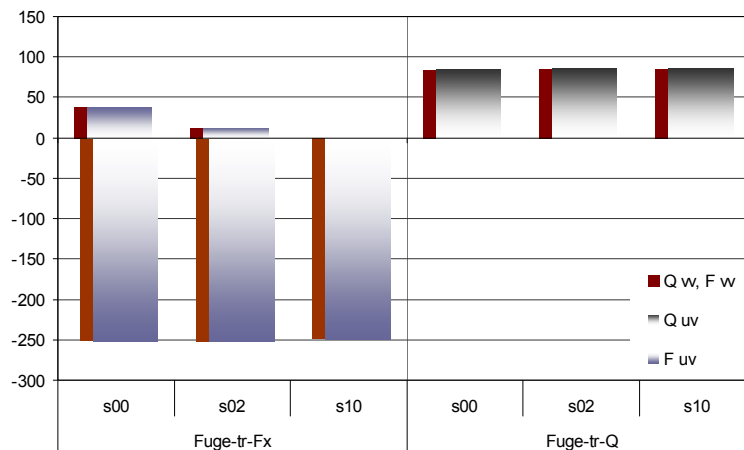


Abb. 9-40 Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerClips-tr – Modelle s00-s10 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell

9.4.4 Besonderheiten des punktuellen Lastabtrags

Die zum Teil sehr hohen Einzelkräfte aus den Verbindungen müssen durch das Element zuverlässig aufgenommen werden können. Mit der Dübelwirkung wird ein besonders werkstoffgerechter Lastübertragungsmechanismus genutzt, da die Kräfte über eine vergleichsweise große Lasteinleitungsfläche mittels Pressung in den Beton eingeleitet werden. Dem gegenüber steht die aufnehmbare Spannung des Betons.

Abb. 9-41 erlaubt die Abschätzung der resultierenden Druckspannung σ_D im Beton unter einer Belastung und Vorgabe des Einbaudosendurchmessers. Um 100 kN mit einer Betondruckspannung $< 10 \text{ N/mm}^2$ in das Element einzuleiten, ist eine Einbaudose mit $\text{Ø}120 \text{ mm}$ erforderlich. Die in Einzelfällen auftretende Maximalbelastung beträgt bis zu 280 kN pro Verbindungspunkt. Dies erfordert Einbaudosen von $\text{Ø}200 \text{ mm}$.

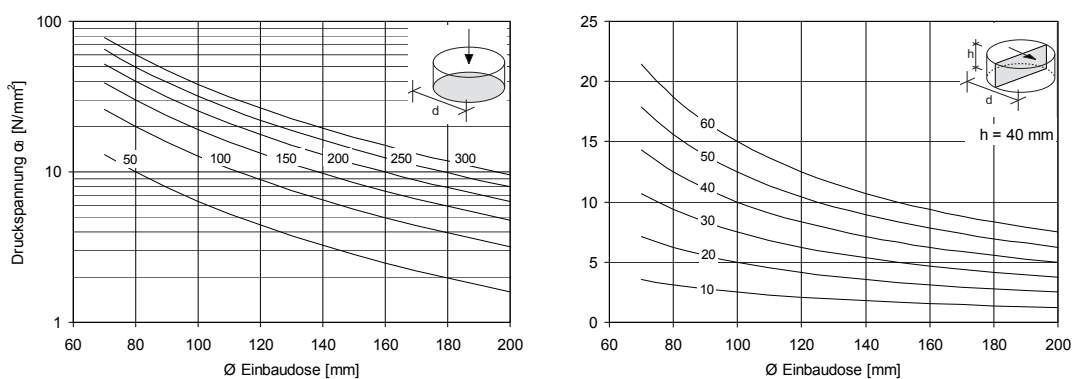


Abb. 9-41 Resultierende Druckspannung σ_D im Beton infolge Axiallast und Querkraft auf die Einbaudose

Die Querkraftübertragung wird durch die Einlasstiefe und dem Durchmesser der Einbaudose im Beton bestimmt. Da die Integration der Verbindungstechnik bereits eine Mindesteinbautiefe der Dose von 40-50 mm erforderlich macht, können die wesentlich kleineren Querkräfte durch dieses Prinzip optimal eingeleitet werden.

Die Festigkeit eines Aerogelbetons mit einer Wärmeleitfähigkeit $< 0,1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ erreicht mit dem aktuellen Stand der Forschung ca. 3 N/mm^2 . Dadurch besteht ein Widerspruch zwischen der vorhandenen Materialfestigkeit eines hoch wärmedämmenden Leichtbetons und dem Festigkeitsanspruch an das Material durch die punktuelle Fügung der Elemente.

Da die Stahl-Einbaudosen in dem ansonsten dämmenden Betongefüge eine Wärmebrücke darstellen, kann deren Durchmesser nicht beliebig gesteigert werden. Von Vorteil ist der vorhandene Bauraum in der Wand infolge der einschaligen Ausführung. Eine Möglichkeit, die Kräfte in die Wand einzuleiten, besteht durch die Generierung eines Übergangsbereichs mit höherer Festigkeit zwischen der Einbaudose und dem Wandelement (Abb. 9-42).

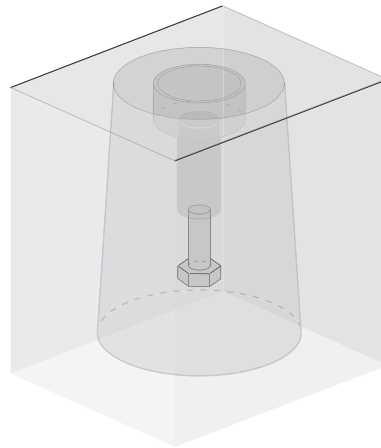


Abb. 9-42 Detailausbildung eines PowerClip mit abgestuftem Festigkeitsbereich zur Einleitung der Punktlasten in das Wandelement

Dieser Bereich wird durch ein vorgefertigtes Element mit reduziertem Aerogelanteil und bereits integrierter Einbaudose gebildet. Die Lasteinleitung erfolgt über die Mantelfläche und die Grundfläche. Die Wärmebrückenwirkung eines derartigen Elements ist gegenüber dem Stahleinbauteil stark vermindert und fällt sehr diffus aus, so dass keine bauphysikalischen Nachteile zu erwarten sind. Diese Elemente werden im Zuge des Montageprozesses in die Wand eingebaut.

Als weiterer Lösungsansatz ist auch die Entwicklung eines Einbauteils denkbar, welches eine sehr große Oberfläche aufweist, um die auftretenden Kräfte einzuleiten. Derartige Entwicklungsbemühungen laufen aktuell an der TU Darmstadt.

9.4.5 Zusammenfassung und Bewertung

Die Simulation zeigt, dass ein diskreter Lastabtrag zu sehr hohen Kräften in den Verbindungen führt. Dies gilt insbesondere für Verbindungen für den vertikalen Lastabtrag. Die Lasteinleitung der Verbindungselemente im Beton ist aufgrund dessen geringer Festigkeit nicht direkt möglich und erfordert eine lokale Verstärkung der Lasteinleitungsbereiche.

9.5 Analyse der Systemrobustheit

Mit Hilfe einer ausreichenden Robustheit einer Struktur wird die unverhältnismäßige Versagensfolge durch ein lokales Versagen einer Struktur infolge einer außergewöhnlichen Einwirkung weitgehend ausgeschlossen. Eine zugelassene Strategie zur Ausbildung der Robustheit nach DIN EN 1991-1-7 [27], ist das Vorsehen einer ausreichenden Tragwerksredundanz, um im Falle eines außergewöhnlichen Ereignisses einen alternativen Lastpfad innerhalb der Struktur zu ermöglichen.

Einfamilienhäuser bis zu vier Geschosse zählen in die Schadensfolgeklasse 1, die bei einem Nachweis der Tragfähigkeit unter normalen Nutzungsbedingungen keiner weiteren Untersuchung außergewöhnlicher Einwirkungen bedarf.

Die Verbindungselemente PowerClip-tr und PowerCon-tr beinhalten in ihrer Konzeption bereits Funktionalitäten, welche Forderungen aus der Schadensfolgeklasse 2a und 2b

erfüllt. Dazu gehört die zugfeste Verbindung von Bauteilen. Das System empfiehlt sich durch diese zusätzliche Funktionalität für einen Einsatz in diesem Bereich. Als praktischste Nachweisstrategie bei tragenden Wandbauweisen wird von der Norm die Berechnung des Modells bei Entfernung von jeweils nur einem Wandabschnitt vorgeschlagen. Mit dieser Untersuchung soll überprüft werden, inwieweit das eingesetzte Verbindungssystem in der Lage ist, die geforderten, alternativen Lastpfade auszubilden.

Abb. 9-43 zeigt die maximal beanspruchten PowerClips im Gebäude infolge eines ausgefallenen Wandelements. Es wurden alle drei Stockwerke EG, OG und DG untersucht und Stockwerksweise zusammengefasst. Die Abbildung rechts zeigt die jeweils der maximalen Belastung zugrundeliegende Tragwerksverformung.

Die Ausbildung alternativer Lastpfade ist nur unter Ausnutzung der Zugtragfähigkeit der Verbindung möglich. Damit bleiben Bauteile auch bei fehlender Druckunterstützung weiterhin stabil. Um die Standsicherheit bis zur Räumung des Gebäudes sicherstellen zu können, müssen die Zugelemente die berechneten Lasten übertragen können. Unter Druck ist ein Versagen des Verbindungselements tolerierbar, da es damit zu einer vollflächigen Auflagerung des gestützten Elements kommt. Dadurch reduzieren sich die hohen Pressungen und tragen zu einer Stabilisierung des Gesamtsystems bei.

Für drei Ausfallszenarien konnte in der Simulation keine Lösung gefunden werden. Dies deutet auf ein Systemversagen hin.

