Zeitschrift: Bulletin für angewandte Geologie

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure;

Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie

Band: 1 (1996)

Heft: 1

Artikel: Abschätzung der Gebirgsfestigkeit für Bruchprobleme in Festgesteinen

Autor: Locher, Hans Georg

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-219178

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 30.11.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Abschätzung der Gebirgsfestigkeit für Bruchprobleme in Festgesteinen

mit 2 Figuren und 5 Tabellen HANS GEORG LOCHER*

1.	Einleitung	. 21
2.	Ingenieurmässige Klassierung des Gebirges nach Barton	. 22
	Die Festigkeit von Fels und Gebirge nach Hoek	
	Abschätzung der Genauigkeit mit probabilistischen Methoden	
	Beispiele	
	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	
	teraturteratur	

1. Einleitung

In der Boden- und Felsmechanik treten eine ganze Anzahl von Bruchproblemen auf, zu deren zahlenmässiger Abschätzung der Geotechniker Werte für die Scherparameter und das Raumgewicht des Bodens oder des Gebirges benötigt:

- Stabilität von Böschungen oder Baugrubenwänden
- Tragfähigkeit von Fundamenten
- Erd- resp. Gebirgsdrücke auf Wände
- Stabilität und Gebirgsdrücke von Tunneln.

In der *Bodenmechanik* sind die Methoden zur experimentellen Ermittlung der Scherparameter - im allgemeinen Fall der Kohäsion c' und des Reibungswinkels Φ' in Bezug auf Effektivspannungen - bekannt und meist für die praktischen Bedürfnisse der Grundbauer genügend genau (s. z.B. Lang / Huder 1982, Kap. 6 und Kap. 9).

In der Felsmechanik dagegen sind die Modellvorstellungen ganz wesentlich komplizierter (s. z.B. Wittke 1984, Teil D), und die sehr zahlreichen Parameter sind schlecht bekannt sowie mit vielen Annahmen behaftet. Nur die Raumgewichte können einfach bestimmt oder geschätzt werden.

Im allgemeinen stehen uns bei Felsproblemen folgende Unterlagen zur Verfügung:

- die einaxiale Druckfestigkeit von intakten Gesteinsproben, z.B. von Bohrkernen. Darüber besteht ein grosser Schatz von Erfahrungen und Messungen.
- Aufnahme und visuelle Beurteilung der Schichtung und Klüftung (Kluftfamilien, Richtung, Kluftbeläge, Verwitterung etc).
- Angaben über die Grund- resp. Kluftwasserverhältnisse sowie die Spannungsverhältnisse im Gebirge.

^{*} Geotechnische Beratungen, Gumpisbühlweg 17, 3067 Boll

Im vorliegenden Artikel wird systematisch unterschieden zwischen

- Eigenschaften des intakten Felsens (intact rock material, Index i)
- Eigenschaften des Gebirges (rock mass, Index m).

Es wird eine Methode gezeigt, welche aus den oben aufgezählten zur Verfügung stehenden Unterlagen Scherparameter des Gebirges, nämlich eine durchschnittliche Kohäsion c_m und einen durchschnittlichen Reibungswinkel Φ_m abzuschätzen erlauben. Diese durchschnittlichen Scherparameter berücksichtigen sowohl die Festigkeit des Grundgesteins wie auch den abmindernden Einfluss von Schichtung und Klüftung. Sie wurden auf halbempirischem Weg gefunden, indem mehrere zusätzliche Parameter in ein bekanntes Bruchkriterium eingefügt wurden, deren Wert an praktischen Beispielen bestimmt werden konnte.

Mit den so erhaltenen durchschnittlichen Scherparametern c_m und Φ_m können felsmechanische Bruchprobleme näherungsweise mit denselben Berechnungsmethoden abgeschätzt werden, wie sie für Bodenprobleme gebräuchlich sind, und man kann dazu dieselben Rechenprogramme verwenden.

Zur Abschätzung der Gebirgsfestigkeit werden folgende vier aus der Literatur bekannte Ansätze miteinander kombiniert:

- 1. Nach Deere (1963) wird die *Rock Quality Designation RQD* bestimmt oder abgeschätzt. RQD ist der prozentuale Anteil von Bohrkernstücken grösser als 10 cm in der untersuchten Schicht einer Bohrung.
- 2. Nach Barton et al. (1974) wird aus dem RQD und den Angaben über die Klüftung, die Kluftwasser- und Spannungsverhältnisse die *Rock Mass Quality Q*, eine Masszahl für die Qualität des Gebirges bestimmt.
- 3. Aus der Rock Mass Quality Q des Gebirges und der einaxialen Druckfestigkeit σ_{ci} des intakten Gesteins können nach Hoek (1994) die *durchschnittlichen Scherparameter des Gebirges*, nämlich der Reibungswinkel Φ_{m} und die Kohäsion c_{m} des Gebirges abgeschätzt werden.
- 4. Alle bei diesen Abschätzungen verwendeten Grössen weisen eine beträchtliche Streuung auf. Mit Hilfe von probabilistischen Überlegungen werden daraus Angaben über die zu erwartende Streuung der Scherparameter abgeleitet (Harr 1987, Locher 1983, 1985). Damit kann die Zuverlässigkeit der erhaltenen Resultate beurteilt werden. Auf Grund der erhaltenen Streuungen ist es möglich, auf eine systematischere Art Parameterstudien auszuführen, in denen für die Scherparameter des Gebirges statistisch begründbare obere und untere Werte eingesetzt werden.

2. Ingenieurmässige Klassierung des Gebirges nach Barton

Im Jahr 1974 hat das Norwegische Geotechnische Institut in seiner Publikation Nr. 106 (Barton et al. 1974) ein Klassifizierungssystem für das Gebirge entwickelt, welches vorab für Tunnel gedacht war, aber mit der nötigen Erfahrung auch für andere Gebirgsprobleme verwendet werden kann. Das System beruht auf der Analyse von ca. 200 Untersuchungen für Tunnelbauten und ergab einen nützlichen Zusammenhang zwischen den Verbaumassnahmen und einer Masszahl für die Gebirgsqualität Q. Diese Masszahl wird aus 6 Parametern errechnet, welche vorwiegend die Eigenschaften von Schichtung und Klüftung beschreiben und auf Grund der visuellen Beurteilung als skalierte Leitziffern (ratings) festgelegt werden. Folgende Leitziffern wurden verwendet: (s. Tabellen 1 und 2)

