

Literaturbericht über Untersuchungen der Standfestigkeit von Felshängen

In den Jahren 1970—1975 wurden am Institut für Wasserbau der Polnischen Akademie der Wissenschaften (PAN) in Danzig verschiedenartige Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt. Die Resultate wurden von KAZIMIERZ THIEL [„*Badanie i prognozowanie stateczności zboczy skalnych (Untersuchungen und Prognostik der Standfestigkeit von Felshängen)*“. — *Prace Inst. Bud. Wodnego PAN*, 2, 83 S., 55 Abb., *Polska Akad. Nauk, Gdansk* 1976. |Polnisch“|.] veröffentlicht und sollen im folgenden kurz dargestellt werden.

Das Hauptziel der Untersuchungen war die Festlegung der Untersuchungsmethodik für die Standfestigkeit von Hängen und Staudammbauten im Karpathenflyschbereich sowie deren Prognostik. Durch die Untersuchungen wurden drei ausgewählte Hangrutschungen: Lipowica/Dukla, Kotelnica/Zakopane und Dobczyce/Raba-Fluß erfaßt, wovon jene von Lipowica am vollständigsten ausgearbeitet wurde. Es wurden auch ältere Ergebnisse ingenieurgeologischer Untersuchungen für die Errichtung eines Staudammes in Stróża/Myślenice (1968—1970) sowie in Dobrzyń an der Weichsel herangezogen.

Das Buch besteht aus zwei Hauptteilen:

- I. Teil — Untersuchungen an Hangrutschungen und
- II. Teil — Untersuchungsmethodik und Hangrutschungsprognostik im Rahmen von Staudammbauten.

Der erste Teil der Arbeit beschreibt die Art der durchgeführten Untersuchungen:

- Erkundungen über Morphologie (geodätische Messungen, terrestrische Photogrammetrie und Luftbildauswertung) und Baugeologie (Archivauswertung, geophysikalische Methoden, Aufschlußbohrungen und Schurfarbeiten).
- Erhebung der hydrogeologischen u. klimatischen Bedingungen.
- Bestimmung der maximalen und residualen Gesteinsfestigkeits-Parameter (Reibungswinkel und Kohäsion) in den Gleitflächen oder Rutschzonen und ihre Abhängigkeit von dem natürlichen Wassergehalt.
- Feststellung der Grenzbedingungen der Hangstabilität.

Die Standfestigkeit der Hänge wurde hauptsächlich mit Hilfe der Methoden von NONVEILLER und JANBU sowie von MASLOW-BERER und TAYLOR berechnet. Sie sind als getrennte Ausarbeitungen in der Bibliothek PAN-Gdansk zugänglich.

Die berechneten Standfestigkeitswerte basieren auf der allgemein bekannten und verwendeten Annahme, daß sich der Rutschkörper auf der gesamten Gleitfläche bewegt. Wie man an der Lipowica-Rutschung beobachten kann, kommt es zuerst zu einer Teilbeeinträchtigung einiger Bereiche des Hanges und dann fortschreitend zum progressiven Bruch, was ein laufendes örtliches und zeitliches Schwanken der Werte der Scherfestigkeit (von maximal auf residual), sowie der hydrogeologischen Bedingungen bewirkt; dies macht sich durch die Zunahme der Wasserinfiltration sowie des hydrodynamischen Druckes in Klüften und Spalten bemerkbar.

Die untersuchten Karpathenflysch-Rutschungskörper zeigen folgende lithologische Ausbildung:

Der Hang in Lipowica besteht aus massigem Cergowski-Sandstein-Bänken (ca. 0,7 m bis 4 m mächtig) mit dünnen Zwischenlagen aus Tonschiefern, Tonen und Schluffen (0,05—0,15 m); der Hang in Kotelnica besteht aus dünnen (von 0,05 bis 0,30 m mächtigen) tonig-mergeligen Tonschieferlagen sowie Schluffen, die mit dünn-schichtigem Sandstein im Verhältnis 8 : 1 wechseln;

der Hang in Dobczyce besteht aus 0,10—0,30 m starken Sandstein-Bänken, die mit dünnen Tonschiefern und Tonlagen wechseln.

Die Rutschungen in Lipowica und Kotelnica stellen den konsequent-strukturellen Typ, jene von Dobczyce den insequent-strukturellen Typ dar.

Die hydrogeologischen Erkundungen haben folgendes erbracht:

Die Tiefenlage des Grundwassers wurde mit Hilfe von geoelektrischen Sondierungen, piezometrischen Beobachtungen an Pegeln sowie bei Bohrungen aufgezeichnet.

