

F 2868

Wolfgang Breit, Eva-Maria Ladner

# Anwendungssichere Verwendung von Hohlraumbodensystemen mit Fließestrichen und starren Belägen (Systemböden)



Fraunhofer IRB Verlag

\*

# F 2868

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2014

ISBN 978-3-8167-9144-7

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

Fraunhofer IRB Verlag Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

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

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



Gottlieb-Daimler-Straße, Gebäude 60 67663 Kaiserslautern Telefon: +49 631 205 22 97 Telefax: +49 631 205 31 01 E-Mail: wolfgang.breit@bauing.uni-kl.de www.bauing.uni-kl.de/fwb

# **BBR-Endbericht**

SF-10.08.18.7-10.32 / II 3-F20-10-056

vom 15. Mai 2013

# Anwendungssichere Verwendung von Hohlraumbodensystemen mit Fließestrichen und starren Belägen (Systemböden)

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Eva-Maria Ladner

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7-10.32 / II 3 – F20-10-056) Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Dieser Bericht umfasst 86 Seiten (inkl. Deckblatt).

Wiedergabe, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung des Fachgebiets Werkstoffe im Bauwesen der TU Kaiserslautern gestattet. Jede Haftung des Fachgebiets und seiner Mitarbeiter aus mündlichen oder schriftlichen Auskünften, Beratungen oder Gutachten ist, soweit gesetzlich zulässig, ausgeschlossen. Von Ansprüchen Dritter sind wir freizustellen.



# Inhalt

Ü	be	ersich	nt		. iv		
1		Aus	gang	gssituation	. 5		
	1.	.1	Allg	emeines und Ziel	. 5		
	1.	.2	For	schungsverband / Projektbegleitung / Beratergruppe	. 5		
	1.	.3	Aus	gangsbasis	. 6		
2		Ver	such	sprogramm	. 8		
	2.	.1	Mat	erialkennwerte	. 8		
		2.1.	1	Fließestriche	. 8		
		2.1.	2	Gipsfaserplatte	. 8		
		2.1.	3	Stützen	. 8		
	2.	.2	Bau	teilversuche	. 9		
		2.2.	1	Systemaufbauten	. 9		
		2.2.	2	Versuchsdurchführung	11		
	2.	.3	Fini	te Elemente Modell	17		
		2.3.	1	Ausgangsbasis für Finite Elemente Modell	17		
		2.3.2		Aufbau Finite Elemente Modell	22		
		2.3.3		Hohlraumboden ohne Belag	23		
		2.3.	4	Hohlraumboden mit Belag	23		
3		Ver	such	sergebnisse	24		
	3.	.1	Bes	timmung der Materialkennwerte	24		
		3.1.	1	Fließestriche	24		
		3.1.	2	Gipsfaserplatte	32		
		3.1.	3	Stützen	33		
	3.	.2	Bau	teilversuche	34		
		3.2.	1	Hohlraumboden ohne Belag	34		
		3.2.	2	Hohlraumboden mit Belag	42		
	3.	.3	Fini	te Elemente Modell/Numerische Simulation	47		
		3.3.	1	Hohlraumboden ohne Belag	47		
		3.3.	2	Hohlraumboden mit Belag	52		
4		Ver	such	sauswertung	53		
	4.	.1	Hoh	Iraumboden ohne Belag	53		
	4.	.2	Hoh	Iraumboden mit Belag	53		
5		Faz	it un	d Ausblick	55		
6		Tab	eller	iverzeichnis	56		
7	Abbildungsverzeichnis						

8	Literaturverzeichnis	59
Anh	nang zum Forschungsbericht	v

# Übersicht

BBR-Bericht:	SF-10.08.18.7-10.32 / II 3-F20-10-056
Titel :	Anwendungssichere Verwendung von Hohlraumbo- densystemen mit Fließestrichen und starren Belä- gen (Systemböden)
Auftraggeber:	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raum- ordnung (BBR) Zukunft BAU Deichmanns Aue 31-37 D-53179 Bonn
Auftraggeber, vertreten durch:	Herr Asmus Schriewer
Projektleiter:	Prof. DrIng. Wolfgang Breit
Sachbearbeiterin:	DiplIng. Eva-Maria Ladner
Interne Forschungsnummer:	F228
Ausgestellt am:	15.05.2013
Berichtsumfang:	86 Seiten

# 1 Ausgangssituation

# 1.1 Allgemeines und Ziel

Systemböden haben sich seit dem ersten Erscheinen auf dem Markt zu Beginn der 80er Jahre wegen ihrer zahlreichen Vorteile ein breites Anwendungsfeld erschlossen und kommen mittlerweile auch in Schwerlastbereichen mit Punktlasten bis 15 kN zur Anwendung [L2].

Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie nach industriellen Fertigungsmaßstäben mit hoher Präzision hergestellt werden. Sie ermöglichen neben Spezialanwendungen in technischen Bereichen die unkomplizierte Installationsführung, z. B. in Großraumbüros, Banken und anderen Objekten. Für die Belegung mehrschichtiger Hohlbodensysteme mit Fließestrichen mit starren Belägen aus keramischen Fliesen oder Natursteinplatten liegen jedoch derzeit keine grundsätzlichen Regelungen vor.

Hohlbodensysteme werden nach DIN EN 13213 einer Erstprüfung unterzogen und anschließend klassifiziert. Hierbei wird das Hohlbodensystem ohne Belag u. a. auf die Tragfähigkeit und die auftretenden Verformungen geprüft. Während größere Verformungen (vgl. 1.3) von elastischen oder textilen Bodenbelägen schadensfrei aufgenommen werden können, kann es bei starren Bodenbelägen zu Schäden in Form von Rissen und/oder Ablösungen der Beläge kommen. Entsprechend den aufzunehmenden Verkehrslasten müsste die Tragschicht bemessen werden. Zurzeit erfolgt keine Bemessung der Tragschicht, die Estriche werden lediglich nach DIN 18560 bzw. DIN EN 13813 [vgl. R7] klassifiziert. Da die Anwendungsfälle nach DIN 18560 ein anderes Tragverhalten voraussetzen (Verbundestrich, Estrich auf Dämmschicht, Estrich auf Trennschicht), liegt eine Regelungslücke für die Nachfolgegewerke vor.

Seitens des Projektpartners Bilfinger SE liegen Erfahrungen mit Schäden an Hohlbodensystemen mit Fließestrichen und starren Belägen vor. Die Problematik ist bei den Systembodenherstellern sowie der Natursteinindustrie bekannt und wurde auch in einschlägigen Fachzeitschriften thematisiert [L1, L3, L4, L5].

Ausgehend von Schadensfällen aus der Baupraxis, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes experimentelle Untersuchungen und Finite Elemente Modellierungen des Trag- und Verformungsverhaltens vorgenommen, um zu einer ausreichenden Planungs- und Anwendungssicherheit im Umgang mit derartigen Bodensystemen zu gelangen.

Durch das Forschungsvorhaben soll für Planer und Ausführende die bestehende Regelungslücke geschlossen werden.

# 1.2 Forschungsverbund / Projektbegleitung / Beratergruppe

Das Projekt wurde durchgeführt seitens:

**Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit Dipl.-Ing. Eva-Maria Ladner** Technische Universität Kaiserslautern Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen Gottlieb-Daimler-Straße, Geb. 60 D-67663 Kaiserslautern

# Dr.-Ing. Jörg-Peter Wagner

**Dipl.-Ing. Jürgen Krams** Bilfinger Construction GmbH Zentrales Labor für Baustofftechnik Carl-Reiß-Platz 1-5 D-68165 Mannheim

Das Projekt wurde seitens des BBR begleitet von:

#### Dipl.-Ing. Asmus Schriewer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) Zukunft BAU Deichmanns Aue 31-37 D-53179 Bonn

Beratend waren an dem Projekt beteiligt:

#### Prof. Dipl.-Ing. Claus Flohrer

Abteilungsleiter/ Department Manager Von der IHK Offenbach ö.b.u.v. Sachverständiger für Betontechnologie, Instandsetzung und zerstörungsfreie Prüfverfahren

HOCHTIEF Solutions AG Consult Materials Farmstr. 91-97 64546 Mörfelden-Walldorf

# 1.3 Ausgangsbasis

Hohlböden sind sogenannte Systemböden, d. h. Fußbodenkonstruktionen, die als Gesamtsystem ohne Belag nach DIN EN 13213 in Verbindung mit der Anwendungsrichtlinie des Bundesverbands Systemböden [R1, R6] geprüft werden und in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Erstprüfung hinsichtlich der Tragfähigkeit in bestimmte Belastungsgruppen/klassen eingestuft werden. Bodenbeläge werden im Rahmen der Erstprüfung und der Einstufung in Belastungsklassen nicht berücksichtigt.

Bei der Prüfung nach DIN EN 13213 [R1] werden auf der Grundlage einer Belastungsprüfung die Bruchlast und die Durchbiegung an dem jeweiligen Hohlbodensystem ermittelt.

Die nach DIN EN 13213 [R1] bei Hohlböden zulässige maximale Durchbiegung im Gebrauchszustand von I/300 führt bei Rastermaßen von 600 mm zu maximal möglichen Durchbiegungswerten von 2 mm. Dadurch entstehen im Auflagerbereich Verdrehungen, die zu Öffnungen im Stoßbereich der Gipsfaserplatten der Hohlraumbodenkonstruktion führen können. Diese Verformungen können in der Bodenkonstruktion zu Rissbildungen im Auflagerbereich führen, wenn die aufnehmbaren Zugkräfte überschritten werden bzw. zu Ablösungen eines starren Belags, wenn in Feldmitte die aufnehmbaren Druckspannungen überschritten werden.

Abbildung 1 stellt den Aufbau eines Hohlbodens dar.



Abbildung 1: Darstellung eines Hohlbodenaufbaus nach [R6]

Die Festigkeiten des Fließestrichs werden dabei nach DIN EN 13813 angegeben [R2, R3, R4] bestimmt. Der verwendete Estrich bei einem Hohlbodensystem kann jedoch nicht direkt einem Teil der deutschen Anwendungsnorm DIN 18560 "Estriche im Bauwesen" [R2, R3, R4] zugeordnet werden, da in dieser Norm von einer vollflächigen Bettung auf dem Untergrund und damit einer gleichmäßigen Abtragungen der Lasten ausgegangen wird. Das Tragsystem eines Hohlbodensystems entspricht jedoch einer auf einem Stützenraster aufgelagerten mehrschichtigen Platte.

# 2 Versuchsprogramm

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurden zunächst die Materialkennwerte der einzelnen Bestandteile der Hohlraumbodensysteme bestimmt. In Großversuchen wurden verschiedene Hohlraumböden mit unterschiedlichem Systemaufbau anschließend auf ihre Belastbarkeit geprüft. Hierbei wurden sowohl Versuche an Systemen ohne Belag entsprechend DIN EN 13213, als auch Versuche an Systemen, die mit starrem Belag versehen waren, durchgeführt. Gemessen wurden dabei die Belastungen an unterschiedlichen Stellen sowie die zugehörigen Verformungen, die als Grundlage für die FE-Simulation dienten.

# 2.1 Materialkennwerte

# 2.1.1 Fließestriche

Die Produktauswahl beschränkte sich auf handelsübliche Anhydritfließestriche. Diese wurden mit den Namen Estrich I bis Estrich V bezeichnet und auf ihre Eigenschaften untersucht. Es wurden sowohl Frisch- als auch Festmörtelkennwerte bestimmt. Als Frischmörtelkennwerte wurden Frischmörteltemperatur, Ausbreitmaß, Luftporengehalt und Rohdichte bestimmt. Zur Bestimmung der Festmörtelkenndaten wurden Prismen nach DIN EN 13892 [R5] für die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit sowie für den Elastizitätsmodul Zylinder mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Höhe von 150 mm hergestellt. Geprüft wurde jeweils im Alter von 7, 28, 56 und 91 Tagen. Es wurde je Sorte ein weiterer Prismensatz für Schwindmessungen hergestellt. Bestätigungsprüfungen wurden im Alter von 28 Tagen an einer eigens dafür hergestellten Platte in Form von herausgesägten Plattenstreifen durchgeführt.

# 2.1.2 Gipsfaserplatte

Die Prüfung von faserverstärkten Gipsplatten wurde in Anlehnung an DIN EN 15283-2 [R8] durchgeführt. Die Maße der Probekörper wurden an die vorhandenen Prüfeinrichtungen angepasst. Hierzu wurde das Ursprungsmaß von 300 mm x 400 mm auf 240 mm x 320 mm reduziert. Das Seitenverhältnis wurde beibehalten. Aus drei Platten wurden jeweils vier Probekörper, zwei in Längs- und zwei in Querrichtung zur Untersuchung einer möglicherweise vorhandenen Anisotropie, ausgesägt. Von jeder Platte wurden jeweils zwei Probekörper im Wärmeschrank bei 40 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Zwei weitere Platten wurden ohne weitere Behandlung im Prüfraum der Großversuche gelagert. Hierbei wurde der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Festigkeiten und das Quellverhalten der Gipsfaserplatten untersucht.

# 2.1.3 Stützen

Die Stützen wurden starr innerhalb der Prüfeinrichtung mit der Maximalhöhe von 200 mm eingebaut und durch zentrische Lasteinleitung mit 120 N/s ± 10 % nach DIN EN 12825 [R9] geprüft. Dabei mussten die Stützen der vierfachen Nennlast standhalten und durften keinerlei Anzeichen von Versagen aufweisen. Bei dem hier vorliegenden Hohlboden bedeutet dies eine Nennlast von mindestens 16 kN. Geprüft wurden alle Stützen bis zu einer Last von 20 kN. Es wurden dabei die Verformungen aufgezeichnet.