Tabl	Table 1. Descriptions and Ratings for the Parameters RQD, J_{n} , and J_{r}	gs for the Para	imeters RQD, In, and Ir		Tab	Table 2. Continued	pan			Table 3. Descriptions and Ratings for the Parameter SRF	ons and Kating	a lor in	e l'arameter on r
A. Very B. Poor C. Fair	ROCK QUALITY DESIGNATION (RQD) Very poor 25— 25 Poor 25— 57 Fair 50— 75	2000	Note: (i) Where RQD is reported or measured as £ 10 including	ui		0.4	(80—160)		٠٠ ا	STRESS REDUCTION FACTOR (a) Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated	CTOR ting excavation, of rock mass	(SRF)	Note: (i) Reduce these values of SRF by 25-50%, if the relevant where only
			of a nominal value of 10 is used to evaluate Q in Eq. (1) (ii) RQD intervals of S, i. e. 100, 95, 90, erc. are sufficiently		(Discontinuous coatings, 1—2 mm or less in thickness) (b) Rock wall contact before 10 cms shear	_			-, α		kness zones y disintegrated rock (any depth)	10.0	influence but do not inte
		(Jn)	accurate	Ħ,	S	4.0	(250-300)		i	chemically disintegrated rock (depth of excavation ≤ 50 m)	(depth of	2	
	Massive, no of few joints One joint set plus random	3 2 -1.0		Ġ.	2 00	0.9	(160—240)		Ċ		ining clay, or c (depth of ex-	2.5	
G.F. Two		9 6 1	Notes	ï		8.0	(12°-16°)	(m)	D.		petent rock ; rock (any depth) ent rock (clay	5.0	
		15	(i) For intersections use (3.0 × J _n) (ii) For portals use (10.0 × L _n)	Ļ	Swelling clay fillings, i. c. mont- morillonic (Continuous, <5 mm in thickness) Value of L. denande	8.0—12.0	(60-120)		μ,	free) (depth of excavation ≤ 50 m) Single shear zones in competent rock (clay free) (depth of excavation > 50 m)	50 m) ent rock (clay 50 m)	2.5	
3. JOIN	BER	(4)	787		on percent of swelling clay-size				Ġ.	Loose open joints, heavily jointed or "sugar cube" etc. (any depth)	inted or "sugar	2.0	
(e) (b) R R	(a) Rock wall contact and (b) Rock wall contact before				(c) No rock wall contact when sheared			×		(b) Competent rock, rock stress problems \(\sigma_{1}\) \(\sigma_{1}\)	stress problems		
		4 m N	Note: (i) Add 1.0 if the mean spacing of the relevant ioint set is	M.L.	NOI	6.0, 8.0 or 8.0—12.0	(6°—24°)		Η̈́	Low stress, near surface 3	> 13	2.5	(ii)
D. Slicke E. Rough		1.5	greater than 3 m (ii) J ₁ =0.5 can be used for	ż	dition) Zones or bands of silty- or sandy clay, small clay fraction	5.0				structure (Usually favourable to stability, may be unfavourable to		0:1	
	Slickensided, planar (c) No rock wall contact when sheared	6:3	planar slickensided joints having lineations, provided the lineations are favourably orientated	O, P,	P. Thick, continuous zones or bands of clay (see G. H. J for descrip-	100, 13.0 or	(60-240)		٦		5-2.5 0.33-0.16	5-10	where: $\sigma_c = \text{unconfined}$ compression strength
H. Zone	ng clay minerals thick	(legimon) 01		1	tion of car, condition	207			Ä.	Heavy rock burst (massive rock)	<2.5 <0.16	10-20	(point load), or and or =
Sandy thick contact		1.0 (nominal)		ا د	JOINT WATER REDUCTION FACTOR	(J _m)	Approx. water pressure (kg/cm²)	ater .		(c) Squeezing rock; plastic flow of incompetent rock under the influence	ow of nfluence		stresses (iii) Few case records available where depth of crown
T.	Table 2. Descriptions and Ratings for the Parameters $J_{f a}$ and $J_{f w}$	ings for the Pa	trameters Ja and Ju	₹ €	Dry excavations or minor inflow, i. e. <51/min. locally Medium inflow or presents	1.0	1,	(i) Factors C to F are	z o	Mild squeezing rock pressure Heavy squeezing rock pressure		5—10 10—20	below surface is less than span width. Suggest SRF increase from 2.5 to 5 for such cases (see H)
JOIN	JOINT ALTERATION NUMBER (Ja)	la) Gr (approx.)	brox.)	á	occasional outwash of joint			crease Ju if drainage		(d) Swelling rock; chemical swelling activity depending on presence of water	welling e of water		
Tigh	(a) Rock wall contact Tightly healed, hard, non-soften- ing, impermeable filling i. e.	0.75 (—)	Note: (i) Values of (¢), are in-	Ü	Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled ioints	0.5	2.5—10.0	(ii) Special problems caused by ice forma- tion are not con-	전 전	Mild swelling rock pressure Heavy swelling rock pressure		5-10	
Quar		1.0 (250—350)		D.		0.33	2.5—10.0	sidered					
Sligh	ed joint walls. Non- teral coatings, sandy -free disintegrated	2.0 (250—300)		щ	Exceptionally high inflow or water pressure at blasting, de- caying with time	0.2—0.1	> 10.0						
Silty., or	rock erc. Silve, or sandy-clay coatings, small 3.0 clay-fraction (non-softening)	(055-005)	250)	m,	Exceptionally high inflow or water pressure continuing without noticeable decay	0.1—0.05	> 10.0						

Tab.1: Engineering Classification of Rock Masses Rock Mass Quality Q. Tables of ratings for the Parameters RQD, J_n, J_r, J_a, J_w, SRF. Kopie aus Barton et al. (1974).

