

"Ingenieurgeologische Probleme bei der Beurteilung der Standsicherheit von Felsböschungen in der Slowakei"

Dr. Rudolf HOLZER

Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Komensky Universität Bratislava, CSFR

Einleitung

Das Studium der Standsicherheit von Einschnitten, Anschnitten u.ä. in verschiedenartig gestaltetem Felsverband, die Prognose seines momentanen oder rheologischen Verhaltens sowie der Entwurf einer standsicheren Böschung gehören zu den wichtigsten Problemen der ingenieurgeologischen Praxis.

Insbesondere die Prognose der Sicherheit und Haltbarkeit einer künstlichen Einschnittsböschung verlangt die Erfassung der verschiedenen Einflüsse bei der Änderung des quasistabilen Zustandes infolge des Aushubes, der Sprengarbeiten und der Dynamik des Naturmilieus. Von besonderer Wichtigkeit ist hier die Frage der quantitativen Beurteilung jener Parameter des Felsverbandes, die über seine Festigkeitseigenschaften und sein Deformationsverhalten beim Baueingriff von großer Bedeutung sind.

Problemstellung

Bei der Problembehandlung gehen wir davon aus, daß die Standsicherheit einer Felsböschung vor allem von der Beschaffenheit und der Geometrie der "defekten" Flächen oder Räume abhängt, die grundsätzlich die schwächsten Stellen des Verbandes darstellen.

Struktur und Klassifikation des Felsverbandes sowie Aufgaben der Modellstudien

Viele unserer Geländearbeiten haben gezeigt, daß es bei der Untersuchung der Standsicherheitsfaktoren notwendig ist, folgende Haupttypen des Milieus zu unterscheiden:

- Felsverband mit hoher Festigkeit des Gesteinsmaterials, dessen Blöcke gut verbunden sind; das Diskontinuitätsnetz ist weitmaschig
- Felsverband mit einer starken tektonischen Beanspruchung, das Material zerfällt sehr schnell und das Klufnetz ist sehr dicht
- Felsverband in Charakter und Eigenschaften außerordentlich variabel infolge einer starken lithologischen und tektonischen Inhomogenität
- Felsverband nach Öffnung des Einschnittes infolge verschiedener Prozesse schnell der Auflockerung bis zu völliger Zerlegung des Materials unterworfen (z.B. hydrothermale, metamorphe Prozesse, Verwitterung etc.)
- Felsverband durch Verkarstungsprozesse stark beeinflußt

Unter mehreren Faktoren, die wesentlich das Verhalten des Felsverbandes beeinflussen - vor allem in Bezug auf seine Materialänderungen, Störungen und limitierte Standsicherheit - nimmt die Blockstruktur eine besondere Stellung ein. Durch ihre geometrische Charakteristik und Materialeigenschaften ist ihre Entwicklung mit mehreren Vorgängen verbunden, die vor allem tektonischer, genetisch-lithologischer oder hypergener Natur sind.

Im Hinblick auf die Problematik der typologischen Klassifikation der Deformation von Felseinschnitten wird die Analyse dieser Felsstrukturen an vorderer Stelle stehen. Seit längerer Zeit wurde die Analyse solcher Strukturen zuerst ganz allgemein erforscht - in verschiedenen lithologischen Gesteinstypen - bis wir zu einer ingenieurgeologischen Klassifikation gelangten, die Felsformationen nach Grundbegriffen gliedern und beschreiben läßt:

- 1) nach einzelnen Strukturen und ihren Elementen (Maße und Formen der Stoffelemente, also Bruchstücke, Grundblöcke, Schichtfolgen u.ä.) wie auch nach Elementen ihrer tektonischen Diskontinuität und deren Variabilität (Klüfte, Dislokationen, Störungszonen),
- 2) nach strukturbildenden Beziehungen, welche den physikalischen Zustand und interstrukturelle Funktionen charakterisieren (MATULA, ONDRÁŠIK, 1987; GOLODKOVSKAJA, MÁTULA, SAUMJAN, 1987).