#### 2.2 Bauteilversuche

#### 2.2.1 Systemaufbauten

#### 2.2.1.1 Hohlraumboden ohne Belag

Es wurden vier Versuchsfelder hergestellt, die sich in ihrem Aufbau bezüglich Stützenabstand, Estrichdicke und Estrichart entsprechend Tabelle 5 unterschieden.

Versuchsfeld 1 mit einer Nenndicke von 38 mm entsprach der zugelassenen Variante. Das Hohlbodensystem ist mit dem Estrich III (vgl. 3.1) zugelassen, dieser wurde für die Felder 1,3 und 4 verwendet.

Estrich V wurde für Feld 2 ausgewählt, da dieser bei der Bestimmung der Materialkennwerte überdurchschnittlich hohe Festigkeiten aufwies. Tabelle 1 stellt die Versuchsfelder mit zugehörigem Stützenabstand, den verwendeten Estrichen und deren Dicken dar.

Versuchsfeld	Stützenabstand	Estrichdicke	Verwendeter Estrich nach Herstellerangabe					
Versuchsfeld 1	600 / 300*	38 mm	Estrich III (C30 F6)					
Versuchsfeld 2	600 / 300*	38 mm	Estrich V (C30 F5)					
Versuchsfeld 3	600 / 300*	76 mm	Estrich III (C30 F6)					
Versuchsfeld 4	300 / 300*	38 mm	Estrich III (C30 F6)					
*Stützenabstand an zwei aneinander liegenden Rändern								

#### Tabelle 1: Versuchsaufbau Übersicht Versuchsfeld 1 bis 4

Bei der Herstellung wurden zunächst die Stützen im vorgesehenen Raster mit PU-Kleber auf dem Boden aufgeklebt und auf die vorgesehene Höhe von 20 cm vorjustiert. Nachdem der Kleber getrocknet war, wurden auf den Stützen Gipsfaserplatten im Verbund verlegt. Diese wurden ebenfalls mit PU-Kleber an den Stützenköpfen verklebt.

Um das Feld wurde eine Schalung montiert, um den Estrichs aufbringen zu können. In die Schalung wurde überlappend eine Schrenzlage verlegt, um die Gipsfaserplatten vor der Feuchtigkeit des Estrichs zu schützen und somit Schäden zu vermeiden. Die verschiedenen Estriche wurden mit einem Doppelwellenmischer in Hobbocks angemischt, wobei die vom Hersteller maximale empfohlene Wassermenge verwendet wurde. Beim Einbringen des Estrichs wurde an den Eckpunkten und in Feldmitte die Einfüllhöhe kontrolliert. Abbildung 2 zeigt den Aufbau mit eingebrachter Schrenzlage.



Abbildung 2: Aufbau Hohlbodensystem ohne Belag mit eingelegter Schrenzlage

#### 2.2.1.2 Hohlraumboden mit Belag

Die Versuche an Hohlraumböden mit einem starren Belag aus keramischen Spaltplatten erfolgten an zwei Feldern, mit einem identischen Aufbau, hinsichtlich des Stützenrasters und der verwendeten Materialien entsprechend Versuchsfeld 1. Der einzige Unterschied bestand im Aufbringen des Belags.

Beide Versuchsfelder wurden mit den gleichen Spaltplatten belegt, von denen Feld 5 ohne Verband mit durchgehender Fuge und Feld 6 im Läuferverband mit einer halben Fliese Versatz gefliest wurden. Bei diesen Versuchen sollte u. a. auch der der Einfluss des Verbandes (Anordnung der Fugen) auf den Lastabtrag und das Versagensbild untersucht werden.

Die Herstellung erfolgte analog zu der Herstellung der Felder ohne Belag. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die beiden hergestellten Varianten des Systems.



Abbildung 3: Versuchsfeld 5, Fliesen ohne Verband



Abbildung 4: Versuchsfeld 6, in Läuferverband

#### 2.2.2 Versuchsdurchführung

Die Systemprüfung der Hohlraumböden wurde nach DIN EN 13213 [R1] durchgeführt.

Die einzelnen Prüfstellen wurden vor der Prüfung gesäubert und abgeschmirgelt, sodass eine ebene Fläche gewährleistet werden konnte. Auf die Messstellen wurde zur Prüfung zunächst eine dünne Gummiplatte mit 3 mm Dicke und 65 Shore-A Härte nach ISO 48 gelegt. Darauf wurde der Laststempel gestellt, auf den eine Stahlstütze gestellt wurde, um das System gegen die Decke abstützen zu können. Der Laststempel hatte eine Kantenlänge von 25 mm x 25 mm und eine Höhe von 50 mm. Die Stahlstütze wurde horizontal ausgerichtet, um eine zentrische Lasteinleitung gewährleisten zu können. Auf der Stahlstütze wurde eine Hydraulikpresse angebracht, die mit einer Hydraulikpumpe verbunden war und darüber eine Kraftmessdose. Zwischen Decke und Hydraulikpresse wurde noch eine Kalotte eingebaut, um Unebenheiten und Schiefstellungen des Aufbaus auszugleichen.

Bei der Belastung in Feldmitte wurde neben der aufgebrachten Last die Verformung (Durchbiegung) mittels induktiven Wegaufnehmern gemessen.

Der Versuchsaufbau ist in der folgenden Abbildungen 5 und 6 dargestellt:



Abbildung 5: Skizze Versuchsaufbau



Abbildung 6: Versuchsaufbau für Versuchsfelder 5 und 6

Die normativ vorgegeben Prüfstellen nach DIN EN 13213 [R1] waren:

- Zweites Rasterfeld in Feldmitte
- In der Mitte zwischen zwei Stützauflagern, bei unterschiedlichen Stützweiten ist der ungünstigste Fall anzunehmen
- In der Nähe der Stützauflager
- Jede weitere Stelle, die eine Schwachstelle darstellen kann

Die Prüfgeschwindigkeit betrug 120 N/s ± 10 %.

Die nachstehende Tabelle 2 zeigt die geplanten Laststufen pro Messstelle.

#### Tabelle 2: Laststufen pro Feld

	Felder 1-3	Feld 4	Felder 5-6
Messstelle	[N]	[kN]	[mm]
	8.000	8.000	8.000
1	10.000	10.000	10.000
2	8.000	8.000	8.000
3	8.000	8.000	8.000
4	8.000	8.000	8.000
5	6.000	-	6.000
6	8.000	8.000	6.000

Für die spätere Auswertung ist zu beachten, dass sich die ermittelten Verformungen zusammensetzen aus:

- Stützensenkung
- Verformung der Gipsfaserplatte, des Estrichs und ggf. des Belags, sowie
- der Verformung ("Zusammendrücken") der Gummiplatte

Zur Berechnung der reinen Verformung des Hohlbodens wurden deshalb zusätzlich die Verformungen der Stütze (siehe 3.1.3) und der Gummiplatte (siehe 3.1.2) bestimmt. Die Gummiplatte wurde hierbei ebenfalls mit einer Geschwindigkeit von 120 N/s bis 10.000 N belastet, dies entsprach der Belastungsgeschwindigkeit der durchgeführten Versuche. Die nachstehende Abbildung 7 zeigt die Werte der beiden verwendeten Gummiplatten.



# Verformungen der Gummiplatte

Abbildung 7: Verformungen der Gummiplatte

#### 2.2.2.1 Hohlraumboden ohne Belag

Jedes Versuchsfeld wurde an den drei normativ vorgegebenen sowie an zwei bzw. drei zusätzlichen Prüfstellen belastet.

Die Anordnung der Messstellen je Versuchsfeld ist in den Abbildungen 8 und 9 dargestellt:

Die Punktlasten für die Versuchsfelder 1 bis 3 hatten folgende Koordinaten: (vgl. Abb. 7)

- Normative Prüfanforderung nach DIN EN 13213 [R1]:
  - 1. Auflagernähe: 0,70 m / 1,20 m
  - 2. Zwischen zwei Stützen: 0,90 m / 1,80 m
  - 3. Feldmitte: 0,90 m / 0,90 m
- Zusätzliche Prüfstellen:
  - 4. Randbereich bei einem Stützenraster von 300 mm: 1,74 m / 1,05 m
  - 5. Randbereich bei einem Stützenraster von 600 mm: 0,06 m / 1,50 m
  - 6. Ecknähe bei einem Stützenraster von 600 mm: 0,10 m / 0,10 m



Abbildung 8: Anordnung der Messpunkte der Versuchsfelder 1-3

Die Punktlasten für Versuchsfeld 4 hatten folgende Koordinaten:

- Normative Prüfanforderung nach DIN EN 13213 [R1]: (vgl. Abb. 20)
  - 1. Auflagernähe: 0,50 m / 1,20 m
  - 2. Zwischen zwei Stützen: 0,75 m / 1,80 m
  - 3. Feldmitte: 1,05 m / 0,75 m
- Zusätzliche Prüfstellen:
  - 4. Randbereich bei einem Stützenraster von 300 mm: 1,74 m / 1,05 m
  - 5. Ecknähe: 0,10 m / 0,10 m

Bei Versuchsfeld 4 entfiel die Messstelle im Randbereich von 600 mm, da dieses Versuchsfeld an allen vier Rändern einen Stützenabstand von 300 mm aufwies.



Abbildung 9: Anordnung der Prüfstellen bei Versuchsfeld 4

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht über die Maximallasten mit denen die Prüffelder tatsächlich belastet werden konnten.

Messstelle	Versuchsfeld 1	Versuchsfeld 2	Versuchsfeld 3	Versuchsfeld 4
Auflagernähe (Messstelle 1)	10.000 N	10.000 N	10.000 N	10.000 N
Zwischen zwei Stützen (Messstelle 2)	8.000 N	8.000 N	8.000 N	8.000 N
Feldmitte (Messstelle 3)	8.500 N	8.000 N	19.500 N	8.000 N
Randbereich 300 mm (Messstelle 4)	7.800 N	8.000 N	8.000 N	7.500 N
Randbereich 600 mm (Messstelle 5, entfiel bei Versuchsfeld 4)	6.000 N	6.000 N	17.500 N	-
Ecknähe (Messstelle 6 bzw. 5 bei Versuchsfeld 4)	7.400 N	Nicht prüfbar	6.000 N	8.000 N

Tabelle 3: Maximallasten bei den Versuchsfeldern 1 bis 4

Das benötigte Materialvolumen kann Seite x im Anhang entnommen werden.

#### 2.2.2.2 Hohlraumboden mit Belag

Die Hohlraumböden mit Belag wurden ebenfalls an sechs Messstellen geprüft, dabei entsprachen die Messstellen denen der Hohlböden 1-3 aus den vorangegangenen Versuchen.

Tabelle 4 zeigt die Maximallasten mit denen die beiden Felder an den verschiedenen Messstellen tatsächlich belastet werden konnten.

Messstelle	Versuchsfeld 5	Versuchsfeld 6
Auflagernähe (Messstelle 1)	10.200 N	10.200 N
Zwischen zwei Stützen (Messstelle 2)	8.300 N	8.200 N
Feldmitte (Messstelle 3)	13.800 N	8.200 N
Randbereich 300 mm (Messstelle 4)	8.300 N	8.300 N
Randbereich 600 mm (Messstelle 5, entfiel bei Versuchsfeld 4)	6.100 N	6.200 N
Ecknähe (Messstelle 6)	6.200 N	6.100 N

# 2.3 Finite Elemente Modell

### 2.3.1 Ausgangsbasis für Finite Elemente Modell

Als Ausgangsbasis wurde der Systemboden vereinfachend als Durchlaufträger über 3 gleiche Felder mit einer Stützweite von 600 mm betrachtet (siehe Abbildung 10). Diese diente als Grundlage für die Erstellung eines Finite Elemente Modells.



Abbildung 10: Tragsystem

Der Momentenverlauf für das gewählte System unter der gegebenen Belastung ist in Abbildung 11 dargestellt.



Abbildung 11: Momentenverlauf

Für die Berechnung der Biegespannungen wurde der Bodenaufbau, bestehend aus Fließestrich (1), Kleber (2) und keramischer Spaltplatte (3), unter Vernachlässigung der Gipsfaserplatte als Verbundquerschnitt mit idealer, schlupffreier Verbindung angenommen. Die Bezeichnungen sind aus Abbildung 12 ersichtlich.



Abbildung 12: Verbundquerschnitt mit Bezeichnung der Parameter

Für den Verbundquerschnitt ergibt sich die Lage der Nulllinie bezogen auf den unteren Rand in Abhängigkeit von der Steifigkeit der einzelnen Schichten gemäß Gleichung (1).

$$\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^{s} E_i \cdot A_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^{s} E_i \cdot A_i}$$
(1)

Nach den Gesetzen der Biegelehre ergibt sich die ideelle Spannung nach Gleichung (2).

$$\bar{\sigma} = \frac{M}{\bar{I}} \cdot \bar{z} \tag{2}$$

Hierin ist  $\overline{I}$  das ideelle Trägheitsmoment des Verbundquerschnitts, das sich aus der Summe der gewichteten Flächenträgheitsmomente der Teilflächen bezogen auf die eigene Schwerachse und die jeweiligen Steiner-Anteile nach Gleichung (3) errechnet.

$$\bar{I} = \sum_{i=1}^{s} n_i \cdot I_i$$

mit

$$n_i = \frac{E_i}{E_c}$$

hierin sind

- *Ī* ideelles Flächenträgheitsmoment des Verbundquerschnitts
- *I<sub>i</sub>* Flächenträgheitsmoment der Teilfläche bezogen auf die eigene Schwerachse und Steiner-Anteil der Teilfläche
- *E<sub>i</sub>* E-Modul der Teilfläche
- *E<sub>c</sub>* Vergleichs-E-Modul

(3)

(1)

Hiermit lassen sich die tatsächlichen Spannungen in jeder beliebigen Schicht des Verbundquerschnitts nach Gleichung (4) berechnen.

$$\sigma_i = n_i \cdot \bar{\sigma}$$

Den Parameterstudien wurden die Ergebnisse der Materialuntersuchungen und ggf. Literaturwerte zugrunde gelegt. Die Parameter und die Variationsstufen sind in der nachfolgenden Tabelle 5 dargestellt.