Auf Grund dieser Beobachtungen konnte man eine direkte Abhängigkeit des Grundwasserspiegelniveaus von den Niederschlägen im Sommer und Herbst sowie teilweise auch im Frühjahr feststellen. Der Grundwasserspiegel steigt mit eintägiger Verzögerung nach den Niederschlägen, sinkt aber mit mehrtäglichem Nachlauf nach Beendigung der Niederschläge.

Die klimatische Charakteristik aller drei untersuchten Rutschungen basiert auf 16 bis 20-jährigen Niederschlagsbeobachtungen. Man konnte feststellen, daß ca. 50% der Niederschläge auf die Sommermonate von Juni bis August fallen, was zu einer Reaktivierung bestehender oder zur Entstehung neuer Rutschungen an den Hängen des Karpathenflysches führt.

Die größeren Niederschlagsmengen sind natürlich an die Meereshöhe gebunden, was folgende Werte charakterisieren können:

Tabelle 1

Rutschung	Höhe (ü.m.n.)	mittlerer Jahresniederschlag (mm)	mittlere Zahl der Regentage/Jahr
Kotelnica	850—900	1183,0	197
Lipowica	380—430	852,0	165
Dobczyce	250—285	860,5	174

Es ist zu bemerken, daß in Kotelnica die stärkere Niederschlags-Tätigkeit als direkte Ursache der Rutschungen anzunehmen ist. In Lipowica kommt zusätzlich der Anschnitt der Hänge durch den Abbau in einem Steinbruch dazu, sowie der höhere Strömungsdruck, der von der größeren Neigung des Hanges von 20°—30° abhängig ist.

Die Festigkeitsparameter sind sehr unterschiedlich und hängen von der Gesteinsart, der petrographischen Charakteristik sowie dem Wassergehalt ab. Leider beruht diese Unterschiedlichkeit auch in gewissem Ausmaß auf der Art der Untersuchungsmethoden. Die untersuchten gleichaussehenden schluffigen Lagen im Lipowica Profil haben Festigkeitswerte von 1,4 bis 12,0 kg/cm² gezeigt. Es wurde auch festgestellt, daß bei gleicher petrographischer Zusammensetzung die Gesteinsfestigkeitswerte von der Tiefenlage sowie vom Verwitterungsgrad der Schichten abhängig sind. Die Abhängigkeitsverhältnisse der Scherfestigkeitswerte (τ) von der Normalspannung (σ) verlaufen nicht immer linear; in manchen Fällen (z. B. in Kotelnica) verhält sich der mergelige Schiefer ab 3,3 kg/cm², der blaue Ton ab 1,65 kg/cm² plastisch. Wenn sich die Gleitfläche nicht tief unter der Oberfläche befindet, sind die Normalspannungswerte nicht groß, man kann also allgemein eine geradlinige τ — σ Abhängigkeit annehmen. Die Abnahme der Scherfestigkeitswerte mit Zunahme des Wassergehalts und des Anteiles an Tonmineralien wurde an Hand der untersuchten Schluffe, Tone und Lehme getestet, wobei festgestellt wurde, daß sich die verschiedenen Wassergehalte in erster Linie auf die Kohäsionswerte auswirken, weniger jedoch auf die Größe der Reibungs-

winkel, wobei diese auch von der Schnelligkeit des Scherversuches abhängen — bei einem „langsamen“ Scherversuch bekommt man halb so große Werte wie beim „Schnell-Versuch“.

Auf Grund der systematischen Untersuchung (je 0,5 m) des Wassergehalts der Kernproben von Tertiärsedimenten in Dobrzyń konnte man auf Grund der Maximalwerte die Gleitfläche bestimmen.

Generell wurde bei den Untersuchungen der Toneinlagerungen (Lipowica, Kotelnica) festgestellt, daß die Werte der Reibungswinkel nicht von den Scherflächen der Proben abhängig sind; die Kohäsionswerte bei Felduntersuchungen sind jedoch ca. dreimal so groß wie bei Laboruntersuchungen.

Bei der rechnerischen Analyse der Standsicherheit der Hänge wurden folgende Faktoren berücksichtigt: etwaiger Hanganschnitt, die Lage des Grundwasserspiegels unter der Gleitfläche (sog. „o“ Stand) und die minimalen und maximalen Wasserstände, die Änderungen der Festigkeitsparameter sowie der Wasseraufstieg im Staubecken.

