

**SEMINAR ZUR AUSBILDUNG VON QUALIFIZIERTEN  
PLANUNGSINGENIEUREN FÜR TUNNEL  
UND ERDBAUWERKE  
2012**

**DB Trainingszentrum Regensburg**

**- EINFÜHRUNG IN DIE FELSMCHANIK -**

**Dipl.-Ing. Christian Spang  
Dr. Spang GmbH, Witten, Freiberg, Esslingen, Nürnberg, Naumburg**

**15.03. – 16.03.2012**



# 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 75 Mitarbeitern
- seit 2007 Lehrtätigkeit z.B. TAE Esslingen, DB Trainingszentrum

## 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 2012

**TEIL 1: GRUNDLAGEN / TUNNELBAU 14.03.2012 - 30.03.2012**

Datum	1. Std.	2. Std.	3. Std.	4. Std.	5. Std.	6. Std.	7. Std.	8. Std.	9. Std.
	7:45 - 8:30	8:30 - 9:15	9:25 - 10:10	10:30 - 11:15	11:15 - 12:00	14:00 - 14:45	15:00 - 15:45	15:45 - 16:30	16:30 - 17:15
Mi 14.03.2012						<u>Einführung:</u> Müller, I.NVT 42	<u>Baugrund:</u> <b>Geologie, Hydrologie</b> Prof. Fecker, Ettlingen		
Do 15.03.2012	<u>Baugrund:</u> <b>Geologie, Hydrologie</b> Prof. Fecker, Ettlingen		<u>Baugrund:</u> <b>Bodenmechanik</b> Wolfgang Vogel, München			<u>Tunnelbau:</u> <b>Einführung</b> Schuck, I.NVT 42	<u>Baugrund:</u> <b>Felsmechanik</b> Dipl.-Ing. Spang, Witten		
Fr 16.03.2012	<u>Baugrund:</u> <b>Felsmechanik</b> Dipl.-Ing. Spang, Witten		<b>Betreiberverantwortung DB</b> Zwanziger, CRI (N)						
Mo 19.03.2012						<u>Geotechnische Untersuchungen:</u> <b>in Boden und Fels</b> Prof. Fecker, Ettlingen			
Di 20.03.2012	<u>Geotechn. Untersuch.:</u> <b>in Boden und Fels</b> Prof. Fecker, Ettlingen		<u>Tunnelbau:</u> <b>Messungen</b> Prof. Fecker, Ettlingen			<u>Tunnelbau:</u> <b>Standsicherheit (Neubau)</b> Schuck, I.NVT 42			
Mi 21.03.2012	<u>Tunnelbau:</u> <b>Standsicherheit (bestehende Tunnel)</b> Prof. Fröhlich, Limburg			<u>Tunnelbau:</u> <b>Instandsetzung u. Wartung</b> Prof. Fröhlich, Limburg					
Do 22.03.2012	<u>Tunnelbau:</u> <b>Planung und Bau Spritzbetonbauweise</b> Prof. Kirschke, Ettlingen								
Fr 23.03.2012	<u>Tunnelbau:</u> <b>Planung und Bau Spritzbetonbauweise</b> 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.















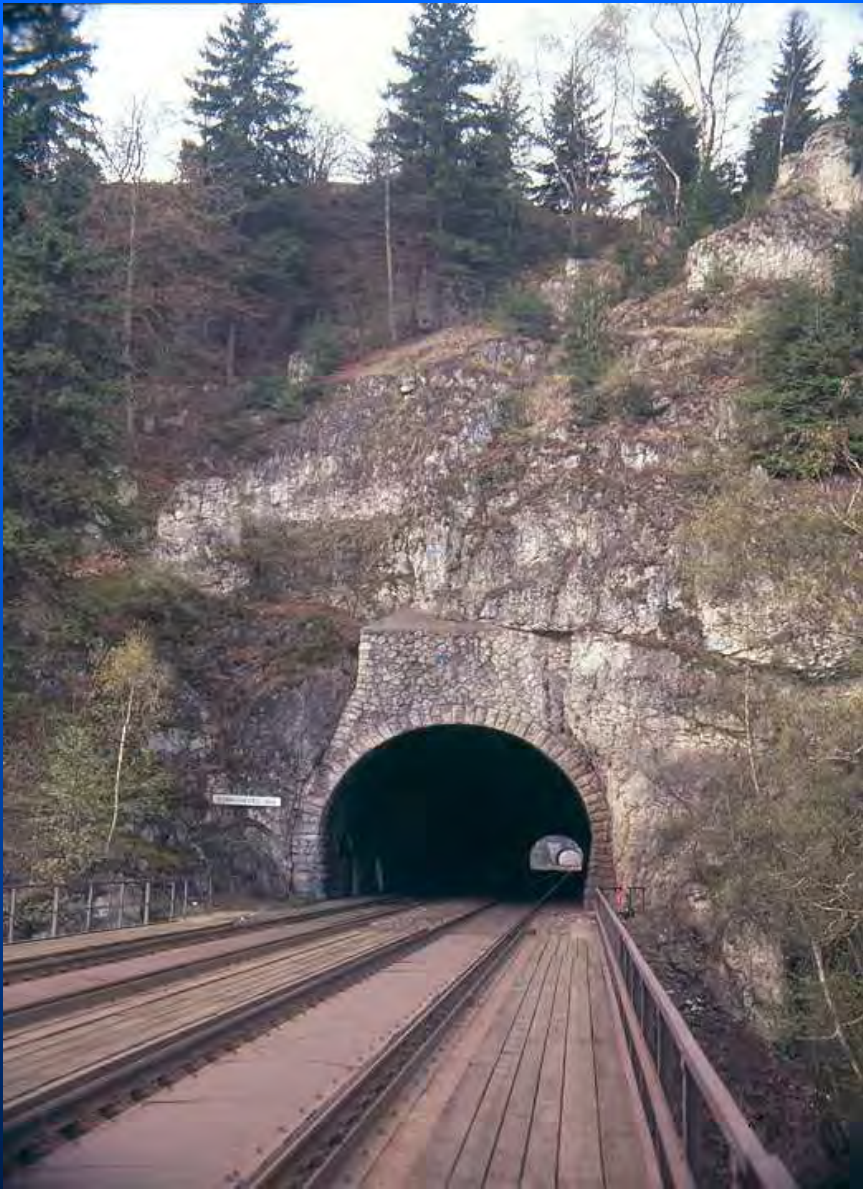
































# GLIEDERUNG

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  $\rho$
- Definiert als Quotient aus Masse  $m$  und Volumen  $V$

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

- 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)
- „ $\gamma$ “ 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  $\rightarrow$  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 <sup>3</sup>	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	<b>2,0 - 2,6</b>	<b>5 - 25</b>
Tonstein	<b>2,0 - 2,4</b>	<b>10 - 30</b>
Kalkstein	<b>2,2 - 2,6</b>	<b>5 - 20</b>
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  $105^\circ$
3. Wiegen nach Abkühlen ( $m_s$ )



## 3.2 Mechanische Eigenschaften

### 3.2.1 Einaxiale Druckfestigkeit

$$\sigma = F / A$$

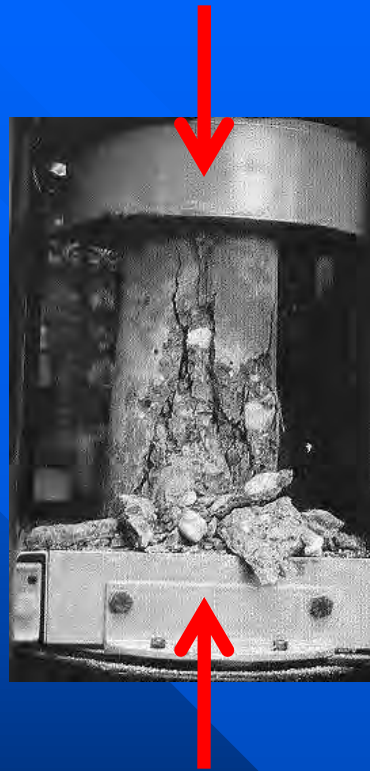
mit

F = Belastung

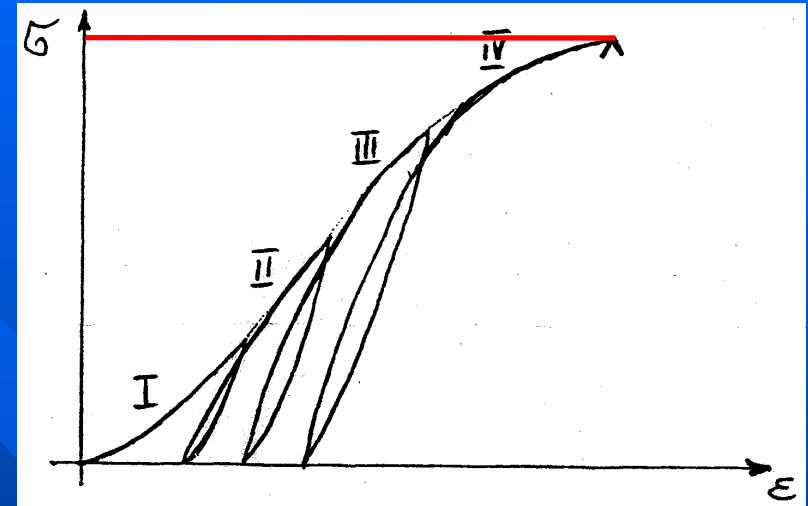
A = Fläche

$$F = p \cdot A_p$$

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

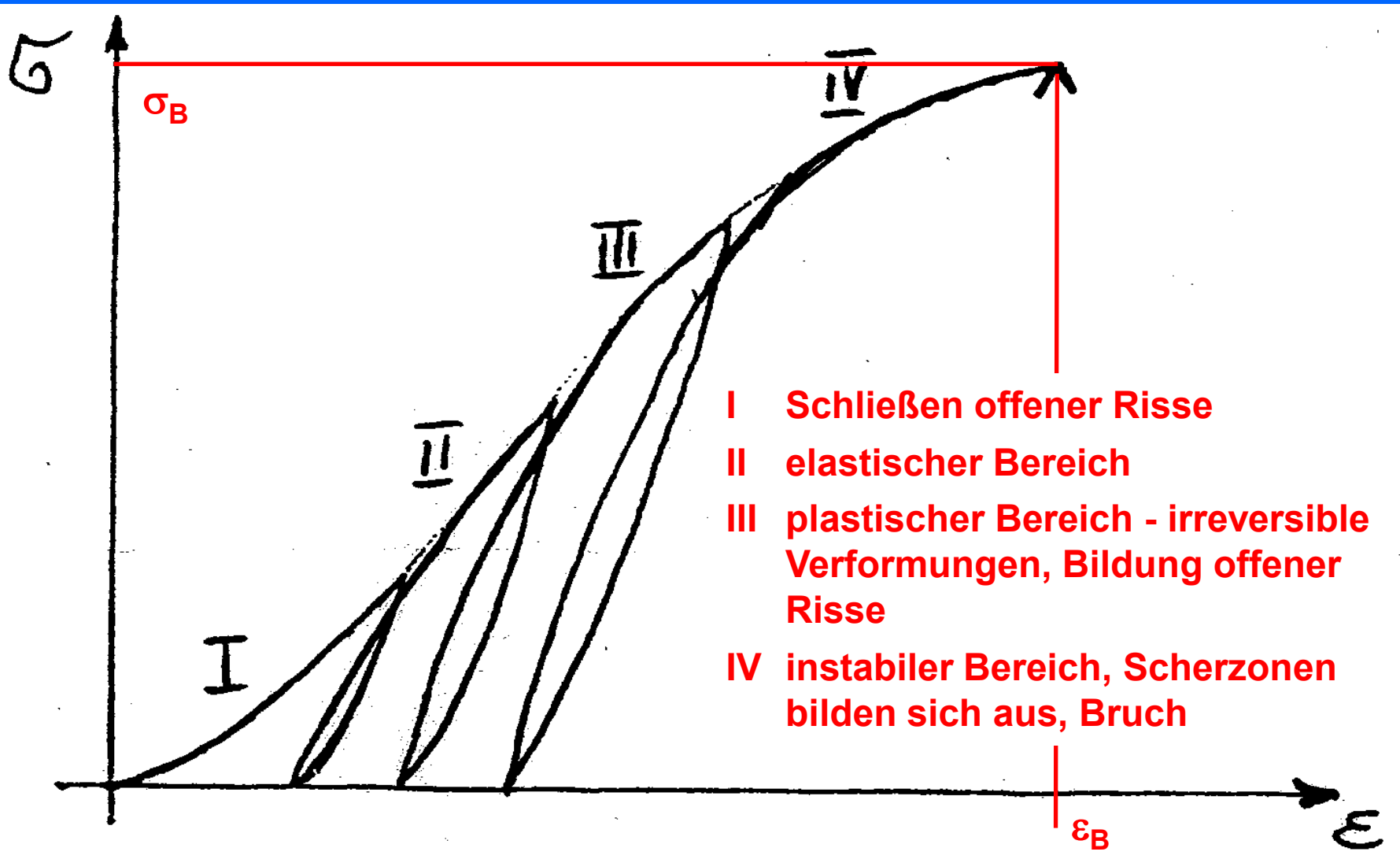


einfachste Art der Druckbeanspruchung



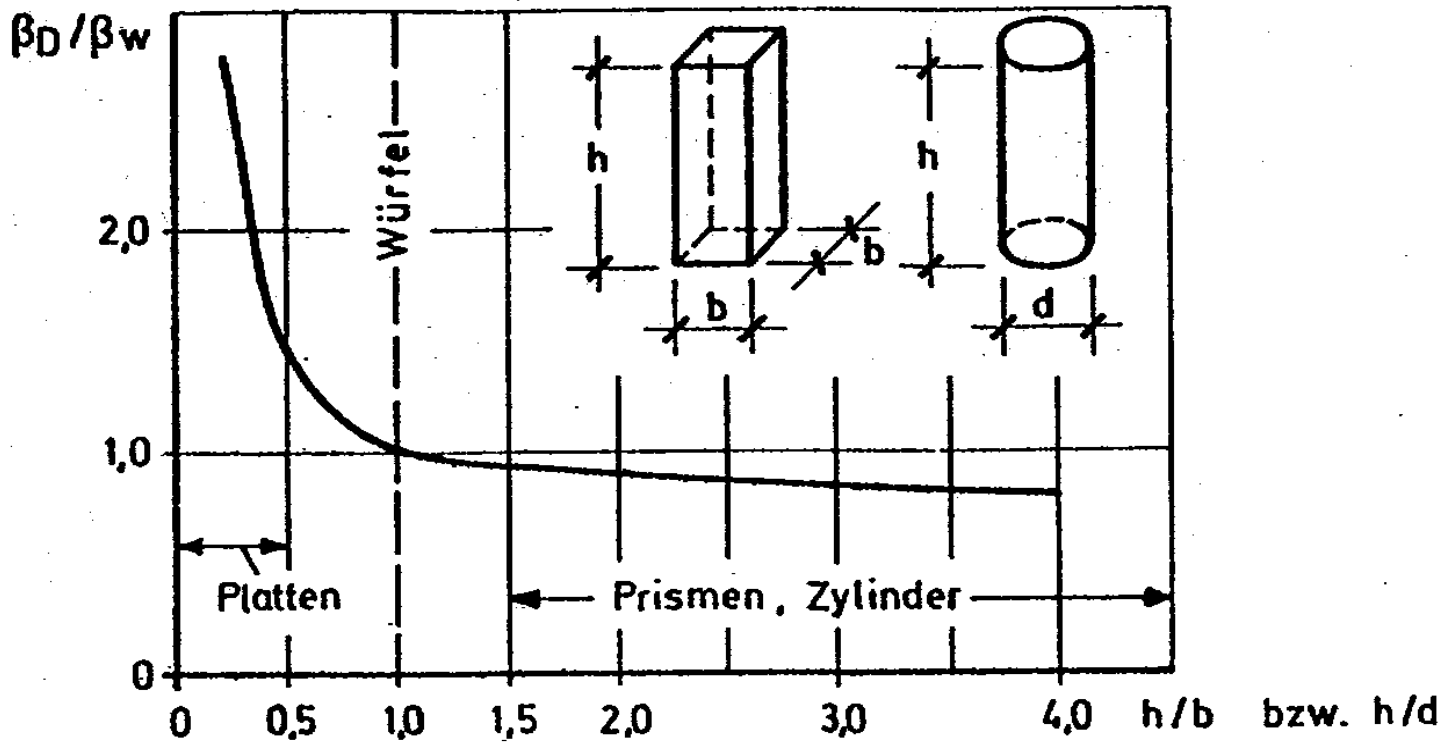
- zylindrische Proben mit  $H/D = 2,5 - 3,0$  und  $\varnothing 54$  mm (Empfehlung Nr. 1, DGGT), **Zylinderdruckfestigkeit**
- Würfel (DIN 52 105), **Würfeldruckfestigkeit**





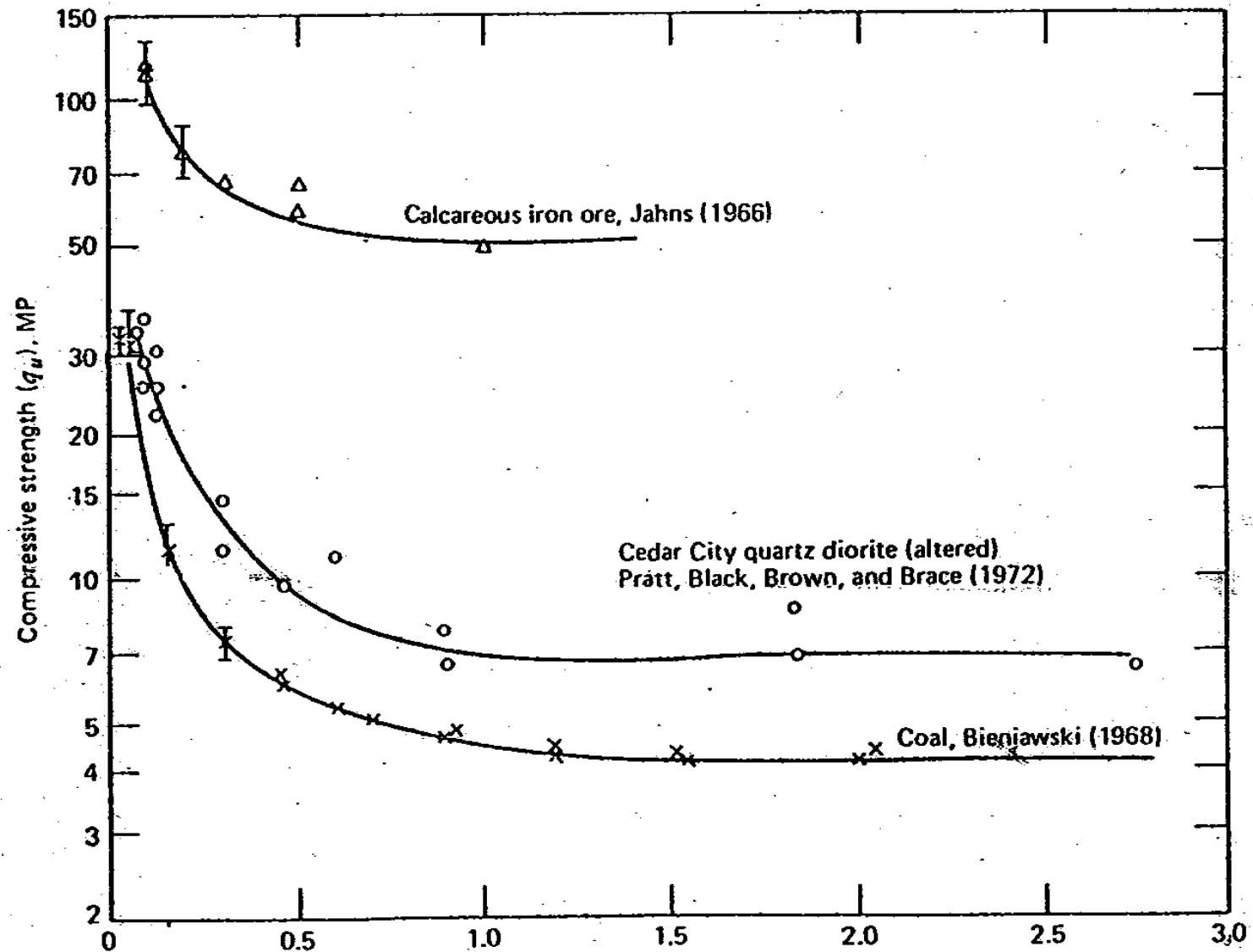
typische Versuchskurve, einaxialer Druckversuch

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

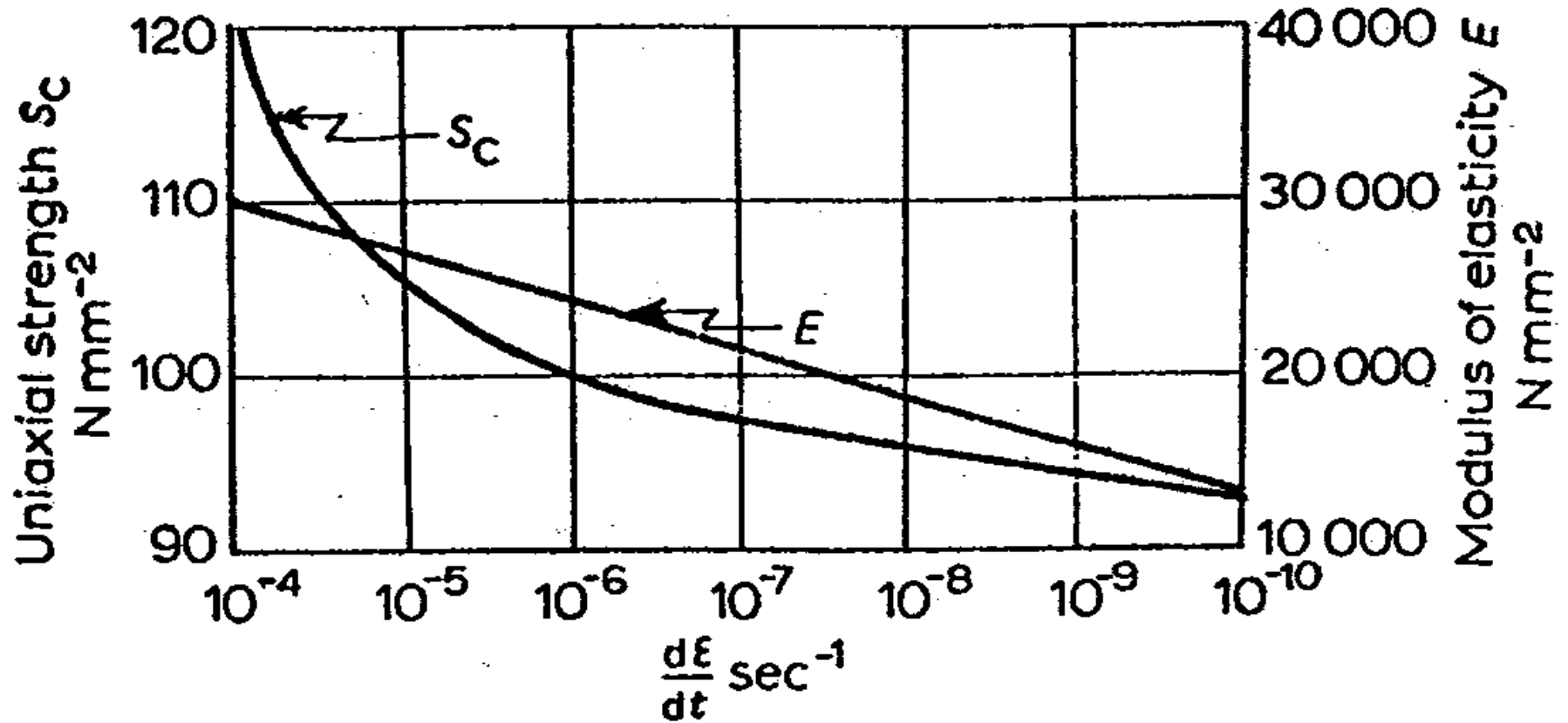


Verhältnis der Druckfestigkeit  $\beta_D$  prismatischer Körper zur Würfeldruckfestigkeit  $\beta_w$  in Abhängigkeit von der Schlankheit  $h/d$  bzw.  $h/b$  [ 25 ]

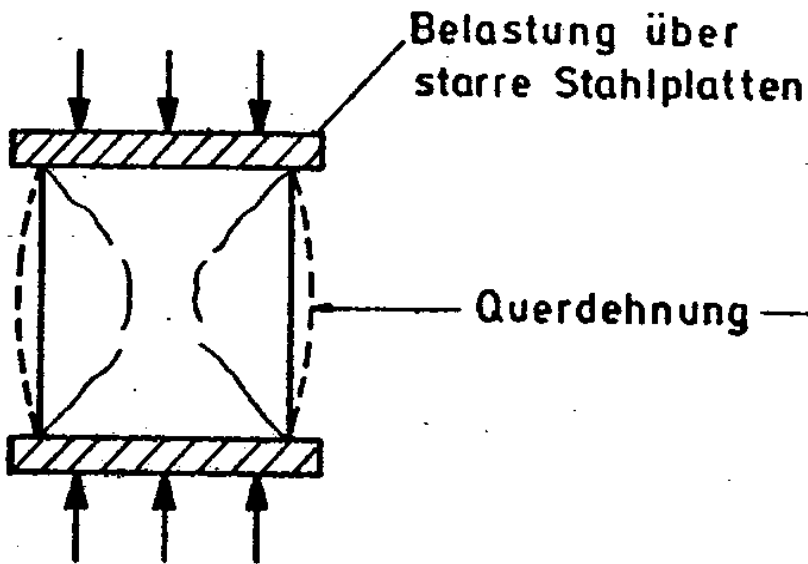
**1. Form des Probekörpers**



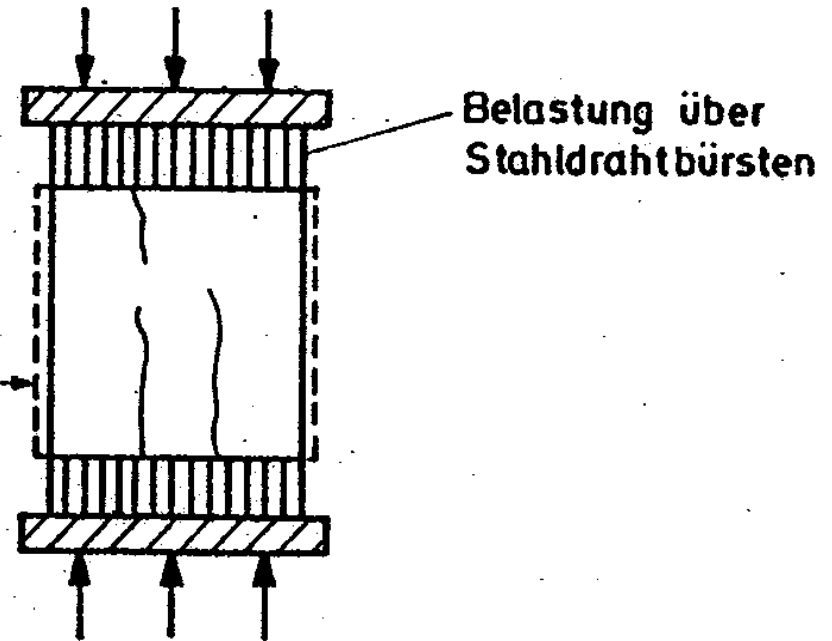
## 2. Probengröße



### 3. Verformungsgeschwindigkeit



a) Bruchkegel bei behinderter Querdehnung



b) Bruch durch Spaltrisse bei nicht behinderter Querdehnung

Bruchbilder von Betonwürfeln mit (a) und ohne Behinderung (b) der Querdehnung

## 4. Endflächenbedingungen



- Noch **weitere Einflussfaktoren**, z.B. Wassergehalt, Temperatur
- Verweis auf Empfehlungen ISRM bzw. AK Versuchstechnik im Fels, DGGT (Vergleichbarkeit)
- Hinweis auf praktische Bedeutung, z.B. Pfeiler im Bergbau!  
(Kammerbau)

In üblichen Prüfmaschinen wird nur die Bruchfestigkeit (Spitzen-) untersucht; Prüfmaschine wird bei der Belastung der Probe jedoch ebenfalls elastisch verformt; bei Erreichen von  $\sigma_B$  wird gespeicherte Energie plötzlich frei  
→ **explosionsartiger Zerfall der Probe** → **Versuchsende** (!)