 Tabelle 5: Parameter der Parameterstudie

Werkstoff	Parameter			
	Dicke	E-Modul		
	[mm]	[N/mm²]		
Estrich	35, 45	15.000, 25.000		
Kleber	3	5.000 <sup>1)</sup>		
Keramische Spaltplatte	5, 10	50.000, 100.000 <sup>2)</sup>		

1) Annahmewert

2) Literaturwert

Gemäß dem in Abbildung 11 dargestellten Momentenverlauf tritt das größte positive Moment im mittleren Feld direkt unter der angreifenden Einzellast auf. Hierbei werden der Estrich unterseitig durch Biegezugspannungen und der keramische Belag oberseitig durch Biegedruckspannungen beansprucht.

Das größte negative Moment tritt gemäß Abbildung 11 über den beiden mittleren Auflagern auf. Hierbei werden der Estrich unterseitig durch Biegedruckspannungen und der keramische Belag oberseitig durch Biegezugspannungen beansprucht.

Die Ergebnisse der Parameterstudie sind in der nachfolgenden Tabelle 6 dargestellt. Die Eingangswerte und die graphische Darstellung der Ergebnisse der Parameterstudie können dem Anhang auf den Seiten xiv-xxxi entnommen werden.

	Estrich		Belag		Kleber		Feld		Auflager	
	d	E	d	E	d	E	Belag	Estrich	Belag	Estrich
	[mm]	[N/mm²]	[mm]	[N/mm²]	[mm]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
Mod 3	45	15000	5	50000	3	5000	-6,1	2,4	2,6	-1,0
Mod 4	45	25000	5	50000	3	5000	-5,0	2,7	2,1	-1,2
Mod 7	45	15000	5	100000	3	5000	-7,5	2,1	3,2	-0,9
Mod 8	45	25000	5	100000	3	5000	-6,5	2,3	2,8	-1,0
Mod 11	45	15000	10	50000	3	5000	-4,0	1,9	1,7	-0,8
Mod 12	45	25000	10	50000	3	5000	-3,5	2,2	1,5	-0,9
Mod 15	45	15000	10	100000	3	5000	-4,9	1,7	2,1	-0,7
Mod 16	45	25000	10	100000	3	5000	-4,3	1,9	1,8	-0,8
Mod 1	35	15000	5	50000	3	5000	-8,6	3,6	3,7	-1,6
Mod 2	35	25000	5	50000	3	5000	-7,2	4,1	3,1	-1,7
Mod 5	35	15000	5	100000	3	5000	-10,4	3,2	4,5	-1,4
Mod 6	35	25000	5	100000	3	5000	-9,2	3,5	3,9	-1,5
Mod 9	35	15000	10	50000	3	5000	-5,6	2,8	2,4	-1,2
Mod 10	35	25000	10	50000	3	5000	-4,9	3,1	2,1	-1,3
Mod 13	35	15000	10	100000	3	5000	-6,7	2,5	2,9	-1,1
Mod 14	35	25000	10	100000	3	5000	-5,9	2,7	2,5	-1,2

# Tabelle 6: Ergebnisse der Parameterstudie bei einer Belastung von 8 kN (Maximal- und Minimalwerte farbig gekennzeichnet)

Die Auswertung zeigt, dass für eine angenommene Belastung von 8 kN (entspricht der Bruchlast eines Hohlbodens der Systemklasse 3) die Biegedruckspannungen bei ungünstigster Kombination im Estrich über den Auflagern maximal 1,7 N/mm<sup>2</sup> und für den keramischen Belag (Steinzeugfliese/keramische Spaltplatte) an der Stelle des maximalen Feldmoments 10,4 N/mm<sup>2</sup> erreichen. Diese Spannungen können sowohl von der Belagsschicht als auch der Estrichschicht schadensfrei aufgenommen werden.

An der Stelle des maximalen Feldmomentes tritt die maximale Biegezugspannung an der Estrichunterseite auf. Sie erreicht im ungünstigsten Fall eine Höhe von 4,1 N/mm<sup>2</sup> und kann von einem Estrich der Biegefestigkeitsklasse F5 schadensfrei aufgenommen werden.

Im Auflagerbereich treten dagegen Biegezugspannungen in der Belagsschicht (Steinzeugfliese/keramische Spaltplatte) auf, die in Abhängigkeit von der Kombination der Schichten im Extremfall bis zu 4,5 N/mm<sup>2</sup> betragen können.

Die weitere Betrachtung zeigt zudem, dass die oberseitigen Biegezugspannungen durch eine Vergrößerung der Steifigkeit (Dicke, E-Modul) der Estrichtragschicht und eine Vergrößerung der Belagsdicke verringert werden können.

Für die aus Tabelle 7 ersichtlichen Kombinationen Mod. 5 und Mod. 12, für die die an der Belagsoberseite auftretenden Biegezugspannungen einen maximalen bzw. minimalen Wert annehmen, sind die Biegezugspannungen in Abbildung 13 in Abhängigkeit von der Belastung dargestellt. Abbildung 14 zeigt für die beiden Kombinationen die in Feldmitte auf der Estrichunterseite auftretenden Biegezugspannungen.

Bei der Bewertung ist zu beachten, dass der bei Kombination Mod. 5 der für den keramischen Belag angesetzte Wert des E-Moduls von 100.000 N/mm<sup>2</sup> zu hoch angesetzt ist. Auf der Grundlage früherer eigener Untersuchungen kann für den E-Modul von Steinzeugfliesen ein Wert von ca. 60.000 bis 65.000 N/mm<sup>2</sup> und für keramische Spaltplatten ein Wert von 45.000 bis 50.000 N/mm<sup>2</sup> angesetzt werden.

Zum Vergleich und zur besseren Übertragung auf praktische Verhältnisse ist aus diesem Grund in den Abbildung 13 und 14 die Kombination Mod. 17 aufgetragen. Hierbei wurde für den Estrich eine Steifigkeit (Dicke/E-Modul) von 40 mm und 20.000 N/mm<sup>2</sup>, für den Kleber

von 3 mm und 5.000 N/mm<sup>2</sup> und für den keramischen Belag von 8 mm und 60.000 N/mm<sup>2</sup> zugrunde gelegt.



Abbildung 13: Biegezugspannungen auf der Belagsoberseite im Auflagerbereich in Abhängigkeit von der Belastung



Abbildung 14: Biegezugspannungen auf der Estrichunterseite in Feldmitte in Abhängigkeit von der Belastung

Die Betrachtungen zeigen, dass die Biegezugspannungen im Estrich auch bei ungünstigsten Annahmen keinen für einen Calciumsulfatfließestrich (CAF) der Biegefestigkeitsklasse F5 kritischen Wert erreichen.

Die an der Belagsoberseite auftretenden Biegezugspannungen können im Gebrauchszustand Werte von bis zu ca. 1 N/mm<sup>2</sup> erreichen, können aber bei ungünstigen Verhältnissen -Estrichdicke und E-Modul an der Untergrenze, geringe Belagsdicke in Verbindung mit einem hohen E-Modul - bis auf den doppelten Wert ansteigen.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die errechneten Werte auf der vereinfachten Annahme der Lastabtragung eines Durchlaufträgers beruhen. Die unter realen Bedingungen vorliegende Plattentragwirkung und die bei der Modellierung vernachlässigte Gipsfaserplatte führen in der Praxis zu einem abweichenden Tragverhalten.

Die Berücksichtigung der Gipsfaserplatte als zusätzliche Schicht unter Ansatz eines vollen Verbundes zur Estrichschicht führt bei einer Belastung von 4 kN (Gebrauchslast für Systemklasse 3) bei Mod. 17 zu einer Reduzierung der Biegezugspannungen an der Belagsoberseite von 1,15 N/mm<sup>2</sup> auf 0,85 N/mm<sup>2</sup>. Da tatsächlich zwischen Gipsfaserplatte und Estrichschicht kein starrer sondern ein nachgiebiger Reibungsverbund vorliegt, wird der Beitrag der Gipsfaserplatte bei dieser Vorgehensweise überschätzt.

Biegezugspannungen in der abgeschätzten Höhe können von keramischen Erzeugnissen problemlos aufgenommen werden. Für den Verbund zwischen Keramik und Fugenmörtel (Haftzugfestigkeit) können sie problematisch sein.

Bei der Simulation der Zusammenhänge im FE-Modell sind insbesondere die Laststellungen Feldmitte, Plattenrand und Plattenecke näher zu untersuchen.

#### 2.3.2 Aufbau Finite Elemente Modell

In einer Parameterstudie wurden die Einflüsse, die sich aus den Materialparametern (Festigkeit, Steifigkeit und Dicke der Tragschicht, des Verlege-/Verfugungsmörtels und des Belags) und den systembedingten Parametern (z.B. Steifigkeit und Festigkeit der Unterkonstruktion, Rasterabstände und Systemhöhe) ergeben, auf die Verformungen eines Hohlbodens genauer untersucht. Bereits im Vorfeld sollte dadurch abschätzbar sein, bei welcher Last die Hohlbodensysteme versagen und wie groß die Verformungen zum jeweiligen Prüfzeitpunkt sein würden.

Das Finite Elemente Modell wurde mit SOFISTIK erstellt. Die Stützen wurden durch Federn modelliert, da hiermit eine Stützensenkung am besten dargestellt werden kann. Die Federsteifigkeit von 36.000 kN/m wurde aus den Materialkennwerten der Stützen berechnet. Zur Vereinfachung wurde nur die Estrichplatte ohne Gipsfaserplatte dargestellt. Als Materialeigenschaften wurden die ermittelten durchschnittlichen Materialkennwerte (Biegezug- und Druckfestigkeit sowie Elastizitätsmodul) der jeweiligen Versuchsfelder der Berechnung zugrunde gelegt. Des Weiteren wurden die bei den Bestätigungsprüfungen festgestellten Materialdicken berücksichtigt. In dem Finite Elemente Modell wurde von einem linear-elastischen Materialverhalten ausgegangen.

### 2.3.3 Hohlraumboden ohne Belag

Jedes Versuchsfeld wurde mittels SOFISTIK in einzelne Elemente diskretisiert. Für die einzelnen Rasterfelder wurde eine Diskretisierung von 10 x 10 Elementen festgelegt. Für jedes Versuchsfeld ergab dies 1.200 Berechnungspunkte. Im Achsmaß liegt jeder Berechnungspunkt dementsprechend 6 cm auseinander.

Die Eingabe des Modells in SOFISTIK untergliedert sich in folgende Teile:

- 1. Stufe: Festlegung der Materialeigenschaften (Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Elastizitätsmodul der verwendeten Produkte)
- 2. Stufe: Generierung eines Systems mit: Eingabe der Koordinaten für Auflager-/ Knotenpunkte und Bestimmung der Art der Lagerung (diese Koordinaten werden sowohl für obere wie untere Lage eingegeben) sowie der Koordinaten für die Belastungspunkte
- 3. Stufe: Belastung mit: Eingabe der Belastungsart und Lasten (Eigengewicht und Einzellasten bei einzelnen Punkten)

Aufgrund der Diskretisierung stimmen manche Belastungspunkte nicht zu 100 % mit den Belastungspunkten aus dem Bauteilversuch überein. In diesem Fall wurde bei dem Finite Elemente Modell der nächstliegende Belastungspunkt gewählt.

#### 2.3.4 Hohlraumboden mit Belag

Die FE-Modellierung für die Hohlbodensysteme mit Belag erfolgte analog der Modellierung der Hohlbodensysteme ohne Belag. Der Unterschied beider Modelle liegt darin, dass für die Systeme mit Belag ein mehrschichtiger Aufbau modelliert wurde und dabei verschiedene Parameter der Oberflächenmaterialeigenschaften variiert wurden, während bei den Systemen ohne Belag nur ein einschichtiger Aufbau, bestehend aus der Estrichplatte, vorausgesetzt wurde.

# 3 Versuchsergebnisse

# 3.1 Bestimmung der Materialkennwerte

### 3.1.1 Fließestriche

#### Frischmörtelkennwerte

Von jedem geprüften Estrich wurden Estrichtemperatur, Rohdichte und LP-Gehalt bestimmt. Zusätzlich wurde das Ausbreitmaß nach zwei Methoden bestimmt. Zum Einen das Ausbreitmaß nach Hägermann und zum Anderen das Ausbreitmaß mit einer 1,3 I Konsistenzprüfdose. Das Materialvolumen wurde auf Seite v im Anhang berechnet.

Die Menge des Anmachwassers wurde ebenfalls vermerkt.

Die nachstehende Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Frischmörtelkennwerte.

