

Mechanika hornin

Přednáška 2

Technické vlastnosti hornin a laboratorní zkoušky

prof. Ing. Matouš Hilar, Ph.D.

Dělení technických vlastností hornin

1. Základní popisné fyzikální vlastnosti
2. Hydrofyzikální vlastnosti
3. Fyzikálně technické vlastnosti
4. Pevnostní vlastnosti
5. Přetvárné (deformační) vlastnosti
6. Technologické vlastnosti

1. ZÁKLADNÍ POPISNÉ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

Objemová hmotnost

$$\rho = \frac{m}{V}$$

- měrná (specifická) hmotnost
- objemová hmotnost horniny v přirozeném stavu
- objemová hmotnost suché horniny

Objemová tíha

$$\gamma_s = \rho \cdot g$$

- měrná (specifická) tíha
- objemová tíha horniny v přirozeném stavu
- objemová tíha suché horniny

Zrnitost (určuje se u zemin)

Konzistence (určuje se u zemin)

2. HYDROFYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

- **Vlhkost**

$$w = \frac{m_v - m_s}{m_s} \cdot 100$$

m_v - hmotnost vlhkého vzorku

m_s - hmotnost suchého vzorku

- **Stupeň nasycení vodou**

$$S_r = \frac{V_v}{V_p}$$

V_v objem vody

V_p celkový objem pórů

- **Kapilarita** - schopnost rozvádět a udržovat v kapilárních dutinách kapaliny, jež mají schopnost kapilární elevace
- **Propustnost** - schopnost propouštět kapaliny a plyny
- **Bobtnavost** - schopnost zvětšovat svůj objem přijímáním vody

2. HYDROFYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

- **Rozbředavost** – vyznačuje se přítomností slabě vázané a volné vody, která narušuje vazbu a vede k pohybu částic
- **Smrštitelnost** - zmenšování objemu horniny způsobené ztrátou vody
- **Nasákavost** - schopnost přijímat do svých pórů kapalinu
- **Namrzavost** - zvětšování objemu působením záporných teplot (týká se však především jemnozrnných zemin)

3. FYZIKÁLNĚ TECHNICKÉ VLASTNOSTI

- **Tepelné vlastnosti** (např. tepelná vodivost, měrné teplo, teplotní roztažnost)
- **Magnetické vlastnosti** - určuje podíl tzv. ferromagnetických součástí (železo, nikl, kobalt a mangan).
- **Elektrická vodivost** – odpor, který je kladen el. proudu
- **Seismické vlastnosti** - schopnost vést seismické vlny vyvolané přirozenými nebo umělými zdroji
- **Radioaktivní vlastnosti** - obsah radioaktivních prvků v hornině (přirozená radioaktivita) a výskyt radonu v dutinách.

4. PEVNOSTNÍ VLASTNOSTI

- **Pevnost v tlaku** (na opracovaných vzorcích, na nepravidelných vzorcích, určená pomocí sousých razníků)
- **Pevnost v tahu** (s přímým upínáním vzorků do čelistí, zalitím konců vzorků, v odstředivce, v tlakové komoře, pomocí razníků)
- **Pevnost v příčném tahu**
- **Pevnost v tahu za ohybu**
- **Pevnost ve stříhu** (v raznicích, v šikmých maticích)

5. PŘETVÁRNÉ (DEFORMAČNÍ) VLASTNOSTI

- **Modul pružnosti** – stanoven z pružné deformace (odtěžovací větve)
- **Modul přetvárnosti** – stanoven z pružnoplastické deformace (přitěžovací větve)
- **Poissonovo číslo** - poměr pružné deformace kolmo k zatížení a pružné deformace ve směru zatížení
- **Modul reakce podloží** (nazývaný také modul reakce prostředí, koeficient pružného odporu nebo koeficient ložnosti) - popisuje poddajnost horniny při zatlačování konstrukce (či její části) do horninového prostředí

6. TECHNOLOGICKÉ VLASTNOSTI

- **Vrtatelnost** - udává, jaký odpor je kladen vrtání. Stanovuje jako práce spotřebovaná na vyvrtání otvoru do horniny o objemu 1 cm^3 , nebo jako rychlost vrtání při přesně stanovených podmínkách.
- **Tvrdoost** - odpor kladený proti vnikání předmětu do povrchu (např. Schmidtovo kladívko, Shoreho přístroj)
- **Vtlačná pevnost** - druh penetrační pevnosti, která slouží pro rozpojování hornin. Do povrchu horniny se zatlačuje tvrdý kovový váleček (nebo diskové dláto) a měří se zatížení a hloubka vniku.
- **Abrazivita** - schopnost povrchově opotřebovávat rozpojovací nástroj (např. dle Cerchara – pro TBM)

PŘETVÁRNÉ (DEFORMAČNÍ) VLASTNOSTI HORNIN

Budeme uvažovat zatěžování horniny v jednom a ve dvou směrech

Platí Hookův zákon:

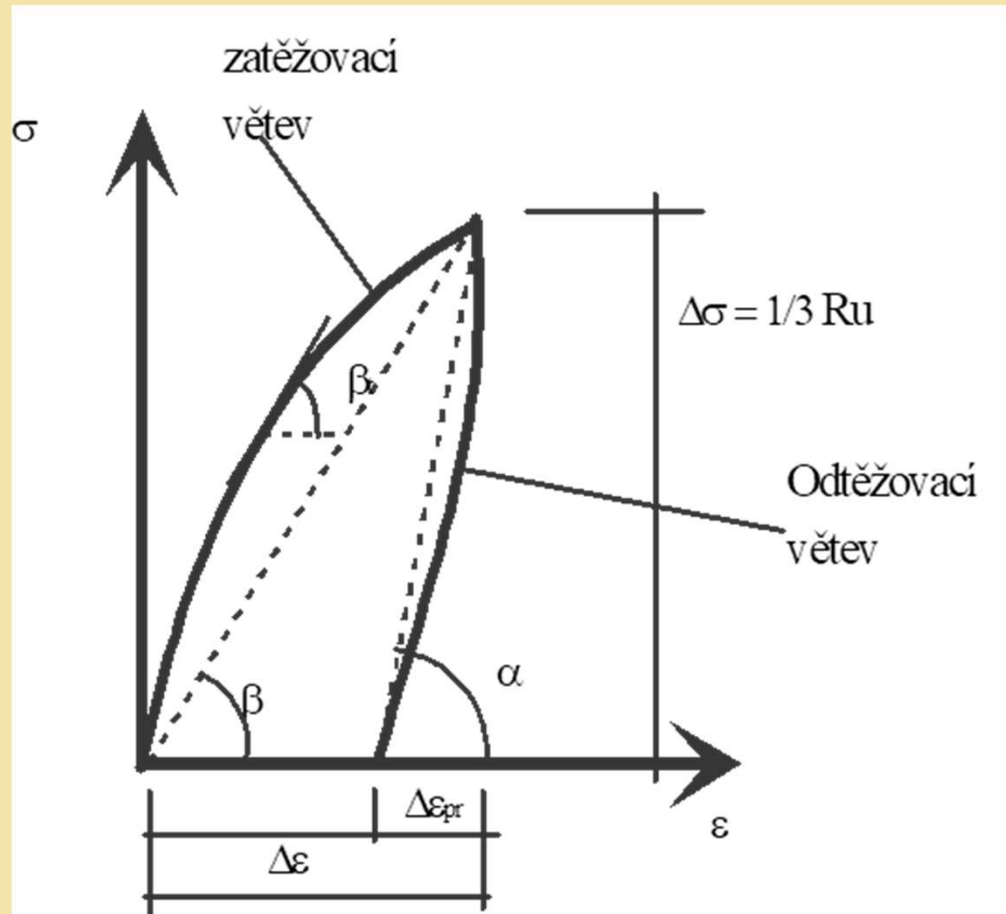
$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

σ napětí

ε poměrná deformace

E Youngův modul

Plynulé zatěžování



Pracovní diagram

Modul pružnosti

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \Delta\sigma / \Delta\epsilon_{pr}$$