	RQD		Leit	Leitziffern für:														
***************************************		%	L	Kluftsysteme	ηſ		Kluftrauhigkeit	Jr		Kluftverwitterung	Ja		Wasserfaktor	Druck m	λV		Spannungsfaktor	SRF
L			L				taletaestale = time (4) (e)			(a) (b) mit Eolekontakt							(a) Schwächezonen	
		ANDREAS PROPERTY OF THE PROPER	-				(a) (b) IIIII LEISMOIIIANI	na processor and the second		(a) (b) IIIII Leiskolliaki	***************************************							
4	A sehr schlecht	0 - 25	A	massiv, nur weinige Klüfte	0.5-1	Ą	Klüfte nicht zusammenhängend	4	Ą	Klüfte verheilt	0,75	A	Aushub praktisch trocken	< 10	-	٧	viele Schwächezonen mit Ton	10
В	3 schlecht	25 - 50	80	eine Kluftschar	2	80	rauh, unregelmässig, gewellt	9	В	unverwittert	-	8	mittlerer Zufluss	10 - 25	99'0	В	einzelne Schwächezonen mit Ton	2
O		50 - 75	O		9	O	glatt, gewellt	2	O	leicht angewittert, ohne Ton	2	C,D	grosser Zufluss	25 - 100	0.33 - 0.5	O	wie B, aber Tiefe > 50 m	2,5
) aut	75 - 90	٥	zwei Kluftscharen	4	٥	mit Rutschharnischen, gewellt	1,5	О	Kluftbelag siltig-sandig	3	E,F	extrem grosser Zufluss	> 100	0.05-0.2	۵	mehrere Scherzonen ohne Ton	7,5
ш		90 - 100	Ш		9	В	rauh, eben	1,5	ш	Kluftbelag dünn, wenig aktive						В	einzelne Scherzonen ohne Ton	5
	anni anni anni anni anni anni anni anni		ഥ	drei Kluftscharen	o	ш	glatt, eben	-		Tone, Chlorit, Talk, Gips	4					ч	wie E, aber Tiefe > 50 m	2,5
			Ŋ	drei Kluftscharen + zufällige	12	Ø		0,5	ш	Kluftfüllung dünn, Sand	4					O	total zerbrochener Fels	5
			I	vier Kluftscharen oder mehr	15		(c) ohne Felskontakt			stark überkonsolidierte Tone	9						(b) Spannungsprobleme	
A.L			ר	total zerbrochener Fels	20	Ι		T	т	wenig überkonsolidierte Tone	80					Ŧ	Spannung gering	2,5
						7	mit sandigem oder kiesiger		7	quellende Tone, z.B.	-					7	Spannung mittel	-
							Klufffüllung	-		Montmorillonit	8-12					¥	Spannung hoch	0.5-2
-										(c) ohne Felskontakt						٦	wenig Bergschlag	5-10
S. S									z	dicke Zonen, Sand	2					Σ	starker Bergschlag	10 - 20
	ALEXANDER PROPERTY AND A PROPERTY AN								О,Х	stark überkonsolidierte Tone	6 - 10						(c) Drückendes Gebirge	
-				***************************************					L,P	wenig überkonsolidierte Tone	8 - 13					z	geringer Druck	5-10
***************************************									M,	quellende Tone, z.B.						0	starker Druck	10 - 20
, management		-								Montmorillonit	12 - 20		***************************************				(d) Quellendes Gebirge	
																۵	geringer Quelldruck	5-10
-																œ	hoher Quelldruck	10 - 15
		-			1	1												

Tab. 2: Leitziffern für die Berechnung der Gebirgsqualitätszahl Q. Nach Barton et al. 1974, vereinfachte Zusammenfassung von Tabelle 1.

- RQD = Rock Quality Designation nach J. Deere (1963), definiert als Prozentanteil von Bohrkernstücken grösser als 10 cm an der totalen Bohrlänge in einer bestimmten Schicht. Variation zwischen 10 und 100 %.
- J_n = <u>Joint set number</u> <u>Kluftsysteme</u> Mit Leitziffern zwischen 0.5 und 20 werden Gebirgstypen von "massiv, nur wenig Klüfte" über Typen mit einem bis mehreren ausgeprägten Kluftsystemen bis zu vollständig zertrümmerten Kakiriten und Kataklasiten beschrieben.
- J_r = <u>Joint roughness number</u> <u>Kluftrauhigkeit</u> Mit Leitziffern zwischen 4 und 0.5 werden Kluftflächen beschrieben, die von nicht zusammenhängenden über rauhe und unregelmässige bis zu glatten Flächen reichen.
- J_a = <u>Joint alteration number Kluftverwitterung</u> Mit Leitziffern zwischen 0.75 bis 20 werden von verheilten über wenig bis stark verwitterte bis zu mit dicken Tonlagen gefüllte Klüfte beschrieben.
- $J_{w} = \underbrace{\begin{array}{c} \underline{\text{Joint water reduction factor}} \\ \text{Mit Leitziffern zwischen 1 und 0.05 werden Kluftsysteme ohne Wasser bis} \\ \text{zu Systemen mit extrem hohen Wasserdrücken oder Wassereinströmungen beschrieben.} \end{array}}$
- SRF = Stress Reduction Factor
 Mit Leitziffern von 0.5 bis 10 werden Schwächezonen im Gebirge, die durch den Ueberlagerungsdruck zerstört werden oder zu Bergschlag führen können, beschrieben. Leitziffern bis 20 charakterisieren quellfähige Felsschichten.

Die Felsqualität Q wird aus den Leitziffern wie folgt berechnet:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$
 (1)

Sie variiert zwischen 0.001 für vollständig gebräches, quellendes Gebirge bis zu 1000 für sehr harten, gesunden, praktisch nicht geklüfteten Fels.

Bei den dargestellten Beispielen (s. Tabelle 4) variiert der Wert Q zwischen 0.075 für Molassemergel und 90 für sehr harten Basalt.

3. Die Festigkeit von Fels und Gebirge nach Hoek

Zwischen 1980 und 1994 haben Dr. E. Hoek und seine Mitarbeiter Vergleichsversuche und Berechnungen ausgeführt, um mit Hilfe der von Barton vorgeschlagenen Felsqualitäts-Zahl Q, der einaxialen Druckfestigkeit σ_{ci} des intakten Felsens und einigen zusätzlichen Parametern die Druck- und Scherfestigkeit des Gebirges abzuschätzen.

Die Felsqualität Q charakterisiert dabei wie in Kap. 2 dargestellt vor allem die Gefügeeigenschaften, d.h. den Einfluss von Schichtung, Klüftung, Anzahl von Kluftsystemen, Oberflächeneigenschaften der Klüfte und Kluftbeläge, sowie Kluftwasser- und Spannungseinflüsse.

Die Felsqualitätszahl Q kann, wie erwähnt, in einem sehr grossen Bereich variieren, was für Vergleiche nicht praktisch ist. Daher wurde ein neuer, auf Q basierender Wert GSI (Geological Strength Index) eingeführt, welcher von ca. 10 für

sehr schlechtes Gebirge bis 100 für intakten Fels variiert. Er ist nach Hoek et al. (1994) wie folgt definiert:

$$GSI = 9 \cdot ln Q + 44 \tag{2}$$

Beispiel: weicher Mergel O = 0.02GSI = 9Molassesandstein Q = 0.4GSI = 36Q = 50GSI = 79Granit Basalt O = 200GSI = 92

Die einaxiale Druckfestigkeit σ_{ci} charakterisiert die Festigkeitseigenschaften des intakten Felsens. Da der Druckversuch an Bohrkernen relativ einfach und billig auszuführen ist, gibt es hier eine sehr grosse Menge von Erfahrungen und Messungen. Die Resultate wurden für die Auswertungen auf einen Bohrkerndurchmesser von 50 mm umgerechnet.