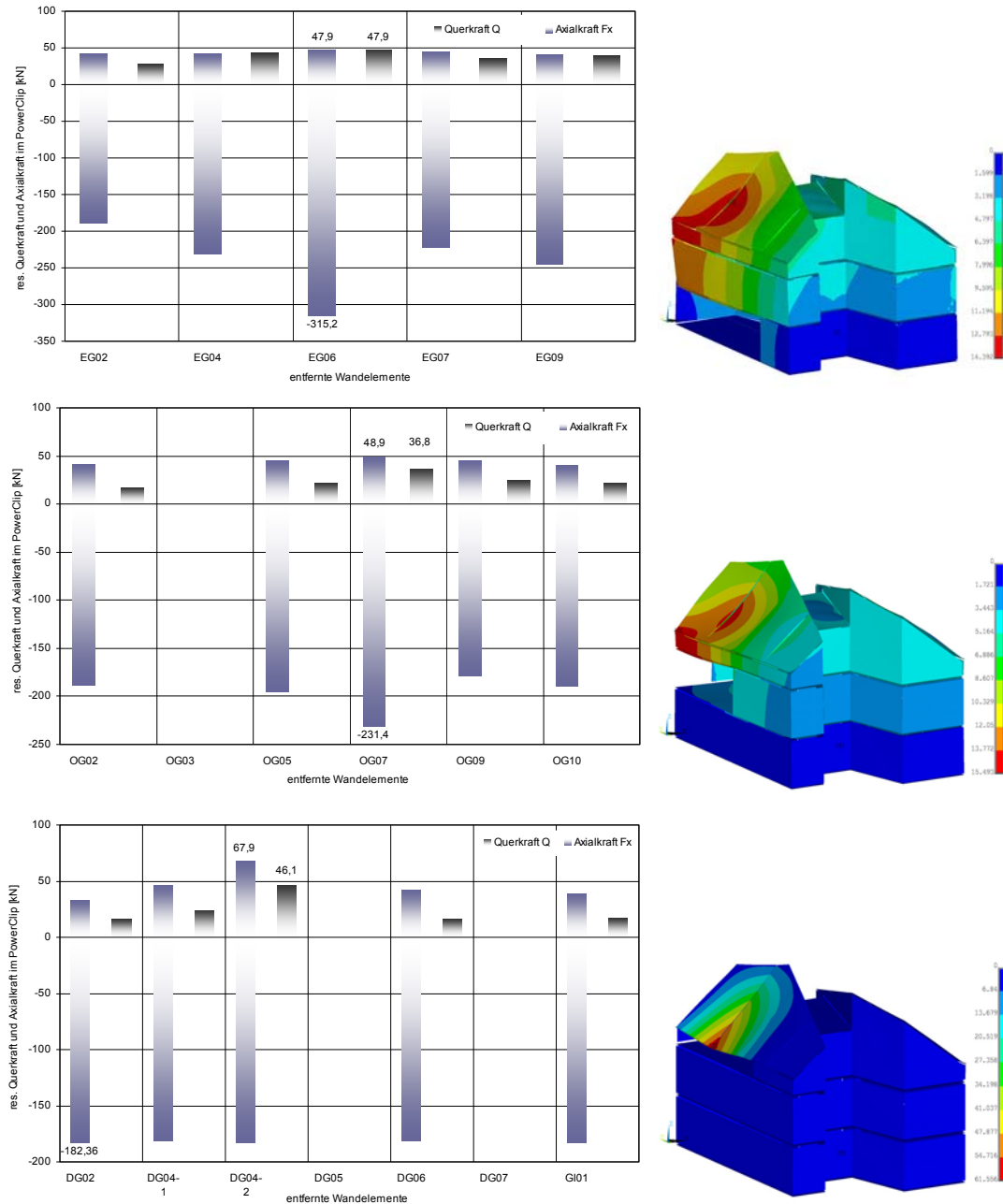


Abb. 9-43 Maximale Reaktionskräfte in den PowerClips infolge Ausfall eines Wandelementes

Die maximalen Schnittkräfte der PowerCons-tr treten gemäß Abb. 9-44 in denselben Versagensszenarien auf, für die auch die Maximalbelastung der PowerClips-tr detektiert wurde. Gegenüber den Bemessungsrelevanten Lasten aus den vorherigen Lastfällen ergeben sich eine Steigerung der Querkraft von 50% auf 68 kN und effektiv sogar eine Reduktion der Axiallast von -10%.

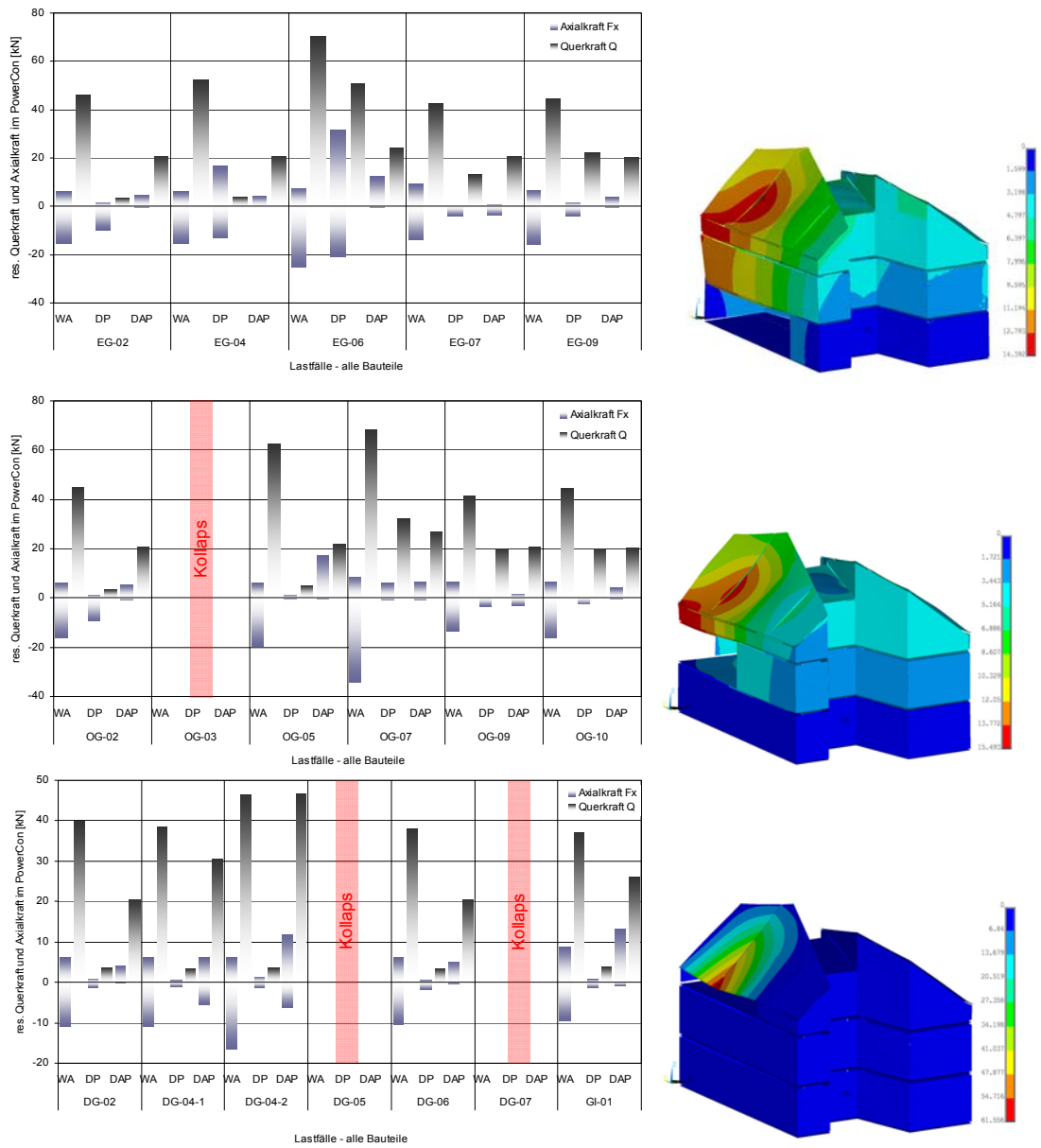


Abb. 9-44 Maximale Reaktionskräfte in den PowerCons infolge Ausfall eines Wandelements

Die Verbindungssystematik wird durch die Querkraft unter normaler Nutzlast nur gering ausgelastet, so dass sich die berechnete Steigerung der Lasten für die Verbindung als unproblematisch darstellt. Die berechneten Axiallasten liegen in einer ähnlichen Größenordnung, wie die bemessungsrelevanten Lasten, so dass auch hier die Funktion der Verbindung gewährleistet werden kann. Unzureichend geklärt ist, ob der Berechnungsabbruch aufgrund einer Verbindungsüberbeanspruchung oder infolge eines statischen Systemversagens erfolgte.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit befasst sich mit einem Konzept zur Steigerung der Nachhaltigkeit von Betonbauweisen. Grundlage hierfür ist die einschalige Ausbildung von Außenwandelementen mit einem tragenden und dämmenden Leichtbeton auf der Basis von Aerogelzuschlägen und der lösbaren Verbindung der Elemente mit Hilfe eines neuartigen Verbindungssystems. Aufgrund des umfangreichen Themas liegt der Anspruch der Arbeit in der vertiefenden Einführung der Einzelaspekte sowie in der plausiblen Darstellung der inhaltlichen Abhängigkeiten.

Die Anwendung einer neuen Leichtbetontechnologie ist sinnvoll, da das Leistungspotential bekannter Materialien zunehmend hinter der Forderung aktueller Verordnungen zurückbleibt und das Entwicklungspotential nahezu erschöpft ist. Leichtbeton mit Aerogelzuschlag dagegen ermöglicht einen einschaligen Wandaufbau, der eine große Vereinfachung der Planungs- und Konstruktionsarbeit beinhaltet. Gleichzeitig erlaubt die Aufhebung der Schichtentrennung größere Freiheiten bei der Integration der Wände. Das neue Betonmaterial kann uneingeschränkt an der Oberfläche mit den bekannten Nachbearbeitungstechniken gestaltet werden. Die oberflächenfertige Herstellung der Elemente spart somit nachfolgende Gewerke des Fassadenaufbaus ein. Durch die Integration der Elemente mit Medien erreicht man auf diese Weise eine effektiv frühere Fertigstellung von Gebäuden, da auch Gewerke des Innenaufbaus entfallen können. Damit verbunden ist die Verpflichtung zur sorgfältigen Handhabung der Elemente durch den Hersteller und das Montageteam, wie sie bei Architekturbetonelementen bereits üblich ist.

Die lösbare Verbindungstechnik zielt auf den Einsatz vorgefertigter Betonelemente. Die Verlegung der Herstellungsarbeiten von der Baustelle ins Werk ermöglicht eine verbesserte Qualität der Bauteile, sichert den umweltgerechten Umgang mit Produktionsmaterialien und erlaubt die Anwendung einer breiteren Nachbearbeitungspalette auf die Elemente. Die individualisierte Herstellung durch den Einsatz einer konsistenten Computertechnologie in Planung und Fertigung nach den Vorstellungen des Planers ist Stand der Technik. Das neuentwickelte Verbindungssystem erlaubt unter Berücksichtigung der Toleranzen im Betonbau eine sofort kraftschlüssige, justierbare und reversible Verbindung von Betonelementen. Als Entwicklungsgrundlage flossen die im Forschungsprojekt gesammelten Erfahrungen mit dem bestehenden Verbindungssystem ein.

Die auftretenden Kräfte in der punktuellen Verbindung sind im Gegensatz zur vermörtelten Fuge wesentlich größer, können aber durch die Ausbildung einer geeigneten Rückverankerung in das Wandelement eingeleitet werden. Grundsätzlich ermöglicht das Konzept eine statisch sichere Verbindung der Elemente. Infolge der mechanisch wirkenden Zugverankerung über die Verbindungsmittel ergeben sich besondere Vorteile des Systems in Hinblick auf die zu übertragenden Zugkräfte unter Erdbeben und für den Nachweis der Systemrobustheit.

Gerade im Themenbereich des erdbebensicheren Bauens steckt noch unerforschtes Potential in der Verbindungstechnik. Durch die nachgiebige Lagerung der Einbaudosen

im Bauteil mit beispielsweise einer Ummantelung mit einer Neoprenschicht kann insbesondere durch einen dämpfenden Fugenaufbau die kinetische Energie eines Erdbebens wirksam dissipiert werden. Diese Effekte müssen jedoch in dynamischen Simulationen nachgewiesen und quantifiziert werden, was im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgte.

Die entwickelten Verbindungsmittel stellen eine Prinziplösung dar, auf deren Grundlage sich ein funktionsfähiges System entwickeln lässt. Dieser Schritt kann nur in Zusammenarbeit mit einem Unternehmen erfolgen, das in die abschließenden Entwicklungsarbeiten involviert wird und die Etablierung des Systems am Markt übernimmt.