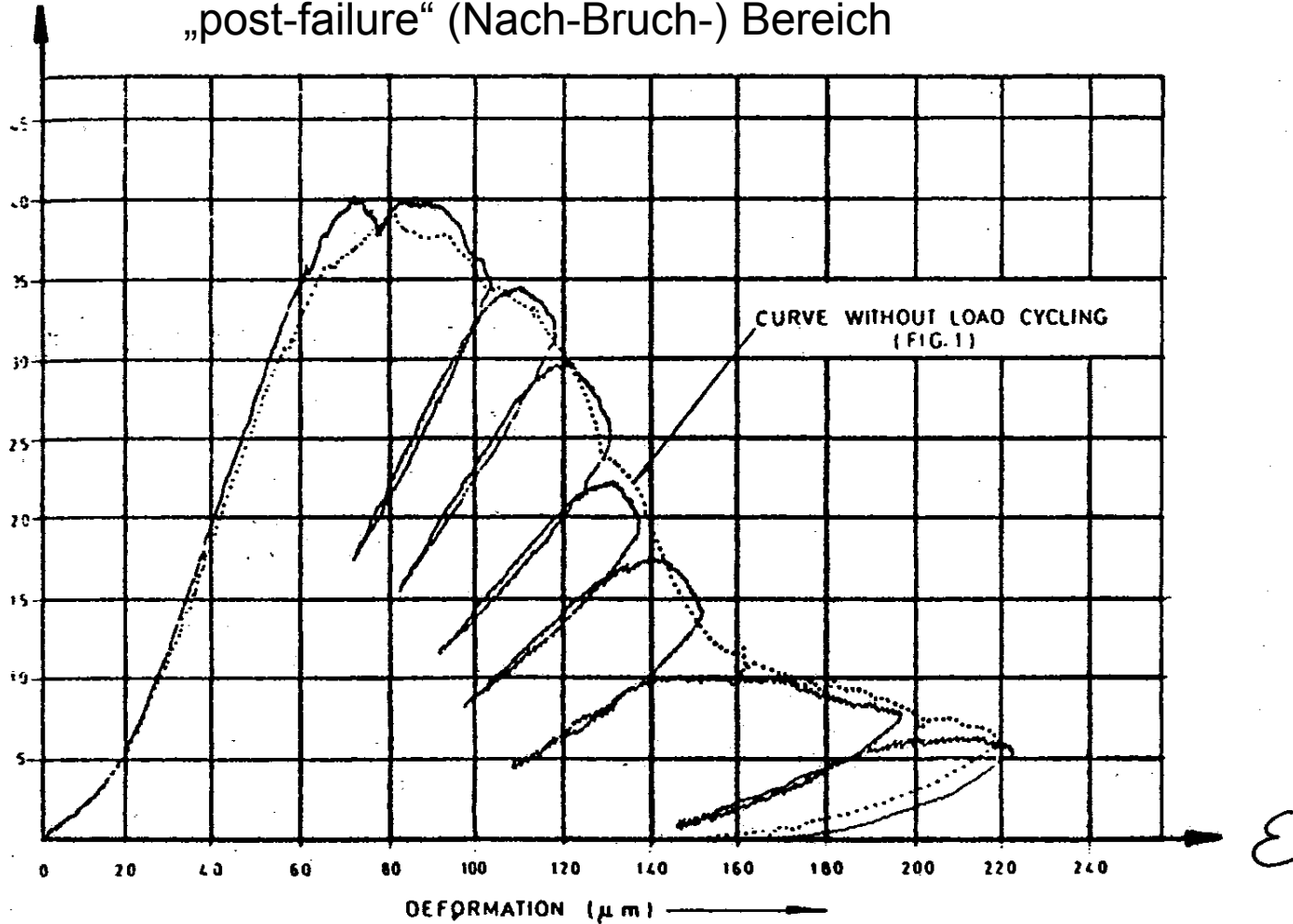
Mit servo gesteuerten Prüfmaschinen, Verformungs- bzw. Weg- gesteuert; axiale Verformungsgeschwindigkeit wird nach einem vorgegebenen Wert konstant gehalten, wobei der Öldruck des Systems je nach Probenverhalten in extrem kurzer Zeit erhöht bzw. reduziert werden kann.

→ **vollständige Spannungs-Verformungskurve**, zeigt eine Restfestigkeit nach Überschreiten der Bruchfestigkeit  $\sigma_B$



σ

Vollständige Spannungs-Dehnungskurve mit zyklischer Belastung im „post-failure“ (Nach-Bruch-) Bereich

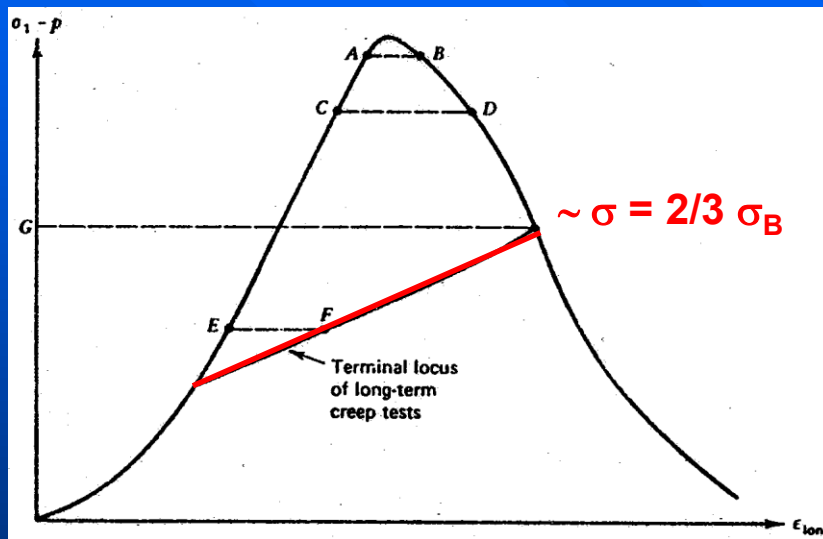


**Bedeutung:** Gebirge liegt verglichen mit Gesteinsproben im post-failure-Bereich; Analogien im Verhalten von geklüftetem Gebirge und Gestein

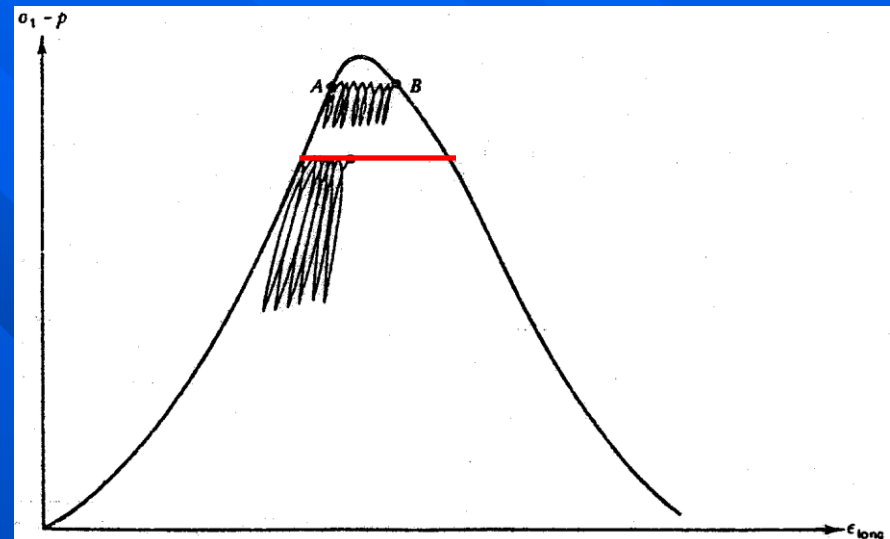


# Kriechen und zyklische Belastung

→ 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.

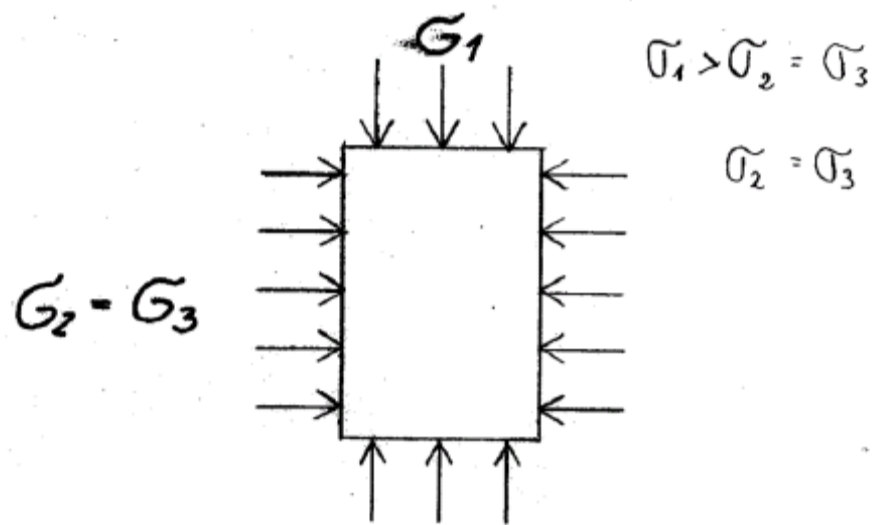
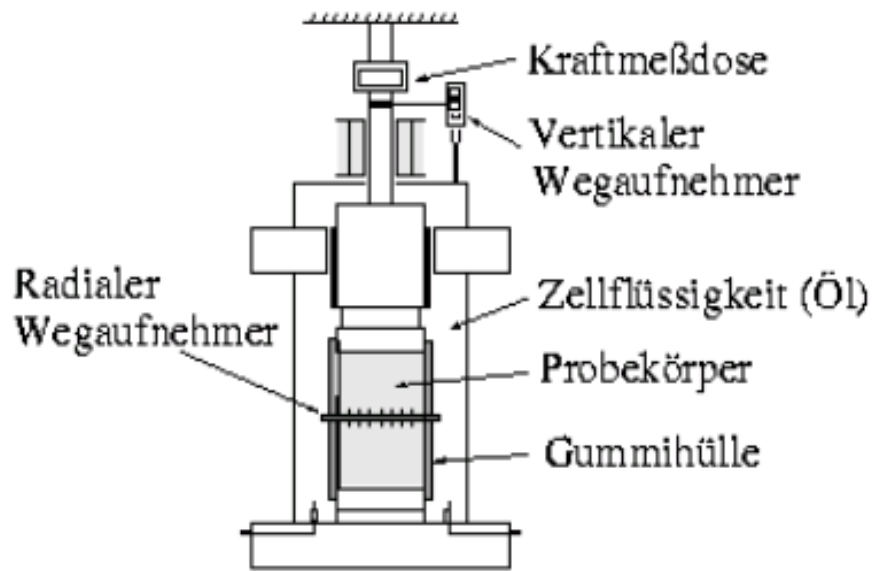
Versuchsdurchführung Empfehlung Nr. 2, DGGT

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!

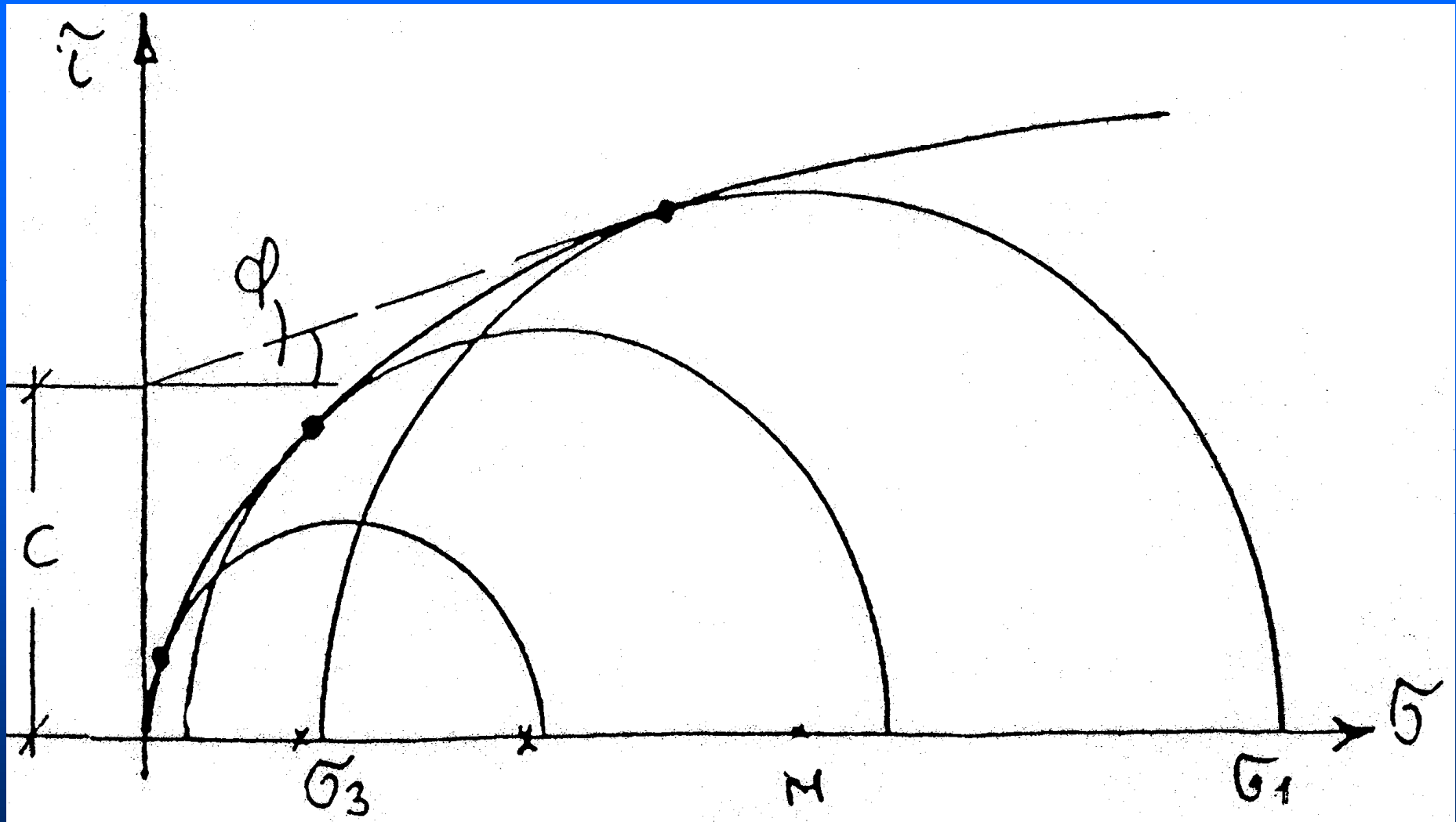
**Triaxiale Beanspruchung ist Regelfall im Felsbau**





Triaxialzelle

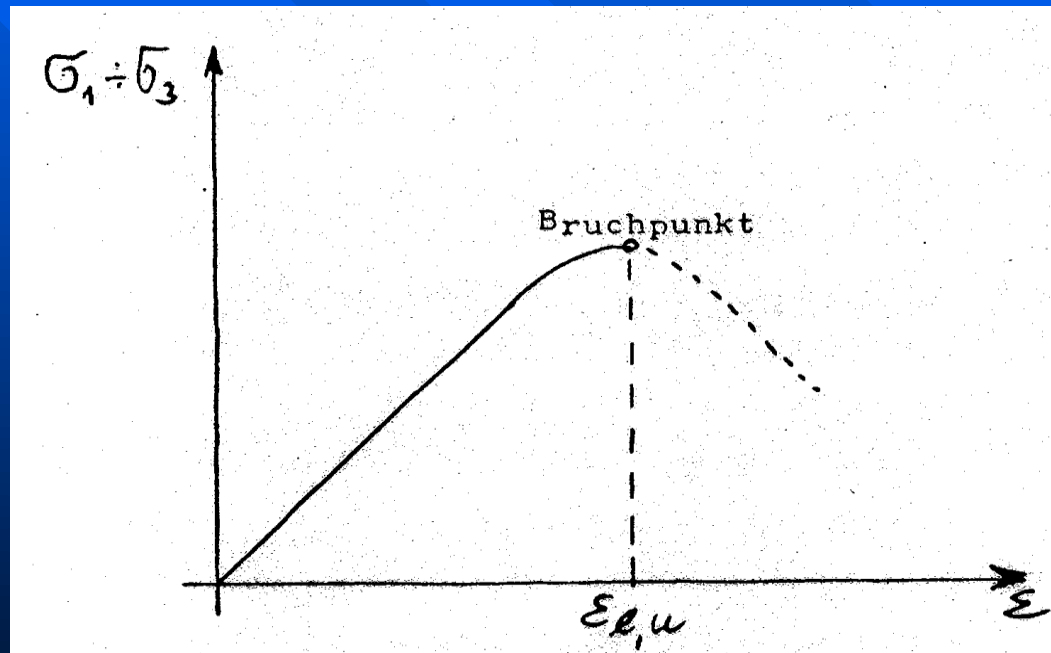




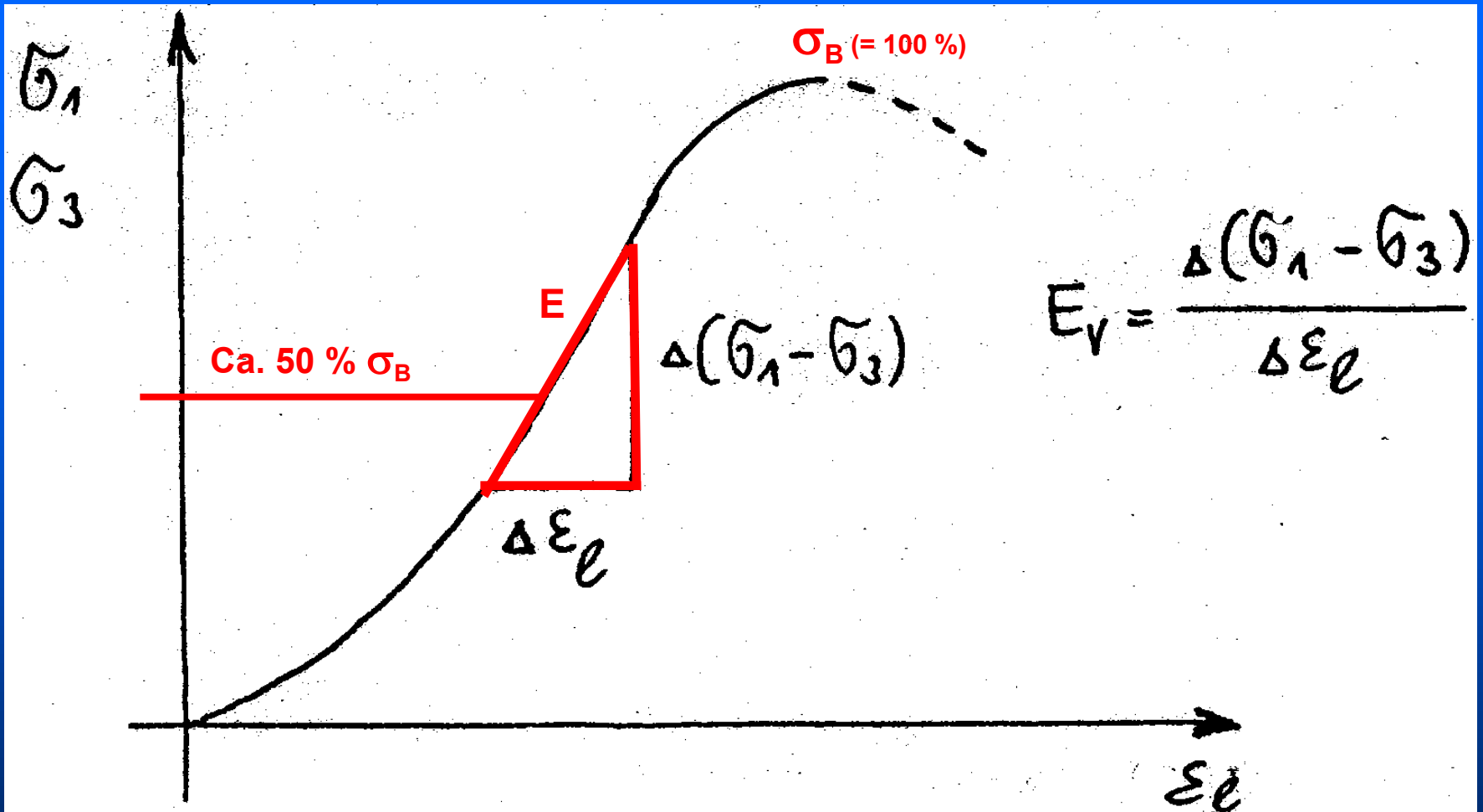
## Auswertung triaxialer Druckversuch im Mohr-Diagramm

# Triaxialversuch liefert:

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

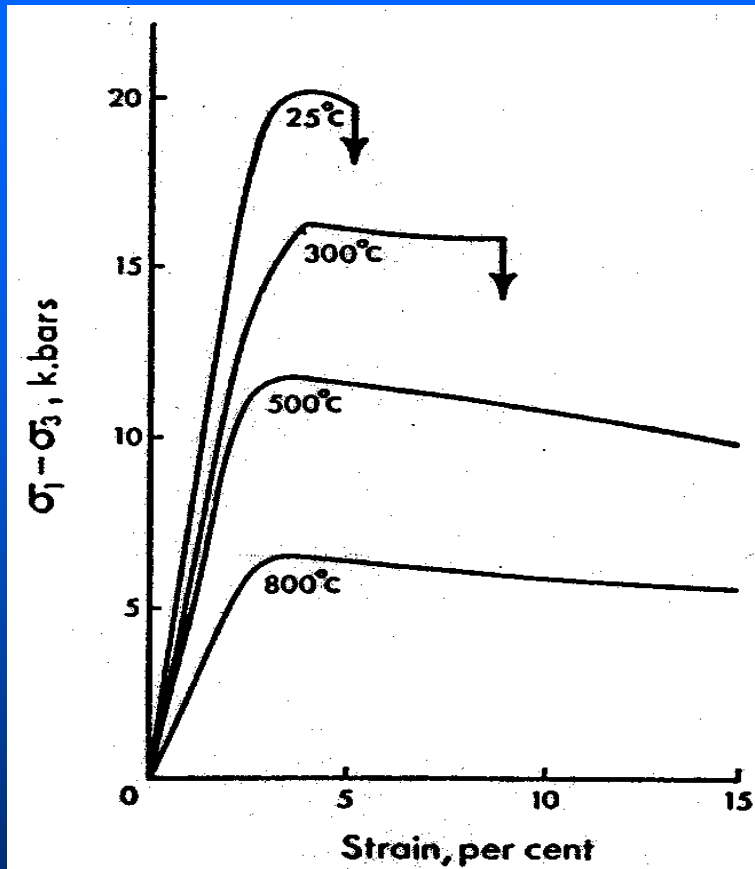






## Auswertung Sigma – Epsilon – Diagramm

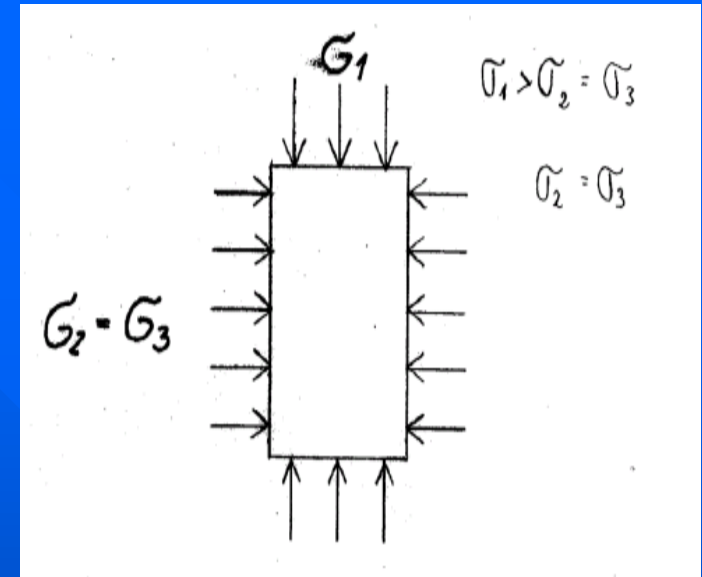
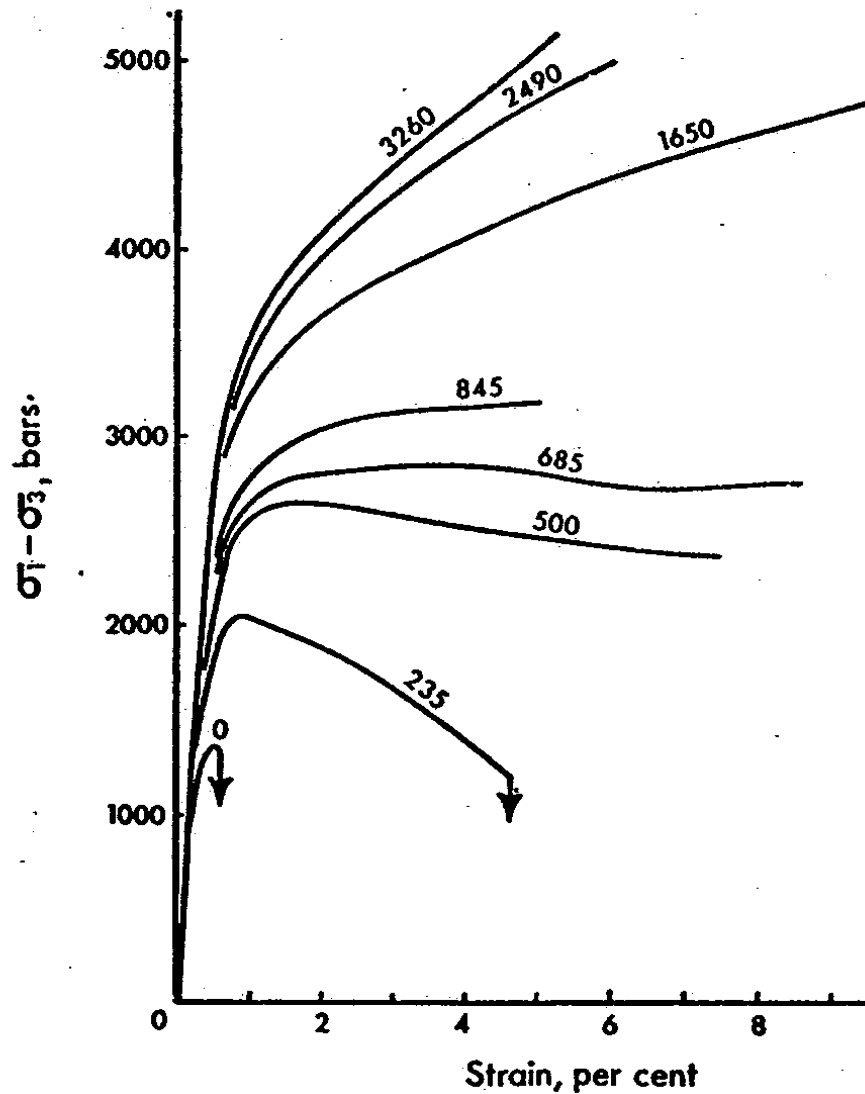
**triaxiale Festigkeit, wie bereits einaxiale Festigkeit, von zahlreichen Faktoren abhängig (zusätzlich zum Gesteinstyp)**



## 1. Einfluss Temperatur

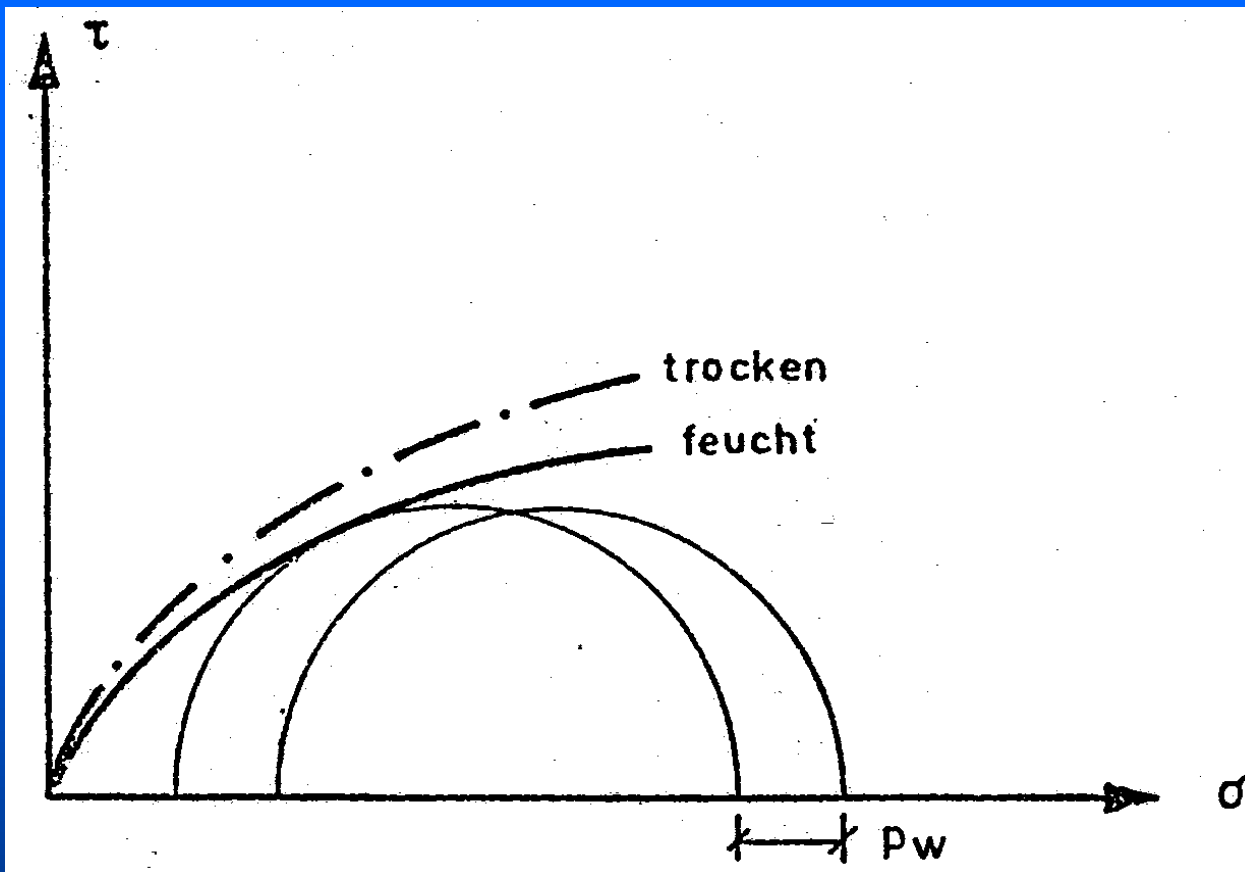
bestimmt auch Materialverhalten, bei niedrigen Temperaturen spröde, bei hohen duktil ==> Tektonik





