

Daniel Schmeer, Benjamin Schönemann
Olga Arkhipkina, Walter Haase, Harald Garrecht
Oliver Sawodny, Werner Sobek

Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradiertem Beton

F 3194

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) 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 reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0499-7

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/tauforschung



Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradiertem Beton



Universität Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Institut für Systemdynamik
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. h.c. Oliver Sawodny
Institut für Werkstoffe im Bauwesen
Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht



Vorhabenbezeichnung:	Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradier-tem Beton
Zuwendungsempfänger:	Universität Stuttgart Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren Pfaffenwaldring 7 + 14 70569 Stuttgart Institut für Systemdynamik Waldburgstraße 17 + 19 70569 Stuttgart Institut für Werkstoffe im Bauwesen Pfaffenwaldring 4 70569 Stuttgart
Förderkennzeichen:	SWD-10.08.18.7-16.48
Förderstelle:	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Projektsumme:	432.757,96 €
Fördermittelanteil:	278.412,92 €
Projektleitung:	Dr.-Ing. Walter Haase
Mitarbeiter:	Daniel Schmeer (ILEK), Benjamin Schönemann (ISYS), Olga Arkhipkina (IWB), Dennis Dobschanski (ILEK), Oliver Gericke (ILEK), Marzena Husser (ILEK), Sabrina Jilka (ILEK), Julian Pfänder (IWB), Francesco Ranaudo (ILEK), Marc Hymans (ILEK)
Studentische Mitarbeiter:	Ismael Delorenzo (ILEK), Alexander Dreher (ILEK), Maximilian Borbe (ILEK), Carl Niklas Haufe (ILEK)
Projektlaufzeit:	01.11.2016 – 30.11.2018 kostenneutral verlängert bis 28.02.2019
Berichtszeitraum:	01.11.2016 – 28.02.2019

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei der Autorenschaft mit der Reihenfolge: Daniel Schmeer, Benjamin Schönemann, Olga Arkhipkina, Walter Haase, Harald Garrecht, Oliver Sawodny und Werner Sobek

Dieser Forschungsbericht umfasst 130 Seiten.
Stuttgart, 25.03.2019

Dr.-Ing. Walter Haase

**INHALTSVERZEICHNIS**

DANKSAGUNG	4
1 ZUSAMMENFASSUNG	8
2 EINLEITUNG (ILEK)	8
2.1 Inhalt	8
2.2 Projektziel	9
2.3 Sitzungen der Arbeitsgruppe	9
2.4 Arbeitsplan	9
3 STAND DER TECHNIK (ILEK)	10
3.1 Wärmedämmende Wandsysteme aus Beton	10
3.2 Gradientenbeton	13
3.2.1 Konzept und Anwendungsgebiete	13
3.2.2 Betontechnologie	13
3.2.3 Herstellungstechnologie	15
3.2.4 Entwurf funktional gradierter Betonbauteile	17
4 UNTERSUCHUNGSRAHMEN UND ZUSAMMENSTELLUNG NORMATIVER REGELUNGEN FÜR DIE AUSLEGUNG VON WANDBAUTEILEN (ILEK)	18
4.1 Untersuchungsrahmen	18
4.1.1 Festlegung der multifunktionalen Anforderungen	18
4.1.2 Festlegung von Anwendungsfall und Bauteilgeometrie	19
4.1 Statische Bemessung und Konstruktion von Betonbauteilen	20
4.1.1 Lastabhängiges Verhalten	20
4.1.2 Lastunabhängiges Verhalten	22
4.2 Bauphysikalische Bemessung von Wandbauteilen	26
4.2.1 Wärmeschutz	26
4.2.2 Feuchteschutz	26
4.2.3 Schallschutz	27
4.2.4 Brandschutz	28
5 WEITERENTWICKLUNG DER BETON- UND BEWEHRUNGSTECHNOLOGIE (AP1)	29
5.1 Entwicklungsstand der Betontechnologie zu Projektbeginn (ILEK)	29
5.2 Ziele und Anforderungen an die weiterzuentwickelnde Betontechnologie (ILEK)	30
5.3 Weiterentwicklung der Betonmischungen im Labor	32
5.3.1 Auswahl an Leichtzuschlägen (ILEK/IWB)	32
5.3.2 Bereitstellung von Betonen zum Nassspritzen durch die Firma HeidelbergCement (ILEK) ..	33
5.3.3 Entwicklung wärmedämmender Leichtbetone (IWB)	33



