

# Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur künstlichen Bodenvereisung im strömenden Grundwasser

Anton Sres

Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik (IGT) der ETH Zürich  
Band 234, Juni 2010

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung . . . . .	1
1.2	Ziele und Abgrenzung der Arbeit . . . . .	2
1.3	Gliederung der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Das Gefrierverfahren</b>	<b>5</b>
2.1	Entwicklung und Einsatz des Verfahrens . . . . .	5
2.2	Technik . . . . .	7
2.3	Methoden der thermischen Analyse . . . . .	10
2.3.1	Analytische Lösungen . . . . .	10
2.3.2	Numerische Modelle . . . . .	14
2.3.3	Laborversuche . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Physikalische Beschreibung des Gefrierprozesses</b>	<b>19</b>
3.1	Gefrieren von Boden . . . . .	19
3.2	Bodenspezifische Kenngrößen . . . . .	22
3.3	Thermische Eigenschaften . . . . .	24
3.3.1	Ungefrorener Wassergehalt . . . . .	24
3.3.2	Wärmeleitfähigkeit . . . . .	24
3.3.3	Wärmekapazität . . . . .	28
3.3.4	Absenken der Gefriertemperatur . . . . .	29
3.4	Hydraulische Eigenschaften . . . . .	30
3.4.1	Grundwasserströmung . . . . .	30
3.4.2	Durchlässigkeitsbeiwert . . . . .	30
3.5	Thermische Anfangs- und Randbedingungen . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Formulierung des thermo-hydraulischen Modells</b>	<b>33</b>
4.1	Konzept Poröse Medien . . . . .	33
4.2	Erhaltungssätze . . . . .	34
4.2.1	Resultierendes Gleichungssystem . . . . .	38
4.2.2	Konvektionsdominanz . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Finite-Elemente-Formulierung</b>	<b>41</b>
5.1	Diskretisierung . . . . .	41
5.1.1	Variationsformulierung . . . . .	41
5.1.2	Räumliche Diskretisierung . . . . .	42
5.1.3	Zeitdiskretisierung . . . . .	43
5.2	Implementierung . . . . .	44

5.2.1	Elementwahl	44
5.2.2	Netzgenerierung	46
5.2.3	Lösung des Gleichungssystems	52
5.2.4	Zeitschrittsteuerung bei Konvektionsdominanz	54
5.2.5	Phasenübergang	54
5.2.6	Analytische Lösungen	56
5.2.7	Modellierung der Gefrierlanzen	60
5.2.8	Leistungsfähigkeit des Programmes	63
<b>6</b>	<b>Laborversuche</b>	<b>67</b>
6.1	Vorgehensweise	67
6.1.1	Vorversuch	67
6.1.2	Simulationsparameter	67
6.1.3	Allgemeines Messkonzept	68
6.2	Vorversuch	68
6.2.1	Versuchsaufbau	68
6.2.2	Die Sensorik des Vorversuchs	70
6.2.3	Durchgeführte Versuche und Resultate	72
6.3	Grossversuch	75
6.3.1	Versuchsaufbau	75
6.3.2	Die Sensorik des Grossversuchs	79
6.3.3	Durchgeführte Versuche	82
6.4	Das Kühlsystem	85
6.4.1	Kühlanlage und Kühlkreislauf	85
6.4.2	Gefrierlanzen	87
6.5	Sensoren und Datenerfassung	88
6.5.1	Sensoren	88
6.5.2	Messerfassung	89
6.6	Bestimmung der Simulationsparameter	90
6.6.1	Geotechnische Parameter	90
6.6.2	Thermodynamische Parameter	93
<b>7</b>	<b>Überprüfung des TH-Modells</b>	<b>103</b>
7.1	Vorversuch	103
7.1.1	FE-Modell	103
7.1.2	Vergleich Temperaturverteilung	105
7.1.3	Vergleich Kälteleistung	105
7.2	Grossversuch	106
7.2.1	FE-Modell	106
7.2.2	Vergleich Temperaturverteilung	109
7.2.3	Vergleich Kälteleistung	109
7.2.4	Frostkörperformen	113
<b>8</b>	<b>Untersuchungen zur Bildung einer Frostwand</b>	<b>117</b>
8.1	Parameterstudie	117
8.1.1	Zielfunktionen und Parametervariationen	118
8.2	Idealisierte Frostwand	120
8.2.1	FE-Modell	120
8.2.2	Schliesszeit	121
8.2.3	Wachstum der Frostwand	121

8.2.4	Dimensionsanalyse . . . . .	122
8.3	Geschichteter Boden . . . . .	129
8.3.1	Modell . . . . .	129
8.3.2	Resultate . . . . .	131
8.3.3	Dimensionslose Darstellung . . . . .	132
<b>9</b>	<b>Anwendungsfall Tunnelquerschlag</b>	<b>133</b>
9.1	Modellannahmen . . . . .	133
9.2	Queranströmung . . . . .	133
9.3	Längsanströmung . . . . .	137
<b>10</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>141</b>
10.1	Schlussfolgerungen . . . . .	141
10.2	Ausblick . . . . .	141
10.2.1	Theorie . . . . .	141
10.2.2	Implementation . . . . .	142
10.2.3	Parameterstudien . . . . .	142
10.2.4	Experimente . . . . .	142
<b>A</b>	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>143</b>
A.1	Lateinische Symbole . . . . .	143
A.2	Griechische Symbole . . . . .	144
A.3	Indices . . . . .	145
<b>B</b>	<b>Dimensionsanalyse</b>	<b>147</b>
B.1	Basistransformation . . . . .	147
B.2	Zusammenstellung . . . . .	149
B.3	Darstellung . . . . .	151
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>153</b>