## 2. Einfluss Manteldruck





### 3. Einfluss Wassergehalt

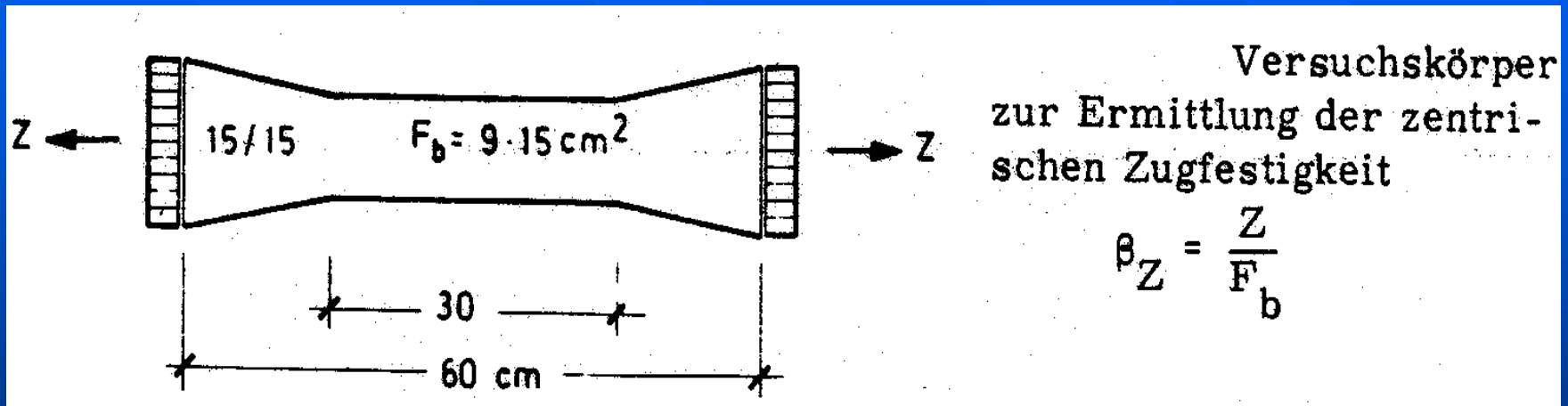
**Hinweis: Versuchsergebnisse meist zu gut,  
Probenauswahl – objektiv im Hinblick auf Probenvorbereitung,  
Stichwort charakteristische Werte**



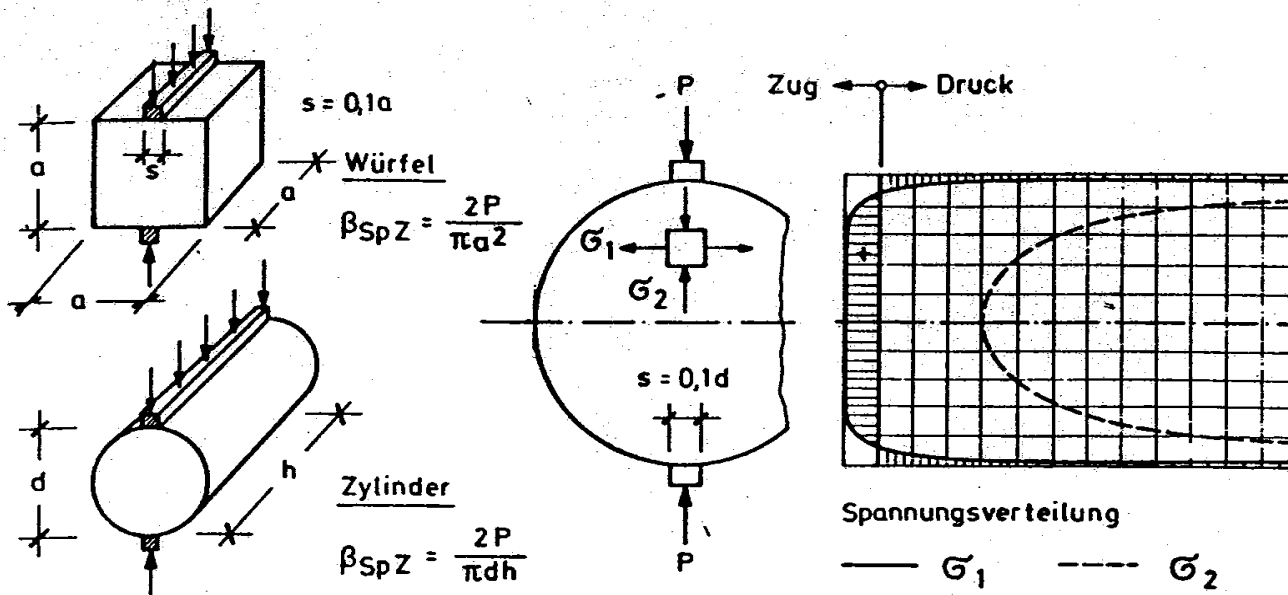
### 3.2.3 Zugfestigkeit

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

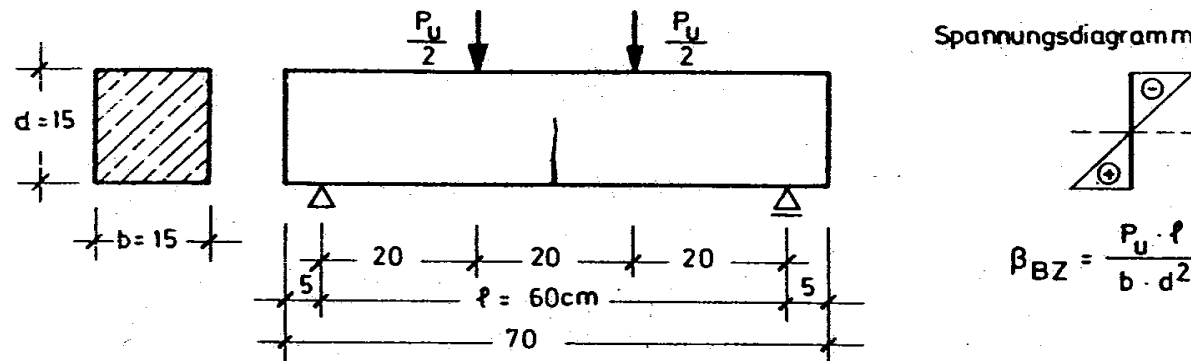
- Werte aus **einaxialem Zugversuch** (Empfehlung Nr. 10, DGGT)



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



Ermittlung der Spaltzugfestigkeit

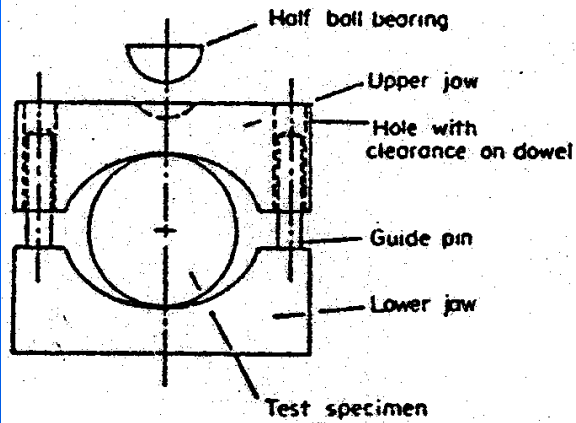


Prüfkörper zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit

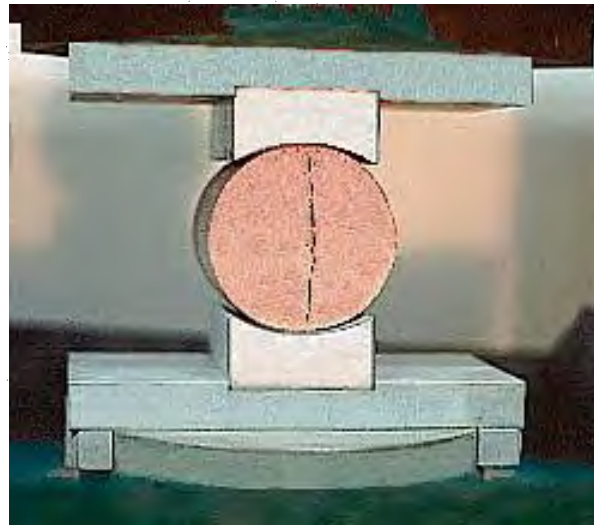
Spaltzugfestigkeit

Biegezugfestigkeit

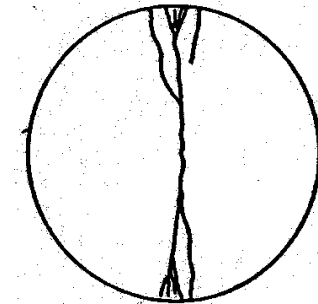




Versuchseinrichtung



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  $\varphi$ ,  $c$**  (s.o.) des Gesteinskörpers (!)



## 3.2.5 Statische elastische Parameter

Außer einaxialer Druckfestigkeit liefert einaxialer Druckversuch noch die elastischen Parameter  $E$ ,  $\nu$  bzw.  $m$

$m$  = Querdehnungszahl

$\nu$  = Poissonzahl oder Querdehnungsverhältnis

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

$$\begin{aligned} \epsilon_l &= \frac{\Delta l}{l_0} && \text{(Längenänderung)} \\ \epsilon_d &= \frac{\Delta d}{d_0} && \text{(\text{\O} Änderung)} \\ \epsilon_c &= \frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\pi \cdot \Delta d}{\pi \cdot d_0} = \frac{\Delta d}{d_0} = \epsilon_d && \text{(Umfangsänderung)} \end{aligned}$$

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

Poissonzahl  $\nu = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_l} \quad 0 < \nu < 0,5$

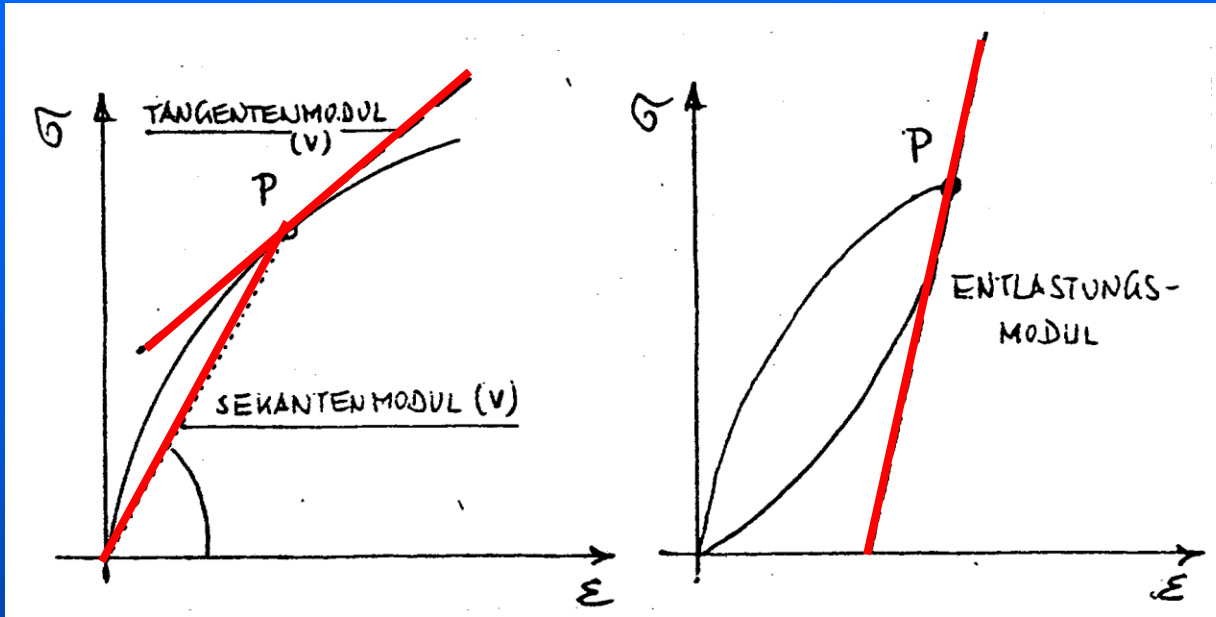
meist  $\nu = 0,25$  gesetzt, wenn keine Versuche in stark verwittertem Fels auch 0,40

Querdehnungszahl  $m = - \frac{\epsilon_l}{\epsilon_d}$   
 $m = \frac{1}{\nu}$





# E-Modul / V-Modul

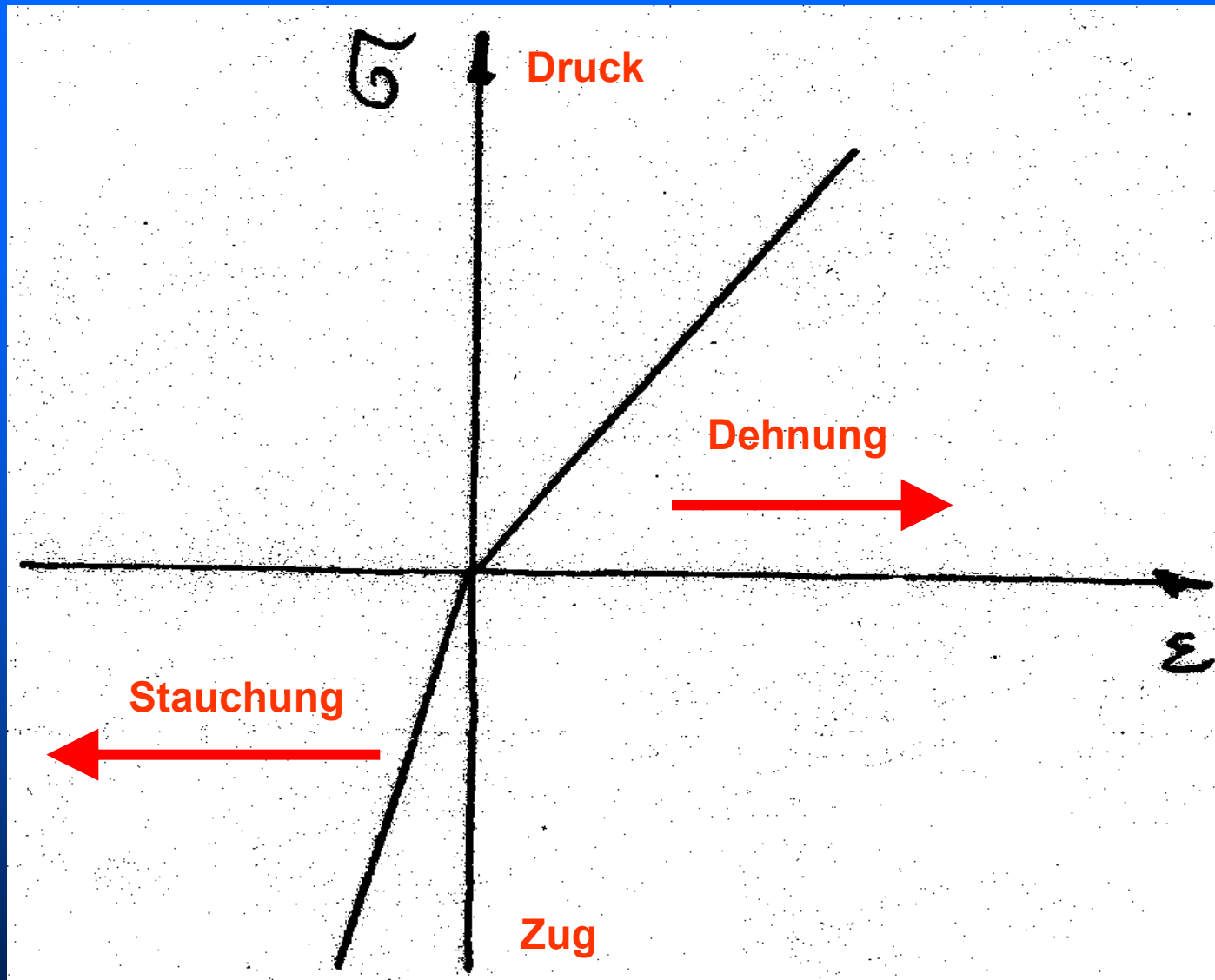


$$E = \sigma / \epsilon$$

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.

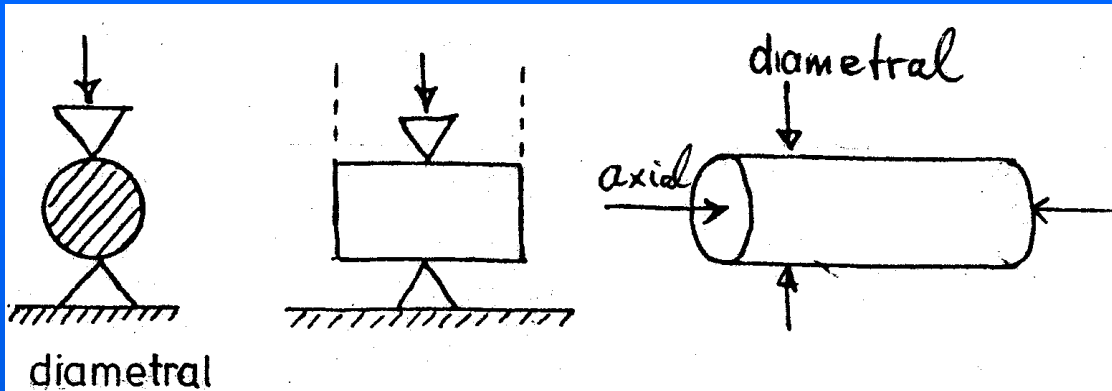




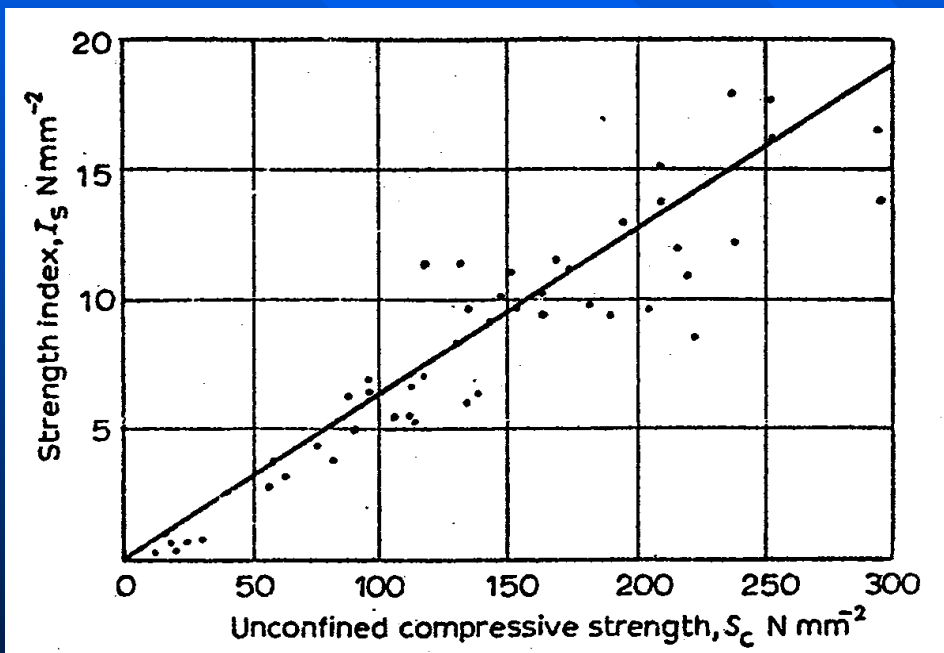


## 2. Punktlastindex (Empfehlung Nr. 5, DGGT)





## 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  $\sigma_D$  = einaxialer Druckfestigkeit

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

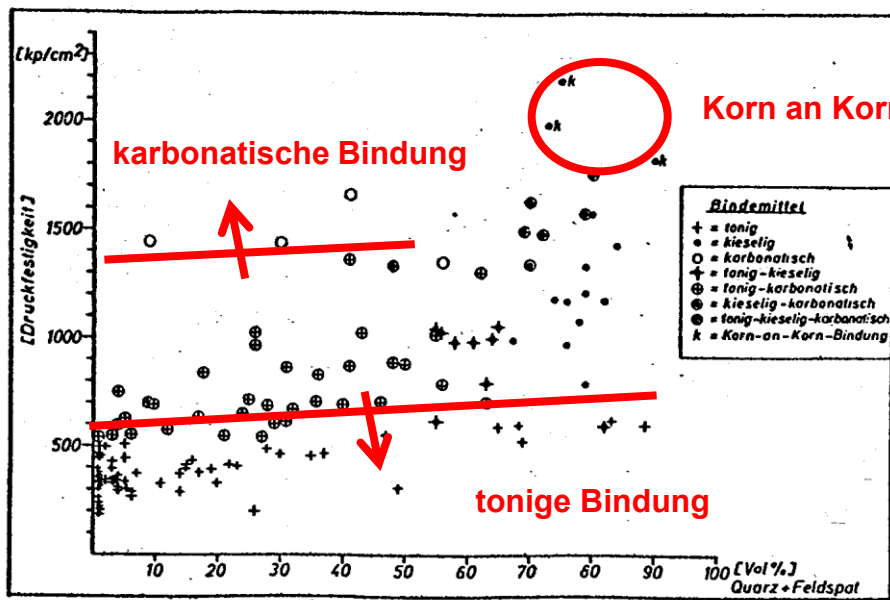




## 3.2.9 Zusammenhänge zwischen Gesteinsart und Festigkeit

- Zusammenhang innerer Aufbau Gesteine / Festigkeit / Verformbarkeit nachweisbar (Mineralogie).
- **Druckfestigkeit wächst** mit Gehalt an druckfesten Materialien, **z.B. Quarz**
- feinkörnige Gesteine in der Regel höhere Festigkeiten
- **Festigkeit nimmt ab** mit zunehmendem Gehalt an **spaltbaren Mineralien (bevorzugt Glimmer)**
- nimmt ab mit zunehmender Porosität
- nimmt zu mit Festigkeit des Bindemittels bei Sedimentgesteinen





Der Einfluß des Gesteinsaufbaus auf die Druckfestigkeit von Ruhrkarbonategesteinen (Schimazek, Knatz, 1974)

-> Gehalt Quarz / Feldspat

Praktisch ist Prognose aus Gesteinsart weniger interessant, da im Labor leicht prüfbar; jedoch andere Eigenschaften (**z.B. Bindemittel, siehe Diagramm**), die durch die o.a. Versuche nicht feststellbar sind, können entscheidend sein:

- Löslichkeit (im chemischen Sinne), Beispiel: Karst (Kalk, Salz)
- Erodierbarkeit
- Verwitterungsanfälligkeit (Sonnenbrennerbasalt, Tonsteine, Mergel)
- Quellverhalten von Mineralogie abhängig (Gips/Anhydrit, Ton)



Zugfestigkeit ~ 1/10

1 : 357 E-Modul

Gestein	Einaxiale Druckfestigkeit [MN/m <sup>2</sup> ]			Einaxiale Zugfestigkeit [MN/m <sup>2</sup> ]			E-Modul [MN/m <sup>2</sup> * 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

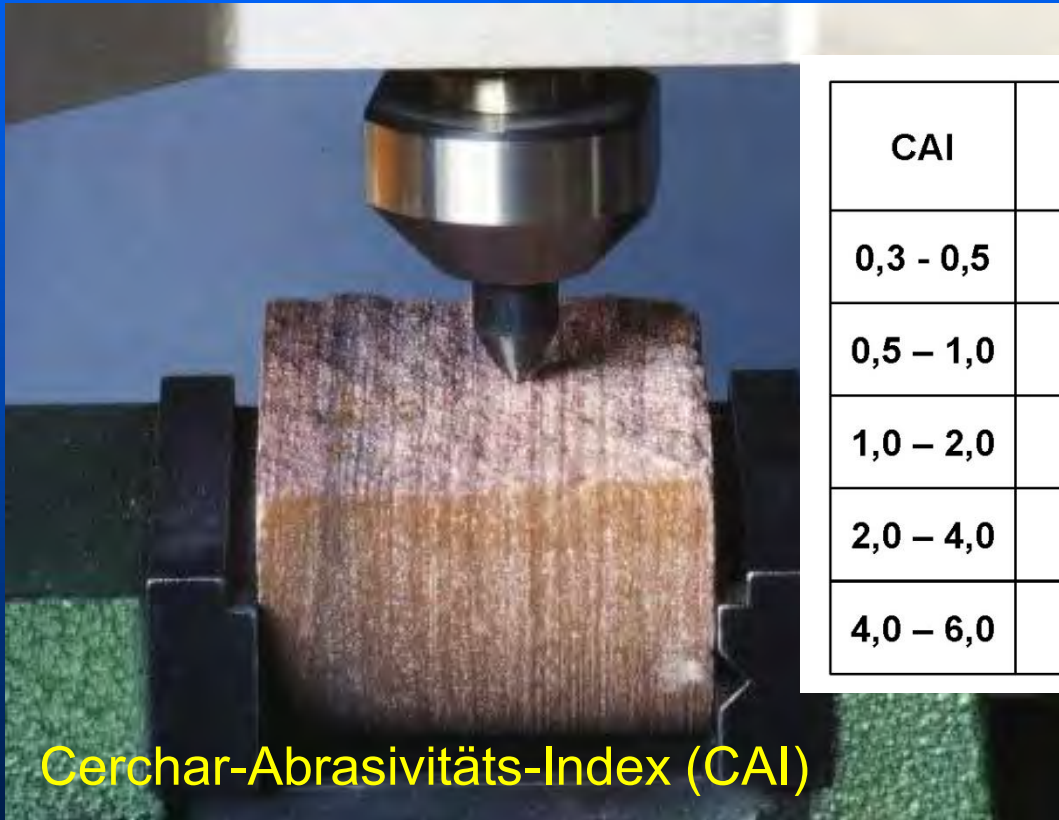
Verwitterungsgrad	V5	V4	V3	V2	V1	V0
Gesteinstyp	Boden	Halbfestgestein			Festgestein	
Zerlegung	ohne Gefüge	Restgefüge	Auflockerung an Trennflächen vollständig/ stark		teilweise/ schwach	beginnend   keine
Bohrkern	grusig, bindig	blättrig/ bröckelig/ stückig		Kernstücke, -scheiben	Vollkern	
Festigkeit	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

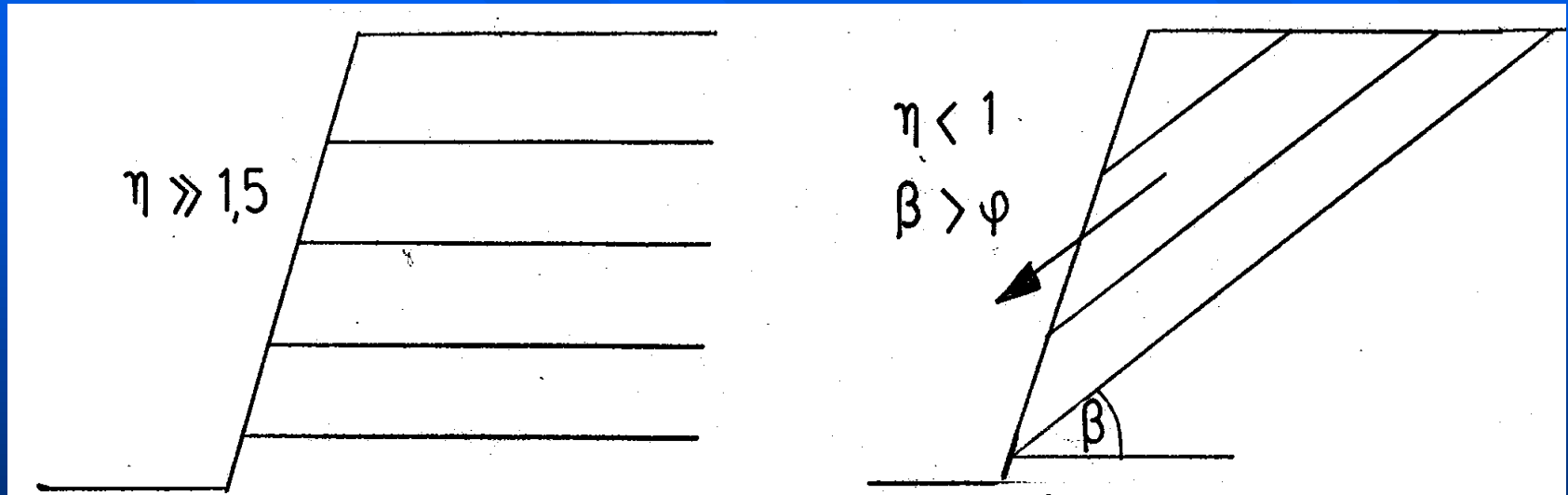
1. Programm
2. Einleitung
3. Gesteinseigenschaften
- 4. Trennflächen**
5. Gebirgseigenschaften
6. Spannungen im Gebirge
7. Bruchvorgänge im Gebirge / Gestein
8. Wasser im Gebirge
9. Gesteins- und Gebirgsklassifizierung



