

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	1
<b>1.1. Begriffsbestimmung</b> .....	1
<b>1.2. Wirtschaftliche Bedeutung der Rutschungssanierung</b> .....	2
<b>2. Charakteristische Formen von Rutschungen und ihre Sanierungsmöglichkeiten</b> .....	6
<b>3. Die wichtigsten Ursachen von Rutschungen</b> .....	8
<b>3.1. Geologische Ursachen</b> .....	8
<b>3.2. Morphologische Ursachen</b> .....	9
3.2.1. Übersteilung der Böschungsneigung .....	9
3.2.2. Überbelastung des Kopfes einer Böschung .....	10
3.2.3. Schwächung des Fußes einer Böschung .....	10
<b>3.3. Physikalische Ursachen</b> .....	12
3.3.1. Versagen der Kohäsion im Laufe der Zeit .....	12
3.3.2. Einfluß der diagenetischen Bindekräfte und ihres Versagens auf die Rutschungsgefahr .....	13
3.3.3. Progressiver Bruch – Ingenieurgeologie der überkonsolidierten plastischen Tone .....	14
3.3.4. Rutschungen in steifen, rissigen Tonen .....	18
3.3.5. Wirkung von Erdbeben .....	19
<b>3.4. Chemisch-physikalische Strukturveränderung von Schluff- und Tonböden (F. Hilbert)</b> .....	20
3.4.1. Druckentlastung und dadurch bedingte Wasseraufnahme .....	21
3.4.2. Erhöhung des Wasserdruckes im Boden .....	21
3.4.2.1. Erhöhung des Wasserzufflusses zu wasserführenden Schichten ..	22
3.4.2.2. Verschließen natürlicher Drainagen (Quellen, Wasseraustritte) ..	22
3.4.3. Entstehung neuer Spalten und Klüfte oder Öffnung bisher durch wasser- und durchlässiges Material verschlossener Wasserwege .....	23
3.4.4. Salztrennung und Abwässer. Ionenaustausch .....	23
3.4.5. Aneinandergrenzen reduzierender und oxidierender Bodenschichten (blauer Ton – brauner Ton) – natürliche Elektrosmose .....	24
3.4.6. Quicktone .....	24

## VIII Inhaltsverzeichnis

<b>3.5. Wirkung des Wassers im Boden</b> . . . . .	24
3.5.1. Wirkung des Porenwassers . . . . .	25
3.5.1.1. Das Porenwasser wirkt konzentriert an einer potentiellen oder tatsächlichen Gleitfläche oder Kluftfläche im tonig-schluffigen „homogenen“ Boden . . . . .	25
3.5.1.2. Das Porenwasser wirkt konzentriert an der Grenzfläche zweier tonig-schluffiger Bodenschichten verschiedener Natur. (Bei 3.5.1.1. und 3.5.1.2. sind die Grenzschichten, in denen sich der Porenwasserdruck aufbaut, sehr dünn (oft nur wenige Millimeter).) . . . . .	25
3.5.1.3. Das Porenwasser wirkt in einer mehrere Dezimeter dicken, relativ durchlässigen schluffigen Sandschicht zwischen zwei relativ undurchlässigen, schluffig-tonigen Bodenschichten . . . . .	26
3.5.1.4. Das Porenwasser wirkt über die ganze Höhe der oft viele Meter dicken tonig-schluffigen Schicht mehr oder weniger gleichförmig verteilt. Bei relativ kleiner Wassermenge je Zeiteinheit (kein kontinuierlich intensiver Wasserspender) setzt das strömende Porenwasser den ganzen Hang in Bewegung. Dieser Fall ist ähnlich dem unter 3.5.2.2. beschriebenen, unterscheidet sich aber durch die Wassermenge je Zeiteinheit . . . . .	26
3.5.2. Wirkung des strömenden Wassers im Boden durch einen intensiven kontinuierlichen Wasserspender . . . . .	27
3.5.2.1. Bei sandigen Böden . . . . .	27
3.5.2.2. Bei tonig-sandigen Schluffböden . . . . .	27
3.5.3. Wirkung des strömenden Oberflächenwassers . . . . .	29
3.5.3.1. Bei senkrechten oder steil einfallenden klüftigen Bodenschichten . . . . .	29
3.5.3.2. Das Wasser vermischt sich mit den an der Oberfläche liegenden Bodenschichten (Muren) . . . . .	29
3.5.3.3. Durch ein strömendes Gewässer kann der Fuß eines Hanges unterwaschen und somit eine Rutschung ausgelöst werden . . . . .	29
3.5.4. Solifluktion . . . . .	30
<b>4. Theoretische Grundlagen zur Berechnung der Standsicherheit von Böschungen</b> . . . . .	32
<b>4.1. Stabilitätsverhältnisse einer Böschung über einer ebenen, unendlich langen hangparallelen Gleitfläche</b> . . . . .	32
<b>4.2. Verfahren zur Berechnung der Standsicherheit von Böschungen mit beliebig aufgebautem Untergrund</b> . . . . .	37
<b>4.3. Kritische Betrachtungen und Verbesserungsvorschläge zur Berechnung der Standsicherheit von Böschungen</b> . . . . .	42
4.3.1. Vorbemerkung . . . . .	42
4.3.1.1. Ebene Prüfflächen . . . . .	42
4.3.1.2. Gekrümmte Prüfflächen . . . . .	44
4.3.2. Einleitung . . . . .	44