#### Tabelle 7: Frischmörtelkennwerte der Estrichmassen

Bezeichnung	T <sub>L [°C]</sub>	rF [%]	W [I]	a <sub>1,3I</sub> [cm]	a <sub>HG</sub> [cm]	T <sub>M</sub> [°C]	e [kg/dm³]	LP [Vol-%]
Estrich I	24,4	67,0	6,60	47	22,0	25,4	2,200	1,0
Estrich II	24,4	67,0	6,00	45	20,0	24,4	2,311	1,1
Estrich III	23,6	65,5	6,50	45	22,0	23,9	2,292	0,8
Estrich IV	24,5	65,5	6,00	40	17,5	24,6	2,267	1,2
Estrich V	24,5	65,5	3,50	37	15,0	24,5	2,234	2,5
T <sub>L</sub> = Temperatur Luft; r <sub>F</sub> = relative Luftfeuchte; W=Wassermenge; a <sub>1,3I</sub> = Ausbreitmaß mit 1,3 l Prüfdose; a <sub>HG</sub> = Ausbreitmaß nach Hägermann; T <sub>M</sub> = Temperatur Mörtel; $\rho$ = Dichte; LP = Luftporengehalt								

Bei allen angemischten Estrichmassen konnten die vom Hersteller angegebenen Frischmörtelkennwerte erreicht werden.

#### Festmörtelkennwerte

#### **Druck- und Biegezugfestigkeit**

Bei der Prüfung der Festmörtelkennwerte erreichte Estrich I bereits nach sieben Tagen die vom Hersteller erst nach 28 Tagen angegebene Biegezugfestigkeit von 6 N/mm<sup>2</sup>. Ähnlich verhielt es sich mit der Druckfestigkeit. Nach sieben Tagen wurde bereits eine Druckfestigkeit keit von 28 N/mm<sup>2</sup> nachgewiesen.

Estrich II zeigte eine deutlich langsamere Festigkeitsentwicklung als Estrich I. Erst nach 28 Tagen wurden wie vom Hersteller angegeben die Festigkeitswerte eines C25-F5 erreicht.

Auch Estrich III zeigte eine langsame Festigkeitsentwicklung. Estrich III entspricht den geforderten Festigkeitswerten erst nach 28 Tagen. Estrich IV erreichte bereits nach etwa 7 Tagen die für die Festigkeitsklasse eines C25-F5 geforderten Werte. Die Druckfestigkeit lag bei 31,1 N/mm<sup>2</sup> und die Biegezugfestigkeit bei 4,8 N/mm<sup>2</sup>.

Bei der Prüfung von Estrich V zeigte sich eine überproportional hohe Festigkeitsentwicklung. Die geforderte Festigkeitsklasse sollte C30-F5 betragen, jedoch erreichte Estrich V bereits nach 7 Tage eine Biegezugfestigkeit der Klasse F7, die im weiteren Verlauf konstant blieb. Auch die Druckfestigkeit war weit höher als erwartet. Sie betrug nach 7 Tagen einen Wert von ca. 60 N/mm<sup>2</sup> und stieg im weiteren Verlauf stetig an bis zu einer Endfestigkeit von 89 N/mm<sup>2</sup> nach 91 Tagen. In Tabelle 8 sind die Estriche mit ihren jeweiligen Festigkeiten und deren Klassifizierung nach DIN EN 13813 dargestellt. Die graphische Darstellung kann dem Anhang auf den Seiten vi bis viii entnommen werden.

Bezeichnung	Prüfalter [d]	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Klassifizierung nach DIN EN 13813	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Klassifizierung nach DIN EN 13813
Catriab I	28	7,6	F7	49	C40
ESUICITI	91	10,6	-	57	-
Estrich II	28	5,4	F5	33	C30
ESUICITII	91	6,7	-	40	-
Estrich III	28	5,9	F5	39	C35
ESUICITIII	91	7,5		45	
Estrich IV	28	7,1	F7	36	C35
ESUICITIV	91	8,2	-	46	-
	28	7,1	F7	77	C70
	91	7,3	-	89	_

#### Bestätigungsprüfungen

Zusätzlich zu den hergestellten Prismen und Zylindern wurden Platten hergestellt, die zu Bestätigungsprüfungen am Bauteil nach DIN 18560 herangezogen wurden. Die Platten hatten eine Größe von 500 mm x 500 mm und eine Dicke von 35 mm. Das Prüfalter der Platten betrug 28 Tage. Aus jeder Platte wurden fünf Prüfstreifen mit einer Breite von je 60 mm ausgeschnitten. Bei allen Proben konnten die geforderten Biegezugfestigkeiten nachgewiesen werden. Tabelle 9 zeigt die geforderten Werte an die Bestätigungsprüfung, sowie die tatsächlich ermittelten Biegezugfestigkeiten.

Horetollorangabo	Anforderung an keit an Plattens 185	forderung an Biegezugfestig- it an Plattenstreifen nach DIN 18560-2		verte	Klassifizierung
Terstellerangabe	Einzelwert [N/mm²]	Mittelwert [N/mm²] DIN 18560	Einzelwert [N/mm²]	Mittelwert [N/mm²]	2
			7,2		
	5,5	6,0	8,2	7,5	F7
Estrich I C30 - F6			7,5		
			7,9		
			6,8		
	4,5	5,0	4,9	5,3	F5
Estrich II C25 - F5			5.1		
			59		
			5.5		
	5,5	6,0	6.8	6,8	F6
Estrich III C30 - F6			6.4		
			6,8		
			7,2		
			6,6		
	4,5	5,0	6,8	7,0	F6
			7,1		
Estrich IV C25 -			7,6		
15			7,5		
			6,2		
			7,8		
Estrich V C20	4,5	5,0	8,8	8,4	F8
			9,0		
			7,8		
			8,5		

#### Tabelle 9: Bestätigungsprüfung an Plattenstreifen von Fließestrichen im Alter von 28 Tagen

#### E-Modul

Die E-Moduli wurden in Anlehnung an DIN 1048 durchgeführt. Maßgebend für die Berechnung der oberen Prüfspannung bei der Bestimmung des E- Moduls ist 1/3 der durchschnittlichen Druckfestigkeit.

Estrich I erreichte den vom Hersteller angegebenen E-Modul von 17.000 N/mm<sup>2</sup> bereits nach etwa 7 Tagen. Dieser stieg mit steigender Festigkeitsentwicklung weiter an bis zu einem 91 Tage-Wert von 30.000 N/mm<sup>2</sup>.

Estrich II zeigte eine ähnliche Entwicklung des E-Moduls und wies nach 91 Tagen einen Endwert von 25.600 N/mm<sup>2</sup> auf.

Bei Estrich III zeigte sich nach dem Erreichen eines 28 Tage-Wertes von etwa 20.000 N/mm<sup>2</sup> nur noch eine geringe Steigerung zu einem 91 Tage-Wert von etwa 22.000 N/mm<sup>2</sup>.

Bereits nach 7 Tagen erreichte Estrich IV ein E-Modul von etwa 15.000 N/mm<sup>2</sup>. Nach 28 Tagen konnte kein zufriedenstellender Wert gemessen werden, da die drei Einzelwerte weit auseinander lagen. Der E-Modul stieg zum 91 Tage-Wert weiter an auf 28.500 N/mm<sup>2</sup>.

Im Vergleich zu den anderen geprüften Estrichen zeigte Estrich V auch bei der Bestimmung des E-Moduls höhere Werte als die anderen Estriche. Er erreichte nach 7 Tagen bereits einen Wert von knapp 25.000 N/mm<sup>2</sup> und nahm in den folgenden zwölf Wochen noch einmal um 7.000 N/mm<sup>2</sup> zu. Die graphische Darstellung kann dem Anhang auf der Seite ix entnommen werden.

#### Schwindmessungen

Von jedem Estrich wurde ein Prismensatz zur Schwindmessung hergestellt. Nach einem Tag Aushärtung in der Schalung wurde mit den Schwindmessungen begonnen. Die Schwindprismen wurden in eine Messvorrichtung eingespannt, in der die Längenänderung mit einer Genauigkeit von 0,001 mm gemessen werden konnte. Nach einer Erhärtungszeit von 24 h wurden die Prismen ausgeschalt und es wurde mit der ersten Messung, der 0-Messung, begonnen. In den ersten 14 Tagen wurden die Schwindwerte täglich abgelesen, danach im Wochenrhythmus. Parallel zu den Schwindmessungen wurden auch die Raumtemperatur und die Luftfeuchte aufgezeichnet. Die Proben wurden im Klimaraum, bei einer Durchschnittstemperatur von 22,7 °C und 60% relativer Luftfeuchte, gelagert.

Die Probekörper von Estrich I begannen die ersten Tage nach Messbeginn zu quellen. Das Maximum des Quellens wurde jeweils nach 14 Tagen erreicht. Der Estrich war um etwa 0,030 mm/m gequollen. Dabei wurde die maximale freie Dehnung gemäß DIN EN 13454 von 0,5 ‰ nicht erreicht. Nachdem das Quellmaximum erreicht war fingen die Probekörper an zu schwinden. Nach 100 Tagen erreichten sie wieder ihr Ausgangsmaß. Am Ende der Messreihe nach 147 Tagen waren die Probekörper um etwa 0,01 mm/m geschwunden.

Estrich II fing ebenso zuerst an zu Quellen. Das Maximum von etwa 0,0125 mm/m wurde nach 9 Tagen erreicht. Die maximale freie Dehnung laut DIN EN 13454 wurde auch hier nicht erreicht, diese betrug 0,1 mm/m. Ab Tag 9 fingen die Probekörper an zu schwinden. Nach etwa 55 bis 60 Tagen hatten sie ihre Ausgangsgröße wieder erreicht. Nach 147 Tagen erreichten die Proben ein Endschwindmaß von 0,02 mm/m.

Auch Estrich III begann zunächst zu Quellen, bis die Maximalwerte von 0,015 mm/m nach 5 Tagen erreicht waren. Anschließend begannen die Proben zu schwinden. Ihre Ursprungsgröße erreichten sie nach 42 bzw. 60 Tagen. Nach 147 waren die Proben um etwa 0,02 mm/m geschwunden. Die maximale freie Dehnung der Herstellervorgaben von 0,1 mm/m wurde nicht erreicht.

Die Probekörper von Estrich IV fingen zunächst an zu quellen, bis sie einen Wert von 0,01 mm/m erreicht hatten. Nach 28 Tagen fingen die Probekörper dann an zu schwinden, sodass das Endschwindmaß nach 147 Tagen etwa 0,038 mm/m betrug.

Estrich V wies die stärksten Quelleigenschaften aller geprüften Estriche auf. Nach 35 Tagen waren die Probekörper 0,09 mm/m gequollen. Nach dem Erreichen des maximalen Quellwertes begannen die Proben zu Schwinden, sie konnten aber am Ende der Versuchszeit von 147 Tagen noch nicht wieder ihre Ursprungsgröße erreichen. Der Endwert lag bei +0,035 mm/m. Da Estriche III und V letztendlich zur Herstellung der Hohlbodenaufbauten verwendet wurden, wurde an ihnen noch noch das Schwindverhalten bei jeweils maximaler und minimaler Wasserzugabe ermittelt. Die Versuchsreihe dauerte 98 Tage. Tabelle 10 zeigt die hergestellten Mischungen mit der jeweiligen Wasserzugabe.

5		Wasserzugabe		
Produkt	Bezeichnung	Masse	Prozentual	
Estrich \/	Mischung 1	6,5 I / 40 kg	16,3%	
	Mischung 2	7,0 I / 40 kg	17,5%	
Catriab III	Mischung 3	3,5 l / 25 kg	14,0%	
Estrich III	Mischung 4	4,0 l / 25 kg	16,0%	

Tabelle TV: Mischungsverhaltnisse der untersuchten Estriche
---

Die Schwindmessungen wurden sowohl an Schwindprismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm, als auch an Schwindrinnen mit einer Länge von ca. 970 mm durchgeführt. Für jede Mischung wurden 3 Prismen und eine Schwindrinne hergestellt.

Ab einem Prüfalter von 4 Tagen wurde täglich die Längenänderung gemessen. Abbildung 15 zeigt die Schwindverläufe der einzelnen Mischungen.



Abbildung 15: Schwindverläufe an Prismen

Im Alter von 98 Tagen ergaben sich gegenüber der 0-Messung im Alter von 24 h die folgenden mittleren Schwindmaße:

- Mischung 1: -0,227 mm/m

- Mischung 2: -0,341 mm/m
- Mischung 3: -0,167 mm/m
- Mischung 4: -0,158 mm/m

Estrich V zeigte bei minimaler Wasserzugabe ein hohes anfängliches Quellen von bis zu +0,22 mm/m. Nach Erreichen des Quellmaximums schwindet Estrich V um 0,45 mm/m auf ein Schwindmaß nach 98 Tagen von -0,23 mm/m. Bei maximaler Wasserzugabe zeigt sich zunächst ein wesentlich geringeres Quellverhalten von nur +0,10 mm/m. Nach Erreichen des Quellungsmaximums verläuft bei beiden Mischungen das Trocknungsschwinden parallel. Bezogen auf die Ausgangslänge erreicht Mischung 1 im Alter von 98 Tagen einen Wert von -0,34 mm/m und Mischung 2 einen Wert von -0,23 mm/m.

Dagegen zeigt Estrich III von Anfang an ein wesentlich geringeres anfängliches Quellverhalten. Beide Mischungen erreichen Werte von etwa +0,06 mm/m. Das daraufhin einsetzende Schwindverhalten zeigt bei beiden Mischungen fast identische Verläufe. Im Alter von 98 Tagen erreichen beide Mischungen Schwindmaße von -0,16 mm/m.