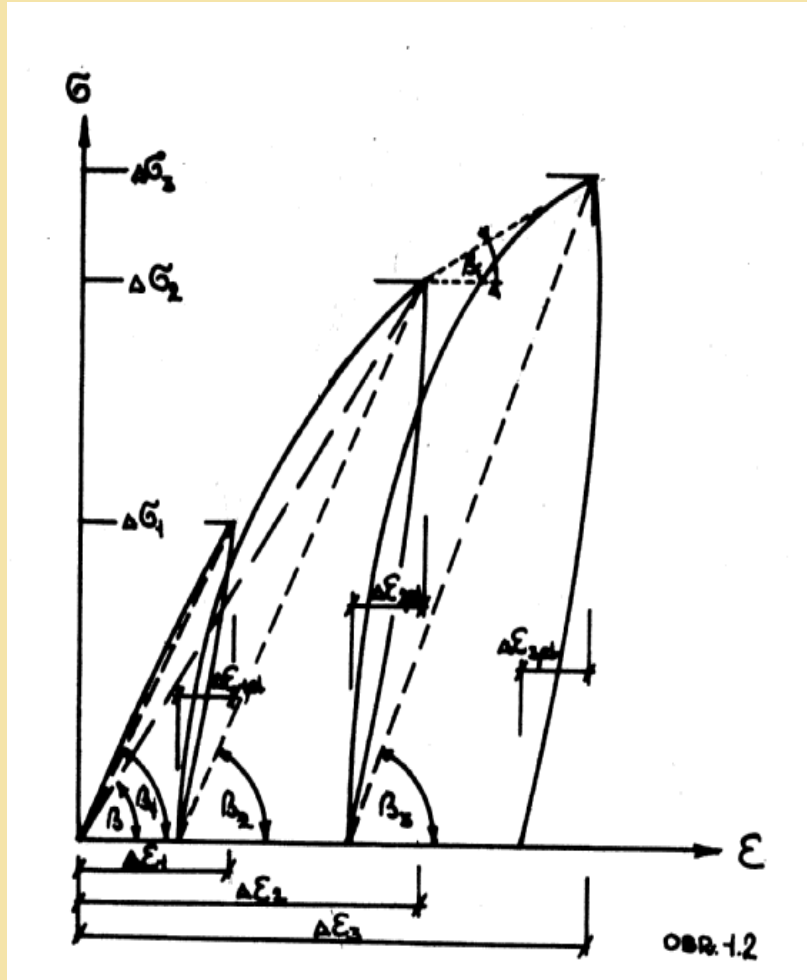
Modul přetvárnosti (základní)

$$E_{def} = \operatorname{tg} \beta = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$$

Tečnový modul přetvárnosti

$$E_{def,t} = \operatorname{tg} \beta_t = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$$

Cyklické zatěžování



Pracovní diagram

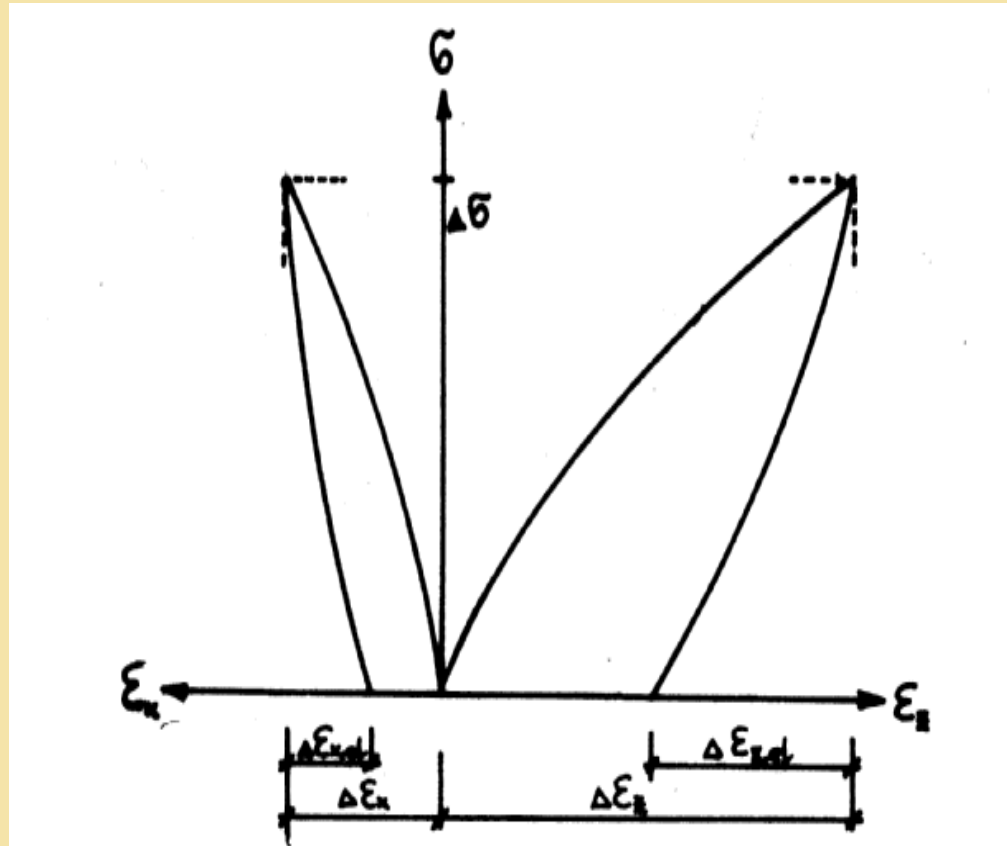
- Cyklický modul přetvárnosti

$$E_{def,c} = \frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\varepsilon_2 - \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_{2,el}} = \operatorname{tg}\beta_2$$

- Okamžitý modul přetvárnosti

$$E_{def,i} = \frac{\Delta\sigma_3 - \Delta\sigma_2}{\Delta\varepsilon_3 - \Delta\varepsilon_2} = \operatorname{tg}\beta_i$$

Poissonovo číslo



$$\nu = \frac{\Delta \epsilon_{x \cdot el}}{\Delta \epsilon_{y \cdot el}}$$

$$\nu = \frac{\text{poměrná deformace kolmo k zatížení}}{\text{poměrná deformace ve směru zatížení}}$$

Poissonovo číslo

- běžné hodnoty pro horniny

| Hornina | ν | K_0 |
|----------------------------|-------------|-------------|
| žula | 0,10 – 0,14 | 0,11 – 0,16 |
| rula | 0,15 – 0,30 | 0,18 – 0,43 |
| křemence | 0,10 – 0,15 | 0,11 – 0,18 |
| pískovce | 0,13 – 0,17 | 0,15 – 0,21 |
| křemité břidlice | 0,10 – 0,15 | 0,11 – 0,18 |
| jílovité břidlice | 0,25 – 0,30 | 0,33 – 0,43 |
| zvětralé jílovité břidlice | 0,30 | 0,43 |
| písky, štěrkopísky | 0,33 – 0,36 | 0,49 – 0,56 |
| tuhý jíl | 0,40 – 0,45 | 0,57 – 0,82 |

ν Poissonovo číslo
 K_0 Koeficient bočního tlaku v klidu

Modul reakce podloží

Poloprostor na základě Winklerovy hypotézy, pružný odpor se dá vyjádřit lineární závislostí:

$$\sigma = k \cdot \delta$$

kde:

- σ pasivní odpor horniny (napětí působící na kontaktu hornina – obezdívka v místě, kde se obezdívka deformuje směrem do horniny)
- k modul reakce prostředí
- δ zatlačení rubu ostění do horniny

