

10. Mechanika hornin - laboratoř

Laboratorní metody jsou od samého počátku nedílnou součástí geotechniky a tedy i mechaniky hornin. Jako v celé řadě jiných oborů jsou zde nenahraditelné, a to především při určování vlastností horninové matérie a za jistých okolností i horninového masívu, při verifikaci chování geotechnických konstrukcí, při stanovení varovných stavů, při zpětné analýze, při stanovení vstupních parametrů pro numerické metody (MKP, MHP) apod.

Laboratorní metody lze rozdělit na:

- **Fyzikální modelování**, kdy je stavěn a zatěžován model a
- **Laboratoř mechaniky hornin**, ve které se smluvenými postupy zkoumají vlastnosti horninové hmoty odebrané z horninového masívu.

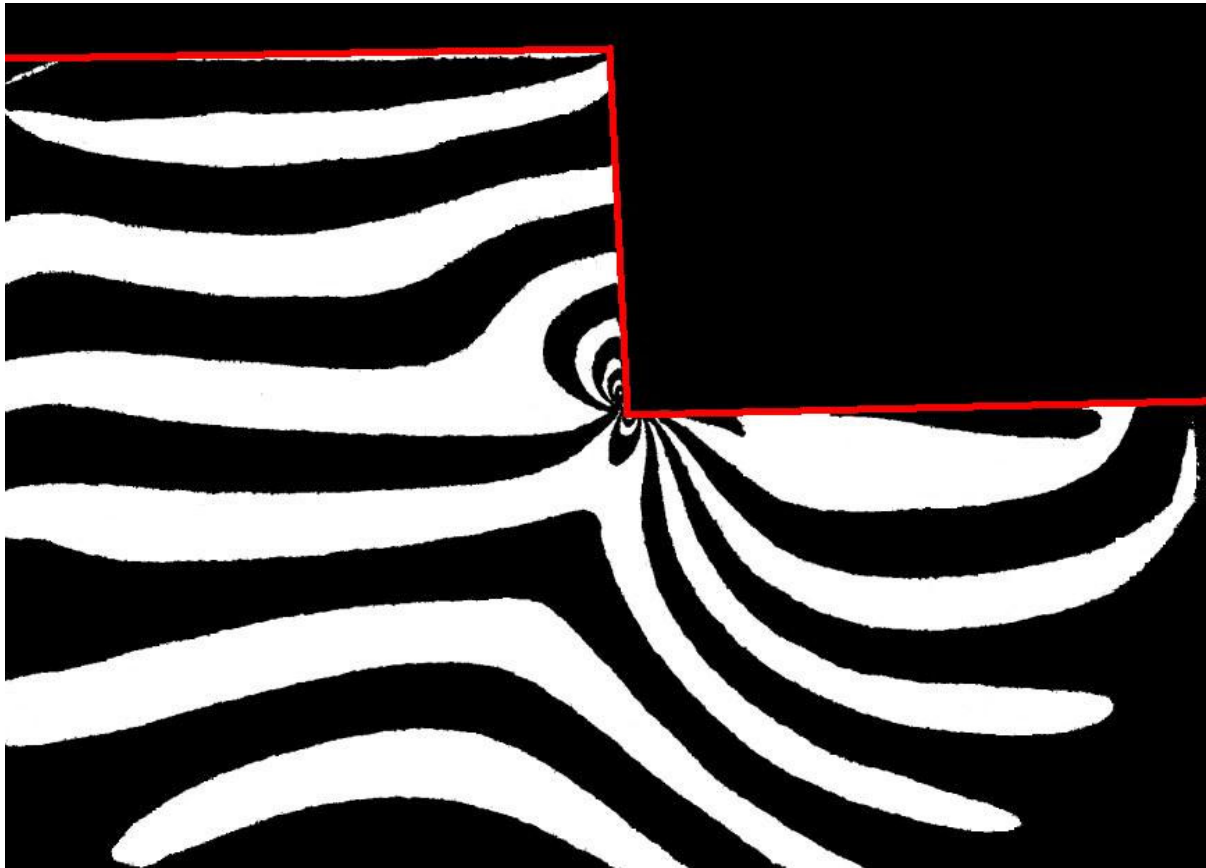
10.1 Fyzikální modelování

je založeno na podobnosti fyzikálních jevů, přičemž zkoumání konkrétního originálu (konstrukce) je nahrazeno zkoumáním fyzikálně podobného systému a dimenzionální analýzy menšího měřítka (mnohem lehčeji realizovatelného). V mechanice hornin se v posledních cca 20-ti letech nejčastěji použily **fotoelastické modely** a **modely z ekvivalentních materiálů**.