Die Standsicherheit wird in den Beispielfällen durch folgende Faktoren um die in der Tabelle angeführten numerischen Größen vermindert:

Tabelle 2

Hang	Hanganschnitt	Aufstieg des Grundwasserspiegels auf max. Stand von „o“-Stand (= unter Gleitfläche)		Abnahme d. Scherfestigkeit von max. auf residual mit Zunahme d. Wassergehalts		Wasserim Staubecken
		von max. Stand	von minim. Stand	von max. auf residual	mit Zunahme d. Wassergehalts	
Lipowica	1,45	0,11	0,07	0,26		
Kotelnica	0,10	0,25	0,11	0,40		
Dobczyce	0,09	0,26	0,08			+0,12
Stróza	0,33				1,06	0,34
Dobrzyń					0,33	0,67

Wie aus der Tabelle zu entnehmen ist, kann die Hebung des Wasserspiegels im Staubecken sowohl eine Zunahme der Standsicherheit verursachen (z. B. um 0,12, daher in der Tabelle mit + bezeichnet, wie in Dobczyce auf Grund der Verminderung des vorhandenen Strömungsdruckes und eines flach geneigten Hanges), als auch dessen Abnahme auf Grund eines vergrößerten Wasserauftriebes (Stróza und Dobrzyń).

Aus der Analyse der Ursachen der Entstehung von Rutschungen auf einzelnen Hängen geht hervor, daß in Lipowica der Hanganschnitt und die Niederschläge, — in Kotelnica und Dobczyce die Niederschläge und der Anstieg des Grundwasserniveaus, in Stróza die Zunahme des natürlichen Wassergehalts und in Dobrzyń die Abnahme der Gesteinsfestigkeit zum Verlust der Standfestigkeit vor allem beigetragen haben.

Die Aufstellung der tatsächlichen Untersuchungs- und Berechnungskosten wurde in vier Gruppen geteilt und zwar: I. Geologische Erkundungen, II. Hydrogeologische Erhebungen, III. Bestimmung der Festigkeitsparameter und IV. Standfestigkeitsberechnungen. Wie aus der Analyse hervorgeht, war der finanzielle Aufwand für die Gruppe I zu hoch, dagegen jener für die Untersuchungsgruppen II u. IV zu niedrig.

Im Allgemeinen sollten die Kosten folgendermaßen aufgeteilt werden:

Gruppe I	55—60%
Gruppe II	10—15%
Gruppe III	5—15%
Gruppe IV	10%

Im zweiten Teil der Arbeit wurden allgemeine Richtlinien für die Untersuchungsmethodik und Prognostik für Hangrutschungen beim Bau von Wasserstaubecken aufgestellt.

Auf Grund der Analyse der morphologischen, geologischen und klimatischen Situation werden die Festigkeitsparameter, die technischen Bedingungen für Wasserstaubecken, sowie der Typ und die Ursachen der möglichen Hangrutschungen festgelegt. Die Bestimmung der Art der Hangrutschungen erfolgt auf Grund der Klassifikation der Hangrutschungen (Tab. 3), die auf der Art der Bewegung und Form der Gleitfläche beruht. Diese Art von Einstufung erleichtert die Auswahl der Methodik zur Bestimmung der Festigkeitsparameter sowie der Hangstandfestigkeit.

Tabelle 3: Klassifikation der Hangrutschungen

Art der Bewegung	Form der Gleitfläche	Verwitterungsmaterial	Strukturell	
			Verlauf der Gleitfläche zum Fallen der Schichten	
			konkordant	diskordant
Kriechen	flach kreiszahl. beliebig	Hangkriechen	konsequentes Kriechen	insequentes Kriechen
Gleiten	flach kreiszahl. beliebig	Hanggleitung	konsequentes Gleiten	insequentes Gleiten
Felssturz	nicht vorhanden beliebig	Sturz durch Felsüberhang Sturz (Gleiten) durch die Zerstörung der Felsbasis		

Mit den Rutschungen sind mehrere Entstehungsursachen verbunden. Sie wurden auf zwei Gruppen aufgeteilt: die „passiven“ — immerwährenden (morphologischen, strukturellen u. lithologischen) Gegebenheiten sowie die „aktiven“ — variablen (klimatischen, vegetationsbedingten und anthropogenen) Ursachen.

Von den in den Karpathen aufgenommenen Rutschungen sind 97% durch „passive“ Ursachen (auf Grund der Flußerosion 91%, der Suffusion 5% und Abrasion 1%) erklärbar und nur 3% durch „aktive“ Ursachen (menschliche Eingriffe) entstanden.

Die Untersuchungen und rechnerischen Arbeiten führen zu zwei Typen von Prognosen: die erste mit qualitativem Charakter (Festlegung der Ursachen, Art und Bereich der Hangbewegungen); die zweite mit quantitativem Charakter kontrolliert der erste Prognose und erlaubt die Bestimmung der Hangstabilitätskoeffizienten sowie deren Abhängigkeit von den verschiedenen Faktoren, die auf die Änderung der Hangstabilität Einfluß nehmen. Die Genauigkeit der rechnerischen Prognose ist von dem ersten Typ abhängig.

