

**SEMINAR ZUR AUSBILDUNG VON QUALIFIZIERTEN
PLANUNGSINGENIEUREN FÜR TUNNEL
UND ERDBAUWERKE
2014**

DB Trainingszentrum Regensburg

- EINFÜHRUNG IN DIE FELSMECHANIK -

**Dipl.-Ing. Christian Spang
Dr. Spang GmbH**

Witten, Frankfurt, Freiberg, Esslingen, Nürnberg, Naumburg

09.10.2014



GLIEDERUNG

- 1. Programm**
2. Einleitung
3. Gesteinseigenschaften
4. Trennflächen
5. Gebirgseigenschaften
6. Spannungen im Gebirge
7. Bruchvorgänge im Gebirge / Gestein
8. Wasser im Gebirge
9. Gesteins- und Gebirgsklassifizierung



1. PROGRAMM

Thema: Einführung in die Felsmechanik

- Begrüßung
- Vorstellung Referent
- Stundenplan



Dipl.-Ing. Christian Spang



- 1997 – 2002 Studium des Bauingenieurwesens an der TU Karlsruhe, Vertiefung Konstruktiver Ingenieurbau und Grundbau
- 1999 – 2002 Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen (ISE) an der Universität Karlsruhe
- 2002 – 2006 Projektingenieur, Prof. Wittke Beratende Ingenieure für Grundbau und Felsbau GmbH, Aachen
- seit 2006 Geschäftsführer der Dr. Spang GmbH, Ingenieurbüro für Geotechnik mit 100 Mitarbeitern
- seit 2007 Lehrtätigkeit z.B. TAE Esslingen, DB Trainingszentrum, Straßen.NRW

Ausgewählte Projekte

- z.B. **Tunnelerneuerung**: Tunnel Nittel, DB Strecke 3010, Koblenz – Perl, Zustand und Geotechnik
- z.B. **Tunnel Neubau**: Tunnel Ostelsheimer Kurve, Planung – Güterzugtunnel Nürnberg, Geotechnik
- z.B. **Felseinschnitte**: Voreinschnitte Tunnel Marienhagen, Geotechnik
- z.B. „**Steinschlag**“: Mattinger Hänge im Donautal, DB Regensburg-Ingolstadt, Planung + Geotechnik
- z.B. **Felsgründung**: diverse Bauwerke VDE 8.1, ABS Nürnberg-Ebensfeld (Flach + Tiefgründungen)



LEHRSTOFF- UND STUNDENPLAN

Seminar zur Ausbildung von Qualifizierten Planungsingenieuren für Tunnel und Erdbauwerke 2014

TEIL 1: GRUNDLAGEN / TUNNELBAU 08.10.2014 - 24.10.2014

Datum	1. Std.	2. Std.	3. Std.	4. Std.	5. Std.	6. Std.	7. Std.	8. Std.	9. Std.	10. Std.	
	7:45 - 8:30	8:30 - 9:15	9:25 - 10:10	10:30 - 11:15	11:15 - 12:00	13:00 - 13:45	13:45 - 14:30	14:45 - 15:30	15:30 - 16:15	16:30 - 17:15	
Mittwoch 08.10.2014						Einführung: Müller, I.NVT 42	Baugrund: Geologie, Hydrologie Prof. Fecker, Ettlingen				
Donnerstag 09.10.2014	Baugrund: Bodenmechanik Prof. Neidhart, Regensburg				Baugrund: Felsmechanik Dipl.-Ing. Spang, Witten						Ab 16:30 Exkursion
Freitag 10.10.2014	Notfallmanagement Kruse, TQS 2		Betreiberverantwortung DB Zwanziger, CRI (N)								
Montag 13.10.2014						Geotechnische Untersuchungen und Messungen Prof. Fecker, Ettlingen					
Dienstag 14.10.2014	Geotechnische Untersuchungen und Messungen Prof. Fecker, Ettlingen					Einführung Tunnelbau Schuck, I.NVT 42		Standsicherheit (Neubau) Schuck, I.NVT 42			
Mittwoch 15.10.2014	Standsicherheit (bestehende Tunnel) Prof. Fröhlich, Limburg			Instandsetzung u. Wartung Prof. Fröhlich, Limburg							
Donnerstag 16.10.2014	Planung und Bau Spritzbetonbauweise Prof. Kirschke, Ettlingen										
Freitag 17.10.2014	Planung und Bau Spritzbetonbauweise Prof. Kirschke, Ettlingen										



1. PROGRAMM

Ziel der Vorlesung:

- **Einführung**, nicht Einübung von Entwurfs- oder Rechenroutinen
- Schaffung eines **generellen Verständnisses** für das mechanische Verhalten des Materials Fels, insbesondere im Hinblick auf dessen Besonderheiten.
- Bereitstellung des **Basiswissens für die nachfolgenden Vorlesungen** über Tunnelbau / Felsböschungen.
- „Schwerer“ Stoff, viel Theorie – Grundlagen, leider nicht vermeidbar....



GLIEDERUNG

1. Programm

2. Einleitung

3. Gesteinseigenschaften

4. Trennflächen

5. Gebirgseigenschaften

6. Spannungen im Gebirge

7. Bruchvorgänge im Gebirge / Gestein

8. Wasser im Gebirge

9. Gesteins- und Gebirgsklassifizierung



2. EINLEITUNG

2.1 Begriff, Anwendung

Felsmechanik ist die Lehre vom **mechanischen Verhalten** von Fels (im Sinne von Gebirge), analog zur Bodenmechanik

2.2 Aufgaben

- Grundlagenwissenschaft für den Felsbau, der die theoretischen Erkenntnisse der Felsmechanik in die Baupraxis umsetzt, speziell bei
 - Felsgründungen
 - Felsböschungen
 - Felshohlraumbau / Tunnelbau

-> Damit große, wirtschaftliche Bedeutung



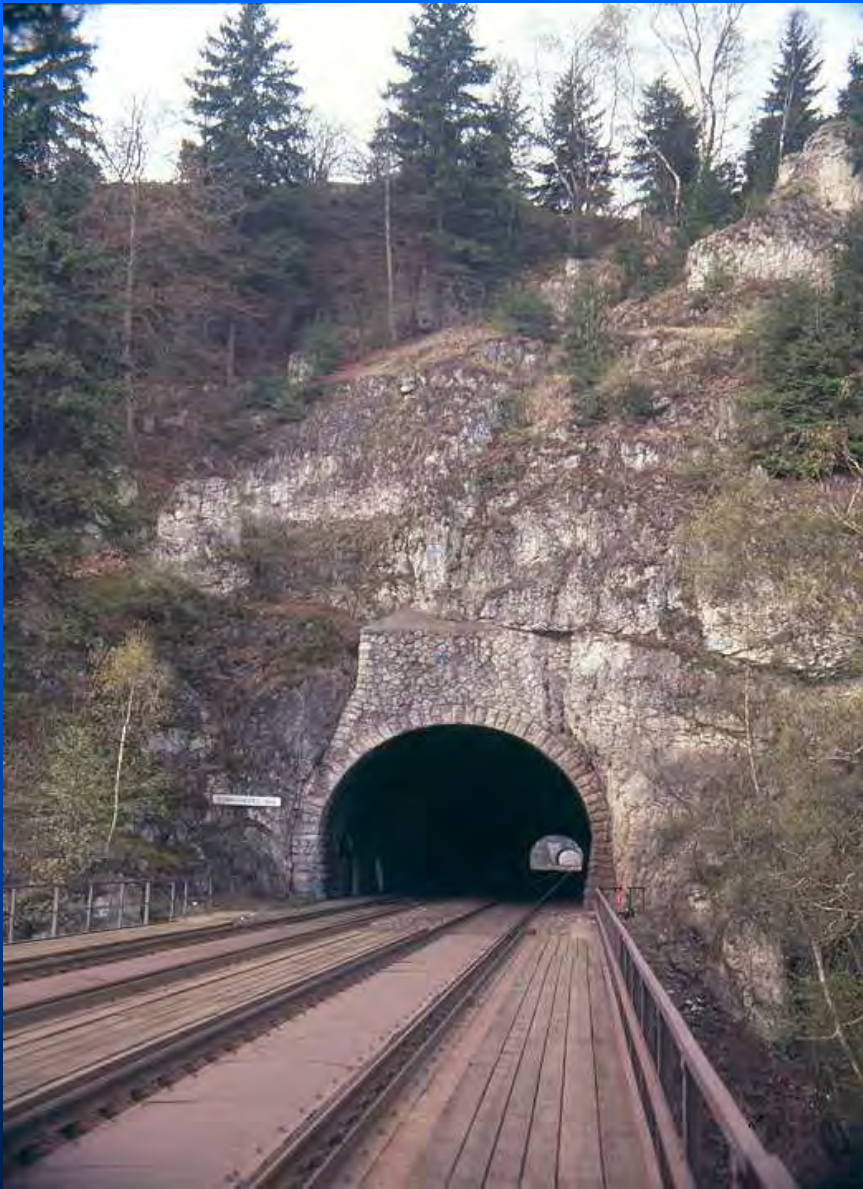
Felsmechanik....

- Mechanisches Verhalten der Festgesteine im natürlichen Zustand und **unter dem Einfluss von Baumaßnahmen** zu beschreiben und zu erklären
 - Berechnung des mechanischen Verhaltens von Festgesteinen zu ermöglichen
- Voraussetzungen für Entwurf und Bemessung im Felsbau zu schaffen**
- Fels als Baugrund
 - Fels als Baustoff
 - Zunächst als kleinste Einheit **Gesteins-/ Klufkörper** betrachtet;
 - **Gesteins- / Klufkörper** mechanisch ähnlich wie Beton, deshalb grundsätzlich gleicher Ansatz bei der Beschreibung der mechanischen Eigenschaften.















1. Veranlassung



1. Veranlassung









GLIEDERUNG

1. Programm
2. Einleitung
- 3. Gesteinseigenschaften**
4. Trennflächen
5. Gebirgseigenschaften
6. Spannungen im Gebirge
7. Bruchvorgänge im Gebirge / Gestein
8. Wasser im Gebirge
9. Gesteins- und Gebirgsklassifizierung



3. GESTEINSEIGENSCHAFTEN

3.1 Stoffliche Eigenschaften

3.1.1 Dichte und Wichte

Dichte (spez. Masse, bulk density)

- Formelzeichen ρ
- Definiert als Quotient aus Masse m und Volumen V

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [g/cm^3 \text{ bzw. } t/m^3]$$

- abhängig von Temperatur, Druck, Feuchtigkeit, Porosität, etc.

Analog zur Bodenmechanik werden Dichte der feuchten Probe, Dichte unter Auftrieb, Trockendichte und Dichte der wassergesättigten Probe verwendet.

- Versuche / Bestimmung nach Empfehlung ISRM Nr. 2



Wichte (spez. Gewicht)

- Definiert als Quotient aus Gewicht W und Volumen V

$$\gamma = \frac{m \cdot g}{V} = \frac{W}{V} \quad [kN/m^3]$$

- wobei $\gamma = g \cdot \rho$ (g = Erdbeschleunigung)
- „ γ “ soll *eigentlich* nach DIN 1306-2 nicht mehr verwendet werden, da wegen $g = f(x, y, z)$ im Gegensatz zur Dichte ortsabhängig.



Dichtebestimmung nach Empfehlung ISRM, Nr. 2, in folgenden Arbeitsgängen:

1) Volumenbestimmung

- Tauchwägung in Wasser
- direkte Messung (regelmäßige Proben)

2) Probe wird wassergesättigt im Vakuum

- 1 Stunde bei $p \leq 800 \text{ Pa}$
→ Wiegen der **gesättigten Probe** $\Rightarrow m_{\text{sat}}$

3) Probe ofengetrocknet bei 105° bis Gewichtskonstanz, nach Abkühlen im

Exsikkator → Masse der **trockenen Probe** $\Rightarrow m_s$

- Trockendichte: $\rho_d = \frac{m_s}{V}$

- Dichte der gesättigten Probe: $\rho_{\text{sat}} = \frac{m_{\text{sat}}}{V}$



3.1.2 Porosität (Porenvolumen, Porenanteil)

a) Porenanteil „ n “: Verhältnis des Porenvolumens zum Gesamtvolumen einer Probe

$$n = \frac{V - V_{\text{Feststoff}}}{V} = \frac{V_{\text{Poren}}}{V}$$

b) Porenvolumen „ V_p “: Differenz zwischen dem Gesamtvolumen V und dem Volumen der Festmasse „ V_f “;

$$V_p = V - V_f$$

c) Porenzahl „ e “: Verhältnis des Porenvolumens V_p zum Volumen der Festmasse der Probe

$$e = \frac{V - V_f}{V_f} = \frac{n}{1 - n} = \frac{V_{\text{Poren}}}{V_{\text{Feststoff}}}$$

Bestimmung zusammen mit der Dichte

$$V_p = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{\rho_w}$$

Mindestens 3 Proben \Rightarrow Mittelwert



Gestein	Dichte t/m ³	Porosität
Granit	2,6 - 2,9	0,5 - 1,5
Dolerit	2,7 - 3,05	0,1 - 0,5
Rhyolit	2,4 - 2,6	4 - 6
Andesit	2,2 - 2,3	10 - 15
Gabbro	2,8 - 3,1	0,1 - 0,2
Basalt	2,8 - 2,9	0,1 - 1,0
Sandstein	2,0 - 2,6	5 - 25
Tonstein	2,0 - 2,4	10 - 30
Kalkstein	2,2 - 2,6	5 - 20
Dolomit	2,5 - 2,6	1 - 5
Gneiss	2,8 - 3,0	0,5 - 1,5
Marmor	2,6 - 2,7	0,5 - 2
Quarzit	2,6 - 2,7	0,1 - 0,5
Tonschiefer	2,6 - 2,7	0,1 - 0,5

Typische Porositäten und Dichten von Gesteinen



3.1.3 Wassergehalt

- Einfluss auf Festigkeit / Verformbarkeit
- **Indikator** (!) für Verwitterungsgrad (in Sedimentgesteinen), Versuch ist günstig
- Definiert als Anteil des im Porenvolumen enthaltenen Wassers, bezogen auf die Feststoffmasse m_s

Bestimmung:

$$w_n = \frac{m - m_s}{m_s}$$

1. Wiegen (m)
2. Ofentrocknen bei 105°
3. Wiegen nach Abkühlen (m_s)



3.2 Mechanische Eigenschaften

3.2.1 Einaxiale Druckfestigkeit

$$\sigma = F / A$$

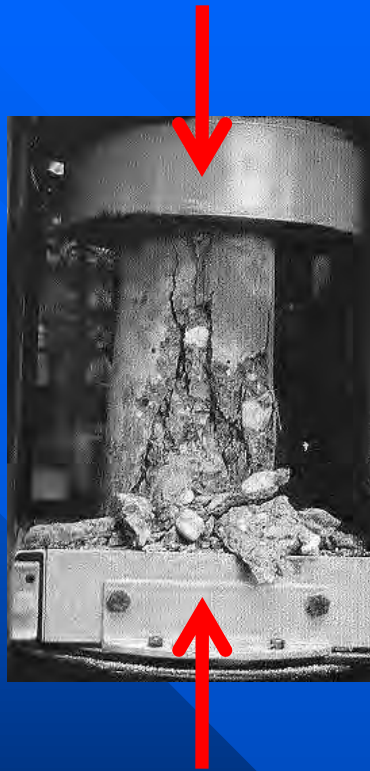
mit

F = Belastung

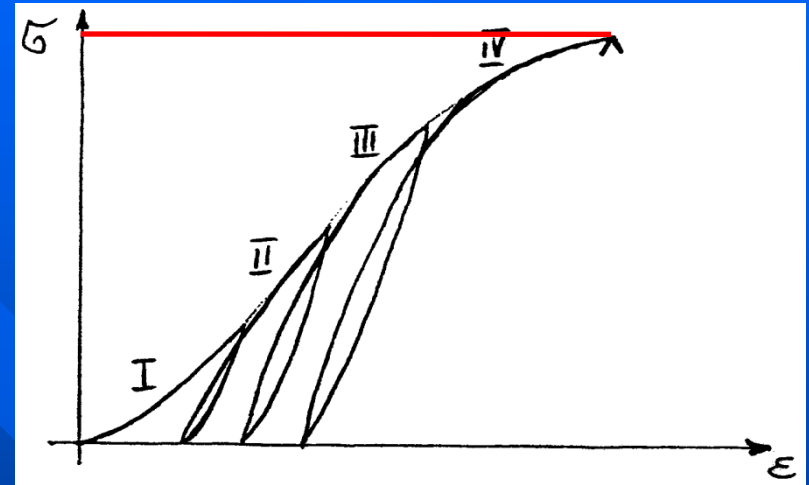
A = Fläche

$$F = p \cdot A_p$$

$$\sigma_B = \frac{\max F}{A_p}$$

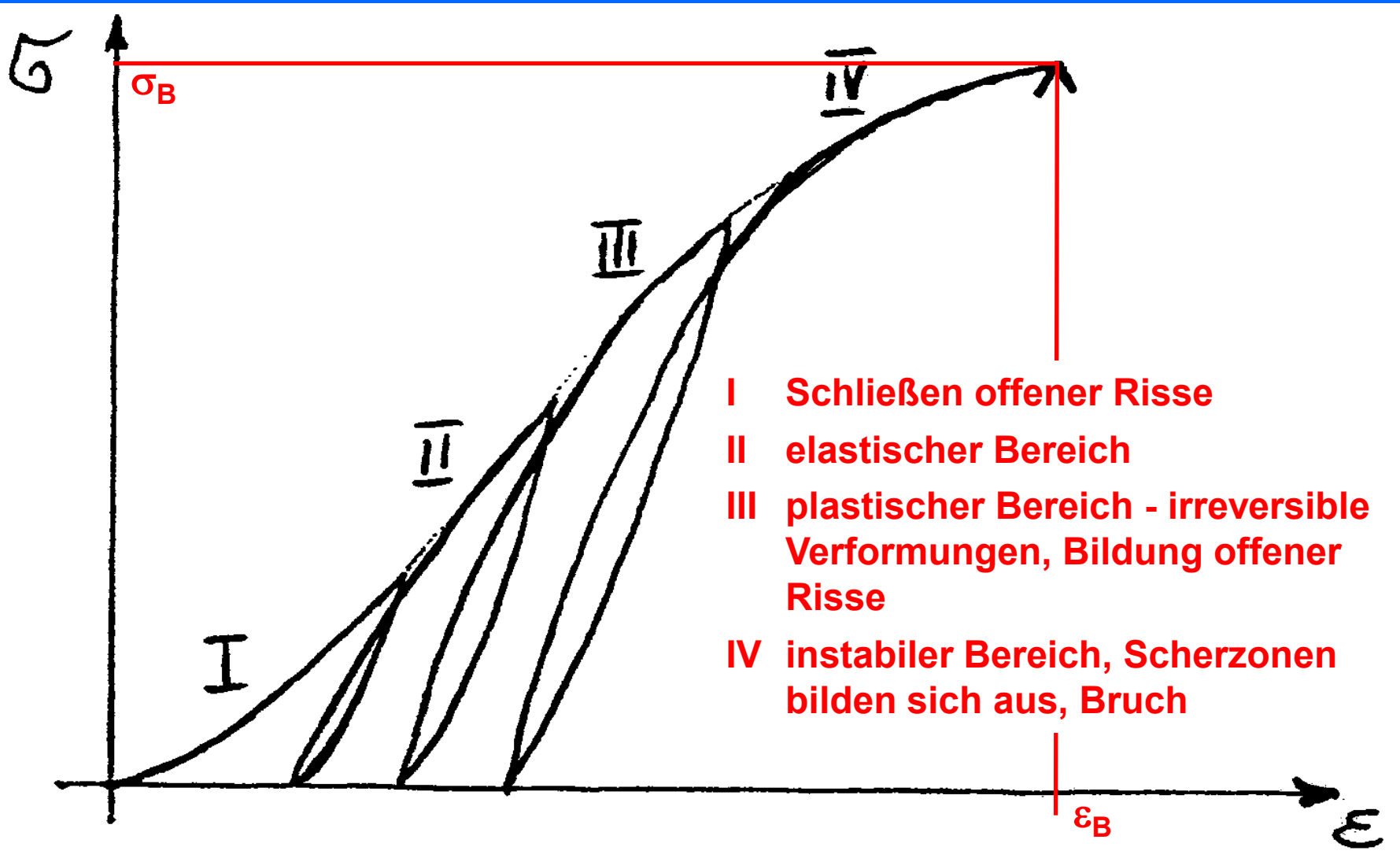


einfachste Art der Druckbeanspruchung



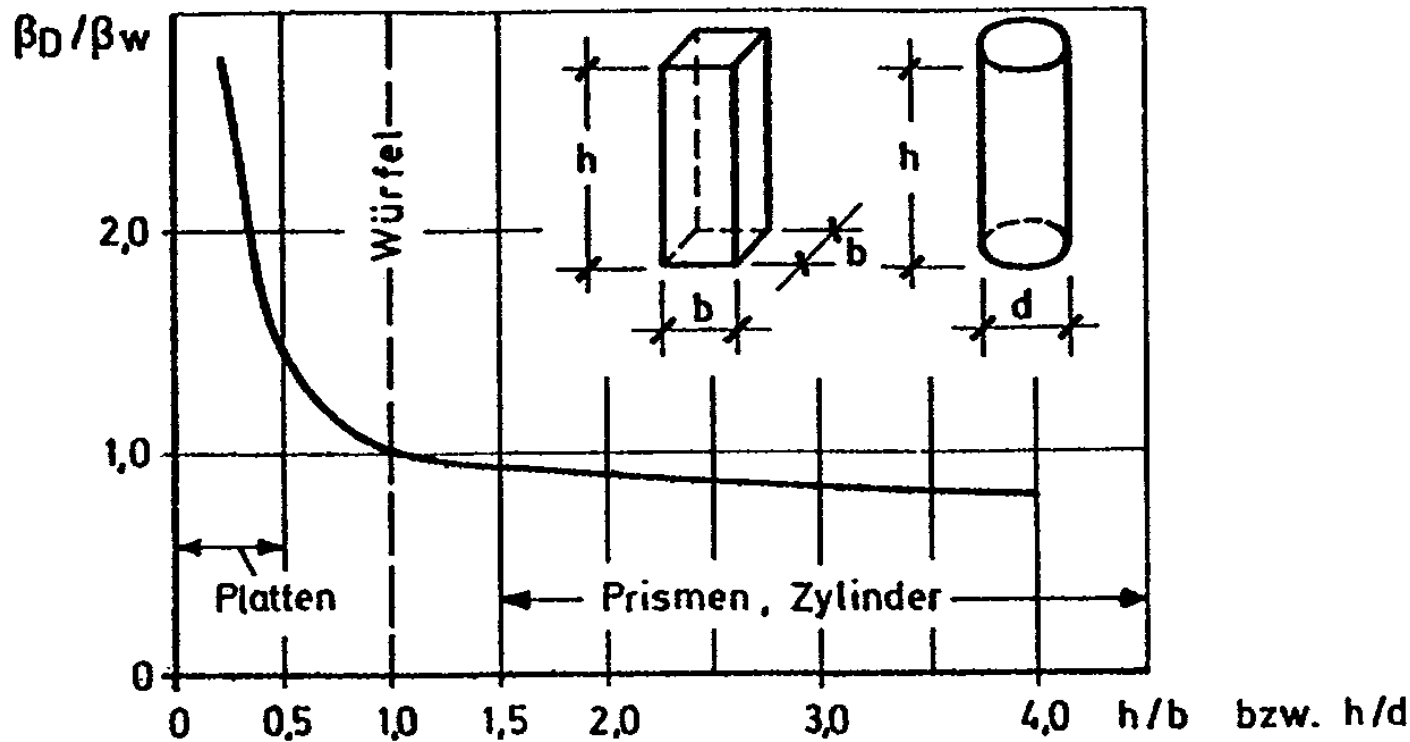
- zylindrische Proben mit $H/D = 2,5 - 3,0$ und $\varnothing 54$ mm (Empfehlung Nr. 1, DGGT), **Zylinderdruckfestigkeit**
- Würfel (DIN 52 105), **Würfeldruckfestigkeit**





typische Versuchskurve, einaxialer Druckversuch

einaxiale Druckfestigkeit (Gestein / Klufftkörper) ist keine Materialkonstante, sondern von zahlreichen Faktoren abhängig

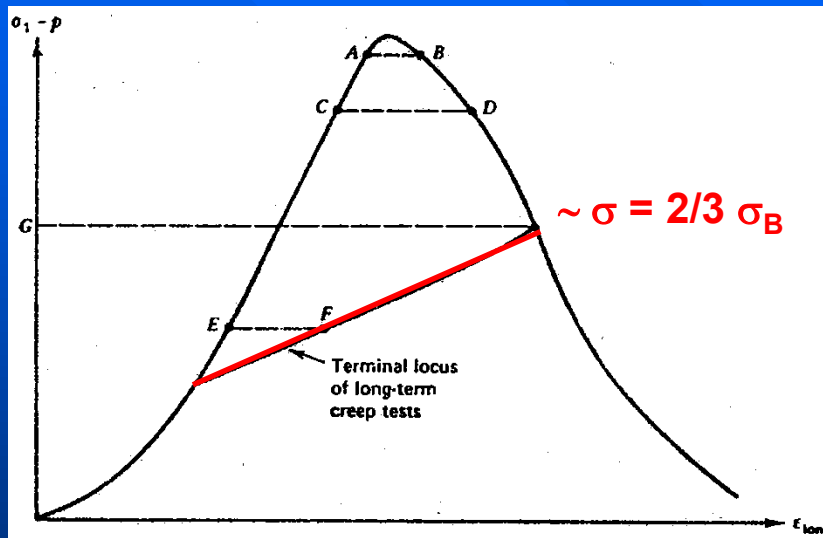


Verhältnis der Druckfestigkeit β_D prismatischer Körper zur Würfeldruckfestigkeit β_w in Abhängigkeit von der Schlankheit h/d bzw. h/b [25]

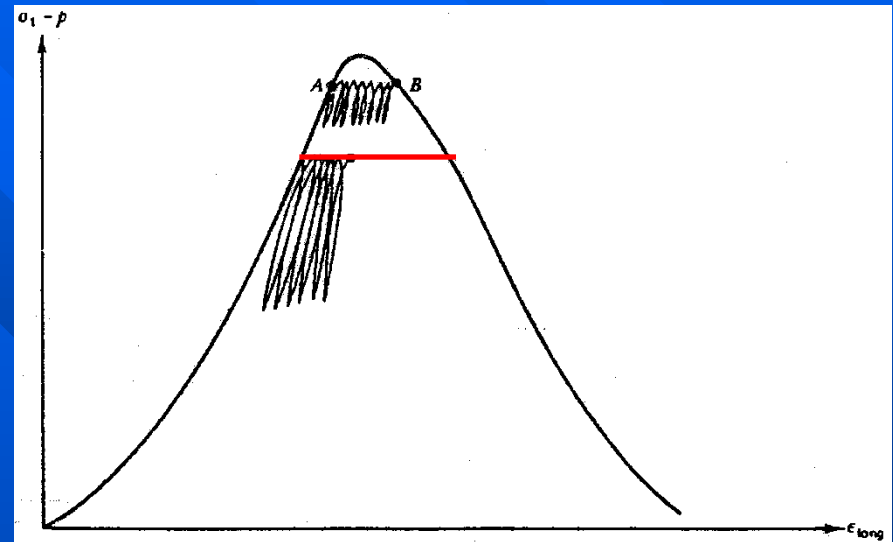
1. Form des Probekörpers

Kriechen und zyklische Belastung

→ komplette Spannungs-Verformungskurve lässt sich bei der Vorhersage des Bruches infolge Kriechens bzw. dynamischer Belastung verwenden



Kriechen in Bezug zur vollständigen Spannungs-Dehnungskurve



Effekt **zyklischer Belastung** in Bezug zur vollständigen Spannungs-Dehnungskurve



3.2.2 Dreiaxiale Druckfestigkeit

- Ermittelt im Triaxialversuch
- Prüfung zylindrischer Proben $H/D = 2,0 - 2,5$, $\varnothing = 35$ mm, mind. 10 x Einzeldurchmesser Größtkorn
- Prüfung in Triaxialzelle $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$
- meist zuerst hydrostatischer Druck, dann Deviatorspannung aufgebracht.

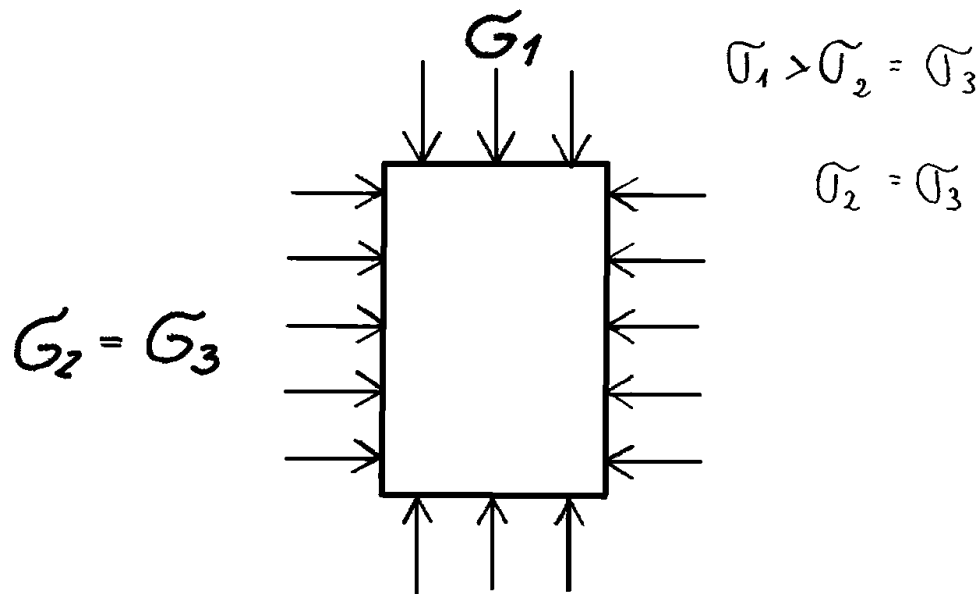
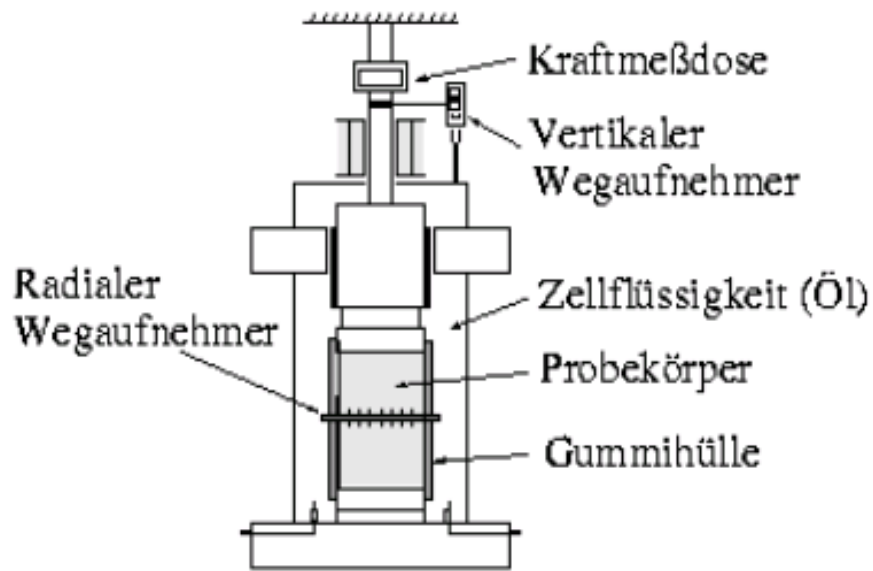
Versuchsdurchführung Empfehlung Nr. 2, DGGT

Mehrstufentechnik nach Empfehlung Nr. 12, DGGT

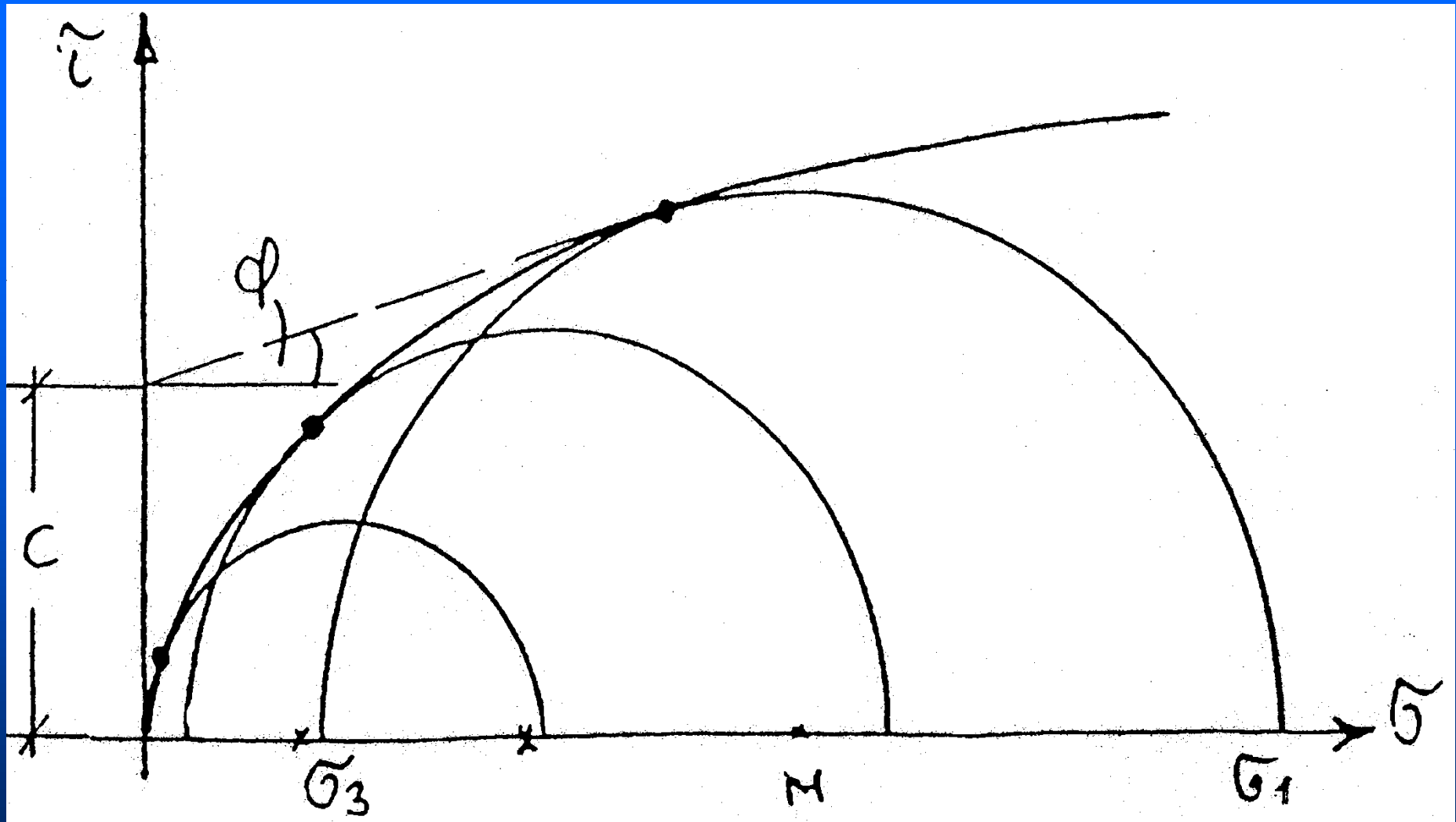
Mindestens 3 Versuche mit steigendem Manteldruck erforderlich; zweckmäßig 1 x unter, 1 x im Bereich und 1 x über den tatsächlichen Beanspruchungen des Gesteins; zu enge Schrittweite ergibt unvollständige Hüllkurve!