Die Parameter m_i, s und a charakterisieren das Bruchverhalten des Gebirges. Hoek benützt die Bruchtheorie von Griffith und passt das Bruchkriterium wie folgt an (Hoek-Brown-Bruchkriterium):

$$\sigma_{1}' = \sigma_{3}' + \sigma_{ci} \left[m_{b} \cdot \frac{\sigma_{3}'}{\sigma_{ci}} + s \right]^{a}$$
(3)

 σ₁' = grössere effektive Hauptspannung im Gebirge bei Bruch
 σ₃' = kleinere effektive Hauptspannung im Gebirge bei Bruch
 σ_{ci} = einaxiale Druckfestigkeit des intakten Felsens
 m_b = Materialkonstante für das Gebirge (Abminderungsparameter) = grössere effektive Hauptspannung im Gebirge bei Bruch

s a } = Konstanten für die Form der Bruchlinie, abhängig von den Eigenschaften des Gebirges

Auf Grund der zur Verfügung stehenden Literatur, z.B. Bieniawski (1976) und von eigenen Vergleichswerten hat Hoek folgende Werte für die drei Parameter angegeben (Hoek et al. 1994):

$$m_b \approx m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28}} \tag{4}$$

m_i = Materialkonstante für den intakten Fels, s. Tabelle 3

für GSI
$$\geq 25$$
 s $\approx e^{\frac{GSI-100}{9}}$ Verschiebung (5)

$$a \approx 0.5$$
 Exponent (6)

$$f \ddot{u} r G S I < 25$$
 $s \approx 0$ Verschiebung (5a)

$$a \approx 0.65 - \frac{GSI}{200}$$
 Exponent (6a)

Aus den Hauptspannungen σ_1 ' und σ_3 ' im Bruchzustand können die Spannungen σ_n und τ für die Bruchlinie berechnet werden:

$$\sigma_{n} = \sigma_{3}' + \frac{\sigma_{1}' - \sigma_{3}'}{\delta \sigma_{1}' / \delta \sigma_{3}' + 1} \tag{7}$$

$$\tau = \left(\sigma_{n} - \sigma_{3}'\right) \sqrt{\frac{\delta \sigma_{1}'}{\delta \sigma_{3}'}} \tag{8}$$

Dabei bedeuten:
$$\frac{\delta \sigma_1}{\delta \sigma_3} = 1 + \frac{m_b \cdot \sigma_c}{2 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)}$$
Für GSI < 25
$$\frac{\delta \sigma_1}{\delta \sigma_3} = 1 + a \cdot m_b^a \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c}\right)^{a-1}$$

	Sedimente			Metamorphe Gesteine			Eruptivgesteine	
		mi			mi			mi
Klastische Sedimente	Nagelfluh	(22) *)	nicht geschiefert	Marmor	9	Ergussgesteine hell	Obsidian	(19)
	Sandstein	19		Hornfels	(19)		Andesit	19
	Siltstein	9		Quarzit	24		Dacit	(17)
	Tonstein + Mergel	4	leicht geschiefert	Migmatit	(30)		Rhyolit	(16)
	Grauwacke	(18)		Amphibolit	31	Ergussgesteine dunkel	Basalt	(17)
Karbonatgesteine	Kalkbrekzie	(20)		Mylonit	(6)	Tiefengesteine hell	Granit	33
	Kalksparit (grobkörnig)	(10)	stark geschiefert **)	Gneis	33		Granodiorit	(30)
	Kalkmikrit (feinkörnig)	8		Glimmerschiefer	(10)		Diorit	(28)
Chemische Sedimente	Gips	16		Phyllit	(10)	Tiefengesteine dunkel	Gabbro	27
	Anhydrit	13		Tonschiefer	9		Norit	22
	Kreidegestein	7				Pyroklastische Gesteine	Agglomerat	(20)
Organische Sedimente	Kohle	(8-21)					Brekzie	(18)
							Tuff	(15)

^{*)} Zahlen in Klammern: geschätzte Werte

Tab. 3: Berechnung der Gebirgs-Parameter nach Hoek. Materialkonstanten m_i für verschiedene Felsarten.

Da die Bruchlinien des Griffith-Kriteriums gekrümmte Linien sind, ist es vorteilhaft, einen vernünftigen Spannungsbereich auszuwählen und mit Hilfe von linearer Regressionsrechnung über diesen Bereich eine gerade Bruchlinie mit einer Kohäsion c_m und einem Reibungswinkel Φ_m zu berechnen.

Mit Hilfe dieser Werte kann sodann auch eine mittlere Druckfestigkeit des Gebirges (compressive strength of rock mass)

$$\sigma_{cm} = \frac{2 \cdot c_{m} \cdot \cos\Phi_{m}}{1 - \sin\Phi_{m}} \tag{9}$$

berechnet werden, welche direkt mit der Druckfestigkeit des Gesteins σ_{ci} verglichen werden kann. Das Verhältnis σ_{ci} / σ_{cm} variiert in den in Kapitel 5 dargestellten Beispielen von 50 beim schlechtesten bis 1.5 beim besten Material.

Diese Zahlen zeigen deutlich, dass eine Schätzung von irgendwelchen Abminderungsfaktoren sehr problematisch ist und zu grossen Fehleinschätzungen führen kann.

Aus den Vergleichsversuchen ging ferner ein approximativer empirischer Zusammenhang zwischen dem Geological Strength Index GSI und einem mittleren Verformungsmodul des Gebirges E_m hervor. Eine statistische Auswertung vieler Versuche ergab folgende Näherungsformel:

$$E_{m} \approx 10^{\frac{GSI - 10}{40}} \tag{10}$$

^{**)} Versuche senkrecht zur Schieferung

Auch hier ist das Verhältnis zwischen dem E-Modul des intakten Felsens und des Gebirges beträchtlich. In den Beispielen des Kapitels 5 variiert es schätzungsweise zwischen 100 und 500. Eine Abschätzung von Felsdeformationen wird mit den reduzierten Werten von E_m nach der erwähnten Formel wesentlich realistischer. Bei der Anwendung dieser durchschnittlichen Felskennwerte ist es natürlich unumgänglich, die gesamte Struktur des Gebirges im betrachteten Bereich einzubeziehen. Fällt z.B. bei einer Stabilitätsrechnung eine grössere Kluft oder Störung ungefähr parallel zu den untersuchten Gleitflächen, dann dürfen die hier errechneten durchschnittlichen Felskennwerte nicht verwendet werden.

4. Abschätzung der Genauigkeit mit probabilistischen Methoden

Die Eingabegrössen der in den Kapiteln 2 und 3 dargestellten halbempirischen Berechnungsmethode sind nicht sehr genau, da es sich mit Ausnahme der Fels-Druckfestigkeit σ_{ci} , um visuell bestimmte, d.h. nach Ermessen geschätzte Zahlen handelt. Alle Grössen können als "unscharf definierte Grössen" nach Prof. Jörg Schneider betrachtet werden (Schneider J. 1994).