Weiterführende Forschungsprojekte haben die Entwicklung von Aerogelbeton zu einem anwendbaren Werkstoff im Bauwesen zum Ziel. Das bereits gestartete und vom DBU unterstützte Forschungsvorhaben: „Aerogelbeton - hochdämmender und tragender Werkstoff im Hochbau“ vergleicht die Umweltwirkung des Materials mit bestehenden Lösungen und ermittelt aussagekräftige Werkstoffkenngrößen.

11 Literatur

- [1] *Anderson, M., Anderson, P.:* Prefab prototypes. Site-specific design for offsite construction. New York: Princeton Architectural Press 2007.
- [2] *Atkins, P. W., Paula, J. de:* Physikalische Chemie. Weinheim: Wiley-VCH 2006.
- [3] *Bachmann, H., Steinle, A., Hahn, V.:* Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau. In: Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J.-D. (Hg.): Betonkalender /// Beton-Kalender. Konstruktiver Hochbau Aktuelle Massivbaunormen /// 98,2. Konstruktiver Hochbau, aktuelle Massivbaunormen. Berlin: Ernst & Sohn, S. 151–336.
- [4] *Bergdoll, B., Christensen, P., Broadhurst, R.:* Home delivery. Fabricating the modern dwelling ; [published in conjunction with the exhibition "Home Delivery: Fabricating the Modern Dwelling", at The Museum of Modern Art, New York, July 20 - October 20, 2008] /// Fabricating the modern dwelling. New York: Birkhäuser; Museum of Modern Art 2008.
- [5] *Bernhardt, C., Vonau, E.:* Zwischen Fordismus und Sozialreform. Rationalisierungsstrategien im deutschen und französischen Wohnungsbau 1900–1933. <http://www.zeithistorische-forschungen.de/16126041-Bernhardt-Vonau-2-2009>.
- [6] *Brandenburg, H.:* Verbindungen ohne Mörtelverguß bei Stahlbeton-Großtafel-Bausystemen. Problematik und Möglichkeiten. Univ., Diss.–Karlsruhe, 1973. Wiesbaden: Bauverl. 1973.
- [7] Nanogel. Aerogel matting agent. Boston 2003.
- [8] Nanogel translucent Aerogel. TLD 100, 101, 102, 301, 302. Boston 2010.
- [9] *Dallmann, J.:* Untersuchung der Wiederverwendungsmöglichkeiten von demonstrierenden Fertigteilelementen aus Wohnungsbautypen der ehemaligen DDR für den Einsatz im Wohnungsbau. [Endbericht]. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl 2005.
- [10] *Dechantsreiter, U.:* Aufbau eines Netzwerkes zur Wiederverwendung von gebrauchten Bauteilen in Deutschland. Ergebnisbericht ; Projektförderung von 2006 - 2009. Bremen ca. 2009].
- [11] *Deutsches Institut für Normung:* DIN 18203-1; Toleranzen im Hochbau Teil 1: Vorgefertigte Teile aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Berlin: Beuth (April 1997).
- [12] *Deutsches Institut für Normung:* DIN-EN 1097-3; Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Berlin: Beuth (Juni 1998).
- [13] *Deutsches Institut für Normung:* DIN 18007; Abbrucharbeiten Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche. Berlin: Beuth (Mai 2000).

- [14] *Deutsches Institut für Normung*: DIN EN 12667; Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät. Berlin: Beuth (Mai 2001).
- [15] *Deutsches Institut für Normung*: DIN 1055-4; Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten. Berlin: Beuth (März 2005).
- [16] *Deutsches Institut für Normung*: DIN 4149; Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Berlin: Beuth (April 2005).
- [17] *Deutsches Institut für Normung*: DIN 1055-5; Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 5: Schnee- und Eislasten. Berlin: Beuth (Juli 2005).
- [18] *Deutsches Institut für Normung*: DIN 18202; Toleranzen im Hochbau - Bauwerke. Berlin: Beuth (Oktober 2005).
- [19] *Deutsches Institut für Normung*: DIN 1055-3; Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 3: Eigen- und Nutzlasten für Hochbauten. Berlin: Beuth (März 2006).
- [20] *Deutsches Institut für Normung*: DIN 18540; Abdichten von Außenwandfugen im Hochbau mit Fugendichtstoffen. Berlin: Beuth (Dez 2006).
- [21] *Deutsches Institut für Normung*: DIN V 18500; Betonwerkstein – Begriffe, Anforderungen, Prüfung, Überwachung. Berlin: Beuth (Dezember 2006).
- [22] *Deutsches Institut für Normung*: DIN V 4108-4; Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte. Berlin: Beuth (Juni 2007).
- [23] *Deutsches Institut für Normung*: DIN EN 14992; Betonfertigteile - Wandelemente. Berlin: Beuth (Juli 2007).
- [24] *Deutsches Institut für Normung*: DIN 1045-1; Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Berlin: Beuth (August 2008).
- [25] *Deutsches Institut für Normung*: DIN 18800-1; Stahlbauten Bemessung und Konstruktion. Berlin: Beuth (November 2008).
- [26] *Deutsches Institut für Normung*: DIN 18542; Abdichten von Außenwandfugen mit imprägnierten Fugendichtungsbändern aus Schaumkunststoff. Berlin: Beuth (Juli 2009).
- [27] *Deutsches Institut für Normung*: DIN EN 1991-1-7; Eurocode 1: Einwirkung auf Tragwerke Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen. Berlin: Beuth (Dezember 2010).
- [28] *Duran, S. C.*: Prefab houses - Fertighäuser. Köln, London: Taschen 2009.
- [29] *Enoekl, V.*: Entwicklung eines tragfähigen, beliebig formbaren Baustoffes mit sehr geringer Wärmeleitfähigkeit für den Wohnungs- und Industriebau. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben 03E - 8504 - A. Stuttgart Juli 1988.
- [30] *Faust, T.*: Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Ernst & Sohn 2003.

- [31] *Filipaj, P.*: Architektonisches Potential von Dämmbeton. Zürich: vdf Hochsch.-Verl. an der ETH 2006.
- [32] *Fricke, J.*: Organische Aerogele. *Spektrum der Wissenschaft* (1992), S. 14–15.
- [33] *Fritz, O.*: Kundenindividuelle Massenproduktion in der Architektur. *Industrielles Bauen. baublatt* 116 (2005), S. 12–15.
- [34] *Garrecht, H., Gilka-Bötzow, A., Wetzel, M.*: Haufwerksporige Leichtbetone (LAC2) mit minimierter Rohdichte. In: FBF Betondienst (Hg.): *Concrete solutions*. 55. Betontage 2011: bauverlag, S. 116–119.
- [35] *Geisenhanslüke, C., Schmidt, M., Teichmann, T.*: Optimierung der Packungsdichte des Feinstkorns für Ultra-Hochleistungs- und selbstverdichtende Betone. In: Schmidt, M., Fehling, E. (Hg.): *Ultra high performance concrete (UHPC). 10 years of research and development at the University of Kassel - 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel*. Kassel: Kassel Univ. Press, S. 165–183.
- [36] *Geiss, G., Müller, H.-K., Prass, W., Scheunemann, U., Zimmermann, A.*: Aerogelhaltige Zusammensetzung, Verfahren zu Ihrer Herstellung sowie ihrer Verwendung. 11 (10.10.1995).
- [37] *Gross, J., Fricke, J.*: Thermal expansion of carbon and silica aerogels above room temperature. *Journal of non-crystalline solids* 186 (1995), S. 301–308.
- [38] *Hasslinger, W.*: Demountable and re-Erectable Precast Reinforced Concrete Buildings. In: Reinhardt, H.-W., Bouvy, J. (Hg.): *Demountable concrete structures. A challenge for precast concrete. Proceedings of the international symposium held at Rotterdam, The Netherlands, May 30-31, 1985*. Delft: Delft University Press, S. 37–49.
- [39] *Heinemann, U.*: Wärmetransport in semitransparenten nichtgrauen Medien am Beispiel von SiO₂-Aerogelen. Würzburg 1993.
- [40] *Homann, M.*: Porenbeton-Handbuch. Planen und Bauen mit System. Gütersloh: Bauverl. 2008.
- [41] *Huyghe, G.*: Demountable Construction in Precast concrete. In: Reinhardt, H.-W., Bouvy, J. (Hg.): *Demountable concrete structures. A challenge for precast concrete. Proceedings of the international symposium held at Rotterdam, The Netherlands, May 30-31, 1985*. Delft: Delft University Press, S. 241–256.
- [42] *Iken, H. W., Lackner, R. R., Zimmer, U. P., Wöhl, U.*: Handbuch der Betonprüfung. Anleitungen und Beispiele. Düsseldorf: Verl. Bau + Technik 2003.
- [43] *Jahn, K.-J.*: Konstruktives Fugenabdichtungs-System für den Betonfertigteiltbau. In: Ruhnau, R. (Hg.): *Ingenieur-Hochbau. Berichte aus Forschung und Praxis. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr. Erich Cziesielski*. Düsseldorf: Werner, S. 203–208.
- [44] *Junghanns, K.*: Das Haus für alle. Zur Geschichte der Vorfertigung in Deutschland. Berlin: Ernst 1994.

- [45] *Just, A.*: Untersuchungen zur Weiterentwicklung von chemisch aufgetriebenen, lufthärtenden, mineralisch gebundenen Schäumen. Aachen: Shaker 2008.
- [46] *Koebel, M.*: Silica Aerogels as high-performance insulation materials: Structure-property relationship elucidated with synchrotron SAXS. Dübendorf (CH) 17.10.2008.
- [47] *Krell, K.-H.*: Maßabweichungen bei Stahlbetonfertigteilen als Beitrag zur Frage der Toleranzen im Bauwesen. Dissertation. Dresden 1954.
- [48] *Krell, K.-H.*: Regeln für die Toleranzanwendung. Teil 1. Bautechnik (1962), S. 126–135.
- [49] *Künzel, E., Kott, M.*: Produktionsintegrierter Umweltschutz im Bereich des Hochbaus der Beton- und Fertigteilindustrie. Projekt PRODOMO. Weimar 2001.
- [50] *Künzel, H.*: Wärme- und Feuchteschutz. Wiesbaden 2003.
- [51] *Leydecker, S., Kölbl, M.*: Nanomaterialien. In Architektur, Innenarchitektur und Design. Basel: Birkhäuser 2008.
- [52] *Mangold, D.*: Integrales Energiekonzept und Bauphysikalische Beratung für das Forschungsvorhaben "HOMES(24) - Das schnellste Haus der Welt". Stuttgart März 2010.
- [53] *Middendorf, B.*: Ultraporcrete.
- [54] *Middendorf, B., Just, A.*: Hochfester Schaumbeton - Neue Möglichkeiten im Betonbau. In: FBF Betondienst (Hg.): Concrete solutions. 55. Betontage 2011: bauverlag, S. 124–125.
- [55] *Müller, G., Groth, C.*: Grundlagen. Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEM-Anwendungen - Lösungen mit dem Programm ANSYS Rev. 9/10 ; mit zahlreichen Beispielen auf CD-ROM. Renningen: expert-Verl. 2007.
- [56] *Müller, H. S., Reinhardt, H.-W.*: Beton. In: Bergmeister, K., Fingerloos, F. D., Wörner, J.-D. (Hg.): Betonkalender /// Beton-Kalender. Konstruktiver Hochbau Aktuelle Massivbaunormen /// 98,2. Konstruktiver Hochbau, aktuelle Massivbaunormen. Berlin: Ernst & Sohn, S. 1–149.
- [57] *Müller, H. S., Haist, M.*: Sichtbetone aus Leichtbeton. In: Müller, H. S., Flasche, C. (Hg.): Sichtbeton - Planen, Herstellen, Beurteilen. Symposium; 2. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Universität Karlsruhe (TH) 17. März 2005 /// 2. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Universität Karlsruhe (TH), 17. März 2005. Karlsruhe: Universitätsverlag; Univ.-Verl. Karlsruhe, S. 57–70.
- [58] *Nerdinger, W.* (Hg.): Wendepunkte im Bauen. Von der seriellen zur digitalen Architektur /// Von der seriellen zur digitalen Architektur ; [Publikation zur Ausstellung des Architekturmuseums der TU München in der Pinakothek der Moderne, 18. März bis 13. Juni 2010]. München: Ed. Detail 2010.
- [59] *Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN*: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil6. Berlin: Beuth (Dezember 2005).

