

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract in English</b>	<b>x</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Beschreibung von Hangkriechen . . . . .	3
1.1.1 Anzeichen für Hangkriechen . . . . .	4
1.1.2 Einflussfaktoren . . . . .	6
1.2 Kriechen von Böden unter Laborbedingungen . . . . .	6
1.3 Berechnungen von Kriechhängen . . . . .	9
1.3.1 Parameterbestimmung . . . . .	9
1.3.2 Beispiele für Modellierungen von Kriechhängen . . . . .	10
1.3.3 Versagen von Kriechhängen . . . . .	11
1.3.4 Lösungsansätze zur Stabilisierung von Kriechhängen . . . . .	13
<b>2 Rheologie</b>	<b>14</b>
2.1 Elastizität . . . . .	14
2.1.1 Eindimensionale konstitutive Modelle . . . . .	14
2.1.2 Dreidimensionale Modelle . . . . .	15
2.2 Plastizität . . . . .	16
2.2.1 Eindimensionale konstitutive Modelle . . . . .	16
2.2.2 Dreidimensionale Modelle . . . . .	17
2.3 Viskosität . . . . .	24
2.3.1 Eindimensionale konstitutive Modelle . . . . .	25
2.3.2 Dreidimensionale Modelle . . . . .	28

<b>3</b>	<b>Laborversuche</b>	<b>39</b>
3.1	Erste Serie an Laborversuchen zur Moräne . . . . .	39
3.1.1	Korngrößenverteilung . . . . .	40
3.1.2	Triaxialversuche, weggesteuert . . . . .	40
3.1.3	Kriechversuche im Rahmenschergerät . . . . .	40
3.2	Zweite Serie an Laborversuchen zur Moräne . . . . .	43
3.2.1	Korngrößenverteilung . . . . .	43
3.2.2	Triaxialversuche, weggesteuert . . . . .	43
3.2.3	Kriechversuche im Triaxialgerät . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Parameterbestimmung</b>	<b>50</b>
4.1	Allgemeine Parameter . . . . .	50
4.2	Parameter der linearen Elastizität . . . . .	51
4.2.1	Paragneis . . . . .	51
4.2.2	Moränenmaterial . . . . .	51
4.3	Plastische Parameter . . . . .	52
4.3.1	Moränenmaterial . . . . .	52
4.4	Viskose Parameter . . . . .	54
4.4.1	Rahmenscherversuche . . . . .	54
4.4.2	Triaxialversuche . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Elementversuche</b>	<b>62</b>
5.1	Numerische Modellierung . . . . .	63
5.1.1	Das Prinzip der virtuellen Arbeit . . . . .	64
5.1.2	Inkrementelles Aufbringen der Last und Bestimmen des globalen Gleichgewichts . . . . .	65
5.1.3	User Material (UMAT) . . . . .	66
5.1.4	Verlaufsfunktionen und Verschiebungsansätze . . . . .	68
5.1.5	Konstitutive Beziehungen . . . . .	70
5.2	Überprüfung der UMATs . . . . .	75