In diesem Artikel wird die Streuung der Eingabedaten durch insgesamt fünf Variationskoeffizienten (V = Standardabweichung / Mittelwert) erfasst. Die V-Werte müssen entweder geschätzt oder aus Reihen von mindestens 10 Bestimmungen statistisch errechnet werden.

Eingabe:

$$V\left(\frac{RQD}{J_n}\right) \tag{11a}$$

$$V\left(\frac{J_{r}}{J_{a}}\right) \tag{11b}$$

$$V\left(\frac{J_{w}}{SRF}\right) \tag{11c}$$

$$V \left(\sigma_{ci}\right) \tag{11d}$$

$$V (m_i)$$
 (11e)

Mit Hilfe der Näherungsmethode "Punkt-Abschätzungsmethode nach Rosenblueth" (s. Harr 1987) können aus diesen Eingabe-Variationskoeffizienten die Streuungen, d.h. die Variationskoeffizienten der Berechnungsresultate näherungsweise ermittelt werden.

Qualitätszahl Q	V(Q)	(12a)
Geological Strength Index GSI	V (GSI)	(12b)
E-Modul	$V(E_m)$	(12c)
einaxiale Druckfestigkeit des Gebirges	$V(\sigma_{cm})$	(12d)
Reibungswinkel	$V\left(\Phi_{m}\right)$	(12e)
Kohäsion	$V(c_m)$	(12f)

Tabelle 5 stellt ein von mir entwickeltes Berechnungsblatt im Tabellenrechnungsprogramm EXCEL dar, auf welchem der Berechnungsgang mit den Formeln (1) ... (11) nach Barton et al. (1974) und nach Hoek + Brown (1982) und Hoek (1994), so-

Beispiel Nr.		1			2			3			4			5			9			7	1	Einheit
	Molassem	Molassemergel Combette	ette	Molasse G	Molasse GF Combette		Molasse GD Com	D Combette		Molassesan	Molassesandstein Stettlen		Malmkalk Jura	ura	-	Aaregranit			Basalt	***************************************	***************************************	***************************************
	Mittel	Std.Abw.	Var.Koeff.	Mittel	Std.Abw.	Var.Koeff.	Mittel	Std.Abw.	Var.Koeff.	Mittel	Std.Abw.	Var.Koeff.	Mittel	Std.Abw.	Var.Koeff.	Mittel	Std.Abw.	Var.Koeff.	Mittel	Std.Abw.	Var.Koeff.	
Eingabe																					***************************************	***************************************
RQD=	30		0,20	15		0,20	50		0,20	10		0,15	80		0,10	95		0,10	100	***************************************	0,10	***************************************
= U)	80			12			10			9			က			2			-		-	
-J.	4		0,10	-		0,20	1,5		0,10	1,5		0,10	3		0,10	4		0,10	4	***************************************	0,10	
= aL	10			5			1,5			9			2			-		***************************************	0,75	***************************************		***************************************
= MC	0,5		0,15	0,5		0,15	6,0		0,15	-		0,15	99'0		0,15	99'0	***************************************	0,15	-		0,15	-
SRF =	10			2,5			2,5			2,5			2,5		***************************************	2,5			2,5			NAMES OF TAXABLE PARTY OF TAXABLE PARTY.
sig ci =	3,5	***************************************	0,15	4,5		0,15	6,5		0,15	က		0,15	100		0,15	300		0,15	400		0,15	MN/m2
= im	4		0,20	15		0,20	15		0,20	6		0,20	7		0,20	33	•••••	0,20	17		0,20	
Resultate	•																					
= Ø	0,075	0,020	0,272	0,050	0,016	0,325	1,000	0,272	0,272	0,333	6/0'0	0,237	10,560	2,191	0,207	50,160	10,408	0,207	213,333	44,265	0,207	
= IS9	20,4	2,4	0,120	16,6	2,9	0,176	43,7	2,4	0,056	33,9	2,1	0,063	0'59	1,9	0,029	79,0	1,9	0,024	92,1	1,9	0,020	
Em=	1,833	0,258	0,141	1,480	0,249	0,168	7,015	686'0	0,141	3,979	0,487	0,122	23,879	2,565	0,107	53,531	5,751	0,107	113,325	12,174	0,107	MN/m2
sig_cm =	0,064	0,015	0,232	0,138	0,035	0,255	0,535	0,111	0,207	0,158	0,033	0,210	14,76	3,19	0,216	102,13	22,01	0,216	243,09	53,16	0,219	MN/m2
= m_ihq	20,3	2,4	0,119	29,5	2,8	960'0	39,3	2,2	0,056	32,2	2,2	0,067	36,8	2,4	0,064	\$2,3	2,0	760,0	48,9	2,4	0,049	0
tan phi_m =	0,370	0,048	0,129	0,566	0,065	0,116	0,820	0,065	0,079	0,630	0,053	0,084	0,747	0,064	980'0	1,390	0,103	0,074	1,146	960'0	0,084	***************************************
= m_2	22,0	4,8	0,218	40,0	9,4	0,235	126,4	25,8	0,204	43,6	0,6	0,206	3700,3	815,4	0,220	16459,5	3597,5	0,219	45626,9	10467,1	0,229	kN/m2
Beurteilung	extremely poor	poor		extremely poor	000r		poor			very poor			pood			very good			extremely good	p		

Tab. 4: Zusammenstellung von Beispielen von 7 Gebirgstypen. Gebirgsfestigkeiten.

wie die Variationskoeffizienten aller Resultate mit Hilfe der Punktabschätzungsmethode nach Rosenblueth (Harr 1987) ausgeführt wird.

Dieses Verfahren ist eine relativ einfache Näherungsmethode, die aber gegenüber genaueren Methoden den Vorteil hat, dass sie direkt in einer Tabellenrechnung verwendet werden kann. Sie ist für Abschätzungen der hier beschriebenen Art meist weitaus genügend genau. Exaktere Methoden sind z.B. im Programm VaP des Instituts für Baustatik und Konstruktion an der ETHZ (Schneider J. 1994) verfügbar und können für kritische Fälle zur Kontrolle dienen.

In Tabelle 5 ist als Muster das 4. Beispiel der Tabelle 4 gezeigt:

Block A: Hier werden die Eingabedaten für die Berechnung des Q-Werts nach Barton eingegeben.

Block B: Eingabe der Variationskoeffizienten für die Ausdrücke

$$\frac{\text{RQD}}{J_n}$$
, $\frac{J_r}{J_a}$, $\frac{J_w}{\text{SRF}}$

Block C: Eingabe der einaxialen Druckfestigkeit des intakten Felsens σ_{ci} , der Materialkonstanten des intakten Felsens m_i (s. Tabelle 3) und der zugehörigen Variationskoeffizienten.