- [60] *Peck, M.*: Sichtbeton. Techniken der Flächengestaltung. DETAIL (2008), S. 72–77.
- [61] Concrete Connections. Produktkatalog 2010.
- [62] *Pich-Aguilera, F., Batlle, T., Casaldaliga, P., Prats, O.*: Das "Casa-Kyoto"-Projekt in Spanien. Beton + Fertigteil-Technik (2009), S. 32–37.
- [63] *Probst, H., Schädlich, C.*: Walter Gropius. Ausgewählte Schriften. Berlin: Ernst 1988.
- [64] *Prochiner, F.*: Wandverbindung mit System. DBZ 49 (2001), S. 96–98.
- [65] *Prochiner, F.*: Homes 24. Die (R)Evolution des industriellen Bauens. Dissertation. München 10.03.2006.
- [66] *Ratke, L.*: Herstellung und Eigenschaften eines neuen Leichtbetons: Aerogelbeton. Beton und Stahlbetonbau 103 (2008), S. 236–243.
- [67] *Ratke, L.*: Aerogelbeton. Ein neuer Leichtbaustoff. Köln 08.12.2009.
- [68] *Reim, M.*: Strukturuntersuchungen und Charakterisierung der optischen und thermischen Eigenschaften von Silica-Aerogelgranulaten sowie deren Anwendung in transluzenten Fassadensystemen. Aachen: Shaker 2003.
- [69] *Reinhardt, H.-W.*: Sachstandbericht - nachhaltig Bauen mit Beton. Berlin: Beuth 2001.
- [70] *Sagmeister, B.*: Rezeptoptimierung von haufwerksporigen Leichtbeton. Beton + Fertigteil-Technik (2000).
- [71] *Schlaich, M.*: Infraleichtbeton. Beton und Stahlbetonbau 103 (2008), S. 175–182.
- [72] *Schmid, T., Testa, C.*: Bauen mit Systemen. Zürich: Artemis Zürich 1969.
- [73] *Schneider, J.*: Joseph Paxton. Wegbereiter und Anwender der industriellen Vorfertigung, Konstrukteur des Kristallpalastes. Deutsche Bauzeitung (2005), S. 70–75.
- [74] *Schnell, J., Breit, W.*: Small house village Kaiserslautern. Experimentalgebäude mit kerngedämmten Leichtbeton. In: FBF Betondienst (Hg.): Concrete solutions. 53. Betontage 2009: bauerlag, S. 118–119.
- [75] *Schramm, W.*: Endbericht zum Forschungsprojekt Technikbewertung von Aerogelen. Wien: Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie 1993.
- [76] *Schubert, U., Hüsing, N.*: Aerogele - luftige Materialien: Chemie, Struktur und Eigenschaften. ISSN 0044-8249. Angewandte Chemie 110 (1998), S. 22–47.
- [77] *Thienel, K.-C.*: Sonderbetone. Gefügedichter und haufwerksporiger Leichtbeton. München 2010.
- [78] *Thomas Teichmann*: Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein. Dissertation. Kassel 07.07.2008.

- [79] *Unruh, H.-P., Nagora, A.*: Rückbau von Plattenbauten. Vorbereitung und Gestaltung der Baustellenprozesse bei De- und Remontagen ; mit 107 Tabellen. Braunschweig: Vieweg 2002.
- [80] *Wachsmann, K.*: Wendepunkt im Bauen. Stuttgart: DVA 1989.
- [81] *Weiß, G.*: Demontierbare Gebäude aus Beton: Festschrift zum 60. Geburtstag von H.-W. Reinhardt. Hamburg: Libri Bod, S. 392–409.
- [82] *Weller, K.*: Industrielles Bauen. Stuttgart: Kohlhammer 1986.
- [83] *Wendehorst, R., Vollenschaar, D.*: Baustoffkunde. Wiesbaden: [Teubner] 2006.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1	Wohnbauprojekt PileUp (links) und Wohnbau in Neu-Ulm mit fassadenfertigen Bauteilen	11
Abb. 3-2	Bausteine des Integrierten Konzepts	13
Abb. 3-3	Lösbare Verbindungen des IFF-Projekts PRODOMO für Skelett- und Wandbauteile [49]	15
Abb. 3-4	Casa Kyoto (HP Pich-Aguilera) - Demontierbares Gebäude aus Betonfertigteilen (aus [28])	16
Abb. 3-5	Fügungsprinzip der Leitungsführung in der Fuge (aus [65])	17
Abb. 3-6	Ablauf eines integrierten Planungsprozesses	19
Abb. 3-7	Bauraum (rot) für Leitungsführung in verschiedenen Wandaufbauten.....	21
Abb. 3-8	Gebaute Beispiele in monolithischer Leichtbetonbauweise (von links): Haus Gartmann - Haus Trager - Haus Schlaich (Quelle Liapor).....	21
Abb. 4-1	Porigkeit von Leichtbeton (Liapor, BV Porenbeton)	24
Abb. 4-2	Kornrohrichtebereiche ausgewählter Zuschläge	25
Abb. 4-3	Kornfestigkeit Ca und Wärmeleitfähigkeit λ ausgewählter Zuschläge.....	26
Abb. 4-4	Misapor-Einzelkorn (Misapor) und Zuschlagsmischung.....	27
Abb. 4-5	Unterschied in der Wasserzugabe von Leichtbeton und Normalbeton (nach [77])	28
Abb. 4-6	Tragverhalten in Abhängigkeit vom E-Modul (nach [30])	30
Abb. 4-7	Bilineare Leichtbetondruckfestigkeit (nach [83]).....	30
Abb. 4-8	optimierte Porenstruktur Ultraporcrete (aus [53])	32
Abb. 4-9	Herstellerangaben und Forschungsergebnisse der Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit verschiedener Leichtbetonprodukte im Vergleich (Referenzierung der Einzelwerte siehe Anhang A.1; S.166).....	34
Abb. 5-1	Stadien der unterkritischen Trocknung (von links) – nasser Gelkörper – maximale Schrumpfung aufgrund Trocknung – getrockneter Gelkörper nach Springback (Fa. Cabot)	37
Abb. 5-2	Wirksamkeit der drei Wärmetransportmechanismen in Abhängigkeit von der Aerogeldichte (nach [32])	39
Abb. 5-3	Qualitativer Aufbau (nach [39]) - REM-Aufnahme (HP DLR) einer Aerogelstruktur	39
Abb. 5-4	Einfluss einer Füllkörnung auf die Sieblinie (links) und die Packungsdichte (rechts) nach [35]	42
Abb. 5-5	Optimierung der Packungsdichte [78] - Beeinflussung der Viskosität [35]	42
Abb. 5-6	Aerogelpartikel: Grade TLD 302 (links), Grade TLD 102 (Mitte), Grade Enova MT1100	44
Abb. 5-7	Summenkurve des Siebdurchgangs für TLD 301 - Proben 1-3 (Messwerte Cabot).....	45
Abb. 5-8	Anwendungsbereiche verschiedener Analysemethoden der Kornform und -größe	46
Abb. 5-9	Vergleich von Bildanalyse und Laserbeugung anhand der Summenkurven zweier verschiedener Aerogelfraktionen (Analysenvergleich der Fa. Sympatek)	47
Abb. 5-10	Experimentelle Packungsdichtermittlung für zwei Aerogelfraktionen	48
Abb. 5-11	Herstellung der Aerogelprobekörper im Betonlabor	49

Abb. 5-12 Kumulierter Gewichtsverlust (relativ) der Proben bei Trocknung	51
Abb. 5-13 U-Wert einer Modellwand mit 74 Vol.-% Aerogelgehalt in Abhängigkeit von der Wandstärke mit derzeit gültigen Grenzwerten.....	53
Abb. 5-14 rot pigmentierte Probekörper (Bayanian, Huang, Schneider, Yan, Zheng) Pigmentanteil 4,5 % (von links) nicht saugend - saugend - gestrahlt - nicht saugend strukturiert (Foto Miklautsch)	55
Abb. 5-15 Photobetonmotiv (Fahlbusch, Ruppert) gelaserte Schablone - Einbringung des Verzögerers – Endergebnis (Foto Miklautsch)	57
Abb. 5-16 sandgestrahlter Probekörper (Pelzer) – abgeklebter und gestrahlter Probekörper - Strahlpistole und Strahlmittelreservoir – Endergebnis (Foto Miklautsch)	57
Abb. 5-17 Gesäuertes Probekörper (Bischofberger, Popovic) - Aufbringen der Säure – Abwaschen – Endergebnis (Foto Miklautsch).....	58
Abb. 5-18 Mechanisch bearbeitete Probekörper (Bozza) – gestockt (links) und poliert (rechts); (Fotos Miklautsch)	59
Abb. 5-19 Lichtleitender Probekörper (Hermann) durch Einlegen transparenter Kunststoffprofile – Oberfläche geschliffen – Endergebnis (Foto Miklautsch)	59
Abb. 6-1 Konstruktive (links) und dauerelastisch gedichtete (rechts) Fugenausbildung (Prinzip).....	63
Abb. 6-2 Begriffe und deren Anwendung nach DIN 18202 [18]	64
Abb. 6-3 Gaußsche Normalverteilung – Ableitung der Toleranzspanne	65
Abb. 6-4 auftretende Toleranzen und deren Wirksamkeit nach Gleichung 3.....	66
Abb. 6-5 Durchführung der Laserentfernungsmessung - Anlage von Winkel und Messgerät auf das Reflektionsziel	68
Abb. 6-6 Erscheinungsformen von Stoßfugen – passgenau (links) – Versatz (Mitte) – Eindellung (rechts)	69
Abb. 6-7 Übersicht über die ermittelten Meßgrößen durch die Bauteilevaluation	69
Abb. 6-8 Tabelle zur Auswertung des Bauteilmaßes	70
Abb. 6-9 Stichmaße S_i an den gestoßenen Schalelementen und Winkelabweichung A und B der Wand jeweils für Messung 1 und 2.....	71
Abb. 6-10 Häufigkeitsverteilung der gemessenen Stichmaße S_i am Schalungsstoß ...	72
Abb. 6-11 Häufigkeitsverteilung der Längenmaßdifferenz L_{unt} und L_{ob} von Solllänge – Istlänge für Messung 1 und Messung 2.....	73
Abb. 6-12 Häufigkeitsverteilung der Breitenmaßdifferenz B_{re} und B_{li} von Sollbreite – Istbreite für Messung 1 und Messung 2.....	73
Abb. 6-13 Prozentuale Stichmaßverteilung A an der linken Schalungsseite	74
Abb. 6-14 Prozentuale Stichmaßverteilung B an der rechten Schalungsseite.....	74
Abb. 6-15 Funktionszonen für die konstruktiv und dauerelastisch abgedichtete Fuge	77
Abb. 6-16 Isothermen- und Farbplot der Wandecke mit Verbinder - durchgehendes Fugenband	80
Abb. 6-17 Isothermen- und Farbplot der Wandecke mit Verbinder – durch schmales Fugenband abgetrennte Luftschicht.....	80
Abb. 6-18 Schnittkräfte in den Fugen aufgrund horizontaler und vertikaler Lasten	81
Abb. 6-19 Wandaufbau Prototyp: zwei Stockwerke und Dachgeschoss mit optimiert platzierten PowerClips	82
Abb. 6-20 Montagefolge einer horizontalen Wandfuge	84