Triaxiale Beanspruchung ist Regelfall im Felsbau





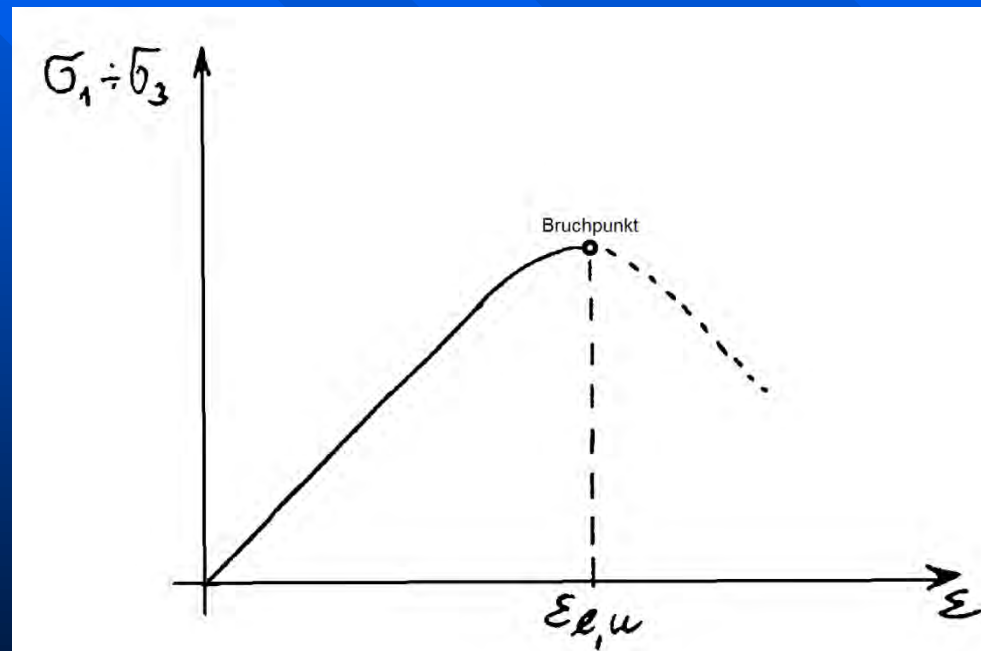
Triaxialzelle

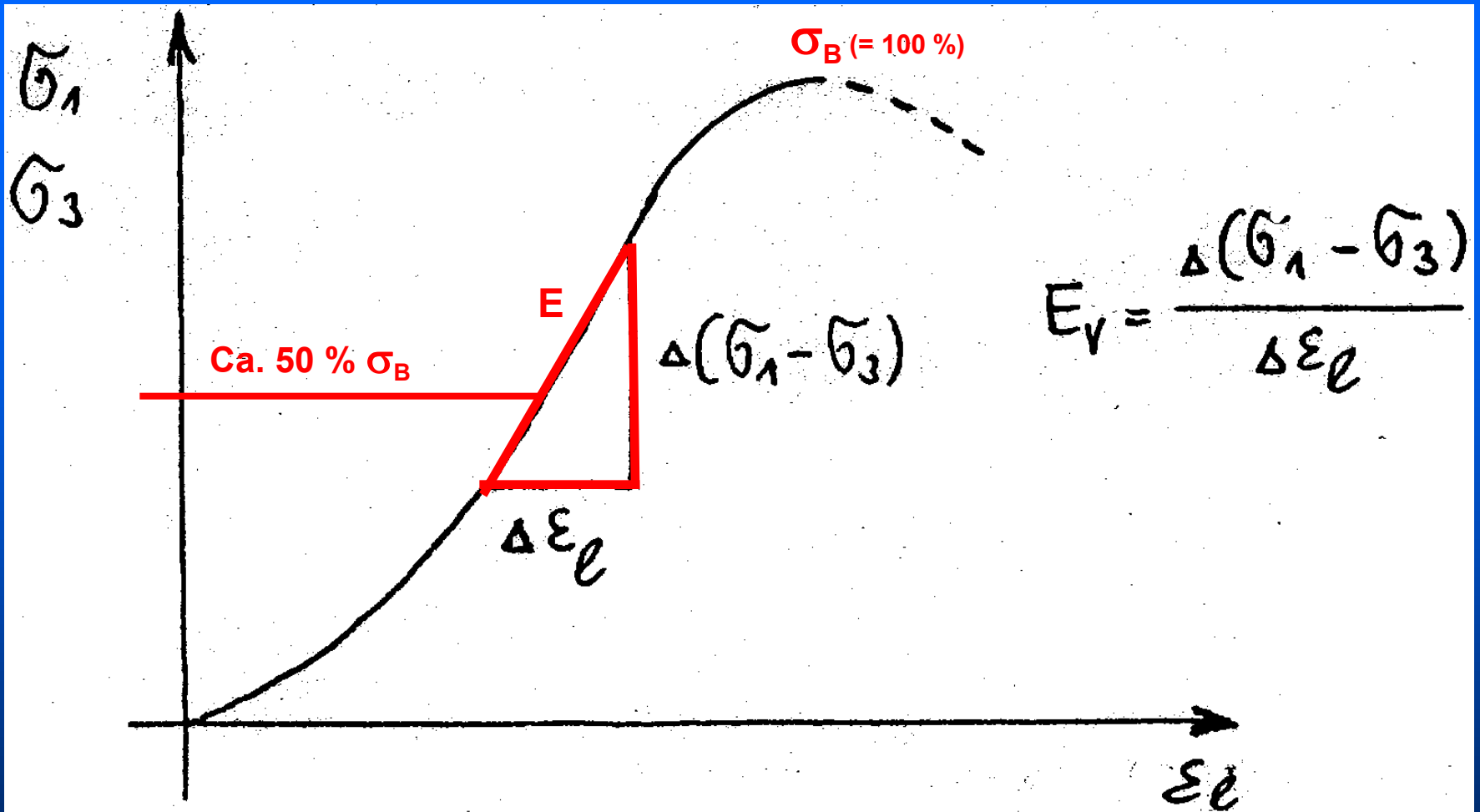


Auswertung triaxialer Druckversuch im Mohr-Diagramm

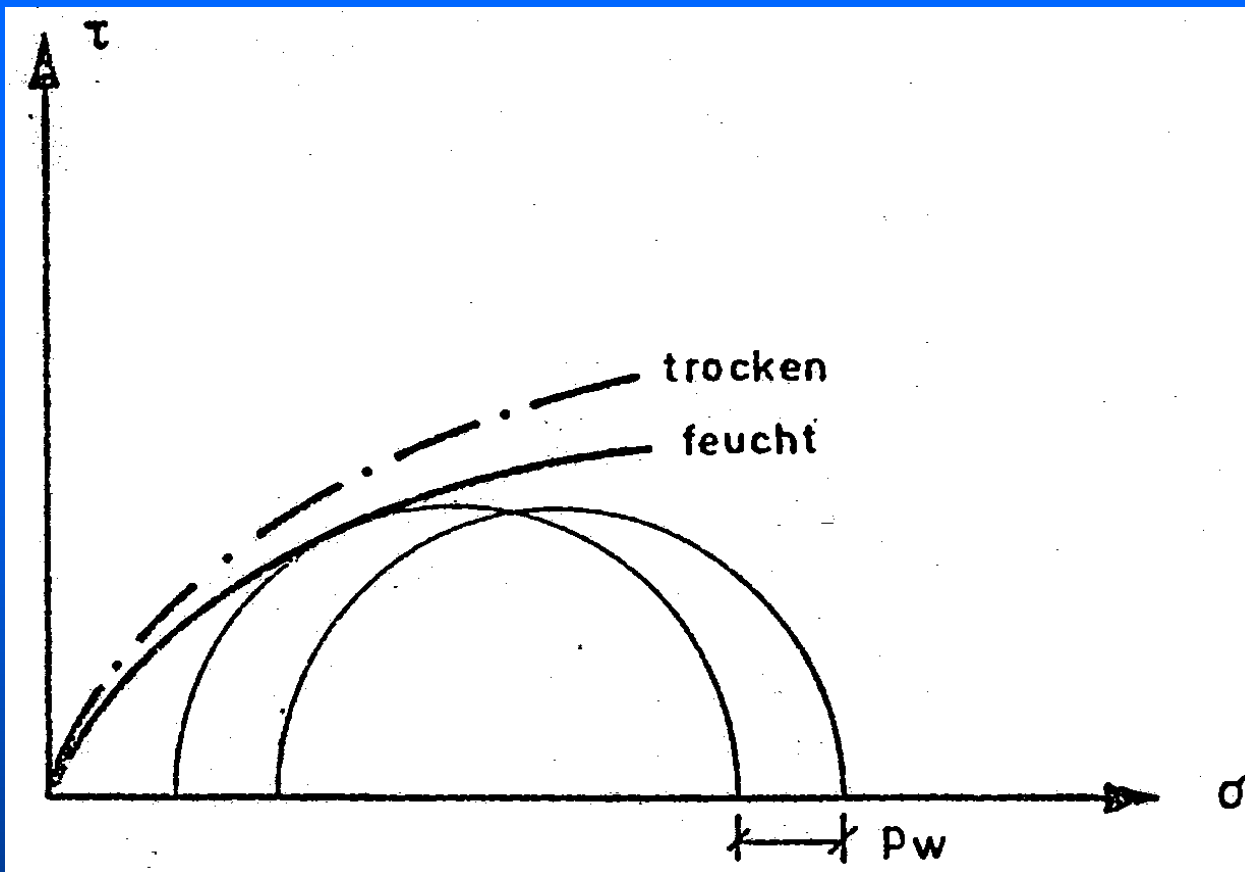
Triaxialversuch liefert:

- **Scherparameter φ , c** (s.o.)
- meist nicht-lineares Spannungsverformungsverhalten
- **Werte φ , c** deshalb nur für Teilbereiche mit mehr oder weniger linearem Verlauf nach Bruchhypothese von Coulomb verwendbar.
- Außerdem messbar:
 $\varepsilon_{e,u}$ = Bruchdehnung, Dehnung zwischen Versuchsbeginn und dem Bruchpunkt.
- damit **E - und V - Modul** bestimmbar





Auswertung Sigma – Epsilon – Diagramm



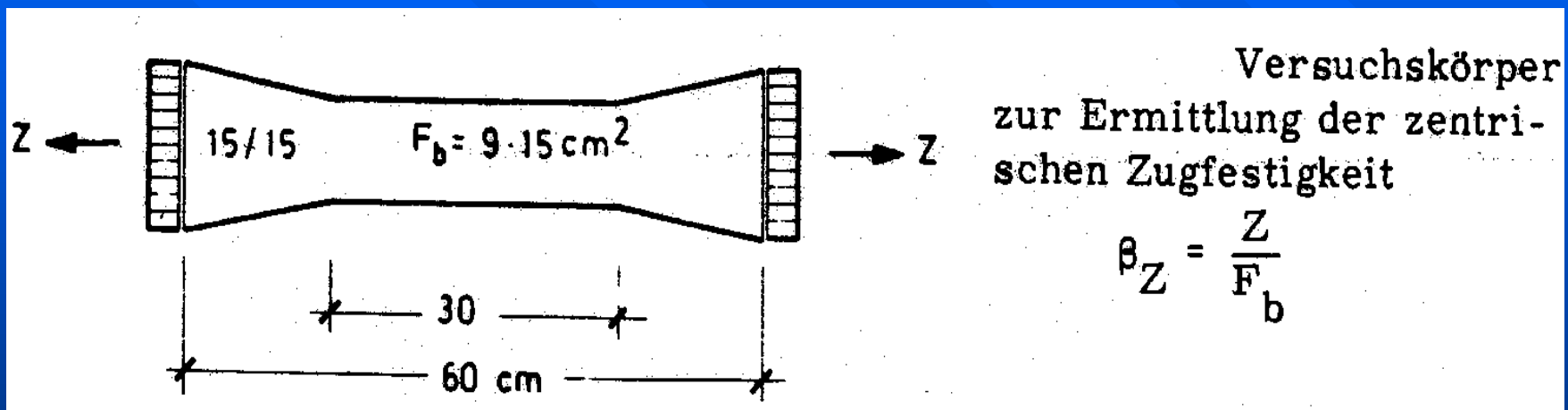
3. Einfluss Wassergehalt

**Hinweis: Versuchsergebnisse meist zu gut,
 Probenauswahl – objektiv im Hinblick auf Probenvorbereitung,
 Stichwort charakteristische Werte**

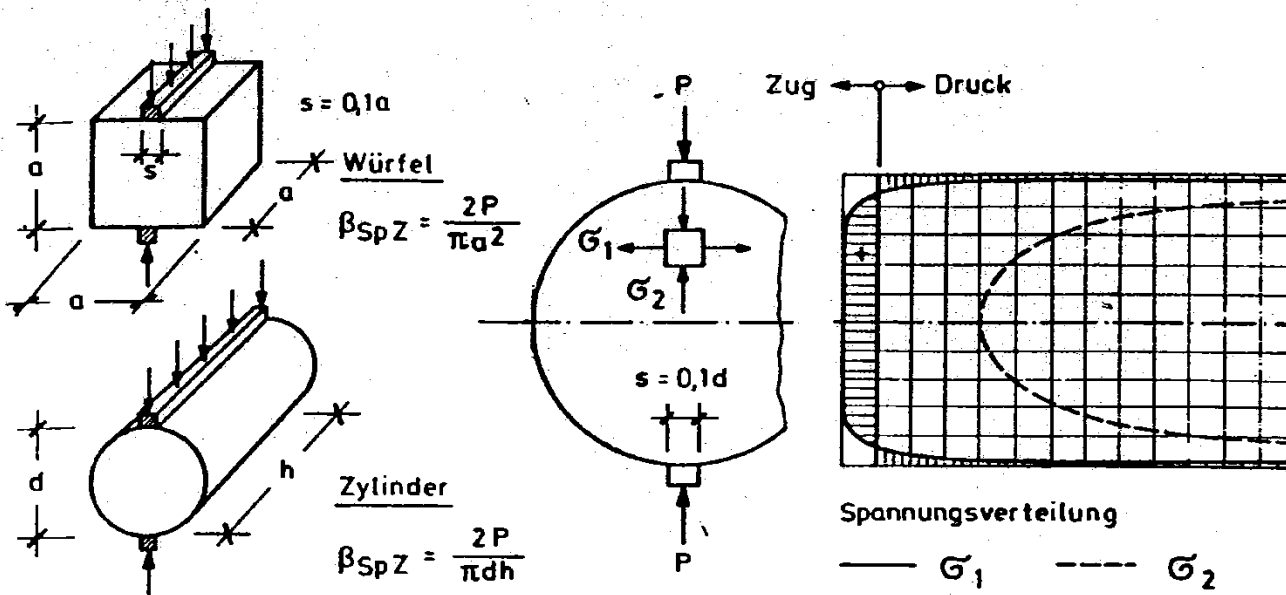
3.2.3 Zugfestigkeit

Bislang Mohr'sche Hüllkurve noch unvollständig; im Zugspannungsbereich noch zu ergänzen;

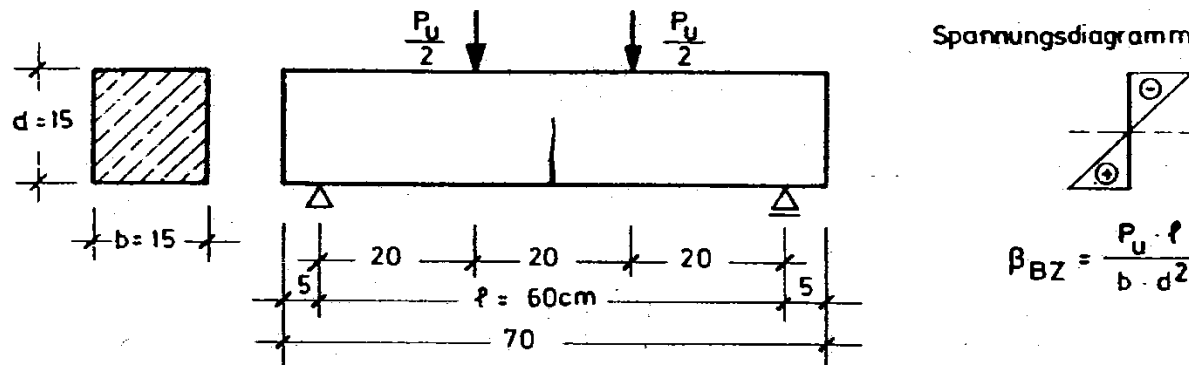
- Werte aus **einaxialem Zugversuch** (Empfehlung Nr. 10, DGGT)



Probleme meist mit Endflächen; deshalb häufiger indirekte Zugversuche, ggf. als Indexwerte;



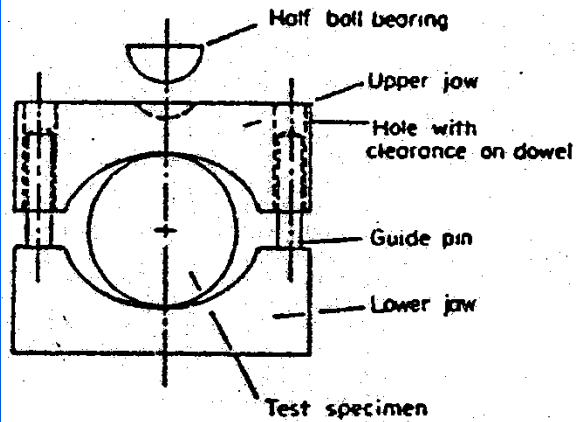
Ermittlung der Spaltzugfestigkeit



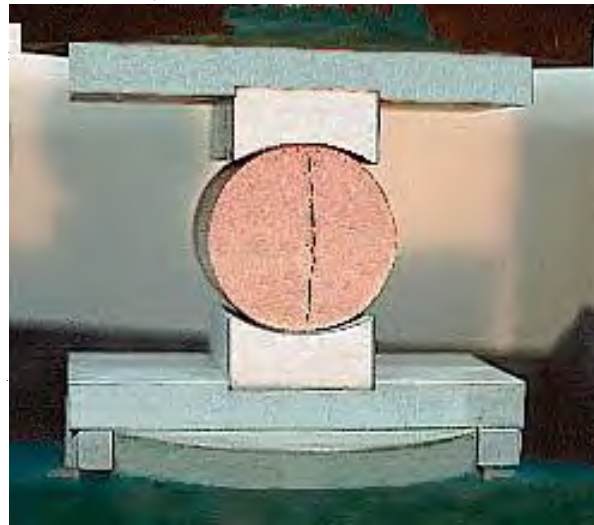
Prüfkörper zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit

Spaltzugfestigkeit

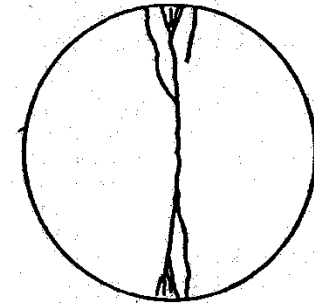
Biegezugfestigkeit



Versuchseinrichtung



Belastungsprinzip



Rißbild

wichtig: **Zugfestigkeit** viel kleiner als Druckfestigkeit, **in der Regel 1/10**

- Bruch erfolgt plötzlich, ohne vorherige Bildung von Mikrorissen wie beim einaxialen Druckversuch -> sprödes Versagen (!)

Direkte Zugbelastung praktisch ohne Bedeutung; wichtig sind dagegen „indirekte“ Zugbeanspruchungen, wie sie unter starren Stützen, Pfeilern usw. entstehen können! Wichtig auch beim Gesteinsbohren und im Tunnelbau (Zugzonen im Profil)



3.2.4 Scherfestigkeit

- Üblicherweise über Triaxialversuch (s.o.)
- auch direkte Scherversuche mit Normalkraft, wie Bodenmechanik; Gleitfläche erzwungen, außerdem verschiedene indirekte Versuche (ohne Bedeutung).
- Mehrstufentechnik nach Empfehlung Nr. 12, DGGT.

→ Ergebnis: **Scherparameter φ , c** (s.o.) des Gesteinskörpers (!)



3.2.5 Statische elastische Parameter

Außer einaxialer Druckfestigkeit liefert einaxialer Druckversuch noch die elastischen Parameter E , ν bzw. m

m = Querdehnungszahl

ν = Poissonzahl oder Querdehnungsverhältnis

- dazu muss während des Versuchs die axiale und radiale Verformung der Probe gemessen werden.

$$\begin{aligned}\varepsilon_l &= \frac{\Delta l}{l_0} && \text{(Längenänderung)} \\ \varepsilon_d &= \frac{\Delta d}{d} && \text{(\varnothing Änderung)} \\ \varepsilon_c &= \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\pi \cdot \Delta d}{\pi \cdot d_0} = \frac{\Delta d}{d_0} = \varepsilon_d && \text{(Umfangsänderung)}\end{aligned}$$

gemessen mit Wegaufnehmern, induktiv mit DMS (längs, quer)

Poissonzahl $V = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_e} \quad 0 < V < 0,5$

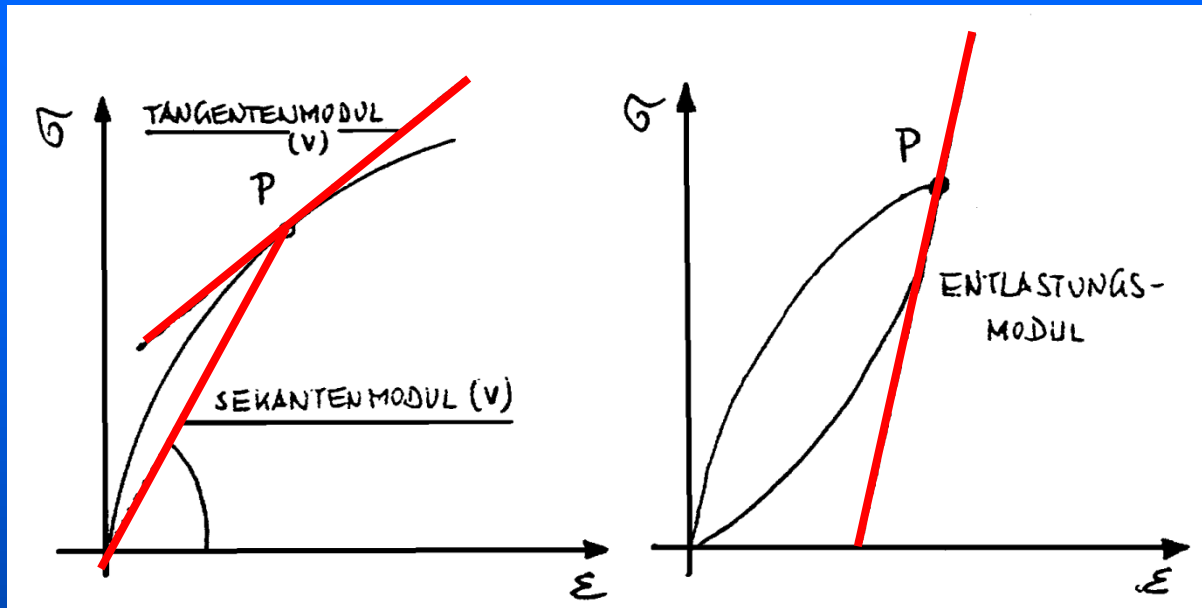
meist $\nu = 0,25$ gesetzt, wenn keine Versuche in stark verwittertem Fels auch 0,40

Querdehnungszahl

$$\begin{aligned}m &= -\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_d} \\ m &= \frac{1}{\nu}\end{aligned}$$



E-Modul / V-Modul

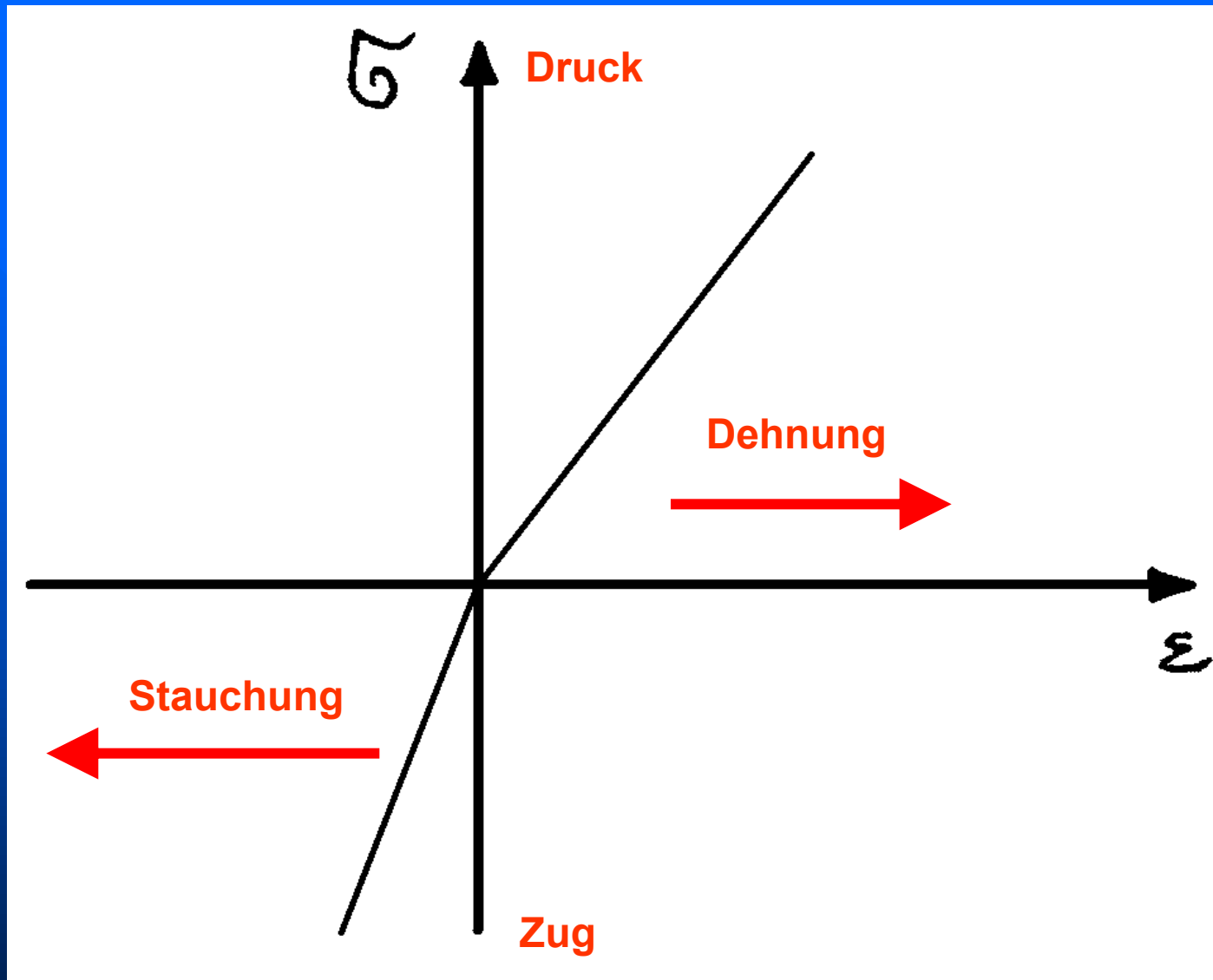


$$E = \sigma / \epsilon$$

aus einaxialem
Druckversuch nach
DGGT-Empfehlung
Nr. 1

- **E-Modul:** meist bei 50 % der Bruchspannung festgelegt
- **E-Modul:** Steigung der Spannungsdehnungslinie unterhalb der Proportionalitätsgrenze (**elastischer Bereich**)
- **V-Modul:** Steigung der Spannungsdehnungslinie oberhalb der Proportionalitätsgrenze (**Verformung**)





E-Modul verschieden für Zug/Druck (!)

3.2.7 Indexwerte

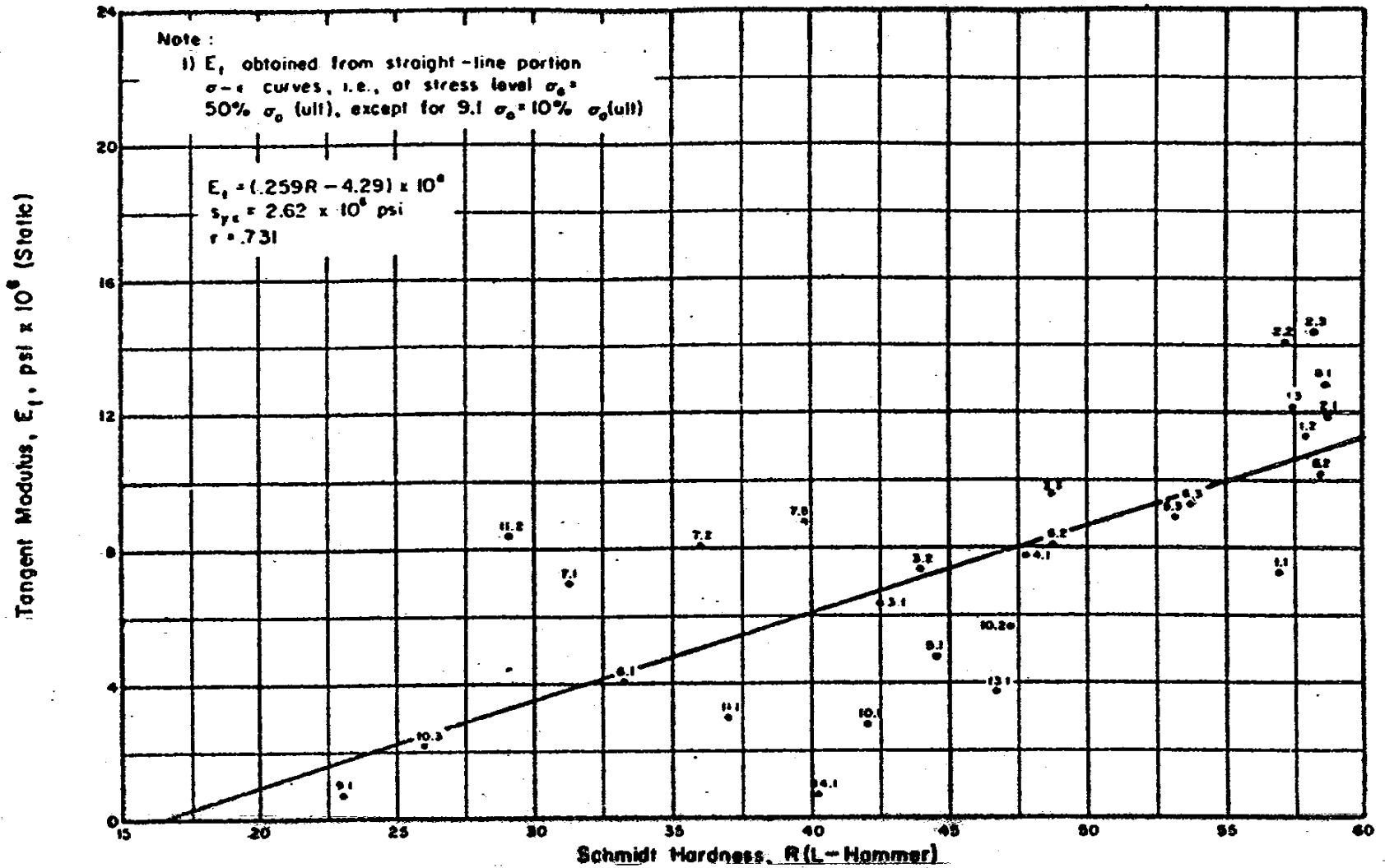
- Laborversuche erfordern Aufwand (Kosten !) für
 - **Transport**
 - **Vorbereitung**
 - **Versuchsdurchführung**
 - es kann immer nur eine **kleine Auswahl** von Proben untersucht werden
 - hilfreich sind hier Indexversuche, die als Feldversuche **keinen Probentransport** erfordern und im allgemeinen auch **keine Probenvorbereitung**
 - erfordern nur relativ kurze Versuchszeiten
 - sind einfach auszuwerten
 - liefern Werte, die sich mit Festigkeitswerten oder elastischen Parametern über mehr oder weniger brauchbare Umrechnungsformeln korrelieren lassen
- **Indexversuche sind kostengünstig und daher wertvoll**



1. Schmidt- oder Rückprallhammer

bekannt aus Betonprüfung, besteht aus einer Feder in einer Hülse, die gespannt wird und einen Stahlbolzen beschleunigt; der auftretende Rückprall wird gemessen; wird korreliert mit **E-Modul** und **Druckfestigkeit**; jedoch starke Streuung.



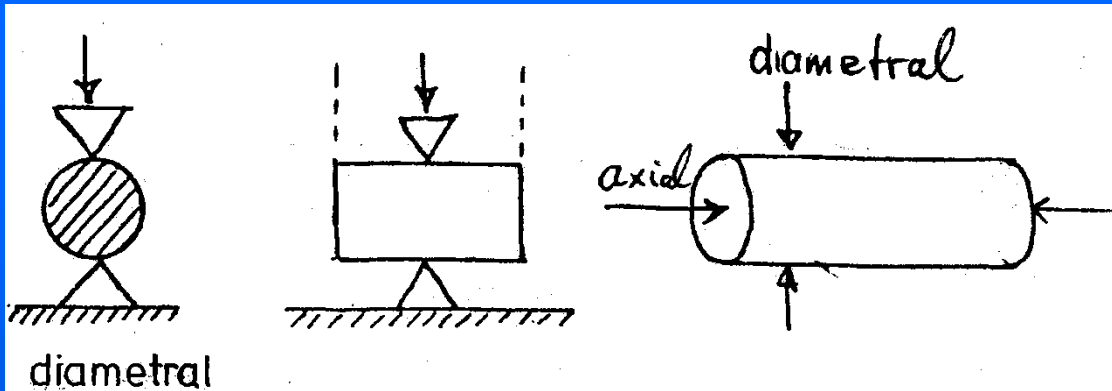


Beziehung zwischen der Rückprallhärte nach Schmidt und dem Tangenten-E-Modul für die halbe Bruchspannung im einaxialen Druckversuch.