Bei jeder Aufgabe der Ingenieurpraxis ist es bei der bekannten Faktorenvariabilität klar, daß kein allgemeines Schema, keine einheitliche Rechenweise für die optimale Standsicherheitsbestimmung einer Böschung relevant ist. Aus diesem Grund wird hier ein Verfahren hervorgehoben, welches aufgrund einer geeigneten ingenieurgeologischen Analyse des betreffenden Felsverbandes eine *Simplifizierung* in Form eines *Modelles* ermöglicht.

Wir gehen davon aus, daß der Felsverband einen Komplex von Blöcken und Bruchstücken bildet, die durch die Diskontinuitätsflächen getrennt sind (L.MÜLLER, 1963, und viele andere). Jeder solche Komplex hat seine eigene interne Organisation, in welcher sich die entstandenen Elemente gegenseitig beeinflussen. Individuell treten die Materialblöcke als eine alleinstehende Einheit auf. Die Eigenschaften dieser Elemente im System können ausreichend durch ihre lithologische Beschreibung und durch die physikalisch-mechanischen Eigenschaften ausgedrückt werden. Nicht weniger wichtig scheint hier die Auflockerung und die sekundäre Füllung der Klüfte zu sein.

Der Felsverband ist ein typisches Beispiel eines offenen Systems, dessen Existenz und Entwicklung sich in sehr naher Koexistenz mit anderen Systemen des Naturmilieus befindet. Zu diesen gehören: das Grundwasser und sein Bewegungsvorgang, die Aktivität von verschiedenen Verwitterungsagentien, die Bio- und Atmosphäre und besonders der Faktor Mensch. Als Konsequenz verschiedener Interrelationen, z.B. Energie- und Materienaustausch, Änderungen des Spannungszustandes u.ä., kommt es zu strukturellen bzw. sogar zu Materialänderungen im Fels.

Eine der wichtigsten Aufgaben der Praxis ist es, ein naturgetreues Modell zu entwickeln, in dem das komplizierte System des Felsverbandes vereinfacht wird. Diese Vereinfachung liegt darin, eine Auswahl von bestimmten *Parametern* zu treffen, die die wesentlichen Eigenschaften des Felsverbandes widerspiegeln und die der Gestaltung eines genügend repräsentativen Modells dienen.

Wir verwenden folgende Parameter:

1) *Lithologie* des Kluftkörpermaterials als erster Parameter der Klassifikation mit einem entscheidenden Beitrag zur Bildung des physischen Charakters des Felsverbandes; die Lithologie gehört zu den Grundelementen des Systems. Sie gibt uns auch Informationen darüber, wie die Zusammensetzung eines bestimmten Gesteinstypes die Bildung der typologischen Strukturcharakteristik beeinflusst (MATULA, HOLZER, 1978).

2) *Blockigkeit* als zweiter Parameter der Klassifikation repräsentiert:

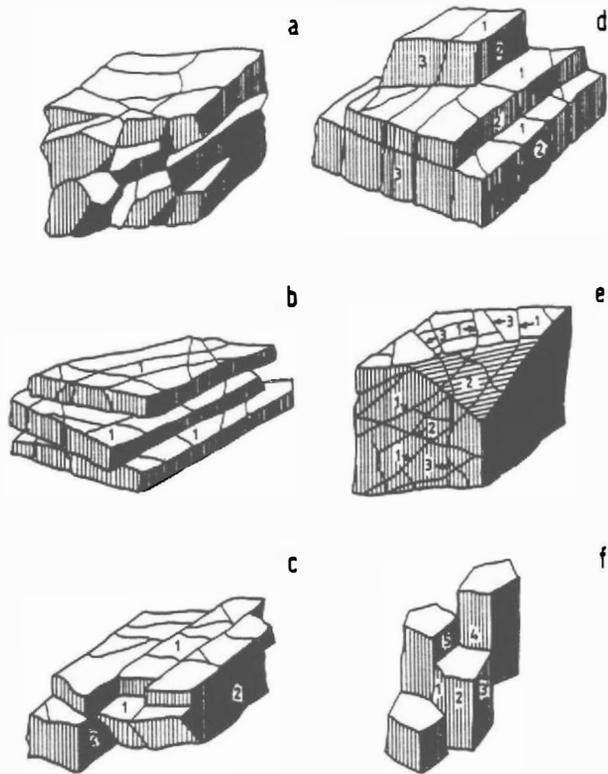
- den Grad der Gliederung des Verbandes in individuelle Blöcke und Bruchstücke mit Dimensionen, die durch den Abstand der Diskontinuitäten in den einzelnen Systemen bestimmt sind;
- die geometrische Form der Blöcke, die durch die räumliche Anordnung der Diskontinuitätssysteme gegeben ist, und
- die räumliche Anordnung der Blöcke im Verband, die völlig von der räumlichen Anordnung der Diskontinuitätssysteme abhängig ist.

Grundtypen der Blockigkeit (MATULA, HOLZER, 1976; MATULA, 1981)

(siehe Abb. 1):

- a) Typ Po: Polyedrische Blöcke; unregelmäßiges Diskontinuitätsnetz ohne Anordnung in ausgeprägte Systeme, Länge der Klüfte meist relativ kurz
- b) Typ Ta: Tafelige Blöcke; ein dominantes System von parallelen Diskontinuitäten (1), z.B. Schichtflächen mit anderen nicht durchlaufenden Klüften, Mächtigkeit der Blöcke kleiner als ihre Länge oder Breite
- c) Typ Pr: Prismatische Blöcke; zwei dominante Systeme von Diskontinuitäten (1 und 2), annähernd orthogonal und parallel, meistens mit einem dritten unregelmäßigen System verbunden, Mächtigkeit der Blöcke kleiner als ihre Länge und Breite
- d) Typ Eq: Gleichdimensionale Blöcke; drei dominante Systeme der Diskontinuität (1, 2 und 3), annähernd orthogonal, teilweise von unregulären Klüften begleitet
- e) Typ Rh: Rhomboidähnliche Blöcke; drei (oder auch mehr) dominante, vorwiegend schiefe Diskontinuitätssysteme (1, 2 und 3), Blöcke annähernd gleichdimensional
- f) Typ Co: Säulige Blöcke; einige Systeme, meistens mehr als drei, von kontinuierlichen, parallelen Klüften (1, 2, 3, 4, 5), oft sog. Querklüfte vorhanden, Länge der Blöcke größer als andere Dimensionen

Abb. 1: Grundtypen der Blockigkeit



Die Blockmaße, gegeben durch den Kluftabstand in dominanten Systemen, können folgend definiert werden (MÁTULA, 1981):

sehr groß	mehr als 200 cm
groß	60 - 200 cm
mittel	20 - 60 cm
klein	6 - 20 cm
sehr klein	weniger als 6 cm

3) Der *Auflockerungsgrad* gibt Angaben über das Volumen der geöffneten Klüfte oder Hohlräume im einheitlichen Volumen eines Felsverbandes. Die Ursachen der Öffnung der Klüfte sind verschieden (tektonisch, lithogenetisch, hypergen u.a.)

Der Grad der Auflockerung wird in einer fünfstufigen Skala als sog. Index der Auflockerung ausgedrückt:

weniger als 0,3 %	1
0,3 bis 2,0 %	2
2 bis 5 %	3
3,5 bis 15 %	4
mehr als 15 %	5

4) Die *Klutfüllung*, ausgedrückt im Charakter des Materials bzw. im Verhältnis der sandigen zu den tonigen Komponenten ist der letzte Parameter der Klassifikation. Er entspricht der sekundären Mineralsubstanz, mit der die Zwischenräume, die durch Dilatation oder Umkippen der Blöcke entstanden sind, gefüllt sind. Meistens sind es kohäsionslose, in seltenen Fällen tonige Materialien.