# 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 !**

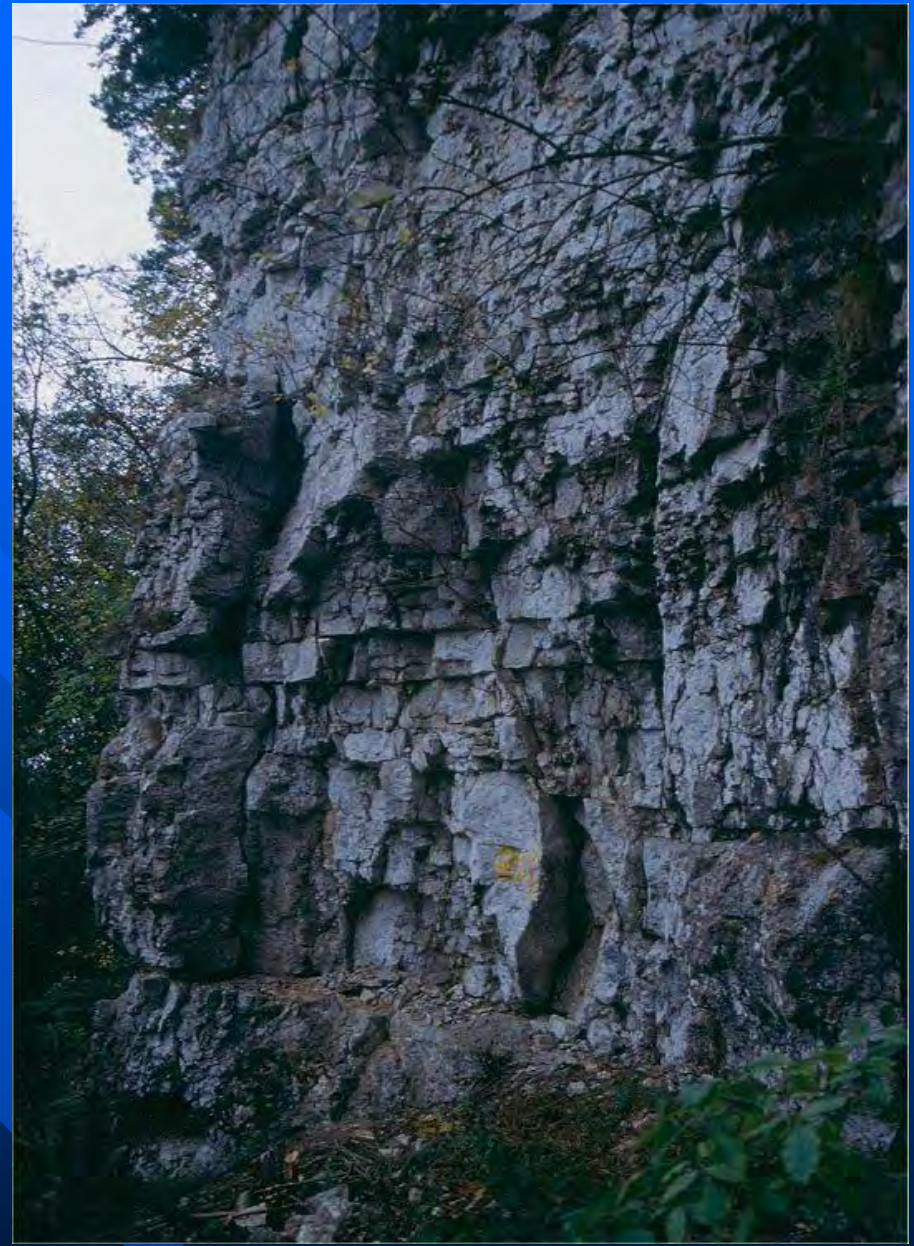
**Klassifizierung je nach Genese und Vorgeschichte, im wesentlichen**

- 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  $\varphi$  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;

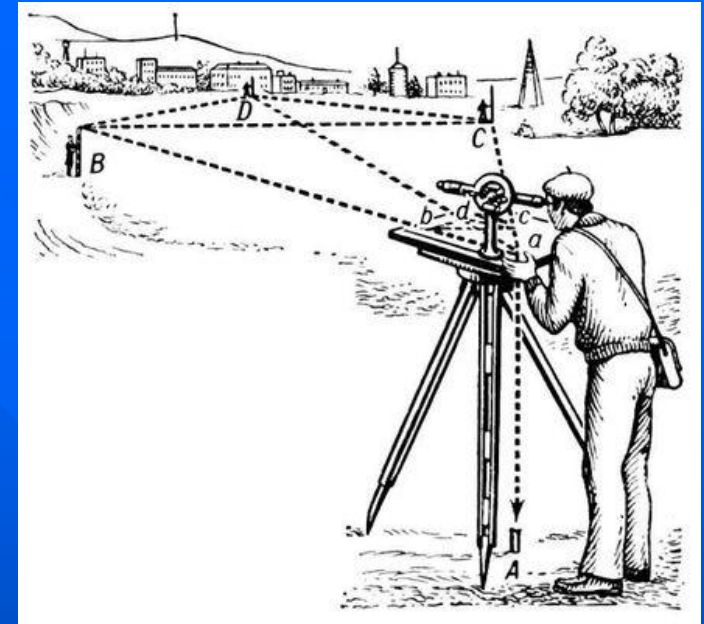




# Messverfahren für Einmessung

## 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 60/45 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.





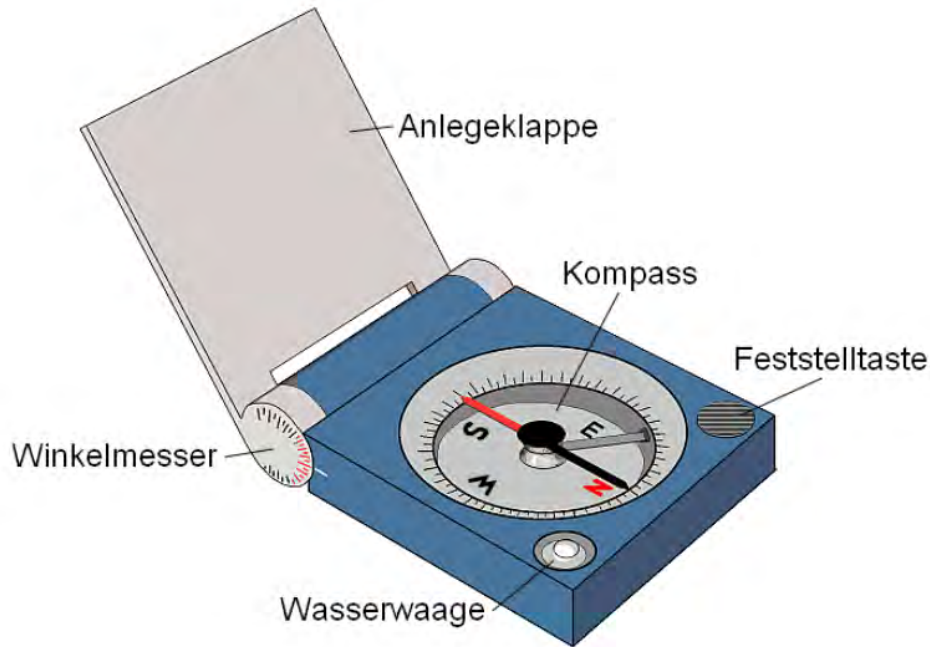
## 2) „geotechnische“ Angabe 2 Werte erforderlich

- Fallrichtung (Streichen):**  
Winkel zwischen der Projektion der Richtung des größten Gefälles einer geologischen Fläche in der Horizontalen und der Nordrichtung, gemessen über Ost
- Fallwinkel:** (siehe oben)  
 Beispiel wie oben, jetzt 150/45

**Wichtig:  
Reihenfolge der Angaben**

## Gefügekopaß

Messung -> Übung



→ nächster Schritt: Darstellung



DR. SPANG

DB Trainingszentrum Regensburg  
EINFÜHRUNG IN DIE FELSMECHANIK

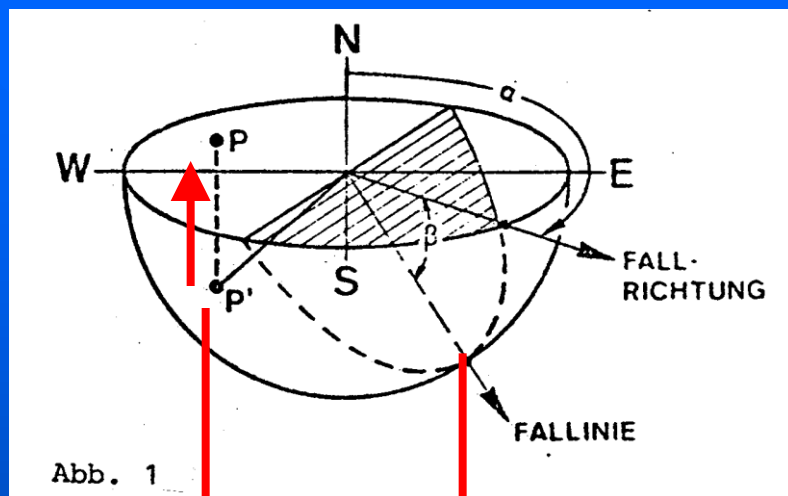


# Darstellung in Lagenkugel (3. Möglichkeit aus Skript)

- 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**

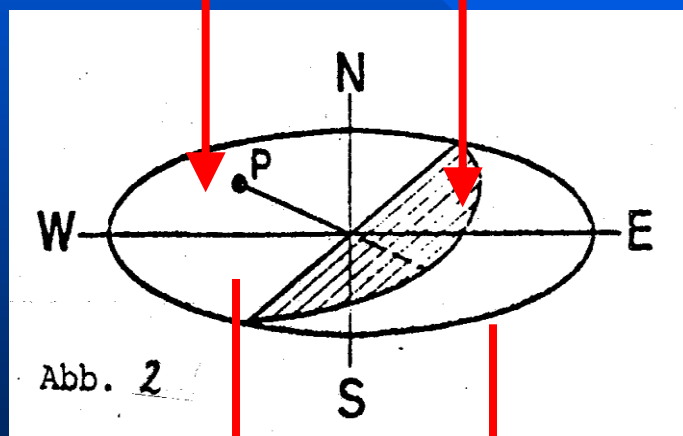


# Darstellung einer Fläche in der Lagenkugelprojektion



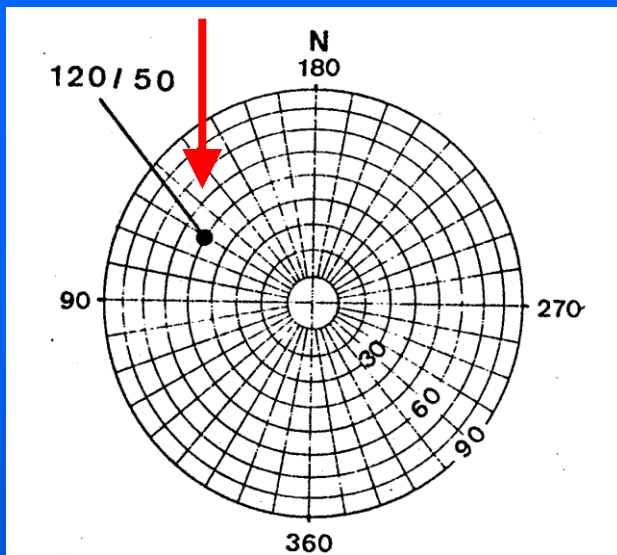
Fläche gedanklich in den Mittelpunkt einer Halbkugel parallel verschoben (teilweise schraffiert)

**Polpunkt P** ist Durchstoßpunkt durch untere Halbkugel

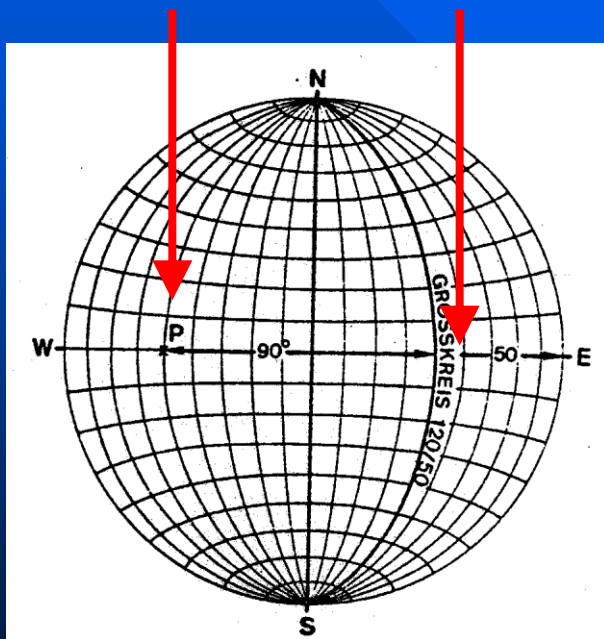


## a) Poldarstellung

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



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

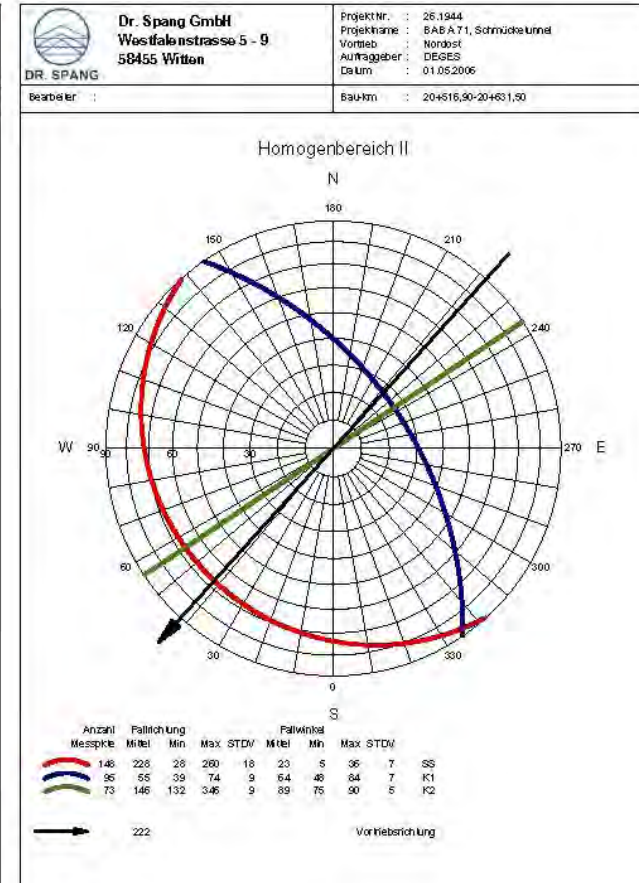
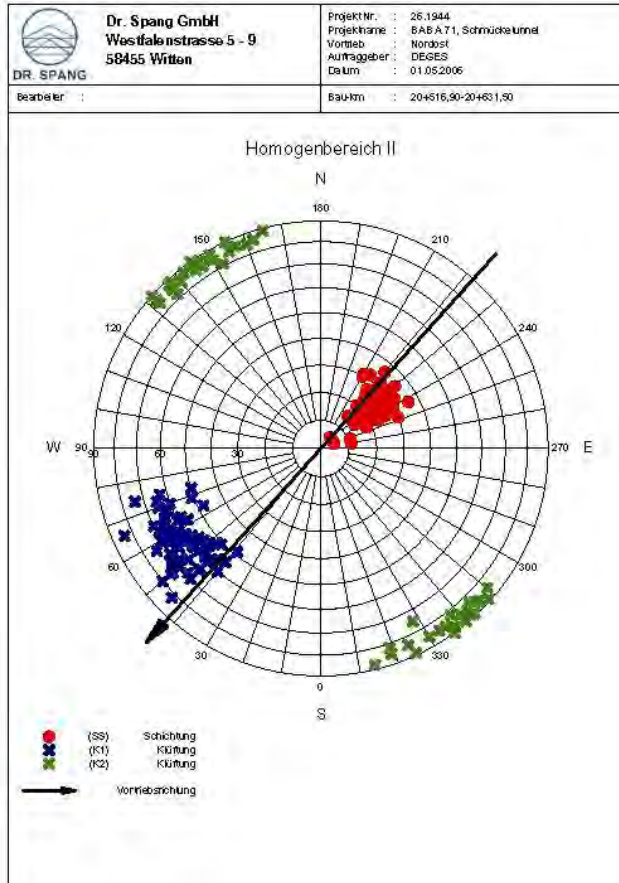


## b) Großkreisdarstellung

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  $90^\circ$  abzählt.

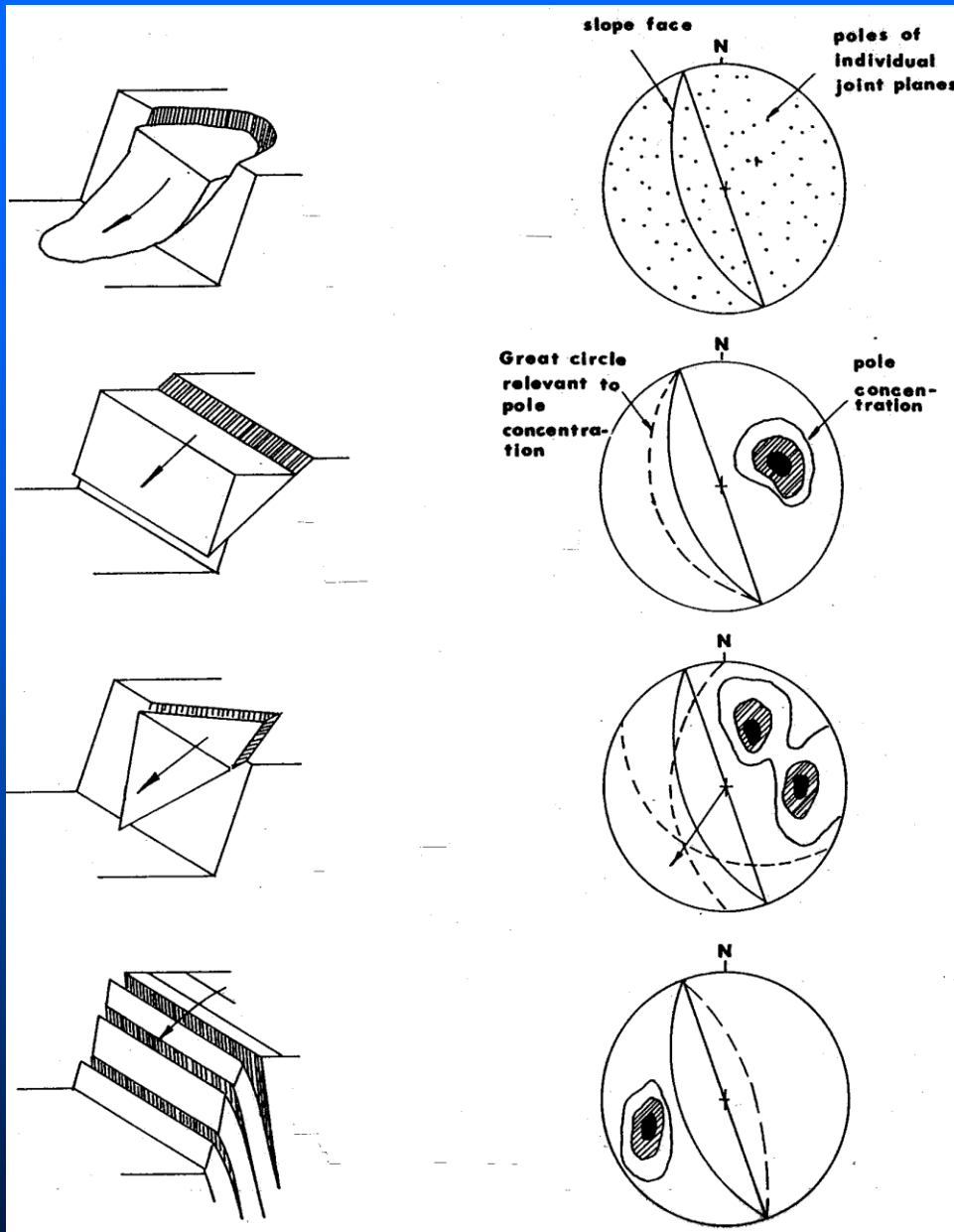


# Trennflächen - Darstellung



**Aufnahme der Trennflächenorientierung mit Geologenkompass und Darstellung in der Lagenkugel**





- 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



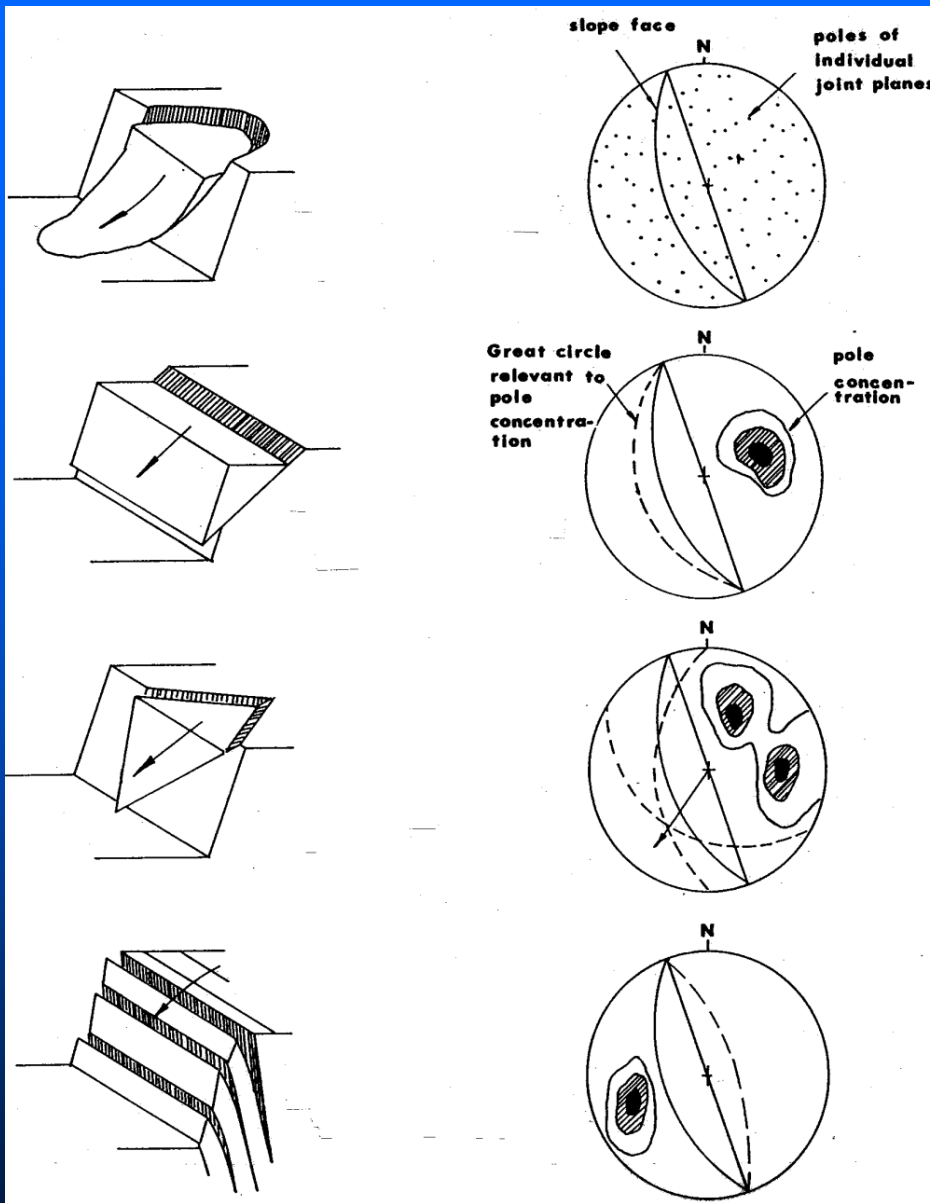


a) Versagen auf gekrümmter Bruchfläche in stark zerlegtem Gebirge ohne identifizierbare Regelung der Trennflächen.









- 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







- 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 Ausblänge

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

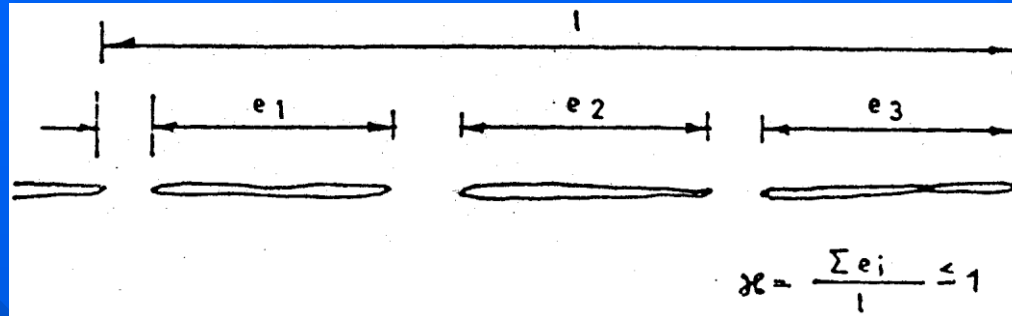
Klufftlänge	Begriff	Gebirge
< 0,1 m	Kleinstklüfte	kleinklüftig
0,1 - 1,0 m	Kleinklüfte	
1,0 - 10 m	mittelgroße Klüfte	mittelklüftig
10 - 100 m	Großklüfte	großklüftig
> 100 m	Riesenklüfte	





## 4.3.2 Durchtrennungsgrad

- **linearer Durchtrennungsgrad**  $\chi$ , 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.

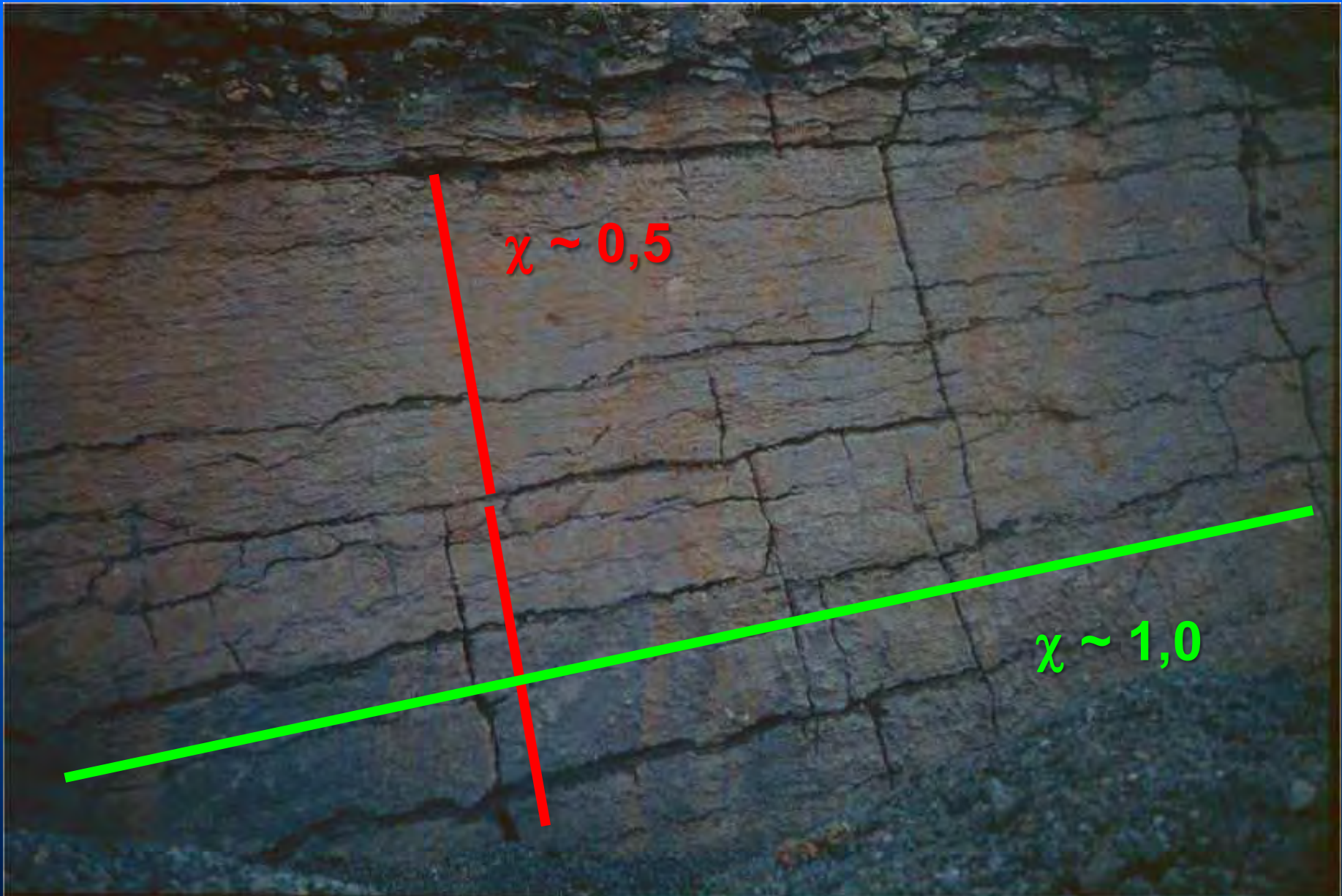
$\chi = 1,0$ ; bedeutet eine vollständige Durchtrennung - sie stellt bei **Schichtflächen** den Regelfall dar.