Die Messungen an Schwindrinnen erfolgten an Rinnen mit einer Länge von ca. 970 mm und einem Rinnenquerschnitt von 100 mm x 40 mm. Eine Seite des Prüfkörpers wurde mittels eines Widerlagers fixiert, an die andere Seite wurde eine Platte angekoppelt, deren Bewegung mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern kontinuierlich gemessen wurde. Die Wegaufnehmer messen mit einer Genauigkeit von 0,01 mm. Die Prüfkörper sind durch eine Folie und die Einfettung der Schalung nahezu reibungsfrei gelagert. Die Abbildungen 16 und 17 zeigen den Versuchsaufbau sowie eine Detailansicht der Wegaufnehmer.



Abbildung 16: Schwindrinnen nach Betonage [Prüfbericht 135/2]



Abbildung 17: Messeinrichtung an Schwindrinnen

Nach 2 Stunden (Estrich V) bzw. etwa 3 Stunden (Estrich III) waren beide Estriche ausreichend angesteift und es wurden die Wegaufnehmer zur Wegmessung angeklemmt. Die Prüfkörper blieben bis zu einem Alter von 4 Tagen mit Folie abgedeckt, dann wurde die Folie entfernt. Es wurden die in Abbildung 18 dargestellten Verläufe, bezogen auf die 0-Messung im Alter von 2 bzw. 3 Stunden, im logarithmischen Maßstab ermittelt.



Abbildung 18: Schwindmessungen in Schwindrinnen im logarithmischen Maßstab bezogen auf 0-Messung

Am Ende des Prüfzeitraums von 98 Tagen ergaben sich gegenüber den 0-Messungen folgende Dehnungen:

- Mischung 1: +0,39 mm/m
- Mischung 2: +0,90 mm/m
- Mischung 3: +0,12 mm/m
- Mischung 4: +0,06 mm/m

Bezieht man die Messungen analog zu den Schwindmessungen der Prismen auf die Werte nach 24 h, so ergeben sich die in Abbildung 19 dargestellten Verläufe.



Abbildung 19: Schwindmessungen an den Schwindrinnen nach 24h

Nach 98 Tagen ergaben sich gegenüber der 0-Messung im Alter von 24 Stunden die folgenden Längenänderungen:

- Mischung 1: +0,01 mm/m
- Mischung 2: +0,09 mm/m
- Mischung 3: +0,12 mm/m
- Mischung 4: +0,05 mm/m

Bei der Bewertung der Ergebnisse der beiden Schwindprüfungen lässt sich feststellen, dass Estrich V bei den Messungen an Schwindrinnen ein völlig anderes Verhalten aufweist als bei den Messungen an den Schwindprismen. Bei der Messung an Schwindrinnen zeigt die Mischung mit der maximalen Wasserzugabe mit +0,97 mm/m ein deutlich höheres anfängliches Quellen als die Mischung mit der minimalen Wasserzugabe, die ein anfängliches Quellen von +0,56 mm/m aufweist. Das höchste Quellmaß wird bei den Versuchen an Schwindrinnen erst nach 10 Tagen erreicht, bei den Prismen wurde es dagegen schon nach 4 Tagen erreicht. Das Schwindverhalten zeigt die gegen Versuchsende ermittelten Schwindwerte sind geringer als die an Prismen ermittelten. Die Mischungen schwinden nur um 0,07 mm/m bzw. 0,17 mm/m. Setzt man analog zu den Messungen an den Schwindprismen die Längenänderung nach 24 Stunden als Anfangswert an, so zeigen beide Mischungen ein ähnliches Quellverhalten von bis zu ca. +0,17 mm/m. Anschließend schwindet Mischung 1 relativ stark bis zu einer Längenänderung von fast 0, während Mischung 2 auf eine Längenänderung von +0,09 mm/m schwindet.

Estrich III zeigt auch bei den Messungen an den Schwindrinnen ein wesentlich geringeres anfängliches Quellverhalten. Beide Mischungen erreichen Werte von etwa +0,13 mm/m, wobei der Maximalwert hier erst nach 34 Tagen erreicht wird. Beim darauffolgenden Schwindverhalten zeigen beide Mischungen ähnliche Verläufe, wobei Mischung 4 mit der maximalen Wasserzugabe etwas stärker schwindet.

### 3.1.2 Gipsfaserplatte

Die Prüfung erfolgte wie in Abbildung 19 dargestellt.



Abbildung 20: Bestimmung der Biegezugfestigkeit der Gipsfaserplatten

Die Bruchlast lag im Mittel bei 1615 N. Die Durchbiegung betrug 6,6 – 6,8 mm. Es konnte kein nennenswerter Unterschied zwischen im Laborklima gelagerten und auf Massenkonstanz getrockneten Proben festgestellt werden. Im Schnitt lag eine Biegezugfestigkeit von 8,2 N/mm<sup>2</sup> und ein Elastizitätsmodul von 4.135 N/mm<sup>2</sup> vor. Im Kraft-Weg-Diagramm war deutlich zu erkennen, dass die Gipsfaserplatten eine Anisotropie hinsichtlich der Faserausrichtung/Orientierung aufwiesen. Die Anisotropie wurde im Nachrissverhalten der Platten, wie in Abbildung 20 dargestellt, deutlich. Es konnten jedoch keine nennenswerten Unter-

schiede bei allen geprüften Platten bezüglich der Maximalkraft festgestellt werden. Das nachstehende Diagramm in Abbildung 21 zeigt die Anisotropie der Gipsfaserplatten, hierbei bezeichnet P 1 einen Probekörper mit Fasern in Längsrichtung und P 2 einen Probekörper mit Fasern in Querrichtung.



Abbildung 21: Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Gipsfaserplatten

#### 3.1.3 Stützen

Zu Beginn der Belastung wurden die Stützen zunächst 1,5 mm gestaucht bevor eine Kraft aufgebracht werden konnte. Bei 20 kN lagen die Verformungen bei etwa 3 mm. In Abbildung 22 ist der Versuchsaufbau dargestellt.



Abbildung 22: Prüfung der Stützen auf vierfache Nennlast

# 3.2 Bauteilversuche

#### 3.2.1 Hohlraumboden ohne Belag

#### Mörtelkennwerte

Die Tragschichtfestigkeit wurde an Prismen (Biegezug- und Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul), die bei der Herstellung der Versuchsfelder parallel mit hergestellt wurden, bestimmt.

Gegenüber den vorgenannten Versuchen zur Bestimmung der Materialparameter waren die Festmörtelkennwerte niedriger. Zur besseren Verarbeitbarkeit wurde das Maximum (nach Herstellerangaben) an möglichem Anmischwasser benötigt.

Als Frischmörtelkennwerte wurden bestimmt:

- Ausbreitmaß: 20 22 cm (Hägermann)
- Rohdichte: 2,2 2,3 kg/dm<sup>3</sup>

Nach einer Trocknungszeit von 28 Tagen wurden die Festmörtelkennwerte bestimmt. Die Prismenprüfung auf Biegezug- und Druckfestigkeit fand bei den Feldern 1 und 2 nach 36 Tagen statt, bei den Feldern 3 und 4 nach 39 Tagen. Die Ergebnisse sind in der nachstehenden Tabelle 12 dargestellt. Zur Bestimmung des E-Moduls wurden die Probekörper mit 1/3 der im Vorfeld an separaten Prismen bestimmten Druckfestigkeiten belastet. Die Prüfung des E-Moduls fand nach 42 Tagen statt. Da die Felder 3 und 4 aus dem gleichen Estrich hergestellt wurden und im selben Versuchsraum aufgebaut wurden, genügte ein Prismensatz zur Bestimmung des E-Moduls. Die Bestätigungsprüfungen an den Plattenstreifen wurden nach 49 bzw. 52 Tagen durchgeführt. Nach DIN 18560-2:2009-09 "Estriche im Bauwe-
sen" wurden die Plattenstreifen nass gesägt. Die nachstehend aufgeführten Werte in Tabelle 11 bezeichnen jeweils den Mittelwert aus 3 geprüften Plattenstreifen.

	Biegezugfestig- keit [N/mm²]	Druckfestigkeit [N/mm²]	E- Modul [N/mm²]	Trockenrohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	Bestätigungsprüfung [N/mm²]
Versuchsfeld 1	6,8	30	17.587	2,00	6,28
Versuchsfeld 2	6,2	40	22.295	2,04	5,27
Versuchsfeld 3	6,7	31	18.320	2,04	5,10
Versuchsfeld 4	6,9	33	18.320	2,03	6,70

Tabelle 11: Festmörtelkennwerte der Versuchsfelder 1 bis 4

### Schwindmessungen

Die Schwindmessungen ergaben für Feld 1 einen Mittelwert von -0,08 mm/m. Für Feld 2 lag die Schwindverformung im Mittel bei -0,06 mm/m. Die Felder 3 und 4, beide mit Estrich III hergestellt, zeigten ein quellendes Verhalten, gegenüber den anderen Proben. Die Proben quollen im Mittel um 0,01 mm/m. Dieser Unterschied lässt sich durch die Lagerung der Proben erklären, die Proben wurden jeweils in dem Raum aufbewahrt, in dem auch das jeweilige Hohlraumbodensystem aufgebaut war. Die Versuchsfelder 1 und 2 wurden in Raum 1 aufgebaut, dessen mittlere Temperatur bei 20 °C und die relative Luftfeuchte bei etwa 44 % lag. In Raum 1 schwankten die Feuchtigkeitswerte aufgrund des im Nebenraum befindlichen Nasssägeraums. Versuchsfeld 3 und 4 befanden sich in Raum 2, dieser wies konstante Temperatur- und Feuchtigkeitswerte auf. Die Raumtemperatur lag bei 21,5 °C und die relative Luftfeuchte bei 62 %.

### Oberflächenzugfestigkeit

Nach der Systemprüfung der Versuchskörper wurden zusätzliche Oberflächenzugfestigkeitsprüfungen durchgeführt. An jeder Platte wurden je drei Stellen mit Ringnut (circa 5 mm tief) und je drei ohne Ringnut geprüft. Es befand sich immer eine vorgebohrte neben einer nichtvorgebohrten Stelle, der Maximalabstand betrug 100 mm. Anschließend wurden die Prüfflächen abgeschliffen. Es wurden runde Haftzugstempel mit einem Durchmesser von 50 mm verwendet, die mit einem zweikomponenten Epoxidharzkleber aufgeklebt wurden. Jeglicher Klebstoffüberstand um die Prüfflächen wurde entfernt. Geprüft wurde mit einer Geschwindigkeit von 100 N/s. Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an DIN 18555. Die Tabellen 12 und 13 stellen die Ergebnisse dar.

Prüfstellen mit Ringnut		Oberflächenzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Versagensart
	Stelle 1	1, 7	Kohäsionsbruch im Estrich
Versuchsfeld 1	Stelle 2	1,0	40% Bruch zw. Klebstoffschicht und Abzugskörper; 60% Kohäsi- onsbruch im Estrich
	Stelle 3	1,0	Kohäsionsbruch im Estrich
	Mittelwert	1,2	
	Stelle 1	1,2	Kohäsionsbruch im Estrich
Voreuchefold 2	Stelle 2	1,0	Kohäsionsbruch im Estrich
versuchsteid 2	Stelle 3	1,78	Kohäsionsbruch im Estrich
	Mittelwert	1,3	
	Stelle 1	1,3	20% Bruch zw. Klebstoffschicht und Abzugskörper; 80% Kohäsi- onsbruch im Estrich
Versuchsfeld 3	Stelle 2	1,0	Kohäsionsbruch im Estrich
	Stelle 3	1,5	Kohäsionsbruch im Estrich
	Mittelwert	1,2	
	Stelle 1	2,1	Kohäsionsbruch im Estrich
	Stelle 2	1,7	Kohäsionsbruch im Estrich
Versuchsfeld 4	Stelle 3	1,1	15% Bruch zw. Klebstoffschicht und Abzugskörper; 85% Kohäsi- onsbruch im Estrich
	Mittelwert	1,6	

### Tabelle 12: Oberflächenzugfestigkeiten Estrich Versuchsfelder 1 bis 4 mit Ringnut

Prüfstellen ohne Ringnut		Oberflächenzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Versagensart
	Stelle 1	1,1	Kohäsionsbruch im Estrich
Versuchsfeld 1	Stelle 2	1,6	Kohäsionsbruch im Estrich
	Stelle 3	1,0	Kohäsionsbruch im Estrich
	Mittelwert	1,2	
	Stelle 1	1,4	Kohäsionsbruch im Estrich
Voreusbofold 2	Stelle 2	1,0	Kohäsionsbruch im Estrich
versuchstelu z	Stelle 3	1,2	Kohäsionsbruch im Estrich
	Mittelwert	1,2	
Versuchsfeld 3	Stelle 1	2,0	Kohäsionsbruch im Estrich
	Stelle 2	1,1	Kohäsionsbruch im Estrich
	Stelle 3	1,8	10% Bruch zw. Klebstoffschicht und Abzugskörper; 90% Kohäsi- onsbruch im Estrich
	Mittelwert	1,6	
	Stelle 1	1,4	Kohäsionsbruch im Estrich
Versuchsfeld 4	Stelle 2	1,0	20% Bruch zw. Klebstoffschicht und Abzugskörper; 80% Kohäsi- onsbruch im Estrich
	Stelle 3	2,5	Kohäsionsbruch im Estrich
	Mittelwert	1,7	

Bei allen Prüfstellen lagen die Oberflächenzugfähigkeiten auf dem gleichen Niveau. Es konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden zwischen den Stellen mit bzw. ohne Ringnut geprüft.