4.3.3. Vereinfachtes Verfahren von Eigenberger . . . . .	45
4.3.3.1. Homogener Boden . . . . .	45
4.3.3.2. Geschichteter Boden . . . . .	47
4.3.3.3. Konzentrierte Lasten . . . . .	49
4.3.3.4. Vereinfachung bei Porenwasserdruck (rasche Spiegelabsenkung)	50
4.3.3.5. Langgestreckte, beliebig geformte Prüfflächen . . . . .	51
4.3.4. Berechnung der Standsicherheit einer Böschung nach dem vereinfachten	
Verfahren von Eigenberger. Beispiele . . . . .	52
4.3.4.1. Homogene Böschung ohne Kohäsion . . . . .	52
4.3.4.2. Homogene Böschung mit Kohäsion . . . . .	53
4.3.4.3. Geschichtete Böschung ohne Kohäsion . . . . .	54
4.3.4.4. Geschichtete Böschung mit Kohäsion . . . . .	56
<b>5. Feld- und Laboruntersuchungen . . . . .</b>	<b>58</b>
<b>5.1. Felduntersuchungen . . . . .</b>	<b>58</b>
5.1.1. Luftbildaufnahmen . . . . .	58
5.1.2. Geodätische Vermessungen . . . . .	59
5.1.3. Geologische Untersuchungen . . . . .	59
5.1.3.1. Seismische Untersuchungen . . . . .	59
5.1.3.2. Geoelektrische Untersuchungen . . . . .	60
5.1.4. Bodenuntersuchung durch Bohrungen und Entnahme von gestörten und	
ungestörten Bodenproben . . . . .	60
5.1.5. Messung des Eindringwiderstandes von Sonden . . . . .	63
5.1.6. Messung des Porenwasserdruckes mittels Piezometer . . . . .	64
5.1.7. Verformungsmessungen an der Oberfläche und in verschiedenen Tiefen	
unter der Geländeoberfläche . . . . .	65
5.1.8. Meßtechnik für elektrische Bodenpotentiale, <i>pH</i> -Wert und Redoxeigen-	
schaften (F. Hilbert) . . . . .	66
5.1.8.1. Messung von Bodenpotentialen . . . . .	66
5.1.8.2. Messung des Boden- <i>pH</i> -Wertes . . . . .	71
5.1.8.3. Messung der Redoxeigenschaften . . . . .	71
5.1.9. Messung des natürlichen Wassergehaltes an der Bodenoberfläche mittels	
radioaktiver Kobaltelemente . . . . .	71
<b>5.2. Laboruntersuchungen . . . . .</b>	<b>72</b>
5.2.1. Bestimmung des natürlichen Wassergehaltes . . . . .	72
5.2.2. Ödometerversuch und Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes $k_f$ . . . . .	72
5.2.3. Zylinderdruckversuch . . . . .	73
5.2.4. Bestimmung des inneren Reibungswinkels und der Kohäsion . . . . .	74
5.2.5. Röntgenographische Untersuchungen . . . . .	74
5.2.6. Prüfung von Modellen in der Zentrifuge . . . . .	75
<b>6. Methoden der Rutschungsanierung . . . . .</b>	<b>76</b>
<b>6.1. Die Morphologie des Geländes wird nicht verändert . . . . .</b>	<b>77</b>
6.1.1. Die in Bewegung befindlichen Schichten werden von Bauwerken durch-	
fahren, ohne aber die Rutschbewegung aufzuhalten . . . . .	77