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

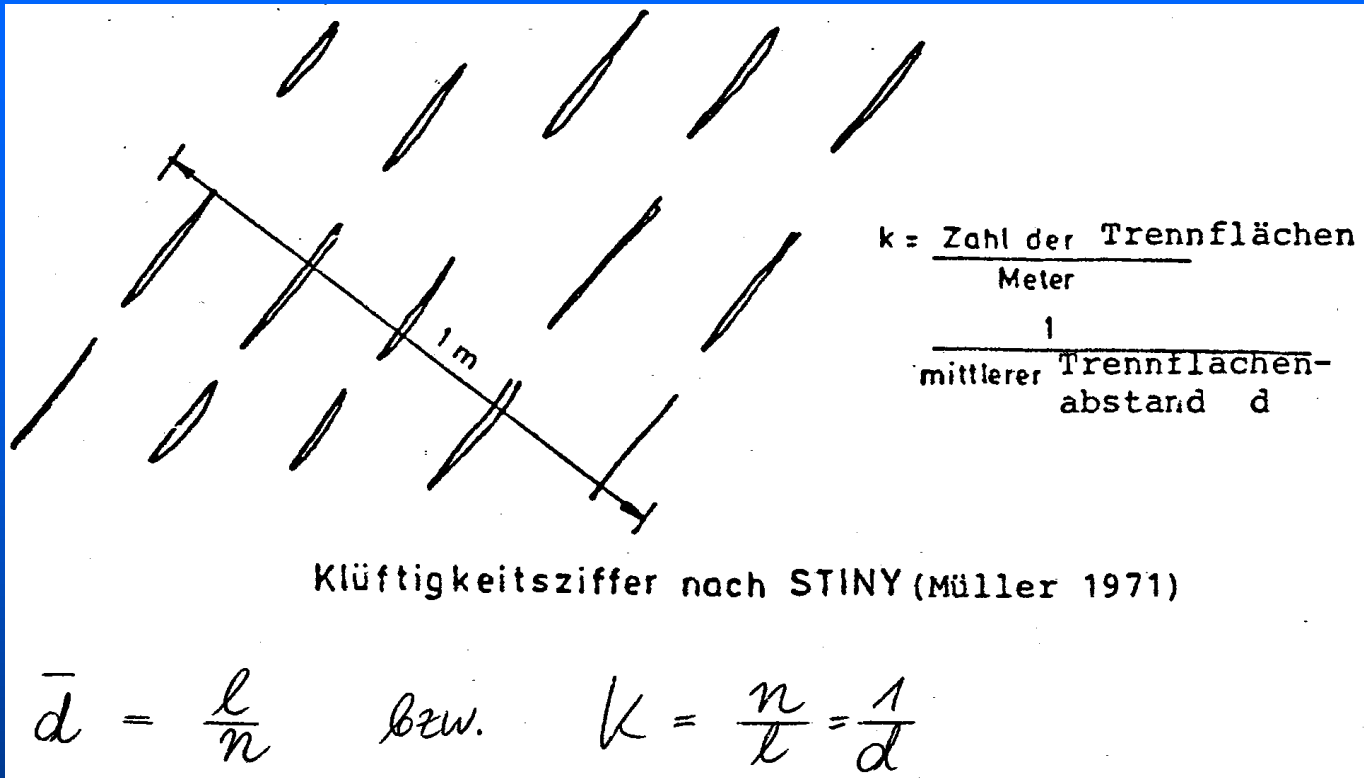
In der Literatur finden sich Hinweise, dass

$\chi \leq 0,5$ ; 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 ?**



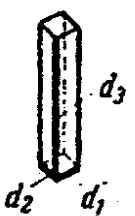
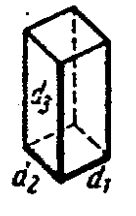
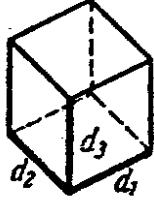
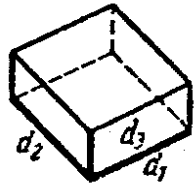
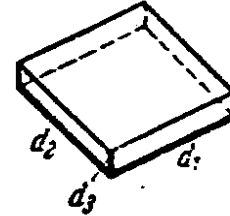
## 4.3.4 Klufföffnungsweite

**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











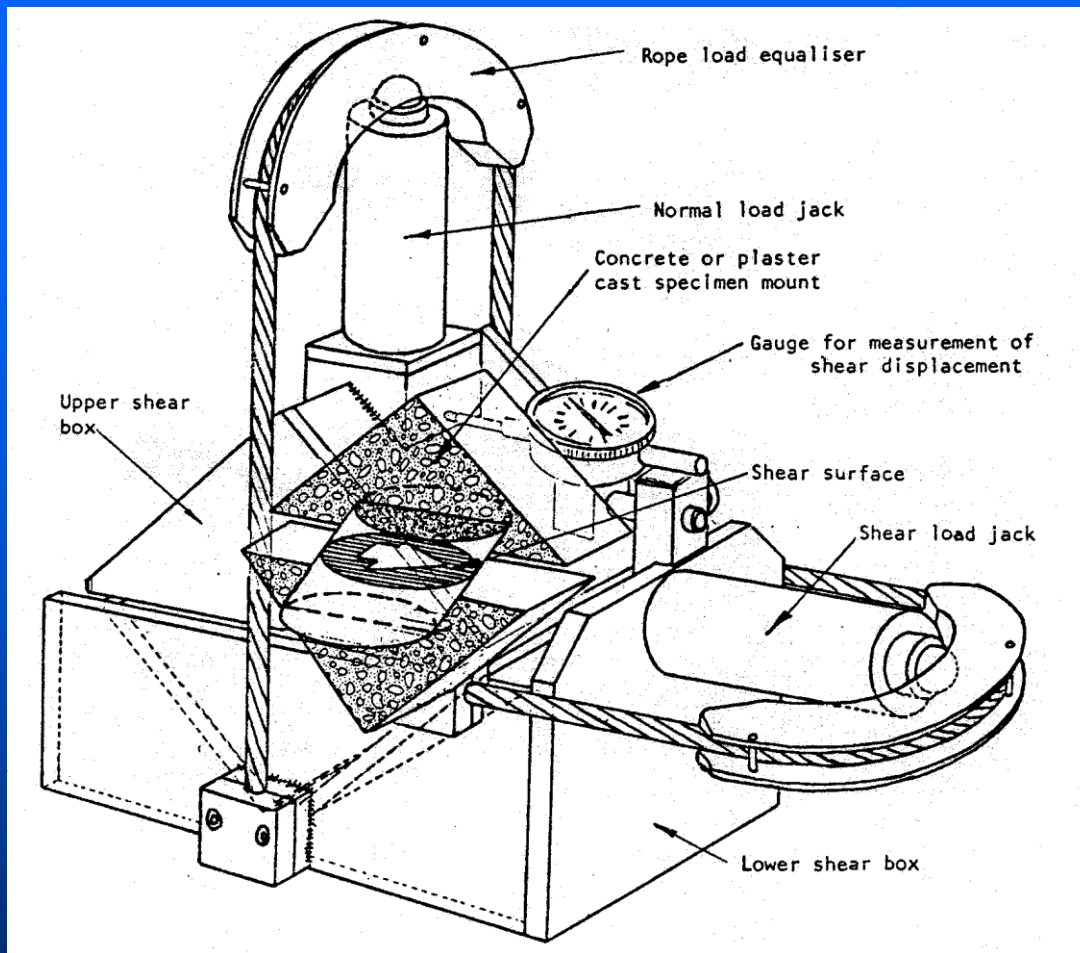












**Tragbares Feld-Schergerät der Robertson Research; die Lage der Probe und der zu prüfenden Scherfläche sind angedeutet.**



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

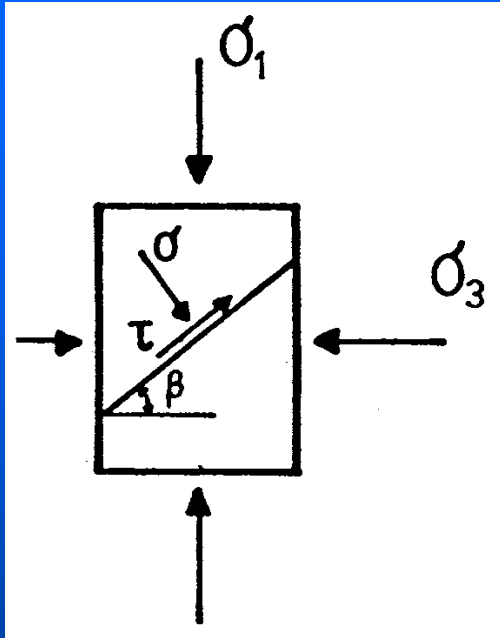
Gestein	$\mu = \tan \varnothing$ (natürliche Scherfläche)
Sandstein	0,52 $\varphi \sim 35^\circ$
Sandstein (feucht und rau)	0,61
Granit	0,60
Quarzit	0,67
Diabas	0,95
Marmor	0,62
Porphyr	0,86
Gneis	0,71 (naß : 0,61)
Tonstein	0,4 - 0,46

**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

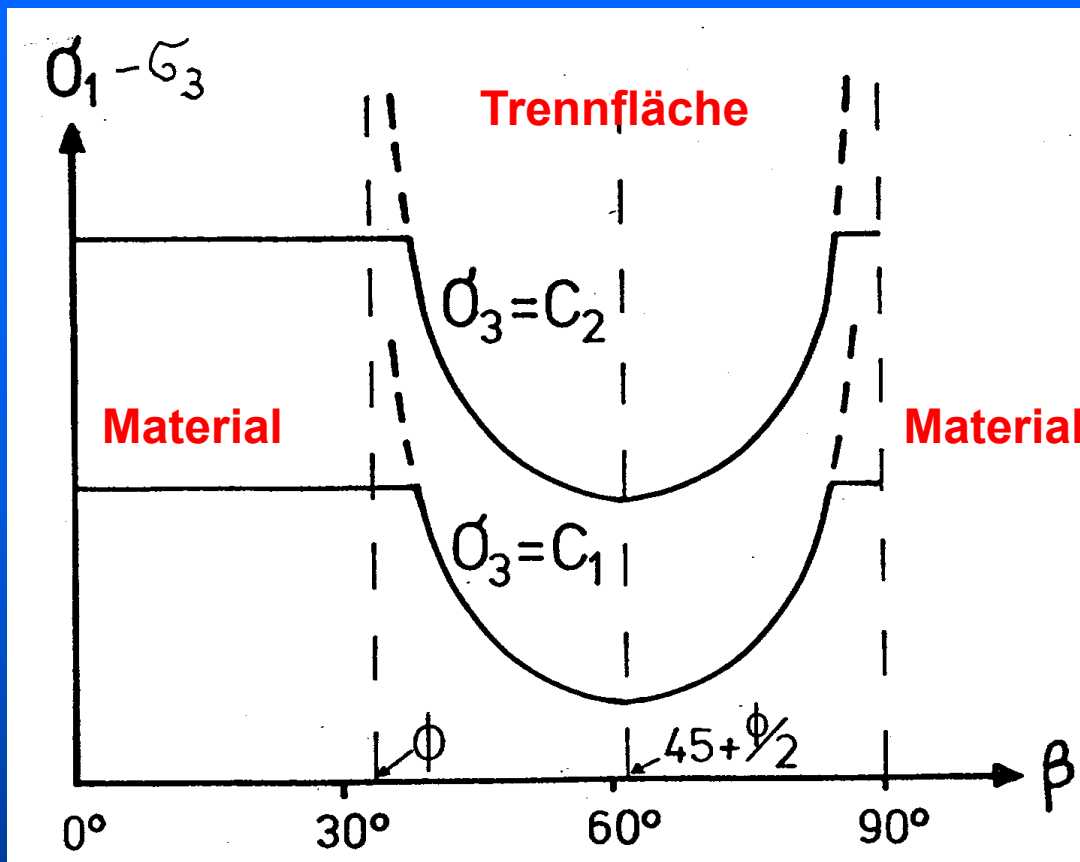
$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi$$

Der Spannungsdeviator lässt sich dann ausdrücken durch

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

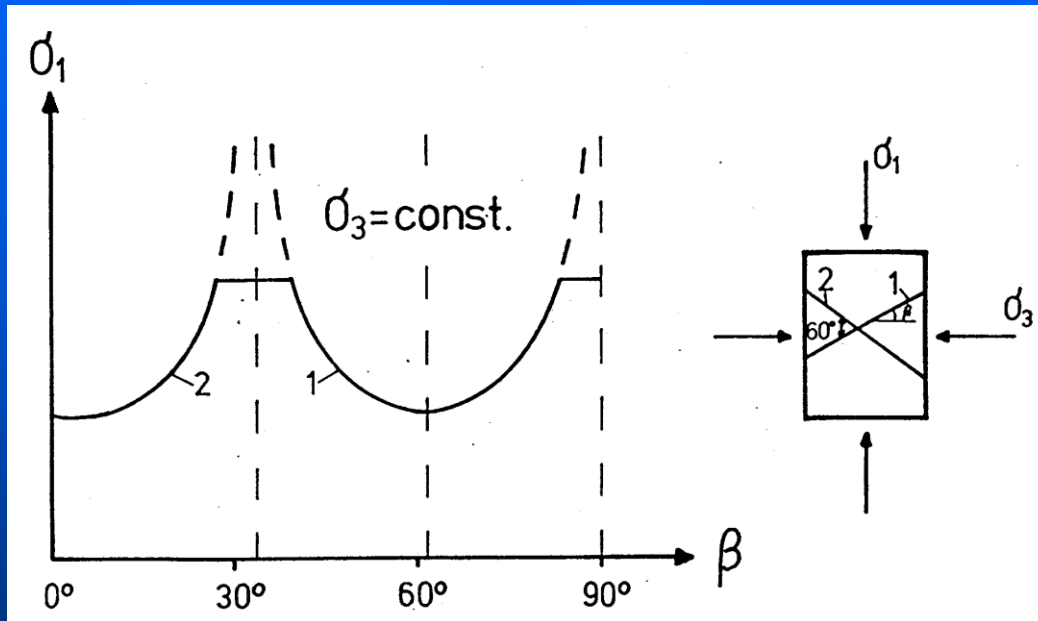
Graphische Darstellung liefert Parabel; diese schneidet die sich ebenfalls nach Coulomb ergebenden horizontalen Geraden für das intakte Material





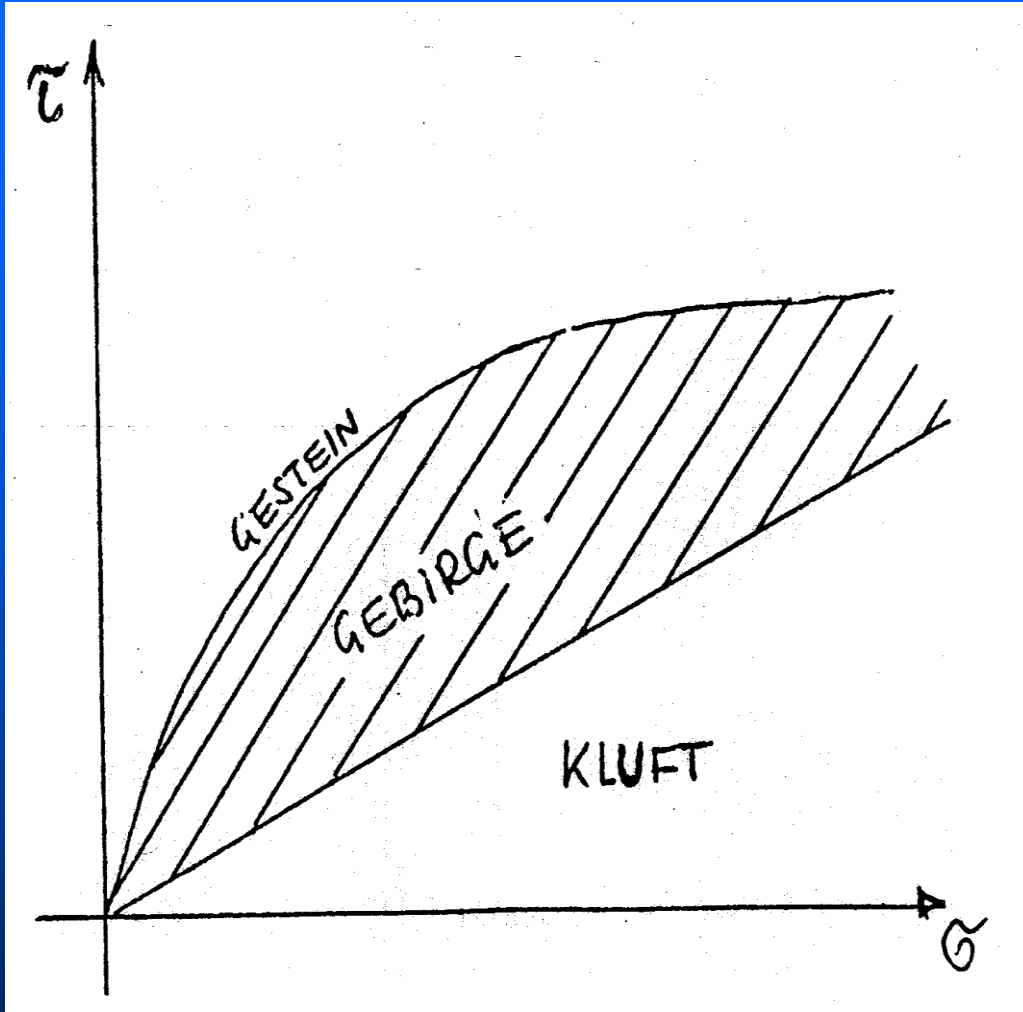
- minimale Festigkeit des geklüfteten Materials bei  $\beta = 45^\circ + \phi/2$  (nur noch ca. 1/3 der Materialfestigkeit)
- außerhalb der Parabel ist die Trennfläche mechanisch unwirksam, Bruch geht durch intaktes Material

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.

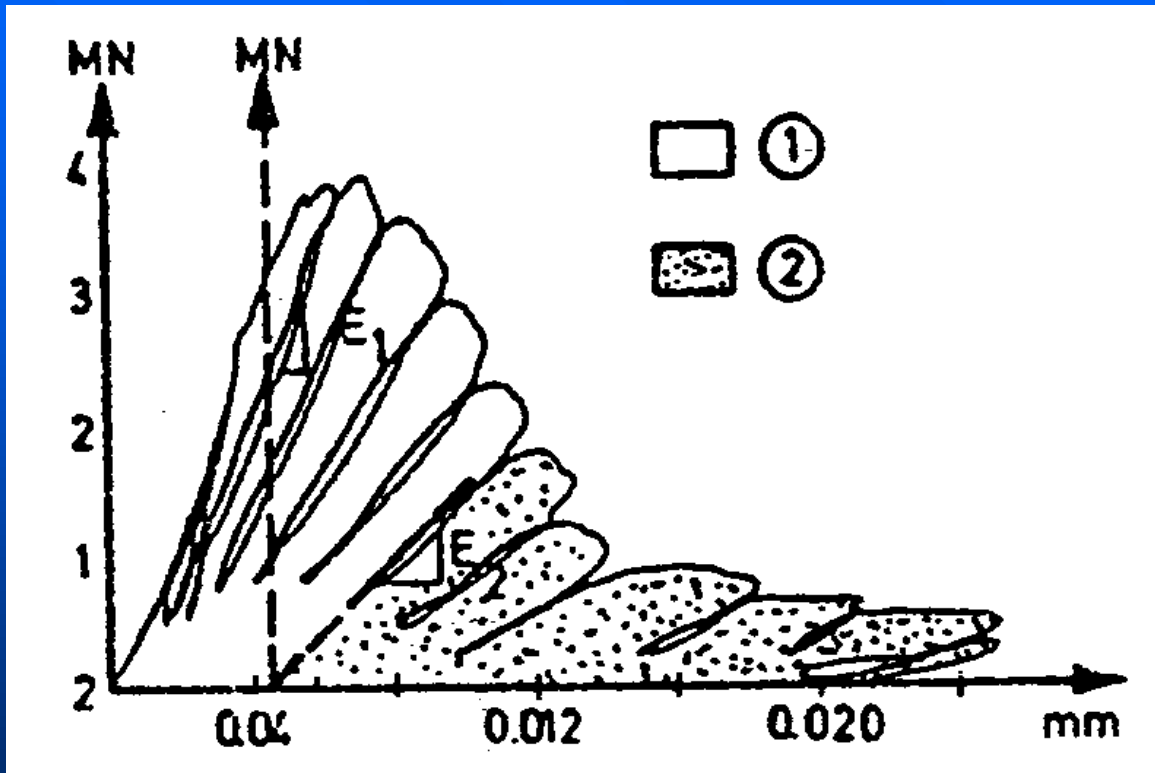
1. Kalke aus den prähistorischen Steinbrüchen von Cosslozza, Beanspruchung der Restpfeiler bis 19 MPa, entspricht der Gebirgsfestigkeit, **nicht wesentlich unter Gesteinsfestigkeit**
2. ebenfalls relativ hohe Werte für Gebirgsfestigkeiten aus dem Salz bekannt; 23 bis 36 MPa,
3. Pfeilerspannungen in der 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.**





Noch **weit größere Unterschiede** realistisch, in Abhängigkeit vom Gefüge !

- großmaßstäblich ist Gebirgsdruckfestigkeit aufgrund der Existenz der Trennflächen mit Gesteinsfestigkeit im post-failure-Bereich vergleichbar.



Analogien zwischen **Gestein und Gebirge** anhand der vollständigen Spannungs-Dehnungskurve

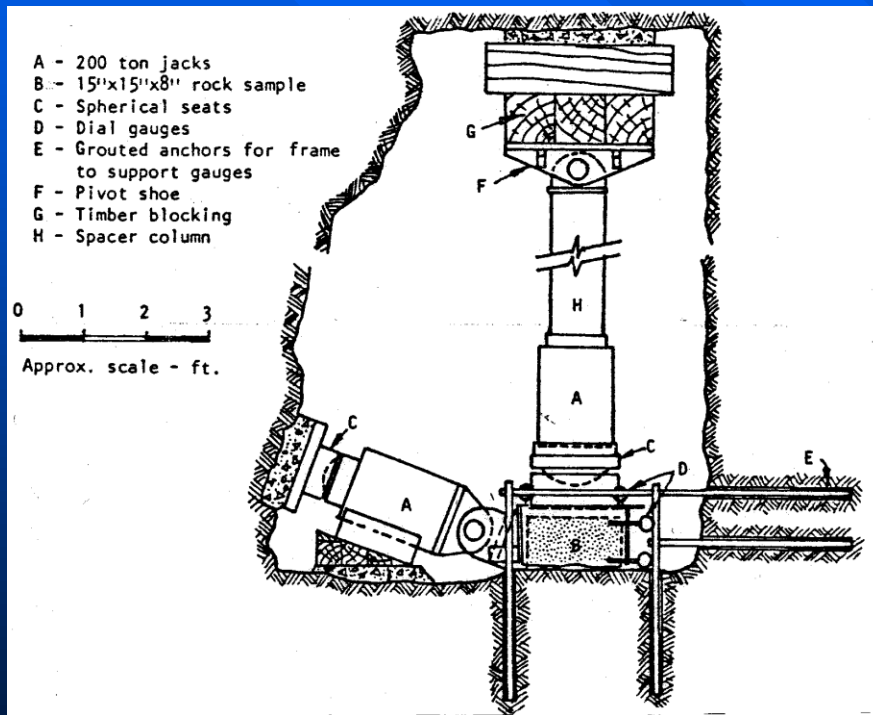
- (1) = Gestein
- (2) = Gebirge

- 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  $\sigma$ ) 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

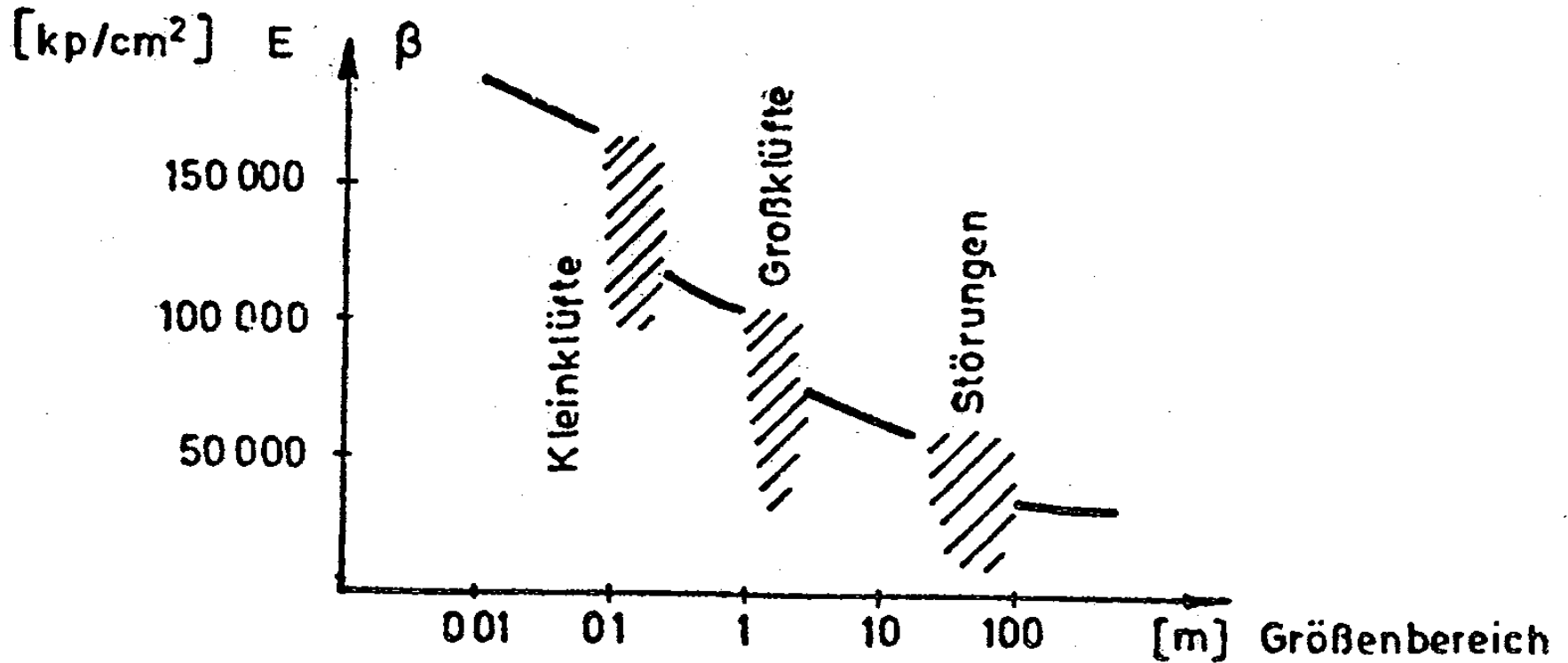
89

52

$$\text{KERNGEWINN: } \frac{89}{90} = 99\%$$

$$\text{RQD: } \frac{52}{90} = 58\%$$





**E-Modul bzw. Festigkeit des Gebirges für verschiedene Größenbereiche, Größenordnungseffekt**





# 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  $\sigma_z$  sei Hauptnormalspannung; die dazu senkrechten Spannungen ( $\sigma_x, \sigma_y$ ) dann ebenfalls Hauptnormalspannungen

dann  $\sigma_z = \gamma \cdot z$

schwieriger ist Bestimmung  $\sigma_x, \sigma_y$

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

bzw.