PEVNOSTNÍ VLASTNOSTI HORNIN

Pevnost v prostém tlaku na opracovaných vzorcích

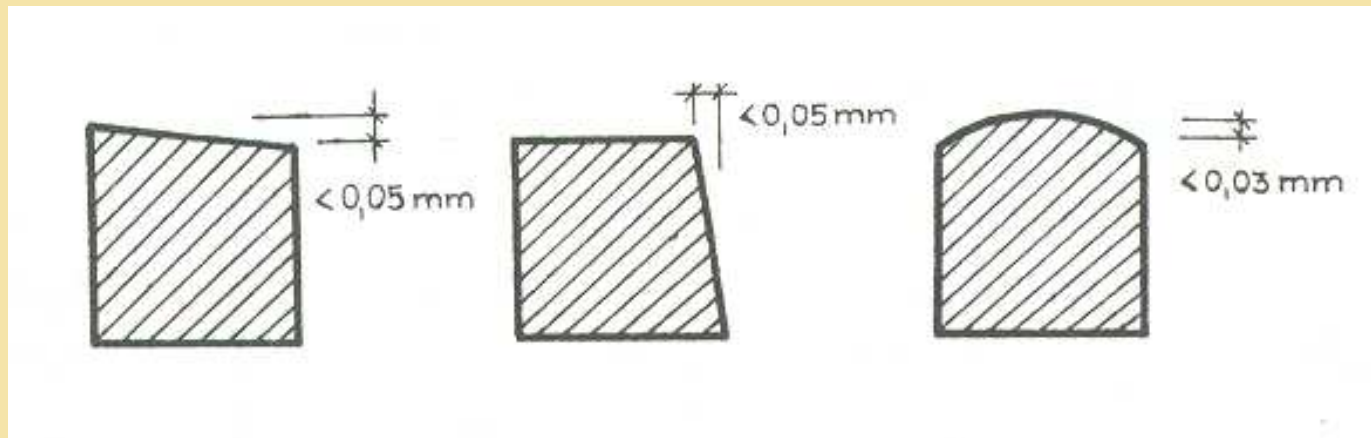
Jedná se o mezní napětí při porušení zkušebního tělesa za jednoosého tlakového namáhání:

$$R_d = \frac{F_{mez}}{A}$$

Pevnost je i funkcí zatěžování, (volí se rychlost zatěžování 500 až 1000 kN/m²) a je závislá na objemu tělíka.

Velká náročnost na přesnost opracování tělísek:

- planparalelnost tlačných ploch
($\pm 0,05$ mm)
- kolmost základen a plášt'ů
($\pm 0,05$ mm na výšku)
- vypuklost tlačných ploch max. 0,03 mm



Pevnost v prostém tlaku na nepravidelných vzorcích

Vzorky jsou:

a) **částečně opracované** odstraní se pouze ostré výčnělky, jež by se drtily při stlačení

b) **neopracované** pomocí kladiva a štípacích kleští se upraví do náležitého tvaru

Pevností se zde rozumí podíl nejvyšší dosažené síly v jednoosém zatěžování k ideální průřezové ploše vzorku (objem by se měl blížit 100 cm³)

R závisí na objemu tělíska

$$R = \frac{F}{A}$$

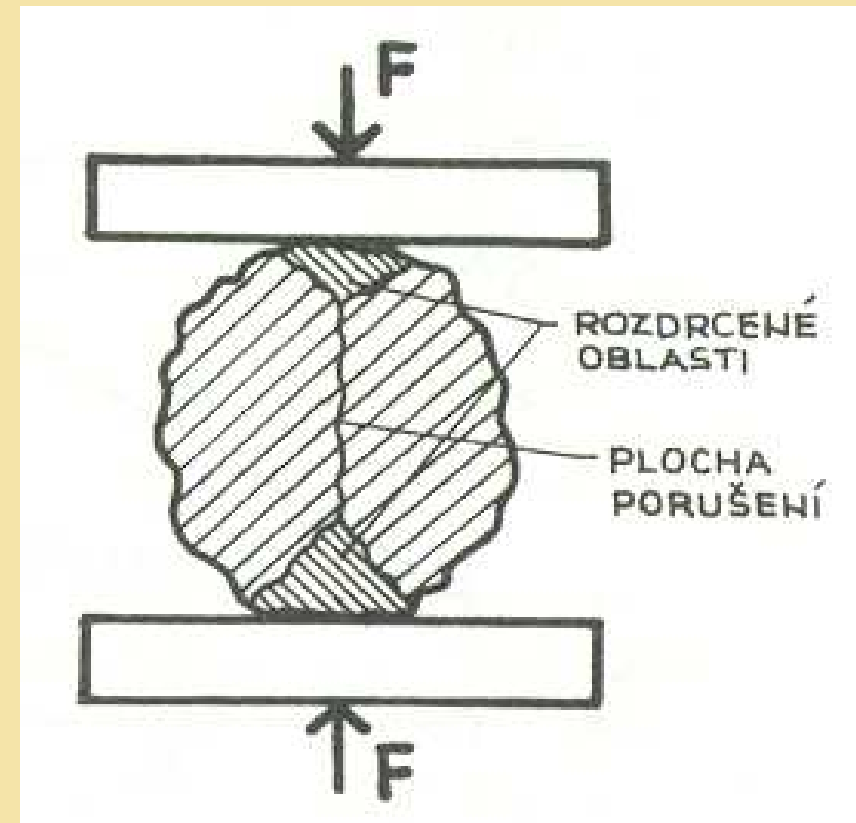
Ideální průřezová plocha se určí výpočtem z objemu

$$A = \sqrt[3]{V^2}$$

Vztah mezi silou F a ideální plochou A je přibližně přímkový

Poměr $u=R/R_d$ bývá stálý pro určitý druh hornin:

| Hornina | U |
|-----------|------|
| Křehká | 0,08 |
| Průměrná | 0,19 |
| plastická | 0,50 |