Fotoelastické modely

využívají fotoelasticimetrii jako metodu k vyšetřování napjatostního stavu (a to nejen na modelech, ale i na povrchu konstrukcí). Model musí být u této metody zhotoven z průhledného, opticky citlivého materiálu (sklo, organické sklo, celuloid, resp. další plasty). Takovýto materiál se z optického hlediska chová při nulovém zatížení jako izotropní látka a po přitížení pak jako látka krystalická. Tato takzvaná „vlastnost dočasného dvojlomu paprsků“ je v přímé závislosti na rozdílu hlavních napětí v jednotlivých místech zatíženého modelu. U zatíženého modelu, prosvěcovaného **ve fotoelasticimetrickém přístroji polarizovaným světlem**, pozorujeme dva druhy čar. **Izoklinné čáry** a **izochromatické čáry** (interferenční pruhy) dávají při rovinném stavu napjatosti směry a rozdíly hlavních napětí (poněvadž směr optických os dočasných krystalů je totožný se směrem hlavního napětí a konstantní hodnota dvojlomu paprsků vzniká v místech se stejným rozdílem hlavních napětí). Na okrajích modelu lze vyčíslit velikosti hlavních napětí. Pomocí metody separace napětí je možné (ze základních fotoelasticimetrických údajů) vypočítat i hodnoty napětí v libovolném místě zatíženého modelu (např. Hetényi, 1961).

Velkou výhodou fotoelasticimetrie je relativní jednoduchost a rychlost získání výsledků. K nevýhodám lze přičíst nutnost opatřit si měřicí zařízení (**fotoelasticimetr**) a skutečnost, že platnost získaných údajů je omezena na obor teorie pružnosti. Výsledky fotoelasticimetrického modelu (viz např. obr.10.1) lze úspěšně porovnat s parametrickými studii zpracovanými matematickým modelováním.



Obr. 10.1 Fotoelasticimetrický model stavu napjatosti při hloubení kolmé stěny stavební jámy. Izočáry napětí (Málek – Kolář, 1990)

Modely z ekvivalentních materiálů

ne zcela správně nazývané i modely hmotovými. Tyto modely (realizované jako rovinné i prostorové) vycházejí z principů *fyzikální podobnosti* a *dimenzionální analýzy*, přičemž vlastní těleso modelu je zhotovováno z ekvivalentních materiálů.

Fyzikální podobnost a dimenzionální analýza v mechanice hornin

Z nutné a postačující podmínky podobnosti dvou dějů vyplývají (podle J. Kohoutka) pro fyzikální model horninového celku následující požadavky:

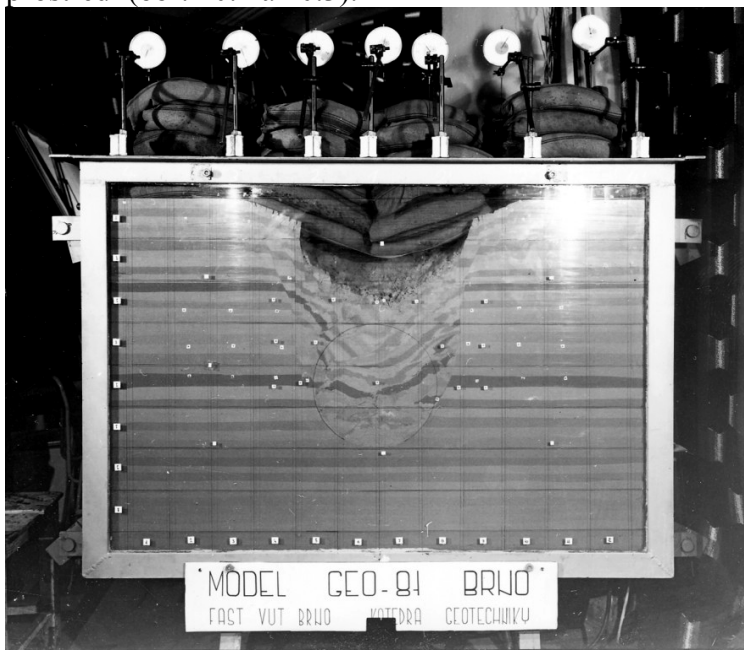
1. Geometrická podobnost
2. Příslušnost dějů v modelu a v horninovém celku k téže třídě dějů; matematicky je popisují tytéž diferenciální rovnice
3. Číselná podobnost počátečních a okrajových podmínek v modelu vyjádřených v bezrozměrovém tvaru s podmínkami v horninovém masívu
4. Číselná podobnost stejnojmenných bezrozměrových argumentů. Dva útvary jsou si geometricky podobné tehdy a jen tehdy, jsou-li všechny jejich rozměry úměrné a příslušné úhly stejné. V geometrii jsou odpovídající si body dvou útvarů nazývány body homologickými. Homologické části modelu a horninového celku jsou tedy části složené z homologických bodů.

Z výše uvedeného (zjednodušeně) vyplývá, že dva fyzikální jevy jsou si podobné tehdy, když parametry jednoho můžeme získat z parametrů druhého.

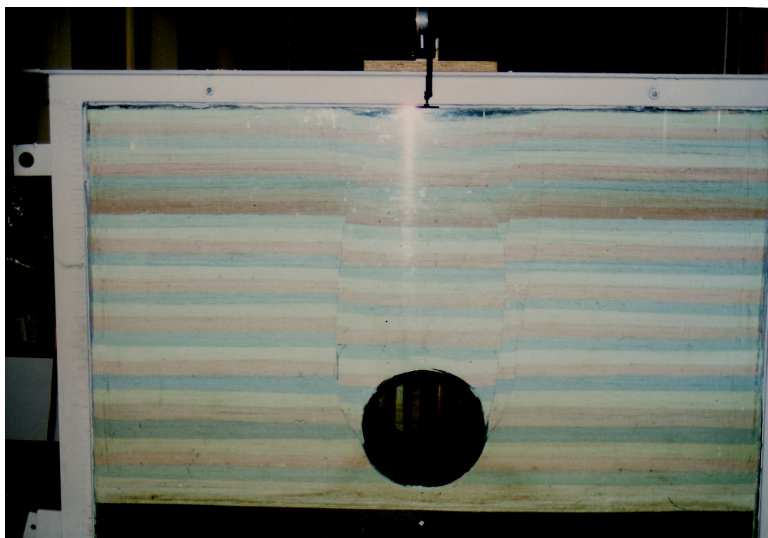
Závislost měřicí jednotky *odvozené veličiny* na měřících jednotkách *základních veličin* se může vyjádřit vzorcem. V soustavě měřících jednotek mají vzorce rozměrovosti všech fyzikálních veličin tvar součinu mocnin. K určení *bezrozměrných veličin*, což jsou bezrozměrné skupiny fyzikálních parametrů, je nutno znát pouze veličiny, na nichž závisí zkoumaný děj a jejich rozměry v určité soustavě jednotek. Fyzikální zákonitosti, zjištěné nepřímo teoreticky nebo přímo experimentálně, představují vlastně funkční závislosti mezi veličinami charakterizujícími zkoumaný jev.

Za *základní fyzikální veličiny* bereme v mechanice *hmotu M , délku l a čas T* . Ostatní fyzikální veličiny se dají odvodit z těchto *základních veličin* pomocí jejich definic a fyzikálních zákonů. Všeobecný závěr *teorie rozměrovosti* je znám jako *teorém π* = *Buchinghamův teorém* (F. Nazari, 1981).

Model postavený ve zvoleném měřítku z ekvivalentních materiálů je zatěžován a je přitom studováno chování modelované konstrukce i dotčeného spolupůsobícího modelovaného prostředí (obr. 10.2 a 10.3).