5.4	Bewehrungstechnologie (ILEK)	38
5.4.1	Auswahl der Bewehrung	38
5.4.2	Bewehrungssysteme	39
6	WEITERENTWICKLUNG DES AUTOMATISIERTEN HERSTELLUNGSVERFAHRENS (AP 2)	40
6.1	Analyse bestehender Herstellungstechnologien und Auswahl geeigneter Verfahren (ISYS/ILEK)	40
6.2	Weiterentwicklung des Nassspritzverfahrens (ISYS/IWB)	42
6.2.1	Anpassung der Betonmischungen	42
6.2.2	Anpassung der Betonverfahrenstechnik	44
6.2.3	Untersuchung von umweltbedingten Einflussfaktoren	47
6.3	Prozessparameteranalyse für das Nassspritzverfahren (ISYS)	48
6.3.1	Einflussfaktoren für das Nassspritzverfahren	48
6.3.2	Versuchsablauf zur Analyse der Einflussfaktoren	49
6.3.3	Prozessparameteranalyse für Betonmischung MI _{NS} (IWB)-V3.1	52
6.4	Schalungstechnologie (ISYS/ILEK)	59
6.5	Bewehrungstechnologie (ISYS/ILEK)	59
7	ENTWURF MULTIFUNKTIONAL GRADIERTER WANDBAUTEILE (AP 3, ILEK)	63
7.1	Entwurfsansatz	63
7.2	Numerische Berechnungsmethoden für die Nachweisführung	64
7.2.1	Tragfähigkeit	64
7.2.2	Wärmefluss	66
7.3	Mikrogradierte Sandwichwand	66
7.3.1	Allgemeine Lösung der Optimierungsaufgabe	66
7.3.2	Materialverteilung	69
7.3.3	Querschnittsoptimierung zur Gewichtsreduktion	72
7.3.4	Kompensation von Schwind- und Temperaturdehnungen	75
7.3.5	Nachweis zum Schall-, Feuchte- und Brandschutz	77
7.4	Mesogradierte Betonwand	78
7.4.1	Allgemeine Lösung der Optimierungsaufgabe	78
7.4.2	Hohlkugelverteilung	81
7.4.3	Nachweis zum Schall-, Feuchte- und Brandschutz	84
8	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN GRADIERTEN WANDBAUTEILEN (AP 4)	85
8.1	Untersuchungen zur Tragfähigkeit (ILEK)	85
8.1.1	Skalierung und Probekörpergeometrie	85
8.1.2	Probekörperherstellung des mikrogradierten Sandwichaufbaus	86
8.1.3	Bauteilprüfung	86
8.1.4	Versuchsergebnisse und Validierung der Berechnungsansätze	87
8.2	Untersuchungen der Eigenschaften von Betonmischungen und geschichteten Wandbauteilen (IWB)	90



8.2.1	Untersuchung des Trocknungsverhaltens	90
8.2.2	Untersuchung des Wasseraufnahmeverhaltens	91
8.2.3	Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit	92
8.2.4	Untersuchung des Schwindverhaltens	95
8.2.5	Bewertung der Untersuchungen	95
9	KONSTRUKTIVE DETAILAUSBILDUNG (AP 5, ILEK)	96
9.1	Grundlagen	96
9.2	Konzeptionelle Ausarbeitung von Anschlussdetails	97
9.2.1	Horizontaler Decken-Wand-Anschluss	97
9.2.2	Horizontaler Wand-Wand-/Wand-Fundament-Anschluss	99
9.2.3	Vertikaler Wand-Wand-Anschluss	100
9.2.4	Transportanker	102
10	PREISKALKULATION UND MARKTANALYSE FÜR DIE GRADIENTENWAND (AP 6, ILEK)	103
10.1	Grundlagen und Eingrenzung der Preiskalkulation	103
10.2	Einzelkosten der Gradientenwand in der Herstellungsphase	105
10.2.1	Baustoffkosten	105
10.2.2	Kosten der Rüst- und Schalstoffe	108
10.2.3	Gerätekosten	108
10.2.4	Lohnkosten	109
10.2.5	Einzelkosten der Entwurfsvarianten in der Herstellung	110
10.3	Einzelkosten der Gradientenwand in der Errichtungsphase	114
10.3.1	Fertigteilkosten	114
10.3.2	Transport- und Montagekosten	114
10.3.3	Einzelkosten der Entwurfsvarianten im fertigen Gebäude	115
10.4	Marktanalyse	116
11	DEMONSTRATOR (AP 6, ILEK/ISYS)	117
12	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK (ILEK)	120
13	VERZEICHNISSE	122
13.1	Abbildungsverzeichnis	122
13.2	Tabellenverzeichnis	126
13.3	Literaturverzeichnis	127