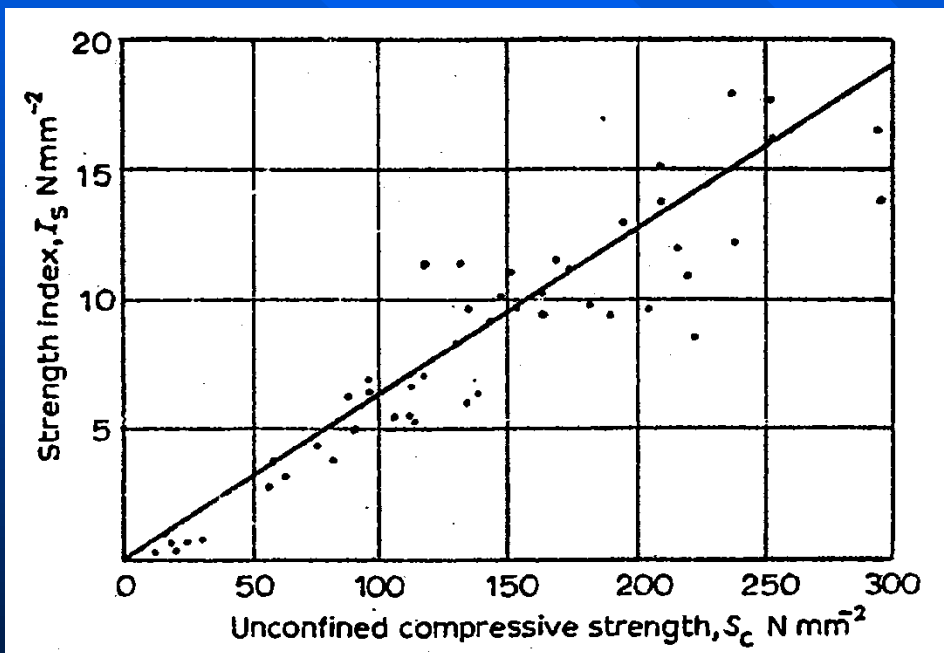


2. Punktlastindex (Empfehlung Nr. 5, DGGT)





Belastungsrichtung (wichtig) – Bezug Belastung „im Bauwerk“



Beziehung zwischen dem Punktlastindex und der einaxialen Druckfestigkeit (ein paar Versuche erforderlich !)



3.2.8 Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern

empirisch ermittelte Zusammenhänge einzelner Parameter erlauben oft eine grobe Abschätzung von Größenordnungen, nach Attewell & Farmer für E-Modul, mit σ_D = einaxialer Druckfestigkeit

- E-Modul $E_{\text{stat}} = 350 \sigma_D$
- Scherfestigkeit ca. $0,5 \times \sigma_D$
- Zugfestigkeit ca. $0,1 \times \sigma_D$



Zugfestigkeit ~ 1/10

1 : 357 E-Modul

Gestein	Einaxiale Druckfestigkeit [MN/m ²]			Einaxiale Zugfestigkeit [MN/m ²]			E-Modul [MN/m ² * 1000]			Poisson-Zahl [v]		
	von	bis	mittl. Wert	von	bis	mittl. Wert	von	bis	mittl. Wert	von	bis	mittl. Wert
Norit	290	326	298	15	25	20	90	110	100	0,21	0,26	0,24
Dolerit	227	319	280	12	26	20	60	90	70	0,15	0,29	0,20
Quarzit	200	304	252	17	28	25	70	105	90	0,11	0,25	0,16
Sandstein	40	179	96	3	7	5	10	16	12	0,10	0,40	0,24
Tonstein	36	172	95	2	5	3	10	14	8	0,10	0,19	0,14

Anhaltswerte für Gesteinsparameter (unverwittert)



Verwitterung

Klassifizierung:
meist visuell z.B.:

- VU bis VZ
(Floss 1997/ FGSV)
- V0 bis V5
(Wallrauch 1969)



VZ/V4



VE/V3



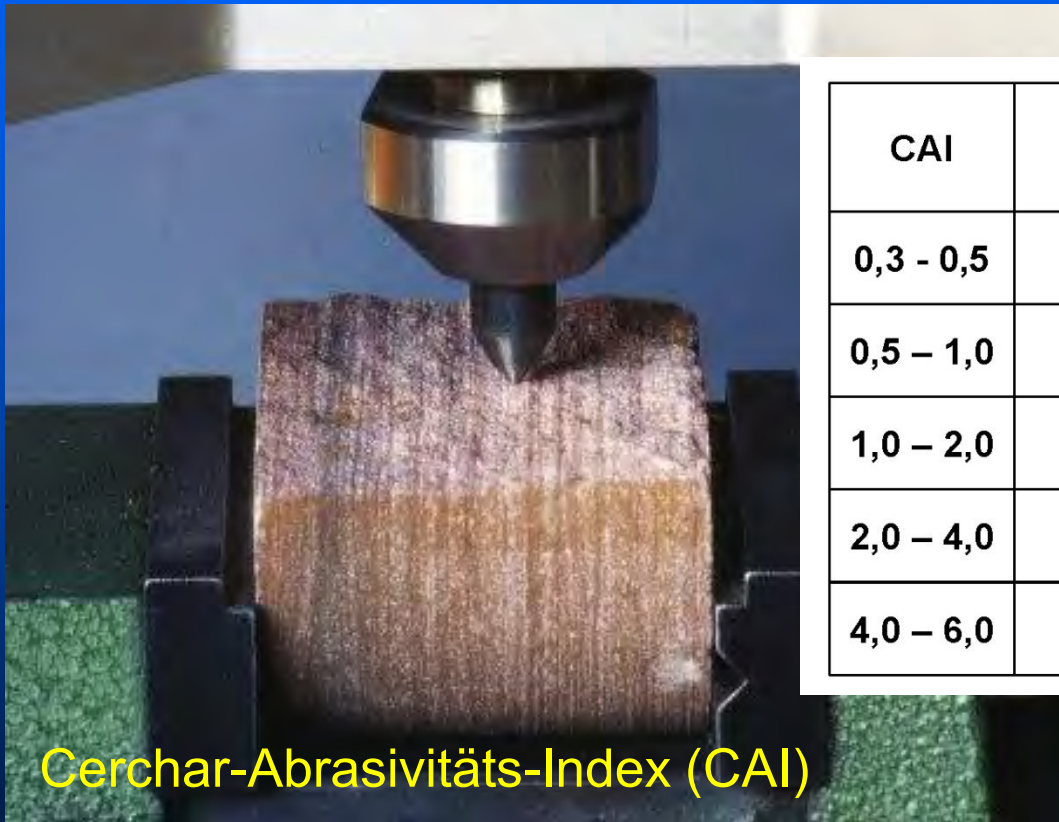
VE/V2

Verwitterungsgrad	V5	V4	V3	V2	V1	V0
Gesteinstyp	Boden	Halbfestgestein			Festgestein	
Zerlegung	ohne Gefüge	Restgefüge	Auflockerung vollständig/ stark	an Trennflächen teilweise/ schwach	beginnend	keine
Bohrkern	grusig, bindig	blättrig/ bröckelig/	stückig	Kernstücke, -scheiben	Vollkern	
Festigkeit	Boden	mürb, sehr mürb	mürb-hart	mäßig hart	hart	hart- sehr hart
vorherrschende Verwitterung	← chemisch →		← mechanisch →			keine
Bezeichnung nach FGSV	(Boden)	zersetzt (VZ)	entfestigt (VE)		angewittert (VA)	unverwittert (VU)

Quelle: Mohrmann, S&P, Stuttgart, Vortrag im Rahmen der Fachtagung „Neue EA-Pfähle“, Hamburg

Abrasivität - Werkzeugverschleiß

Widerstand gegen schleifende Beanspruchung Gesteinsoberfläche zur Abschätzung des Werkzeugverschleiß



CAI	Bezeichnung
0,3 - 0,5	kaum abrasiv
0,5 - 1,0	schwach abrasiv
1,0 - 2,0	abrasiv
2,0 - 4,0	sehr abrasiv
4,0 - 6,0	extrem abrasiv

Cerchar-Abrasivitäts-Index (CAI)

GLIEDERUNG

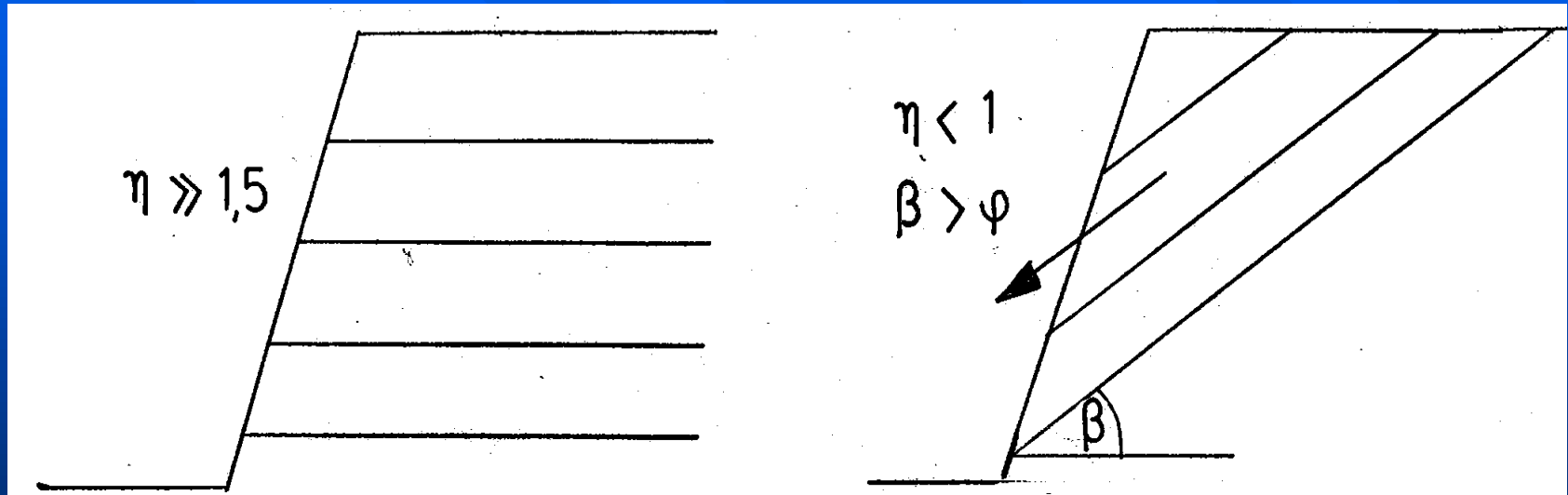
1. Programm
2. Einleitung
3. Gesteinseigenschaften
- 4. Trennflächen**
5. Gebirgseigenschaften
6. Spannungen im Gebirge
7. Bruchvorgänge im Gebirge / Gestein
8. Wasser im Gebirge
9. Gesteins- und Gebirgsklassifizierung



4. TRENNFLÄCHEN

4.1 Entstehung und Klassifizierung

Beispiel Felsböschungen; gleiche Höhe und Neigung, gleiches Gestein, dennoch verschiedene Standsicherheit; **Gesteinseigenschaften reichen offenbar zur Beschreibung des Verhaltens größerer Einheiten nicht aus.**



Ursache für unterschiedliche Sicherheiten ist Existenz von Spalten und Rissen im Gebirge, der sog. Trennflächen, die jedes Gestein im 10er Meter- bis mm-Bereich durchziehen, je nach tektonischer Vorgeschichte bzw. Beanspruchung.

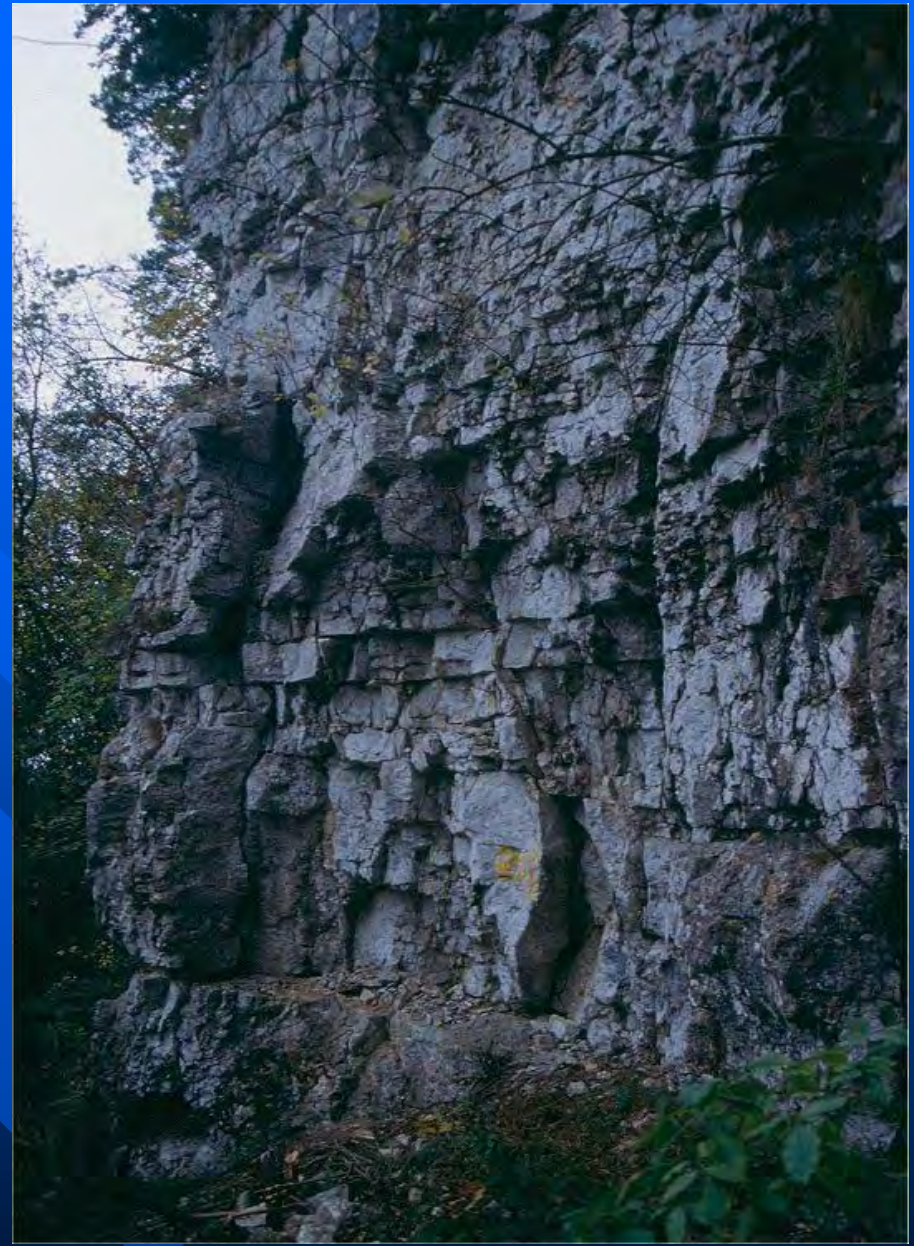
**In vielen Fällen sind Trennflächen und deren
Eigenschaften entscheidender als die Gesteinsfestigkeit;
leitet über zu Gebirgsfestigkeit !**

Klassifizierung je nach Genese und Vorgeschichte, im wesentlichen

- Schichtflächen
- Schieferungsflächen
- Klüfte
- Störungen

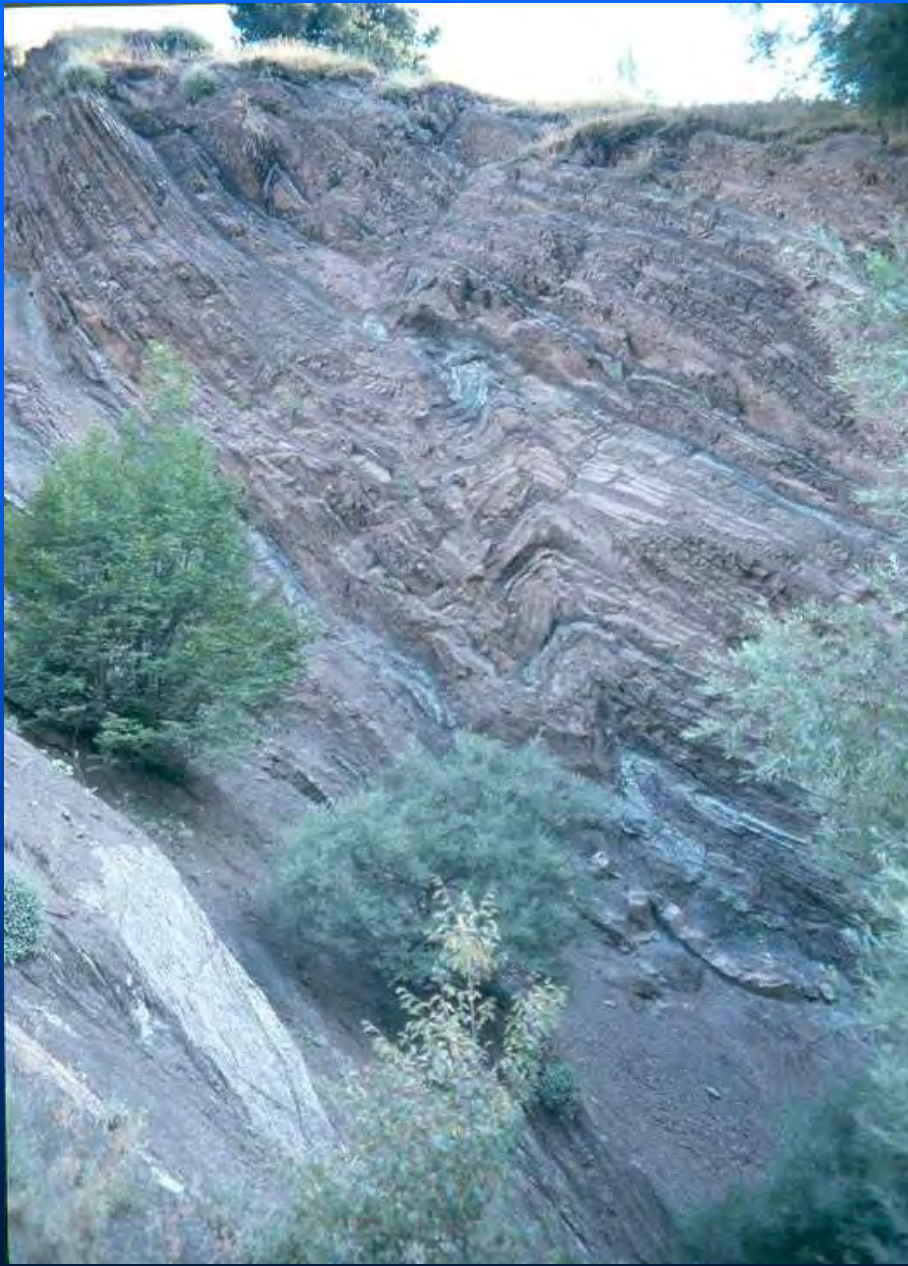
Genese hat tlw. großen Einfluss auf Scherfestigkeit !















Beschreibung von Trennflächen

- **Trennflächengefüge** (Schichtung – Klüftung – Tunnel)
 - Raumstellung (z.B. $120^\circ/50^\circ$) zumeist orthogonal (S / K1 / K2)
- **Scherfestigkeit der Trennflächen**
 - Reibungswinkel φ und Kohäsion c
- **Ausbildung der Trennflächen**
 - Ausbisslänge
 - Durchtrennungsgrad
 - Abstand
 - Öffnungsweite
 - Füllung
 - Art der Klufkörper



4.2 Raumstellung

4.2.1 Messung

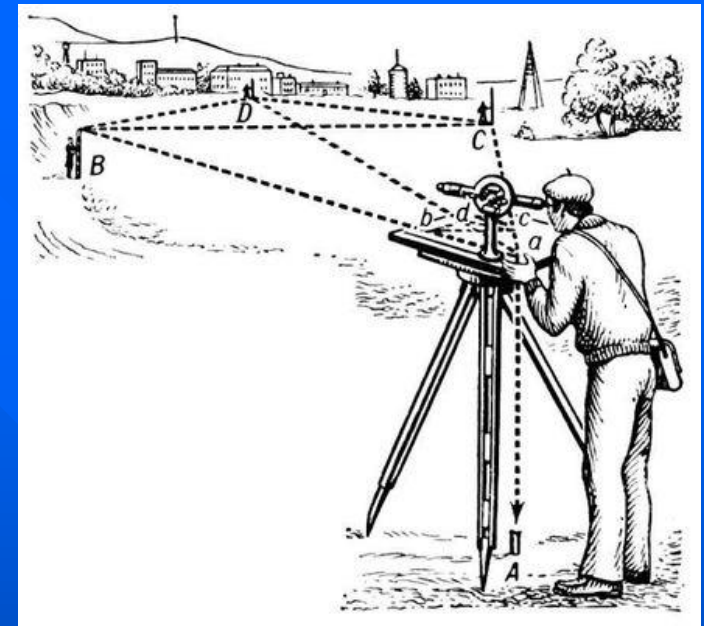
- Grundlage ist geologische Beobachtung, dass regional, ggf. auch lokal, **die Trennflächen nur wenigen Richtungen zuzuordnen sind, um die sie mehr oder weniger stark streuen** → ermöglicht statistische Behandlung (impliziert Annahme, dass stets an jeder kritischen Stelle, z.B. am Böschungsfuß, ein entsprechendes Trennflächenindividuum vorhanden ist),
- es genügt also in der Regel, solche **bevorzugte Richtungen zu identifizieren (Mittelwerte, Extremwerte)**; nur prominente Einzeltrennflächen, wie Großklüfte oder Störungen, werden geodätisch als Individuen festgelegt
- man fasst die zu einer bestimmten Richtung gehörenden Flächen zu einer sogenannten **Trennflächenschar (z.B. K1, K2,)** zusammen;



Messverfahren für Einmessung

a) geodätisch exaktes Verfahren

Fläche / Ebene ist definiert durch 3 Punkte (x, y, z)



→ Vermessungstechnische Festlegung einzelner Punkte, Festlegung in Koordinaten, relativ zum Bauwerk oder absolut, liefert Gleichung der Ebene bzw. deren Raumstellung

- sehr aufwendig
- Flächen oft sehr klein
- Streuung erfordert große Anzahl Messwerte



b) Festlegung der Orientierung der Trennflächen

ohne Erfassung von deren Lage und Höhe

Zwei Möglichkeiten, verschieden in Geologie und Geotechnik; oft Anlass zu Missverständnissen und Verwechslungen, deshalb beide Arten vorgestellt.



1) „geologische“ Angabe

3 Werte erforderlich: Beispiel 45/30 SE

- **Streichen:** Winkel zwischen der Schnittlinie einer geologischen Fläche (hier Trennfläche) mit der horizontalen Ebene und der Nordrichtung, gemessen über E (Ost)
- **Fallwinkel:** Winkel zwischen der Richtung größten Gefälles einer geologischen Fläche (Falllinie) und der Horizontalen
- **Fallrichtung:** Himmelsrichtung, in die die Falllinie zeigt bzw. Himmelsrichtung, in die das größte Gefälle einer geologischen Fläche weist.



2) „geotechnische“ Angabe 2 Werte erforderlich

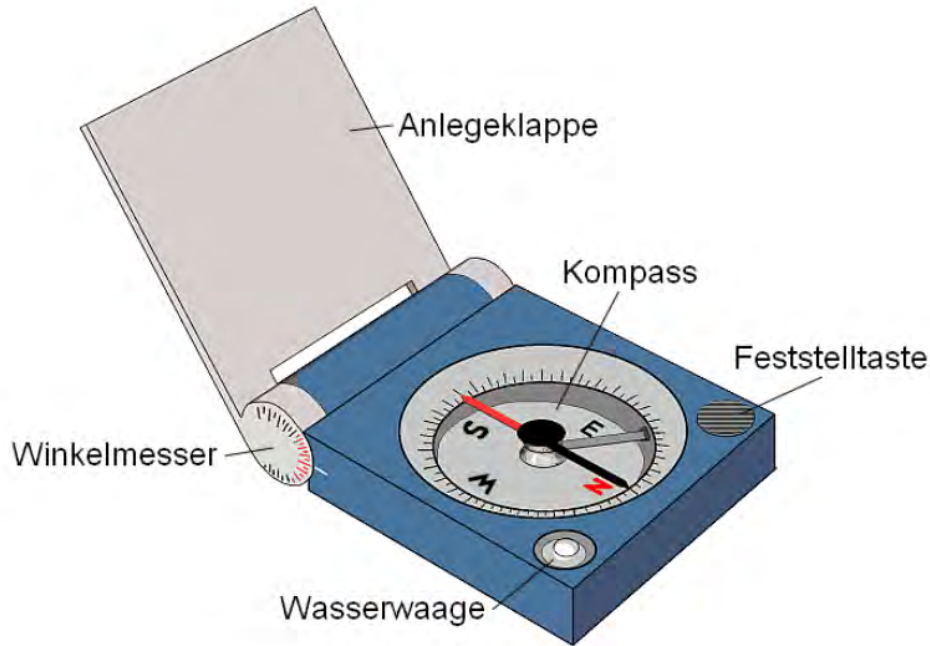
- **Fallrichtung (Streichen):**
Winkel zwischen der Richtung des größten Gefälles einer geologischen Fläche projiziert in die Horizontale und der Nordrichtung, gemessen über Ost
- **Fallwinkel:** (siehe oben)
Beispiel wie oben, jetzt 135/30

**Wichtig:
Reihenfolge der Angaben**



Gefügekompass

Messung → Übung



→ nächster Schritt: Darstellung



DR. SPANG

DB Trainingszentrum Regensburg
EINFÜHRUNG IN DIE FELSMECHANIK

Darstellung in Lagenkugel (3. Möglichkeit aus Skript)

- erlaubt **direkte Eintragung** der Messwerte
- verarbeitet beliebige Datenmengen
- lässt **statistische Bearbeitung** zu
- lässt Mittelwerte, Extreme oder Streuung direkt erkennen
- erlaubt Analyse der räumlichen Beziehungen der Trennflächen untereinander - Beispiel Gleitkeil – und in Bezug auf Bauwerk

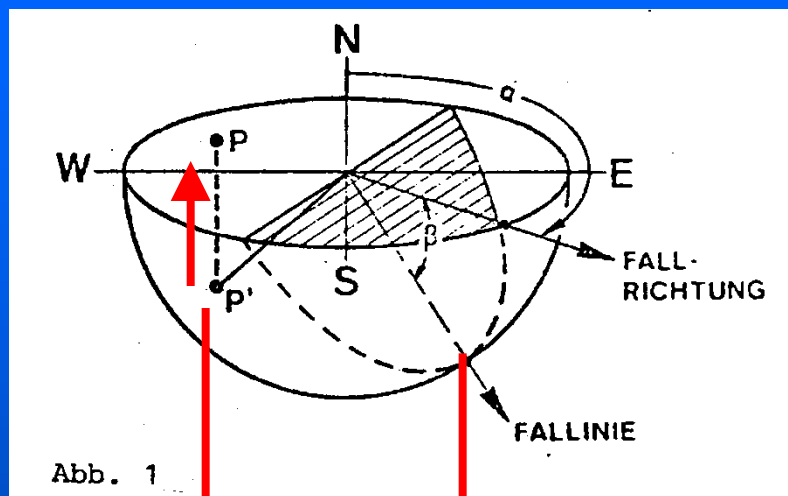
- erfordert nur „kurze“ Einarbeitungszeit (auch im Untertagebau, usw. anwendbar, z.B. Bestimmung von geologisch bedingtem Mehrausbruch).

- **erlaubt Standsicherheitsanalyse von Felskeilen etc. unter Einbeziehung äußerer Kräfte, von Reibung und Kohäsion, Anker, usw.!**

- international eingeführt
- Grundlagen im Nachstehenden erklärt
- gesamte Anwendung eigene Vorlesung -> nur Einführung möglich
- **Problem: räumliches Vorstellungsvermögen**

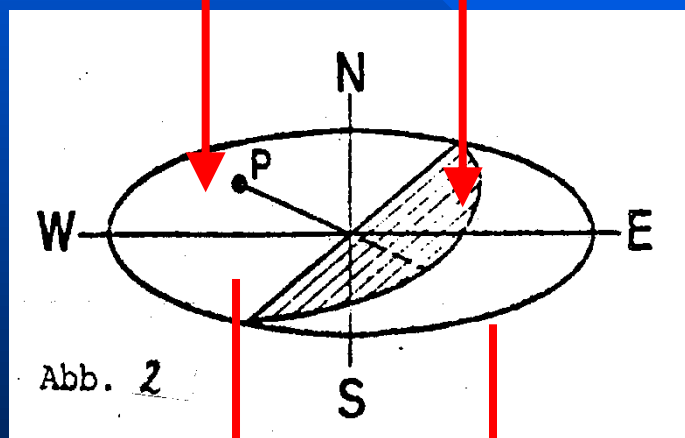


Darstellung einer Fläche in der Lagenkugelprojektion



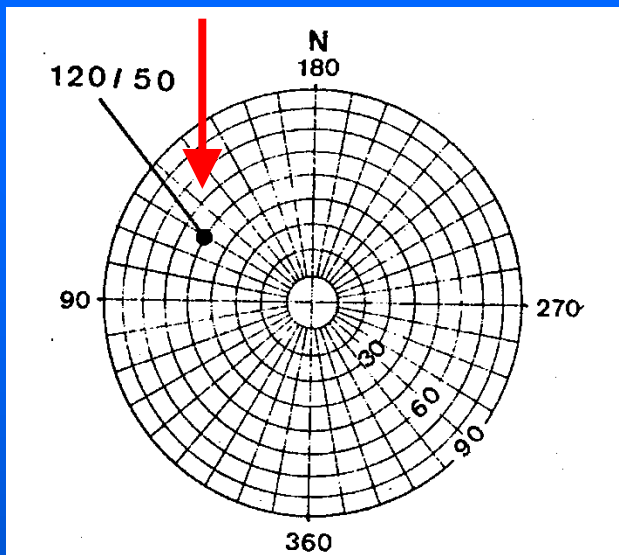
Fläche gedanklich in den Mittelpunkt einer Halbkugel parallel verschoben (teilweise schraffiert)

Polpunkt P ist Durchstoßpunkt durch untere Halbkugel

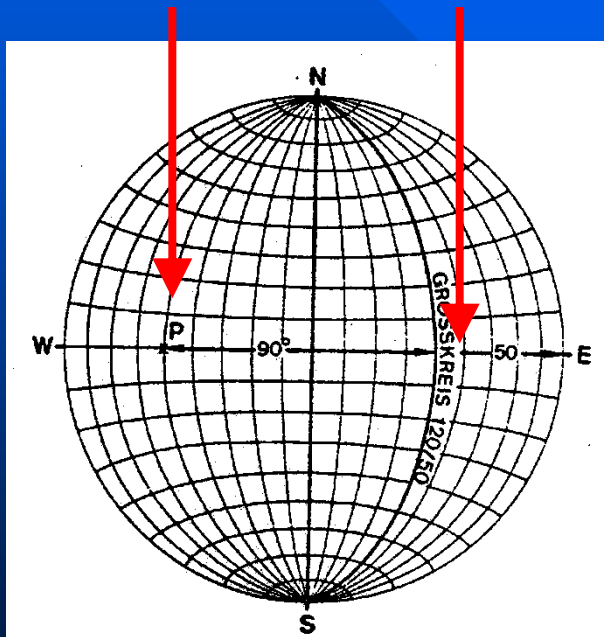


a) Poldarstellung

Flächennormale vom Mittelpunkt der Kugel nach unten erzeugt Durchstoßpunkt P', bzw. in die Äquatorebene projiziert „Pol“ P



Eintragung der Fläche α / β durch ihren Pol P direkt in die Lagenkugel in „Pollage“ (Abb. 3); Beispiel 120/50.

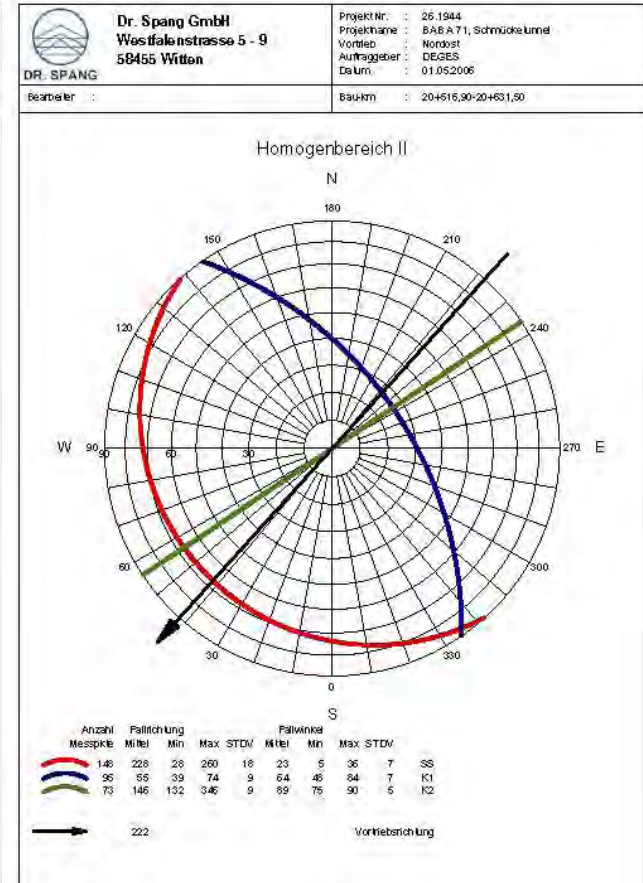
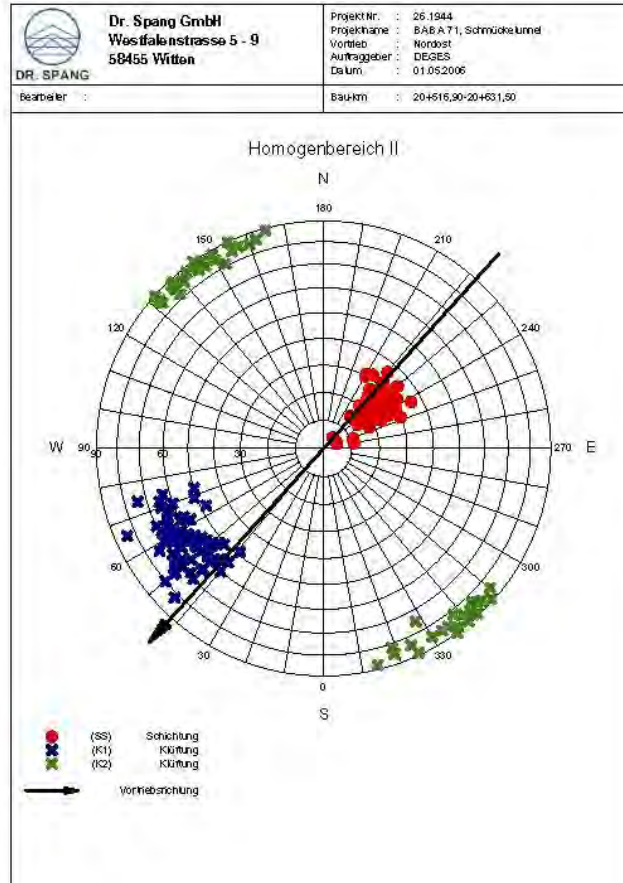
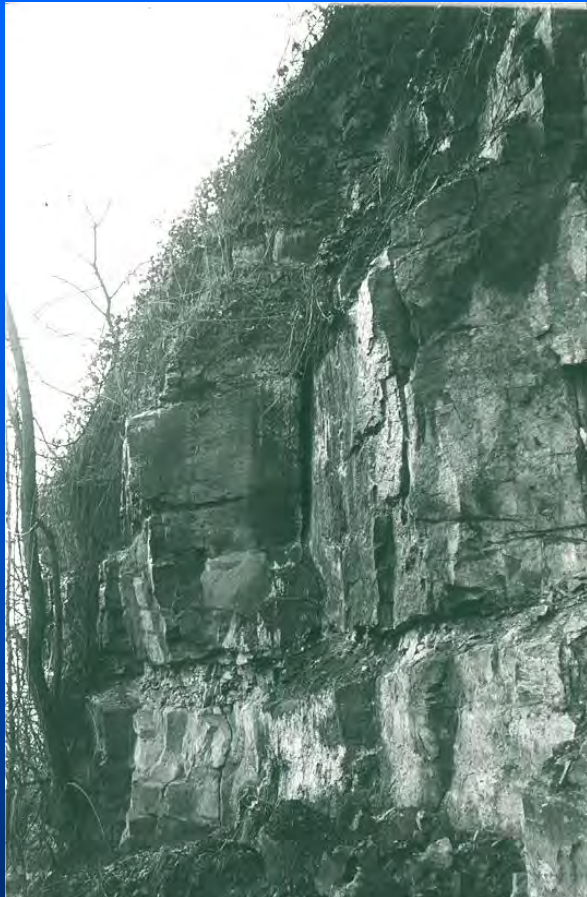


b) Großkreisdarstellung

Lagenkugel in „Pollage“ wird so über Lagenkugel in „Querlage“ (Abb. 4) gelegt, dass Pol P auf der E-W-Achse der Lagenkugel in Querlage liegt. Der zu P gehörige Großkreis wird gefunden, wenn man von P aus längs der E-W-Achse 90° abzählt.