Nahezu an allen Messstellen konnte die nach [N33] für Parkett und elastische Bodenbeläge im Bürobereich geforderte Oberflächenzugfestigkeit von 1,0 N/mm<sup>2</sup> als Einzelwert nachgewiesen werden. Auch die für keramische sowie Natursteinbeläge und textile Bodenbeläge geforderte Oberflächenzugfestigkeit von 0,5 N/mm<sup>2</sup> bzw. 0,8 N/mm<sup>2</sup> konnte nachgewiesen werden. Die vier Versuchsfelder waren damit für eine Belegung geeignet.

### Systemprüfung

Die Tabellen 14 bis 17 zeigen die Verformungsergebnisse der Prüfung (siehe auch Anhang Seiten xi und xii). Die Lasten wurden entsprechend den Laststufen des Systems gemäß Herstellerangaben aufgebracht. Hierbei wird zunächst die einfache Prüfung der Messstellen berücksichtigt. Die Prüfung der Bruchlast erfolgt in einer gesonderten Darstellung. In den Abbildungen 23 bis 26 sind die Versuchsfelder 1 bis 4 nach dem Versagen dargestellt.

Versuchsfeld 1	Kraft [N]	Durchbiegung [mm]	Rissbreite [mm]	Bemerkung
Auflagernähe (Messstelle 1)	8.000	0,82	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Auflagernähe (Messstelle 1)	10.000	1,17	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Zwischen zwei Stützen (Messstelle 2)	8.000	1,17	-	Bis 8.000 N keine Verände- rungen feststellbar, anschlie- ßend Abfall der Kraft auf 7.200 N
Zwischen zwei Stützen (Messstelle 2)	7.200	1,40	-	Setzgeräusche des Estrichs
Zwischen zwei Stützen (Messstelle 2)	8.000	1,78	-	Lasteinleitung wieder auf 8.000 N erhöht, dann Ab- bruch
Feldmitte (Messstelle 3)	8.000	1,33	-	Bis 8.000 N keine Verände- rungen feststellbar
Randbereich 300 mm (Messstelle 4)	7.800	1,57	-	Setzgeräusche im Estrich, kein Riss sichtbar; Lasteinlei- tung abgebrochen
Randbereich 600 mm (Messstelle 5)	6.000	2,01	-	Keine Veränderungen fest- stellbar
Ecknähe (Messstelle 6)	7.400	1,55	0,15	Bei 7.400 N Setzgeräusche und Bruch des Estrichs, Risse sichtbar; Lasteinleitung abgebrochen

Tabelle 14: Verformungen bei Versuchsfeld 1



Abbildung 23: Versagen bei Versuchsfeld 1 nach Prüfung

Versuchsfeld 2	Kraft [N]	Durchbiegung [mm]	Rissbreite [mm]	Bemerkung
Auflagernähe (Messstelle 1)	8.000	0,67	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Auflagernähe (Messstelle 1)	10.000	1,86	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Zwischen zwei Stützen (Messstelle 2)	8.000	1,18	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Feldmitte (Messstelle 3)	8.000	0,96	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Randbereich 300 mm (Messstelle 4)	8.000	1,45	0,3	Bis 8.000 N keine Verände- rungen feststellbar, dann Bruch des Estrichs; Lasteinlei- tung abgebrochen
Randbereich 600 mm (Messstelle 5)	6.000	1,70	-	Keine Veränderungen fest- stellbar
Ecknähe (Messstelle 6)	-	-	0,15	Beim Ausrichten der Stütze und kurzzeitigem Festspannen an der Decke bei ca. 500 Estrichplatte bereits gebro- chen; keine Lasteinleitung; Riss von Lasteinleitung bei Messstelle 5

Tabelle 15: Verformungen bei Versuchsfeld 2



Abbildung 24: Versagen bei Versuchsfeld 2 nach Prüfung

Versuchsfeld 3	Kraft [N]	Durchbiegung [mm]	Rissbreite [mm]	Bemerkung
Auflagernähe (Messstelle 1)	8.000	0,66	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Auflagernähe (Messstelle 1)	10.000	1,82	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Zwischen zwei Stützen (Messstelle 2)	8.000	0,76	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Feldmitte (Messstelle 3)	8.000	0,70	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Randbereich 300 mm (Messstelle 4)	8.000	0,83	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Randbereich 600 mm (Messstelle 5)	6.000	0,89	-	Keine Veränderungen fest- stellbar
Ecknähe (Messstelle 6)	6.000	1,14	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar

Tabelle 16: Verformungen bei Versuchsfeld 3



Abbildung 25: Versagen bei Versuchsfeld 3 nach Prüfung

Versuchsfeld 4	Kraft [N]	Durchbiegung [mm]	Rissbreite [mm]	Bemerkung
Auflagernähe (Messstelle 1)8.0000,66-Auflagernähe (Messstelle 1)10.0000,83-	8.000	0,66	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar		
Zwischen zwei Stützen (Messstelle 2)	8.000	0,66	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Feldmitte (Messstelle 3)	8.000	0,66	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Randbereich 300 mm (Messstelle 4)	7.500	2,10	0,25	Bei 7.500 N Bruch des Est- richs, weitere Lasteinleitung nicht möglich; Messungen abgebrochen
Ecknähe (Messstelle 5)	8.000	1,51	-	Setzgeräusche des Estrichs bei 8.500, keine Risse sicht- bar; Messungen abgebrochen

Tabelle 17: Verformungen bei Versuchsfeld 4



Abbildung 26: Versagen bei Versuchsfeld 4 nach Prüfung

### Bruchlast

Die Ermittlung der maximalen Bruchlast erfolgte anhand einer erneuten Belastung von Messstelle 3, die in Feldmitte lag. Hierbei wurde die Lasteinleitung soweit erhöht, bis sich Versagensanzeichen in Form von Rissen einstellten. Tabelle 19 zeigt die ermittelten Bruchlastwerte für die Versuchsfelder 1 bis 4.

#### Tabelle 18 Bruchlastermittlung

Bruchlast	Max. Belastung [N]	Durchbiegung [mm]	Bemerkungen
Hohlboden 1	8.500	1,58	Setzgeräusche im Estrich, Riss wird sichtbar
Hohlboden 2	-	-	-
Hohlboden 3	19.500	1,29	Keine Veränderungen feststellbar, Lasteinlei- tung wird abgebrochen, da nur eine 20 kN Kraftmessdose einge- baut ist
Hohlboden 4	-	-	-

Hohlboden 1 konnte an Messstelle 3 mit 8.500 N belastet werden, es stellte sich eine Durchbiegung von 1,58 mm ein. Wegen beginnender Rissbildung, wurde die Lasteinleitung abgebrochen.

Bei Hohlboden 2 konnte eine Prüfung der Bruchlast nicht durchgeführt werden, da das System schon bei der Prüfung der sechs Messstellen zuvor Versagenszeichen aufwies.

Hohlboden 3 konnte an Messstelle 3 bis 19.500 N belastet werden, ohne dass sich Veränderungen zeigten. Der Versuch musste an dieser Stelle jedoch abgebrochen werden, da nur eine Kraftmessdose eingebaut war, die 20 kN aufnehmen konnte. Zusätzlich wurde bei Hohlboden 3 noch Messstelle 5 auf Bruchlast geprüft. Hierfür ergab sich eine maximale Bruchlast von 17.500 N bei einer Durchbiegung von 2,33 mm. Die Lasteinleitung wurde daraufhin abgebrochen, da man Setzgeräusche hören konnte und sich ein Riss mit einer Rissbreite von 0,5 mm einstellte.

Bei Hohlboden 4 konnte ebenfalls keine Prüfung der Bruchlast stattfinden, da auch hier die Messung der vorangegangenen Messstellen bereits ein Systemversagen verursachte.

### 3.2.2 Hohlraumboden mit Belag

#### Mörtelkennwerte

Für die Frischmörtelkennwerte ergaben sich für beide Felder folgende Werte:

<ul> <li>Ausbreitmaß nach Hägermann:</li> </ul>	26,0 mm
---	---------

- Rohdichte: 2,251 g
- LP-Gehalt: 2,30 %

Jeweils nach 28 und 36 Tagen wurden an den hergestellte Prismen zuerst die Biegezugfestigkeit und danach die Druckfestigkeit bestimmt. Dabei entspricht der 28 Tage Wert der normativen Vorgabe und der 36 Tage Wert entspricht dem Prüfdatum der Versuchsfelder. Die Prüfkörper 1 bis 6 stammen von Feld 6, Prüfkörper 7 bis 9 von Feld 5. Die Ergebnisse sind in Tabelle 19 dargestellt.

Versuchsfeld	Prüfkörper	Probenalter [d]	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]
	1	28	6,8		31,9	31,2
	2	28	6,5	6,5	30,2	
Versuchsfeld 6	3	28	6,3		31,6	
	4	36	5,7		31,3	31,2
	5	36	6,6	6,2	30,5	
	6	36	6,2		31,9	
Versuchsfeld	7	36	7,4		36,1	
	8	36	7,4	7,4	33,8	36,1
, j	9	36	7,4		38,4	

Tabelle 19: Biegezug- und Druckfestigkeiten des Fließestriches

Die Herstellerangaben geben für die Druckfestigkeit einen Wert von mindestens 30 N/mm<sup>2</sup> und für die Biegezugfestigkeit einen Minimalwert von 6 N/mm<sup>2</sup> an. Zum Prüfzeitpunkt nach 36 Tagen lagen die Festigkeitswerte dann über den Herstellerangaben.

Die Prismensätze von Fliesenkleber und Fugenmaterial (beides Flexmörtel) wurden jeweils nach 36 Tagen, wie in Tabelle 20 dargestellt, geprüft und ergaben die nachstehenden Werte. Dabei sind Prüfkörper 10 bis 12 aus Fliesenkleber hergestellt und Prüfkörper 13 bis 15 aus Fugenmörtel.

Prüf	körper	Probenalter [d]	Biegezugfestigkeit [N/mm²]	Mittelwert [N/mm²]	Druckfestigkeit [N/mm²]	Mittelwert [N/mm²]
	10	36	13,7		36,4	
kleber	11	36	12,3	12,8	39,9	38,4
	12	36	12,6		38,8	
Funda	13	36	9,3		38,5	
mörtel	14	36	8,9	9,2	41,9	40,1
	15	36	9,5		39,8	

Tabelle 20: Biegezug- und Druckfestigkeit des Fliesenklebers und des Fugenmaterials

### Systemprüfung

Die beiden nachstehenden Tabellen 21 und 22 zeigen die einzelnen Messstellen mit den aufgebrachten Lasten und der dazugehörigen Durchbiegung (siehe auch Anhang Seite xiii). Die Belastung bis zum Bruch bleibt hierbei zunächst unberücksichtigt.

Versuchsfeld 5	Kraft [N]	Durchbiegung [mm]	Rissbreite [mm]	Bemerkung
Auflagernähe (Messstelle 1)	8.000	0,87	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Auflagernähe (Messstelle 1)	10.000	1,17	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Zwischen zwei Stützen (Messstelle 2)	8.000	0,94	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Feldmitte (Messstelle 3)	8.000	0,93	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Randbereich 300 mm (Messstelle 4)	8.000	1,18	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar; Prüfstelle direkt auf Fliesenkante
Randbereich 600 mm (Messstelle 5)	6.000	1,14	-	Keine Veränderungen fest- stellbar
Ecknähe (Messstelle 6)	6.000	1,51	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar

Tabelle 21: Verformungen bei Versuchsfeld 5 (Belag ohne Verband)

Versuchsfeld 6	Kraft [N]	Durchbiegung [mm]	Rissbreite [mm]	Bemerkung
Auflagernähe (Messstelle 1)	8.000	0,87	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Auflagernähe (Messstelle 1)	10.000	1,11	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Zwischen zwei Stützen (Messstelle 2)	8.000	0,87	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Feldmitte (Messstelle 3)	8.000	0,96	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar
Randbereich 300 mm (Messstelle 4)	8.000	1,14	-	Lautes Knackgeräusch kurz vor 8.000 N, keine sichtbaren Risse
Randbereich 600 mm (Messstelle 5)	6.000	1,20	-	Lautes Knackgeräusch bei 5.200 N, keine sichtbaren Risse
Ecknähe (Messstelle 6)	6.000	0,81	-	Keine Veränderungen Fest- stellbar

Tabelle 22: Verformunge	n bei Versuchfeld 6	(Belag im L	_äuferverband)
-------------------------	---------------------	-------------	----------------

#### Bruchlast

Für die Prüfung der Bruchlast und der dadurch entstehenden Durchbiegung wurde Messstelle 3 gewählt, die in Feldmitte liegt. Tabelle 23 stellt die Ergebnisse dar.

Bruchlast	Max. Belastung [N]	Durchbiegung [mm]	Bemerkungen
Hohlboden 5	13.800	2,06	Sichtbare Schäden am System, Rissbildung zwischen den Fugen, durchgehender Riss im Estrich
Hohlboden 6	3.600	2,16	Im Vorfeld keine Schäden erkenn- bar

Bei Hohlboden 5 konnte eine Bruchlast von 13.800 N bei einer Durchbiegung von 2,06 mm aufgebracht werden. Erst bei dieser Last versagte das System und es traten sichtbare Schäden in Form von Rissen in den Fugen und einem durchgehenden Riss durch die Estrichschicht auf.

Bei Hohlboden 6 konnte nur noch eine maximale Last von 3.600 N auf Messstelle 3 aufgebracht werden, da das System keine weiteren Lasten aufnehmen konnte. Dies entsprach

nicht der zuvor aufgebrachten Last von 8.000 N aus der Prüfung der einzelnen Messstellen. Es konnten trotz dieser geringen Fähigkeit der Lastaufnahme keine optischen Schäden am System festgestellt werden. Die Abbildungen 27 und 28 zeigen Versuchsfeld 5 nach der Prüfung.