Block D: Ausgabe der Resultate. m_b, s und a sind die Parameter der Hoek-Brown'schen Gleichung [Gl. (3)].

Für die eigentlichen Berechnungsresultate sind neben Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient = Standardabweichung / Mittelwert auch die zu erwartenden Grenzen A und B angegeben.

Block E: Definitionen und Einheiten

Block F: Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Reibungswinkel $\Phi_{\rm m}$ und Kohäsion $c_{\rm m}$.

Die in Block F dargestellten Betaverteilungen können symmetrisch oder unsymmetrisch sein. Sie gehen von Grenze A bis Grenze B und erlauben, die Wahrscheinlichkeit für das Ueber- oder Unterschreiten vorgegebener Werte abzuschätzen.

5. Beispiele

5.1 Felskennwerte

Zur Illustration wurden in Tabelle 4 sieben typische Beispiele zusammengestellt.

Beispiele 1 bis 3 stammen aus einer Hangstabilitätsuntersuchung an der N1, Umfahrung Murten. Die Resultate sind im nachfolgend dargestellten Problem 1 (Fig. 1) verwendet worden.

Beispiel 4 diente zur Beurteilung eines Baugrubenaushubs oberhalb Stettlen bei Bern (Problem 2, Fig. 2).

Die Beispiele 5, 6 und 7 wurden zur Illustration von guten bis sehr guten Gebirgstypen zusammengestellt.

Tunnelling Quality Index (Barton 1974 + 1994)

BLOCK A: INPUT DATA BARTON		mean
Rock Quality Designation	RQD =	10
Joint set number	Jn =	6
Joint roughness number	Jr =	1.5
Joint alteration number	Ja =	3
Joint water reduction factor	Jw =	1
Stress reduction factor	SRF =	2.5

Q = (RQD / Jn) * (Jr / Ja) * (Jw / SRF)

E. Hoek (1994), Strength of rock and rock masses

ISRM News Journal, Vol 2, Nr 2

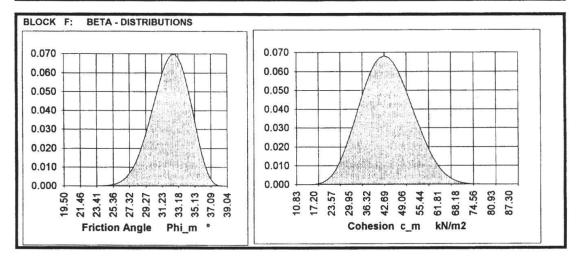
BLOCK B: INPUT C	OEFFICIENTS OF	VARIATIO	N V
			٧
Block size	RQD / Jn =	1.67	0.15
Inter-block friction	Jr / Ja =	0.50	0.10
Active stresses	Jw/SRF=	0.40	0.15

Rock mass Quality

Q = 0.333

		٧
Strength of intact rock MN/m2 sig_o	ci = 3	0.15
	- 1	

BLOCK D: RI	ESULTS					BLOCK	E: DEFINITIONS AND UNITS	
Output	mean	Std.dev.	٧	limits		sig1 =	major principal effective stress at failure	kN/m2
				Α	В	sig3 =	minor principal effective stress at failure	kN/m2
mb/mi =	0.094					sig_ci =	uniaxial compressive strength of the intact rock	MN/m2
mb=	0.859					GSI =	Geological Strength Index	
s =	0.0007							
a =	0.500					mi =	material constant for intact rock	
Q =	0.333	0.079	0.237	0.071	0.911	mb =	material constant for rock mass	
GSI =	33.9	2.1	0.063	20.1	43.2	s =	constant for rock mass	
Em =	3.98	0.49	0.122	1.79	6.75	a =	exponential constant for rock mass	1
sig_cm =	158.2	33.3	0.210	30.6	379.8	Em =	insitu deformation modulus of rock mass	MN/m2
ph_m =	32.2	2.2	0.067	19.5	39.0	sig_cm =	uniaxial compressive strength of rock mass	MN/m2
tan phi_m =	0.630	0.053	0.084	0.354	0.811	phi_m =	friction angle of rock mass	
c_m =	43.6	9.0	0.206	10.8	90.5	c_m =	cohesion of rock mass	kN/m2



Cell formulae:

```
mb/mi = EXP((GSI-100)/28)
   mb = mi*EXP((GSI-100)/28)
     s = IF(GSI>25 THEN EXP((GSI-100)/9) ELSE 0)
     a = IF(GSI>25 THEN 0.5 ELSE (0.65-GSI/200))
  Em = 1000*10^{((GSI-10)/40)}
  sig3 = sigci/2<sup>n</sup> where n starts at 10 and decreases by 1 for each subsequent cell
  sig1 = sig3 + sigci*(((mb*sig3)/sigci) + s)^a
ds1ds3 = IF(GSI>25 \ THEN \ 1 + (mb*sigci)/(2*(sig1-sig3)) \ ELSE \ 1 + (a*mb*a)*(sig3/sigci)^{(a-1)})
  sign = sig3+(sig1-sig3)/(1+ds1ds3)
   tau = (sign-sig3)*SQRT(ds1ds3)
```

signtau = sign*tau $signsq = sign^2$

 $phi_m = phi = (ATAN((sum(signtau)-(sum(sign)*sum(tau))/8)/(sum(signsq)-((sum(sign))^22)/8)))*180/PI()$

 $c_m = coh = (sum(tau)/8) - (sum(sign)/8)*TAN(phi*Pl()/180)$

sigcm = (2*coh*COS(phi*PI()/180))/(1-SIN(phi*PI()/180))

Tab. 5: Berechnungsblatt für die Abschätzung der Gebirgsfestigkeit. Beispiel 4 von Tabelle 4.

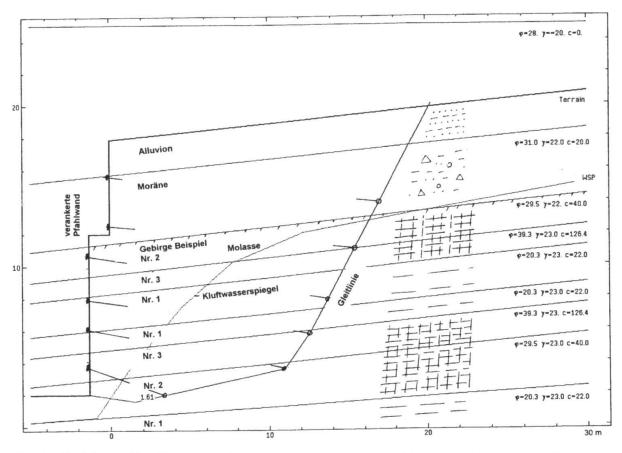


Fig. 1: Problem 1: N 1 Umfahrung Murten (Kt. Freiburg). Felssicherung mit Vorspannankern, Gesamtstabilität des verankerten Körpers. Gebirgstypen; Beispiele 1, 2 und 3 aus Tabelle 4.