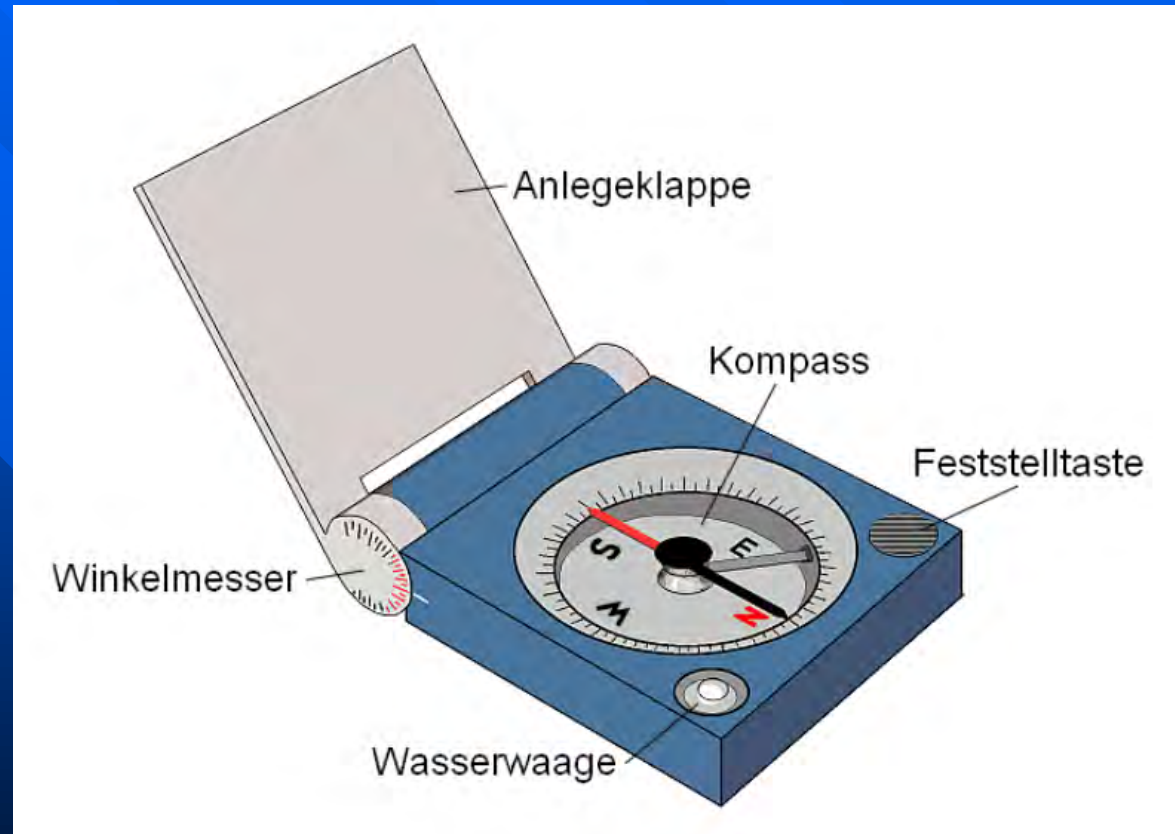
Trennflächen - Darstellung

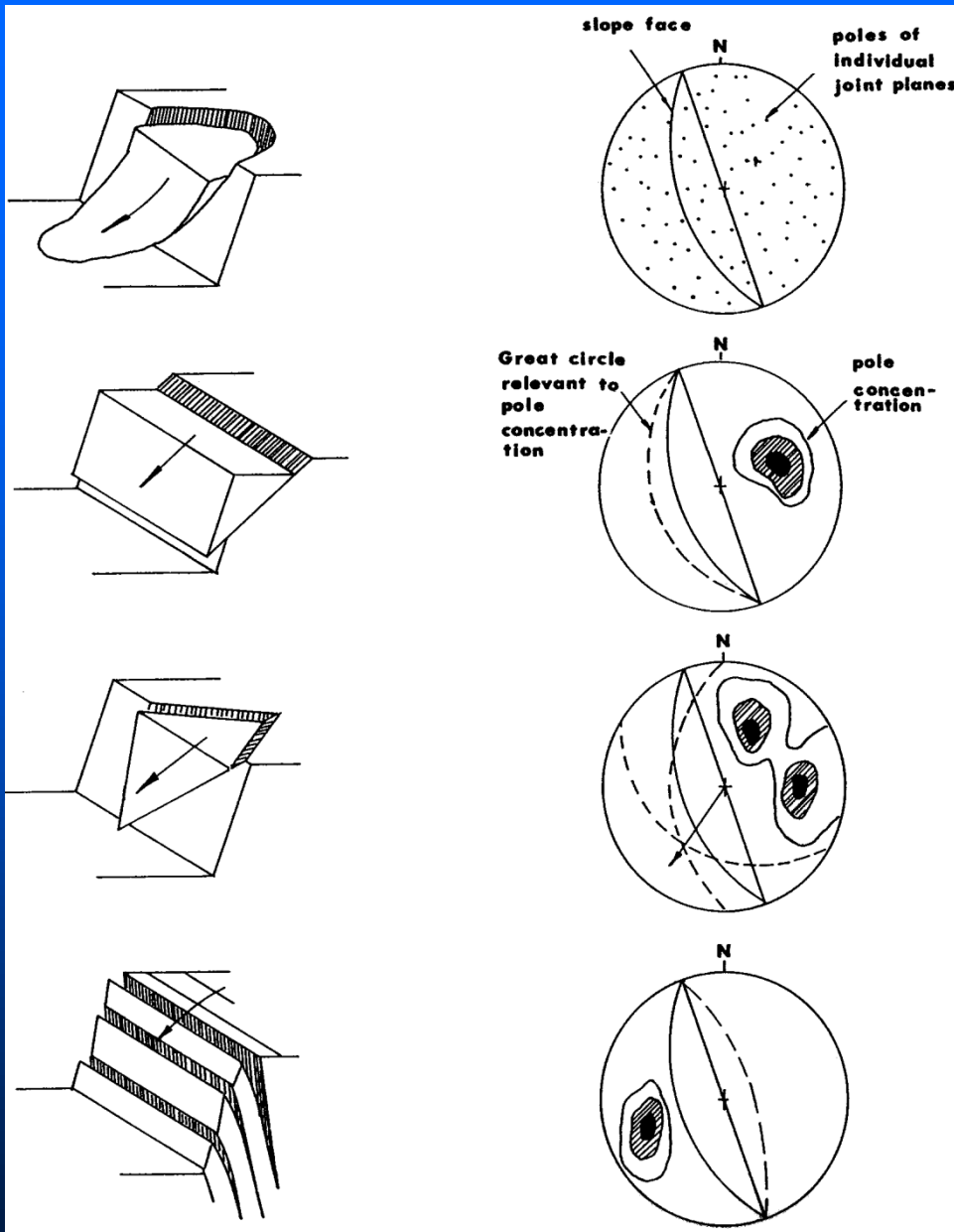


Aufnahme der Trennflächenorientierung mit Geologenkompass und Darstellung in der Lagenkugel

Trennflächen - Darstellung

-> Übung





- a) Versagen auf gekrümmter Bruchfläche in stark zerlegtem Gebirge ohne identifizierbare Regelung der Trennflächen.
- b) Ebenes Gleiten auf 1 Trennfläche(nschar)
- c) Keilgleiten auf 2 Trennflächen(scharen)
- d) Kippen auf steil bergwärts fallenden Trennflächen

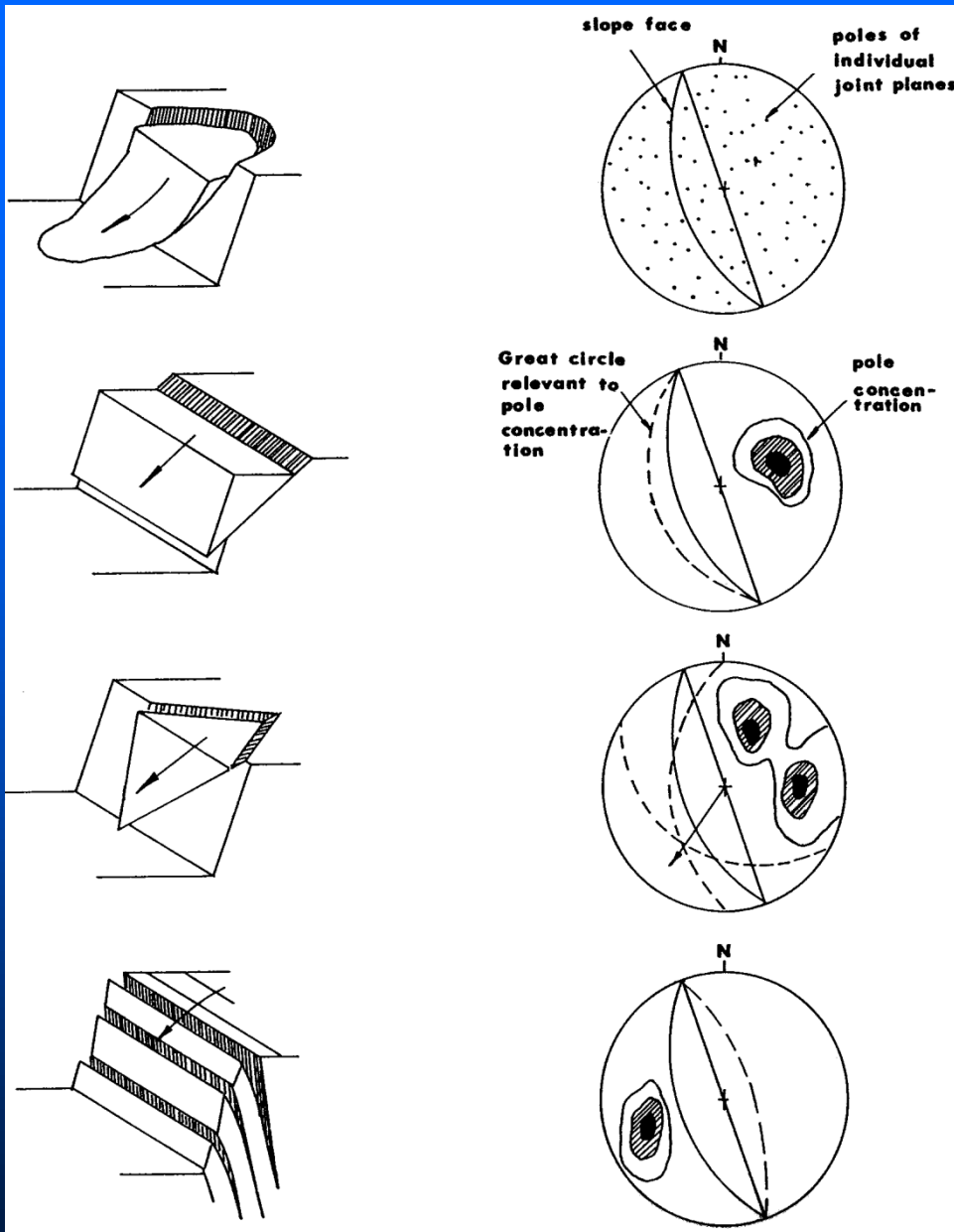




a) Versagen auf gekrümmter Bruchfläche in stark zerlegtem Gebirge ohne identifizierbare Regelung der Trennflächen.







- Versagen auf gekrümmter Bruchfläche in stark zerlegtem Gebirge ohne identifizierbare Regelung der Trennflächen.
- Ebenes Gleiten auf 1 Trennfläche(nschar)
- Keilgleiten auf 2 Trennflächen(scharen)
- Kippen auf steil bergwärts fallenden Trennflächen

Identifizierung von Bruchmechanismen aus der Lagenkugel nach HOEK & BRAY (1977)





- b) Ebenes Gleiten auf 1 Trennfläche(nschar)
- c) Keilgleiten auf 2 Trennflächen(scharen)



d) Kippen auf steil bergwärts fallenden Trennflächen



4.3 Geometrische Beschreibung (ISRM-Empfehlung „Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses“)

4.3.1 Ausbisslänge

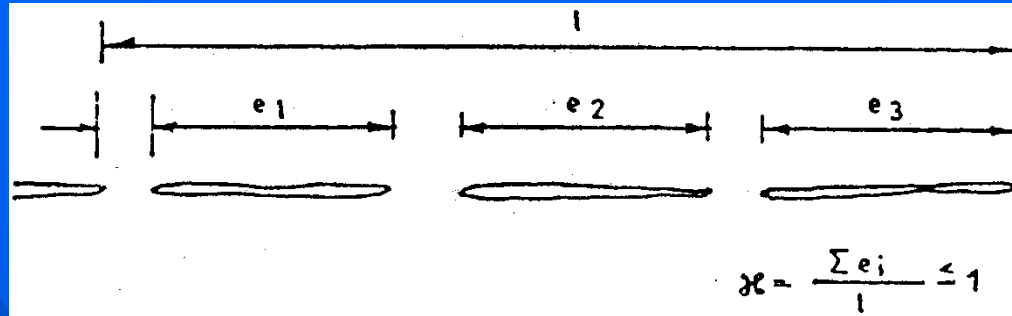
- Trennflächen (mit Ausnahme Schichtung) meist nicht über große Entfernung durchstreichend, sondern durch Materialbrücken unterbrochen;
- **Ausbisslänge**, im ebenen Aufschluss, Länge eines Trennflächenindividuums; Maß für die selten direkt messbare Klufflächengröße

Klufftlänge	Begriff	Gebirge
< 0,1 m	Kleinstklüfte	kleinklüftig
0,1 - 1,0 m	Kleinklüfte	
1,0 - 10 m	mittelgroße Klüfte	mittelklüftig
10 - 100 m	Großklüfte	großklüftig
> 100 m	Riesenklüfte	



4.3.2 Durchtrennungsgrad

- **linearer Durchtrennungsgrad χ** , gibt an, wie sich Materialbrücken und durchtrennte Bereiche entlang einer bestimmten Richtung zueinander verhalten.



Die Bedeutung des linearen bzw. ebenen Durchtrennungsgrades ist einfach anhand der Extremwerte darzulegen.

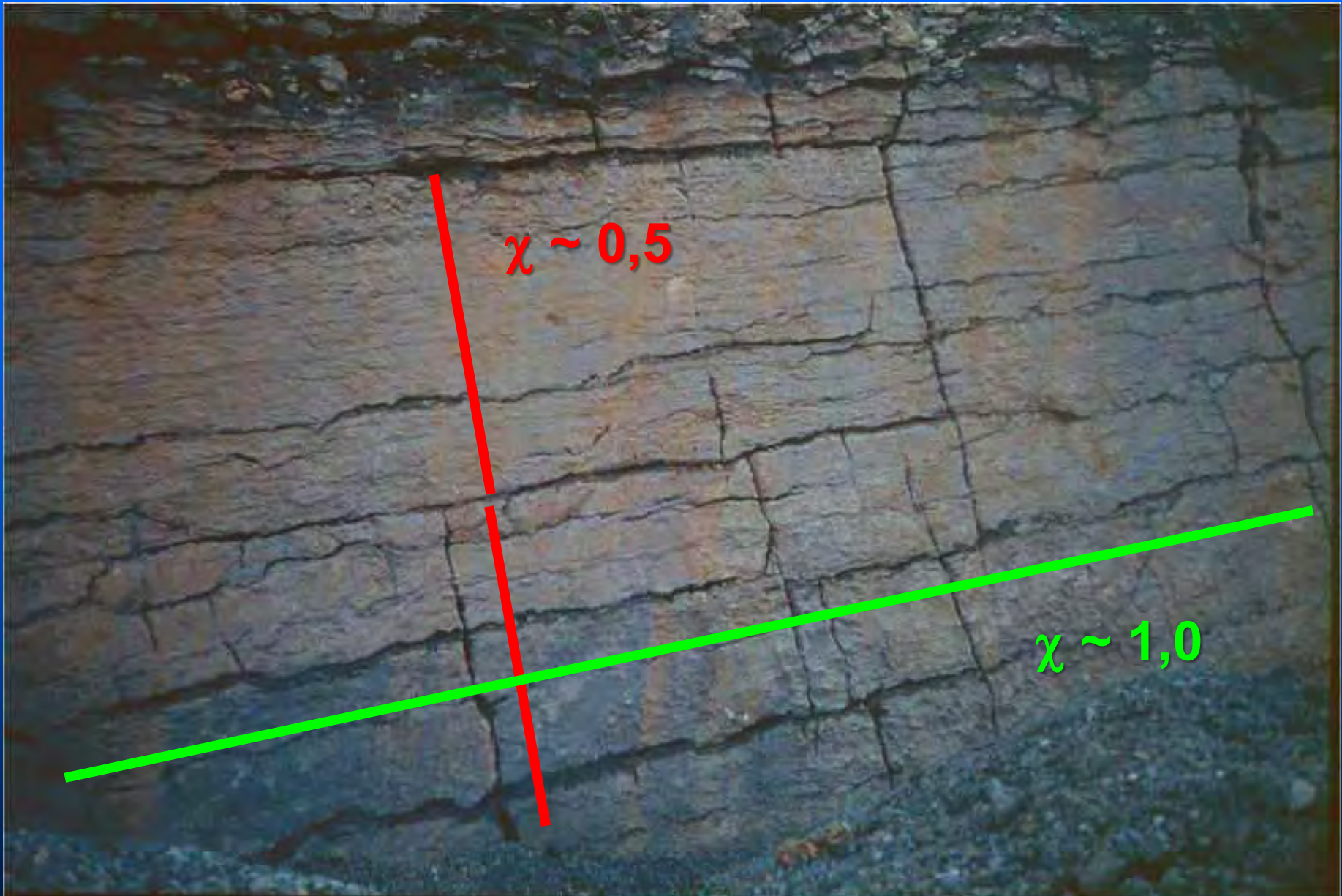
$\chi = 1,0$; bedeutet eine vollständige Durchtrennung - sie stellt bei **Schichtflächen** den Regelfall dar.

$\chi = 0$; bedeutet, dass in der betreffenden Schichtebene keine Kluftfläche vorhanden, das Material demnach intakt bzw. ungeklüftet ist.

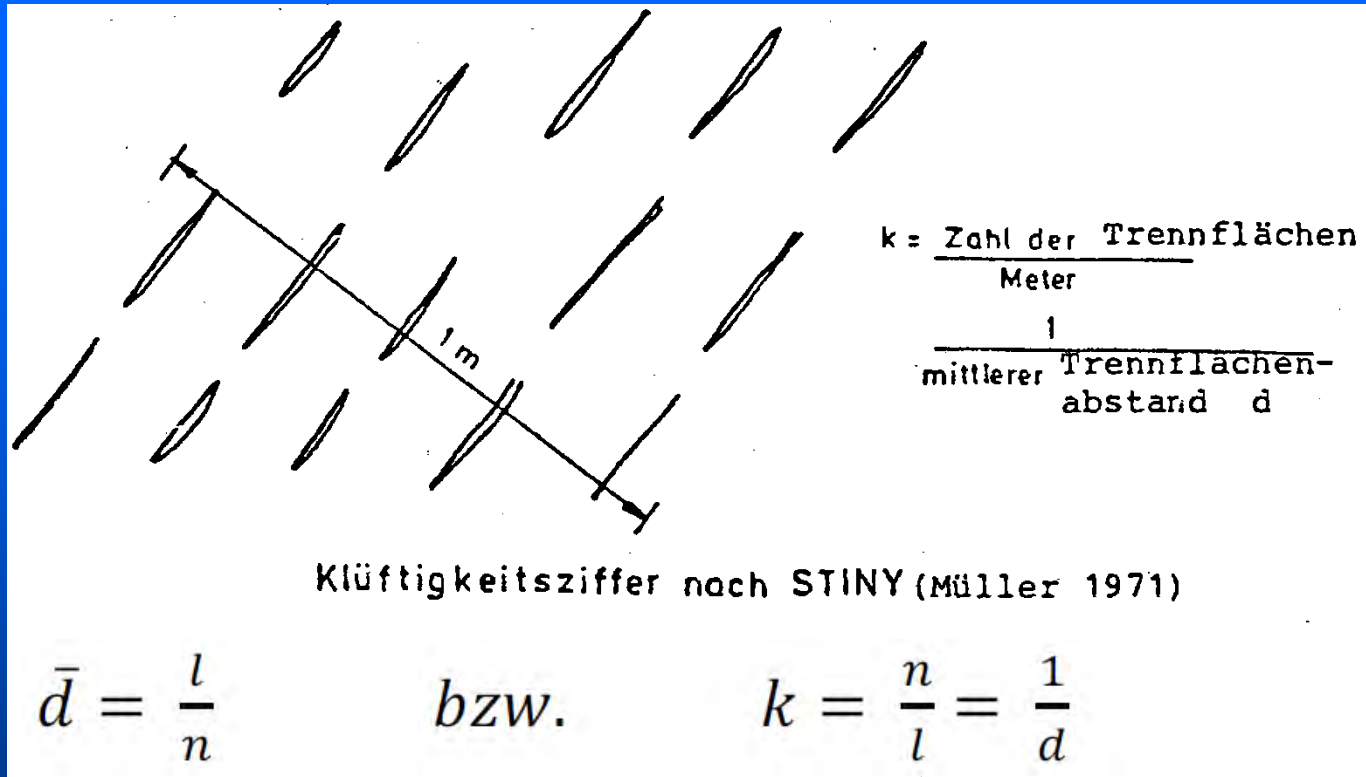
In der Literatur finden sich Hinweise, dass

$\chi \leq 0,5$; mechanisch unwirksam sei (Materialbrücke).





Klüftigkeitsziffer



Wobei „K“ die Kluftdichte (auch Klüftigkeitsziffer nach Stiny) bzw. das Reziprok des mittleren Kluffflächenabstandes ist.





$$K = 7 / 1 \text{ m} = 7$$

4.3.3 Trennflächenabstand

Trennflächenabstand; senkrechter Abstand zwischen Individuen derselben Klufschar; (Einfluss von Tektonik und Verwitterung)

MÜLLER (1963: 235)	
weitmaschig geklüftet	10 m bis 1,0 m
mitteldicht geklüftet	1,0 m bis 0,1 m
engständig geklüftet	< 0,1 m
HEITFELD (1966: 221)	
weitständig	> 1,0 m
mittelständig	0,5 bis 1,0 m
engständig	0,2 bis 0,5 m
sehr engständig	< 0,2 m

MATULA (1981)	Schichtdicke	Kluftabstand	IAEG
> 2 m	massig	kompakt	sehr groß
2 bis 0,6 m	dickbankig	weitständig	groß
0,6 bis 0,2 m	(mittel-)bankig	mittelständig	mittel
0,2 bis 0,06 m	dünnbankig	engständig	eng
0,06 bis 0,02 m	dickplattig }	dicht-	sehr
0,02 bis 0,006 m	dünnplattig }	ständig	eng
0,006 bis 0,002 m	blättrig	schiefrig	





a ~ 0,3 m
-> dickbankig ?

4.3.4 Klufföffnungsweite

Klufföffnungsweite; senkrechter Abstand der beiden Ufer einer Kluft; bei geöffneten Klüften meist Zwischenmittel vorhanden, die ggf. für die Scherfestigkeit bestimmend sein können!

4.3.5 Kluffkörper

Kluffkörper; entsteht durch Verschneidung von 3 und mehr Trennflächenscharen bzw. -individuen; Größe hängt vom Trennflächenabstand ab;

Festgestein – Technische Gesteinsfacies

Form der Kluffkörper					
Kluffabstand d [cm]	d_3 d_2 d_1	d_3 d_2 d_1	d_3 d_2 d_1	d_3 d_2 d_1	d_3 d_2 d_1
Verhältnis $\frac{d_1}{d_2} : \frac{d_2}{d_3}$	$< 1:5$	$1:2$ bis $1:5$	$\sim 1:1$	$2:1$ bis $5:1$	$> 5:1$
$d_{max} > 100$	großsäulig	großblockig	großwürfelig	quaderig-bankig	großplattig
$100 > d_{max} > 10$	kleinsäulig	kleinblockig	kleinwürfelig	kleintäfelig	schiefbrig
$d_{max} < 10$	stängelig-faserig	kubisch-ruschelig	kubisch-ruschelig	splitterig	blättrig-kleinschuppig



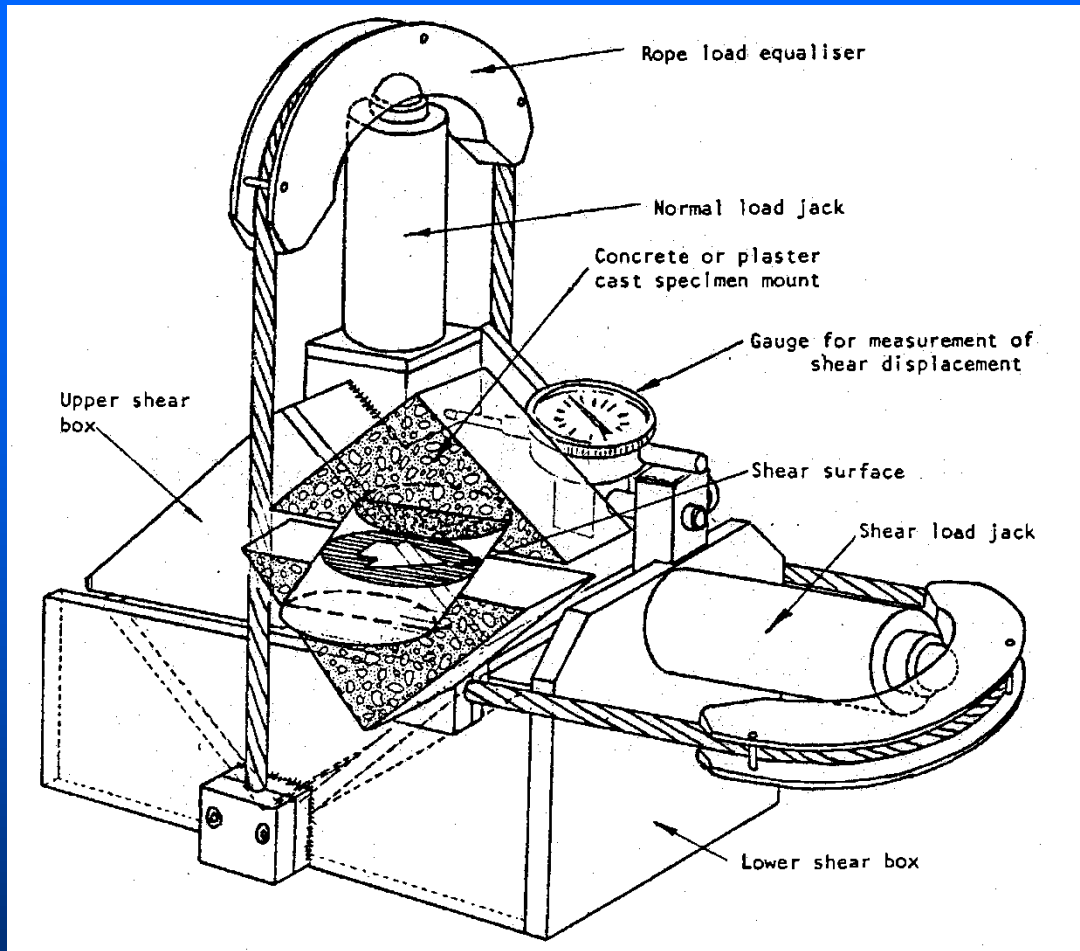












Tragbares Feld-Schergerät der Robertson Research; die Lage der Probe und der zu prüfenden Scherfläche sind angedeutet.