6.1.1./I	Tabakfabrik Fürstenfeld, Steiermark . . . . .	77
6.1.1./II	Gründung der Luegbrücke am Brenner, Tirol . . . . .	79
6.1.1./III	Gründung von Seilbahnstützen und Hochspannungsmasten . . .	82
6.1.1./IV	Gründung der Limbergbrücke an der Franz-Josefs-Bahn, Niederösterreich . . . . .	87
6.1.2.	Die in Bewegung befindlichen Bodenschichten werden aufgehalten . . . .	92
6.1.2./I	Rutschung in der Türkei . . . . .	92
6.1.2./II	Autobahn Stahlberg (Bundesrepublik Deutschland) . . . . .	96
6.1.3.	Das in Bewegung befindliche Bauwerk wird aufgehalten . . . . .	100
	Widerlagersicherung an einer Autobahnüberführung bei Graz (G19) . . . .	100
6.1.4.	Sanierung durch Verminderung des Porenwasserdruckes . . . . .	103
6.1.4.1.	Verminderung des Porenwasserdruckes durch Drainagegräben . . . . .	103
6.1.4.1./I	Hangsanierung Retznei, Steiermark . . . . .	103
6.1.4.1./II	Rutschung Graz-Ruckerlberg . . . . .	105
6.1.4.1./III	Rutschung Kleinsölk, Steiermark . . . . .	111
6.1.4.1./IV	Budapest, Dunaujváros . . . . .	114
6.1.4.2.	Verminderung des Porenwasserdruckes durch Horizontalbohrun- gen vom Gelände aus . . . . .	115
6.1.4.2./I	Rutschung Graz-Ries . . . . .	115
6.1.4.2./II	Memphis . . . . .	120
6.1.4.3.	Verminderung des Porenwasserdruckes durch Brunnen mit Horizontaldrainagen . . . . .	120
	Rutschung Kirchschlag, Niederösterreich . . . . .	120
6.1.4.4.	Verminderung des Porenwasserdruckes durch Kurzschlußleiter nach Veder . . . . .	125
6.1.4.4.1.	Allgemeines (F. Hilbert) . . . . .	125
6.1.4.4.2.	Praktische Anwendungen . . . . .	130
6.1.4.4.2./I	Rutschung bei St. Marein/Mürztal, Steiermark (Hochspannungsmast) . . . . .	130
6.1.4.4.2./II	Rutschung an der Westautobahn bei Viehdorf, Niederösterreich . . . . .	133
6.1.4.4.2./III	Sarukuyoji-Rutschung in Japan . . . . .	134
6.1.5.	Erhöhung der inneren Reibungskräfte, Verfestigung des Bodens . . . . .	137
6.1.5.1.	Verfestigung durch Zementinjektionen (Clauage, Soil Fracturing) . . . . .	137
	Hart bei Gleisdorf und Ganzsteintunnel, Steiermark . . . . .	137
6.1.5.2.	Entwässerung und Verfestigung durch Elektroosmose nach L. Casagrande . . . . .	139
6.1.5.2.1.	Allgemeines (F. Hilbert) . . . . .	139
6.1.5.2.2.	Praktische Anwendung . . . . .	141
	Kootenay Kanal, British Columbia, Kanada . . . . .	141
6.1.5.3.	Verfestigung durch Einbringung von Kalzium-, Magnesium-, Aluminium- oder Eisenverbindungen . . . . .	142
6.1.5.3.1.	Allgemeines (F. Hilbert) . . . . .	142
6.1.5.3.2.	Praktische Anwendung . . . . .	144
6.1.5.3.2./I	Mooskirchen, Steiermark . . . . .	144
6.1.5.3.2./II	Herstellung von Kalkpfählen . . . . .	145
6.1.5.3.2./III	Sonnenbergstraße, Schweiz . . . . .	145