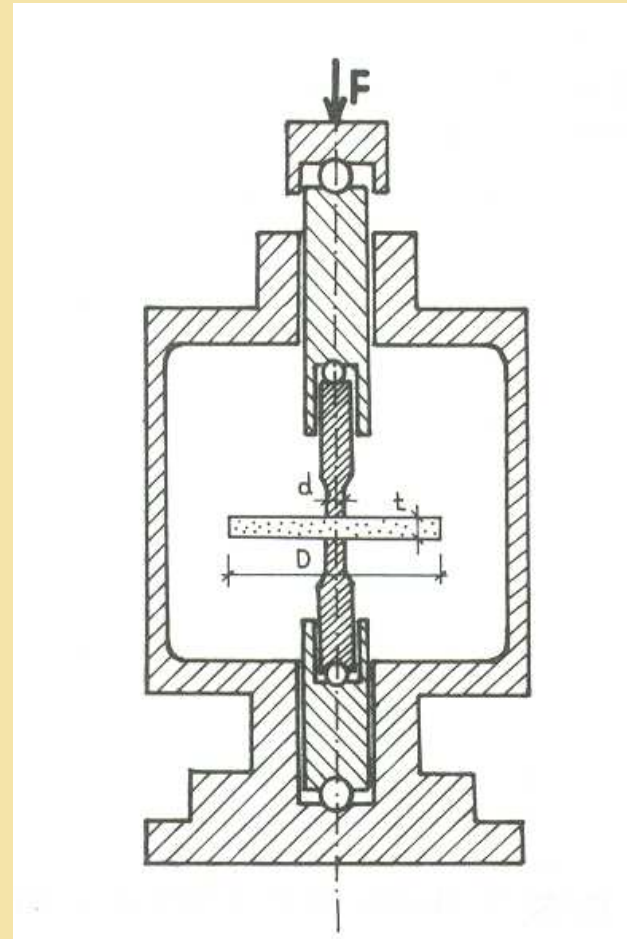


Pevnost v prostém tlaku určená pomocí souosých razníků

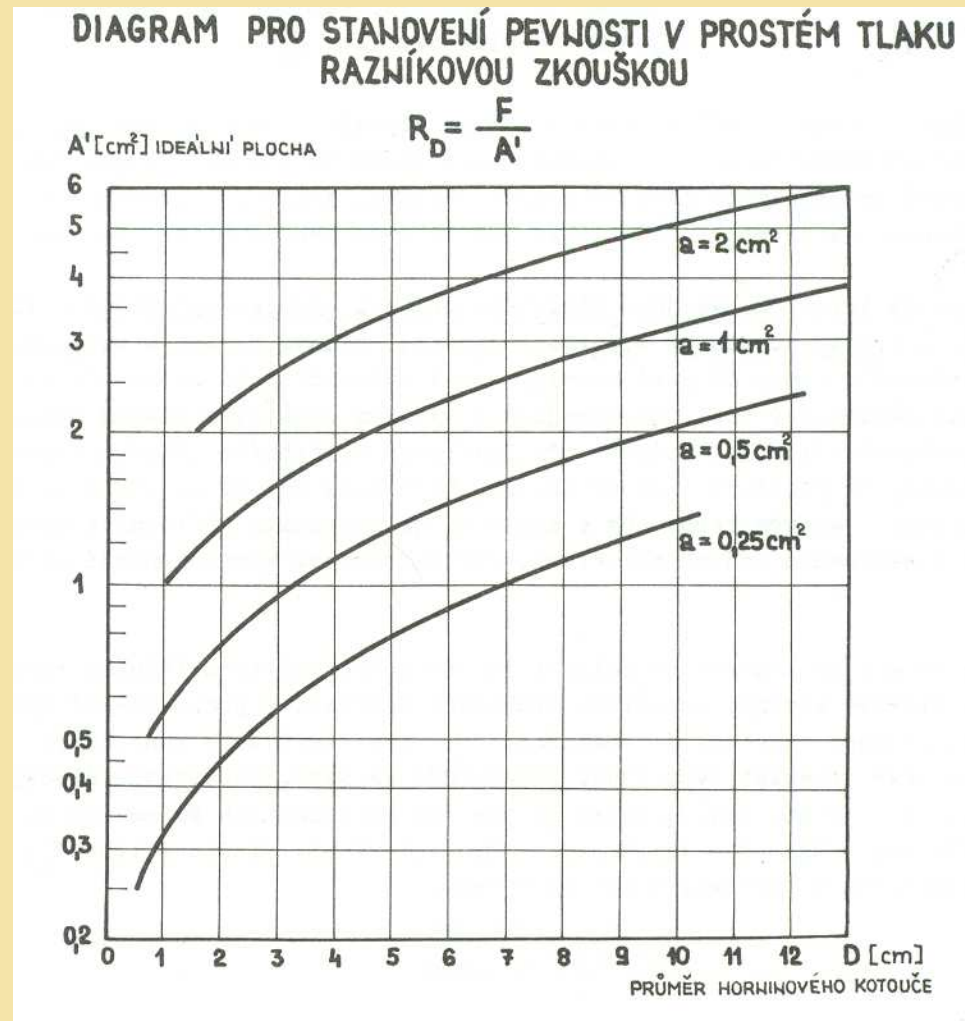
Experimentální metoda

Při určitém poměru
razníku d je mezní síla
 F přímo úměrná
průměru vzorku D

$$R_d = \frac{F}{A'}$$



Ideální plocha není závislá na materiálu, je
f (d, D), určuje se pomocí diagramu:



Pevnost v prostém tahu

- Její znalost je nezbytná pro posouzení vlastností horniny
- Horniny se zpravidla porušují tahem či jeho kombinací se smykem
- Pevnost v tahu je nižší než v tlaku (cca 20 až 50 x)
- Limituje stabilitu podzemních děl
- Hornina při namáhání tahem je citlivá na sebemenší lokální oslabení či anomálii ve skladbě horniny

Pevnost v prostém tahu - přímé upnutí vzorků

Na prizmatické zkušební těleso se přenáší v jeho podélné ose tahová síla (délka tělesa převládá nad šířkou aspoň 5x).

Tahová síla se přenáší pomocí samosvorných čelistí trhacího zařízení (zuby mohou poškodit vzorek)

$$R_t = \frac{F_{mez}}{A}$$

F_{mez} – tahová síla v okamžiku přetržení tělesa
 A – příčná plocha měřená před zkouškou

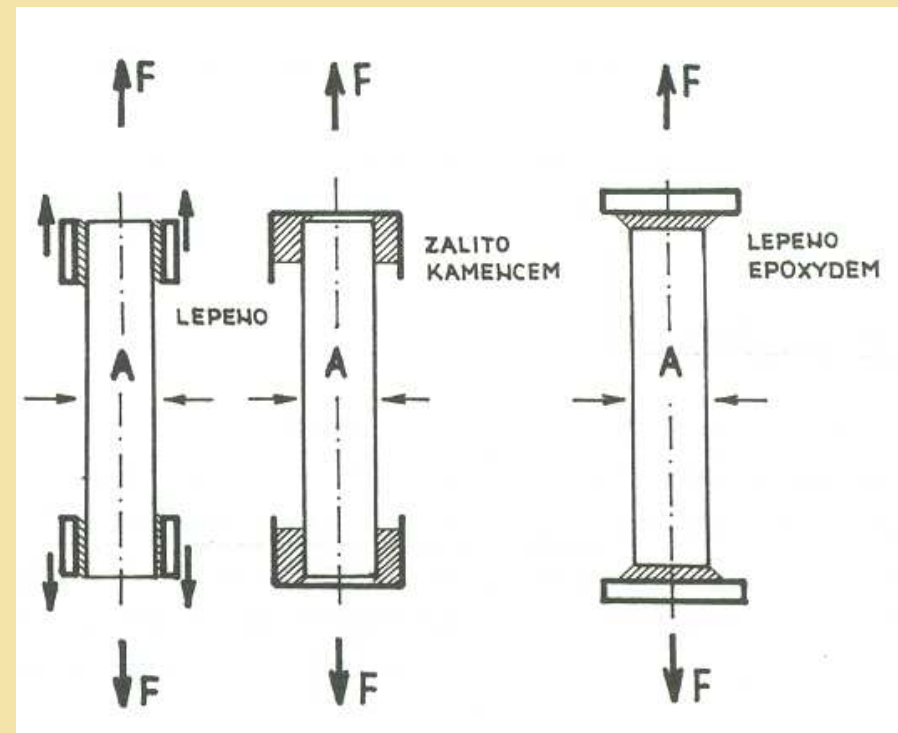
Pevnost v prostém tahu

- zalití konců vzorků

Vzhledem k poškození čelistmi se konce vzorků opatřují ochrannou:

- vložení měkkého kovu
- zalití kamencem
- lepení epoxidem

Je třeba hlídat konstantní průřez vzorku



Pevnost v prostém tahu - v odstředivce

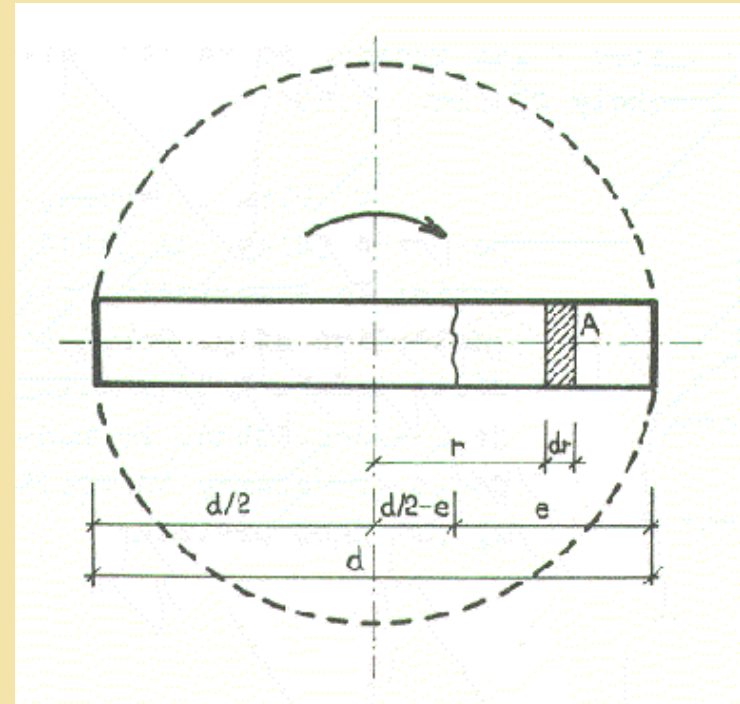
Odstraňuje problémy s uchycením vzorků, vzorek přetrhne odstředivé (objemové) síly

Podstata zkoušky:

Prizmatické tělíčko stejnorodé horniny se vloží do odstředivky, otáčením vznikají odstředivé síly, jež tělíčko poruší.

