

Martin Ziegler, Rebecca Schüller

**Energetische Einsparpotentiale  
bei der Herstellung komplizierter  
Untergeschosskonstruktionen mit  
Hilfe des Vereisungsverfahrens**

F 2887

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 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

2014

ISBN 978-3-8167-9153-9

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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)



## **Abschlussbericht**

Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-11.5

Forschungsthema: „Energetische Einsparpotentiale bei der Herstellung komplizierter Untergeschosskonstruktionen mit Hilfe des Vereisungsverfahrens“

Kurztitel: Energetische Einsparpotentiale beim Vereisungsverfahren

Forschende Stelle: Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen  
Mies-van-der-Rohe-Str. 1  
52074 Aachen

Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Rebecca Schüller

Weitere beteiligte Forschungseinrichtungen:

Geophysica Beratungsgesellschaft mbH  
Lütticher Str. 32  
52064 Aachen

Mitfinanzierende Stellen:

Wayss & Freytag Ingenieurbau AG  
Bereich Mitte  
Wiesenstraße 21 A II  
40549 Düsseldorf

Züblin Spezialtiefbau GmbH  
Bereich Nord  
Bessemersstraße 42b  
12103 Berlin

Deilmann-Haniel Shaft Sinking GmbH  
Haustenbecke 1  
44319 Dortmund



Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7-11.5 / II 3-F20-10-1-143)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

## **Vorwort**

Dem vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) zur Beratung der forschenden Stelle eingesetzten Beratergremium gehören

Herr Prof. Dr.-Ing. Dietmar Placzek von der ELE Beratende Ingenieure GmbH  
Erdbaulaboratorium Essen,

Herr Dr.-Ing. Peter Jordan von der CDM Smith Consult GmbH,

Herr Dipl.-Ing. Roland Jörger der Bilfinger Construction GmbH

und

Herr Dr.-Ing. Michael Brüggemann vom Fraunhofer-Informationszentrum Raum  
und Bau IRB (i.A. für das BBR)

an. Dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung und den Mitgliedern des Beratergremiums sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Ebenso gedankt sei der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH für die programm-technische Unterstützung und Weiterentwicklung. Weiterhin sei der Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, der Züblin Spezialtiefbau GmbH für die finanzielle Unterstützung gedankt. Der Deilmann-Haniel GmbH sei an dieser Stelle sowohl für die finanzielle Unterstützung als auch für die Unterstützung mit Messdaten zum Projekt des Statentunnels in Rotterdam herzlich gedankt.



## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	iv
Tabellenverzeichnis .....	vii
Symbolverzeichnis .....	viii
1 Einleitung .....	1
1.1 Veranlassung .....	1
1.2 Ziel des Forschungsvorhabens .....	1
2 Status Quo - Kühlleistung bei Vereisungsmaßnahmen .....	3
2.1 Richtwerte und Berechnungsansätze .....	3
2.2 Auswertung aktueller Bauprojekte .....	5
3 Theoretische Grundlagen zur Kühlleistungsermittlung .....	10
3.1 Grundlagen der Fluidmechanik .....	11
3.1.1 Laminare Rohrströmung .....	12
3.1.2 Turbulente Rohrströmung .....	12
3.1.3 Hydrodynamisch bzw. thermisch ausgebildete Rohrströmung .....	13
3.2 Grundlagen der Wärmeübertragung .....	15
3.2.1 Konduktion .....	15
3.2.2 Konvektion .....	15
3.2.3 Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten nach dem Prinzip der Ähnlichkeitstheorie .....	17
4 Berechnung der Nusselt-Zahl .....	19
4.1 Nusselt-Zahl bei der Rohrströmung .....	21
4.1.1 Laminare Strömung .....	21
4.1.2 Turbulente Strömung .....	21
4.1.3 Übergangsbereich der Strömung .....	22
4.2 Nusselt-Zahl bei der Strömung durch einen Ringspalt .....	22
4.2.1 Laminare Strömung .....	24
4.2.2 Turbulente Strömung .....	24
4.2.3 Übergangsbereich der Strömung .....	25
5 Numerisches Lösungsmodell .....	26
5.1 Das Programmsystem SHEMAT .....	26
5.2 Weiterentwicklungen im „freezing“- Modul .....	27



5.2.1	Vereinfachte Kühlleistungsermittlung .....	27
5.2.2	Betriebsvarianten der Erhaltungsphase .....	28
5.3	Weiterentwicklung von SHEMAT: „freezrefcap“- Modul .....	29
5.3.1	Grundlagen des numerischen Modells .....	29
5.3.2	Numerische Berechnung der Wärmeströme .....	31
6	Verifikation der Programmsysteme .....	36
6.1	Nachrechnung eines Modellversuchs .....	36
6.1.1	Versuchsaufbau und Eingangsparameter .....	36
6.1.2	Ergebnisse der Simulation mit dem „freezing“- Modul .....	39
6.1.3	Ergebnisse der Simulation mit dem „freezrefcap“- Modul .....	42
6.2	Nachrechnung eines realen Bauprojekts .....	46
7	Parameterstudie.....	54
7.1	Ausgangsmodell und –parameter .....	54
7.2	Einfluss der Bodenparameter .....	57
7.2.1	Einfluss der Grundwasserströmung .....	57
7.2.2	Einfluss des Porenanteils .....	58
7.2.3	Einfluss des Quarzgehalts.....	59
7.2.4	Einfluss der Grundwassertemperatur .....	60
7.3	Einfluss der Eigenschaften des Gefrierrohrs und des Kälteträgerkreislaufs .....	61
7.3.1	Einfluss der Geometrie des koaxialen Gefrierrohrs.....	61
7.3.2	Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Steigrohrs .....	62
7.3.3	Einfluss der Länge des Gefrierrohrs.....	62
7.3.4	Einfluss der Calciumchloridsole.....	63
7.3.5	Einfluss der Vorlauftemperatur .....	64
7.3.6	Einfluss des Durchflusses .....	64
7.4	Fazit der Parameterstudie.....	65
8	Energetische Optimierung von Vereisungsmaßnahmen.....	67
8.1	Ausgangsmodell und –parameter .....	67
8.2	Optimierung der Aufgefrierphase .....	68
8.3	Optimierung der Erhaltungsphase .....	72
8.3.1	Betrieb ohne Anpassung .....	72
8.3.2	Betrieb mit erhöhter Vorlauftemperatur .....	74
8.3.3	Intermittierender Betrieb .....	78
8.3.4	Bewertung der Ergebnisse .....	83



8.4	Vereinfachte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	84
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	91
10	Literaturverzeichnis.....	94