Das Verhältnis zwischen dem sandigen und dem tonigen Anteil bestimmt den Index der Kluffüllung:

	1	2	3	4	5
tonig	0-10	10-35	35-65	65-90	90-100 %
sandig	90-100	90-65	65-35	35-10	0-10 %

Das Ergebnis der systematischen Untersuchung der Zusammensetzung und strukturellen Eigenschaften von Feiskörpern stellt die typologische *Klassifikation* dar. Aufgrund der Auswahl an Kennwerten der lithologischen Komplexe und Gesteine in der Slowakei und aufgrund ihrer Bearbeitung in sog. Stammdatenblätterformularen entstand ein übersichtlicher Atlas der Gebirgsformationen. Die einheitlichen Angaben bilden im derzeitigen Ausmaß (326 Datenblätter) eine zuverlässige Basis für regionale Untersuchungen, ebenso auch für viele konkrete Anwendungen.

Das Stammdatenblatt beinhaltet folgende Teile:

Teil 1: Allgemeine Angaben über die Lokalität, wie z.B. Typ, Maße, Orientierung u.a.

Teil 2: Angaben über die Gebirgsformation in einem Komplex der systematisch geordneten quantitativen und qualitativen Werte. Sie beinhalten vor allem eine präzise Information über die Diskontinuität und Charakteristik ihrer Systeme (Typ und Abstand der Klüfte, Orientierung, Länge, Rauigkeit, Öffnung, Füllung, Wassergehalt).

Daraus erfolgen die Aussagen über die Form und Größe der Blöcke, Auflockerung und Füllung der Klüfte in einzelnen homogenen Bereichen.

Teil 3: Angaben über die Grundeinheit des Gesteins und seine allgemeine Charakteristik: Ort der Probennahme, Orientierung des Probenmonolithes, Farbe, Mineralzusammensetzung, Struktur,

Textur. Tabellarische Bearbeitung der Indexwerte sowie der physikalischen und mechanischen Eigenschaften: spezifisches Gewicht, Trockenrohddichte und -Porosität, N-Wasseraufnahmefähigkeit, Ultraschallgeschwindigkeit, Eindringungsfestigkeit, Einachsiale Druckfestigkeit (trocken, wassergesättigt, nach 25 Frostzyklen), Scherfestigkeit, Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul, Poisson-Zahl, Verformungsmodul, dynamischer Elastizitätsmodul, Schmidt-Prallhammerwert.

Außer diesen Angaben beinhaltet der dritte Teil auch Festigkeits- und Verformungsdiagramme des Gesteins, ein Foto der Laborprobe, ein Mikrofoto des Schliffes und ein SCAN-Foto.

Teil 4: Das Resultat aller vorherigen Untersuchungsetappen wird in kodifizierter Form aller wichtigen Parameter dargestellt, ausgedrückt in Abkürzungen der lithologischen Zusammensetzung (z.B. g-Granit, k-Kalkstein, etc.), dann folgt die Bezeichnung der Blockigkeit (nach der oben genannten Klassifikation der Form und Größe der Blöcke), wie auch die Klassifizierung der Auflockerung und Füllung in Ziffern von 1 bis 5.

Teil 5: Die beiliegende Fotodokumentation der Formation beinhaltet auch eine graphische Darstellung der festgestellten homogenen Bereiche, Standorte der Probenahme, bedeutende Diskontinuitätsflächen etc.

Typologische Klassifikation der Formation und Beurteilung der Standsicherheit bei Felseinschnitten

Wenn nach Maßgabe des Projektes die zu untersuchenden Felsformationen über das angeführte Klassifikationsschema hinaus noch einer ausführlicheren Analyse unterzogen werden müssen, ist es notwendig, eine weitere Präzisierung

der ingenieurgeologischen Untersuchungen in der Standsicherheitsfrage vorzunehmen.