Z hlediska napjatosti nejčistší způsob určení pevnosti v tahu

Max. tahové napětí bývá u většiny přístrojů kolem 14,5 MPa



Pevnost v prostém tahu - v odstředivce

$$R_t = \frac{F}{A} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 e (d - e)$$

ρ objem. hmotnost v kg/m^3

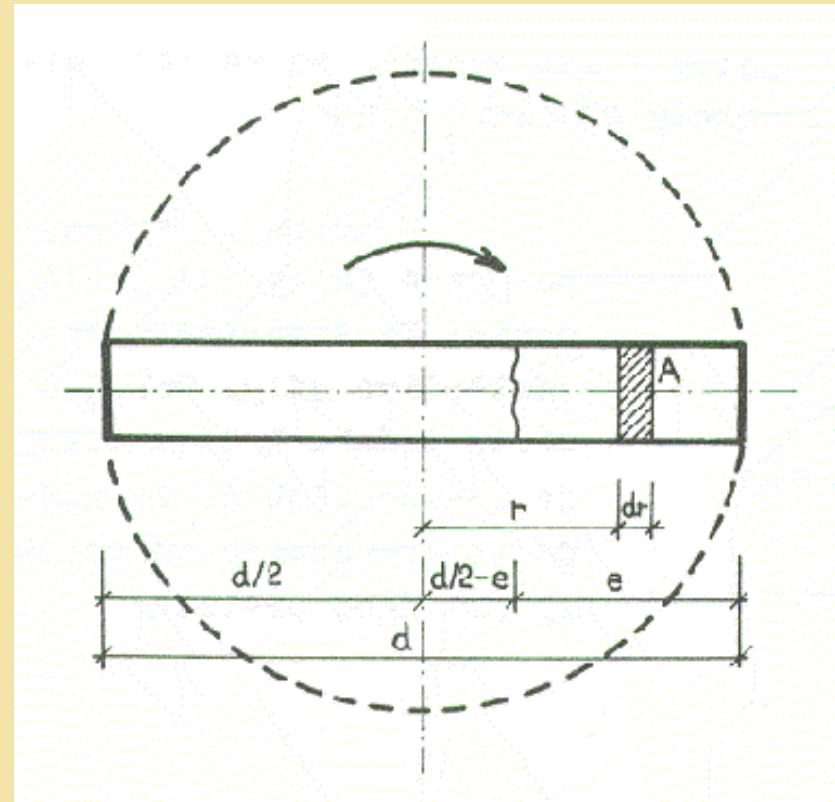
e délka odtržené části vzorku v m

d délka vzorku v m

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60}$$

n počet otáček za minutu

ω úhlová rychlost

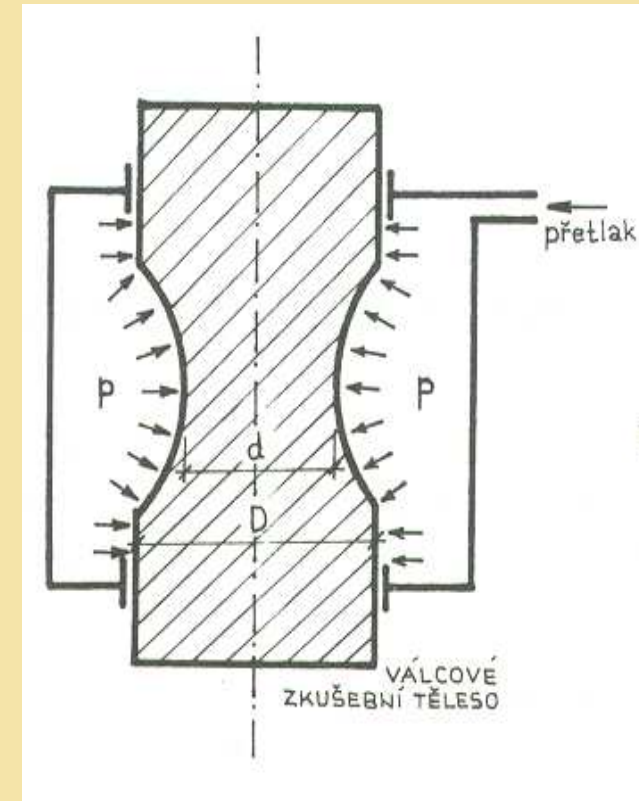


Pevnost v tahu v tlakové komoře

Zkušební tělísko není taženo na koncích, nýbrž hydrostatickým přetlakem, jehož složky působí v axiálním směru (nejde o čistý tah).

Přetlak v komoře se zvyšuje až do přetržení vzorku, pórovité horniny se chrání hermetickým obalem.

Odstraňuje čelní upínání tahové síly na těleso, zavádí značnou tlakovou napjatost kolmo k axiální tahové napjatosti



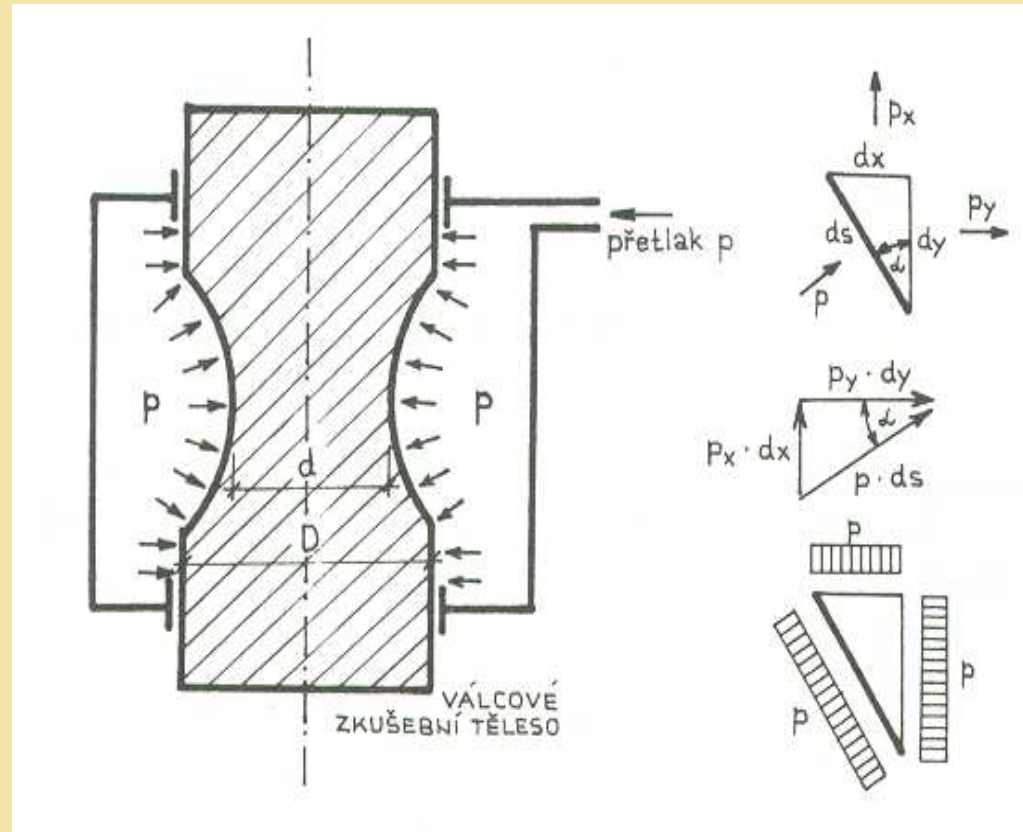
Pevnost v tahu v tlakové komoře

Axiální tahová síla :

$$F = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot p$$

Pevnost v tahu :

$$R_t = \frac{F}{A} = \left(\frac{D^2}{d^2} - 1 \right) \cdot p$$



Pevnost v tahu pomocí razníků

- Stanovuje se v axiátoru
- Horninový kotouč s kruhovým otvorem ve středu
- Otvor se vyplní plastickou hmotou na kterou tlačí razníky velikosti otvoru
- Porušení vzorku je radiálními trhlinami
- Výpočet napětí v tahu je dle teorie napjatosti silnostěnných válců
- Výhodou jsou snadno vyrobitelná tělíska, nevýhodou dvojitá napjatost (v tahu i tlaku)
- Vyhodnocení pomocí diagramů