Obr. 10.2 a 10.3
Modely z ekvivalentních materiálů, postavené a zatěžované ve zkušebním stendu (F. Nazari, 1981 a 1997)



10.2 Laboratoř mechaniky hornin

je dnes integrální součástí disciplíny. Při řešení řady úkolů se geotechnika již neobejde bez laboratorního ověřování vlastností horniny. Na laboratoř je nutno se vždy obrátit když:

- je potřeba doplnit zkoušky polní (viz dále) znalostmi o horninové hmotě
- jinak než laboratorně žádanou vlastnost horniny nedokážeme ověřit (např. hustota, objemová hmotnost, nasákavost)
- se používá zjišťovaná vlastnost jako klasifikační činitel, resp.
- má hornina sloužit co stavební surovina (kámen, kamenivo).

Téměř pro každou zkoušku je v současné době vypracován metodický předpis - v ČR obvykle ve formě ČSN či doporučení ISRM (International Society of Rock Mechanics). Pro některá ze stanovení lze použít paralelně více předpisů. I proto byly širokým kolektivem autorů vypracovány „**Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice hornin**“ (1987). V současné době jsou plně rozvinuty (i za účasti českých expertů) práce sjednocující provádění těchto laboratorních zkoušek v rámci Evropské unie (Eurocode 7-2, normy EN-ISO).

Vlastnosti hornin ověřované v laboratoři lze rozčlenit na:

- a) **fyzikální** - horninu blíže popisující, vyjadřující její hmotu a vztahy mezi fázemi
- b) **mechanické** - vyjadřující chování horniny vůči vnějšímu zatížení nebo namáhání, charakterizující ji při přetvoření a porušení
- c) **technické** (též technologické) - oceňující horninu především jako stavební surovinu.

Větší (v ČR obvykle komerční) laboratoře mechaniky hornin mohou být rozděleny na:

- **fyzikální laboratoř** (pro stanovení *vlastností fyzikálních*; je vybavena mlýnkem na horninu, sušičkou, vařičem, pískovým ložem pro chlazení, pyknometry, běžným i speciálním laboratorním sklem a nádobami, technickými a analytickými váhami etc.)
- **lisovnu** (pro ověření *vlastností mechanických*; je vybavena především lisy různého výkonu a přesnosti, trhačkou, řadou speciálních přípravků etc.) a
- **technologickou zkušebnu** (pro zjišťování *vlastností technických*; s vybavením různými speciálními přístroji, mrazničkou etc.).

Úspěšné uplatnění laboratoře mechaniky hornin je podmíněno logickým a řádným *odběrem vzorků v terénu* a správnou *přípravou zkušebních těles*. Obojí vyžaduje značné znalosti i osobní zkušenost.

Vzorky hornin mají být odebírány především z **charakteristických** (tzn. přibližně průměrných) či z **geotechnicky zajímavých** (tj. obvykle oslabených či jinak postižených) **partii masívu**. Ne neobvyklý je případ určité nouze, kdy jsou odebírány vzorky nesystematicky, podle momentální možnosti, zkrátka kde se vůbec dá (výchozy, odkryvy, nezapažené plochy přístupových děl); tyto skutečnosti je nutné zohlednit. Samozřejmostí je řádná dokumentace vzorkování (označení průzkumného díla, metráže, hloubky, výšky nad počvou apod.). Vzorky hornin mohou být:

- **kusové** – úlomky horniny objemu prvních dm³ (běžně cca velikosti lidské pěsti)
- **balvanité** – omezené pouze možnostmi manipulace se vzorkem v terénu (obvykle hmotnosti do max. cca 50 kg)
- **úlomky vrtného jádra** – vyjmuté ze vzorkovnic při dokumentaci jádrového vrtu.

Z kusových či balvanitých vzorků, resp. z úlomků vrtného jádra lze připravit zkušební tělesa:

- **neopracovaná** (nepravidelného tvaru)
- **částečně opracovaná** (přibližně vejčitá, seříznuty dvě protilehlé podstavy apod.)
- **zcela opracovaná = pravidelná** (*krychle, hranoly, válce, destičky*), nařezaná z balvanitých vzorků nebo z vrtného jádra diamantovými kotoučovými pilami – obr. 10.4.

