

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ix
Abstract in English	x
1 Einleitung	1
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
2 Rheologie	14
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

3	Laborversuche	39
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
4	Parameterbestimmung	50
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
5	Elementversuche	62
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
6 Die unendlich lange Böschung	85
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
7 Anwendung auf eine Fallstudie	106
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
8	Zusammenfassung und Ausblick	131
8.1	Zusammenfassung	131
8.2	Ausblick	134
	Glossar	147
	Abkürzungsverzeichnis	149
	Symbolverzeichnis	151
	Indizes und Exponenten	155
	Anhang	157
A	Rheologie	158
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 Laborversuche	167
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
C Elementversuche	188
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
D Die unendlich lange Böschung	204
D.1 Berechnung der Spannungen	204
D.1.1 Spannungen an der Unterkante der Moräne	206
D.2 Vergleich der Kriechberechnungen	206
E Numerisch differenzieren	207
F Numerisch integrieren	208

G Methode der kleinsten Fehlerquadrate