Beispiele für Werte der **Restreibung** (Reibungskoeffizient) für Gestein:

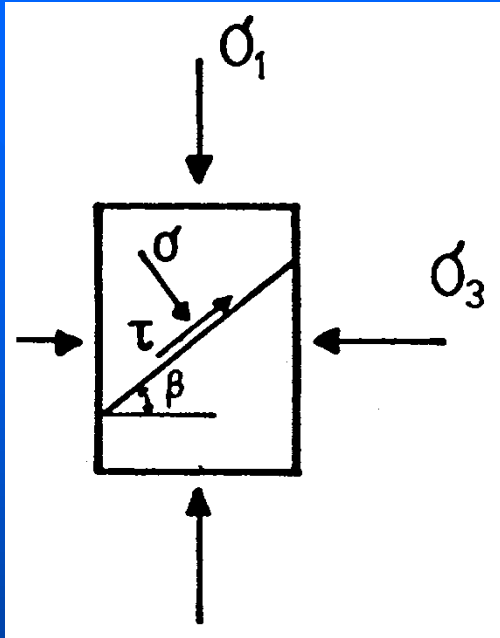
Gestein	$\mu = \tan \varnothing$ (natürliche Scherfläche)
Sandstein	0,52 $\varphi \sim 35^\circ$
Sandstein (feucht und rau)	0,61
Granit	0,60
Quarzit	0,67
Diabas	0,95
Marmor	0,62
Porphyr	0,86
Gneis	0,71 (naß : 0,61)
Tonstein	0,4 - 0,46

Beispiele für Werte der Restreibung (Reibungskoeffizient) für Gestein:



4.5 Einfluss der Trennflächen auf das Gebirgsverhalten

- nur in einfachen Fällen analytisch lösbar



$$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$$

Es gelte das Coulomb'sche Bruchkriterium

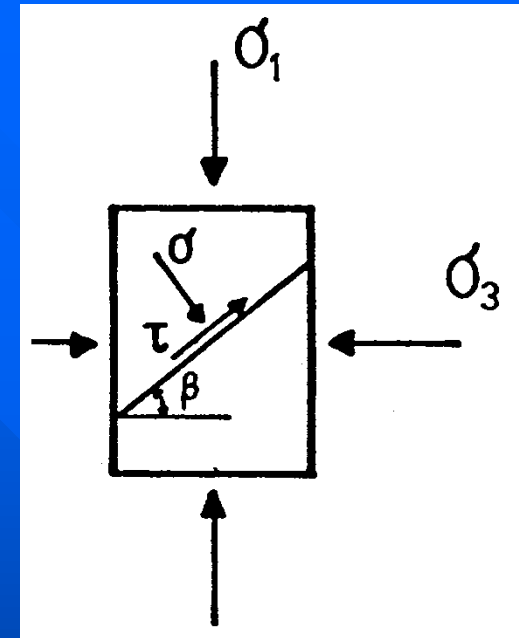
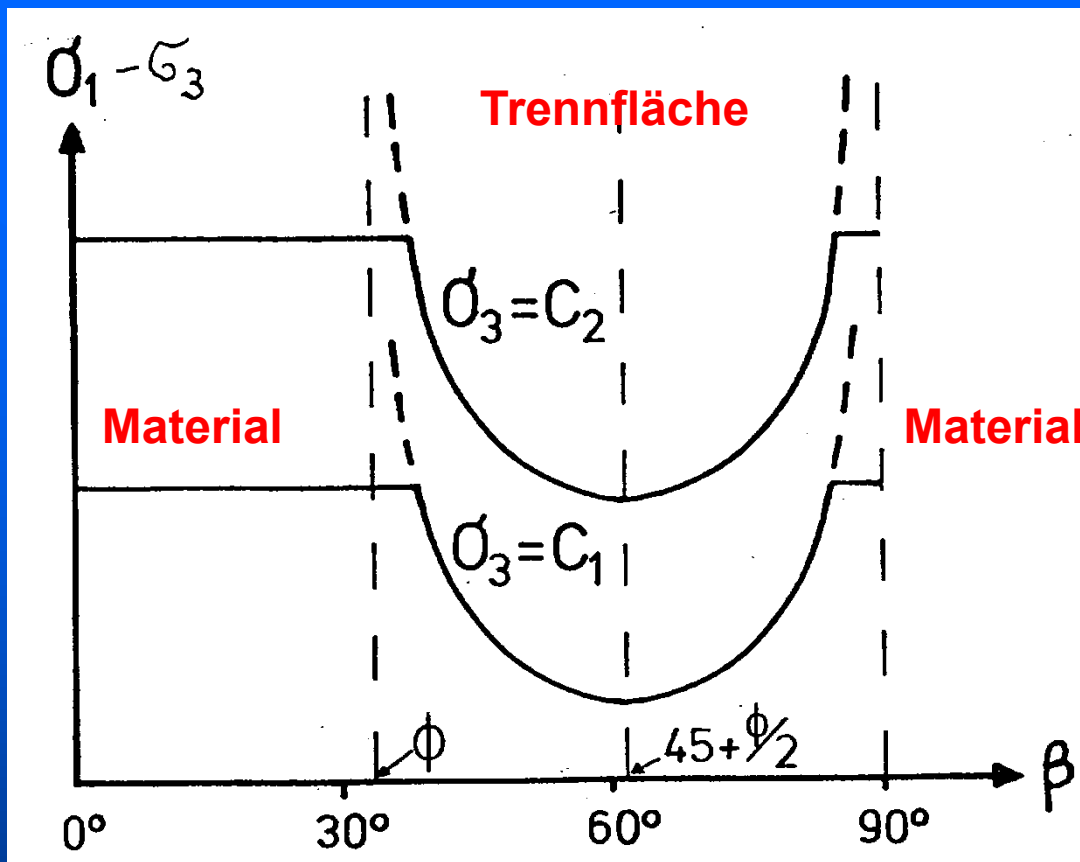
$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi$$

Der Spannungsdeviator lässt sich dann ausdrücken durch

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2 \cdot c + 2 \sigma_3 \cdot \tan \varphi}{(1 - \tan \varphi \cdot \cot \beta) \cdot \sin 2\beta} \quad \text{für } \varphi < \beta < \frac{\Pi}{2}$$

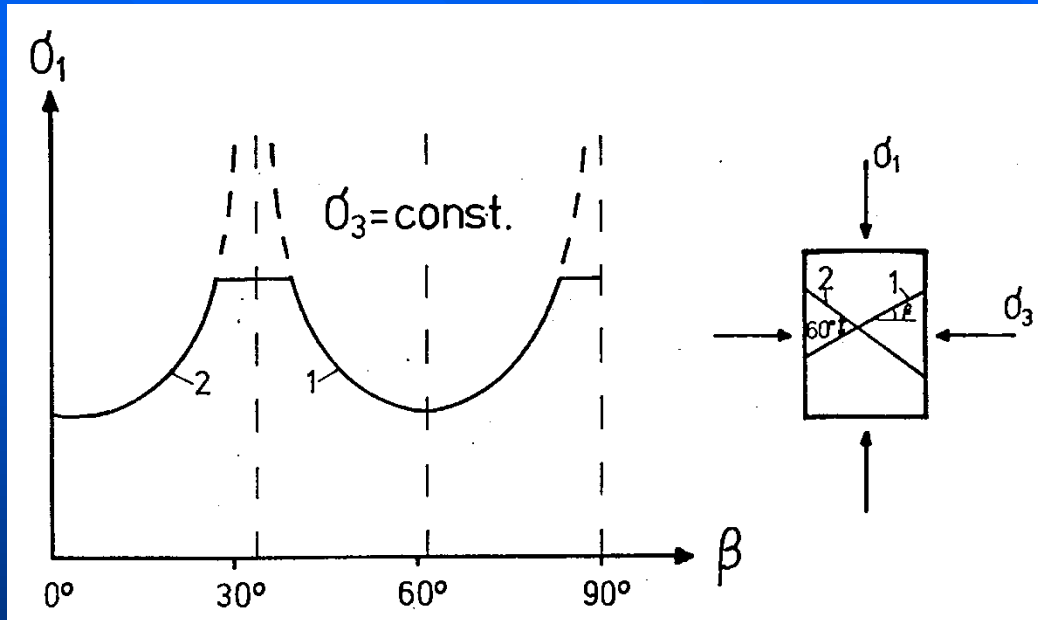
Graphische Darstellung liefert Parabel; diese schneidet die sich ebenfalls nach Coulomb ergebenden horizontalen Geraden für das intakte Material





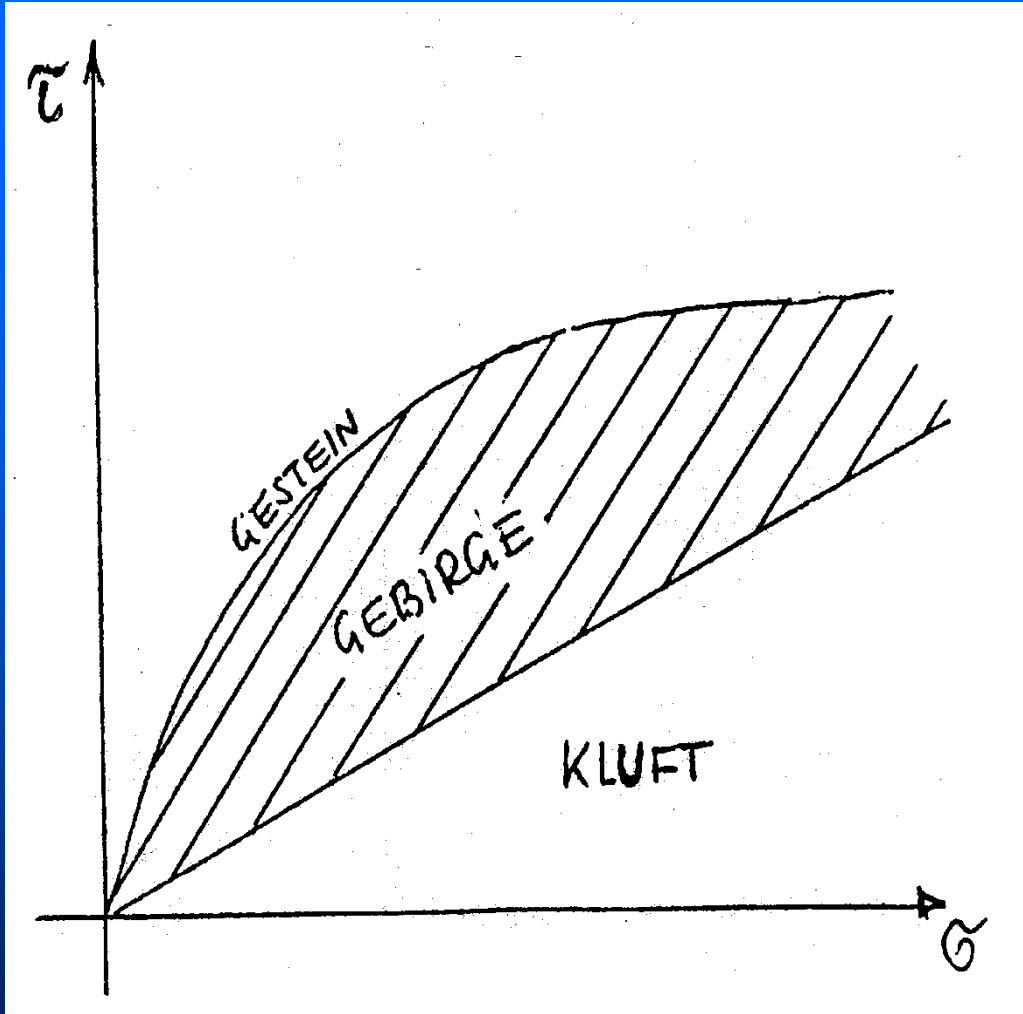
- minimale Festigkeit des geklüfteten Materials bei $\beta = 45^\circ + \phi/2$ (nur noch ca. 1/3 der Materialfestigkeit)
- außerhalb der Parabel ist die Trennfläche mechanisch unwirksam, Bruch geht durch intaktes Material

aus nachfolgendem Diagramm für 2 Trennflächenscharen erkennbar, dass Materialbruch **mit entsprechend hohen Festigkeiten nur noch geringen Anteil** an den zur Verfügung stehenden Richtungen der Bruchflächen hat.



**Je mehr
Trennflächen
desto weniger Einfluss
Gestein**

Modell auf mehrere Trennflächenscharen nicht erweiterbar, da es den Einfluss der auf die Anfangsbewegungen folgenden Spannungsänderungen nicht erfasst.



Gebirgsfestigkeit lässt sich lediglich eingrenzen zwischen Bruchfestigkeit des **Gesteins** und Scherfestigkeit der schwächsten **Trennflächenschar**.



GLIEDERUNG

1. Programm
2. Einleitung
3. Gesteinseigenschaften
4. Trennflächen
- 5. Gebirgseigenschaften**
6. Spannungen im Gebirge
7. Bruchvorgänge im Gebirge / Gestein
8. Wasser im Gebirge
9. Gesteins- und Gebirgsklassifizierung



5. GEBIRGE

5.1 Allgemeine Eigenschaften

- **inhomogen**, d.h. keine einheitliche Zusammensetzung;
- Zusammensetzung **ortsabhängig**
- Quasi-Homogenität als Hilfsbegriff
- Homogenbereiche als Entwurfsbereiche
- **anisotrop**, d.h. Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften
- **Diskontinuum**; physikalische Größen ändern sich sprunghaft.

5.2 Gebirgskennwerte

5.2.1 Gebirgsdruckfestigkeit

- **Laborversuche schwierig**; Problem repräsentativer Proben im Hinblick auf Verhältnis Kluftkörpergröße/Probengröße (Triaxialversuch an geklüfteten Großbohrkernen, Empfehlung Nr. 3, DGGT)
- **in-situ-Versuche**, Problem Kosten/statistisch zuverlässige Anzahl Messwerte.



Gebirgsdruckfestigkeit im Sinne der einaxialen Festigkeit der Gesteine kaum prüfbar; kommt auch in der Regel nicht vor;

Ausnahme: Pfeiler beim großflächigen untertägigen Abbau, Hohlraumrand Tunnel.

Größenordnung aus Rückrechnung gebrochener Pfeiler oder aus Spannungsmessungen bekannt.

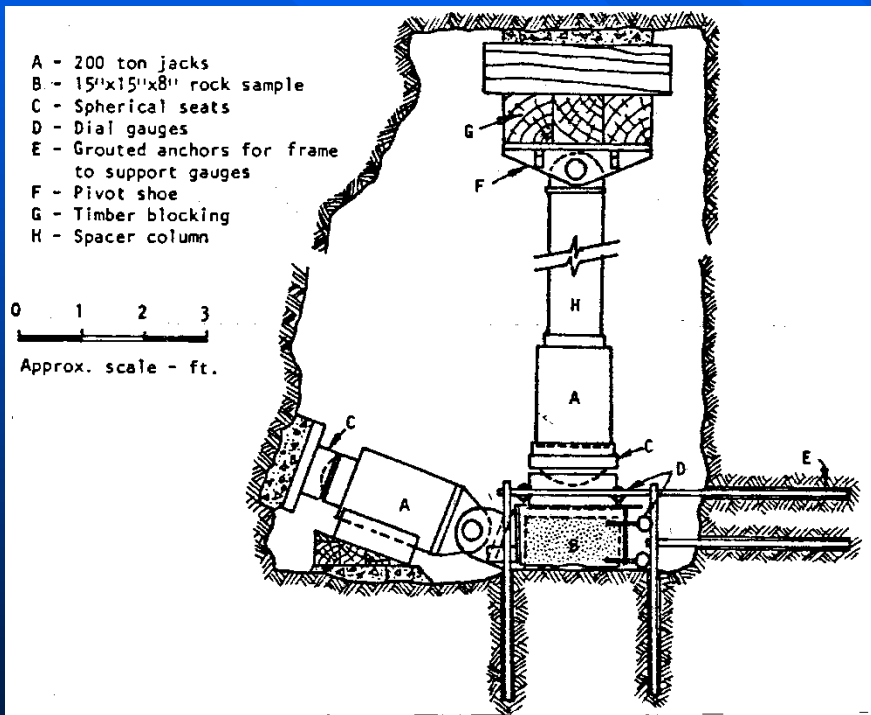
1. Kalke aus den prähistorischen Steinbrüchen von Cosslozza, Beanspruchung der Restpfeiler bis 19 MPa, entspricht der Gebirgsfestigkeit, **nicht wesentlich unter Gesteinsfestigkeit**
2. ebenfalls relativ hohe Werte für Gebirgsfestigkeiten aus dem Salz bekannt; 23 bis 36 MPa,
3. Pfeilerspannungen in der Kohle von ca. 20 MPa; Gesteinsfestigkeit ca. 30 bis 60 MPa, **d.h. Abminderung um ca. 33 - 66 %**
4. dto., jedoch Gebirgsfestigkeit ca. 3,5 MPa bei Gesteinsfestigkeiten von 20 bis 30 MPa, **Abminderung etwa 83 - 90 %, d.h. Gebirgsfestigkeit nur ca. 10 - 20 % der Gesteinsfestigkeit.**

Werte in der Regel aufgrund von Erfahrung abgeschätzt, **Auswirkungen Unsicherheiten durch Parameterstudien** erfasst (z.B. worst case).



5.2.2 Gebirgscherfestigkeit

- auch hier gilt: Scherbeanspruchung des Gebirges ein Spezialfall;
- Grundfall ist die **triaxiale Beanspruchung des Gebirges**, die deshalb allein das Verhalten des Gebirges unter Belastung umfassend wiedergibt;
- gemessen in Großscherversuchen (Empfehlung Nr. 4, DGGT),
- **Maßgebend: Trennflächenorientierung und Eigenschaften**



5.2.4 Elastische Parameter

- Definition siehe Kapitel 3.
 - Ermittlung durch Laborversuche scheidet aus (Größenordnung, repräsentative Proben)
 - in-situ-Einaxial-Versuch an Großproben
 - **Dilatometerversuch im Bohrloch** (Empfehlung Nr. 8, DGGT)
 - **Lastplattenversuch** (Empfehlung Nr. 6, DGGT)
 - **Schlitzentlastungsversuch** (Empfehlung Nr. 7, DGGT)
 - **Druckkissenbelastungsversuch** (Empfehlung Nr. 7, DGGT)
- Nachteil:**
- Es wird nur ein kleiner Teil des Gebirges belastet
 - Bohrloch muss standsicher sein
 - beide Parameter (E und σ) stark anisotrop



5.2.5 Indexwerte


- Bedeutung bereits bei der Gesteinsfestigkeit dargelegt;
- In-situ Versuche sehr aufwendig, geringe Anzahl Versuche; Kosten !
- deshalb Indexwerte, die allgemeines Zustandsbild über Gebirge geben

- 1) **geophysikalische Messungen**, speziell Wellengeschwindigkeiten für räumliche Aussagen
Größenordnung: 100 - 200 m/s - 4.000 - 6.000 m/s und mehr
Klüftigkeit, Verwitterungszustand etc.

Insbesondere durch Seismik; kleinräumlich (Portalzonen)
Hammerschlagseismik, großräumig und bei großen Tiefen
Sprengseismik;

- 2) **RQD-Wert**, bezogen auf Bohrungen, wichtiger Eingangswert für moderne Gebirgsklassifizierungen; leicht zu messen
→ Bohrungen so teuer, dass vollständige Auswertung geboten!



	KERNGEWINN [cm]	MODIFIZIERTER KERNGEWINN (RQD-Wert) [cm]
	17	17
	6	
	4	
	7	
	8	
	15	15
	20	20
	7	
	5	

KERNSTRECKE: 90cm

89 52

KERNGEWINN: $\frac{89}{90} = 99\%$ RQD : $\frac{52}{90} = 58\%$



GLIEDERUNG

1. Programm
2. Einleitung
3. Gesteinseigenschaften
4. Trennflächen
5. Gebirgseigenschaften
- 6. Spannungen im Gebirge**
7. Bruchvorgänge im Gebirge / Gestein
8. Wasser im Gebirge
9. Gesteins- und Gebirgsklassifizierung



6. Spannungen im Gebirge

6.1 Primärspannungen

- im natürlichen Zustand im Gebirge vorhandene Spannungen
- mehrere Ursachen am **Primärspannungszustand** beteiligt; zunächst und in jedem Fall

a) Eigengewicht

- Annahme, vertikale Spannung σ_z sei Hauptnormalspannung; die dazu senkrechten Spannungen (σ_x, σ_y) dann ebenfalls Hauptnormalspannungen

dann $\sigma_z = \gamma \cdot z$

schwieriger ist Bestimmung σ_x, σ_y

allgemein: $\sigma_h = \lambda \cdot \sigma_v$

bzw.

$$\lambda = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$$

λ ist kein elastischer Parameter des Gebirges, nicht abzuleiten, nicht theoretisch bestimmbar, entweder aus Erfahrung angenommen oder in-situ gemessen;

- aus Erfahrung $0,2 \leq \lambda \leq 3$
- bei $\lambda > 0,4$ weitere Ursache:



b) tektonische (Rest) Spannungen

- **Tektonik:** Lehre vom Bau der Erdkruste sowie von den Bewegungen und Kräften, die aufgrund geologischer Ursachen auf diese einwirken oder eingewirkt haben
- Ursache von Krustenspannungen: Gebirgsbildungen (Orogenese); globale Betrachtung durch die Plattentektonik

→ Häufig erhöhte Horizontalspannungen

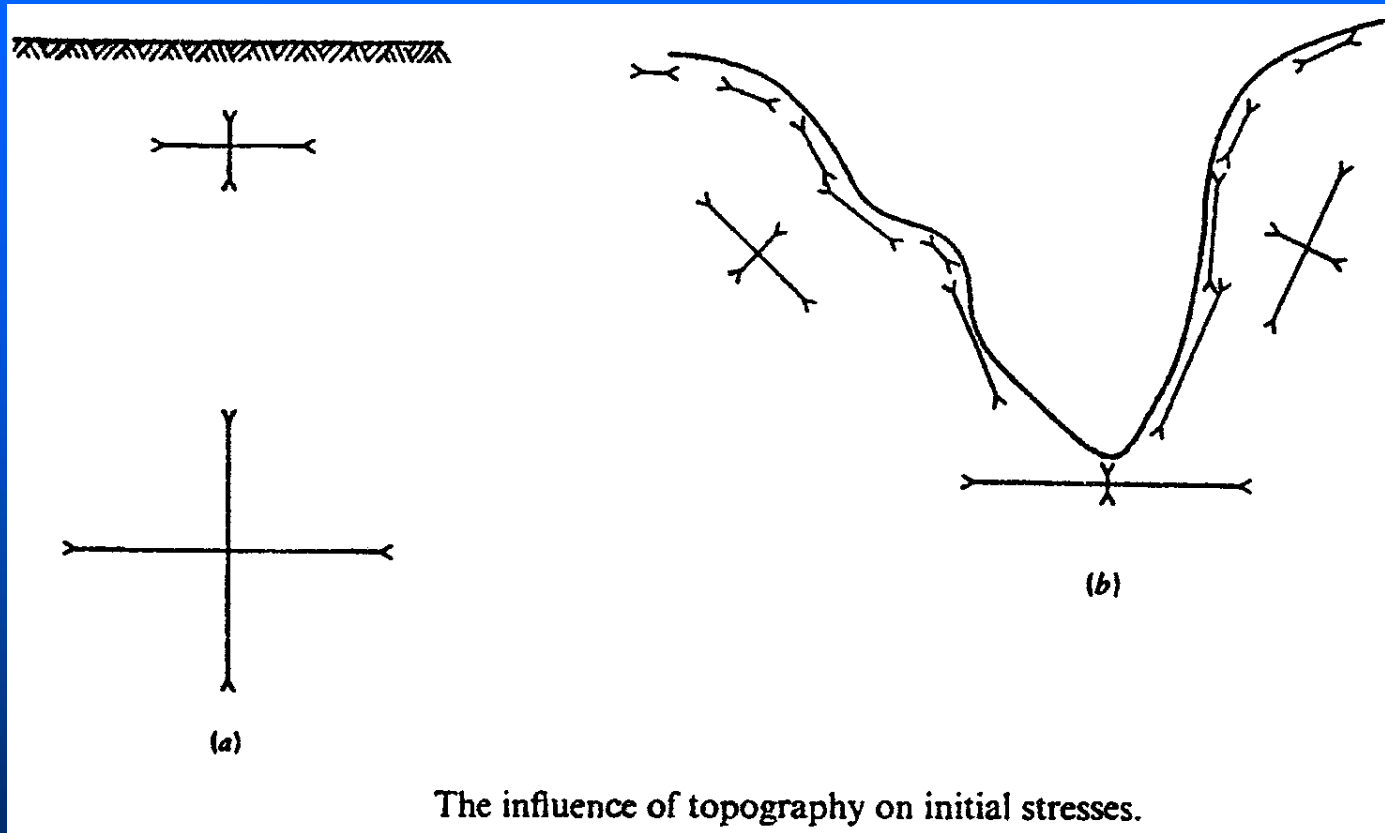
- Effekt: Faltung, Bruchtektonik, Erdbeben
- auch in Deutschland „junge Krustenbewegungen“
- siehe **DIN 4149 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten“**
- auch in tektonisch ruhigen Gebieten, in denen keine Beben stattfinden, noch latente Spannungen vorhanden, die teilweise ein Mehrfaches von σ_z betragen können (Restspannungen)

Achtung: Auch Primärspannungen sind anisotrop! Einfluss auf Tunnelbau!



Annahme, σ_H , σ_V Hauptspannungen, nur bei horizontalem Gelände richtig.

- Einfluss der Geländeformen



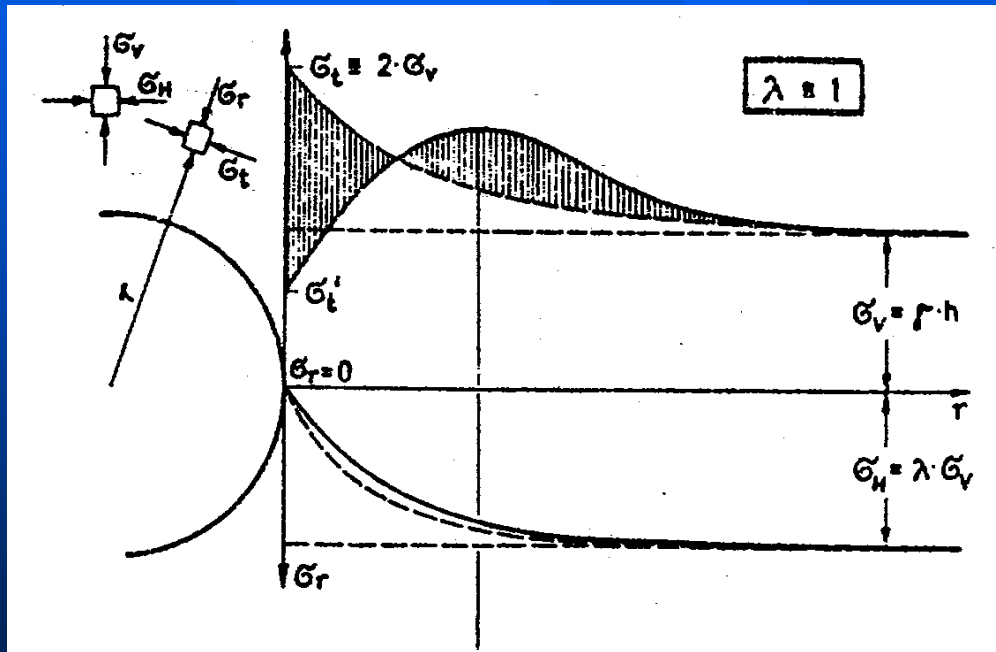
- Entspannung in den Flanken (tiefer) Täler, Talzus Schub, atektonische Klüftung





6.2 Sekundärspannungen

- entstehen durch künstliche Eingriffe (Aushub von Einschnitten, Tunnel, Baugruben)
- Spannungsänderungen rufen Verformungen hervor (Konvergenz), bis neues Gleichgewicht erreicht oder Bruch eintritt**
- Plastifizierung, Gebirgstragring
- Beispiel Spannungen um einen Hohlraum

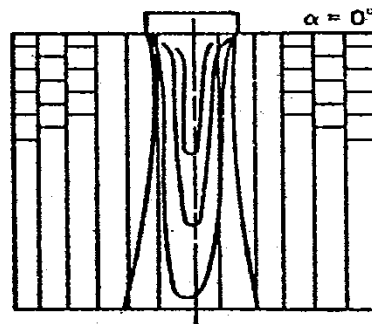
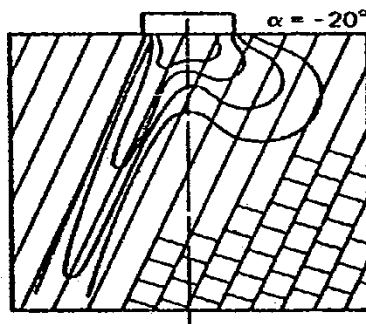
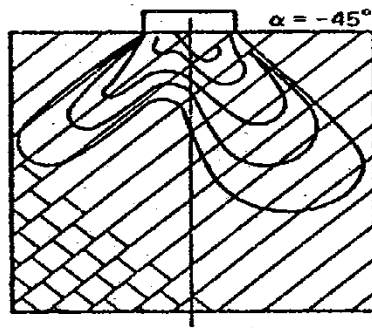
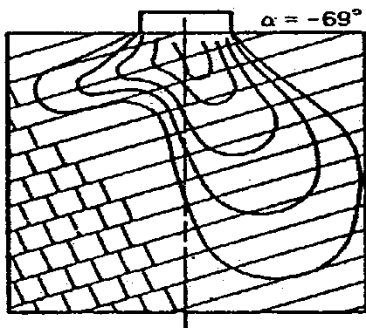
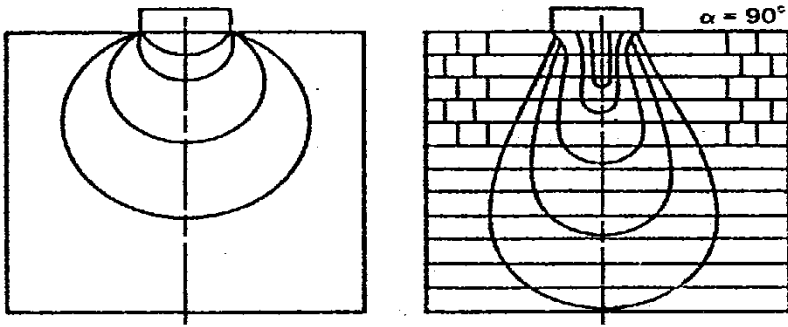


Spannungszustand am Hohlraumrand ohne Verbau

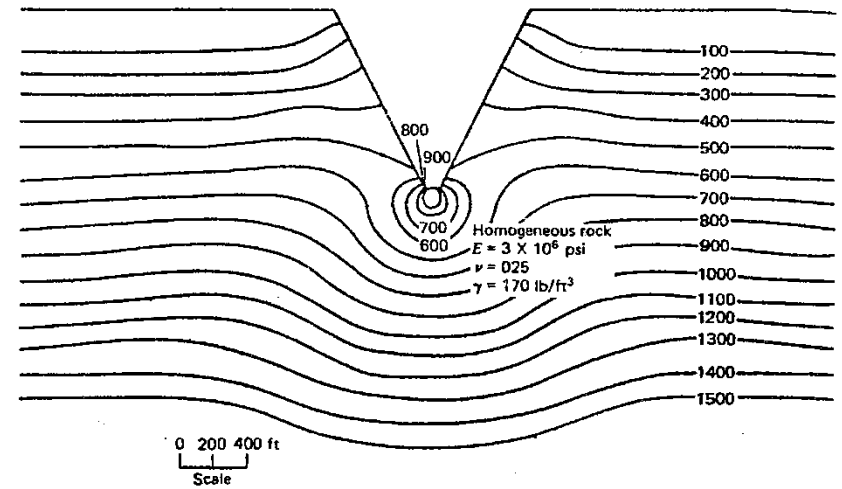
6.3 Einfluss der Trennflächen auf die Spannungsverteilung

- Spannungsverteilung bzw. Richtung der Hauptspannungen **vom Gefüge abhängig**
- Ausgangspunkt Spannungsverteilung unter Fundament, aus Bodenmechanik bekannte „Druckzwiebel“
→ wird verformt infolge Trennfläche; Form von Gefügeorientierung abhängig;
- Achtung! **auch Verformungen dann richtungsabhängig: Verkantungen!**
- **Kritik an Rechenergebnissen und Modellen mit Spannungsverteilungen für isotropes Material oder Symmetrie ! (z.B. GGU)**

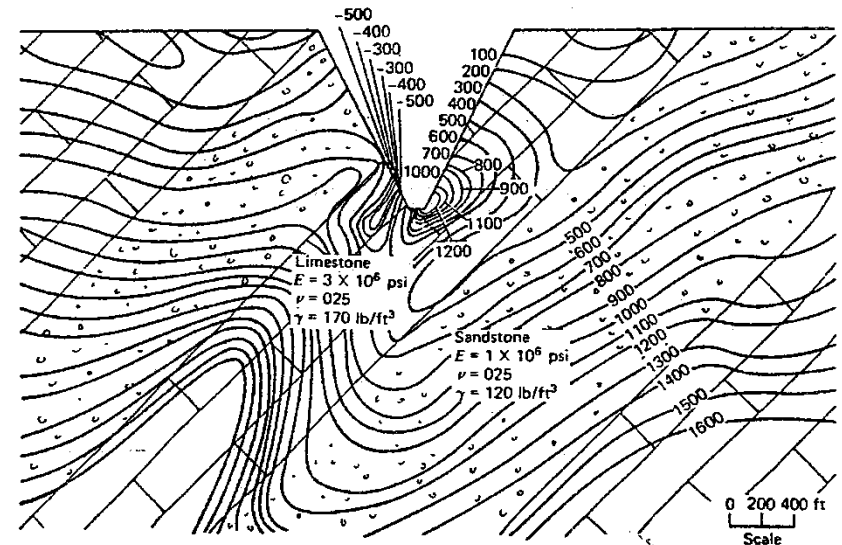




Lines of equal stress (bulbs of pressure) determined by Gaziev and Erlikhman (1971) from models. (α is defined in Figure 9.9.)



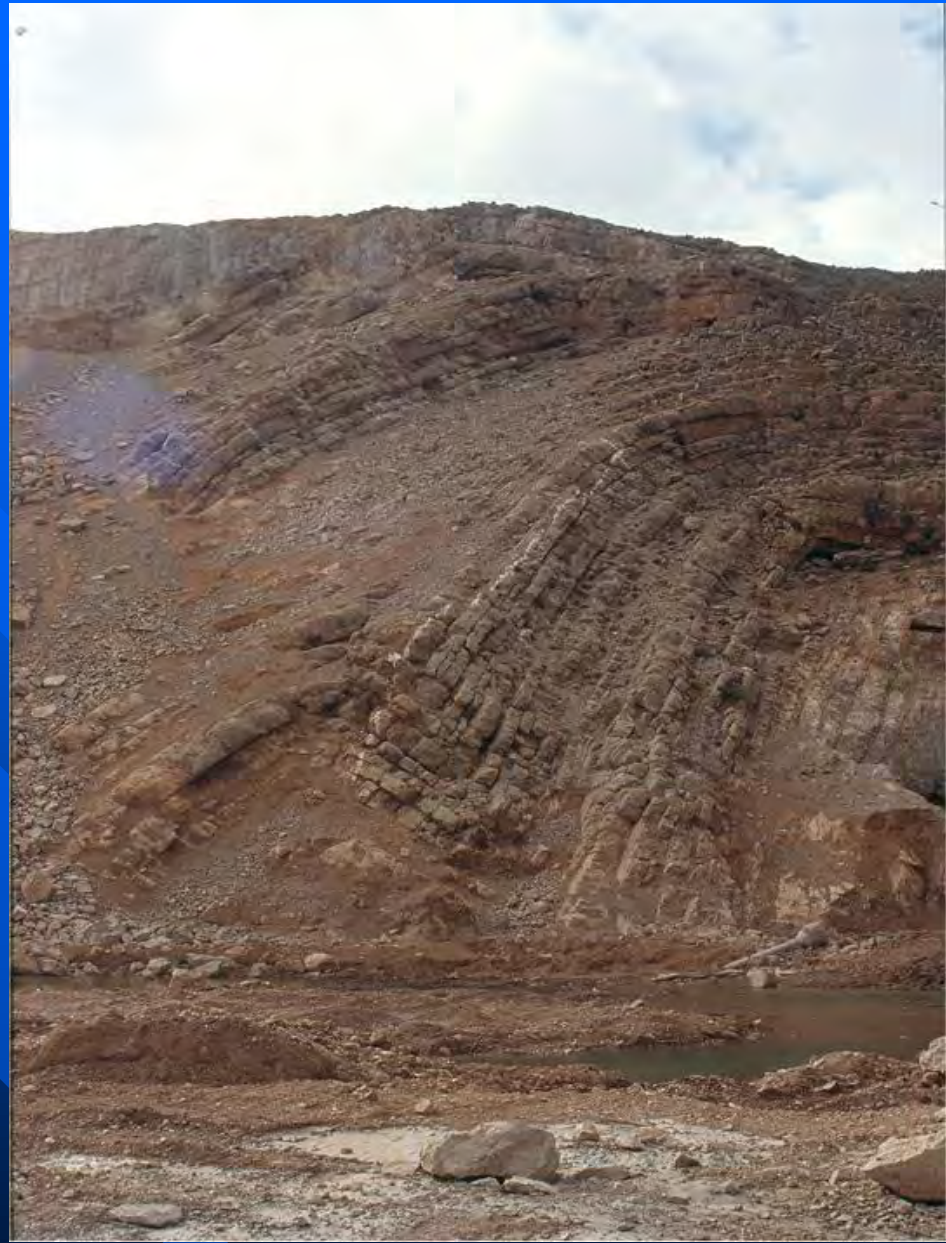
(a)



(b)

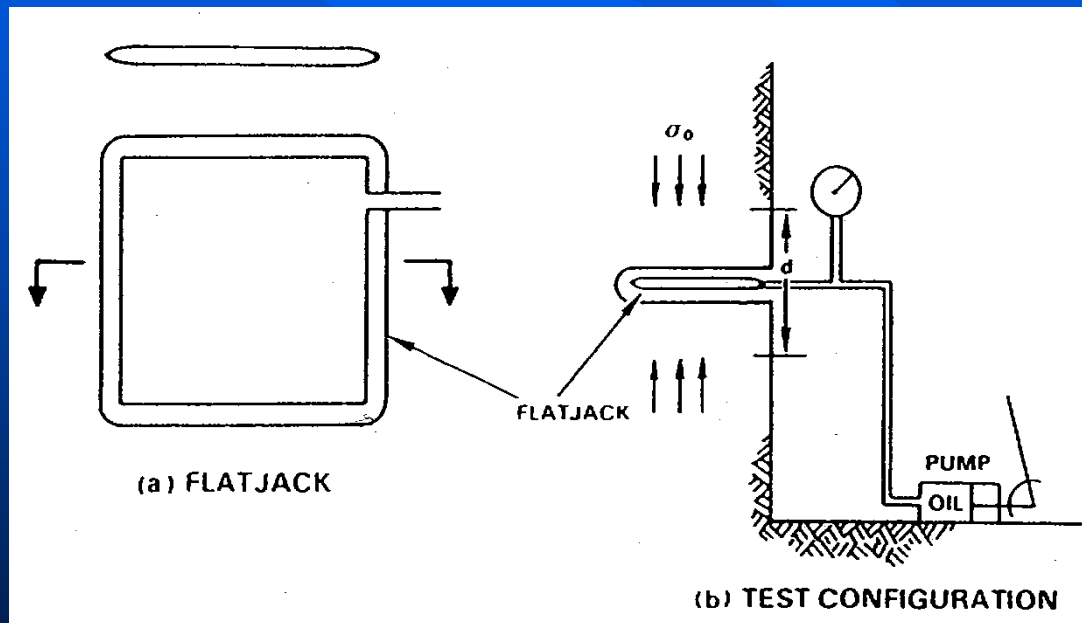
Comparison of maximum shear stresses beneath valleys in homogeneous (a) and heterogeneous (b) formations. Units of shear stress are hundreds of pounds per square foot.