1. Analyse des Formationsaufbaues, Gliederung der Grundeinheiten und ihre Verbandseigenschaften
2. Bewertung aller Inhomogenitäten (tektonische, lithologische etc.)
3. Änderungen des Zustandes und der Eigenschaften von Einzelblöcken in allen homogenen Bereichen
4. Bewertung der Auswirkungen der Blockstruktur im morphologischen Bau des Gebietes
5. Detaillierte Bewertung des Zusammenhanges zwischen Gefüge und Grundwasserströmung bzw. ihre Richtungen und Druckeinfluß des Kluftwassers
6. Bewertung der Auswirkungen und der Reaktion der Blockstruktur auf den technischen Eingriff des Menschen, wie z.B. Festlegung der optimalen Technologie der Sprengarbeiten, ihre Folgen auf die Verbandsauflockerung und Zerlegung der Felsformation, die Feststellung des Verhaltens der Gesteinstypen nach der Öffnung des Einschnittes, Bestimmung der wirkungsvollen Sicherungsmaßnahmen, eventuelle Modifikation der Sanierungsarbeiten.

Typologische Klassifikation der Deformationen von Felseinschnitten

Wie uns mehrere praktische Standsicherheitsaufgaben und Beispiele oder Sanierungsmaßnahmen gezeigt haben, ist es zweckmäßig, eine dem Bau des Massivs entsprechende Klassifikation der möglichen Einschnittsdeformationen aufzustellen. Diese Klassifikation ergibt sich aus dem strukturellen Modell des Massivs, seines Zustandes und aus dem Einfluß verschiedener geologischer

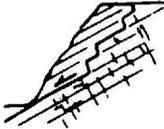
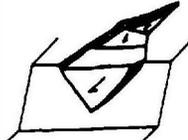
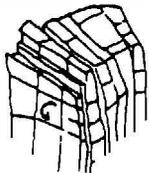
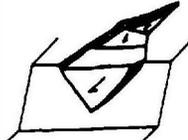
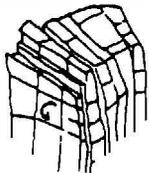
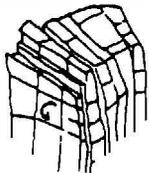
und exogener Prozesse. Es ist wichtig, aus der Blockstruktur und oben erwähnter Verbandshaftung der Blöcke die "Beweglichkeit" innerhalb der Formation zu bestimmen. Weiters ist es wichtig auch zu beachten, daß es sich bei dieser Klassifikation immer um Grundbeziehungen zwischen den Faktoren Struktur - Modell - Deformation handelt, welche viele spezifische Modifikationen ermöglichen.

Die Einteilung der Deformationen in Grundtypen zeigt Tabelle 1.

Schlußbetrachtung

Die vorgeführte Methodik der Modellstudien und Klassifikationen von Felsstrukturen hat sich bei vielen Aufgaben der Ingenieurpraxis bewährt. Eine exakte Analyse des Baues und Zustandes eines Felsverbandes bildete die Grundbasis für die Standsicherheitsbeurteilung von Böschungen und Einschnitten nicht nur in der Projektierungsphase, sondern und sogar noch mehr in der Phase der Detailuntersuchungen bzw. bei rasch durchzuführenden Sanierungsmaßnahmen. Dieses Verfahren wurde erfolgreich bei ingenieurgeologischen Untersuchungen betreffend die Änderung der Baudurchführung einer Straße bei Zvolen in der Mittelslowakei (HOLZER, ONDRÁSIK, GREGOR, 1988), weiters bei der Standsicherheitsbeurteilung der Steinbruchwand und der Sanierung der an ihrem Rand befindlichen Bauobjekte in Kosice (JACKO, HOLZER, 1989) sowie bei anderen Projekten verwendet.