5.2 Probleme

Problem 1 (s. Figur 1):

Für den Baugrubenaushub des Abschnitts Combette an der N1, Umfahrung Murten (Kanton Freiburg) war bei ca. km 136.800 eine verankerte Rühlwand zu dimensionieren, d.h. die Kräfte und freien Längen der Anker zu bestimmen. Die verwendeten Felskennwerte konnten mit einem Hangabschnitt etwas weiter westlich, bei ca. km 136.300, überprüft werden, wo vor dem Versetzen der Anker der Beginn von Rutschbewegungen festgestellt worden war (Sicherheit F = 1.0).

Mit Hilfe einer Rückrechnung konnten hier folgende mittleren Felskennwerte bestimmt werden:

$$\Phi_{\rm m} = 26^{\circ}$$
 (geschätzt)
 $c_{\rm m} = 40 \, {\rm kN/m^2}$ (aus Rückrechnung mit Annahme F = 1)

Beim in Fig. 1 dargestellten Problem ergaben sich die entsprechenden Kennwerte, nämlich ein Gewichtsmittel aus den Schichten 1 und 2, wie folgt:

$$\Phi_{\rm m} = 28^{\circ}$$

 $\epsilon_{\rm m} = 36 \, \text{kN/m}^2$ { (berechnet mit der Methode Hoek - Brown)

Die Werte berechnet nach dem Verfahren Hoek - Brown sind somit in diesem Beispiel in guter Uebereinstimmung mit einer Rückrechnung an einem Hang im gleichen Fels, der sich in labilem Gleichgewicht befand.

Für dieses Beispiel können die Felskennwerte und Stabilitätsrechnungsresultate wie folgt zusammengestellt werden:

Gebirge:			Gebirge Nr. ²⁾	Mittel- wert x _m	Standardab- weichung S	Charakteristi- scher Wert x _k	Teilsicher- heitsbeiwer γ	Bemes- sungswert x _d
Genereller Reibungswinkel	$\Phi_{\rm m}$	0	1	20	2.4	19	1.2	16
			2	30	2.8	28	1.2	24
			3	39	2.2	38	1.2	33
Generelle Kohäsion	c _m	kN/m ²	1	22	4.8	20	1.6	12
			2	40	9.4	35	1.6	22
			3	126	25.8	114	1.6	71
Raumgewicht		kN/m ³				23	1.0	23
Sicherheit F				1.61		1.49		1.17

2) Nummern entsprechen den Beispielen in Tabelle 4

Nach einem Vorschlag von Dr. H.R. Schneider, Zug (1990) wurden folgende Formeln und Werte verwendet:

– Mittelwert x_m:

Resultat der Berechnungen nach Tabellen 4 und 5

Charakteristischer Wert

 $x_k = x_m - 0.5 \cdot S$

- Teilsicherheiten γ.

empfohlen

 $\gamma(\sigma_{ci})$ = 1.6 $\gamma(\Phi_{m})$ = 1.2 (auf tan Φ_{m})

 $\gamma(c_m) = 1.6$ $\gamma(Raumgewicht) = 1.0$

- Bemessungswert:

 $= x_k / \gamma_X$

Die Sicherheit F wurde mit dem Stabilitätsrechnungsprogramm LARIX 2 gerechnet.

Problem 2 (s. Figur 2)

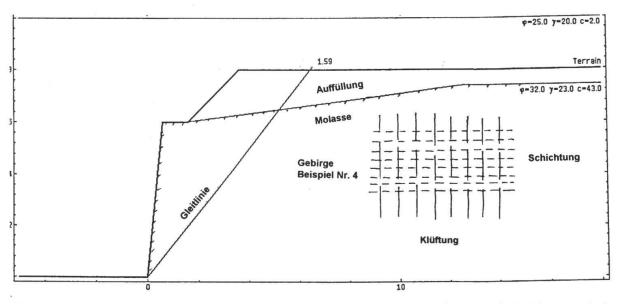


Fig. 2: Problem 2: Baugrubenaushub für Zweifamilienhaus in Stettlen, (Kt. Bern). Gebirgstyp: Beispiel 4 aus Tabelle 4

Für ein Zweifamilienhaus ob Stettlen (Worblental, Kanton Bern) ist ein Aushub im Molassefels vorgesehen. Anhand der Werte von Beispiel 4 aus Tabelle 4 und Figur 2 ist ein Aushub mit der Böschungsneigung 10:1 ohne Abstützung auf 6.5 m Höhe geplant.

Für dieses Beispiel können die Felskennwerte und die erhaltenen Stabilitätsrechnungsresultate wie folgt zusammengestellt werden:

Gebirge:			Mittel- wert x _m	Standardab- weichung S	Charakteristi scher Wert x _k	-Teilsicher- heitsbeiwert γ	Bemes- sungswert x _d
Druckfestigkeit of des Gebirges	5 _{cm}	kN/m ²	158	33	142	1.6	88
Genereller Reibungswinkel	Þ _m	0	32	2	31	1.2	27
Generelle c Kohäsion	C _m	kN/m ²	43	9	39	1.6	24
Raumgewicht		kN/m ³			23	1.0	23
Sicherheiten:							
Sicherheit F	7		1.59	0.3	1.48		1.02
Versagenswahr- p scheinlichkeit)	%	0.6				

Die Bezeichnungen sind gleich gewählt wie in Problem 1. Die Sicherheit F wurde ebenfalls mit dem Programm LARIX 2 gerechnet. Die Versagenswahrscheinlichkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Sicherheit F kleiner als 1 wird. Sie wurde mit Hilfe der Näherungsmethode von Rosenblueth aus einer Betaverteilung für F bestimmt.

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

6.1 Ziel

Geotechnische Untersuchungen von Fels ergeben i. allg. folgende Resultate:

- Petrographie, Druckfestigkeit, evt. Elastizitätsmodul von Proben des intakten Gesteins
- visuelle Beurteilung der Klüftung und Schichtung des Gesteins
- Angaben über die Grund- resp. Kluftwasserverhältnisse.