6.4 Spannungsmessungen

- Hydraulic Fracturing-Methode (ISRM-Empfehlung „Stress Determination“)
- Überbohr-Entlastungsversuch (Empfehlung Nr. 14, DGGT)
- **Schlitzentlastungsversuch** (Empfehlung Nr. 7, DGGT)
- **Druckkissenbelastungsversuch** (Empfehlung Nr. 7, DGGT)



Druckkissenbelastungsversuch



Phase

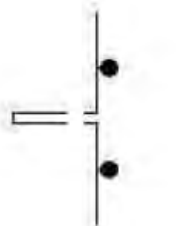
0
Ausgangszustand

Anordnung von
Messpunkten für die
Verschiebungsmessungen

Ansicht

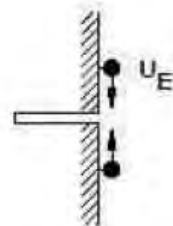
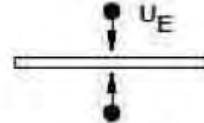


Querschnitt



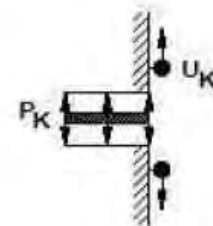
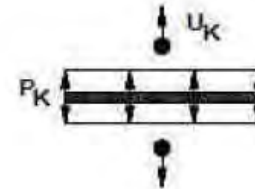
Nullmessung

1
**Entlastung durch
Sägeschlitz**



Entlastungs-
verschiebung

2
**Druckkissen im
Sägeschlitz
(Kompensation)**



Kompensation der
Entlastungsverschiebung
 $U_K = -U_E$

U_E Entlastungsverschiebung infolge Sägeschlitz

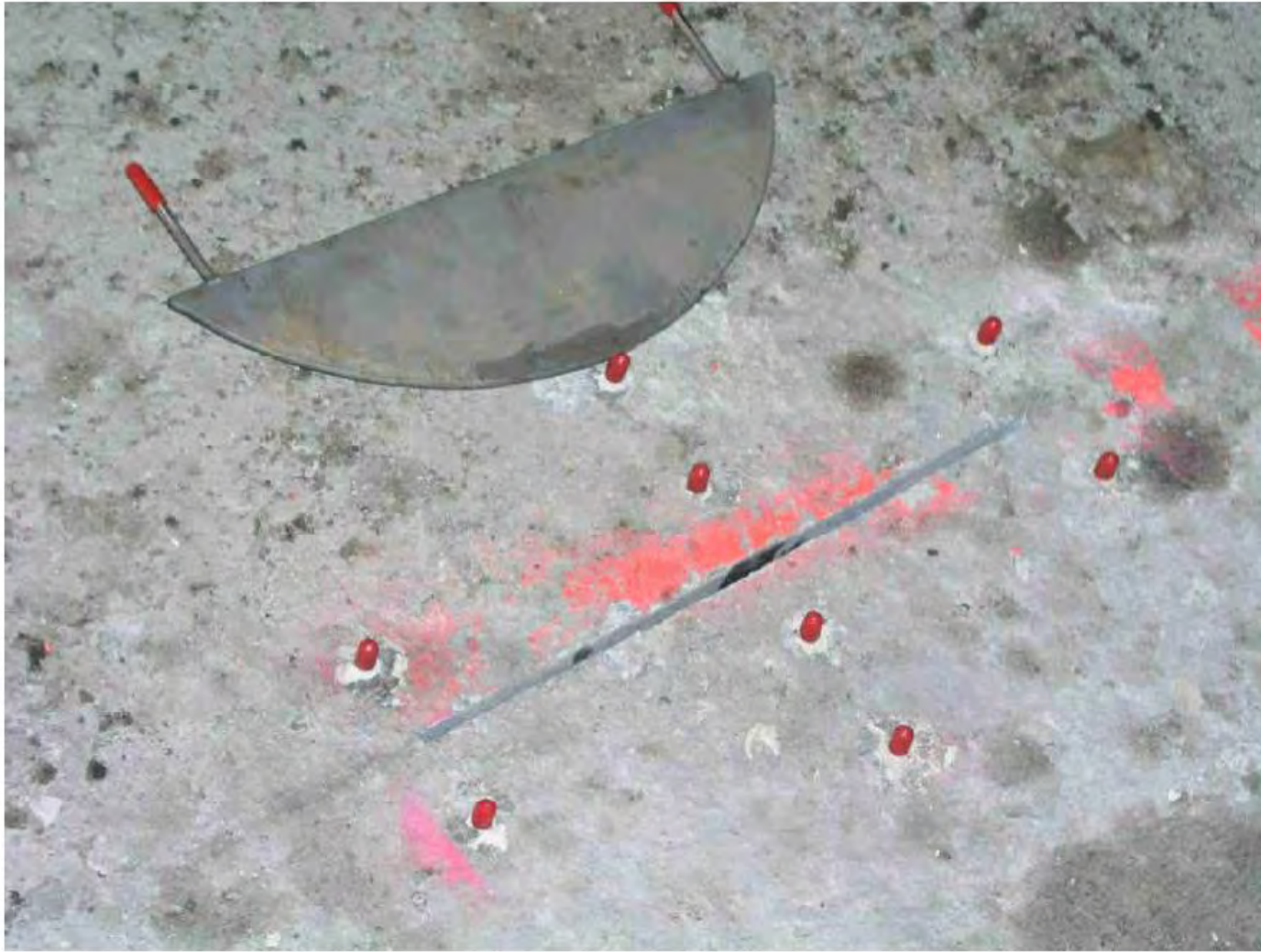
U_K Rückverschiebung bei Kompensation

P_K Kompensationsdruck im Schlitz

Messprinzip der Schlitzentlastungs- und Kompensationsmethode



Spannungsmessung – in situ



Spannungsmessung – in situ



Spannungsmessverfahren - Schlitzentlastung



Spannungsmessverfahren - Schlitzentlastung



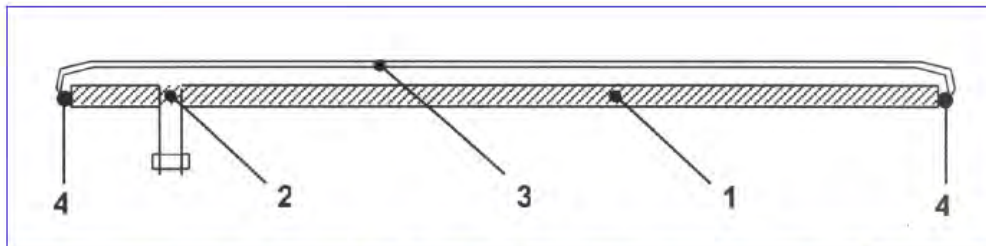
Spannungsmessung – in situ

Auswertung der Versuchsergebnisse:

$$\sigma_n = p \cdot K_m \cdot K_a$$

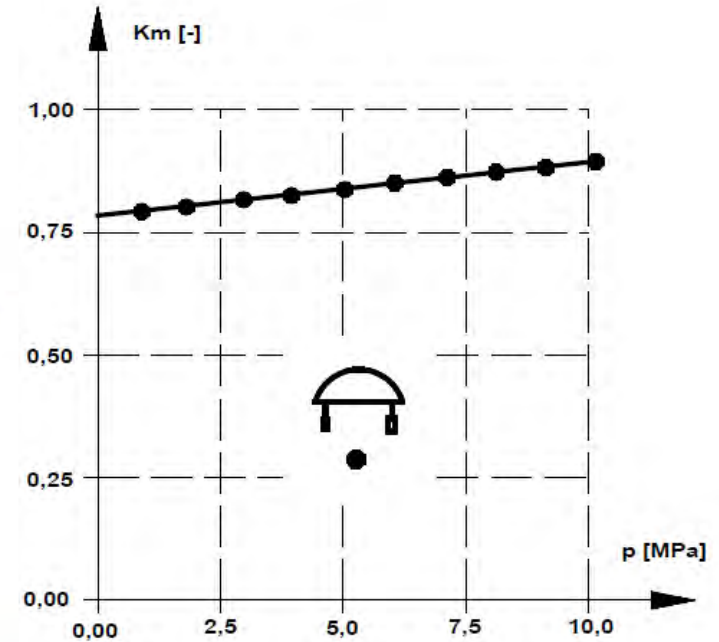
mit:

- σ_n = gesuchte Randspannung im Tunnelmauerwerk
- p = Öldruck im Druckkissen bei Kompensation
- K_m = **Formkonstante** des Druckkissens
- K_a = $A_{\text{jack}}/A_{\text{cut}}$ (Verhältnis Kissen- / Schlitzfläche)



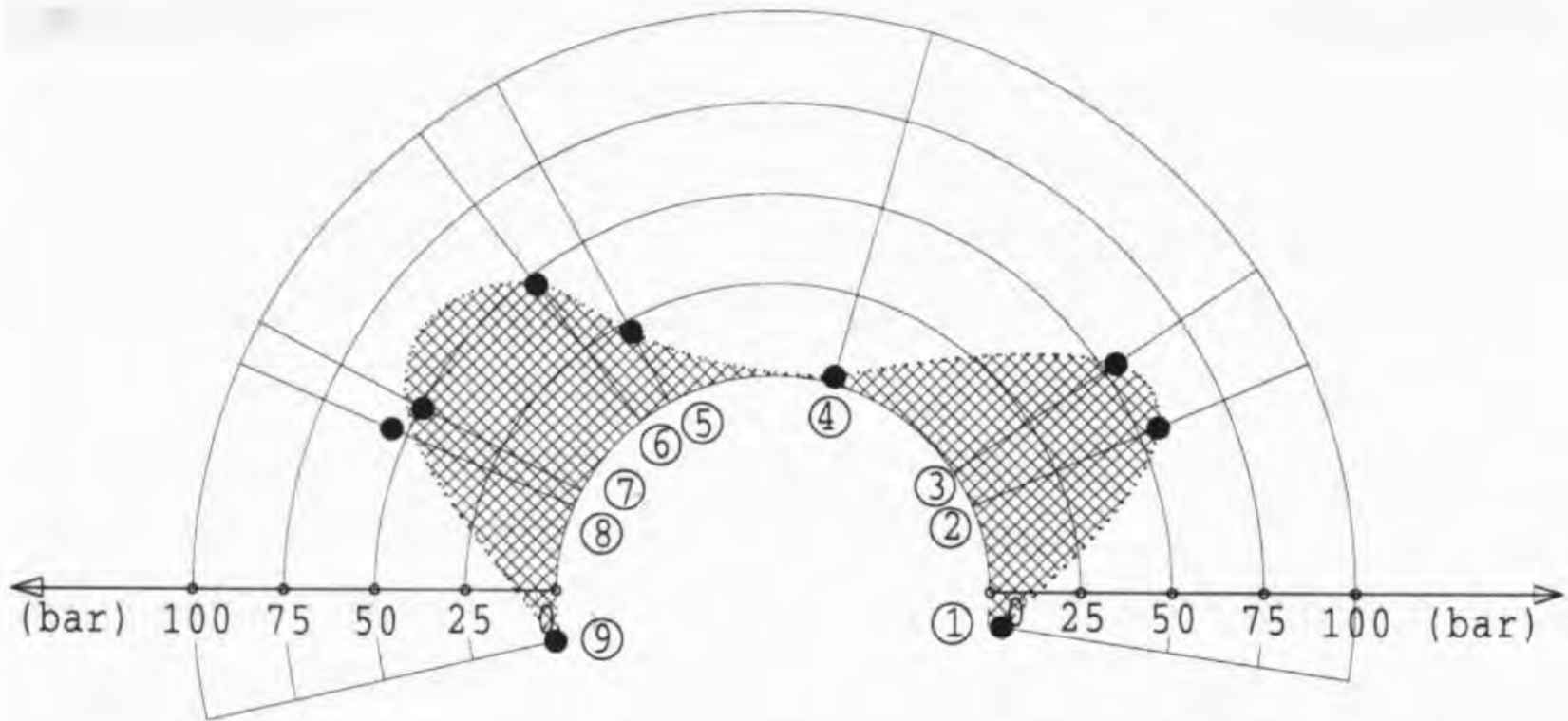
Unsymmetrisch aufgebautes Druckkissen neuerer Bauart

(1) Basisplatte; (2) Öleinlassstutzen; (3) Flexible Deckplatte; (4) Laserschweißnaht.



Faktor K_m - Kalibrierkurve für Druckkissen mit kreissegmentförmigem Querschnitt (konventionelle Bauart) (nach ROSSI, 1987)

Spannungsmessung – in situ



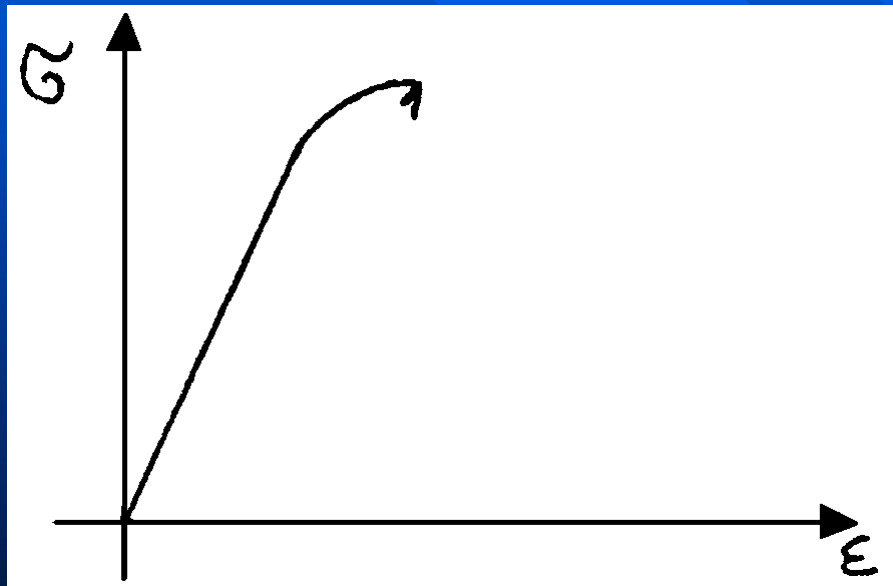
Ergebnis von insgesamt 9 Schlitzentlastungs- und Kompensationsversuchen:
Verteilung der Tangentialspannungen an der Laibung des Tunnelmauerwerks

6.5 Spannungs-Verformungsverhalten

6.5.1 Allgemeine Klassifizierung

Je nach Geometrie der Spannungs-Verformungskurve erfolgt eine Klassifizierung des Material-/ Gebirgsverhaltens, **grundsätzlich:**

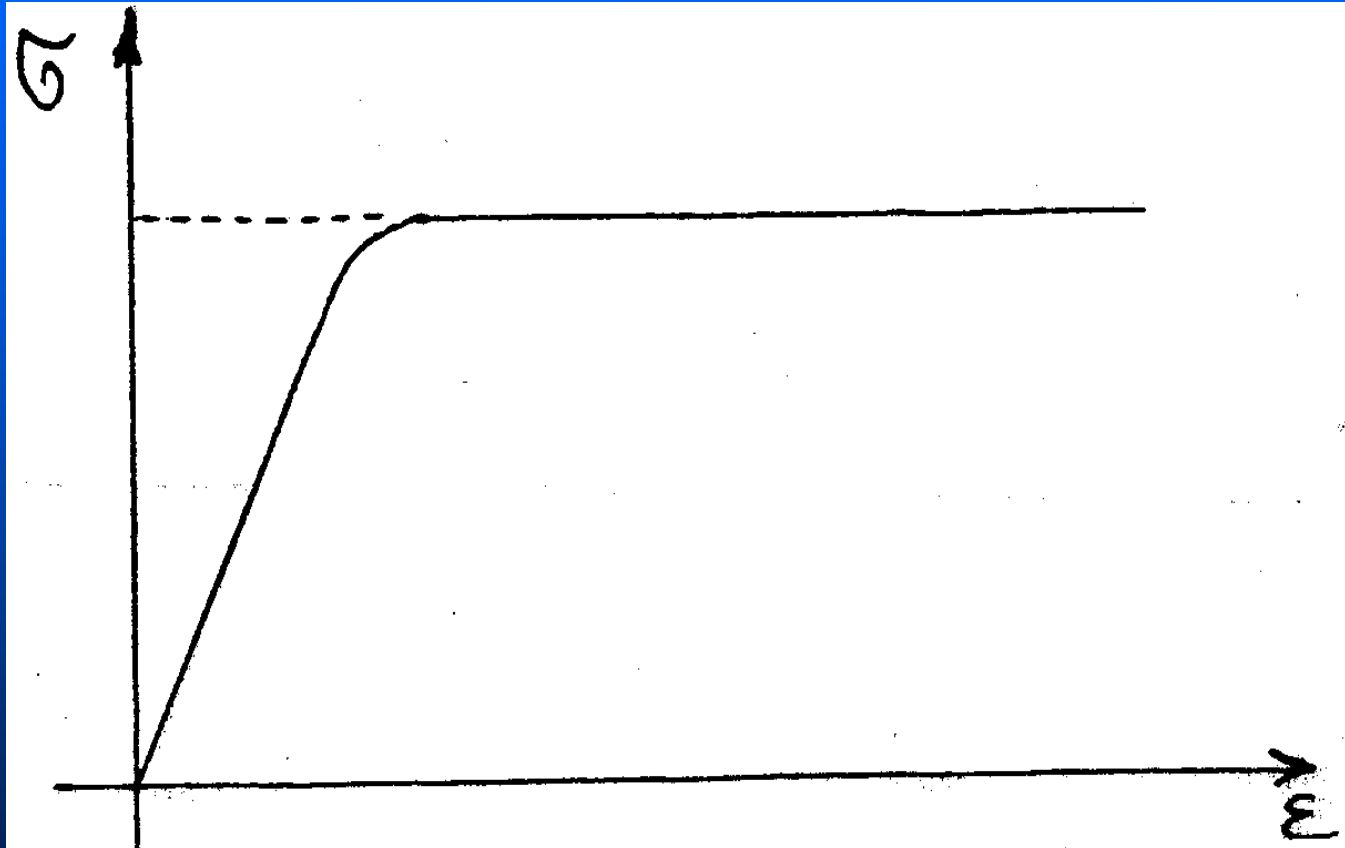
1. **Sprödes Materialverhalten:** oberhalb einer bestimmten (Bruch-) Spannung tritt der Bruch ein, meist ohne nennenswerte vorhergehende Verformung (Glas, Gußeisen)



Sprödbbruch

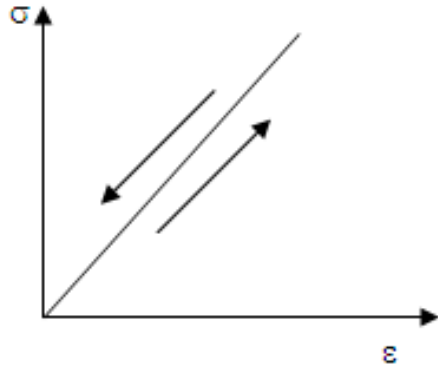


2. **Zähes (duktiler) Materialverhalten:** oberhalb einer bestimmten Spannung tritt plastisches Fließen auf; d.h. andauernde Verformung bei konstanter Spannung (Stahl, Wachs).

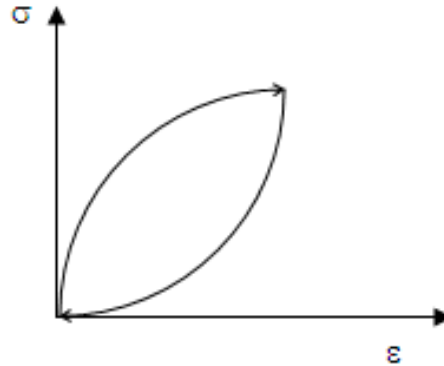


duktiler Verhalten

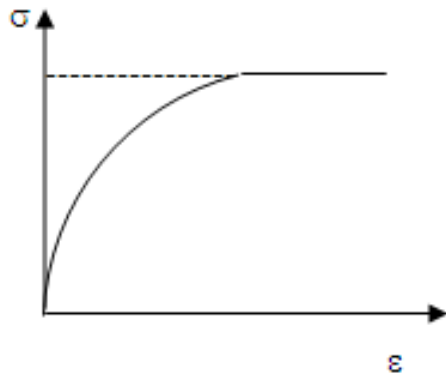
Material-/ Gebirgsverhalten



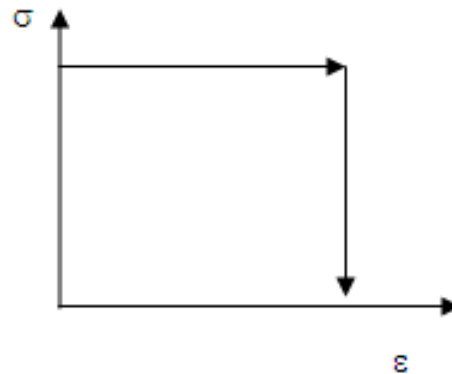
linear elastisch



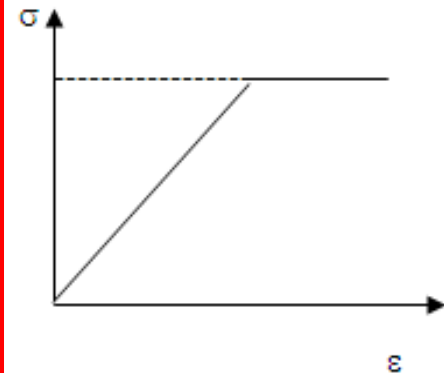
nicht-linear elastisch



plastisches Materialverhalten



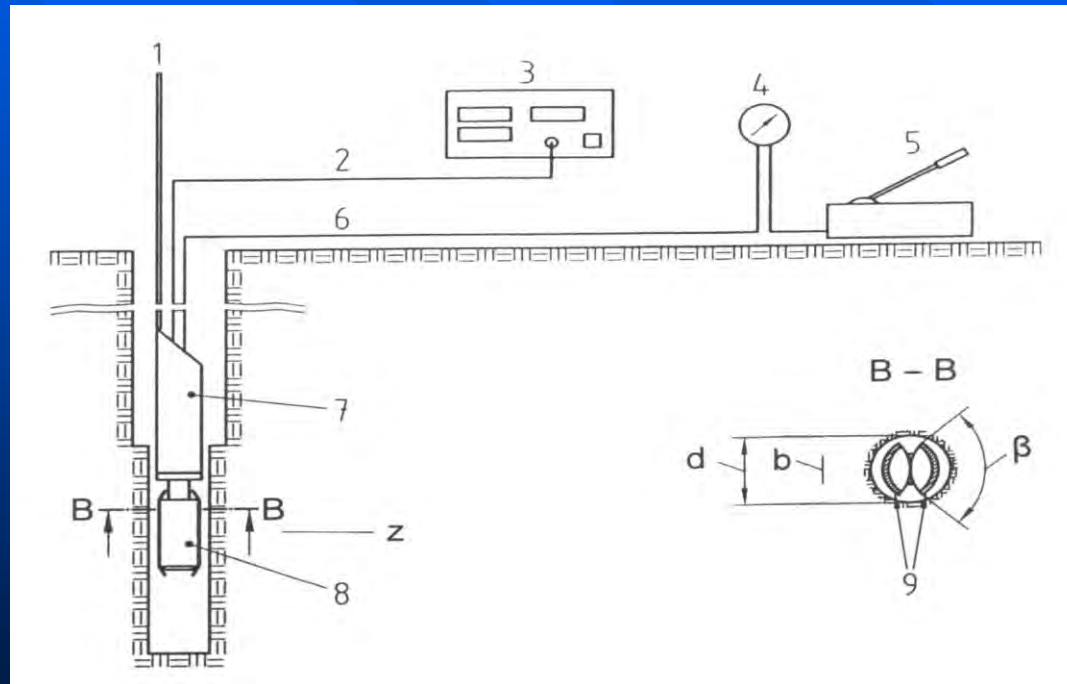
ideal plastisch



ideal elasto-plastisch (St. Venant)

6.5.3 Messung des Verformungsverhaltens

- in-situ-Versuche/Versuchsmaßstab
- Großdruckkissenversuche (Empfehlung ISRM „Large Flat Jack Technique“)
- Dilatometerversuche (Empfehlung ISRM „Flexible Dilatometer“)
- Lastplattenversuch (Empfehlung DGGT)
- **Seitendruckversuch / Dilatometerversuch** (Empfehlung DGGT)



Ettlinger Seitendrucksonde



GLIEDERUNG

1. Programm
2. Einleitung
3. Gesteinseigenschaften
4. Trennflächen
5. Gebirgseigenschaften
6. Spannungen im Gebirge
- 7. Bruchvorgänge im Gebirge / Gestein**
8. Wasser im Gebirge
9. Gesteins- und Gebirgsklassifizierung

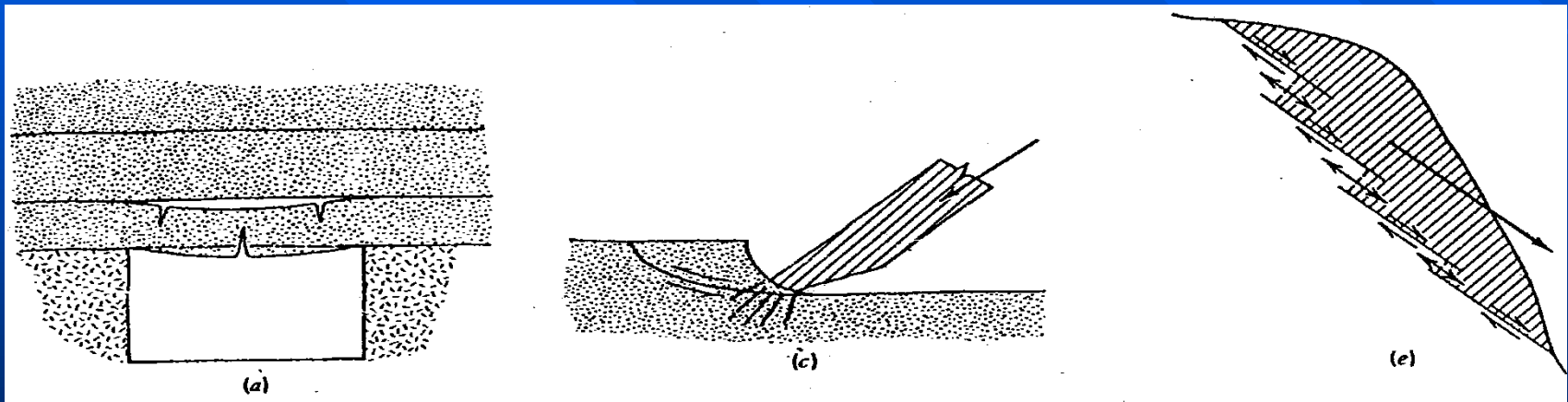


7. BRUCHVORGÄNGE IM GEBIRGE/GESTEIN

7.1 Bedeutung

wenn Spannungen im Gebirge/Gestein bekannt, interessieren weitere Fragen

1. welche **Verformungen** treten auf ?
2. wo liegt die Bruchfestigkeit des Materials/Gebirges bei gegebenem Spannungszustand ?
3. wie groß ist die **Sicherheit gegen Eintreten des Versagens**?



Dafür keine exakte Theorie, mathematisch beweisbar, vielmehr eine Reihe von verschiedenen Bruchhypothesen mit unterschiedlicher Anwendbarkeit und Bedeutung.

7.2 Brucharten

Materialbruch: Bruch geht durch intaktes Gestein (selten)

Gefügebruch: Bruch folgt vorgegebenen Schwächeflächen, d.h. Trennflächen; häufig tritt eine Kombination beider Bruchtypen auf (häufig)

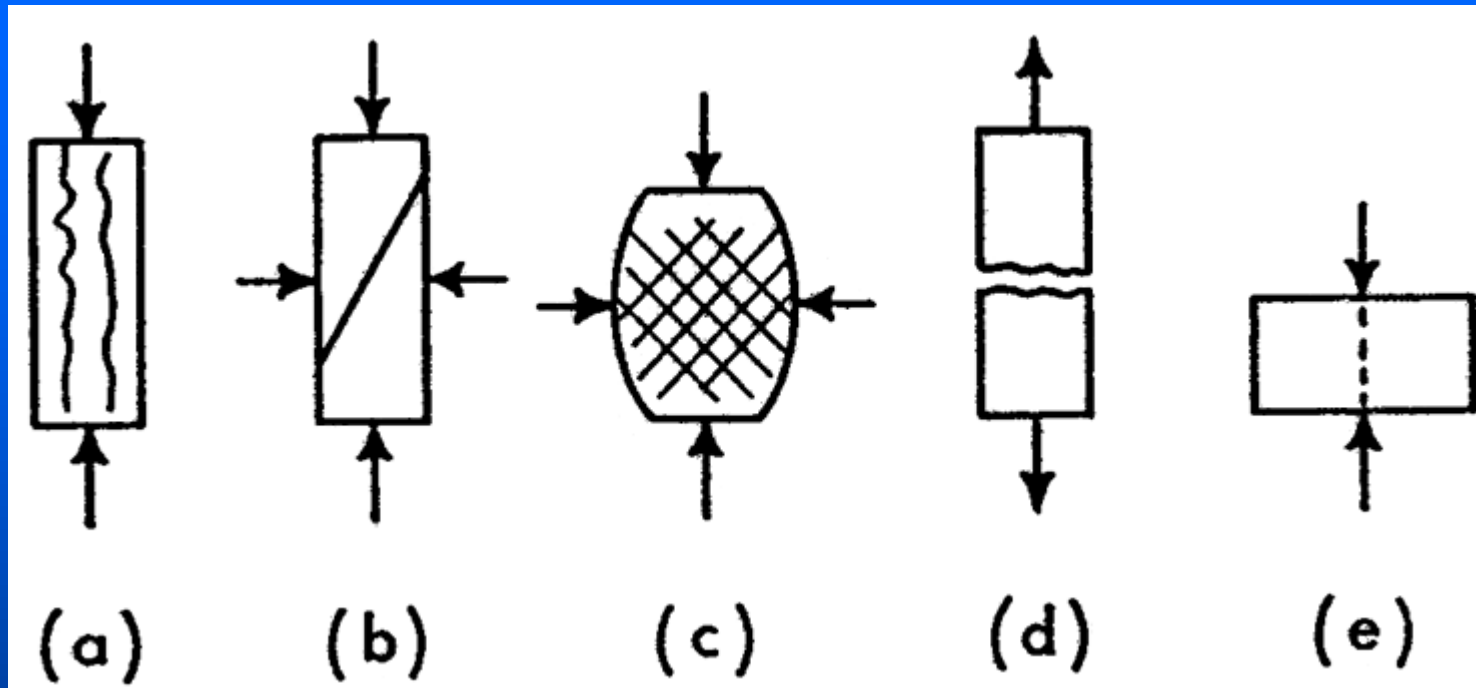
Trennungsbruch: Voraussetzungen sind überwiegend Zugspannungen und nicht zu plastisches Material. Hackige, splitterige, muschelige Flächen.

Gleitungsbruch: Voraussetzung ist das Überwiegen von Druckspannungen, vorwiegend bei plastischen Metallen; glatte Bruchoberfläche liegt in der Ebene der max. Schubspannungen; Harnische.

Verschiebungsbruch: Auftreten „vagabundierender“ Spannungen. Volumenvergrößerung ! Form der Bruchfläche zwischen Trenn- und Gleitungsbruch. Richtung der Bruchfläche zwischen Trennfläche und Ebene der maximalen Schubspannung. Es vermischen sich Gleitungen entlang kristallographisch bestimmter Flächen und Spaltungen entlang von Kristallflächen.