Abb. 6-21 Montagefolge einer vertikalen Wandfuge	85
Abb. 7-1 Komponenten der Prüfmaschine Schenck Hydropuls – Rahmen mit Prüfzylinder	88
Abb. 7-2 Aufbau und Maße des Munitec PowerCon.....	88
Abb. 7-3 PowerCon (m) und (f) mit Distanzplatte (d=5 mm) und O-Ringe (schwarz).....	89
Abb. 7-4 Versuchsaufbau - PowerCon längs unter zentrischer Zug- und Drucklast...	90
Abb. 7-5 Kraft-Verformungskurven unter zentrischer Zugbelastung.....	91
Abb. 7-6 Kraft-Verformungskurven unter zentrischer Druckbelastung	91
Abb. 7-7 Zentrische Druck-Zug Wechselbeanspruchung eines PowerCons	92
Abb. 7-8 Querschnitte eines PowerCon von -20 mm bis +40 mm in der Schrittweite 20 mm.....	92
Abb. 7-9 Exzentrizität e des Lastvektors über die Zuglast.....	93
Abb. 7-10 Exzentrizität e des Lastvektors über die Drucklast.....	94
Abb. 7-11 Versuchsaufbau - PowerCon längs unter exzentrischer Zug- und Drucklast	94
Abb. 7-12 Moment-Rotationskapazität der Verbindung V1-V3 positives Moment – längs.....	95
Abb. 7-13 Moment-Rotationskapazität der Verbindung V5-V7 positives Moment – längs.....	95
Abb. 7-14 Moment-Rotationskapazität der Verbindung V1-V3 negatives Moment – längs.....	96
Abb. 7-15 Moment-Rotationskapazität der Verbindung V5-V7 negatives Moment – längs.....	96
Abb. 7-16 Versuchsaufbau - PowerCon quer unter exzentrischer Drucklast.....	97
Abb. 7-17 Moment - Rotationskapazität der Verbindung V1-V3 negatives Moment – quer	97
Abb. 7-18 Moment - Rotationskapazität der Verbindung V5-V7 negatives Moment – quer	98
Abb. 7-19 Versuchsaufbau PowerCon längs unter schräg angreifender Zugbelastung.....	99
Abb. 7-20 Kraft-Verformung des Sperrstifts für PowerCon unter Schrägzug.....	99
Abb. 7-21 Aufbau und Maße des Munitec-PowerClip	101
Abb. 7-22 PowerClip (f) mit Gewindeteil in Justierstellung 14mm, 7mm und 0mm sowie PowerClip (m) mit Rückverankerungsschraube	101
Abb. 7-23 Versuchsaufbau - PowerClip unter zentrischer Zug- und Drucklast.....	102
Abb. 7-24 Kraft-Verformungslinien unter Drucklast für PowerClips in verschiedenen Justierstellungen	103
Abb. 8-1 Toleranzausgleich durch Exzenterprinzip	106
Abb. 8-2 Darstellung der Abhängigkeit von Verdrehung der Dübelhälften und der daraus resultierenden Verschiebung.....	106
Abb. 8-3 freie Toleranzeinstellung durch eine kombinierte Verdrehung (1) und Verschiebung (2) der Dübel	107
Abb. 8-4 Montagesequenz eines PowerClip-tr	108
Abb. 8-5 PowerClip-tr (m) und (f) mit Exzenterdübel und Einbaudose	109
Abb. 8-6 Aufbau und Maße des PowerCon-tr.....	109
Abb. 8-7 Montagesequenz eines PowerCon-tr	110

Abb. 9-1	Versuchsgebäude HOMES (24) Gegenüberstellung von FE- und CAD-Modell	114
Abb. 9-2	Integriertes Wandbauteil mit PowerCon und Medienverbinder in den seitlichen Fugen	116
Abb. 9-3	Idealisierte Kraft-Verformungslinien für nichtlineare Federn im FE-Programm	117
Abb. 9-4	Toleranzausgleich in der Fuge - dreistufiges System durch Distanzplatten	118
Abb. 9-5	Idealisierte Kraft-Verformungslinien für die FE-Modellierung der PowerClips	119
Abb. 9-6	Spannungsverteilung in den Mörtelfugen ermittelt über Kontaktelemente (rot)	120
Abb. 9-7	Anordnung der nichtlinearen Federkomponenten COMBIN 39 in der Fuge	120
Abb. 9-8	PowerClip: Einzelwerte der Axialkraft F_x - und der Querkraft Q für die Lastfälle 100-131 in der Fuge Wand Dachgeschoß – Dachplatte	121
Abb. 9-9	PowerClip: Maximale Axialkraft F_x - und Querkraft Q der Lastfälle 100-131 in der Fuge Wand Dachgeschoß – Dachplatte	121
Abb. 9-10	Fugenpressung (oben) und Haftreibung (unten) in der Mörtelfuge gegliedert nach Fugenebenen	122
Abb. 9-11	Vertikale Wandfuge mit PowerCon – Einzelwerte gegliedert nach Stockwerk	123
Abb. 9-12	Horizontale Deckenfuge mit PowerCon - Einzelwerte gegliedert nach Ebenen	124
Abb. 9-13	PowerCon: Maximale Axialkraft F_x und Querkraft Q der Lastfälle 100-131 kombiniert dargestellt für Wandelemente (WA), Deckenplatten (DP) und Dachplatten (DAP)	124
Abb. 9-14	Abweichung der Schnittkräfte im PowerClip (links) und PowerCon (rechts)	125
Abb. 9-15	Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerCons - Modelle S21-S24 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell	126
Abb. 9-16	Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerClips – Modelle S21-S24 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell	126
Abb. 9-17	Einzelwertverteilung (links) und Maximalwertdarstellung (rechts) von F_x und Q im PowerClip für unterschiedliche Angriffsrichtungen der Horizontalbeschleunigung	127
Abb. 9-18	Fugenpressung (links) und Haftreibung (rechts) in der Mörtelfuge gegliedert nach Fugenebenen	128
Abb. 9-19	Vertikale Wandfuge mit PowerCon - Einzelwerte gegliedert nach Stockwerken	128
Abb. 9-20	Horizontale Deckenfuge mit PowerCon - Einzelwerte gegliedert nach Ebenen	129
Abb. 9-21	PowerCon: Maximale Axialkraft N und Querkraft Q der Lastfälle 141-146 gegliedert nach Wandelemente (WA) - Deckenplatten (DP) - Dachplatte (DAP)	129
Abb. 9-22	Streuung der Schnittkräfte im PowerClip (links) und PowerCon (rechts) ...	130
Abb. 9-23	Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerCons – Modelle S21-24 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell	131

Abb. 9-24 Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerClips – Modelle S21-S24 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell.....	131
Abb. 9-25 3D-Isometrie des Beispielgebäude HOMES (24) mit punktuellen Verbindungsmitteln und FE-Modell S30.....	132
Abb. 9-26 Annahmen zur Last-Verformungslinie in Achs- und Querrichtung für den PowerClip-tr.....	133
Abb. 9-27 PowerClip-tr: Einzelwerte der Axialkraft F_x und der Querkraft Q für die Lastfälle 100-131 gegliedert nach Fugen (Einteilung gemäß Abb. 9-34) ...	134
Abb. 9-28 PowerClip-tr: Maximale Axialkraft F_x und Querkraft Q der Lastfälle 100-131; Vergleichende Betrachtung mit den Maximalwerten aus S21-24.....	134
Abb. 9-29 PowerCon-tr - vertikale Wandfuge - Einzelwerte gegliedert nach Stockwerken.....	135
Abb. 9-30 PowerCon-tr - Horizontale Deckenfuge - Einzelwerte gegliedert nach Ebenen.....	136
Abb. 9-31 PowerCon-tr: Maximale Axialkraft F_x und Querkraft Q der Lastfälle 100-131 kombiniert dargestellt für Wandelemente (WA), Deckenplatten (DP) und Dachplatten (DAP).....	136
Abb. 9-32 Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerCons – Modelle s00-s10 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell.....	137
Abb. 9-33 Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerClips tr – Modell s00-s10 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell.....	138
Abb. 9-34 Einzelwertverteilung von F_x und Q Im PowerClip-tr unter Erdbebenlast....	138
Abb. 9-35 Maximalwertdarstellung von F_x und Q im PowerClip-tr für unterschiedliche Angriffsrichtungen der Horizontalbeschleunigung.....	139
Abb. 9-36 Vertikale Wandfuge mit PowerCon-tr - Einzelwerte gegliedert nach Stockwerken.....	139
Abb. 9-37 Horizontale Deckenfuge mit PowerCon-tr - Einzelwerte gegliedert nach Ebenen.....	140
Abb. 9-38 PowerCon-tr: Maximale Axialkraft F_x und Querkraft Q der Lastfälle 141-146 kombiniert dargestellt für Wandelemente (WA), Deckenplatten (DP) und Dachplatten (DAP).....	140
Abb. 9-39 Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerCons-tr – Modelle s00-s10 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell.....	141
Abb. 9-40 Vergleich der maximalen Axial- und Querkraft der PowerClips-tr – Modelle s00-s10 Gegenüberstellung der Berechnung am unverformten (uv) und vorverformten (vv) Modell.....	141
Abb. 9-41 Resultierende Druckspannung σ_D im Beton infolge Axiallast und Querkraft auf die Einbaudose.....	142
Abb. 9-42 Detailausbildung eines PowerClip mit abgestuftem Festigkeitsbereich zur Einleitung der Punktlasten in das Wandelement.....	143
Abb. 9-43 Maximale Reaktionskräfte in den PowerClips infolge Ausfall eines Wandelements.....	145
Abb. 9-44 Maximale Reaktionskräfte in den PowerCons infolge Ausfall eines Wandelements.....	146
Abb. A-1 Verteilung der Verkehrslast p auf den Deckenelementen.....	164
Abb. A-2 Elastisches Antwortspektrum nach DIN 4149 [16].....	166
Abb. A-3 Unterseite Bodenplatte (BOPu).....	167