Velikost zkušebních těles musí být dostatečná - tj. minimální rozměr musí být nejméně cca 10x větší, než je maximální rozměr minerálu, zrna nebo vrstvičky (u tence vrstevnatých hornin). Splnění této podmínky nebývá obtížné.



Obr. 10.4 Typy zcela opracovaných (pravidelných) zkušebních tělísek



Obr. 10.5
Řezačka na přípravu
pravidelných zkušebních
tělísek (fy. Norton,
Liechtenstein)

Fyzikální vlastnosti hornin

horninu blíže popisují, vyjadřují její hmotu (zde jsou prakticky neměnné) nebo její okamžitý stav (např. za jistých okolností změny mezi jednotlivými fázemi). Fyzikální vlastnosti jsou obvykle (i když ne nutně) dále rozčleněny na:

- **základní (hmotové)**
- **hydrofyzikální**
- **fyzikálně-chemické**

Základní (hmotové) fyzikální vlastnosti horninové matérie:

HUSTOTA (ve starší literatuře též nesprávně „*specifická hmotnost*“ či „*měrná hmotnost*“) je hmotností objemové jednotky pouze tuhé fáze horniny (tzn. bez pórů a dutin). Hustota se stanoví pyknometrickou metodou (pyknometr Gay-Lussac) na vzorku horniny rozmělněném (drtičem a mlýnkem) tak, aby částice vzorku již neobsahovaly póry (< 0,125 mm). Jde o poměr hmotnosti navážky do pyknometru (vysušené při 105°C) k jejímu objemu, v něm zjištěnému při zalití vodou. Postup zkoušky lze shrnout do kroků: drcení, mletí, sušení, vážení, vložení do pyknometru, zalití vodou, vaření, chlazení, vážení, výpočet:

$$\rho_s = \frac{(m_2 - m_1) \rho_w}{V \rho_w + (m_1 - m_3)} \quad [\text{kgm}^{-3}, \text{gcm}^{-3}]$$

kde:	m_1	hmotnost prázdného pyknometru
	m_2	hmotnost pyknometru + vzorku
	m_3	hmotnost pyknometru + vzorku + kapaliny (vody)
	V	objem pyknometru (obvykle 100 cm ³)
	ρ_w	hustota vody (při 20°C)

Výsledek je stanoven jako \emptyset ze tří souběžných stanovení.

Z pohledu mechaniky hornin nepatří stanovení hustoty horninové hmoty k nejvýznamnějším (zvláště s přihlédnutím ke značné pracnosti). Zjištění velmi vysoké hustoty (výrazněji přes 3 000 kgm⁻³) indikuje zrudnění. Pomineme-li účely rudné prospekce (s nutností ověřit obsahy kovů v analytické laboratoři) může tento ukazatel signalizovat jisté problémy spojené se zrychlením procesu zvětvávání jinak makroskopicky i velmi solidní horniny (např. při oxidaci rozptýleného FeS₂).

Typické hodnoty hustoty činí pro:

-	uhlí	1,3 ÷ 1,5 gcm ⁻³
-	pískovce	2,6 ÷ 2,8 gcm ⁻³
-	vyvřelé horniny	2,65 ÷ 2,9 gcm ⁻³
-	čediče	2,9 ÷ 3,05 gcm ⁻³ .

OBJEMOVÁ HMOTNOST je hmotností všech součástí horniny (tuhé, plynné, příp. i kapalně fáze) v objemové jednotce.

V mechanice hornin je stanovována objemová hmotnost obvykle pro horninový materiál ve **vlhkosti** odpovídající *okamžitému* („*dodanému*“) *stavu* při předání do laboratoře, případně

pro horninu *zcela nasycenou vodou*; poměrně zřídka pak pro horninu *vysušenou*. U běžných skalních hornin se pohybuje přirozená vlhkost v rozsahu několika málo procent (viz dále), takže její zachování není (vzhledem ke značným potížím např. při přípravě pravidelných těles nebo při odběru jádra vrtaného s vodním výplachem) relevantní. Opačný případ však nastává u řady hornin poloskalních (jílovce, slínovce, prachovce apod.), kdy je testování v *přirozené vlhkosti* nutností.