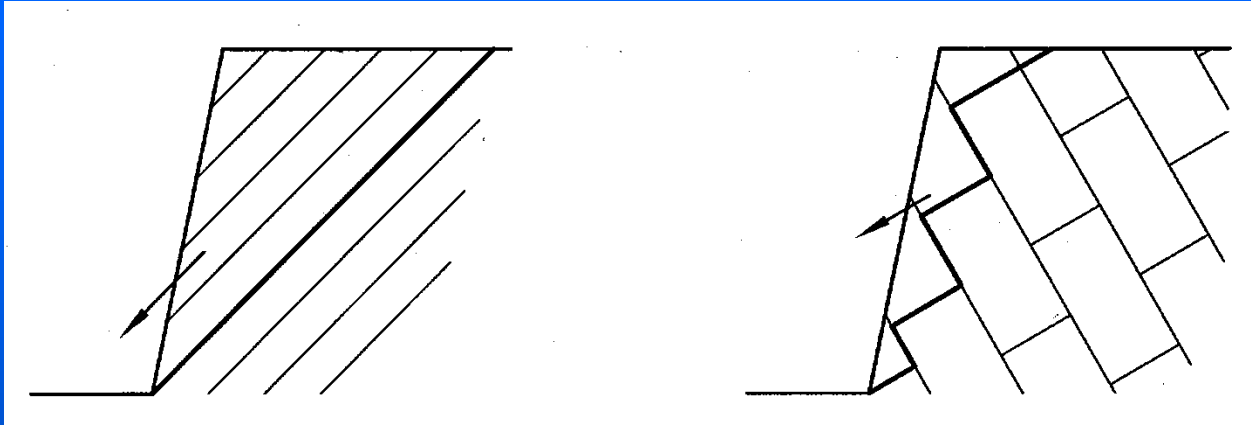
typische Bruchbilder bei verschiedenen Beanspruchungsarten:



- (a) Bildung von Längsrissen im einaxialen Druckversuch,
- (b) Bildung einer Scherfläche,
- (c) Ausbildung multipler Scherflächen,
- (d) Zugriß,
- (e) Spaltzugriß

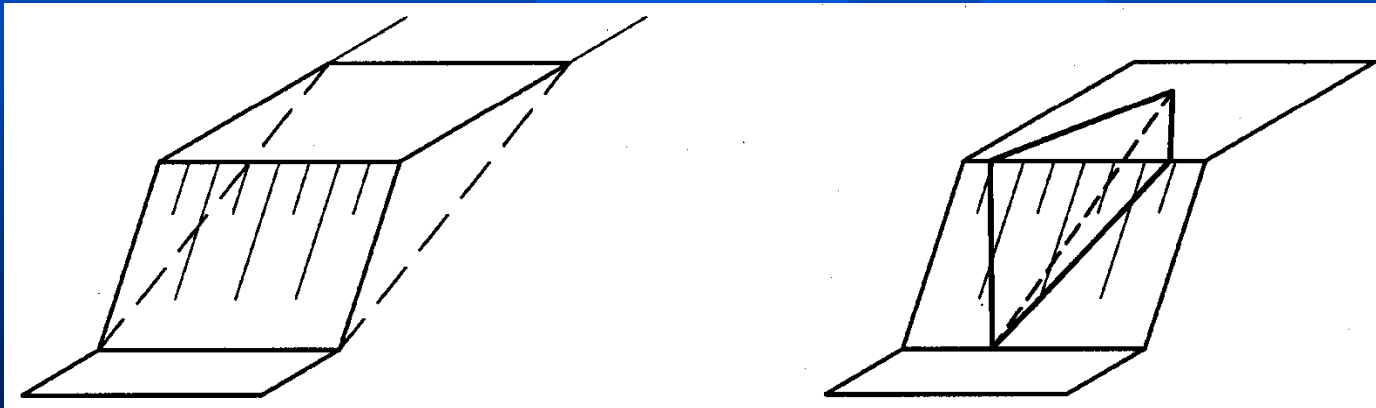
7.5 Starrkörperversagen

7.5.1 Gleiten - eben/räumlich



a) Ebenes Gleiten auf kontinuierlicher Bruchfläche

b) Ebenes Gleiten auf gestufter Gleitfläche

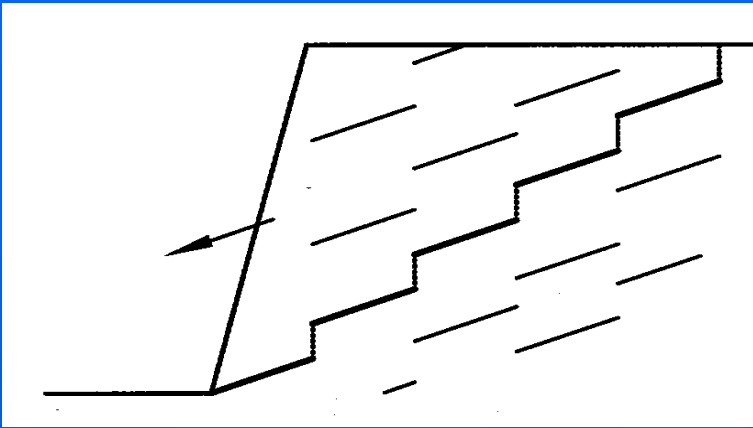


c) Ebenes Gleiten

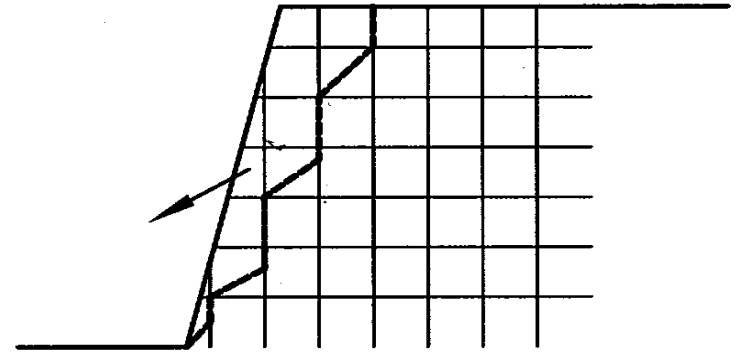
d) Keilgleiten



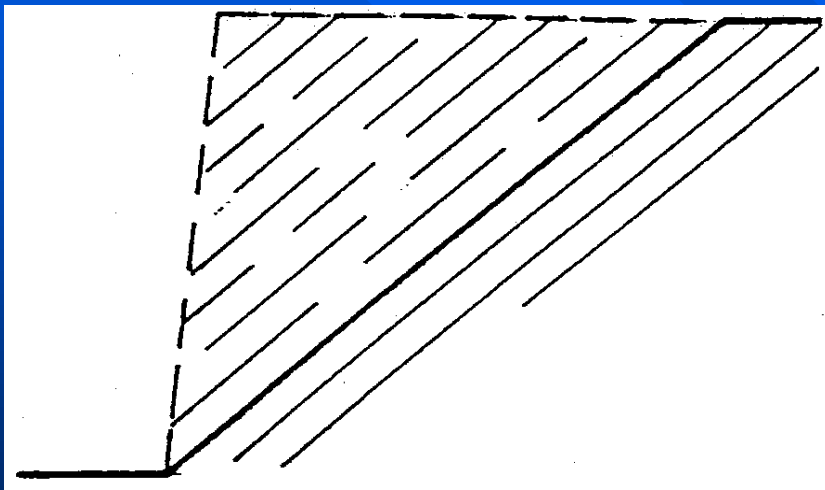




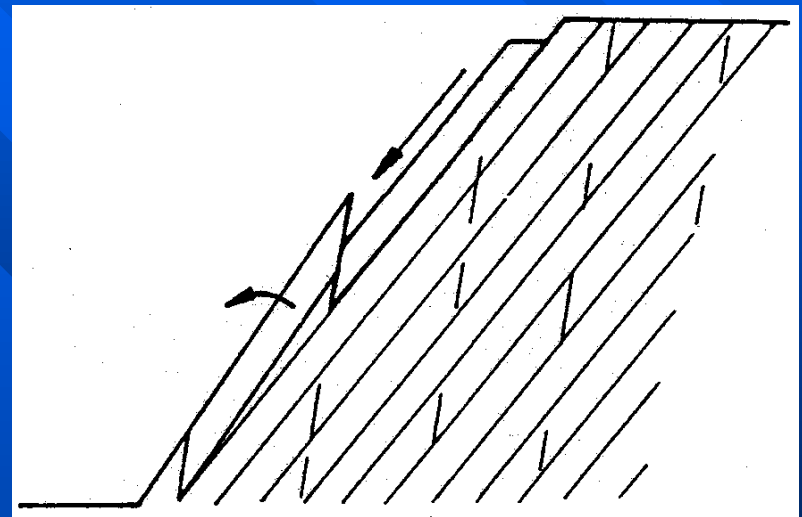
e) Gleiten mit Zugversagen von Materialbrüchen



f) Gleiten mit Scherversagen von Materialbrüchen



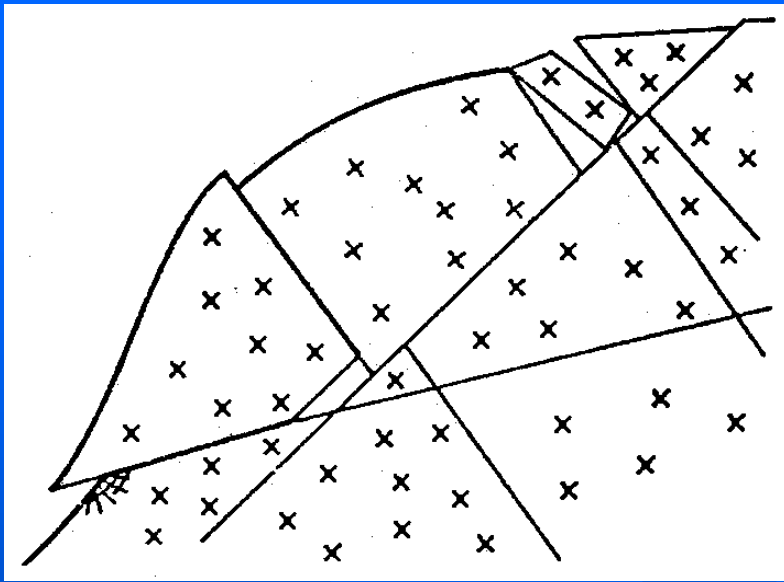
g) unvollständig durchtrennte Bruchfläche mit Materialbrüchen



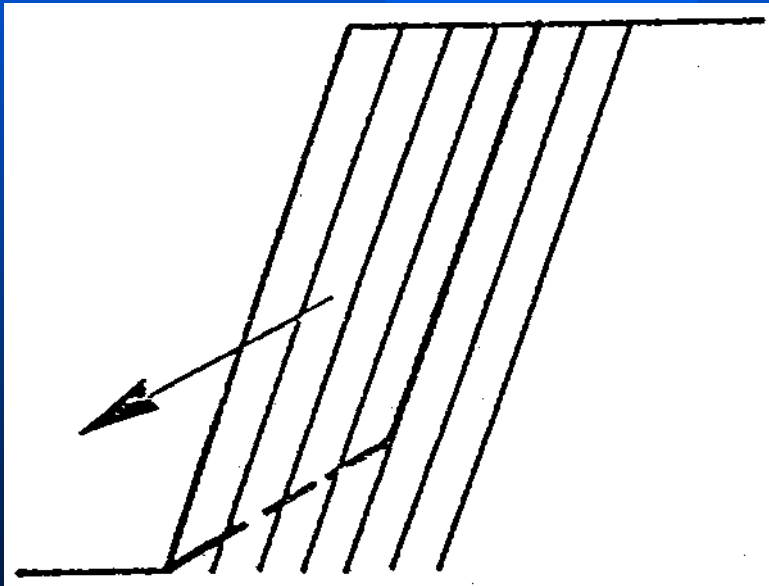
h) Ebenes Gleiten mit Beteiligung einer 2., annähernd saigeren Trennflächenschar







i) Komplexes Gleiten/Kippen auf verschiedenen Trennflächenorientierungen

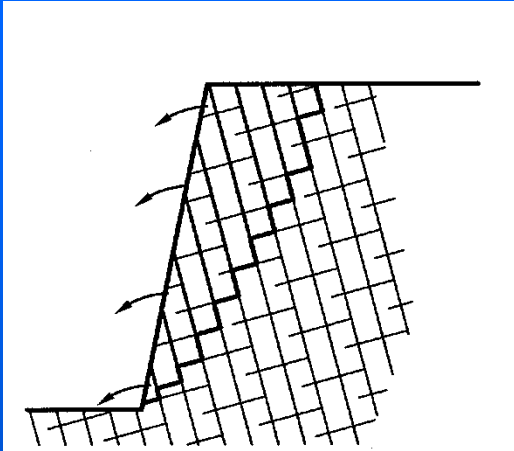


j) Gleiten infolge ungünstiger Kluftorientierung

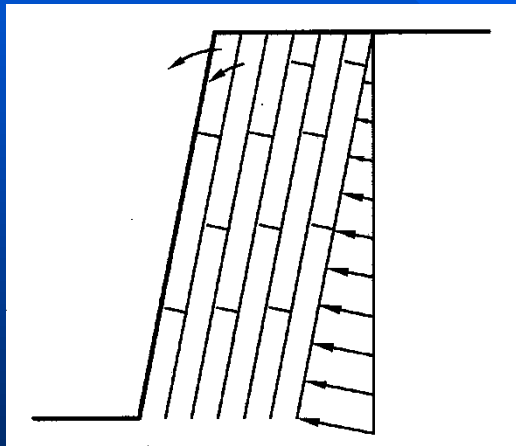




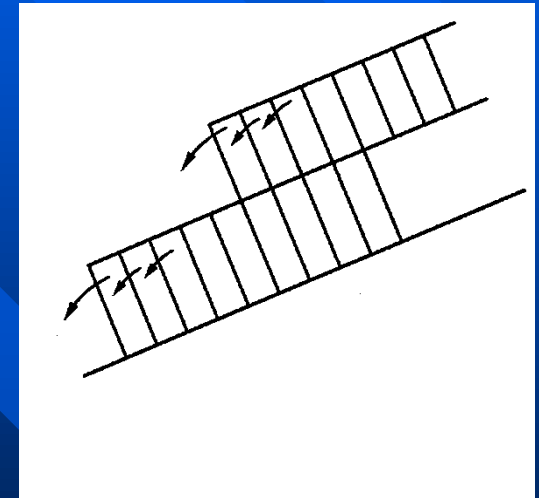
7.5.2 Kippen



a) Kippen auf steil bergwärts fallenden Trennflächen mit gestufter Basisfläche, der vorderste Block als Schlüsselblock (Key block) ist gleitgefährdet.



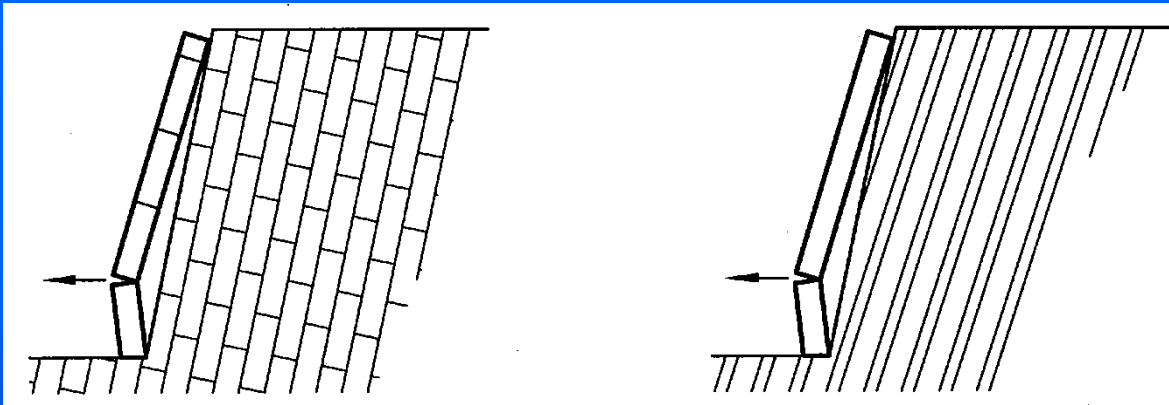
b) Kippen auf einer durchgehenden Basisfläche.



c) Kippen auf steil talwärts fallenden Trennflächen infolge Kluftwasserdruck.



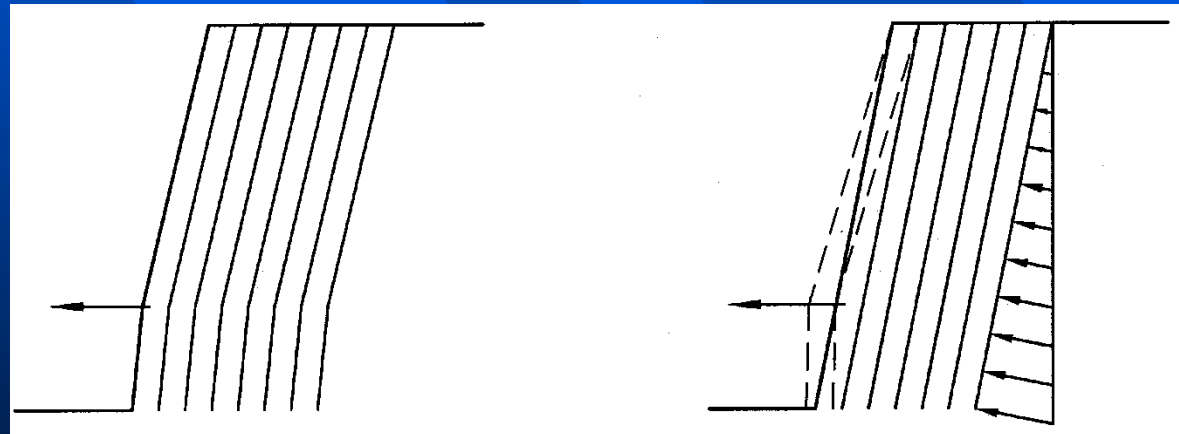
7.5.3 Knicken (Beulen)



b) Knicken monolithischer Platten

a) Knicken schlanker mehrfach zerlegter Platten

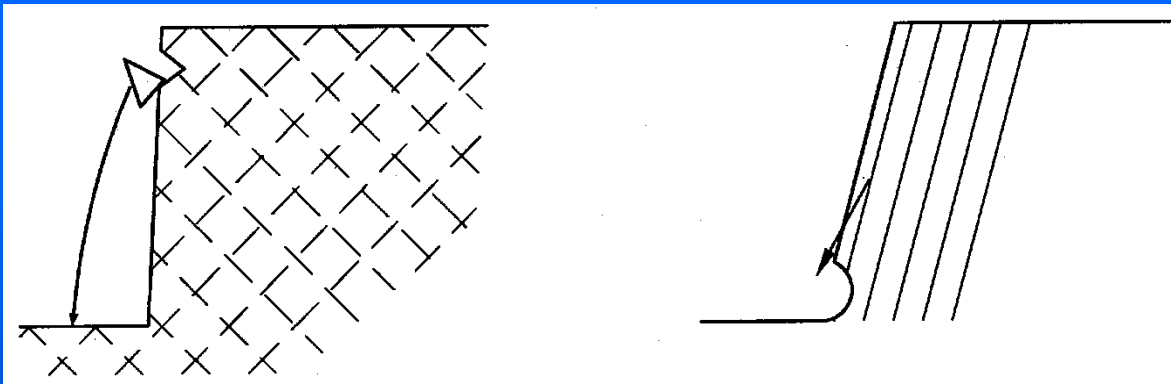
d) Knicken durch Kluftwasserschub



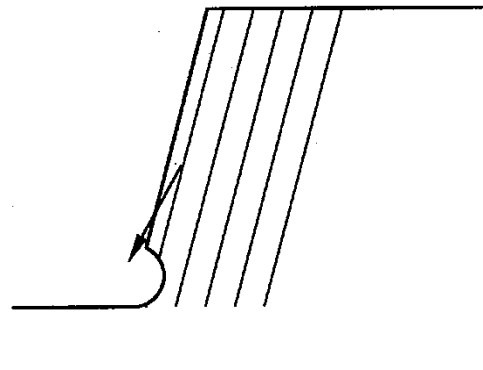
c) Knicken durch Änderung des Einfallens.



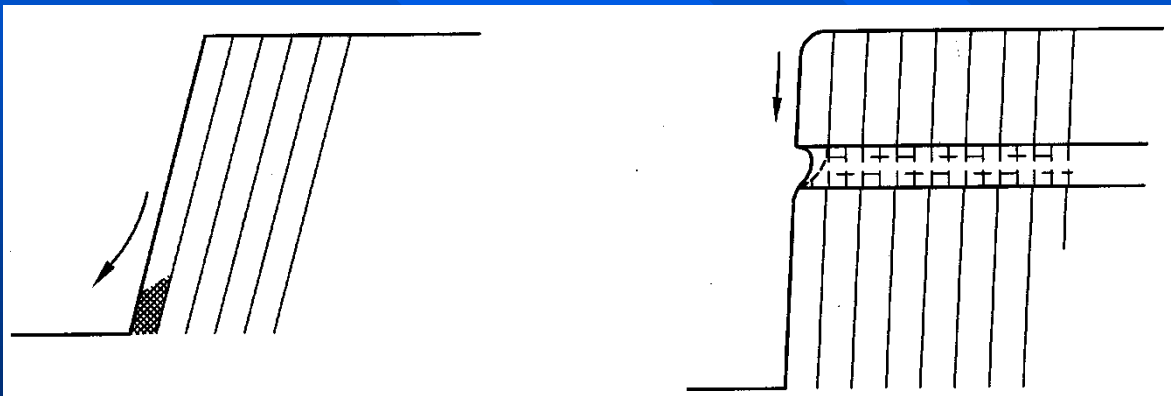
7.5.4 Kombinierte Bruchmechanismen



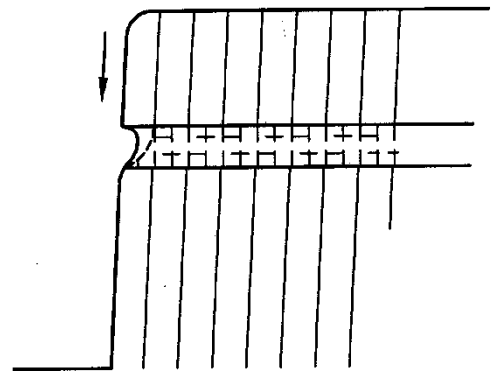
a) Gleiten und Fallen



b) Gleiten nach Unterschneidung



c) Gleiten durch Versagen des Fußes infolge Spannungskonzentration



d) Gleiten nach Herauswittern der Basisschicht



GLIEDERUNG

1. Programm
2. Einleitung
3. Gesteinseigenschaften
4. Trennflächen
5. Gebirgseigenschaften
6. Spannungen im Gebirge
7. Bruchvorgänge im Gebirge / Gestein
- 8. Wasser im Gebirge**
9. Gesteins- und Gebirgsklassifizierung



8. WASSER IM GEBIRGE

8.1 Vorkommen

Im Gebirge als sogenanntes **Bergwasser**, in verschiedenen Zustandsformen vorkommend

- a) **Wasser im Grundkörpermateriale** (Gestein), hierzu Kristallwasser, Porenwinkelwasser, Häutchenwasser etc., unterschiedlich fest gebunden; beeinflusst Gesteinseigenschaften, jedoch ohne großen Einfluss auf Gebirgseigenschaften;
 - b) Wasser in den **Kluftzwischenmitteln** (siehe Bodenmechanik)
 - c) Wasser in den **Klüften**; Strömung in „Kanälen“ nicht in Poren, erzeugt Auftrieb bzw. Kluftwasserschub; Strömungsdruck ohne große Bedeutung.
- ohne Spiegel- bzw. Druckdifferenzen: ruhendes Bergwasser









Versinterte Drainage





Verschlammte Drainage

Grundwasserverhältnisse

- Lage des Grundwasserspiegels
- Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert)
- Betonangriffsgrad DIN 4030
- Stahlangriffsgrad DIN 50 929
- Chemische Untersuchung zur
 - Versinterung
 - Verockerung
 - Verschleimung



8.2 Wirkung

8.2.1 Auftrieb

- Archimedes'sches Prinzip:
Jeder in eine Flüssigkeit eintauchende Körper erfährt **eine der Gewichtskraft** entgegen gerichtete Kraft, die gleich dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit ist

$$\varphi' = \varphi - \varphi_w$$

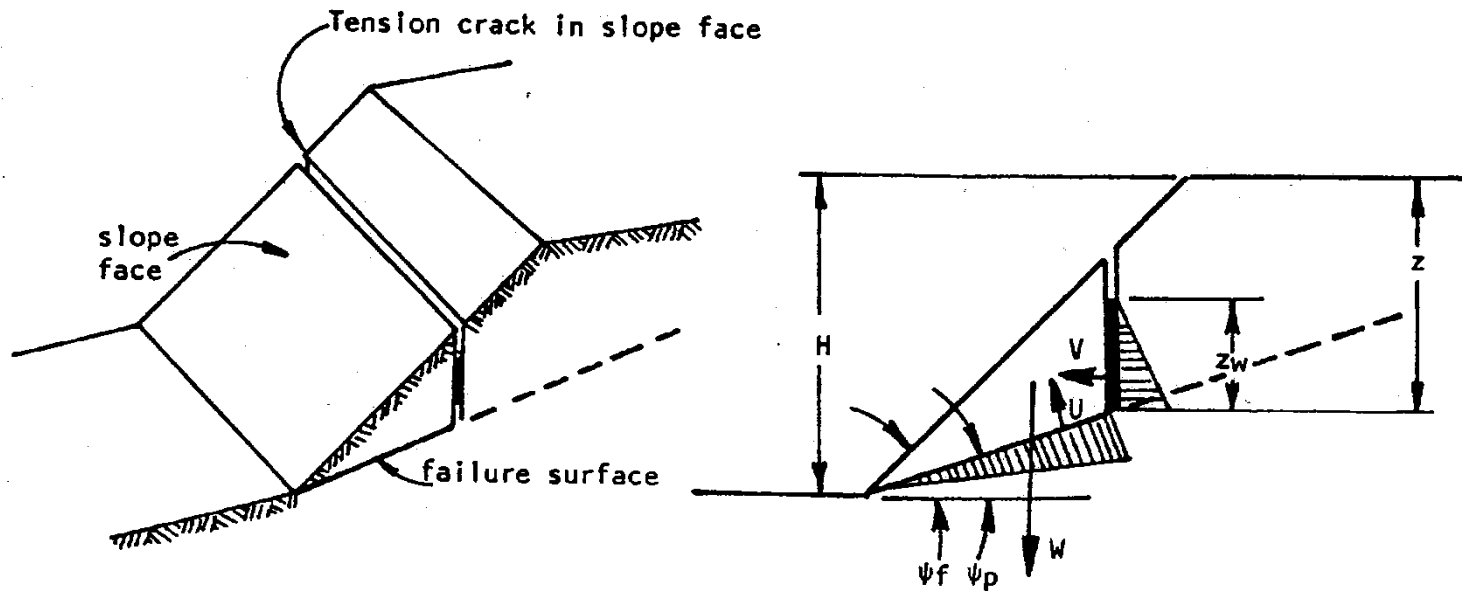
Beispiel: $\varphi = 26 \text{ kN/m}^3$; $\varphi' = 16 \text{ kN/m}^3$

Reduktion der vertikalen Spannungen um ca. 40 % (!)

8.2.2 Kluftwasserschub

- Entsteht bei Spiegeldifferenzen; z.B. bei **rascher Absenkung im Staubecken**; bei Starkregen; kritischer Einfluss auf die Standsicherheit durch zusätzliche Kraft in ungünstiger Richtung.





: Geometry of slope with tension crack in slope face.

$$V = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot z_w^2; \text{ bei } z_w = 10 \text{ m, } V = 500 \text{ kN/m}$$

Achtung: V_w hängt nicht von der Kluftöffnungsweite oder Wassermenge, sondern allein von der Druckhöhe ab!

Richtung des Kluftwasserschubs steht senkrecht auf der betrachteten Fläche
 -> Bedeutung von Dränagen für Tunnel und Böschungen.



8.3 Durchlässigkeit des Gebirges

- **Wasserzufluss** zum Tunnel, zu Baugruben, aus Einschnitten
- **Leistungsfähigkeit von Dränagen**, Bemessung von Wasserhaltungen
- **Injizierbarkeit**

abhängig von verschiedenen Faktoren, u.a.

- a) Klüftigkeit des Gebirges
- b) Durchtrennungsgrad
- c) Kluftöffnungsweite
- d) Zwischenmittel
- e) Richtung

bevorzugt wasserführend **sind Großklüfte und Störungen**, sowie Schnittlinien von Trennflächen -> **Kluftgrundwasserleiter, Modell „ k_f “ vom Boden nur Hilfsmittel...**

- in unseren Breiten gibt es praktisch kein trockenes Gebirge! Vorsicht bei trockenen Bohrlöchern / Baugruben!
- Größenordnung von praktisch undurchlässig bis zu extremen Durchlässigkeiten (z.B. Karst)



8.4 Messverfahren

- Messung in Bohrlöchern durch einfaches Ausloten → GWSpiegel
- **Jahreszeitliche + Langzeitige Schwankungen** – HQ 100 (!?)
- hydraulische Bohrlochversuche (Pumpversuch, Auffüll-/Absenkversuch, W/D)

→ Bau und Bemessungswasserstände definieren, mit ausreichender Sicherheit

Tabelle 20.2 Wasserdurchlässigkeit von Gestein (k_G) und Gebirge (k_F)
(nach LOUIS 1967, aus MÜLLER 1978)

Gesteinsart	Gestein			Fels mit einer Kluft/lfdm		
	k_G (cm/s)			Spaltweite (mm)	k_F (cm/s) in der Klufttrichtung	
1. Kalksteine	0,36 bis	23	10^{-13}	0,1	0,7	10^{-4}
2. Sandsteine						
Karbon	0,29 bis	6	10^{-11}	0,2	0,6	10^{-3}
Devon	0,21 bis	2	10^{-11}	0,4	0,5	10^{-2}
3. Mischgesteine						
sandig-kalkig	0,33 bis	33	10^{-12}	0,7	2,5	10^{-2}
tonig-sandig	0,85 bis	130	10^{-13}	1,0	0,7	10^{-1}
kalkig-tonig	0,27 bis	80	10^{-12}			
4. Granit	0,5 bis	2,0	10^{-10}	2,0	0,6	
5. Schiefer	0,7 bis	1,6	10^{-10}	4,0	0,5	10^1
6. Kalkstein	0,7 bis	120	10^{-9}			
7. Dolomit	0,5 bis	1,2	10^{-8}	6,0	1,6	10^1



GLIEDERUNG

1. Programm
2. Einleitung
3. Gesteinseigenschaften
4. Trennflächen
5. Gebirgseigenschaften
6. Spannungen im Gebirge
7. Bruchvorgänge im Gebirge / Gestein
8. Wasser im Gebirge
- 9. Gesteins- und Gebirgsklassifizierung**



9. GESTEINS- UND GEBIRGSKLASSIFIZIERUNG

9.1 Allgemeine Klassifizierungen

Class	Description	Uniaxial compressive strength MPa
A	Very high strength	> 200
B	High strength	100–200
C	Medium strength	50–100
D	Low strength	25– 50
E	Very low strength	< 25

**Klassifizierung von Gesteinen
nach der Festigkeit**

Rock quality designation (<i>RQD</i>) (after DEERE et al, 1966)	
<i>RQD</i> , %	Rock quality
0– 25	very poor
25– 50	poor
50– 75	fair
75– 90	good
90–100	excellent

**Klassifizierung von Gebirge nach
Kernqualität**



1 4 Beschreibung des Gebirges nach SIA 199

Für die Beschreibung des Gebirges besteht keine einheitliche Nomenklatur. Die Felsmechanik hat gewisse Begriffe definiert, die Geologie andererseits verwendet die Begriffe und Bezeichnungen, die sich auf die Stratigraphie, die Lithologie, die Petrographie usw. beziehen. Der **Ingenieur** ist an diesen Bezeichnungen nur insofern interessiert, als sie ihm Hinweise auf das mutmaßliche Verhalten des Gebirges vermitteln. **Für ihn stehen die bautechnischen Eigenschaften des Gebirges im Vordergrund.**

1 41 Fels

Als Hilfsmittel sowohl für den projektierenden Ingenieur als auch für den Unternehmer wird eine einheitliche Beschreibung und Klassierung des Felsen nach der nachstehend erläuterten «Felsbeschreibung nach S.I.A.» empfohlen.



Es werden folgende 4 Gruppen von Eigenschaften unterschieden:

GESTEIN:

- A Ungünstige Komponenten
- B Druckfestigkeit
- C Gehalt an kristallinem Quarz
- D Bearbeitbarkeit mit Schneidwerkzeugen von Tunnelvortriebsmaschinen (noch nicht definiert)
- E Verhalten bei Wasserzutritt und Feuchtigkeit

STRATIGRAPHISCHE DISKONTINUITÄT DES GEBIRGES:

- F Schichtung, Bankung
- G Tonige oder glimmerhaltige Zwischenschichten
- H Schichtreibung (Gleitreibung)
- I Kohäsion (bei Gleitreibung)



TEKTONISCHE DISKONTINUITÄT DES GEBIRGES:

- K Schieferung (Bruchflächenabstand),
Zerlegungsgrad
- L Art der Bruchfläche
- M Öffnung der Klüfte
- N Reibung in Trennflächen (Gleitreibung)
- O Kohäsion (bei Gleitreibung)
- P Grundformen der Klufkörper

WASSERZIRKULATION:

- Q Durchlässigkeit nach Lugeon
- R Art der Zirkulation



Diese Eigenschaften werden quantitativ in 4 Stufen unterteilt, wobei Stufe 1 den günstigsten, Stufe 4 den ungünstigsten Wertbereich umfasst.

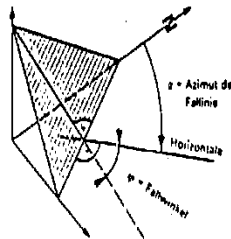
Tabelle 1 TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN DES FELSEN (FELSDESCHEIBUNG NACH SIA)

Stufen	Gestein					Diskontinuität des Gebirges										Wasserzirkulation		
	Ungünstige Komponenten	Druckfestigkeit	Gehalt an kristallinem Quarz	Verhalten bei Wasserzutritt und Feuchtigkeits	Verhalten bei Wasserzutritt und Feuchtigkeits	Stratigraphisch				Tektonisch						Grundformen der Klüftkörper	Durchlässigkeit nach Lugeon	Art der Zirkulation
						Schichtung, Bankung	Tonige oder glimmerartige Zwischenschichten	Schieferung (Gleitreibung)	Kohäsion (bei Gleitreibung)	Schieferung (Bruchflächenabstand), Zerlegungsgrad	Art der Bruchfläche	Öffnung der Klüfte	Reibung in Trennflächen (Gleitreibung)	Kohäsion (bei Gleitreibung)				
A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N	O	P	Q	R		
	MN/m ² (kg/cm ²)	%			m	pro m : in %	°Grad (380°)	MN/m ² (t/m ²)	m		mm	°Grad (380°)	MN/m ² (t/m ²)	%	l/m · min			
1	keine	hoch > 100 MN/m ² (> 1000 kg/cm ²)	unbedeutend < 5		unverändert (unempfindlich)	keine (massig) > 1	keine	gross > 40	gross > 2 MN/m ² (> 200 t/m ²)	gering (kompakt) > 1	nicht durchgehend	sehr klein (geschlossen) < 0,1	gross > 40	gross > 2 MN/m ² (> 200 t/m ²)	vorwiegend kubisch > 80	sehr klein (dicht) < 1	Poren	
2	tonige	mittel 20-100 MN/m ² (200-1000 kg/cm ²)	klein 5-30		Kohäsionsverlust (Verwitterbarkeit)	bankig 1-0,1	vereinzelt von geringer Stärke < 1 ; total < 1	mittel 30-40	mittel 0,2-2 MN/m ² (20-200 t/m ²)	mittel 1-0,1	durchgehend ohne Füllmaterial	klein 0,1-1	mittel 30-40	mittel 0,2-2 MN/m ² (20-200 t/m ²)	teilweise kubisch 60-45	klein 1-5	Schichten	
3	diabasische	klein 5-20 MN/m ² (50-200 kg/cm ²)	mittel 30-60		klüftig	plattig 0,1-0,01	vereinzelt stärkere Schichten < 1 ; total > 1	klein 20-30	klein 0,02-0,2 MN/m ² (2-20 t/m ²)	hoch 0,1-0,01	durchgehend mit gleit- oder quellfähigem Füllmaterial	schmal 1-10	klein 20-30	klein 0,02-0,2 MN/m ² (2-20 t/m ²)	teilweise plattig oder prismatisch (kubisch < 30-45)	mittel 5-20	Spalten	
4	sulfid- oder schieferige	sehr klein < 5 MN/m ² (< 50 kg/cm ²)	gross > 60		Schwellen (physikalisch) oder Quellen (chemisch)	dünnlagig oder schieferig < 0,01	klüftig total: nicht > 1 ; massig	sehr klein < 20	sehr klein < 0,02 MN/m ² (< 2 t/m ²)	sehr hoch (zermalmt) < 0,01	durchgehend mit wasserförmigem Füllmaterial	breit > 10	sehr klein < 20	sehr klein < 0,02 MN/m ² (< 2 t/m ²)	vorwiegend plattig oder prismatisch (kubisch < 30)	gross > 30	Kerz	
		Druckversuch I und II zur Schichtung mit prismatischem Probekörper. Einstellung nach f ₀ min. Angabe der Ver- suchsdauer		Kolonne bleibt vorläufig reserviert für Definitionen bezüglich Bearbei- tbarkeit mittels Schneidwerk- zeugen von Tunnelvorbereitungs- maschinen	Versuche: Wassergehalt bezüglich Löslichkeit Odometer	Mittlere Schichtdicke	Massgebend ist die mittlere An- zahl der Zwi- schenschichten, trotz deren Gesamtstärke in % gemessen	Abreißversuch auf Schicht- flächen, z. B. mit $\sigma_{\text{a}} = 2 \text{ MN/m}^2$ (20 kg/cm ²) Probe feucht. Angabe der Ver- suchsdauer	Als Scherversuch für Schieferung ermittelt	Mittlerer Bruch- flächenabstand		Massgebend ist die mittlere Öffnung	Abreißversuch auf natürlichen Trennflächen, z. B. mit $\sigma_{\text{a}} = 2 \text{ MN/m}^2$ (20 kg/cm ²) Probe feucht. Angabe der Ver- suchsdauer	Aus Scherversuch für Bruchflächen- reibung ermittelt	Sind α, β, γ die Hauptachsen (mit $\alpha > \beta > \gamma$), so gilt ein Körper mit $\alpha/\beta > 0,4$ als kubisch	EN, Druck im Versuchsbereich 1 MN/m ² (10 kg/cm ²) Dauer 10 Minuten. Angabe des Lochdurchmessers		

SI-Einheiten sind ausgeschrieben (vgl. Anhang)
Technische Einheiten sind in Klammern angegeben

Kräfte 1 N (Newton) = 0,1 kg

Spannungen, Drücke:
1 N/mm² | 10 kg/cm²
1 MN/m² | 100 t/m²
(Meganeutron pro m²)
1 MPa (Megapascal)



Die Eigenschaften K bis Q werden nach dem ungünstigsten Trennflächensystem eingestuft.
Alternfalls ist eine getrennte Einstufung auch für die weiteren Systeme vorzunehmen, falls diese beurteilbar massgebend werden können.