Abb. A-4	Lage der Verbinder in der Mittelebene der Bodenplatte (BOPm).....	168
Abb. A-5	Lage der Einbauteile auf Fuge der Oberseite Bodenplatte (BOPo).....	169
Abb. A-6	Lage der Einbauteile in der vertikale Fuge der Wandbauteile im Erdgeschoss (WaEG).....	170
Abb. A-7	Lage der Einbauteile auf Fuge der Unterseite Deckenplatte auf Erdgeschoß (DEP1u)	171
Abb. A-8	Lage der Verbinder in der Mittelebene der Deckenplatte über EG (DEP1m).....	172
Abb. A-9	Lage der Einbauteile auf Fuge der Oberseite Deckenplatte über EG (DEP1o).....	173
Abb. A-10	Lage der Einbauteile in der vertikale Fuge der Wandbauteile im OG (WaOG)	174
Abb. A-11	Lage der Einbauteile auf Fuge der Unterseite Deckenplatte auf OG (DEP2u).....	175
Abb. A-12	Lage der Verbinder in der Mittelebene der Deckenplatte über OG (DEP2m).....	176
Abb. A-13	Lage der Einbauteile auf Fuge der Oberseite Deckenplatte über OG (DEP2o).....	177
Abb. A-14	Lage der Einbauteile in der vertikale Fuge der Wandbauteile im DG (WaDG)	178
Abb. A-15	Lage der Einbauteile auf Fuge der Unterseite Deckenplatte auf Kern (DABAu)	179
Abb. A-16	Lage der Verbinder in der Mittelebene der Deckenplatte auf Kern (DABAm)	180
Abb. A-17	Lage der Einbauteile auf Fuge der Oberseite Deckenplatte über Kern (DABAo)	181
Abb. A-18	Lage der Einbauteile in der vertikale Fuge der Wandbauteile im Giebel (WaGi)	182
Abb. A-19	Lage der Einbauteile auf Fuge der Unterseite Dachplatte (DAPu).....	183
Abb. A-20	Lage der Verbinder in der Mittelebene der Dachplatte (DAPm).....	184
Abb. A-21	Oberseite Dachplatte (DAPo).....	185

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1 Ausprägungsunterschiede der Vorfertigung, Mechanisierung, Automatisierung und Industrialisierung in verschiedenen Baubereichen (nach [82]).....	9
Tab. 3-2 Komponenten des Munitec Verbindersystems	17
Tab. 4-1 Anwendungsbezogene Einteilung von Leichtbeton (aus [83]).....	23
Tab. 4-2 Kornform, übliche Durchmesser, Oberflächenbeschaffenheit und innere Struktur ausgewählter, marktüblicher Zuschläge.....	27
Tab. 5-1 Verfügbare Durchmesserabstufung von Aerogelgranulat [8].....	45
Tab. 5-2 Mittlere Korndurchmesser-Verhältnisse für mögliche Gerüst - Füller Kombinationen	47
Tab. 5-3 Rezeptur der Probekörper	50
Tab. 5-4 $\lambda_{10, tr}$ und Trockenrohdichte der Probekörper	52
Tab. 5-5 Festigkeit f_u der Probekörper AE-1 bis AE-3 und Ultraporcrete [45].....	52
Tab. 5-6 Anzahl und Art der Probekörper sowie Nachbearbeitungsmethode.....	55
Tab. 6-1 Anforderungen an Fugenkonstruktionen im Elementbau.....	62
Tab. 6-2 Herstellungstoleranzen von Betonfertigteilelementen nach DIN 18203-1 und DIN EN 14992.....	67
Tab. 6-3 Vergleich der Normwerte aus Tab. 6-2 und den Messergebnissen aus Abschnitt 6.2.3	75
Tab. 6-4 erforderliche Fugennennstärke F_N - min und max Fugendicke in [mm]	76
Tab. 6-5 Anforderungen an die Fugenkonstruktion [6].....	76
Tab. 6-6 funktionaler Aufbau einer trocken konzipierten Außenwandfuge.....	78
Tab. 6-7 Materialien und angesetzte Wärmeleitfähigkeit	79
Tab. 7-1 Werkstoffinformationen Material PowerCon und PowerClip	87
Tab. 7-2 Bezeichnung, Aufbau und Versuchsanzahl der untersuchten Verbindungsvarianten	89
Tab. 7-3 Bruchlasten und Versagensbilder PwClip verschiedener Justierzustände ...	102
Tab. 7-4 Ergebnisübersicht der Montageuntersuchungen	103
Tab. 8-1 Anforderungen an das Verbindungselement	105
Tab. 8-2 Übersicht über die Verbindungskomponenten und deren Mehrfachverwendung	111
Tab. 9-1 Übersicht der Modellserien für die Simulationsberechnung.....	113
Tab. 9-2 Materialparameter der Bauteile.....	115
Tab. 9-3 Übersicht der angesetzten faktorisierten Lastfallkombinationen.....	115
Tab. 9-4 Zuordnung der experimentellen Kraft-Verformungslinien zu den Modellvarianten der Serie 2	118
Tab. A-1 Quelle Werkstoffkenngrößen der Leichtbetonwerkstoffe zu Abb. 4-9	163
Tab. A-2 Temperaturverteilung der Bauteile	163
Tab. A-3 Druckbeiwerte und Belastung für Windanströmung mit 0°	164
Tab. A-4 Druckbeiwerte und Belastung für Windanströmung mit 90°	165
Tab. A-5 Wärmeausdehnungskoeffizienten der Komponenten und des Werkstoffs... ..	166
Tab. A-6 Ermittlung der Erdbebenbemessungslast.....	166

A Anhang

A.1 Referenzwerte Kapitel 4.4

Tab. A-1 Quelle Werkstoffkenngrößen der Leichtbetonwerkstoffe zu Abb. 4-9

Material	Projekt	Daten aus
Porenbeton	-	[40]
Schaumbeton	-	Forschungsprojekt „Homes 24“; [54]; [29]
Haufwerksporiger Leichtbeton	-	[22]; [70]
Gefügedichter Leichtbeton	Haus Gartmann	[31]
Gefügedichter Leichtbeton	Haus Schlaich	[71]

A.2 Anhang Lastannahmen

A.2.1 Temperaturbelastung

Die für den Temperaturlastfall gewählte Belastung entspricht einem heißen Sommertag mit Sonneneinstrahlung. Ausgehend von der Orientierung des Objekts wurde für die bestrahlten, dunklen Bauteile eine Oberflächentemperatur von 80°C angesetzt.

Tab. A-2 Temperaturverteilung der Bauteile

Verteilung der Temperaturbelastung	Temperatur T	Wert [°C]
	T ₁	rot 80
	T ₂	orange 70
	T ₃	blau 35
	T _{Ref}	hellblau 30
	T _{innen}	- 20

Die Referenzlufttemperatur liegt bei 30°C. Sowohl Dach- als auch Fensterflächen wurden mit dieser Temperatur beaufschlagt. Für diesen Lastfall interessierte nur die Verformung der einschaligen Wandelemente.

A.2.2 Verkehrslasten

Verkehrslasten wurden gemäß DIN 1055-3 [19] mit 1,5 kN/m² nach Kategorie A2 für Wohngebäude im Obergeschoß (OG) und Dachgeschoß (DG) in Ansatz gebracht. Um für die in den Deckenplattenfugen angeordneten PowerCons eine möglichst ungünstige Laststellung zu erzielen, wurde die Verkehrslast in drei unterschiedlichen Varianten angesetzt (Abb. A-1).

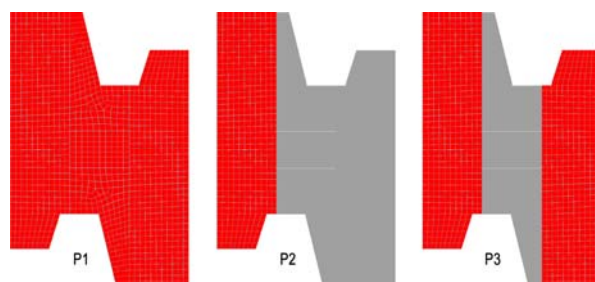
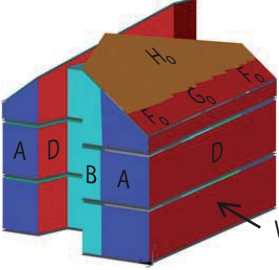
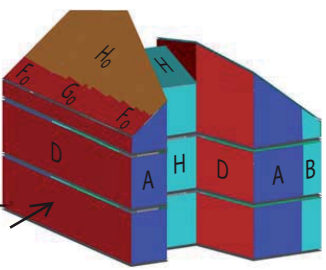
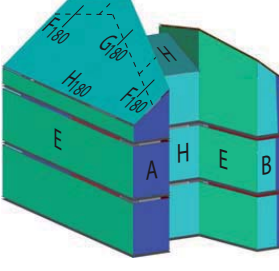
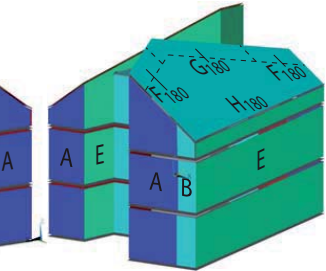


Abb. A-1 Verteilung der Verkehrslast p auf den Deckenelementen

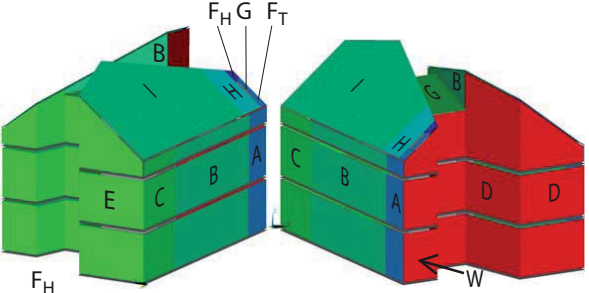
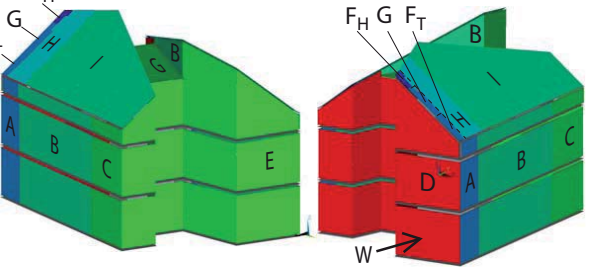
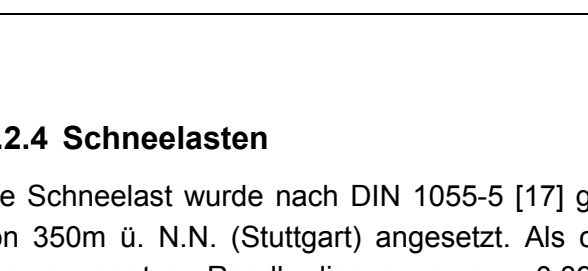
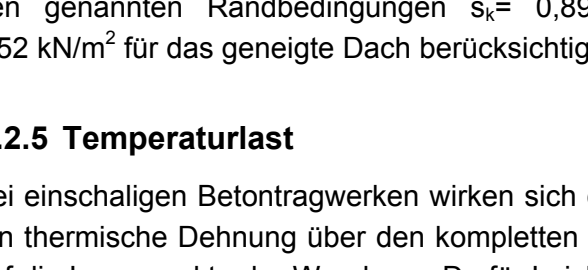
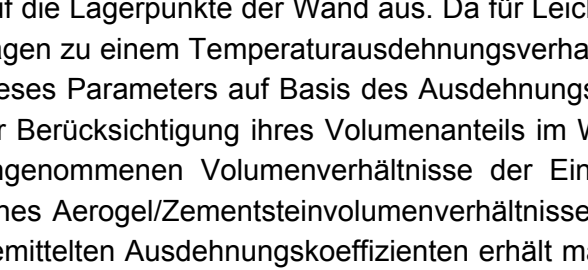
A.2.3 Windlasten

Die Windlasten wurden nach DIN 1055-4 [15] ermittelt. Die Druckbeiwerte wurden für die Anströmrichtungen 0° und 90° angesetzt. Tab. A-3 und Tab. A-4 gibt eine Übersicht der angesetzten Beiwerte und deren Verteilung. Der Staudruck kann vereinfacht für Gebäude unter 25m mit 0,5kN/m² gewählt werden.