Tabelle 1: Einteilung der Deformationen in Grundtypen

Typ der Deformation	Subtyp der Deformation	Struktur der Felsformation	Mechanismus der Deformation																
1. planar einfach /1a/ 	1b stufenförmig 	1 dominantes System der Diskontinuität, parallel zum Einschnitt und flacher als die Einschnittsneigung	Abgleiten von plattigen oder prismatischen Blöcken auf vorgegebenen Flächen nach Überschreitung der Gleitfestigkeit.																
	1c polygonal 			2. keilförmig einfach /2a/ 	2b stufenförmig 	2 bis 3 dominante, sich kreuzende Kluftsysteme. Ihre Schichtlinie ist flacher als die Neigung der Böschung und aus der Böschung gerichtet	Abgleiten der pyramidalen oder polyedrischen Blöcke nach Auflösung der Haftkräfte auf beiden Stützflächen des Keiles	2c polygonal 	3. kippförmig säulig /3a/ 	3b flexural 	Meistens 1 bis 3 vertikale Systeme der Diskontinuität. Markant säuliger Bau der Formation mit tabularen oder prismatischen Grundblöcken	Umkippen und Absturz der Blöcke. Ausgeprägte progressive Zerlegung der aufgelockerten Struktur meistens nach Überwindung der Haftung an vertikalen Klüften.	3c blockig 	4. kombiniert rotationell /4a/ 	4b schicht- u. stufenförmig 	3 und mehr unregelmäßige Systeme der Diskontinuität. Markante tekton. u. litholog. Inhomogenität (Verwitterung, Störungszonen, lithologische Variabilität etc.)	Gleitung, Rutschung und Absturz von meist unregelmäßigen Blöcken. Oft völlige Zerlegung der Struktur. Sehr oft völliger Zerfall der Blöcke	4c zonal 	5. brüchig polygonal /5a/ 
2. keilförmig einfach /2a/ 	2b stufenförmig 	2 bis 3 dominante, sich kreuzende Kluftsysteme. Ihre Schichtlinie ist flacher als die Neigung der Böschung und aus der Böschung gerichtet	Abgleiten der pyramidalen oder polyedrischen Blöcke nach Auflösung der Haftkräfte auf beiden Stützflächen des Keiles																
	2c polygonal 			3. kippförmig säulig /3a/ 	3b flexural 	Meistens 1 bis 3 vertikale Systeme der Diskontinuität. Markant säuliger Bau der Formation mit tabularen oder prismatischen Grundblöcken	Umkippen und Absturz der Blöcke. Ausgeprägte progressive Zerlegung der aufgelockerten Struktur meistens nach Überwindung der Haftung an vertikalen Klüften.	3c blockig 	4. kombiniert rotationell /4a/ 	4b schicht- u. stufenförmig 	3 und mehr unregelmäßige Systeme der Diskontinuität. Markante tekton. u. litholog. Inhomogenität (Verwitterung, Störungszonen, lithologische Variabilität etc.)	Gleitung, Rutschung und Absturz von meist unregelmäßigen Blöcken. Oft völlige Zerlegung der Struktur. Sehr oft völliger Zerfall der Blöcke	4c zonal 	5. brüchig polygonal /5a/ 	5b stufenförmig 	Tektonisch stark beanspruchte Struktur. Mehrere Kluftsysteme mit stark ausgeprägtem Karstprozeß und mit starken Auflockerungserscheinungen.	Absinken und Abstürzen von Blöcken in die aufgelaugten Räume oder Großbewegung der Struktur auf plastischer Unterlage. Oft völlige Zerlegung größerer Teilbereiche des Karstmassives.		
3. kippförmig säulig /3a/ 	3b flexural 	Meistens 1 bis 3 vertikale Systeme der Diskontinuität. Markant säuliger Bau der Formation mit tabularen oder prismatischen Grundblöcken	Umkippen und Absturz der Blöcke. Ausgeprägte progressive Zerlegung der aufgelockerten Struktur meistens nach Überwindung der Haftung an vertikalen Klüften.																
	3c blockig 			4. kombiniert rotationell /4a/ 	4b schicht- u. stufenförmig 	3 und mehr unregelmäßige Systeme der Diskontinuität. Markante tekton. u. litholog. Inhomogenität (Verwitterung, Störungszonen, lithologische Variabilität etc.)	Gleitung, Rutschung und Absturz von meist unregelmäßigen Blöcken. Oft völlige Zerlegung der Struktur. Sehr oft völliger Zerfall der Blöcke	4c zonal 	5. brüchig polygonal /5a/ 	5b stufenförmig 	Tektonisch stark beanspruchte Struktur. Mehrere Kluftsysteme mit stark ausgeprägtem Karstprozeß und mit starken Auflockerungserscheinungen.	Absinken und Abstürzen von Blöcken in die aufgelaugten Räume oder Großbewegung der Struktur auf plastischer Unterlage. Oft völlige Zerlegung größerer Teilbereiche des Karstmassives.							
4. kombiniert rotationell /4a/ 	4b schicht- u. stufenförmig 	3 und mehr unregelmäßige Systeme der Diskontinuität. Markante tekton. u. litholog. Inhomogenität (Verwitterung, Störungszonen, lithologische Variabilität etc.)	Gleitung, Rutschung und Absturz von meist unregelmäßigen Blöcken. Oft völlige Zerlegung der Struktur. Sehr oft völliger Zerfall der Blöcke																
	4c zonal 			5. brüchig polygonal /5a/ 	5b stufenförmig 	Tektonisch stark beanspruchte Struktur. Mehrere Kluftsysteme mit stark ausgeprägtem Karstprozeß und mit starken Auflockerungserscheinungen.	Absinken und Abstürzen von Blöcken in die aufgelaugten Räume oder Großbewegung der Struktur auf plastischer Unterlage. Oft völlige Zerlegung größerer Teilbereiche des Karstmassives.												
5. brüchig polygonal /5a/ 	5b stufenförmig 	Tektonisch stark beanspruchte Struktur. Mehrere Kluftsysteme mit stark ausgeprägtem Karstprozeß und mit starken Auflockerungserscheinungen.	Absinken und Abstürzen von Blöcken in die aufgelaugten Räume oder Großbewegung der Struktur auf plastischer Unterlage. Oft völlige Zerlegung größerer Teilbereiche des Karstmassives.																