Für die Beurteilung von Bruchproblemen im Fels sind diese Angaben nicht direkt nutzbar. In jüngster Zeit sind in der Literatur aber Methoden bekannt geworden, die die Brücke zu schlagen versuchen zwischen den oben erwähnten erhältlichen Angaben und den für die Berechnungen nötigen Kennwerten des Gebirges, nämlich in erster Linie die Scherparameter Kohäsion c_m und Reibungswinkel Φ_m . Dabei wird unterschieden zwischen

- Kennwerten des intakten Felsens
- Kennwerten des Gebirges mit allen Diskontinuitäten

Letztere sind das Ziel der Untersuchungen.

6.2 Anwendung

Die erwähnten Methoden beruhen auf folgendem Lösungsweg:

- Darstellung der zur Verfügung stehenden Grössen durch total 8 Parameter, welche die Resultate der Untersuchungen wie folgt durch gemessene Grössen oder als visuell beurteilte Leitwerte (s. Tabellen 1 und 2) zu erfassen erlauben:
 - Die Klüftung und Schichtung des Gebirges durch die Leitwerte

RQD = Rock Quality Designation nach Deere (Qualität des Gesteins)

 J_n = Leitziffer für Kluftsysteme J_r = Leitziffer für Kluftrauhigkeit J_a = Leitziffer für Kluftverwitterung

J_w = Wasserfaktor SRF = Spannungsfaktor

Aus den 6 Leitwerten wird die Qualitätszahl des Gebirges Q und der Geological Strength Index (Festigkeitsindex) GSI des Gebirges errechnet.

- Die einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins σ_{ci} durch Druckversuche, meist an Bohrkernen. Es wird empfohlen, so viele Versuche durchzuführen, dass daraus statistisch Mittelwert und Standardabweichung bestimmt werden können. Sonst muss der Variationskoeffizient geschätzt werden.
- eine Kennzahl m; für die Petrographie des intakten Felsens.
- Mit Hilfe von vielen Feldbeobachtungen und Vergleichsrechnungen wurden die Zusammenhänge zwischen den Eingabegrössen GSI, σ_{ci} und m_i und den gesuchten Gebirgsparametern halbempirisch eruiert: (Hoek + Brown 1980, Hoek 1994)
 - ullet Scherparameter Φ_m und c_m
 - Gebirgs-Druckfestigkeit σ_{cm}
 - Verformungsmodul E_m
- Zusätzlich zu den von Barton und Hoek publizierten Ableitungen und Kennwerten wurde für jede Grösse eine Streuung (Variationskoeffizient V) geschätzt oder evt. berechnet. Dies erlaubt, die Streuung der Resultate E_m, σ_{cm}, Φ_m und c_m zu beurteilen, um so eine Idee von den möglichen Variationen der Resultate zu erhalten.

6.3 Schlussfolgerungen

Die dargestellten Methoden erlauben, aus den vorwiegend visuell festgestellten Angaben über Fels und Gebirge eine Abschätzung derjenigen Parameter zu erhalten, welche für felsmechanische Berechnungen benötigt werden. Das vorgelegte Berechnungsblatt gibt zusätzlich eine Schätzung für die zu erwartenden Streuungen der Werte. Diese kann als Grundlage für Parameteranalysen mit über oder unter dem Mittelwert liegenden Parameterwerten dienen. Die Methode gibt daher ein Hilfsmittel in die Hand, die wichtigen Parameter des Gebirges, nämlich den Verformungsmodul $E_{\rm m}$, die einaxiale Druckfestigkeit $\sigma_{\rm cm}$, den durchschnittlichen Reibungswinkel $\Phi_{\rm m}$ und die durchschnittliche Kohäsion $c_{\rm m}$ näherungsweise zu bestimmen.

Es muss aber betont werden, dass die Resultate dieser Parameter auf halbempirischem Weg gefundene *Schätzwerte* sind. Sie können für Vorprojekte oder kleinere Bauten mit geringem Risiko angewendet werden. Für grössere und risikoreiche

Bauwerke sind zusätzlich Versuche nötig, um die benötigten Parameter direkt zu bestimmen.

Es ist oft nicht möglich, eine statistisch genügende Zahl von Versuchen auszuführen. Hier kann das Theorem von Bayes weiterhelfen. Es erlaubt, Versuchswerte mit einer Vorinformation (a priori-Werte) auf statistisch optimale Weise zu verknüpfen. Als Vorinformation werden die mit der beschriebenen Methode erhaltenen Werte c_m und Φ_m mit ihren Streuungen eingesetzt. Man erhält dann als Resultat eine verbesserte Information (a posteriori-Werte), bei denen sowohl der Mittelwert wie auch die Streuung besser der Wirklichkeit entsprechen. Dieses Verfahren ist ebenfalls in (Schneider H.R. 1990) dargestellt, wo weitere Literaturangaben zu finden sind.

Damit ist das hier geschilderte Verfahren nach Barton - Hoek zur Abschätzung von Scherparametern des Gebirges ein Glied in einer Kette von Untersuchungen, die zu genaueren Werten der Parameter und damit zu günstigeren und sicheren Lösungen bei Scherproblemen im Fels führen können.

Literatur:

- BARTON N., LIEN R., LUNDE J., 1974: Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Supports. NGI Publication Nr. 106, Oslo.
- BIENIAWSKI Z.T., 1976: Rock mass classification in rock engineering. In: Exploration for rock engineering, proc. of the symp., (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106. Cape Town: Balkema.
- DEERE D.U., 1963: Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes. Felsmechanik und Ingenieurgeologie Vol. 1, Nr. 1, 16-22.
- HARR M.E., 1987: Reliability-Based Design in Civil Engineering. McGraw-Hill Book Company, New York.
- HOEK E. + Brown E.T., 1980: Underground Excavations in Rock. Institute of Mining and Metallurgy, revised 1982.
- HOEK E., 1994: Strength of Rock and Rock Masses. ISRM News Journal, Vol. 2 Nr. 2.
- HOEK E., KAISER P.K., BAWDEN W.F., 1994: Support of Underground Excavations in Hard Rock. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Lang H.-J. / Huder J., 1982: Bodenmechanik und Grundbau. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo. 4. Auflage 1990.
- LOCHER H.G., 1983: Probabilistische Methoden bei Stabilitätsproblemen in der Geotechnik. Schweiz. Ingenieur und Architekt 16/83, 429-434.
- LOCHER H.G., 1985: Anwendung probabilistischer Methoden in der Geotechnik. Schweiz. Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, Mitt. 112, 31-36.
- Schneider H.R., 1990: Die Wahl der Bodenkennwerte. SIA Dokumentation D 064: Anwendung der neuen Tragwerksnormen im Grundbau. 2. November 1990, 29-38.
- Schneider Jörg, 1994: Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen. Hochschulverlag AG an der ETH Zürich / B.G. Teubner Stuttgart.
- WITTKE W., 1984: Felsmechanik, Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. Springer Berlin Heidelberg New York Tokyo.