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

$\lambda$  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 im 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  $\sigma_z$  betragen können (Restspannungen)

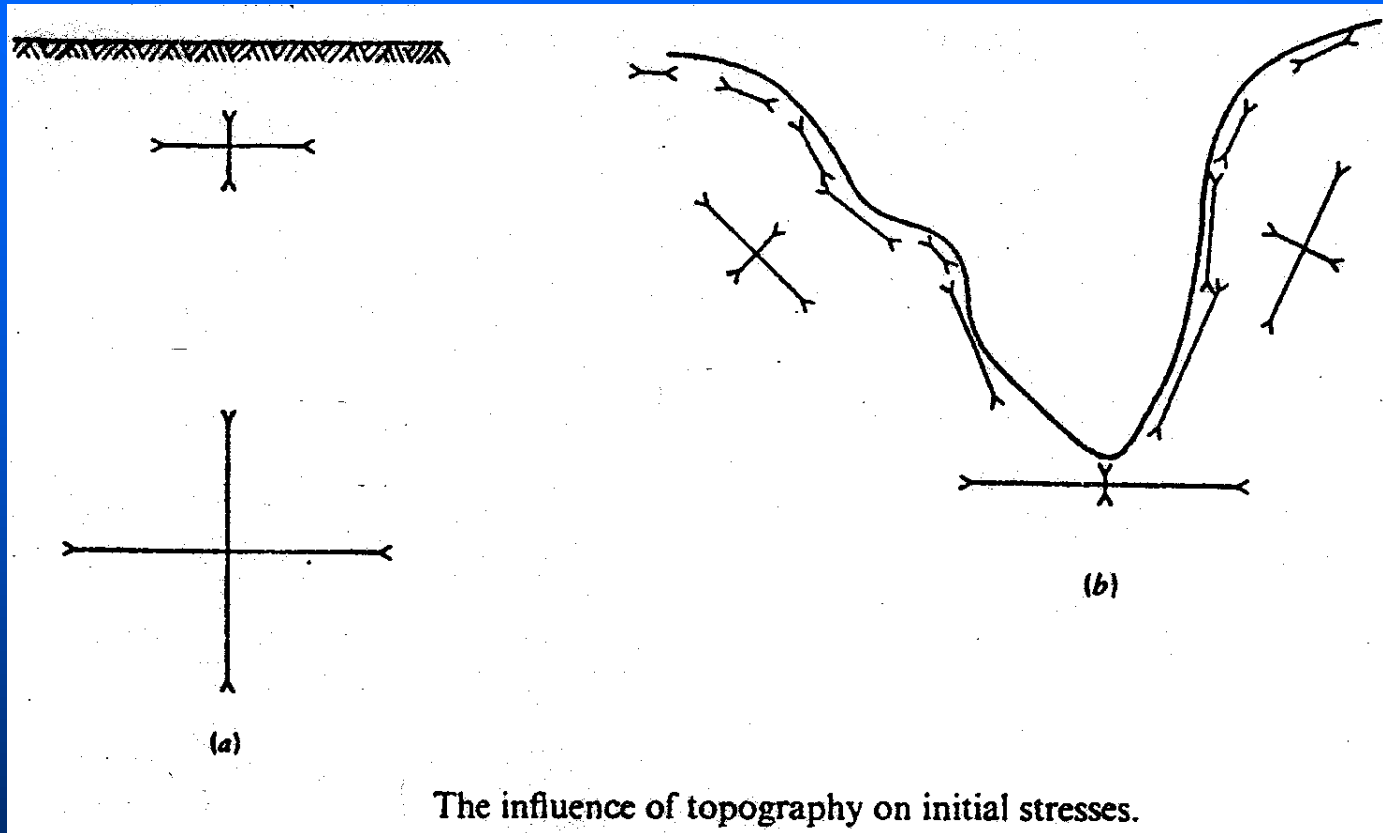
**Achtung: Auch Primärspannungen sind anisotrop!** Einfluss auf Tunnelbau!





**Annahme,  $\sigma_h$ ,  $\sigma_v$  Hauptspannungen, nur bei horizontalem Gelände richtig.**

- Einfluss der Geländeformen



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



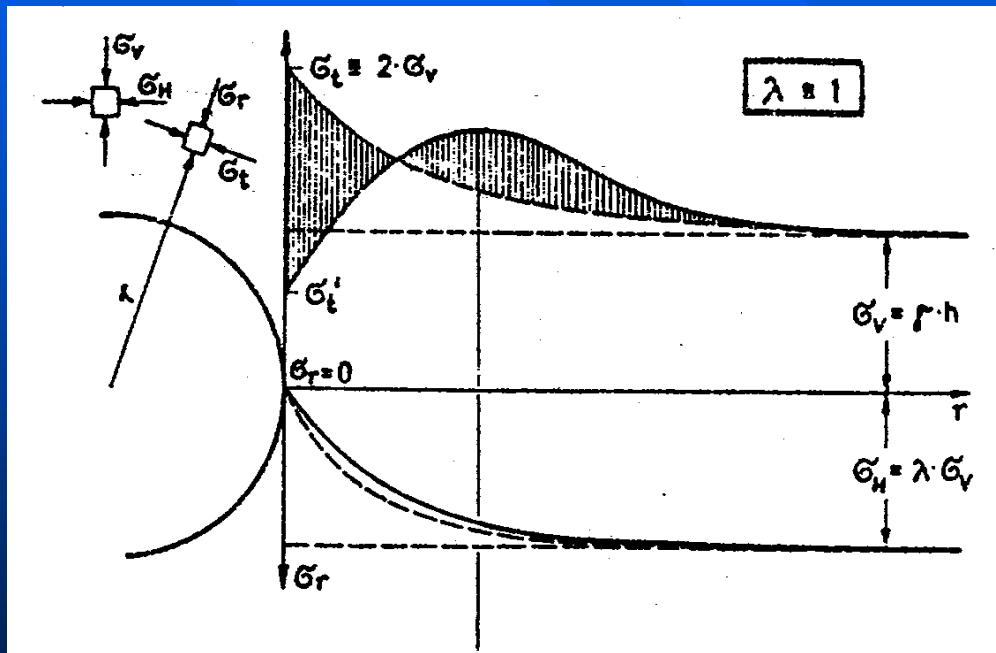


**DB Trainingszentrum Regensburg  
EINFÜHRUNG IN DIE FELSMECHANIK**



## 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



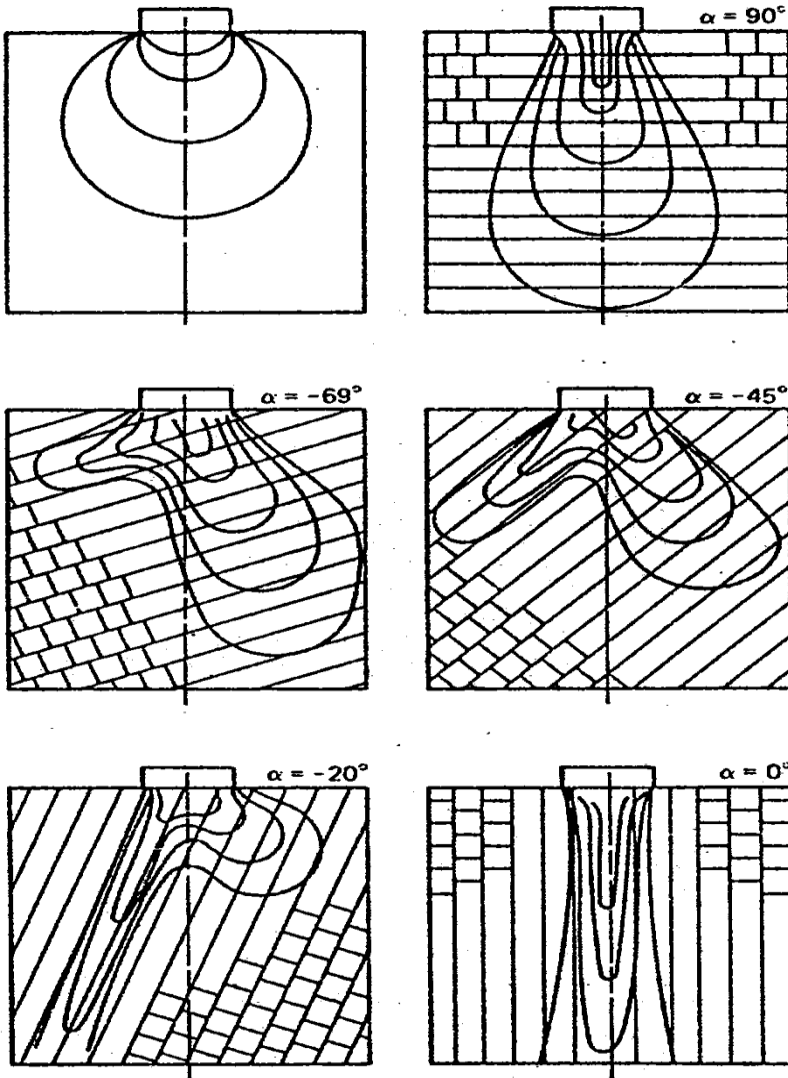
**Spannungszustand am Hohlraumrand ohne Verbau**



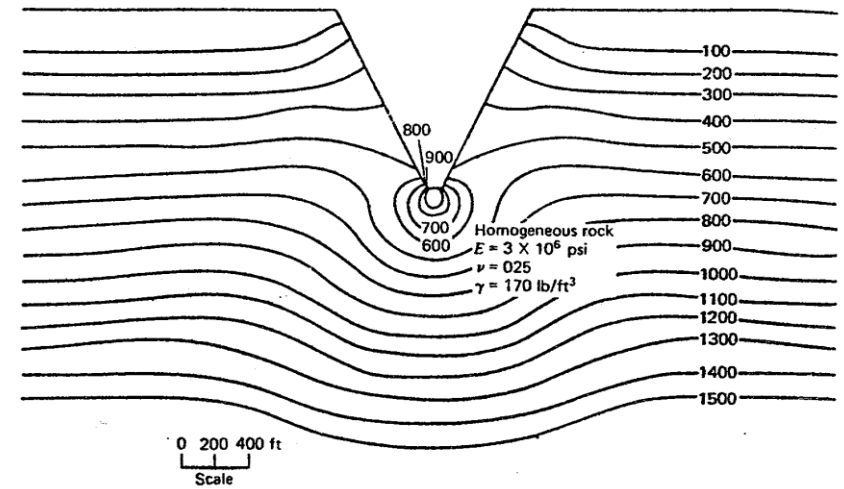
## 6.3 Einfluss der Trennflächen auf die Spannungsverteilung

- 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)**

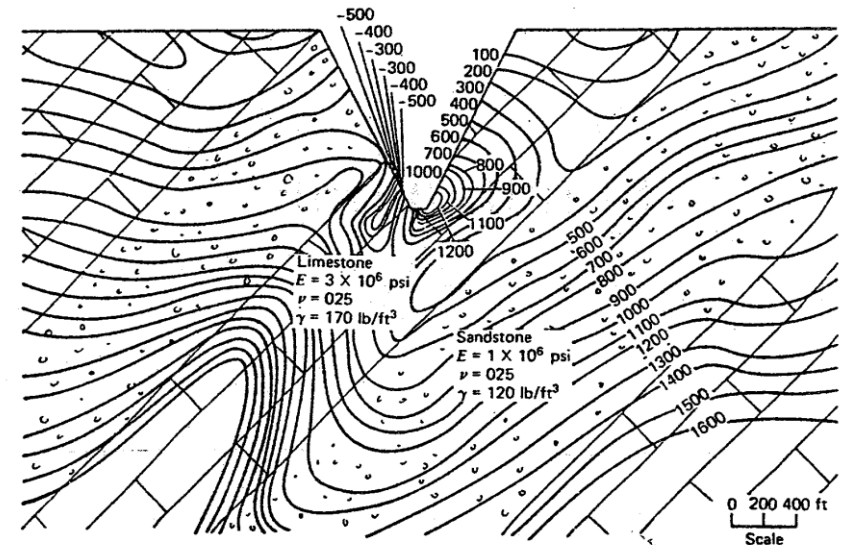




Lines of equal stress (bulbs of pressure) determined by Gaziev and Erlikhman (1971) from models. ( $\alpha$  is defined in Figure 9.9.)



(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.



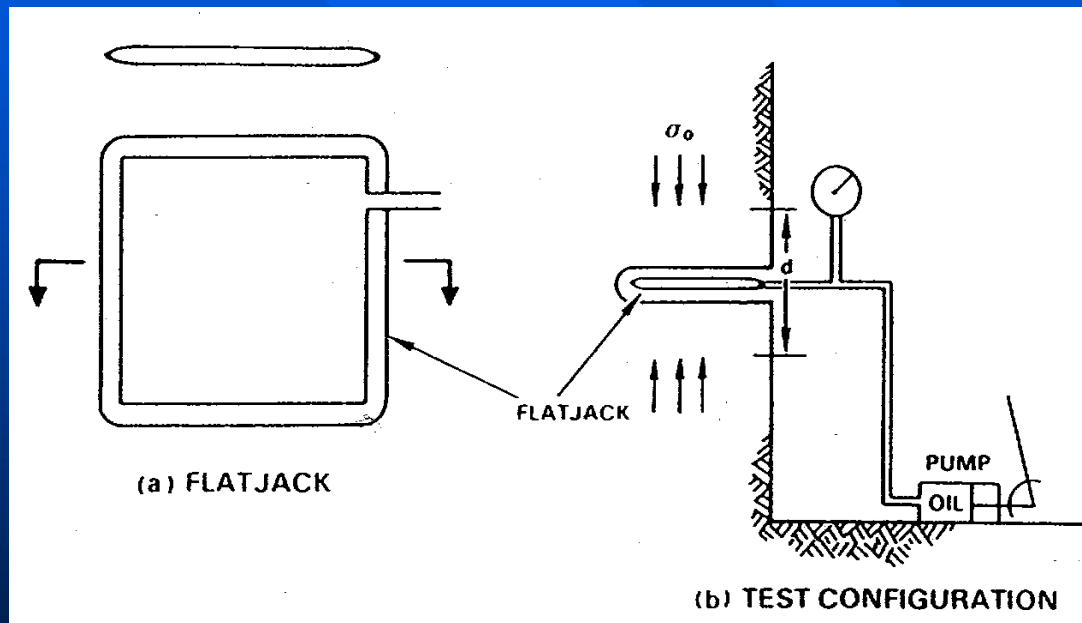






## 6.4 Spannungsmessungen

- 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

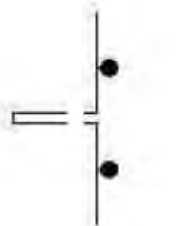
**0**  
**Ausgangszustand**

Anordnung von  
Messpunkten für die  
Verschiebungsmessungen

Ansicht

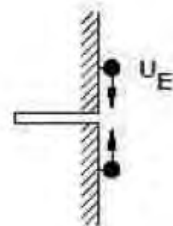
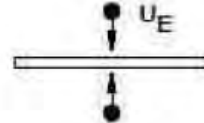


Querschnitt



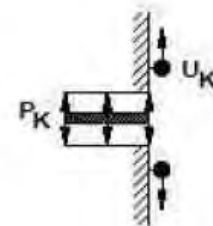
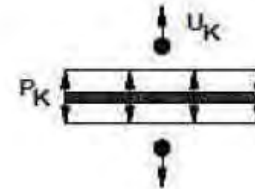
Nullmessung

**1**  
**Entlastung durch  
Sägeschlitz**



Entlastungs-  
verschiebung

**2**  
**Druckkissen im  
Sägeschlitz  
(Kompensation)**



Kompensation der  
Entlastungsverschiebung  
 $U_K = -U_E$

$U_E$  Entlastungsverschiebung infolge Sägeschlitz

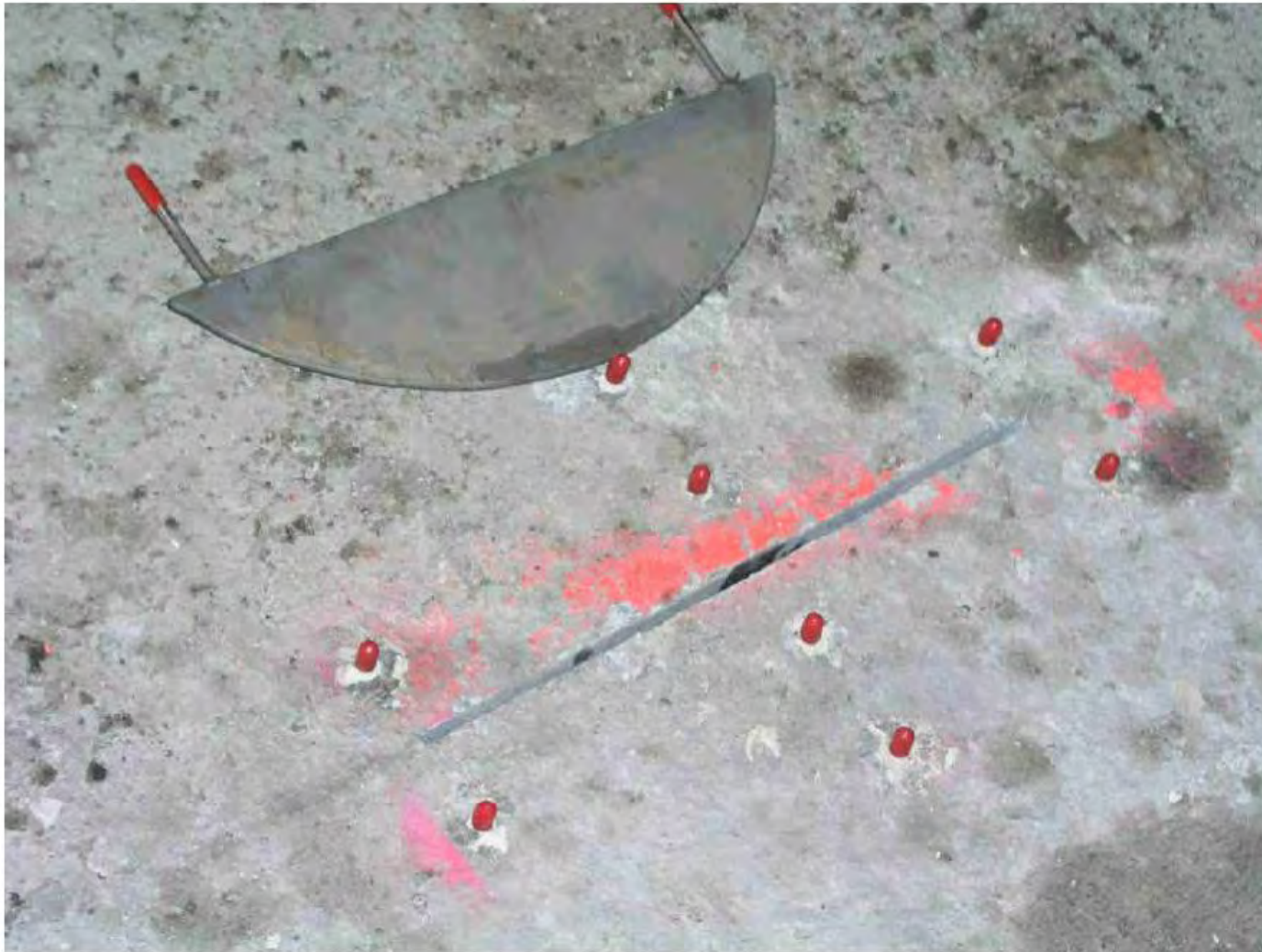
$U_K$  Rückverschiebung bei Kompensation

$P_K$  Kompensationsdruck im Schlitz

**Messprinzip der Schlitzentlastungs- und Kompensationsmethode**



# Spannungsmessung – in situ





# Spannungsmessung – in situ



# Spannungsmessverfahren - Schlitzentlastung





# Spannungsmessverfahren - Schlitzentlastung





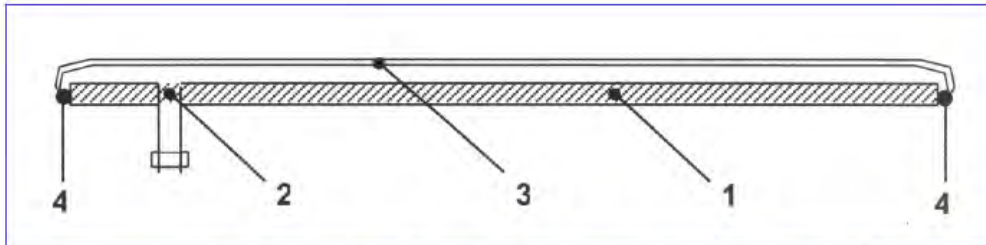
# Spannungsmessung – in situ

## Auswertung der Versuchsergebnisse:

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

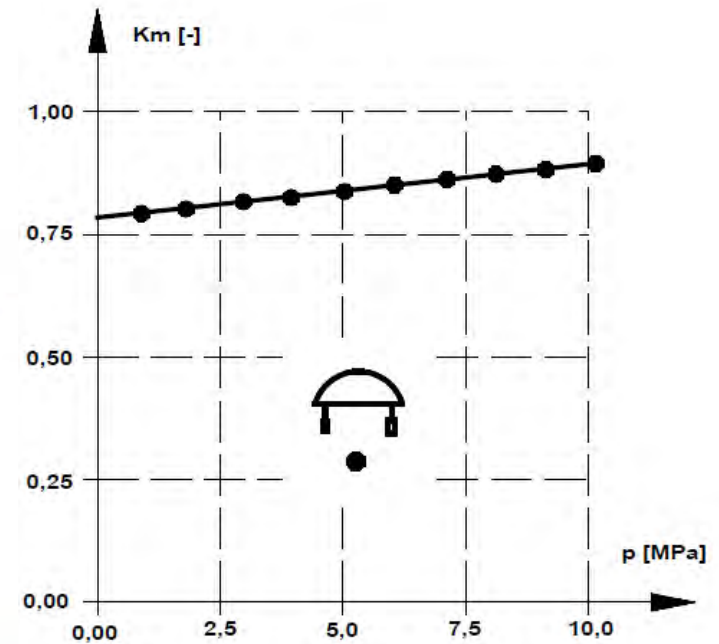
mit:

- $\sigma_n$  = 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)



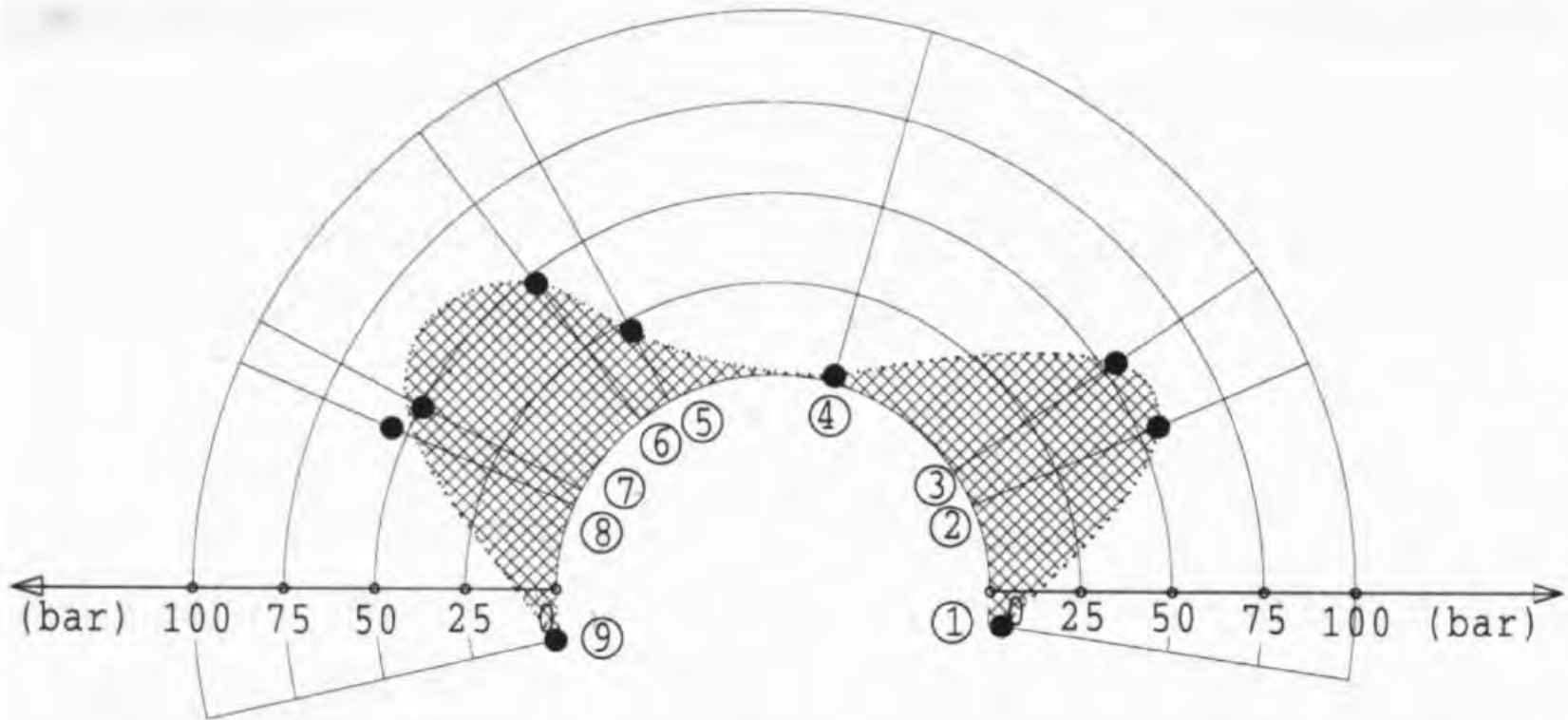
### Unsymmetrisch aufgebautes Druckkissen neuerer Bauart

(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

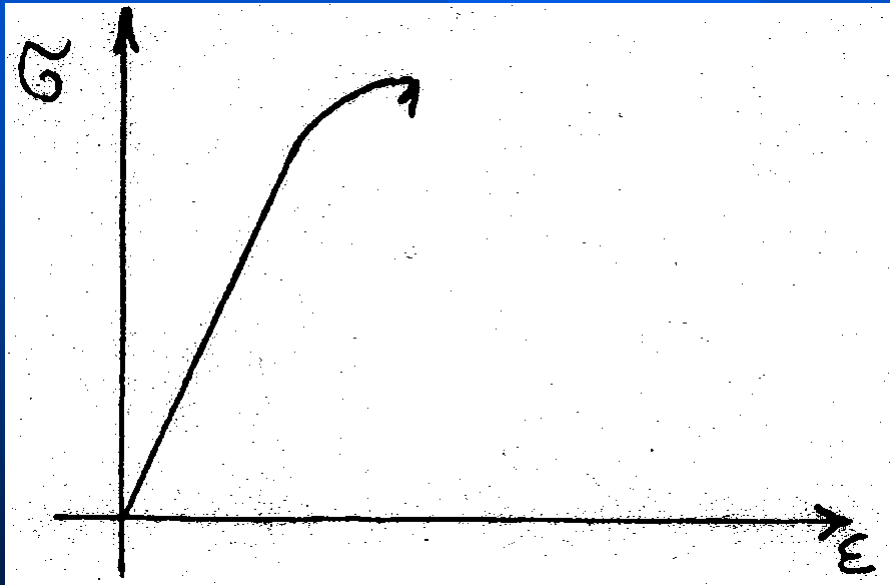


# 6.5 Spannungs-Verformungsverhalten

## 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)

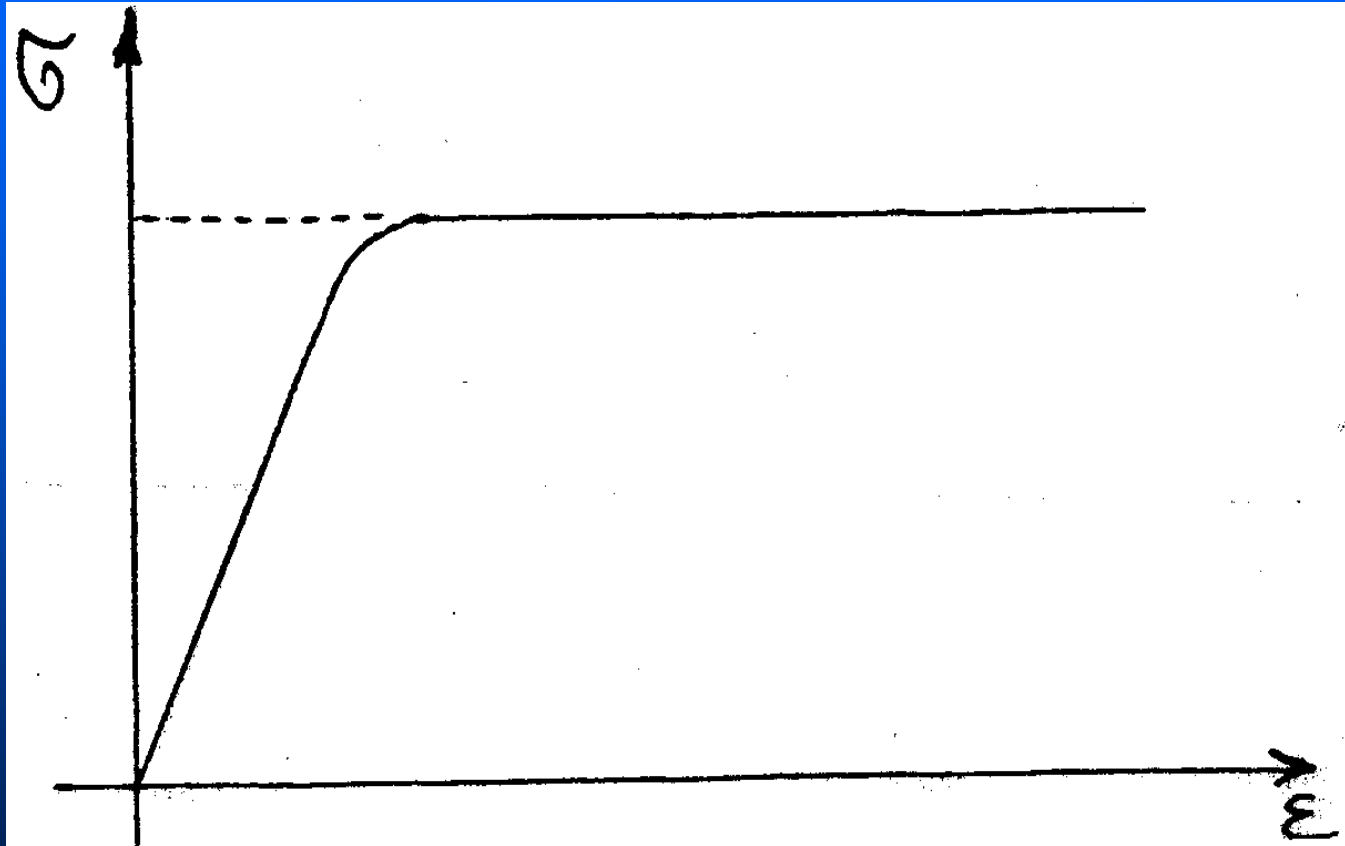


**Sprödbbruch**



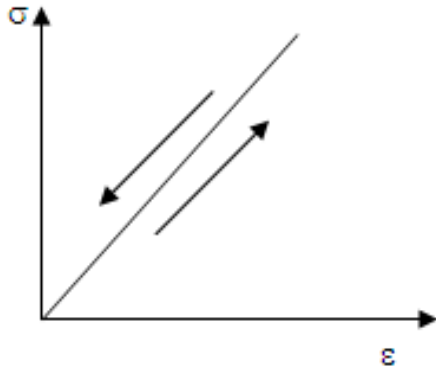


2. **Zähes (duktiler) Materialverhalten:** oberhalb einer bestimmten Spannung tritt plastisches Fließen auf; d.h. andauernde Verformung bei konstanter Spannung (Stahl, Wachs).