<b>6.2. Die Morphologie des Geländes wird zum Teil sehr entscheidend verändert . . . . .</b>	<b>148</b>
6.2.1. Verbesserung der Stabilitätsverhältnisse des Rutschhanges bzw. der Böschung . . . . .	148
6.2.1.1. Der Kopf der instabilen Böschung wird durch Verflachung entlastet . . . . .	148
Oberwasserkanal Rosegg, Kärnten . . . . .	148
6.2.1.2. Ersetzen einer zu schweren Anschüttung beispielsweise durch eine Brücke . . . . .	149
Rutschung bei der Krumbachbrücke (Wechselbundesstraße, Steiermark) . . . . .	149
6.2.2. Durch eine eventuell verankerte und bewehrte Spritzbetonschicht wird der oft sehr steil abgeböschte Lockerboden (vorübergehend) befestigt . . . . .	152
Tokyo und Zwenbergbrücke an der Tauernbahn, Kärnten . . . . .	152
6.2.3. Einziehen von Steinkeilen am Fuß der Rutschung, um die Reibungskräfte stellenweise zu erhöhen, den Fuß zu entwässern und zu belasten . . . . .	155
Ybbsitzer Höhe, Niederösterreich . . . . .	155
6.2.4. Bodenauswechslung in der Dammaufstandsfläche . . . . .	157
Dammrutschung bei Oberpullendorf, Burgenland . . . . .	157
6.2.5. Einbau einer Kiesschüttung an der Sohle und an den Flanken eines Einschnittes . . . . .	162
Unterwasserkanal Silz, Tirol . . . . .	162
6.2.6. Anbringen eines Terzaghi-Filters, um die Erosion von leicht beweglichen Feinsandschichten zu unterbinden . . . . .	164
6.2.7. Einbau von Steinrippen oder von stabilisiertem Bodenmaterial parallel zur Böschung. (Diese Maßnahme ist ungeeignet, wenn nicht der Gleitkreis durchschnitten wird.) . . . . .	164
Ziegelgrube Budapest . . . . .	164
6.2.8. Aufbringen einer Gegengewichtsschüttung zur Stützung des Dammfußes . . . . .	165
6.2.8./I Autobahn Deutschland . . . . .	165
6.2.8./II Vermont . . . . .	165
6.2.9. Stützmauern . . . . .	166
6.2.9.1. Errichten einer Schwergewichtsmauer oder Winkelstützmauer aus Beton . . . . .	166
6.2.9.2. Unverankerte Pfahl- oder Schlitzwand mit beispielsweise T-förmigen Elementen . . . . .	166
Bau der Olympischen Straße in Rom . . . . .	166
6.2.9.3. Verankerte Wand aus tragenden oder auch nicht tragenden Bohrpfehlen bzw. Schlitzwandelementen . . . . .	168
2 Beispiele von Hangsanierungen bei Gebirgsautobahnen . . . . .	168
6.2.9.4. Ankerwand von oben nach unten hergestellt . . . . .	174
Ankerwand bei Peggau, Steiermark . . . . .	174
6.2.9.5. Sonstige Stützwände . . . . .	176
6.2.9.5./I Krainerwände . . . . .	177
6.2.9.5./II Gabbionate . . . . .	177
6.2.9.5./III Bewehrte Erde . . . . .	177
6.2.9.5./IV Neue Ebenseer Wand . . . . .	178
6.2.9.5./V Bodenvernagelung . . . . .	178

## XII Inhaltsverzeichnis

6.3. Synoptische Beschreibung einiger charakteristischer Rutschungen . . . . .	179
6.4. Zusätzliche Sanierungsmaßnahmen . . . . .	183
6.5. Dauerhaftigkeit der Sanierungsmaßnahmen . . . . .	185
7. Physikalische Chemie der Rutschungen in Schluff- und Tonböden (F. Hilbert) . . . . .	186
7.1. Einleitung . . . . .	186
7.2. Hochdisperse (kolloide) Bodenbestandteile . . . . .	186
7.2.1. Kolloide, allgemeine Eigenschaften . . . . .	186
7.2.2. Tonminerale und ihre Eigenschaften . . . . .	191
7.2.2.1. Montmorillonit als Beispiel für quellfähige Schichtsilikate . . . . .	194
7.2.2.2. Mechanismus der Wasseraufnahme und Quellung von Tonmineralen . . . . .	195
7.2.2.3. Einfluß von Kationen auf die Wasseraufnahme, Quellung und Abnahme der Scherfestigkeit. Ionenaustausch . . . . .	196
7.2.2.3.1. Einfluß von Salzstreuung und Abwässern auf Rutschungen . . . . .	198
7.2.2.3.2. Einfluß des <i>pH</i> -Wertes des Wassers im Boden . . . . .	200
7.2.2.3.3. Thixotropie – Quicktone . . . . .	202
7.2.2.4. Die elektrische Ladung der Tonpartikel und die damit zusammenhängenden Erscheinungen . . . . .	204
7.2.2.4.1. Elektrolytische Doppelschicht . . . . .	204
7.2.2.4.2. Elektrosmose . . . . .	206
7.2.2.5. Elektrische Bodenpotentiale, reduzierende und oxidierende Böden, Korrelation von Bodenpotentialen mit Rutschungen . . . . .	213
8. Schlußwort . . . . .	220
Literaturverzeichnis . . . . .	221
Sachverzeichnis . . . . .	227