<i>Inhaltsverzeichnis</i>	xiii
5.3 Nachrechnung der Laborversuche . . . . .	79
5.3.1 Viskoses Materialmodell nach NORTON . . . . .	81
5.3.2 Viskoses Materialmodell nach VULLIET–HUTTER und dessen Erweiterung um eine Fließfunktion nach MOHR–COULOMB . . . . .	82
<b>6 Die unendlich lange Böschung</b>	<b>85</b>
6.1 Spannungen der unendlich langen Böschung . . . . .	87
6.1.1 Ohne Grundwasserströmung . . . . .	87
6.1.2 Mit hangparalleler Grundwasserströmung . . . . .	87
6.2 Spannungstensor in der Scherzone . . . . .	89
6.2.1 Hauptspannungen . . . . .	93
6.2.2 Invarianten . . . . .	93
6.3 Spannungen im Verhältnis zur Fließgrenze . . . . .	94
6.4 Kriechberechnungen . . . . .	96
6.4.1 Viskoses Materialmodell nach NEWTON . . . . .	96
6.4.2 Viskoses Materialmodell nach NORTON . . . . .	97
6.4.3 Viskoses Materialmodell nach VULLIET–HUTTER . . . . .	98
6.4.4 Erweiterung des viskosen Materialmodells nach VULLIET–HUTTER um eine Fließfunktion nach MOHR–COULOMB	100
6.4.5 Ergebnisse der Kriechberechnungen . . . . .	102
6.4.6 Überprüfung der UMATs . . . . .	104
<b>7 Anwendung auf eine Fallstudie</b>	<b>106</b>
7.1 Berechnungsmodell . . . . .	108
7.1.1 Geologisches Profil . . . . .	109
7.1.2 Modellbildung . . . . .	110
7.1.3 Diskretisierung . . . . .	112
7.1.4 Lagerbedingungen . . . . .	113
7.2 Bewegungsraten . . . . .	113
7.2.1 Geodätische Messpunkte . . . . .	113

7.2.2	Extensometer . . . . .	114
7.3	Hydromechanische Koppelung . . . . .	115
7.3.1	Grundlagen der hydromechanischen Koppelung . . . . .	116
7.3.2	Porenwasserdruckverteilung . . . . .	117
7.3.3	Stauseewasserstand . . . . .	119
7.4	Durchgeführte Modellierungen . . . . .	122
7.5	Ergebnisse der Modellierung . . . . .	123
7.5.1	Spannungsverteilung in der Scherzone . . . . .	123
7.5.2	Verschiebungen in den Monitoringpunkten . . . . .	123
7.5.3	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	126
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>131</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	131
8.2	Ausblick . . . . .	134
	<b>Glossar</b>	<b>147</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>149</b>
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>151</b>
	<b>Indizes und Exponenten</b>	<b>155</b>
	<b>Anhang</b>	<b>157</b>
<b>A</b>	<b>Rheologie</b>	<b>158</b>
A.1	Spannungen . . . . .	158
A.1.1	Spannungstensor . . . . .	158
A.1.2	Hydrostatischer und deviatorischer Anteil . . . . .	158
A.1.3	Hauptspannungen . . . . .	159
A.2	Sensitivitätsanalyse . . . . .	160

<b>B Laborversuche</b>	<b>167</b>
B.1 Versuchskurven . . . . .	167
B.1.1 Triaxialversuche . . . . .	167
B.1.2 Kriechversuche im Triaxialgerät . . . . .	168
B.2 Auswertung der Laborversuche . . . . .	180
B.2.1 Triaxialversuche . . . . .	180
B.2.2 Kriechversuche im Rahmenschergerät . . . . .	181
B.2.3 Kriechversuche im Triaxialgerät . . . . .	181
B.3 Ergebnisse der Kriechversuche . . . . .	186
<b>C Elementversuche</b>	<b>188</b>
C.1 Ödometerversuch . . . . .	188
C.1.1 Handrechnung . . . . .	188
C.1.2 Numerische Modellierung . . . . .	193
C.2 Triaxialversuch . . . . .	194
C.2.1 Handrechnung . . . . .	194
C.2.2 Numerische Modellierung . . . . .	197
C.3 Nachrechnung der Laborversuche . . . . .	197
C.3.1 Nachrechnung mit dem viskosen Materialmodell nach NOR- TON . . . . .	200
C.3.2 Nachrechnungen mit dem viskosen Materialmodellen nach VULLIET–HUTTER und dessen Erweiterung um eine Fließ- funktion nach MOHR–COULOMB . . . . .	202
<b>D Die unendlich lange Böschung</b>	<b>204</b>
D.1 Berechnung der Spannungen . . . . .	204
D.1.1 Spannungen an der Unterkante der Moräne . . . . .	206
D.2 Vergleich der Kriechberechnungen . . . . .	206
<b>E Numerisch differenzieren</b>	<b>207</b>
<b>F Numerisch integrieren</b>	<b>208</b>

**G Methode der kleinsten Fehlerquadrate**