Zusätzlich sind anzugeben:

- Gesteinsbezeichnung
- stratigraphische Orientierung (Azimut der Fallinie und Fallwinkel) gemäß nebenstehender Figur
- tektonische Orientierung der Trennflächensysteme (1. System, 2. System, 3. und eventual weitere Systeme)



9.2 Spezielle Klassifizierungen

Klassifizierung nach Lösbarkeit (DIN 18 300) (Auszug)

Klasse 6: Leicht lösbarer Fels und vergleichbare Bodenarten

Felsarten, die einen inneren, mineralisch gebundenen Zusammenhalt haben, jedoch stark klüftig, brüchig, bröckelig, schiefrig, weich oder verwittert sind, sowie vergleichbare verfestigte nichtbindige und bindige Bodenarten. Nichtbindige und bindige Bodenarten mit mehr als 30 Gew.-% Steinen von über 0,01 m³ bis 0,1 m³ Rauminhalt**).

Klasse 7: Schwer lösbarer Fels

Felsarten, die einen inneren, mineralisch gebundenen Zusammenhalt und hohe Gefügefestigkeit haben und die nur wenig klüftig oder verwittert sind. Festgelagerter, unverwitterter Tonschiefer, Nagelfluhschichten, Schlackenhalde der Hüttenwerke und dergleichen. Steine von über 0,1 m³ Rauminhalt**).



PARAMETER			RANGES OF VALUES						
1	Strength of intact rock material	Point load strength index	> 8 Mpa	4 - 8 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial compressive strength	> 200 Mpa	100 - 200 MPa	50 - 100 MPa	25 - 250 MPa	10-25 MPa	3-10 MPa	1-3 MPa
	Rating	15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core quality R Q D		90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25 %		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of joints		> 3 m	1 - 3 m	0,3 - 1 m	50 - 300 mm	< 50 mm		
	Rating		30	25	20	10	5		
4	Condition of joints		Very rough surfaces. Not continuous. No separation. Hard joint wall rock	Slightly rough surfaces. Separation < 1 mm. Hard joint wall rock.	Slightly rough surfaces. Separation < 1 mm. Soft joint wall rock.	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Joints open 1 - 5 mm Continuous joints	Soft gouge > 5 mm tick or Joints open > 5 mm Continuous joints		
	Rating		25	20	12	6	0		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length	None		< 25 litres/min.	25 - 125 litres/min.	> 125 litres/min.		
		Ratio	0		0,0 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
	General conditions		Completely dry		Moist only (interstitial water)	Water under moderate pressure	Severe Water problems		
	Rating		10		7	4	0		

→ 4+17+20+20+4 = 65 Punkte

Klassifikation nach BIENIAWSKI, 1975

B. RATING ADJUSTMENT FOR JOINT ORIENTATIONS

Strike and dip orientations of joints		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very unfavourable
Ratings	Tunnels	0	-2	-5	-10	-12
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25
	Slopes	0	-5	-25	-50	-60

Table IV: THE EFFECT OF JOINT STRIKE AND DIP ORIENTATIONS IN TUNNELLING

Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis	Dip 0° - 20° irrespective of strike
Drive with dip		Drive against dip			
Dip 45°-90°	Dip 20°-45°	Dip 45°-90°	Dip 20°-45°	Dip 45°-90°	Dip 20°-45°
Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very unfavourable	Fair

→ 65 - 5 = 60 Punkte

C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS

Rating	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Class No.	I	II	III	IV	V
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock

→ **60 Punkte**

D. MEANING OF ROCK MASS CLASSES

Class No.	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	10 years for 5 m span	6 months for 4 m span	1 week for 3 m span	5 hours for 1,5 m span	10 min. for 0,5 m span
Cohesion of the rock mass	> 300 kPa	200 - 300 kPa	150 - 200 kPa	100 - 150 kPa	< 100 kPa
Friction angle of the rock mass	> 45°	40° - 45°	35° - 40°	30° - 35°	< 30°

→ **Kennwerte !?**



Rock mass class	Alternative support systems		
	Mainly ROCKBOLTS (20 mm dia., length ½ tunnel width, resin bonded)	Mainly SHOTCRETE	Mainly STEEL RIBS
I	GENERALLY NO SUPPORT IS REQUIRED		
II	Rockbolts spaced 1,5 to 2,0 m plus occasional wire mesh in crown	Shotcrete 50 mm in crown	Uneconomic
III	Rockbolts spaced 1,0 to 1,5 m plus wire mesh and 30 mm shotcrete in crown where required	Shotcrete 100 mm in crown and 50 mm in sides plus occasional wire mesh and rockbolts where required	Light sets spaced 1,5 m to 2 m
IV	Rockbolts spaced 0,5 to 1,0 m plus wire mesh and 30 - 50 mm shotcrete in crown and sides	Shotcrete 150 mm in crown and 100 mm in sides plus wire mesh and rockbolts, 3 m long spaced 1,5 m	Medium sets spaced 0,7 to 1,5 m plus 50 mm shotcrete in crown and sides
V	Not recommended	Shotcrete 200 mm in crown and 150 mm in sides plus wire mesh, rockbolts and light steel sets. Seal face. Close invert.	Heavy sets spaced 0,7 m with lagging. Shotcrete 80 mm thick to be applied immediately after blasting.

**Ergebnis:
Sicherungsempfehlung**



GLIEDERUNG

1. Programm
2. Einleitung
3. Gesteinseigenschaften
4. Trennflächen
5. Gebirgseigenschaften
6. Spannungen im Gebirge
7. Bruchvorgänge im Gebirge / Gestein
8. Wasser im Gebirge
9. Gesteins- und Gebirgsklassifizierung

EXKURSION



Exkursion

Felssicherung Mattinger Hänge

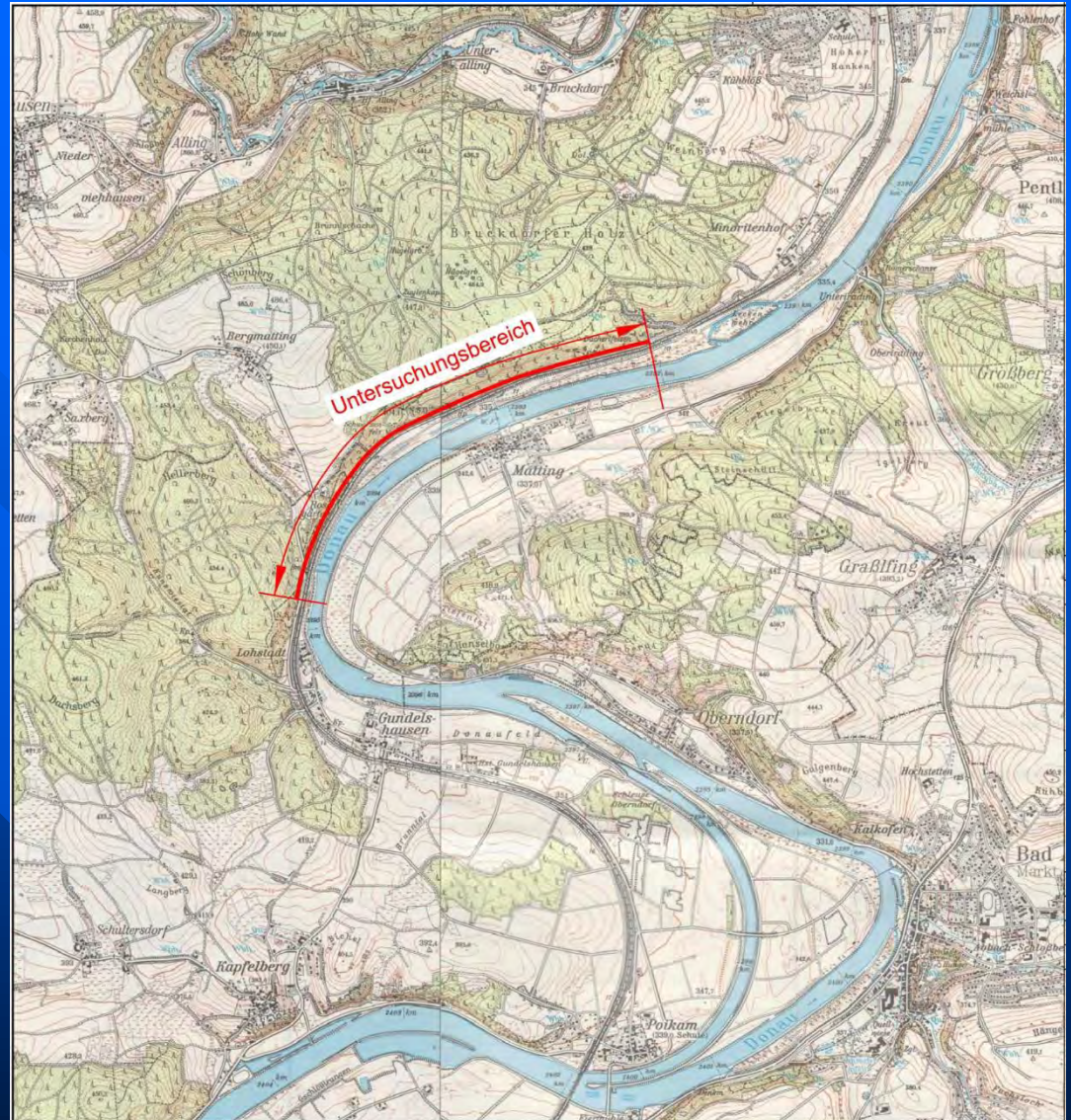


DR. SPANG

DB Trainingszentrum Regensburg
EINFÜHRUNG IN DIE FELSMECHANIK

■ Einleitung

- DB Strecke 5851 Reg-Ing
- Bahn- km 10,2 – 13,2
- Südlich von Regensburg
- Oberpfalz und Niederbayern
- 21 Felsabschnitte
- Abschnitte bis 60 m hoch
- Kalkstein
- nahezu vertikale Felswände
- NSG „Mattinger Hänge“



Ausschnitt aus Topografische Karte



■ Naturschutz

Naturschutzgebiet “Mattinger Hänge“:

- FFH-Gebiet, Natura 2000 Gebiet, Art § 13c BayNatSchG / § 19c BundNatSchG
- LPB-Plan Stand: 10.09.2001, Grundlage Planung 07.05.2001
- Kartierung April – Juli 1997 sowie Einzelbeobachtung 1998 – 2001
- Kartierung nur Bereiche 1 bis 20, 21 bisher nicht kartiert (Fauna+Flora)

Bedrohte Tierarten:

- RL Bay 2 / RL D 3: z.B. Wanderfalke
- RL Bay 3 z.B. Dohle, Uhu

Bedrohte Pflanzenarten:

- RL 2: 8 Arten (z.B. kleinblütige Berminze)
- RL 3: 47 Arten (z.B. wilde Pimpernuss)
- RL P: 3 Arten



■ Geotechnische Situation



■ Geotechnische Situation



■ Geotechnische Situation



■ Allgemeine

A. Eingriffsvermeidung

- dauerhafte Sperrung der DB-Strecke;
- Verlegung der DB-Strecke;

-> nicht möglich

B. Eingriff

- Abflachen der Böschung;
- Erstellung einer Galerie;
- Aufbringen von Schutznetzen;
- Versiegelung der Felsböschung mit Spritzbeton;
- Aufstellen von Steinschlagfangzäunen;
- Felsnagelung;
- Regelmäßige Beräumungen.



Sanierungsvorschlag

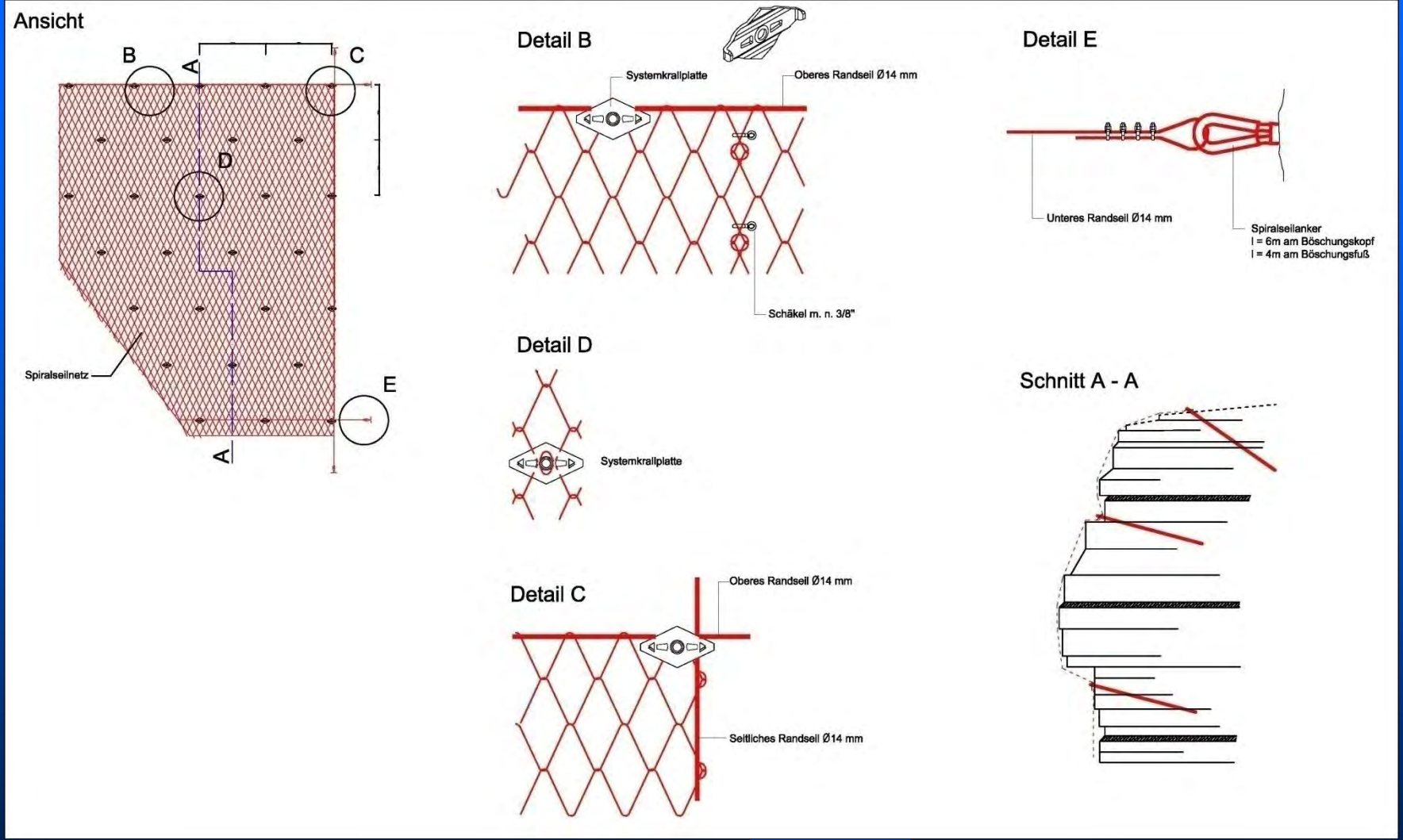


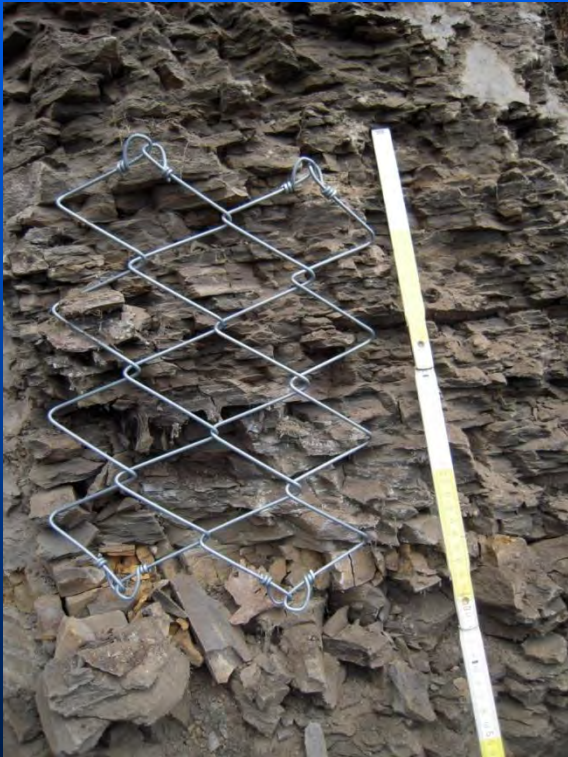
Abbildung 2: Schematische Darstellung Steinschlagschutznetz

■ Sanierungsvorschlag

Tecco ©

stabilisiert verwitterungsanfällige Böschungen, verhindert Ausbrüche und verwächst mit der Natur.

Maschenweite: 83 x 143 mm ($\pm 3\%$)



Spider ©

sichert Partien mit unregelmäßigen Oberflächen und Überhängen (Blockschlagsicherung).

Maschenweite: 292 x 500 mm ($\pm 5\%$)



Sanierungsvorschlag

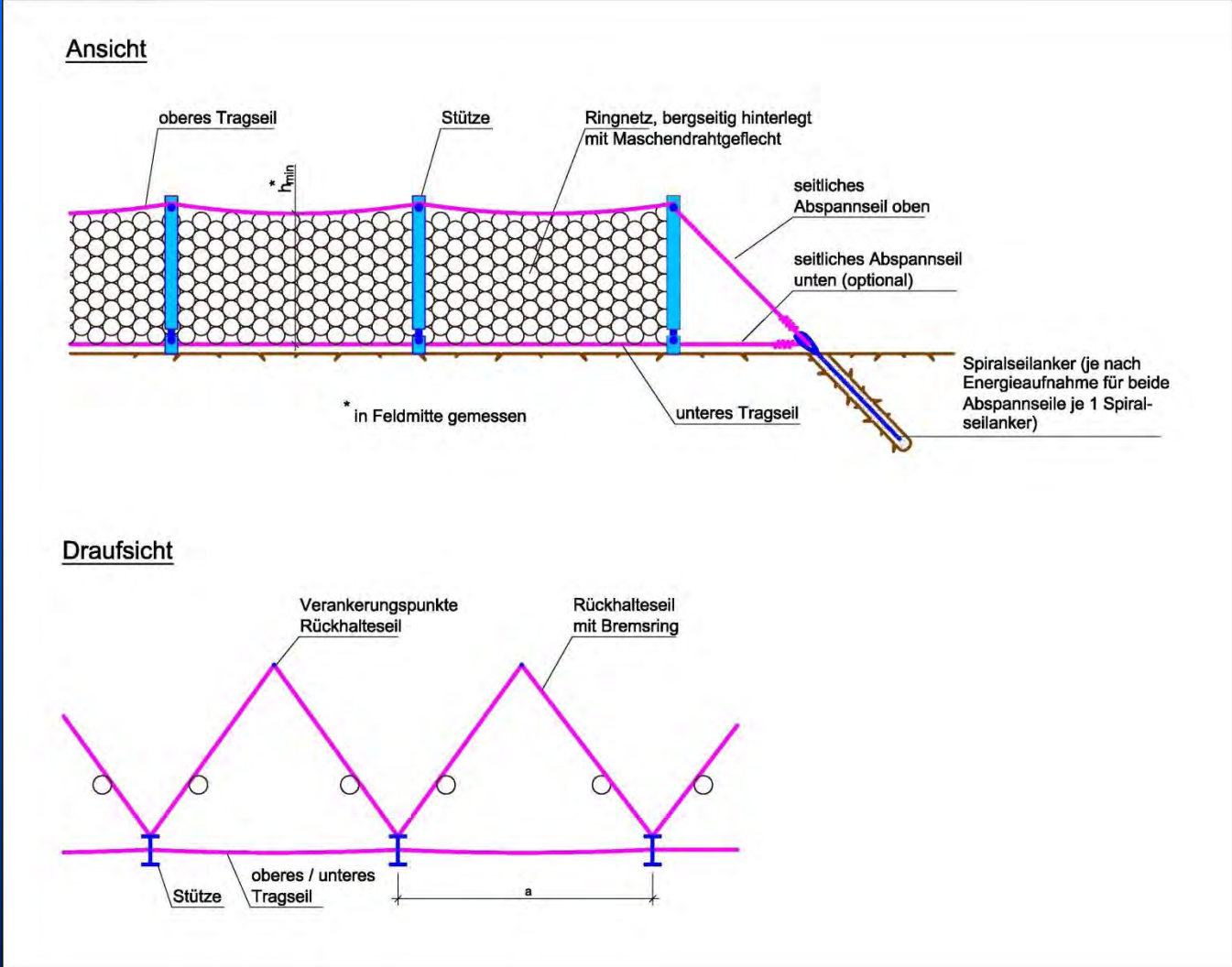


Abbildung 3: Schematische Darstellung Steinschlagschutzzaun

■ Sanierungsvorschlag

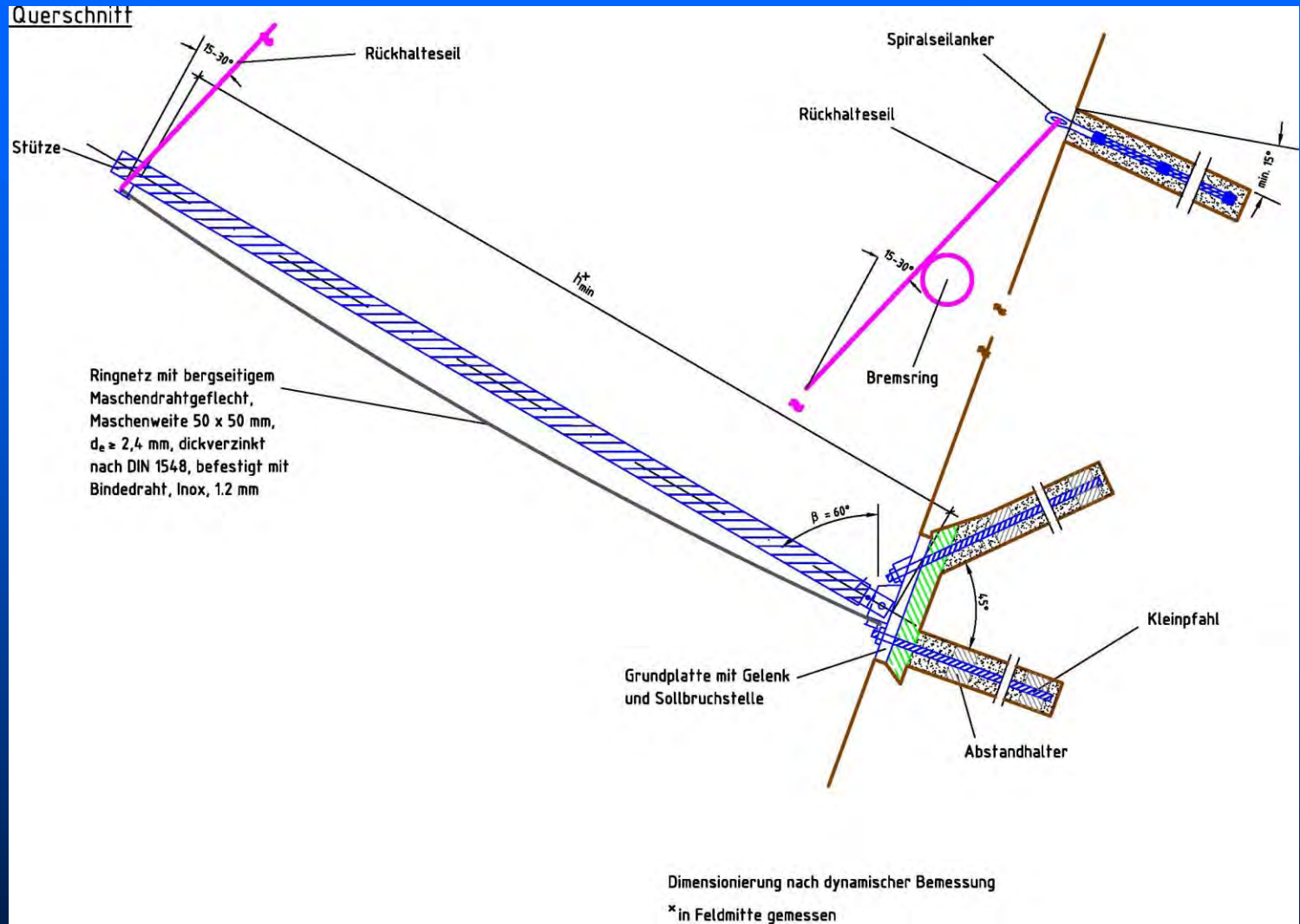
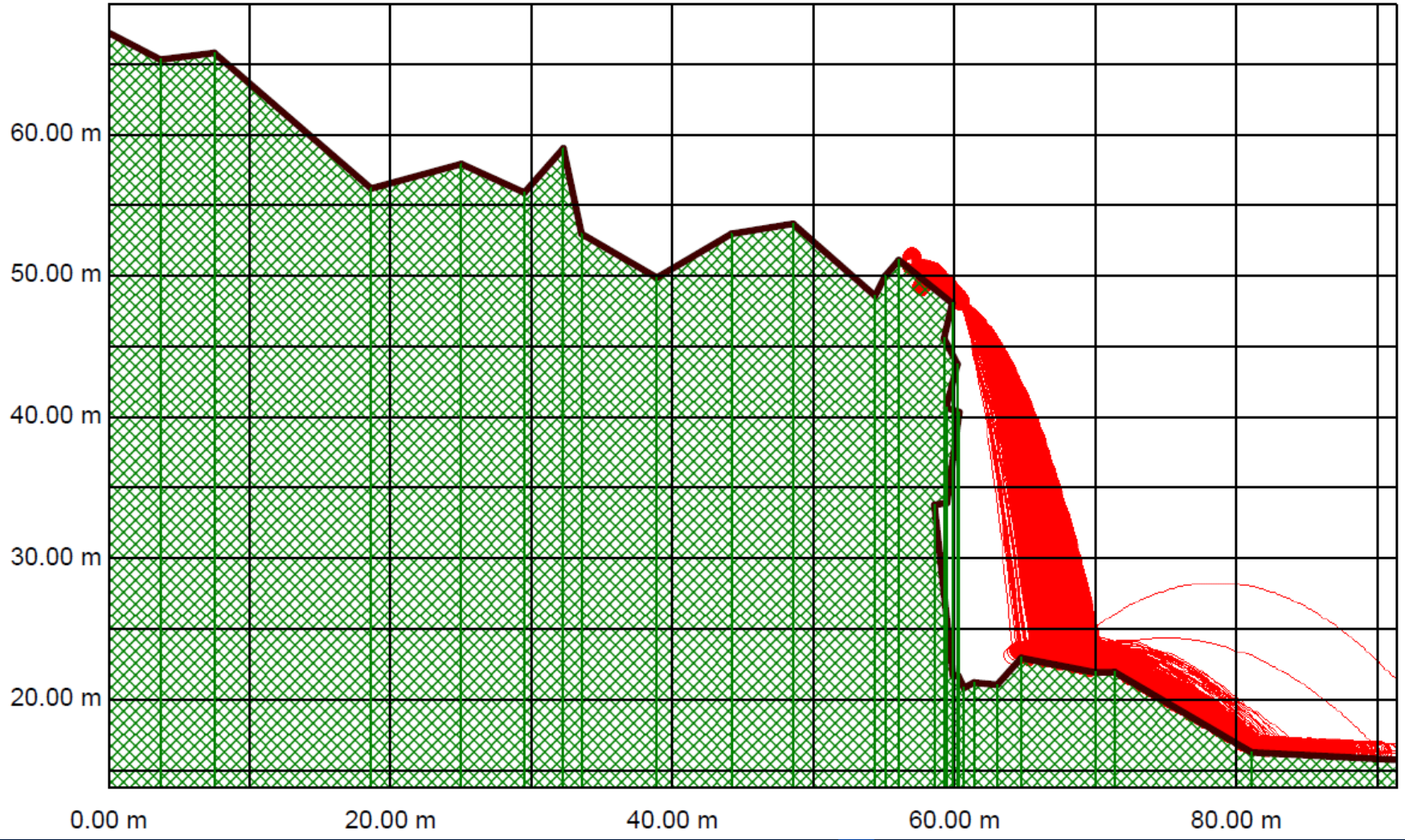


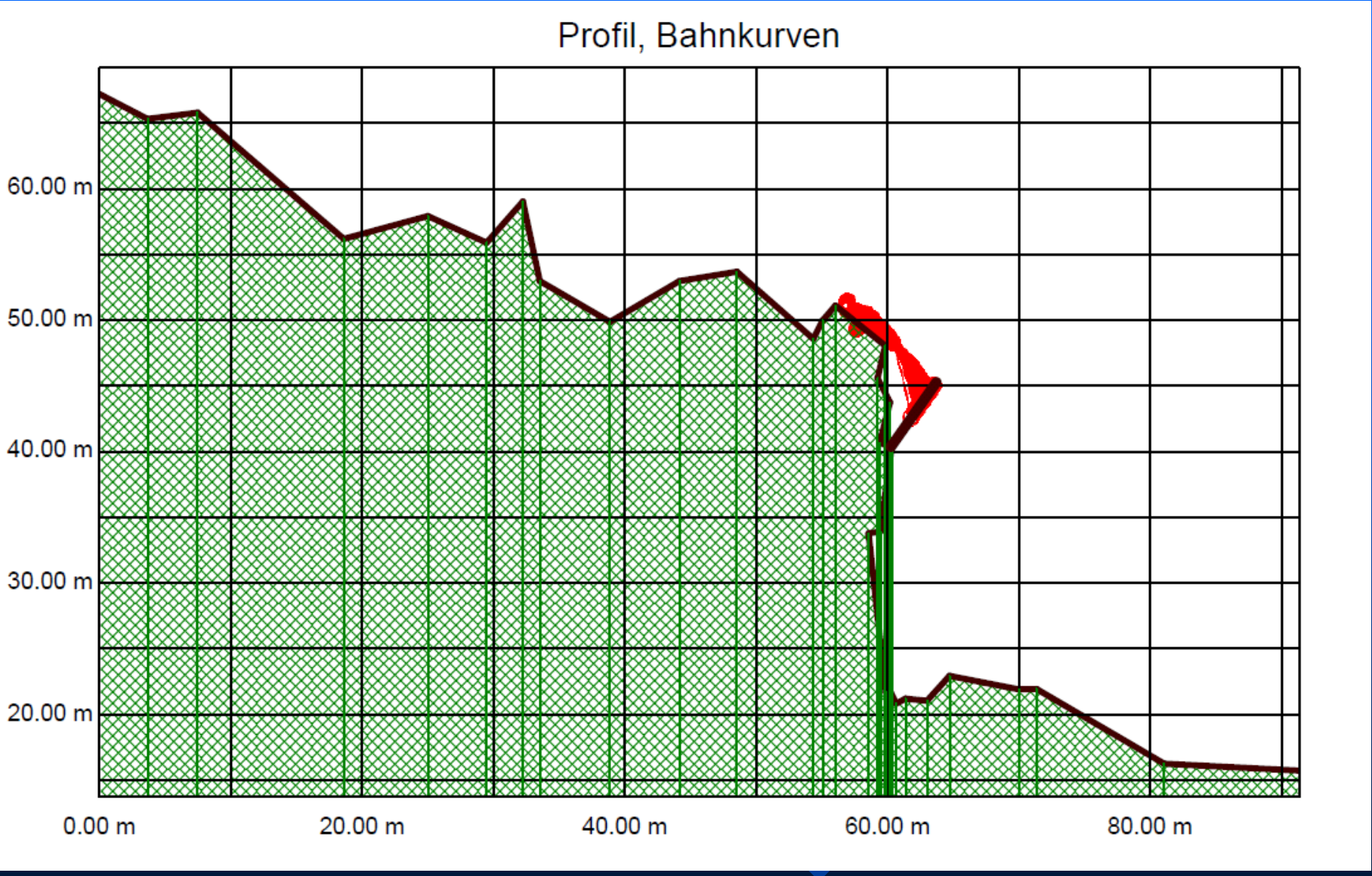
Abbildung 4: Schematische Darstellung Steinschlagschutzzaun (Querschnitt)

4. Praxisbezug - Ausführungsbeispiele

Profil, Bahnkurven



4. Praxisbezug - Ausführungsbeispiele



4. Praxisbezug - Ausführungsbeispiele



4. Praxisbezug - Ausführungsbeispiele



DR. SPANG

**DB Trainingszentrum Regensburg
EINFÜHRUNG IN DIE FELSMECHANIK**

■ Sanierungsvorschlag



Felsanker, Ausführungsbeispiel GEWI





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

www.dr-spang.de
/news/ Passwort: Regensburg2014 (ab 15.10.2014)



DR. SPANG

DB Trainingszentrum Regensburg
EINFÜHRUNG IN DIE FELSMECHANIK