Tab. A-3 Druckbeiwerte und Belastung für Windanströmung mit 0°

Einteilung der Lasteinzugsflächen	Druckbeiwert C_p	Belastung [kN/m ²]	
	A	-1,3	-0,65
	B	-0,8	-0,40
	C	0	0
	D	0,8	0,40
	E	-0,5	-0,25
	F ₀	0,7	0,35
	G ₀	0,7	0,35
	H ₀	0,5	0,25
	F ₁₈₀	-0,8	-0,40
	G ₁₈₀	-0,6	-0,30
	H ₁₈₀	-0,7	-0,35

Tab. A-4 Druckbeiwerte und Belastung für Windanströmung mit 90°

Einteilung der Lasteinzugsflächen	Druckbeiwert C_p	Belastung [kN/m ²]
	-1,3	-0,65
	-0,8	-0,40
	-0,5	-0,25
	0,8	0,40
	-0,5	-0,25
$F_{h,90}$	-1,8	-0,90
$F_{t,90}$	-1,3	-0,65
G_{90}	-1,4	-0,70
H_{90}	-1,0	-0,50
I_{90}	-0,9	-0,45

A.2.4 Schneelasten

Die Schneelast wurde nach DIN 1055-5 [17] gemäß Schneelastzone 2 für eine Höhe von 350m ü. N.N. (Stuttgart) angesetzt. Als charakteristische Schneelast wird unter den genannten Randbedingungen $s_k = 0,89 \text{ kN/m}^2$ für das Flachdach und $s_k = 0,52 \text{ kN/m}^2$ für das geneigte Dach berücksichtigt.

A.2.5 Temperaturlast

Bei einschaligen Betontragwerken wirken sich die Aufheizung der Außenseite und deren thermische Dehnung über den kompletten Wandquerschnitt und damit auch direkt auf die Lagerpunkte der Wand aus. Da für Leichtbeton mit Aerogelzuschlag keine Aussagen zu einem Temperaturendeckungsverhalten vorliegen, erfolgt eine Abschätzung dieses Parameters auf Basis des Ausdehnungsverhaltens der Einzelkomponenten unter Berücksichtigung ihres Volumenanteils im Werkstoff. Tab. A-5 zeigt die Werte und angenommenen Volumenverhältnisse der Einzelkomponenten. Unter der Annahme eines Aerogel/Zementsteinvolumenverhältnisses von 0,7/0,3 und der Verwendung der gemittelten Ausdehnungskoeffizienten erhält man einen Wert von 7,9. Dieser Wert bewegt sich von der Größenordnung im Rahmen des bekannten Wärmeausdehnungskoeffizienten für Leichtbeton.

Tab. A-5 Wärmeausdehnungskoeffizienten der Komponenten und des Werkstoffs

Stoff	$\alpha_T [1 \cdot 10^{-6} K^{-1}]$			Anteil Vol.-%	Quelle
	Min.	Schnitt	Max.		
Zementstein	10	-	23	25-35	[56]
Aerogel	2	-	6	65-75	[37]
Aerogelleichtbeton	4	7,9	≈12		
Leichtbeton		8			[56]
Normalbeton		10			[56]

A.2.6 Erdbebenlast

Die wirkende Horizontallast auf das Beispielgebäude wurde nach DIN 4149 [16] in Ansatz gebracht. Die maßgeblichen Parameter sind in Tab. A-6 zusammengestellt.

Tab. A-6 Ermittlung der Erdbebenbemessungslast

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Regelmäßigkeit	Regelmäßig in Grund- und Aufriss	-	Tab.1
Bodenbeschleunigung a_g	0,8	m/s^2	Tab.2
Untergrundparameter S	1,5 (für C – R)	1	Tab.4
Bedeutungsbeiwert γ_I	1,0	1	Tab.3
Verhaltensbeiwert q	1,5	1	Abschnitt 8
Verstärkungsbeiwert β_0	2,5	1	Abschnitt 5

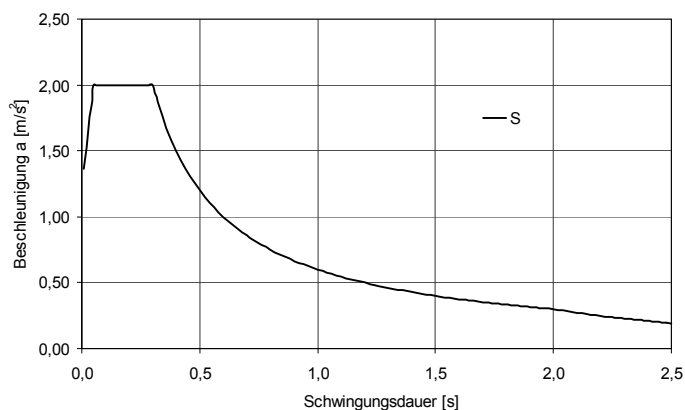


Abb. A-2 Elastisches Antwortspektrum nach DIN 4149 [16]

A.3 Anhang Pläne Versuchsgebäude „HOMES (24)“

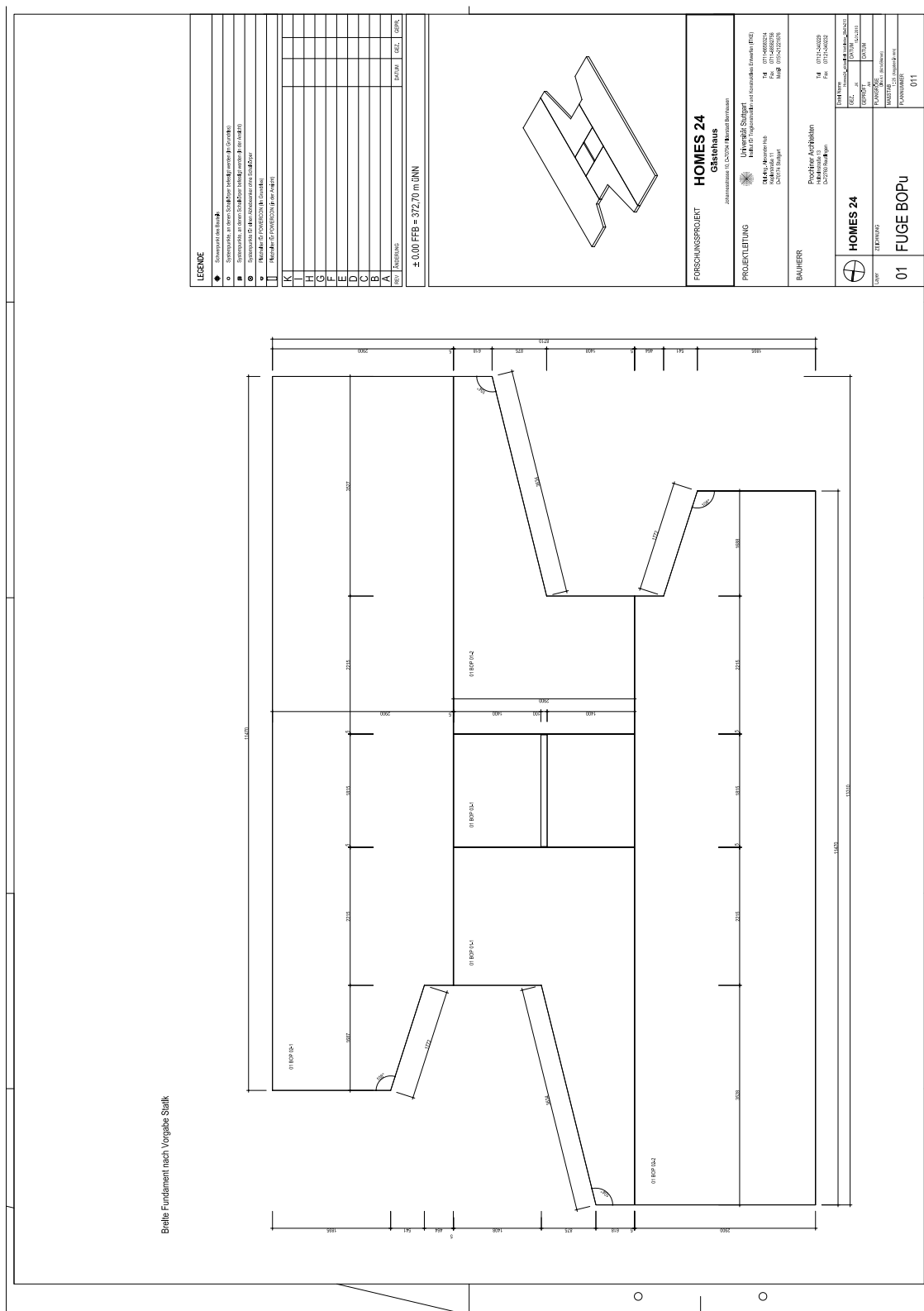


Abb. A-3 Unterseite Bodenplatte (BOPu)