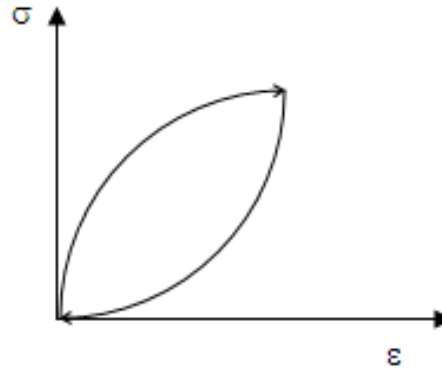


**duktiler Verhalten**

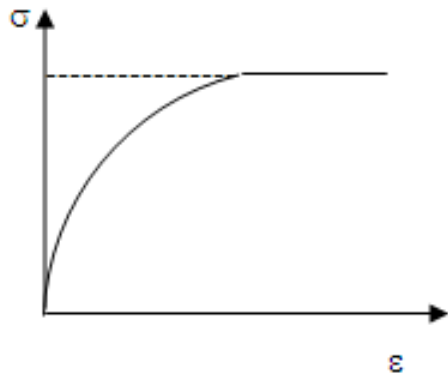
# Material-/ Gebirgsverhalten



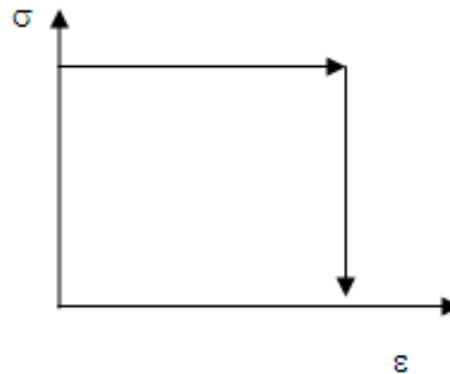
linear elastisch



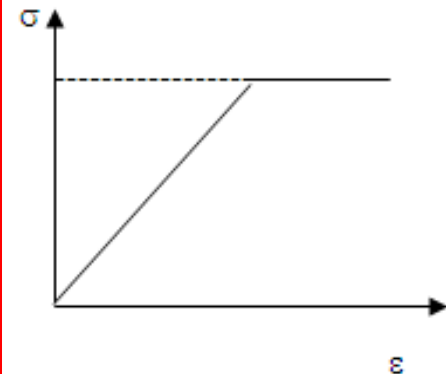
nicht-linear elastisch



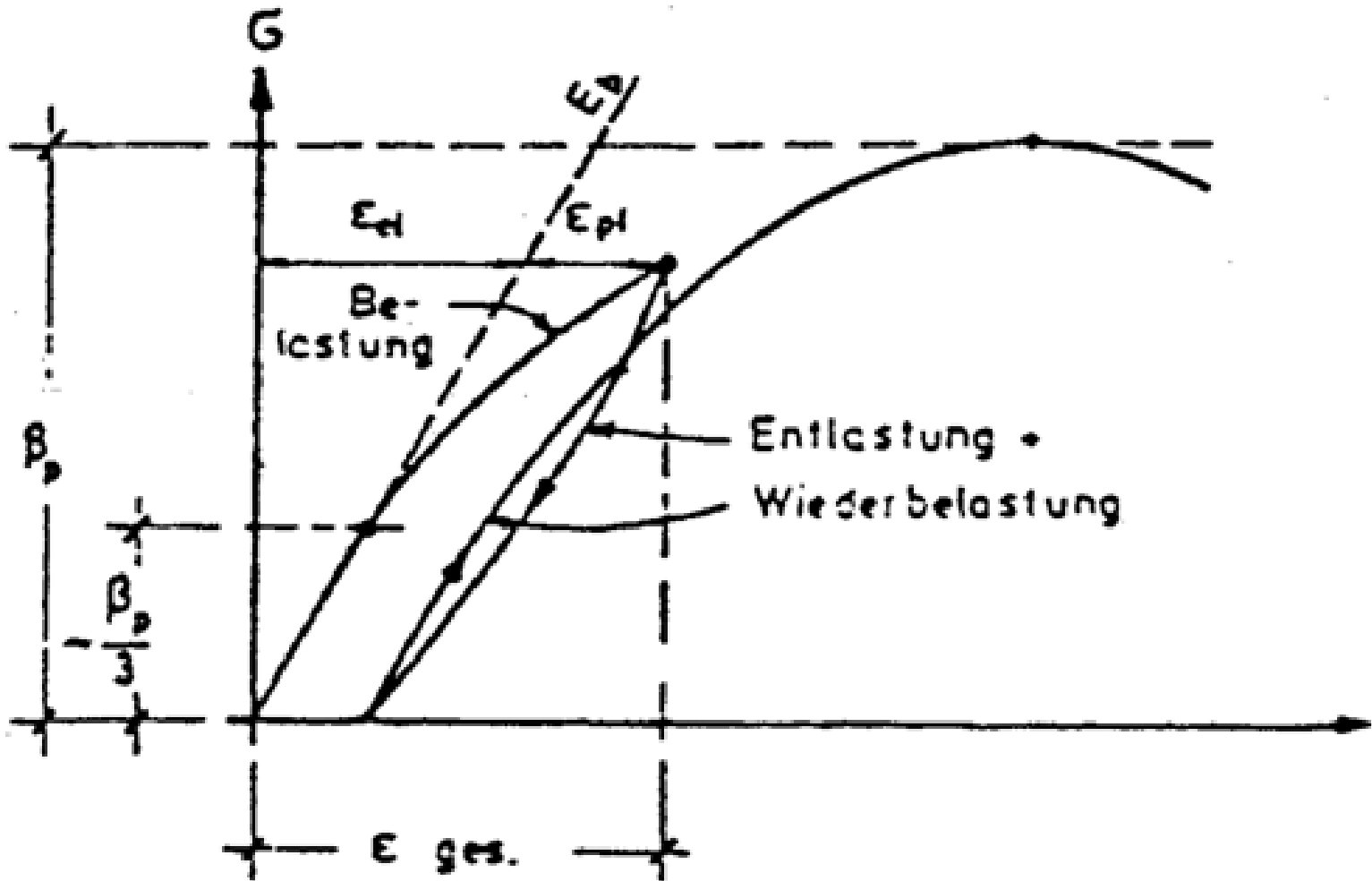
plastisches Materialverhalten



ideal plastisch



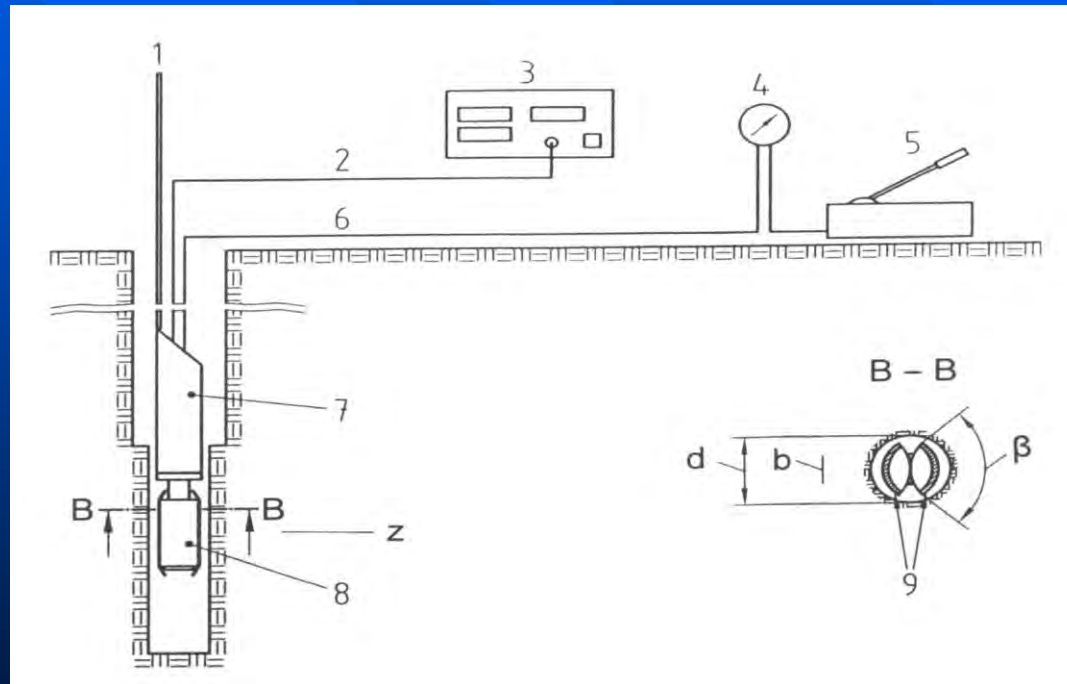
ideal elasto-plastisch (St. Venant)





## 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



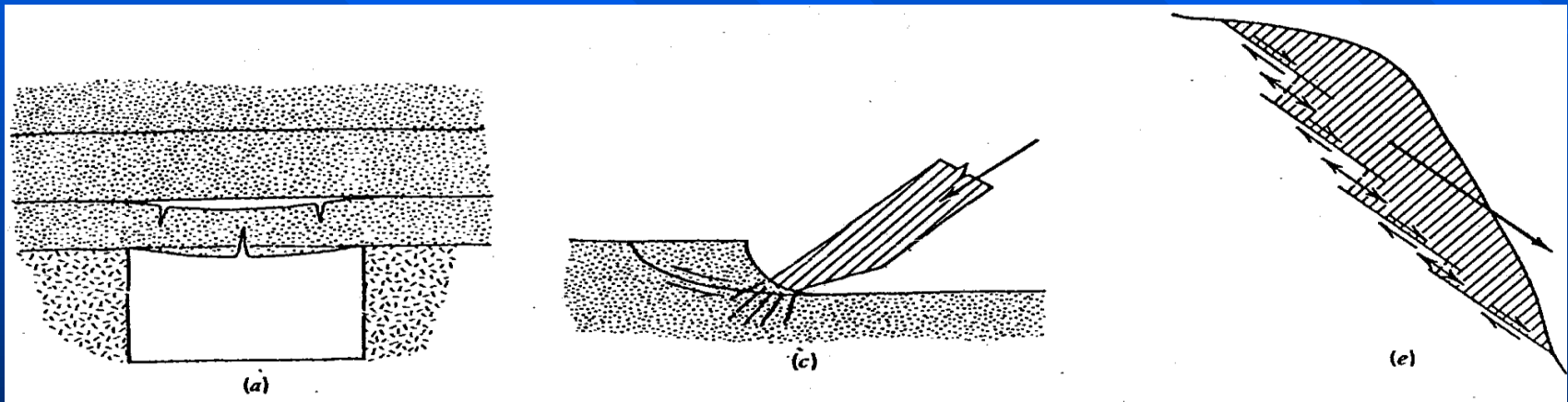


# 7. BRUCHVORGÄNGE IM GEBIRGE/GESTEIN

## 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)

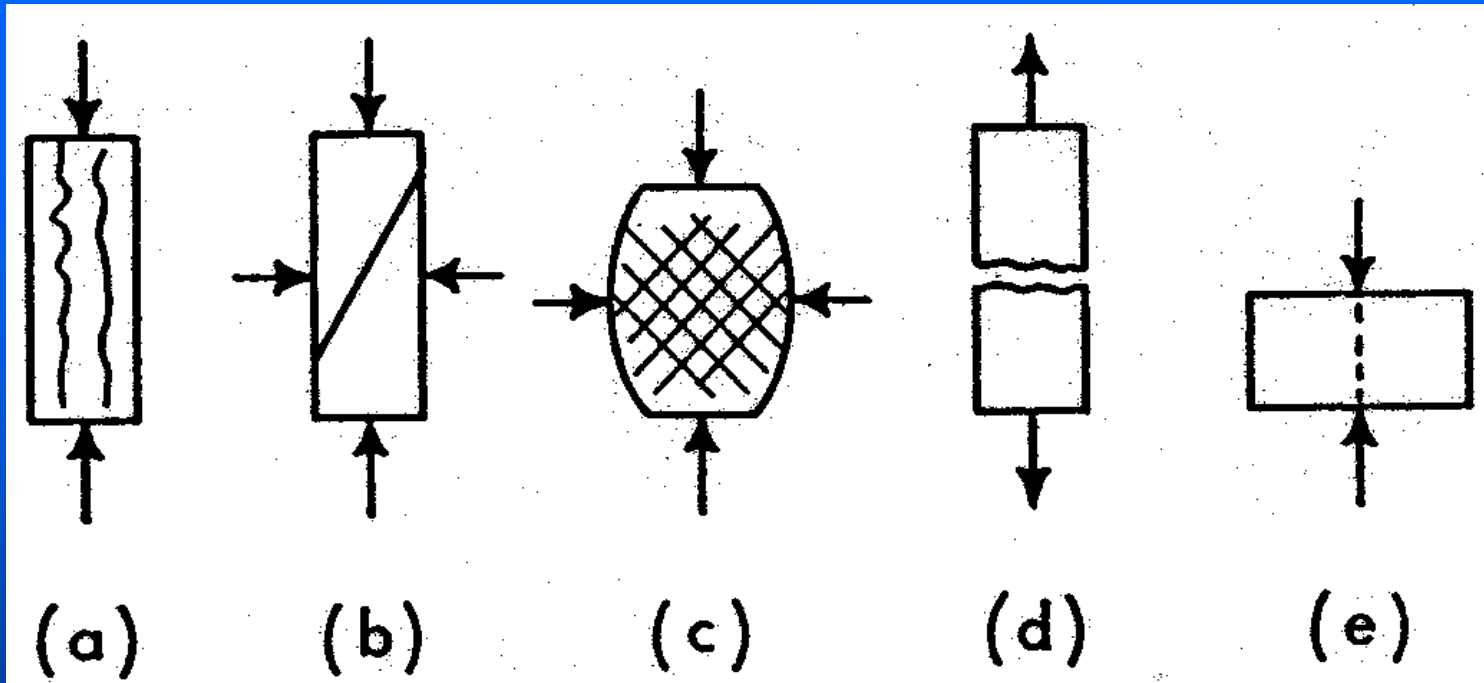
**Trennungsbruch:** Voraussetzungen sind überwiegend Zugspannungen und nicht zu plastisches Material. Hackige, splitterige, muschelige Flächen.

**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:



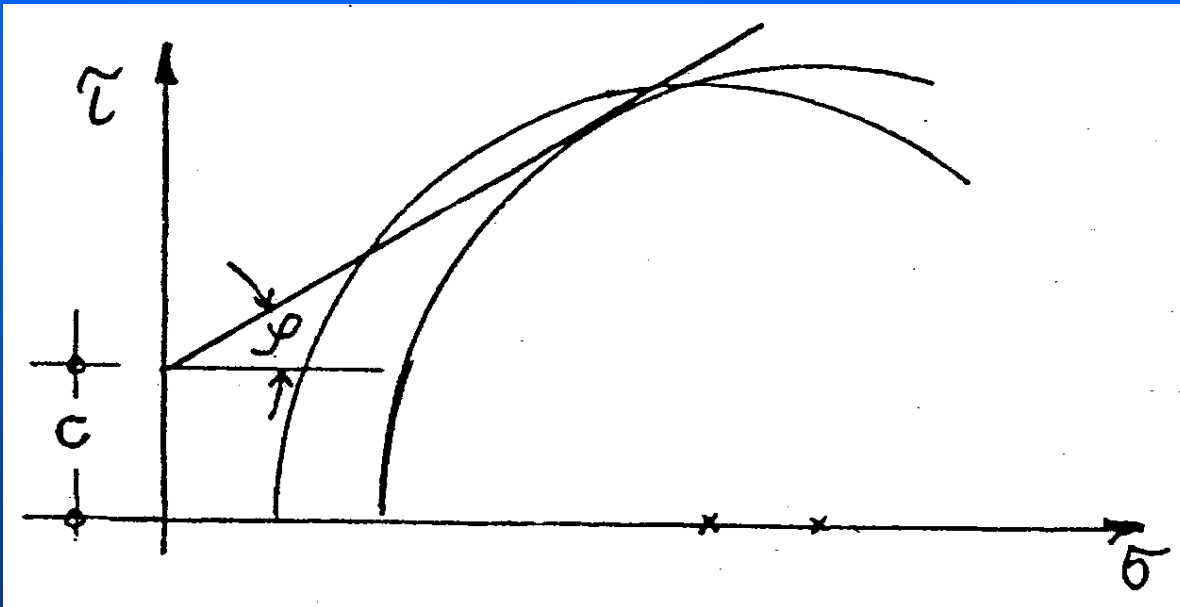
- (a) Bildung von Längsrissen im einaxialen Druckversuch,
- (b) Bildung einer Scherfläche,
- (c) Ausbildung multipler Scherflächen,
- (d) Zugriß,
- (e) Spaltzugriß



# 7.3 Bruchhypothesen

## 7.3.1 Coulomb'sche Bruchhypothese

- aus Bodenmechanik bekannt, geometrisch/analytisch einfache Form



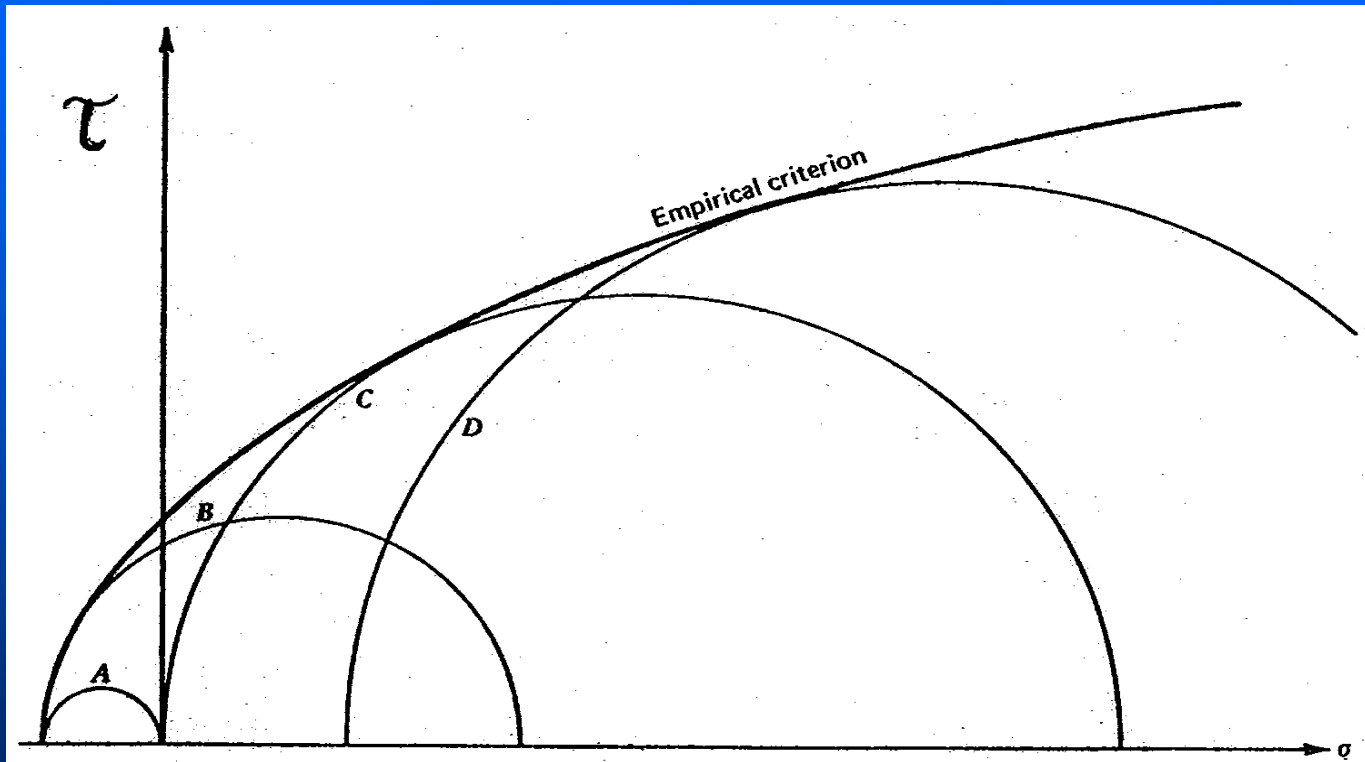
math. Form der **Gleichung**  $\tau = c + \sigma \times \tan \varphi$

wobei „c“ = techn. Kohäsion ( $\text{kN/m}^2$ )  
 $\varphi$  = Winkel der inneren Reibung  
 $\varphi, c$  spannungsabhängig!



## 7.3.2 Mohr'sche Bruchhypothese

- Experimentelle Untersuchungen zeigen bei höheren Spannungen, dass innere Reibung =  $f(\sigma)$ , d.h. dass Bruchbedingung nicht linear ist.
- wird von Mohr'scher Bruchhypothese berücksichtigt

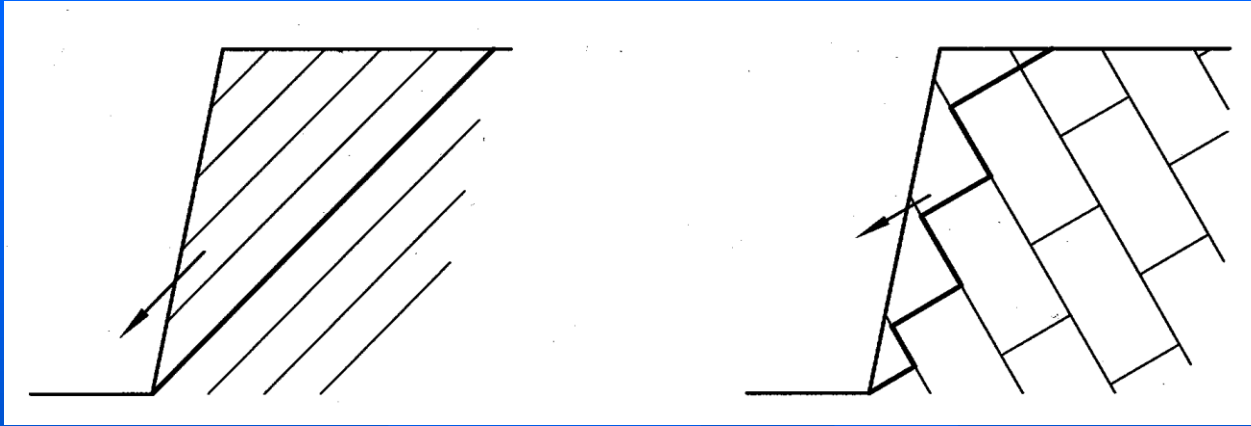


Mohr'sche Hüllkurve als empirisches Bruchkriterium; A: direkter Zugversuche; B: indirekter Zugversuch, C: einaxialer- und D: triaxialer Druckversuch



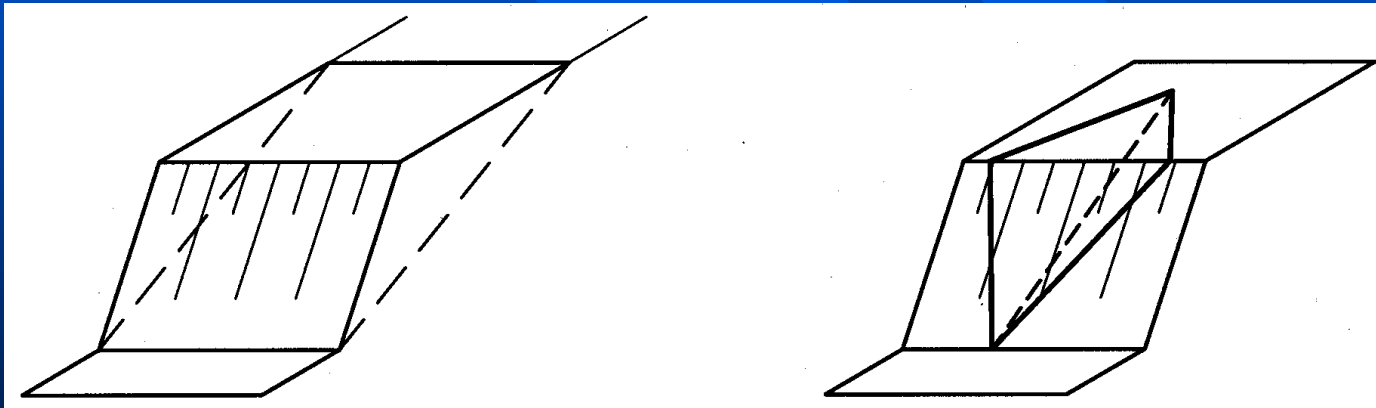
## 7.5 Starrkörperversagen

### 7.5.1 Gleiten - eben/räumlich



a) Ebenes Gleiten auf kontinuierlicher Bruchfläche

b) Ebenes Gleiten auf gestufter Gleitfläche



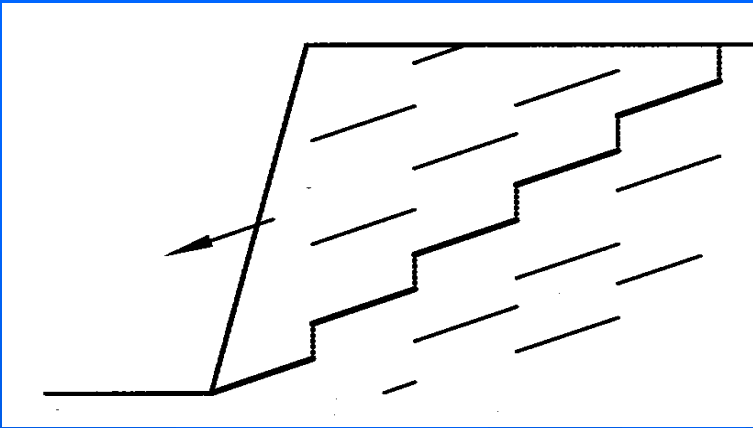
c) Ebenes Gleiten

d) Keilgleiten

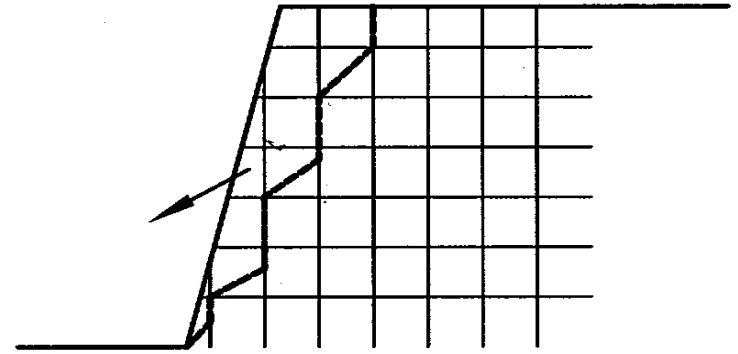




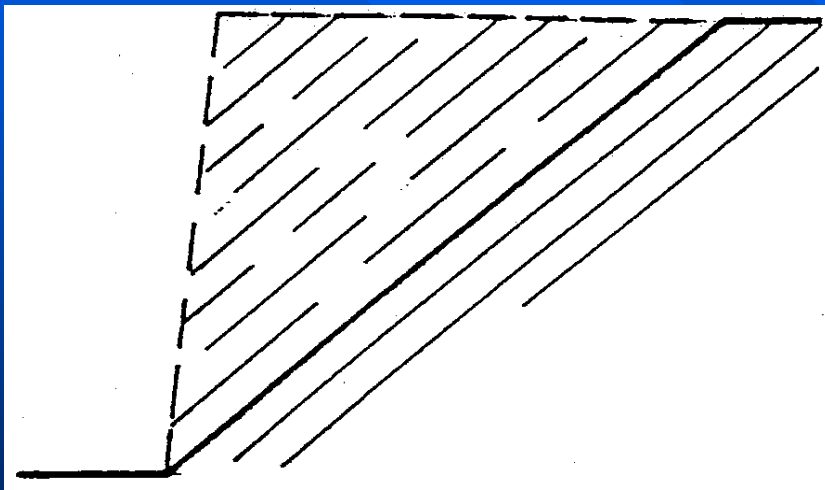




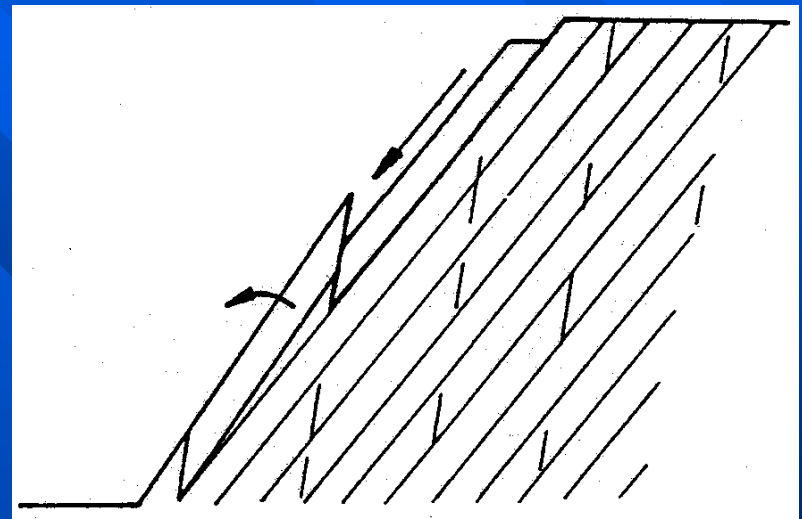
e) Gleiten mit Zugversagen von Materialbrüchen