Zur Beurteilung und Prognostik der Hangstabilität wurden folgende sechs Faktoren ausgewählt: Morphologie des Hanges, sein geologischer Bau, hydrogeologisch-klimatische Verhältnisse, Festigkeitsparameter sowie Verhalten beim Wasseraufbau.

Folgende Ausgangsdaten sollten für die Bestimmung der erwähnten Faktoren erhoben werden:

für die Morphologie des Hanges: Neigung — Höhe u. Länge — Vegetation — Abgrenzung der aktiven und passiven Rutschungen;

für den geologischen Bau: Die geologische Geschichte (Genese, Alter, tektonische u. glazial-tektonische Prozesse) — Lithologie (Art der Schichtung, Streichen u. Fallen, Klüfte, Verwitterung, vorhandene oder potentielle Gleitflächen oder Zonen und die in ihnen vorkommenden Gesteine — Quartär (Petrographie, Mächtigkeit, Wasserverhältnisse);

hydrogeologische Verhältnisse: Lage der Grundwasserspiegel (maximale und minimale in Bezug zur Niederschlagsmenge) — Größe des Einzugsgebietes, Hangstabilität gegenüber den Niederschlags- und Schneeschmelzwassermengen — Verteilung von Druckwasser- und Kluftwasserporen im Hang;

klimatische Verhältnisse: Niederschlagsunterschiede (maximale, minimale und mittlere Werte bezogen auf Tage, Monate und Jahre) — eventuelle Wasserbilanz;

Festigkeitsparameter: Kohäsion und Reibungswinkel (maximale und residuale Werte) entlang der Gleitflächen oder -zonen, Abhängigkeit der Kohäsion und des Reibungswinkels vom Wassergehalt oder mineralogischer Zusammensetzung;

Verhältnisse beim Wasseraufstau: Schwankungen des Wasserspiegels — Geschwindigkeit des Aufstieges und Fallens des Wasserspiegels — Abrasion.

Die Auswahl der Methoden zur Bestimmung dieser Faktoren hängt von der gesamten Situation der Hangrutschung unter Berücksichtigung des Arbeitsaufwandes sowie der anfallenden Kosten ab. Es ist zu empfehlen, die Anwendung von mehreren sich ergänzenden Methoden zu versuchen.

Folgende Methoden dienen der Bestimmung der entsprechenden Faktoren zur Berechnung und Prognostik der Hangstabilität:

Morphologie: Luftbilddauswertung — terrestrische Photogrammetrie — Geodäsie;

geologischer Bau: Archivstudien — Vor- und Detailkartierung — Obertag- und Untertag-Aufschlüsse — geophysikalische Methoden (geoelektrische Sondierungen, geoelektrische Kartierungen, seismische und akustische Untersuchungen) — mineralogische Untersuchungen — Untersuchungen der physikalischen Eigenschaften — Gesteine;

Hydrogeologie: Aufnahme aller zu Tage tretenden Wässer — Auffüllversuche in Bohrlöchern — piezometrische Beobachtungen;

klimatische Verhältnisse: Analyse der Niederschläge im Allgemeinen und im Einzugsgebiet;

Festigkeitsparameter: direkte Scherverversuche im Labor und im Feld;

Verhältnisse beim Wasseraufstau: Annahmen für die technische Projektierung.

Die Untersuchungsarbeiten und Prognostik sollten in drei Etappen durchgeführt werden. Zuerst erfolgt die Beurteilung der vorhandenen und potentiellen Rutschungsphänomene sowie die Ausarbeitung des detaillierten Untersuchungsprogrammes.

In der zweiten Etappe sollten jene Untersuchungen durchgeführt werden, aufgrund welcher eine qualitative und quantitative Prognose samt Sanierungsvorschlägen ausgearbeitet werden soll.

In der dritten Etappe sollten die Beobachtungen der Hangstabilität während des Betriebes des Staudammes gemacht werden. Die Ergebnisse dieser Beobachtungen sollten der Verifizierung der zweiten Etappe dienen. Die Beobachtungen können an der Oberfläche (z. B. Luftbilder, photogrammetrische bzw. geodätische Messungen) sowie untertägig (z. B. geokustische Methode, piezometrische Beobachtungen, Messungen in Bohrlöchern) durchgeführt werden. Sie erlauben die genaue Festlegung der Verschiebungen innerhalb der Hänge und haben besondere Bedeutung für die Sicherheit der Staudämme.

BARBARA VECER