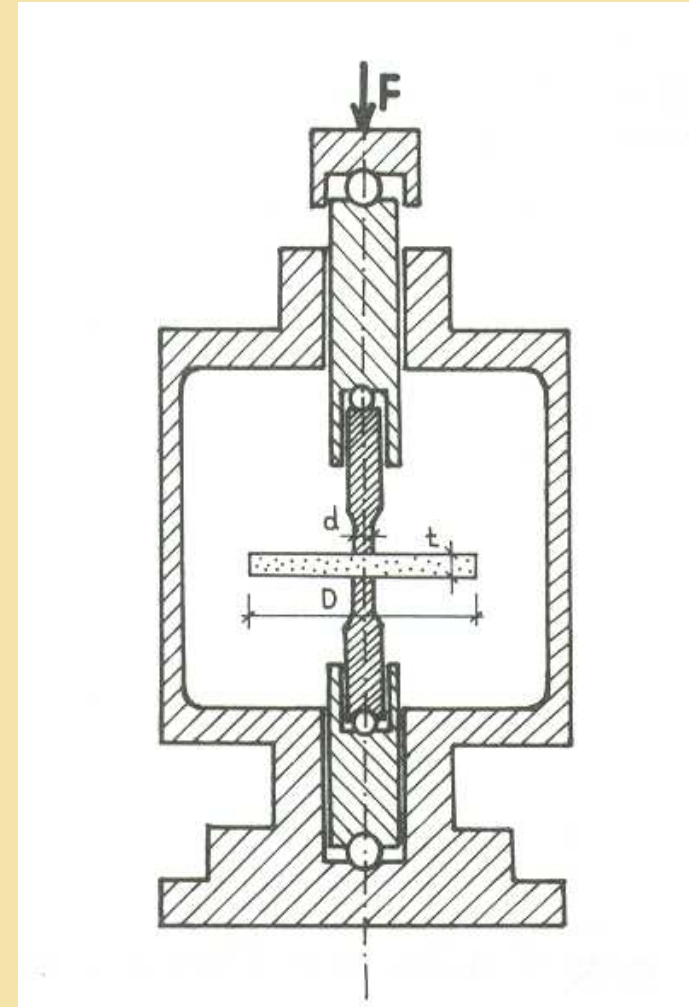
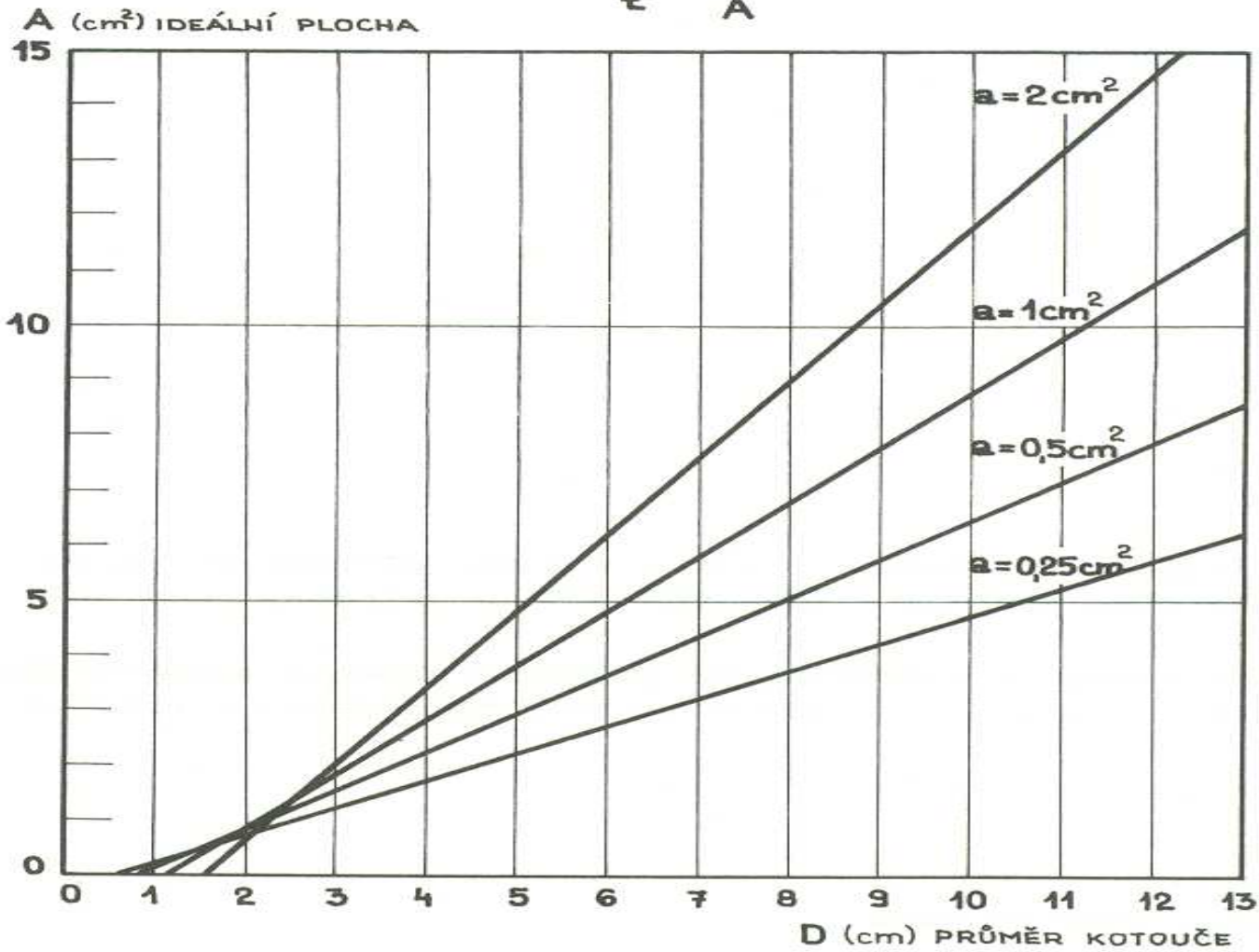


DIAGRAM PRO STANOVENÍ PEVNOSTI V PROSTÉM TAHU RAZNÍKOVOU ZKOUŠKOU

$$R_t = \frac{F}{A}$$

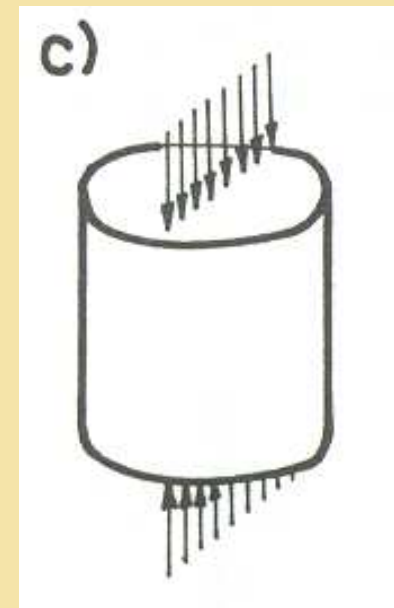
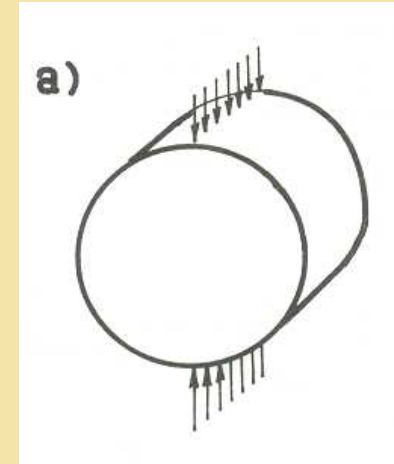