Abbildung 27: Riss im Übergang Fliese zu Fugenbereich bei Versuchsfeld 5 nach Prüfung



Abbildung 28: Versagen bei Versuchsfeld 5 nach Prüfung

# 3.3 Finite Elemente Modell/Numerische Simulation

### 3.3.1 Hohlraumboden ohne Belag

Bei einem Vergleich der Versuchsergebnisse zeigte sich, dass die berechneten Verformungen weitestgehend mit den gemessenen übereinstimmen. Die Ergebnisse können allerdings nur bis zu den Prüfpunkten verglichen werden, an denen die Versuchsfelder noch nicht versagt hatten und keine Vorschädigung vorlag.

Die berechneten Verformungen setzen sich im Gegensatz zu den gemessenen Verformungen nur aus den Verformungen aus Stützensenkung und Verformung des Estrichs zusammen. D.h. zum Vergleich müssen die gemessenen Werte um den Beitrag des Gummistempels reduziert werden.

Die berechneten Verformungen, mit zugehöriger angegebener Kraft, können Tabelle 24 entnommen werden.

Messstelle	Versuchsfeld 1	Versuchsfeld 2	Versuchsfeld 3	Versuchsfeld 4
Auflagernähe	0,39 mm	0,36 mm	0,20 mm	0,19 mm
(Messstelle 1)	8.000 N	8.000 N	8.000 N	8.000 N
Zwischen zwei Stützen (Messstelle 2)	0,44 mm 8.000 N	0,41 mm 8.000 N	0,18 mm 8.000 N	0,17 mm 8.000 N
Feldmitte	0,53 mm	0,46 mm	0,20 mm	0,18 mm
(Messstelle 3)	8.000 N	8.000 N	8.000 N	8.000 N
Randbereich 300 mm (Messstelle 4)	0,28 mm 7.800 N	0,26 mm 8.000 N	0,13 mm 8.000 N	0,21 mm 7.500 N
Randbereich 600 mm (Messstelle 5)	0,54 mm 6.000 N	0,49 mm 6.000 N	0,18 mm 6.000 N	-
Ecknähe (Messstelle 6)	0,57 mm 7.400 N	0,43 mm 8.000 N	0,16 mm 6.000 N	0,24 mm 8.000 N

#### Tabelle 24: Durchbiegungen bei der FE-Simulation, Systeme ohne Belag

Abbildungen 29 bis 36 zeigen die graphische Darstellung des Systems sowie die Belastungen an den einzelnen Messstellen.



Abbildung 29: Darstellung des unbelasteten Systemaufbaus ohne Belag



Abbildung 30: Knotennummerierung der Berechnungspunkte



Abbildung 31: Belastung an Messstelle 1



Abbildung 32: Belastung an Messstelle 2



Abbildung 33: Belastung an Messstelle 3



Abbildung 34: Belastung an Messstelle 4



Abbildung 35: Belastung an Messstelle 5



Abbildung 36: Belastung an Messstelle 6

### 3.3.2 Hohlraumboden mit Belag

Es wurden vier verschiedene Modelle konstruiert, in denen die Estrich- wie auch Fliesenparameter jeweils variieren. Dabei entsprach Modell 0 einem Aufbau ohne Belag. Jede Messstelle wurde mit 8 kN belastet. Der Systemaufbau wurde in drei Schichten unterteilt.

Schicht 1 entspricht der Estrichschicht, es wurden die Dicke und der E-Moduls variiert.

Schicht 2 entspricht dem Fliesenkleber mit einer Dicke von 3 mm und einem E-Modul von 5.000 N/mm<sup>2</sup>.

Die dritte (oberste) Schicht entspricht dem Fliesenbelag. Hierbei wurden die Fugen vernachlässigt. Es wurden wie in Schicht 1 die Dicke und der E-Modul variiert.

Die Variationen entsprechen den Modellen Mod. 5, Mod. 12 und Mod. 17 und 2.3.1.

Ziel der Modellierung war es die maximalen Verformungen (Durchbiegungen) in Abhängigkeit des gewählten Estrichs und des Oberbelags zu bestimmen. Einen Überblick über die einzelnen Modelle und der Ergebnisse der Modellierung gibt Tabelle 25.

	Estrich	Kleber	Fliesen		Messstellen					
Mod.	E [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	Dicke [mm]	1	2	3	4	5	6	
	E	E	E		[mm]					
	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]							
	d	d	d							
	[mm]	[mm]	[mm]							
Mod.	20.000	ohne Belag		0,431	0,507	0,624	0,315	0,636	0,679	
0	40									
Mod. 1 5	15.000	5.000	100.000	0 272	0 25/	0 201	0 220	0 5 4 5	0.490	
	35	3	5	0,272	0,334	0,394	0,239	0,545	0,480	
Mod.	25.000	5.000	50.000	0 1 0 2	0.100	0.206	0.210	0.145	0 270	0.247
12	45	3	10	0,185	0,200	0,219	0,143	0,278	0,247	
Mod. 17	20.000	5.000	60.000	0.216	0.257	0 270	79 0,179	0,368	0,346	
	40	3	8	0,216	0,257	0,279				

 Tabelle 25: Verformungen der FE-Simulation, Systeme mit Belag

Es ist erkennbar, dass durch das Aufbringen eines Oberbelags sich die Durchbiegungen verringern. Bei einem weichen Estrich mit einer geringen Dicke und einem steifen, dünnen Belag wie in Modell 5 erhält man die größten Verformungen. Dies korreliert mit den berechneten, höchsten Biegespannungen aus 2.3.1.

Ist der Estrich dagegen sehr steif und hat eine hohe Dicke und der Oberbelag ist ebenfalls dick, jedoch relativ weich (wie in Modell 12), so ergeben sich deutlich niedrigere Verformungen. Dies korreliert ebenfalls gut mit den berechneten Biegespannungen aus 2.3.1.

# 4 Versuchsauswertung

# 4.1 Hohlraumboden ohne Belag

Bei den Versuchsfeldern 1, 2 und 4 war es nicht möglich zunächst die sechs vorgegebenen Messstellen zu belasten und danach noch einmal Messstelle 3 auf die Bruchlast zu prüfen. Bei Versuchsfeld 1 zeigte sich bereits bei Prüfung der Messstelle 2 ein Abfall der Kraft nach Aufbringen der 8.000 N. Bei Prüfung der Messstellen 4 und 6 zeigten sich zunächst Setzgeräusche und im weiteren Verlauf erfolgte ein Bruch des Estrichs an Messstelle 6. Es wurde trotzdem versucht anhand von Messstelle 3 die maximale Bruchlast festzustellen. Es konnte noch einmal eine Last von 8.500 N aufgebracht werden bevor sich Setzgeräusche und ein Bruch im Estrich zeigten. Versuchsfeld 2 brach bei Belastung von Messstelle 5 und versagte bei Messstelle 6 ohne eine aufgebrachte Lasteinwirkung. Bei Versuchsfeld 4 entstand bei der Prüfung der Messstelle 4 bereits ein Bruch. Lediglich Versuchsfeld 3 blieb über die Messreihe hinaus intakt und konnte so auf die maximale Bruchlast geprüft werden. Dabei konnte Messstelle 3 mit 19.500 N belastet werden ohne dass sich Veränderungen an der Konstruktion zeigten. Die Lasteinleitung musste an dieser Stelle jedoch abgebrochen werden, da die Kraftmessdose nur 20.000 N aufbringen konnte. Es wurde zusätzlich noch eine Lasteinleitung an Messstelle 5 durchgeführt. Dabei konnte das System eine Last von 17.500 N aufnehmen, erst dann zeigten sich Risse.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse zeigt, dass eine höhere Estrichfestigkeit einen deutlichen Einfluss auf die Verformungen des Systems hat. Wird die Dicke des Fließestrichs erhöht oder ein Estrich mit einem höheren E-Modul verwendet, so verringern sich die Durchbiegungen, das System wird steifer. Halbiert man den Rasterabstand, so halbieren sich in gleichem Maße auch die Durchbiegungen.

Das in den vier verschiedenen Varianten hergestellte Hohlbodensystem kann nach DIN EN 13213 [R1] in die Elementklasse 3 eingestuft werden, da bei allen Systemen die Mindestanforderungen (maximale Durchbiegung von 2 mm bei Messstelle 3, Erreichen der Bruchlasten für Elementklasse 3 und 3 Messungen ohne Versagen aufnehmen) an Elementklasse 3 nachgewiesen werden konnten. Bei Versuchsfeld 1 konnten die Elementklasse 3 sowie die Mindestfestigkeiten des Estrichs nachgewiesen werden, jedoch erreichten sie exakt den Grenzbereich der jeweiligen Festigkeitsstufe.

### 4.2 Hohlraumboden mit Belag

Zunächst konnten beide Felder an jeder Messstelle mit den vorgesehenen Belastungen geprüft werden. Feld 5 zeigte hierbei keinerlei Auffälligkeiten in Form von Knackgeräuschen oder Rissen. Bei Feld 6 traten trotz lauter Knackgeräusche an den Messstellen vier und fünf kurz vor Erreichen der Ziellast keine erkennbaren Risse auf. Bei Ermittlung der Bruchlast konnte System 5 mit einer hohen Bruchlast von 13.800 N belastet werden. Daraus lässt sich schließen, dass dieses System auch mit Belag seine geforderte Widerstandsklasse erfüllen kann. Hohlraumboden 5 kann aufgrund seiner sehr hohen Bruchlast von nahezu 14 kN nach DIN EN 13213 [R1] der Elementklasse 6 zugeordnet werden. Hohlboden 6 dagegen war durch die vorangegangenen Prüfungen, trotz keinerlei sichtbarer Schäden, schon soweit

vorgeschädigt, sodass der Hohlboden mit der erreichten Bruchlast eine Elementklasse niedriger eingestuft werden muss.

Ein Einfluss des Verbandes ließ sich wegen der Vorschädigung nicht nachweisen.

# 5 Fazit und Ausblick

In den Versuchen hat sich gezeigt, dass die Festmörteleigenschaften des Estrichs gegenüber den Herstellerangaben variieren können. Dies kann zum Teil auf die benötigte Wassermenge (Vergleich Fließestrichversuche und Hohlbodenversuche) zurückgeführt werden.

Eine höhere Steifigkeit des Estrichs (E-Modul und Dicke) hat einen großen Einfluss auf die Verformungen des Systems. Die Verformungen verringern sich stark, wenn die Steifigkeit des Estrichs zunimmt.

In den Parameterstudien (siehe 2.3.1) hat sich gezeigt, dass es bei der Ausführung eines dünnen und weichen Estrichs in Kombination mit einem dünnen, steifen Oberbelag zu hohen – für den Oberbelag kritischen – Biegezugspannungen auf der Belagsoberseite im Bereich der Auflager kommen kann.

Eine Reduzierung der Spannungen und Verformungen ist durch eine Vergrößerung der Steifigkeiten der Estrich- und der Belagsschicht ebenso wie durch eine Verringerung der Stützenabstände möglich.

Durch das in dieser Arbeit entwickelte FE-Modell für die Versuche 1 bis 4 ist eine Berechnung der Verformungen mit den vorher bestimmten Materialkennwerten gut möglich. Die berechneten und gemessenen Durchbiegungen stimmen weitestgehend überein.

Für eine zutreffende Berechnung der zweiachsialen Biegespannungen müssten die Stoffgesetze in das FE-Modell implementiert und anschließend in einem Bauteilversuch verifiziert werden.

# 6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsaufbau Übersicht Versuchsfeld 1 bis 4	9
Tabelle 2: Laststufen pro Feld	13
Tabelle 3: Maximallasten bei den Versuchsfeldern 1 bis 4	16
Tabelle 4: Maximallasten bei den Versuchsfeldern 5 und 6	16
Tabelle 5: Parameter der Parameterstudie	19
Tabelle 6: Ergebnisse der Parameterstudie bei einer Belastung von 8 kN (Maximal Minimalwerte farbig gekennzeichnet)	- und 20
Tabelle 7: Frischmörtelkennwerte der Estrichmassen	24
Tabelle 8: Biegezug- und Druckfestigkeiten der Estrichmassen	25
Tabelle 9: Bestätigungsprüfung an Plattenstreifen von Fließestrichen im Alter von 28	Гадеп 26
Tabelle 10: Mischungsverhältnisse der untersuchten Estriche	28
Tabelle 11: Festmörtelkennwerte der Versuchsfelder 1 bis 4	35
Tabelle 12: Oberflächenzugfestigkeiten Estrich Versuchsfelder 1 bis 4 mit Ringnut	36
Tabelle 13: Oberflächenzugfestigkeiten Estrich Versuchsfelder 1 bis 4 ohne Ringnut	37
Tabelle 14: Verformungen bei Versuchsfeld 1	38
Tabelle 15: Verformungen bei Versuchsfeld 2	39
Tabelle 16: Verformungen bei Versuchsfeld 3	40
Tabelle 17: Verformungen bei Versuchsfeld 4	41
Tabelle 18 Bruchlastermittlung	42
Tabelle 19: Biegezug- und Druckfestigkeiten des Fließestriches	43
Tabelle 20: Biegezug- und Druckfestigkeit des Fliesenklebers und des Fugenmaterials .	43
Tabelle 21: Verformungen bei Versuchsfeld 5 (Belag ohne Verband)	44
Tabelle 22: Verformungen bei Versuchfeld 6 (Belag im Läuferverband)	45
Tabelle 23: Erneute Belastungen an Versuchsfeld 5 und 6	45
Tabelle 24: Durchbiegungen bei der FE-Simulation, Systeme ohne Belag	47
Tabelle 25: Verformungen der FE-Simulation, Systeme mit Belag	52