Literatur:

- GOLODKOVSKAYA G.A., MÁTULA M., SHAUMYAN L.V., 1987: Ingenieurgeologische Typisation und Bewertung von Felsmassiven (im russischen). MGU Moskau, 272 S
- HOLZER R., ONDRÁSIK R., GREGOR V., 1988: Erfahrungen aus dem Aufbau und nachfolgender Forschung des Einschnittes Velká Stráz (im slowakischen). Wiss. Konf. der Hochschule für Verkehrswesen, Zilina, S. 21-24.
- JACKO S., HOLZER R., 1989: Wohnsiedlung Zelezníky-Kosice: Stabilisation der Steinbruchwand (im slowakischen). Wiss. Bericht Stavoprojekt Kosice, 70 S.
- MATULA M., HOLZER R., 1976: Entwurf der Methodik der ingenieurgeologischen Typisation von Felsmassiven (im slowakischen). Acta Geologica, Bratislava, S.29-58 (deutsches Resumé).
- MATULA M., HOLZER R., 1978: Engineering Geological Typology of Rock Masses. Trans Tech Publications - Grundlagen und Anwendung der Felsmechanik, Karlsruhe, S.107-122.
- MATULA M., 1981: Rock and Soil Description and Classification for Engineering Geological Mapping. Bull. IAEG, Aachen, S.235-274.
- MATULA M., ONDRÁSIK R., 1987: Felsmassive. Skriptum (im slowakischen), Bratislava, 11 S.
- MÜLLER L., 1963: Der Felsbau. Enke Stuttgart, 624 S.