Pevnost v příčném tahu

Zkušební tělísko zatěžují na jeho dvou protilehlých stranách podél dvou úzkých pásků (přímkové zatížení)

K porušení dojde v rovině spojující přímková zatížení

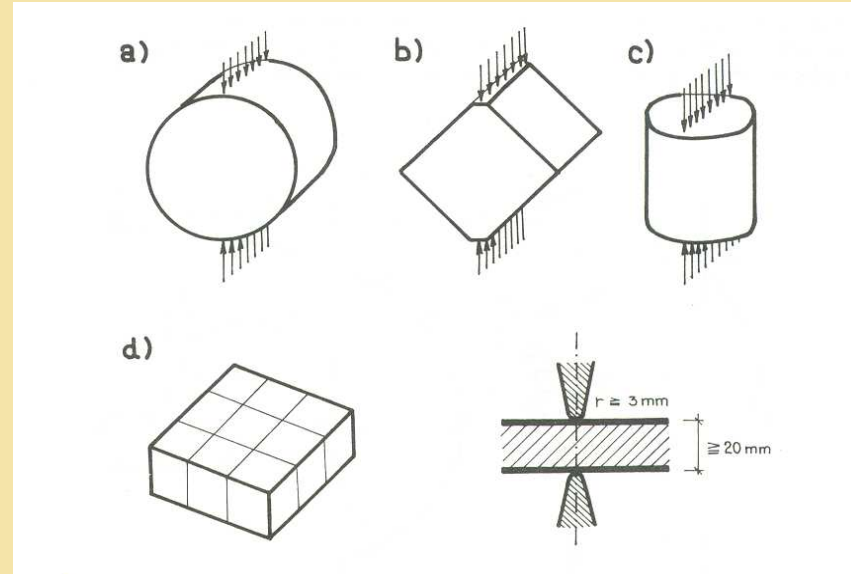
Rozdělení napětí tahového v příčném směru a tlakového ve směru zatížení je odvislé od tvaru tělíska.



Pevnost v příčném tahu

Lze zatěžovat:

- a) Válečky na ležato
- b) Krychle a nízké hranoly
- c) Válce a krychle podél dvou středních protilehlých povrchových příček
- d) Planparalelní destičky



Pro případ zatížení hranolů na koso je pevnost v příčném tahu dle Frosta:

$$R_{t, p \check{r}} = 0,7336 \frac{F_{mez}}{A}$$

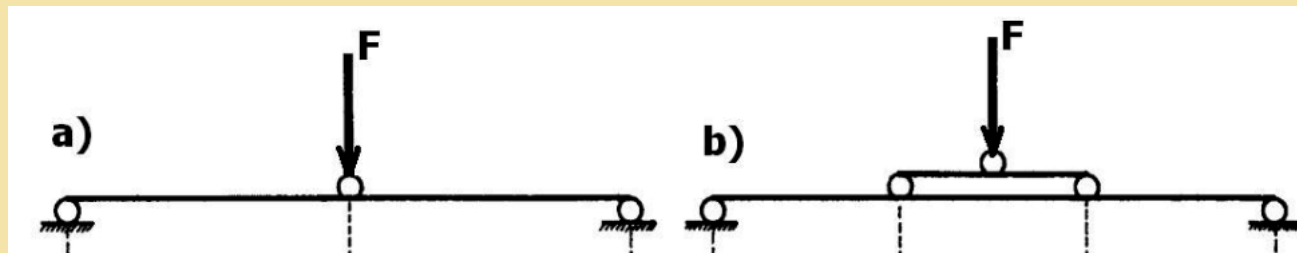
A – plocha porušení tělesa

Pevnost v tahu za ohybu

- Těleso je namáháno jak tahem tak tlakem, pro porušení rozhoduje pevnost menší.
- Předpokládá se trojúhelníkové rozdělení napětí v příčném průřezu, lineární pružnost horniny
- Napětí v tahu i tlaku je dáno vztahem:

$$\sigma_{\text{tah, tlak}} = \pm \frac{M}{W}$$

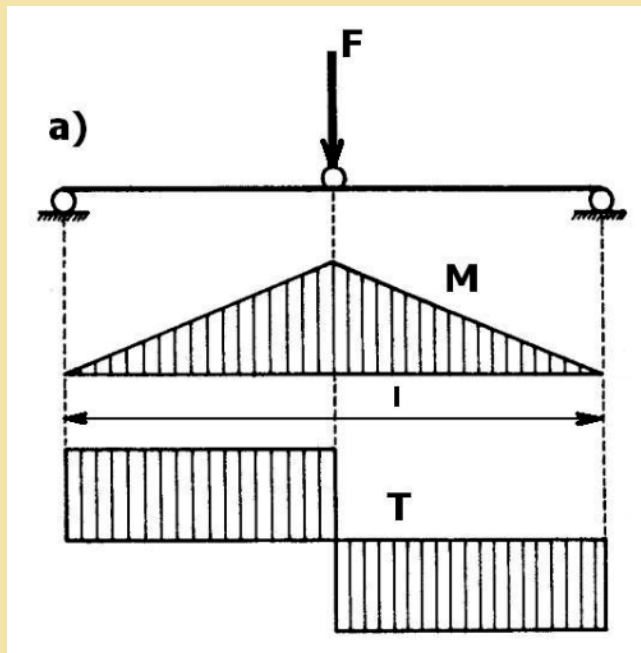
- Rozdíl mezi pevnostmi v tahu za ohybu a v prostém tahu je dán tím, že modul pružnosti horniny v tahu a tlaku není stejný.



Pevnost v tahu za ohybu

Při rovinném ohybu se zatěžuje zkušební trámek:

a) zatížení břemenem uprostřed rozpětí trámku



Dojde-li ke zlomení ve vzdálenosti e od podpory, bude příslušný ohybový moment

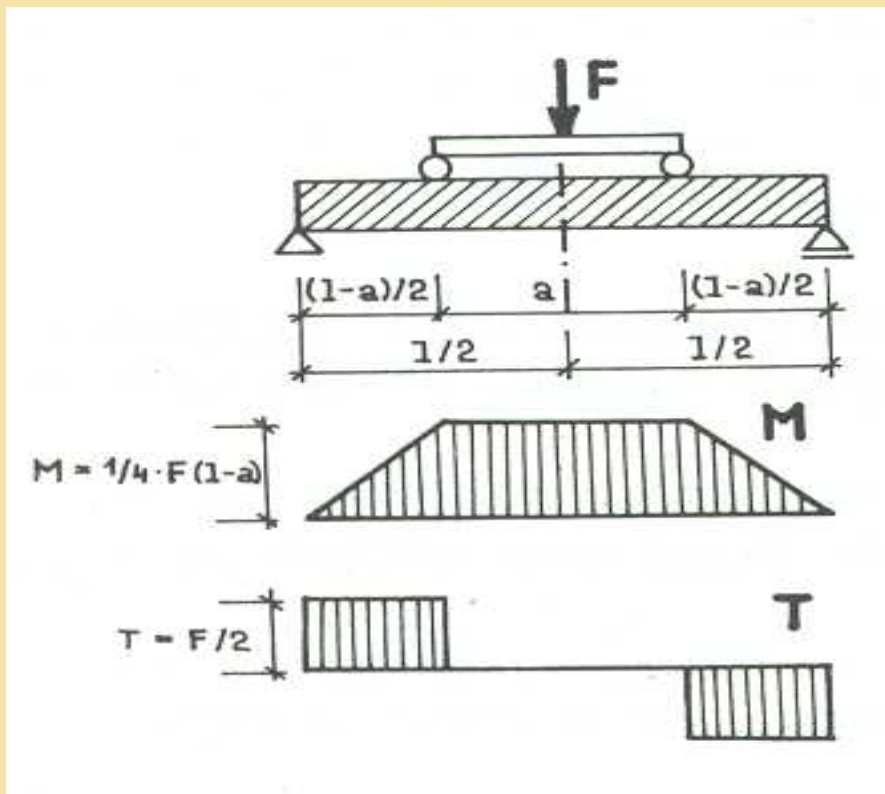
$$M = \frac{1}{2} F \cdot e$$

a napětí v tahu pro průřez obdelníkový

$$R_{to} = \frac{3Fe}{bh^2} \quad (W = 1/6 bh^2)$$

Pevnost v tahu za ohybu

b) zatížení dvěma souměrnými břemeny, každé o $F/2$



Pevnost v tahu za ohybu pro obdélníkový průřez bude

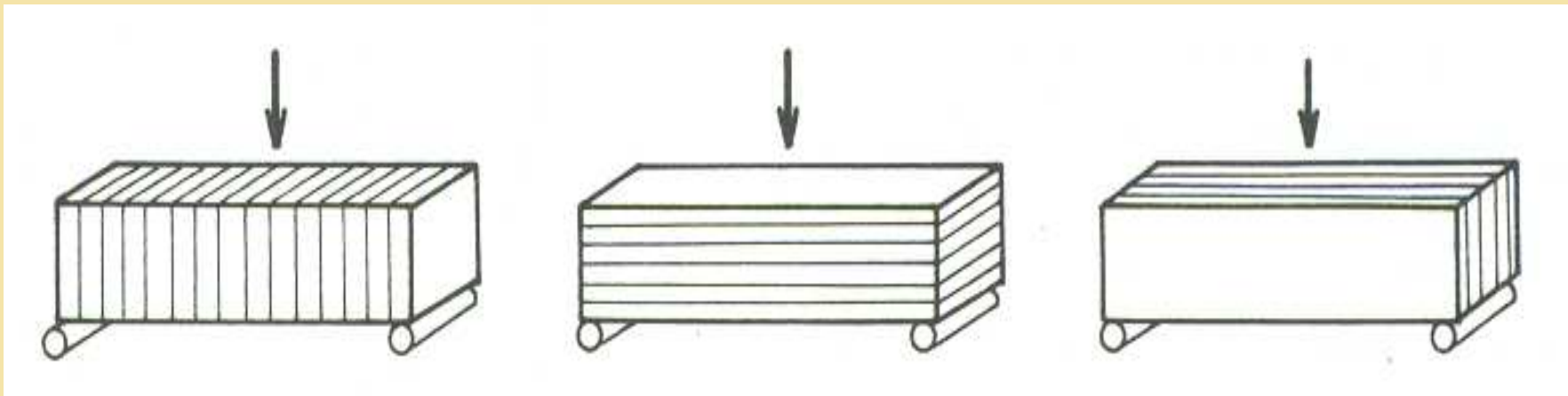
$$R_{to} = \frac{3F(1-a)}{2bh^2},$$

pro průřez kruhový pak

$$R_{to} = \frac{F(1-a)}{\pi r^3}.$$

Pevnost v tahu za ohybu

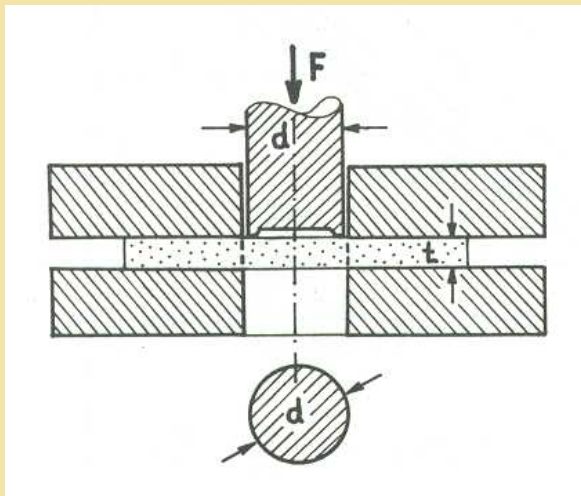
Pro vrstevnaté horniny se pevnost v tahu za ohybu určuje kolmo k vrstvám



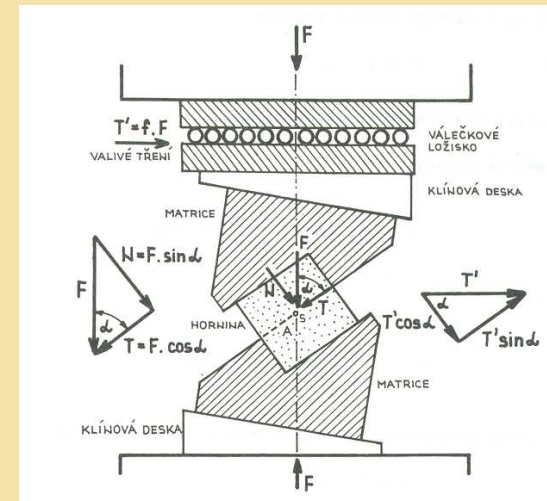
Pevnost ve stříhu

Pevnost hornin ve stříhu je tangenciální síla vztažená na velikost stříhové plochy, nutno je ji odlišovat od smykové pevnosti hornin. Provádí se:

a) v raznicích



b) v šikmých matricích

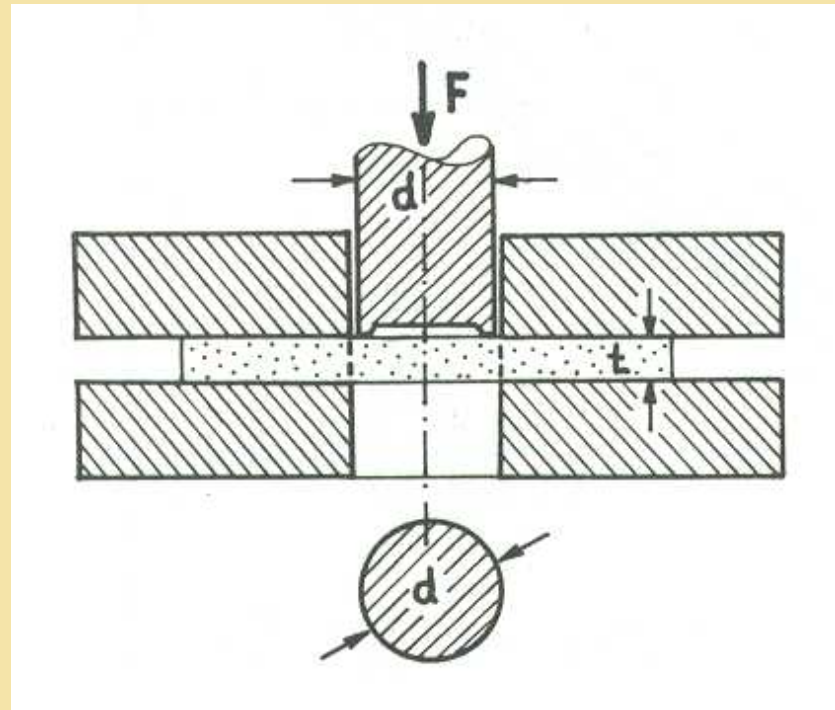


Pevnost ve stříhu v raznicích

Planparalelní deska může být i nepravidelně ohraničena, vloží se mezi dvě ocelové desky, opatřené souosými otvory a otvor se protlačí raznicí

Střihová pevnost je dána vztahem:

$$R_{stř} = \frac{F}{A_{stř}} = \frac{F}{\pi dt}$$



Pevnost ve stříhu v šikmých maticích

Střihová pevnost:

$$\tau_{\text{stř}} = \frac{F}{A} \cos \alpha$$