f) Gleiten mit Scherversagen von Materialbrüchen



g) unvollständig durchtrennte Bruchfläche mit Materialbrüchen

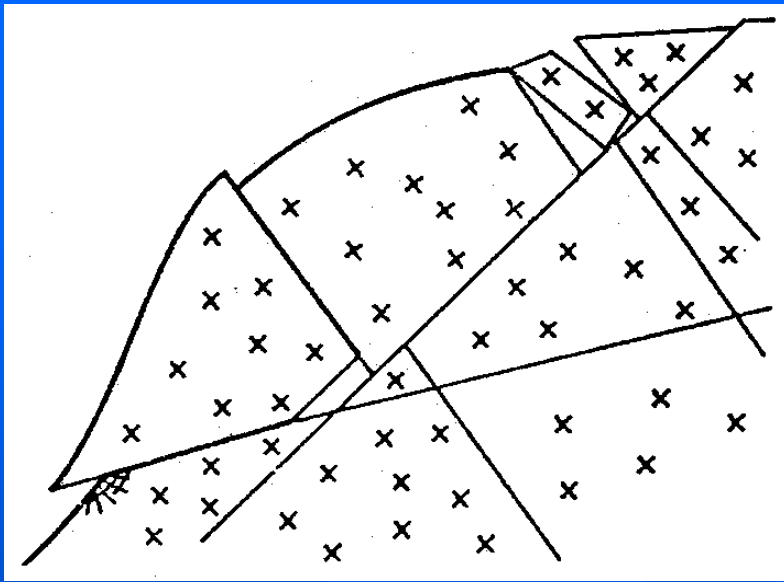


h) Ebenes Gleiten mit Beteiligung einer 2., annähernd saigeren Trennflächenschar

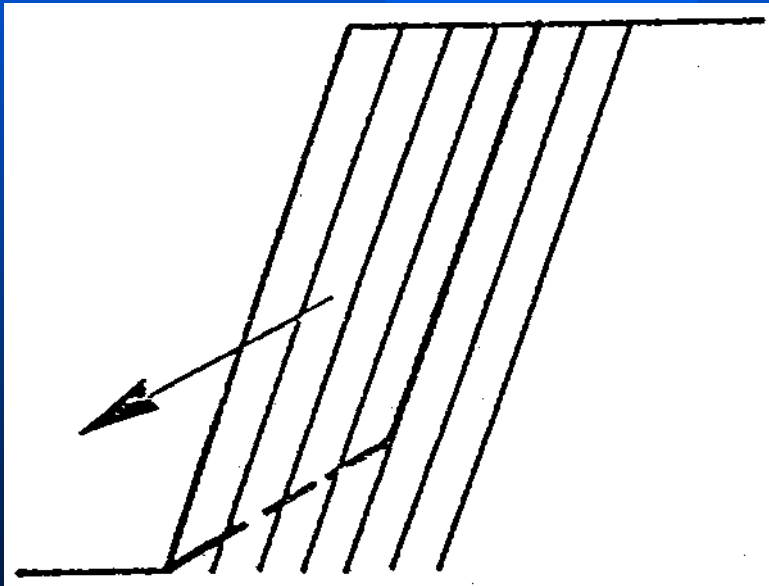








i) Komplexes Gleiten/Kippen auf verschiedenen Trennflächenorientierungen



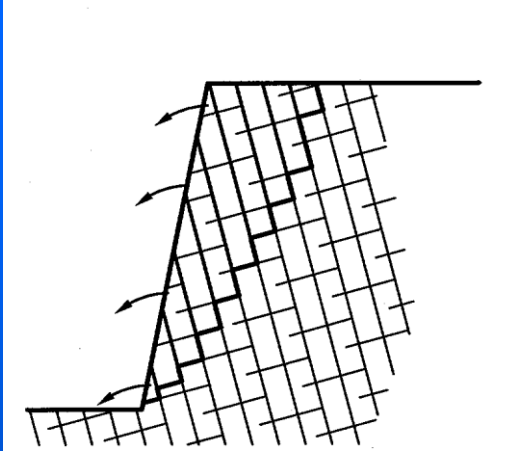
j) Gleiten infolge ungünstiger Kluftorientierung



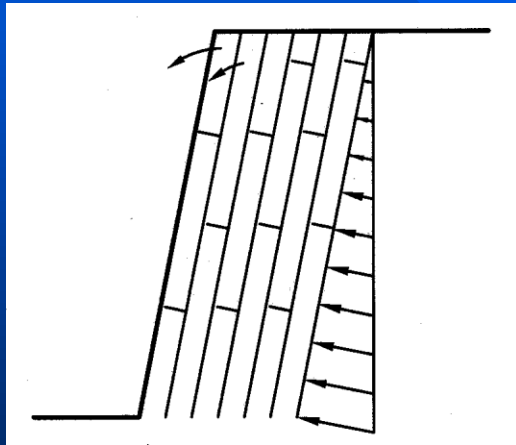




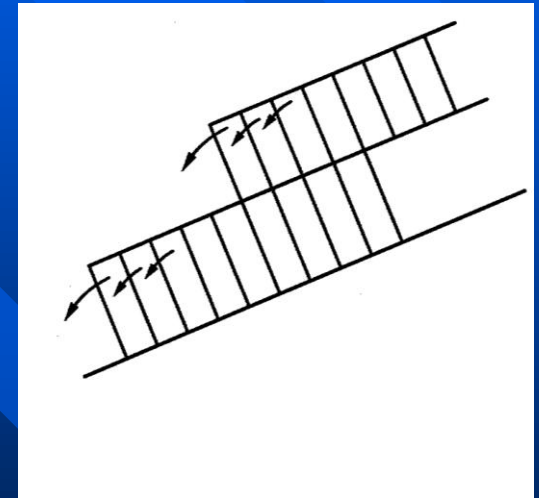
## 7.5.2 Kippen



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



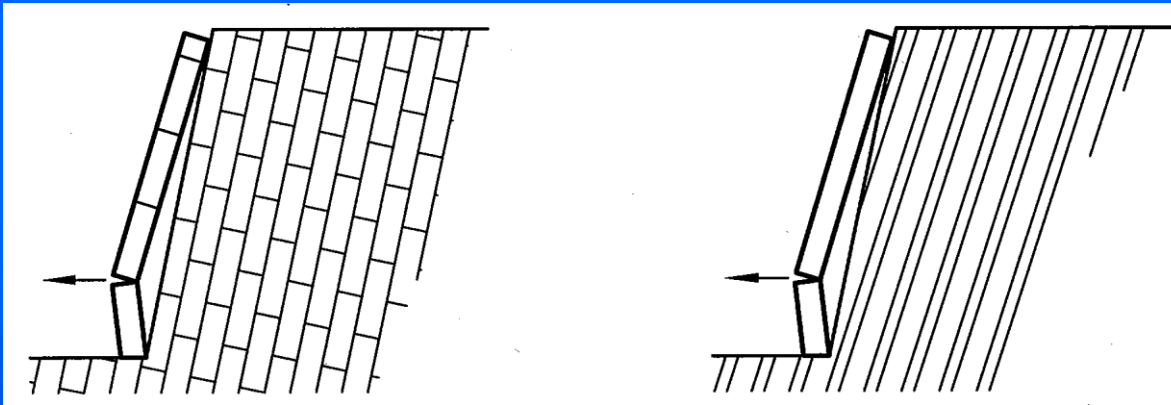
b) Kippen auf einer durchgehenden Basisfläche.



c) Kippen auf steil talwärts fallenden Trennflächen infolge Kluftwasserdruck.



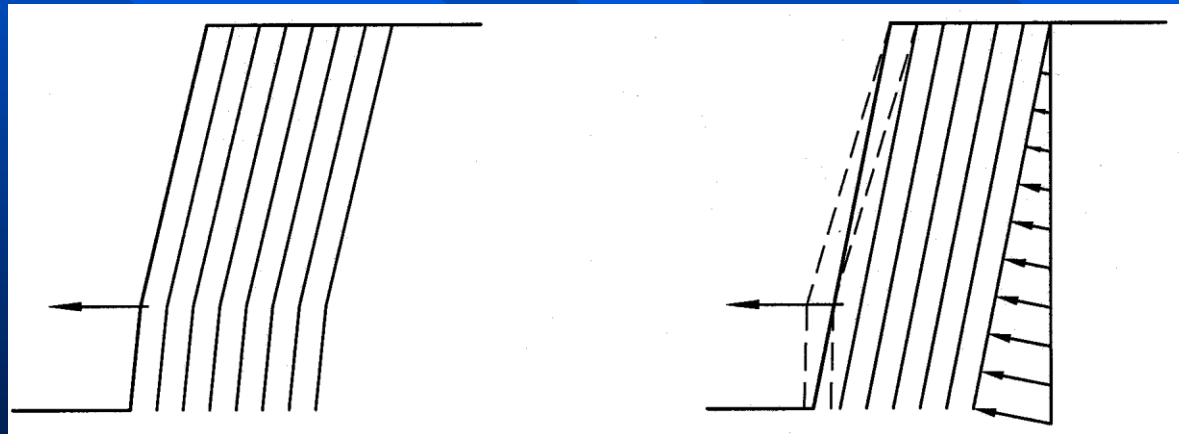
## 7.5.3 Knicken (Beulen)



b) Knicken monolithischer Platten

a) Knicken schlanker mehrfach zerlegter Platten

d) Knicken durch Kluftwasserschub

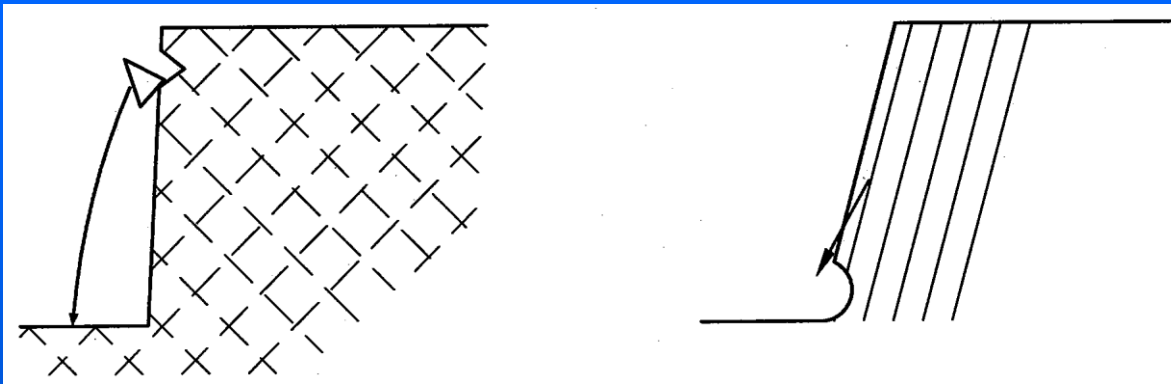


c) Knicken durch Änderung des Einfallens.

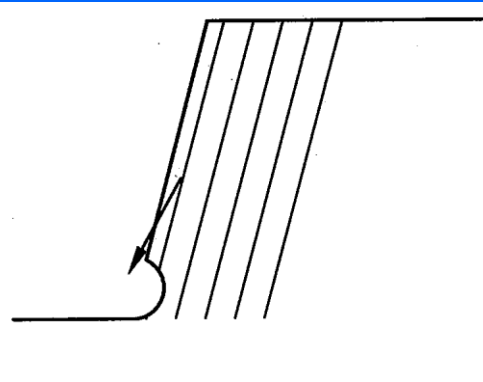




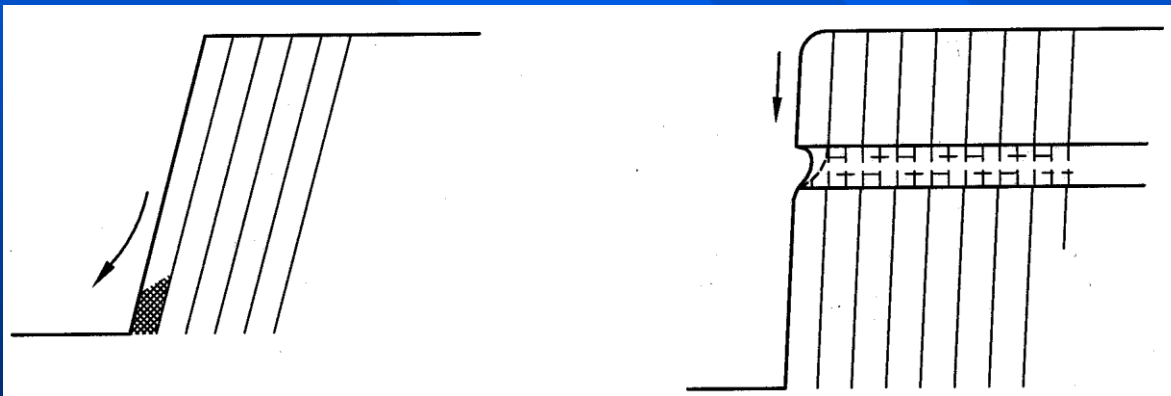
## 7.5.4 Kombinierte Bruchmechanismen



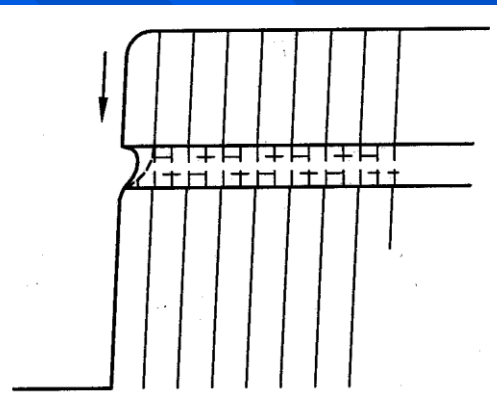
a) Gleiten und Fallen



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** entgegengerichtete Kraft, die gleich dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit ist

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

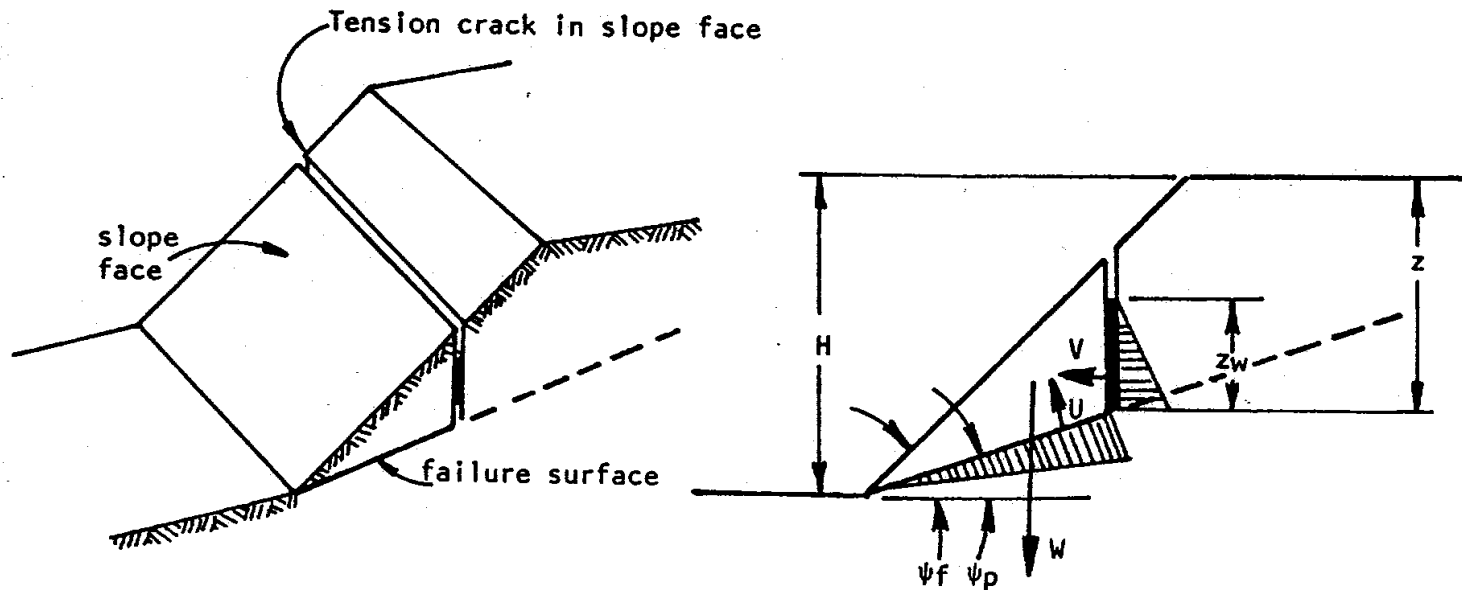
Beispiel:  $\varphi = 26 \text{ kN/m}^3$ ;  $\varphi' = 16 \text{ kN/m}^3$

**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, 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
- **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.

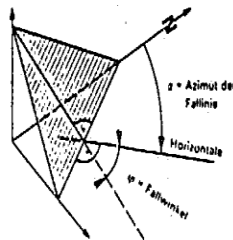
Tabelle 1 TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN DES FELSEN (FELSDESCHEIBUNG NACH SIA)

Stufen	Gestein					Diskontinuität des Gebirges									Wasserzirkulation		
	Ungünstige Komponenten	Druckfestigkeit	Gehalt an kristallinem Quarz	Verhalten bei Wasserzutritt und Feuchtigkeits		Stratigraphisch				Tektonisch					Grundformen der Klüftkörper	Durchlässigkeit nach Lugon	Art der Zirkulation
						Schichtung, Bankung	Tonige oder glimmerartige Zwischenschichten	Schichtreibung (Gleitreibung)	Kohäsion (bei Gleitreibung)	Schieferung (Bruchflächenabstand), Zerlegungsgrad	Art der Bruchfläche	Öffnung der Klüfte	Reibung in Trennflächen (Gleitreibung)	Kohäsion (bei Gleitreibung)			
						F	G	H	I	K	L	M	N	O			
A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N	O	P	Q	R	
	MN/m <sup>2</sup> (kg/cm <sup>2</sup> )	%			m	pro m : in %	°Grad (360°)	MN/m <sup>2</sup> (t/m <sup>2</sup> )	m		mm	°Grad (360°)	MN/m <sup>2</sup> (t/m <sup>2</sup> )	%	l/m · min		
1	keine	hoch > 100 MN/m <sup>2</sup> (> 1000 kg/cm <sup>2</sup> )	unbedeutend < 5	unverändert (unempfindlich)	keine (massig) > 1	keine	gross > 40	gross > 2 MN/m <sup>2</sup> (> 200 t/m <sup>2</sup> )	gering (kompakt) > 1	nicht durchgehend	sehr klein (geschlossen) < 0,1	gross > 40	gross > 2 MN/m <sup>2</sup> (> 200 t/m <sup>2</sup> )	vorwiegend kubisch > 60	sehr klein (dicht) < 1	Poren	
2	tonige	mittel 20–100 MN/m <sup>2</sup> (200–1000 kg/cm <sup>2</sup> )	klein 5–30	Kohäsionsverlust (Verwitterbarkeit)	bankig 1–0,1	verzelte von geringer Stärke < 1 ; total < 1	mittel 30–40	mittel 0,2–2 MN/m <sup>2</sup> (20–200 t/m <sup>2</sup> )	mittel 1–0,1	durchgehend ohne Füllmaterial	fein 0,1–1	mittel 30–40	mittel 0,2–2 MN/m <sup>2</sup> (20–200 t/m <sup>2</sup> )	teilweise kubisch 60–45	klein 1–5	Schichten	
3	dolomitische	klein 5–20 MN/m <sup>2</sup> (50–200 kg/cm <sup>2</sup> )	mittel 30–60	löslich	plattig 0,1–0,01	verzelte stärkere Schichten < 1 ; total > 1	klein 20–30	klein 0,02–0,2 MN/m <sup>2</sup> (2–20 t/m <sup>2</sup> )	hoch 0,1–0,01	durchgehend mit gleit- oder quellfähigem Füllmaterial	schmal 1–10	klein 20–30	klein 0,02–0,2 MN/m <sup>2</sup> (2–20 t/m <sup>2</sup> )	teilweise plattig oder prismatisch (kubisch < 30–45)	mittel 6–20	Spalten	
4	sulfat- oder salzhaltige	sehr klein < 5 MN/m <sup>2</sup> (< 50 kg/cm <sup>2</sup> )	gross > 60	Schwellen (physikalisch) oder Quellen (chemisch)	dünnplattig oder schieferig < 0,01	klüftig total: nicht > 1 ; massg.	sehr klein < 20	sehr klein < 0,02 MN/m <sup>2</sup> (< 2 t/m <sup>2</sup> )	sehr hoch (zermalmt) < 0,01	durchgehend mit wasserlöslichem Füllmaterial	breit > 10	sehr klein < 20	sehr klein < 0,02 MN/m <sup>2</sup> (< 2 t/m <sup>2</sup> )	vorwiegend plattig oder prismatisch (kubisch < 30)	gross > 20	Karst	
		Druckversuch I und II zur Schichtung mit prismatischem leuchtem Probe- körper. Einstufung nach f <sub>g</sub> min. Angabe der Ver- suchsdauer		Kolonne bleibt vorläufig reserviert für Definition be- züglich Bearbeit- barkeit mittels Schneidwerk- zeugen von Tunnelvortriebs- maschinen	Versuche: Wassergehalt Löslichkeit Odometer	Mittlere Schichtdicke	Massgebend ist die mittlere An- zahl der Zwi- schenschichten, teiler deren Gesamstärke in % gemessen	Abscherversuch auf Schicht- flächen, z. B. mit σ <sub>n</sub> ≈ 2 MN/m <sup>2</sup> (20 kg/cm <sup>2</sup> ) Probe leicht. Angabe der Ver- suchsdauer	Als Scherversuch für Schichtreibung ermittelt	Mittlerer Bruch- flächenabstand		Massgebend ist die mittlere Öffnung	Abscherversuch auf natürlichen Trennflächen, z. B. mit σ <sub>n</sub> ≈ 2 MN/m <sup>2</sup> (20 kg/cm <sup>2</sup> ) Probe leicht. Angabe der Ver- suchsdauer	Aus Scherversuch für Bruchflächen- reibung ermittelt	Sind a, b, c die Hauptachsen (mit a > b > c), so gilt ein Körper mit c/a > 0,4 als kubisch	EN, Druck im Versuchsbereich 1 MN/m <sup>2</sup> (10 kg/cm <sup>2</sup> ) Dauer 10 Minuten. Angabe des Lochdurchmessers	

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

Kräfte: 1 N (Newton) = 0,1 kg

Spannungen, Drücke:  
1 N/mm<sup>2</sup> = 10 kg/cm<sup>2</sup>  
1 MN/m<sup>2</sup> = 100 t/m<sup>2</sup>  
(Meganeutron pro m<sup>2</sup>)  
1 MPa (Megapascal)



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

Zusätzlich sind anzugeben:

- Gesteinsbezeichnung
- stratigraphische Orientierung (Azimut der Falllinie und Fallwinkel) gemäss nebenstehender Figur
- tektonische Orientierung der Trennflächensysteme (1. System, 2. System, 3. und eventuell 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 m<sup>3</sup> bis 0,1 m<sup>3</sup> Rauminhalt\*\*).

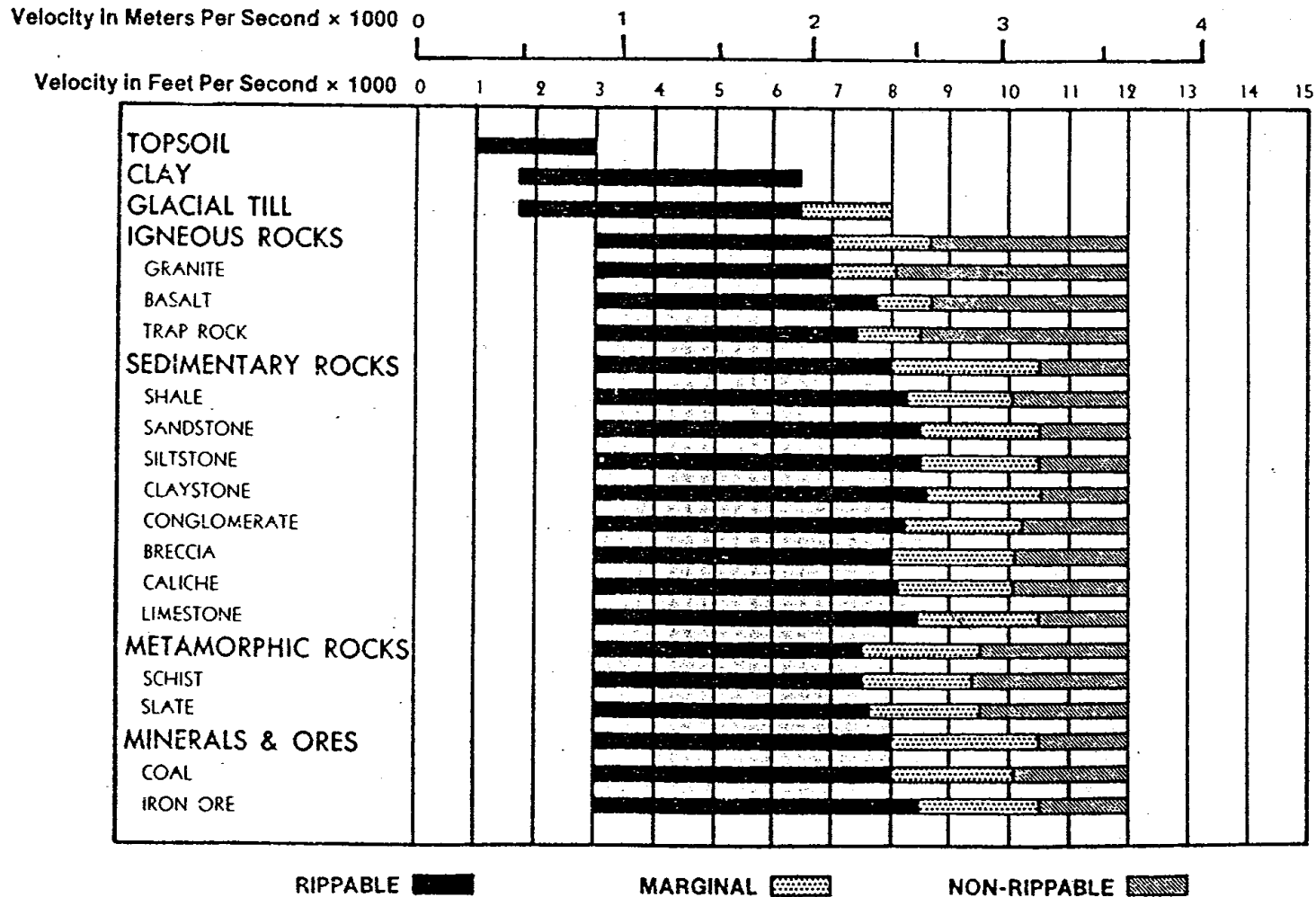
#### Klasse 7: Schwer lösbarer Fels

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 m<sup>3</sup> Rauminhalt\*\*).





# TYPICAL CHART OF RIPPER PERFORMANCE AS RELATED TO SEISMIC WAVE VELOCITIES



**Klassifizierung nach Reißbarkeit/seismischer Wellengeschwindigkeit**

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°





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**









# **Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**

[www.dr-spang.de](http://www.dr-spang.de)



DR. SPANG

DB Trainingszentrum Regensburg  
EINFÜHRUNG IN DIE FELSMECHANIK