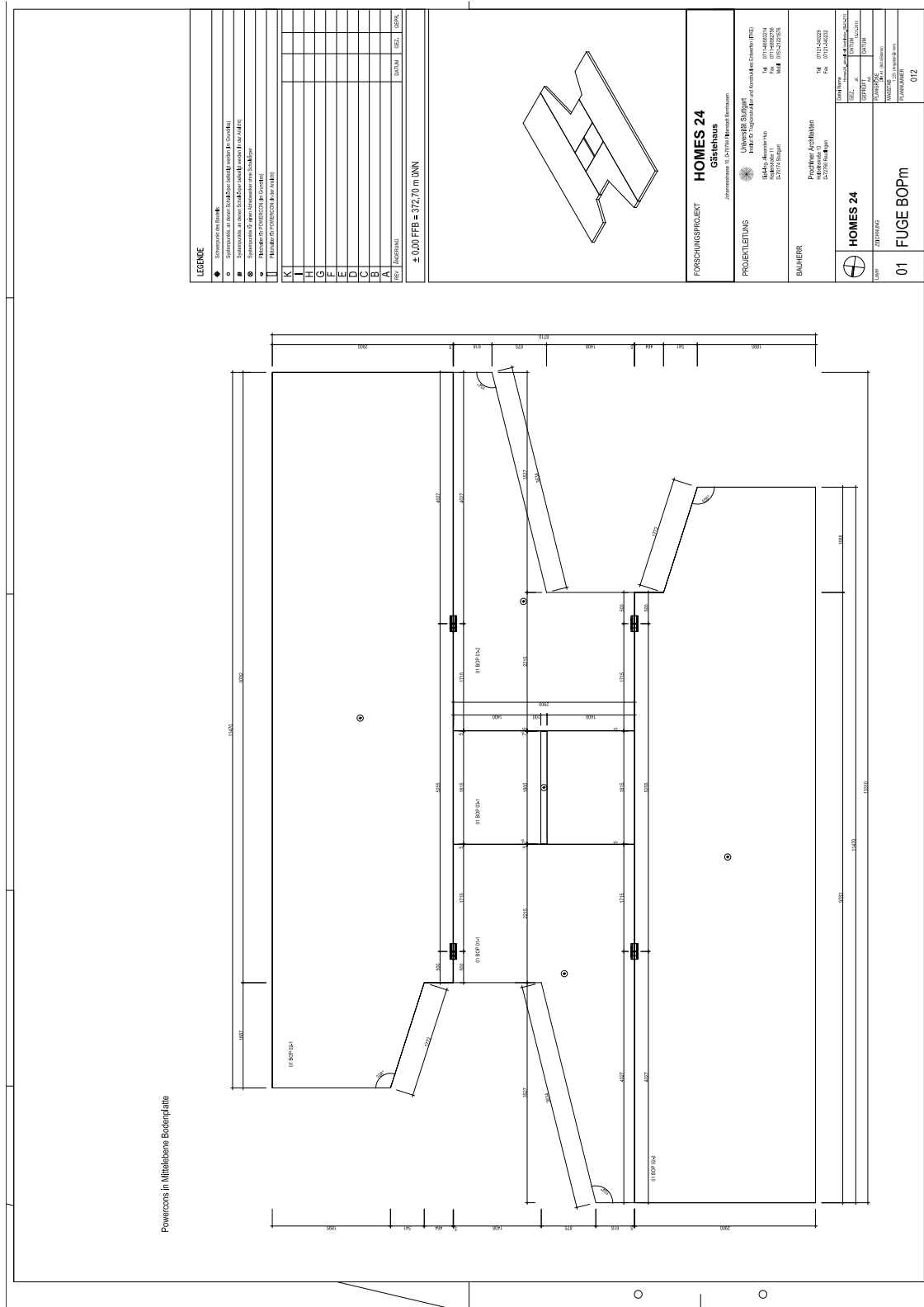


Abb. A-4 Lage der Verbinder in der Mittelebene der Bodenplatte (BOPm)

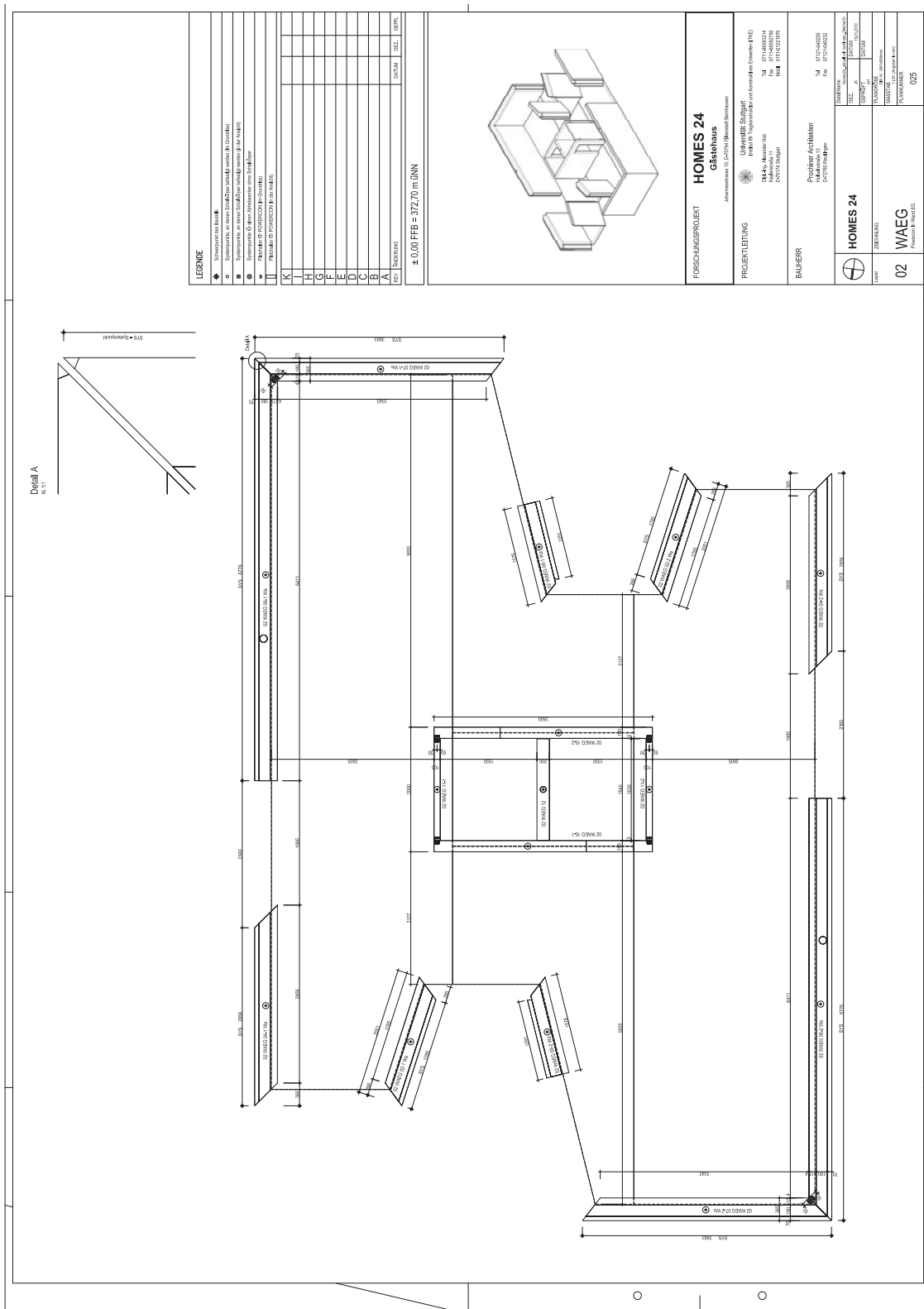


Abb. A-6 Lage der Einbauteile in der vertikale Fuge der Wandbauteile im Erdgeschoss (WaEG)

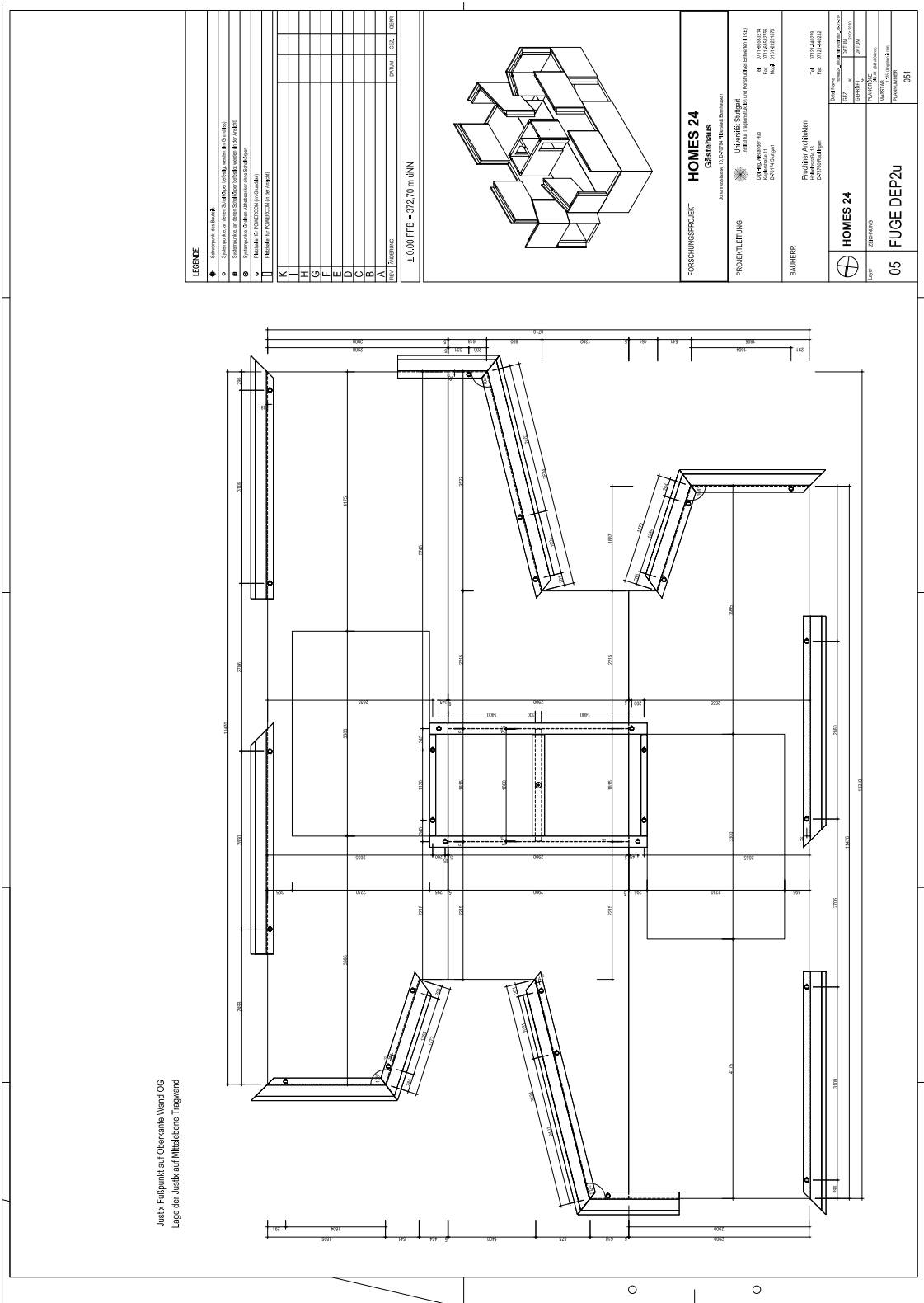


Abb. A-11 Lage der Einbauteile auf Fuge der Unterseite Deckenplatte auf OG (DEP2u)

Lebenslauf

01.04.1973	geboren in Amberg, Oberpfalz
1992	Allgemeine Hochschulreife in Amberg
1992 - 1994	Reserveoffizierslaufbahn im GebPzAufklBtl. 8 in Freyung
1994 - 2000	Studium Bauingenieurwesen an der TH Karlsruhe mit Vertiefung Konstruktiver Ingenieurbau
1997 - 1999	wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Tragkonstruktionen/SFB 315 der Universität Karlsruhe
1998	zweimonatiges Auslandspraktikum auf der Autobahnbaustelle bei Bahçe / Türkei
2000 - 2002	Projektbearbeiter im Ingenieurbüro IF/Reichenau Projekte u.a.: wandelbares Dach Sommertheater, Winterthur/CH 2001 Hauptüberdachung Flughafen Guangzhou/CN 2002 Stadionüberdachung Al Ain, Al Ain/VAE 2002
2002 - 2012	wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Stuttgart Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen Lehrtätigkeit in Grund- und Oberstufe Durchführung von Seminaren und Entwürfen
2002 - 2007	Forschungstätigkeit im Bereich Hybridkonstruktionen aus Beton und GFK
2007 - 2012	Forschungstätigkeit im Bereich Beton und Modularer Betonbau (BMBF) Forschungstätigkeit im Bereich hochdämmenden Leichtbetonwerkstoffs auf Basis von Aerogelgranulat (DBU)
Seit 2012	Projektleitung bei AR-Ingenieure Stuttgart

Universität Stuttgart - Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen

Herausgeber: Professor Dr.-Ing. Jan Knippers