# 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung eines Hohlbodenaufbaus nach [R6]	7
Abbildung 2: Aufbau Hohlbodensystem ohne Belag mit eingelegter Schrenzlage	.10
Abbildung 3: Versuchsfeld 5, Fliesen ohne Verband	.11
Abbildung 4: Versuchsfeld 6, in Läuferverband	11
Abbildung 5: Skizze Versuchsaufbau	.12
Abbildung 6: Versuchsaufbau für Versuchsfelder 5 und 6	.12
Abbildung 7: Verformungen der Gummiplatte	.14
Abbildung 8: Anordnung der Messpunkte der Versuchsfelder 1-3	.15
Abbildung 9: Anordnung der Prüfstellen bei Versuchsfeld 4	.15
Abbildung 10: Tragsystem	.17
Abbildung 11: Momentenverlauf	.17
Abbildung 12: Verbundquerschnitt mit Bezeichnung der Parameter	.18
Abbildung 13: Biegezugspannungen auf der Belagsoberseite im Auflagerbereich Abhängigkeit von der Belastung	in 21
Abbildung 14: Biegezugspannungen auf der Estrichunterseite in Feldmitte in Abhängig von der Belastung	keit 21
Abbildung 15: Schwindverläufe an Prismen	.28
Abbildung 16: Schwindrinnen nach Betonage [Prüfbericht 135/2]	.29
Abbildung 17: Messeinrichtung an Schwindrinnen	.30
Abbildung 18: Schwindmessungen in Schwindrinnen im logarithmischen Maßstab bezog auf 0-Messung	gen 30
Abbildung 19: Schwindmessungen an den Schwindrinnen nach 24h	.31
Abbildung 20: Bestimmung der Biegezugfestigkeit der Gipsfaserplatten	.32
Abbildung 21: Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Gipsfaserplatten	.33
Abbildung 22: Prüfung der Stützen auf vierfache Nennlast	.34
Abbildung 23: Versagen bei Versuchsfeld 1 nach Prüfung	.38
Abbildung 24: Versagen bei Versuchsfeld 2 nach Prüfung	.39
Abbildung 25: Versagen bei Versuchsfeld 3 nach Prüfung	.40
Abbildung 26: Versagen bei Versuchsfeld 4 nach Prüfung	.41
Abbildung 27: Riss im Übergang Fliese zu Fugenbereich bei Versuchsfeld 5 nach Prüfung	.46
Abbildung 28: Versagen bei Versuchsfeld 5 nach Prüfung	.46
Abbildung 29: Darstellung des unbelasteten Systemaufbaus ohne Belag	.48
Abbildung 30: Knotennummerierung der Berechnungspunkte	.48
Abbildung 31: Belastung an Messstelle 1	49

Abbildung 32: Belastung an Messstelle 2	49
Abbildung 33: Belastung an Messstelle 3	50
Abbildung 34: Belastung an Messstelle 4	50
Abbildung 35: Belastung an Messstelle 5	51
Abbildung 36: Belastung an Messstelle 6	51

# 8 Literaturverzeichnis

Literatur

- [L1] Holländer, B.: Expertengespräch 9, Hohlböden mit Naturstein, in Naturstein 6/2007, S. 32 – 38
- [L2] Gillmeister, M.: Schwerlastböden, Standards und Sicherheit, in industrieBAU, 6/08. S. 40 -42
- [L3] Mauer, W. (Mapei-Anwendungstechnik): Keramik- und Naturwerksteinbeläge auf Systembodenkonstruktionen, in Stein, Keramik, Sanitär, 3/2008, S. 28 31
- [L4] Prechel, B.: Ein brauchbares System, Naturwerksteinbeläge auf Systembodenkonstruktionen, in Naturstein, 3/2008, S. 44 - 46
- [L5] Prechel, B.: Auf die Durchbiegung kommt es an, in Fliesen und Platten, Jg. 59, 2/2009, S. 22 -25

Normen und Regelwerke

- [R1] DIN EN 13213:2001-12 Hohlböden
- [R2] DIN 18560-1:2009-09 Estriche im Bauwesen, Allgemeine Anforderungen, Prüfung und Ausführung
- [R3] DIN 18560-2:2009-09 Estriche im Bauwesen, Estriche und Heizestriche auf Dämmschichten
- [R4] DIN 18560-4:2004-04 Estriche im Bauwesen, Estriche auf Trennschicht
- [R5] DIN EN 13892:2003-02 Prüfverfahren für Estrichmörtel und Estrichmassen, Teil 1, Probenahme, Herstellung und Lagerung der Prüfkörper
- [R6] Anwendungsrichtlinie zur DIN EN 13213 Hohlböden, Ausgabe 07/2004, Bundesverband Systemböden e.V. (BVS)
- [R7] BVS Merkblatt Nr. 15 Tragschichten von Hohlböden in nasser Bauweise (Estriche in Hohlbodenkonstruktionen), Stand 09/2006
- [R8] DIN EN 15283-2:2009-12: Faserverstärkte Gipsplatten Begriffe, Anforderungen und Eigenschaften Teil 2: Gipsfaserplatten
- [R9] DIN EN 12825:2002-04: Doppelböden

# Anhang zum Forschungsbericht

Materialvolumen für Estrichuntersuchungen (ausgenommen sind die zusätzlichen Untersuchungen zum Schwindverhalten durch Bilfinger SE):

Je Sorte wurden folgende Materialvolumen benötigt:

#### Tabelle A1 Benötigtes Materialvolumen je Sorte für Probekörper

	Volumen je Probekörper	Volumen gesamt	
	[cm³]	[cm³]	
Prismensatz	768	3.840	
Zylinder	295	3.540	
Platte	10.000	10.000	
	Summe	17.380	

Zusätzlich wird noch Material für die Frischmörtelkennwerte benötigt. Je Material werden etwa 20 kg/( $m^2 x cm$ ) benötigt.

17.380 cm<sup>3</sup> x 20 kg/(m<sup>2</sup> x cm) = 34,76 kg

Pro Mischung wurden entweder ein 40 kg oder zwei 25 kg Gebinde benötigt.

Zusätzlich wurde ein Wasserrohr mit einer Länge von 2 m und mit einem Durchmesser von 50 mm benötigt, das in Stücke von 150 mm Länge gesägt wurde. Sie dienten als Formen für Zylinder bei der Elastizitätsmodulprüfung. Zugeklebt wurde das Rohr anschließend auf einer Seite mit einem Klebeband. Die zwei Schalungen für die Bestätigungsprüfungen wurden aus handelsüblichen Dachlatten (2 x 2,5 m) und einer Platte aus Styropor gebaut.

Prüfergebnisse:

Alter	Estrich I (C30- F6)	Estrich II (C25-F5)	Estrich III (C30-F6)	Estrich IV (C25-F5)	Estrich V (C30-F5)
			MW [N/mm²]		
0	0	0	0	0	0
7	6,0	3,2	3,4	4,8	7,2
28	7,6	5,4	5,9	7,1	7,1
56	9,9	7,5	6,4	7,6	7,9
90	10,6	6,7	7,5	8,2	7,3

Vergleich der Biegezugfestigkeitsentwicklung der Calciumsulfatfließestriche:

Tabelle A2 Tabellarische Darstellung der Biegezugfestigkeitsentwicklung



Abbildung A1 Graphische Darstellung der Biegezugfestigkeitsentwicklung

Vergleich der Druckfestigkeitsentwicklung der Calciumsulfatfließestriche:

	Estrich I (C30-	Estrich II	Estrich III	Estrich IV	Estrich V
Altor	F6)	(C25-F5)	(C30-F6)	(C25-F5)	(C30-F5)
Allei	-				
			MW [N/mm²]		
0	0	0	0	0	0
7	28,0	20,4	23,7	31,1	61,5
28	49,1	32,7	38,7	36,3	77,0
56	45,0	30,9	40,1	32,0	80,8
90	57,1	39,8	44,9	46,2	89,2

 Tabelle A3 Tabellarische Darstellung der Druckfestigkeitsentwicklung



Abbildung A2 Graphische Darstellung der Druckfestigkeitsentwicklung

Vergleich der prozentualen Druckfestigkeitsentwicklung der Calciumsulfatfließestriche:

	Estrich I (C30-	Estrich II	Estrich III	Estrich IV	Estrich V
Altor	F6)	(C25-F5)	(C30-F6)	(C25-F5)	(C30-F5)
Allei					
			MW [N/mm²]		
0	0	0	0	0	0
7	57,0	62,4	61,2	85,7	79,9
28	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
56	91,6	94,5	103,7	88,1	104,9
90	116,2	121,7	116,0	127,4	115,8

Tabelle A4 Tabellarische Darstellung der prozentualen Druckfestigkeitsentwicklung



Abbildung A3 Graphische Darstellung der prozentualen Druckfestigkeitsentwicklung

Vergleich der Elastizitätsmodulentwicklung der Calciumsulfatfließestriche:

	Estrich I (C30-	Estrich II	Estrich III	Estrich IV	Estrich V
Altor	F6)	(C25-F5)	(C30-F6)	(C25-F5)	(C30-F5)
Allei					
			MW [N/mm²]		
0	0	0	0	0	0
7	16476	10414	9201	14764	24719
28	26996	20636	20240	#NV	30614
56	28233	21904	21030	24149	30220
90	29647	25609	22219	28519	32377





Abbildung A4 Graphische Darstellung der Elastizitätsmodulentwicklung

# Materialbedarf für Hohlbodenversuche:

	Versuchs- feld 1	Versuchs- feld 2	Versuchs- feld 3	Versuchs- feld 4	Versuchs- feld 5	Versuchs- feld 6	Summe (bestellt)
Stützen	27	27	27	63	27	27	220 Stützen
Stützen-kleber	Je Stütze w	rurden 30 g P	U-Kleber ber	nötigt; je Sch	lauchbeutel:	600 ml	10 Beutel
Schalungs- elemente	6	6	6	6	6	6	40 Ele- mente
Trenn-/ Schrenzlage	Größe je Rolle: 80 m x 1,25 m						1 Rolle
Estrich III	9 Säcke à 40 kg		18 Säcke à 40 kg	9 Säcke à 40 kg	9 Säcke à 40 kg	9 Säcke à 40 kg	60 Säcke à 40 kg
Estrich V		14 Säcke à 25 kg					30 Säcke à 25 kg

### Tabelle A6 Materialbedarf für Hohlbodenversuche

Prüfung der Versuchsfelder:

Versuchsfeld 1:



Abbildung A5 Vergleich der Durchbiegung in Abhängigkeit der aufgebrachten Kraft bei Versuchsfeld 1



Abbildung A6 Vergleich der Durchbiegung in Abhängigkeit der aufgebrachten Kraft bei Versuchsfeld 2



Abbildung A7 Vergleich der Durchbiegung in Abhängigkeit der aufgebrachten Kraft bei Versuchsfeld 3



Abbildung A8 Vergleich der Durchbiegung in Abhängigkeit der aufgebrachten Kraft bei Versuchsfeld 4



Abbildung A9 Vergleich der Durchbiegung in Abhängigkeit der aufgebrachten Kraft bei Versuchsfeld 5



Abbildung A10 Vergleich der Durchbiegung in Abhängigkeit der aufgebrachten Kraft bei Versuchsfeld 6

Berechnungen zur FE Modellierung:

	Estrich		Be	lag	Kleber			
	d	E	d	E	d	E		
Mod 1	35	15000	5	50000	3	5000		
Mod 2	35	25000	5	50000	3	5000		
Mod 3	45	15000	5	50000	3	5000		
Mod 4	45	25000	5	50000	3	5000		
Mod 5	35	15000	5	100000	3	5000		
Mod 6	35	25000	5	100000	3	5000		
Mod 7	45	15000	5	100000	3	5000		
Mod 8	45	25000	5	100000	3	5000		
Mod 9	35	15000	10	50000	3	5000		
Mod 10	35	25000	10	50000	3	5000		
Mod 11	45	15000	10	50000	3	5000		
Mod 12	45	25000	10	50000	3	5000		
Mod 13	35	15000	10	100000	3	5000		
Mod 14	35	25000	10	100000	3	5000		
Mod 15	45	15000	10	100000	3	5000		
Mod 16	45	25000	10	100000	3	5000		
Mod 17	40	20000	8	60000	3	5000		

### Tabelle A7 Ausgangsparameter für FE Modellierung





Abbildung A11 Mod. 1 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A12 Mod. 1 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe


## Abbildung A13 Mod. 2 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A14 Mod. 2 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe

Mod. 3:



Abbildung A15 Mod. 3 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A16 Mod. 3 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A17 Mod. 4 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A18 Mod. 4 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A19 Mod. 5 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A20 Mod. 5 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A21 Mod. 6 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A22 Mod. 6 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A23 Mod. 7 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A24 Mod. 7 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



## Abbildung A25 Mod. 9 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A26 Mod. 9 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A27 Mod. 9 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A28 Mod. 9 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A29 Mod. 10 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A30 Mod. 10 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A31 Mod. 11 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A32 Mod. 11 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A33 Mod. 12 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A34 Mod. 12 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A35 Mod. 13 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A36 Mod. 13 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A37 Mod. 14 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A38 Mod. 14 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A39 Mod. 15 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A40 Mod. 15 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A41 Mod. 16 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A42 Mod. 16 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A43 Mod. 17 Biegespannungen zu zugehöriger Querschnittshöhe



Abbildung A44 Mod. 17 Dehnungen zu zugehöriger Querschnittshöhe