Objemové hmotnost se stanoví z jednoduchého vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kgm}^{-3}, \text{gcm}^{-3}]$$

kde: m hmotnost vzorku
V objem vzorku

Hmotnost vzorku je stanovena vážením a objem vzorku je určován buď *proměřením pravidelného* zkušebního *tělesa* (krychle, válec, hranol) či *dvojím vážením tělesa nepravidelného (na suchu a při ponoření ve vodě)*. Nepravidelné těleso je možné opatřit na ochranu před vodou (při nebezpečí nasáknutí a rozpadnutí u hornin poloskalních či při nebezpečí průniku vody do pórů u hornin silně porézních) obalem - obvykle parafinovým. V literatuře někdy uváděné (např. J. Pauli – T. Holoušová, 1991) *objemoměry* (Segerův, Tetmajerův, rtuťový) pro stanovení objemu zkušebního tělesa se v praxi neuchytily (zřejmě pro určitou komplikovanost; u rtuťového objemoměru patrně i vzhledem k hygienickým rizikům). Velmi měkké poloskalní horniny lze testovat i metodami používanými laboratoří mechaniky zemin (např. odběr vzorku do prstence známých rozměrů).

Výsledek je stanoven jako $\bar{\rho}$ z minimálně pěti souběžných měření.

V celé geomechanice je objemová hmotnost velmi ceněnou **vlastností** používanou pro geotechnické výpočty (napjatost v horninovém masívu, horninové tlaky na konstrukce, stabilitní výpočty apod.). Vedle toho je však objemová hmotnost rovněž i významným **ukazatelem kvality horniny** pro odlišení jejího stavu v rámci jednoho typu (především určení stupně navětrání či zvětrání – viz tab. X.I).

Typické hodnoty objemové hmotnosti činí pro:

- uhlí 1,25 gcm⁻³
- pískovce 1,9 ÷ 2,4 gcm⁻³
- vyvřelé horniny 2,45 ÷ 2,7 gcm⁻³
- čediče 2,9 gcm⁻³.

Hodnoty objemových hmotností a hustot granodioritů východní granitoidové zóny
brněnského masívu

Tab. X.I

	Objemová hmotnost [kgm⁻³]	Hustota [kgm⁻³]
granodiorit zvětralý	2 460 až 2 580	< 2 630
granodiorit značně navětralý	2 580 až 2 620	2 630 až 2 680
granodiorit středně až mírně navětralý	2 620 až 2 660	2 680 až 2 720
granodiorit zdravý	2 660 až 2 690	2 720 až 2 780

PÓROVITOST je podíl objemu dutin a pórů v objemové jednotce horniny.

Nestanovuje se přímou zkouškou - dopočítá se z hustoty a objemové hmotnosti horniny:

$$n = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)100 \quad [\%]$$

U běžných hornin bývá pórovitost obvykle velmi nízká - v rozsahu několika málo %; pouze pro některé sedimenty (extrémně pórovité pískovce a slepence) se udává v hodnotách přes 10 %. Samotná pórovitost nemá v mechanice hornin zvláštní význam, s výjimkou právě výše uvedených extrémně pórovitých sedimentů (pro posouzení možnosti jejich plynodajnosti, příp. průlinové propustnosti pro vodu apod.).

HUTNOST bezprostředně souvisí s pórovitostí (doplňuje ji v objemu horniny); Hutnost = 100 - n [%].

Hydrofyzikální vlastnosti horninové matérie:

NASÁKAVOST je množství vody přijaté horninou za přesně definovaných podmínek; je rovna poměru hmotnosti vody přijaté horninou ku hmotnosti horniny vysušené při 105°C:

$$NV = \frac{m_N - m_d}{m_d} 100 \quad [\%]$$

kde: m_N hmotnost horniny nasáklé za přesně definovaných podmínek

m_d hmotnost horniny vysušené při 105°C

Nasákavost se obvykle stanovuje ***nasycením vzorku horniny ponořeného do vody na 48 hodin***. Další tři možné metody (***nasákání do ustálené hmotnosti***, ***nasákání za varu*** [3 hodiny vařit a 24 hodin při ponoření do vody vychládat] či ***nasákání za sníženého atmosférického tlaku*** [3 hodiny ve vodě pod vývěvou a dále 2 hodiny ve vodě]) jsou využívány podstatně méně (buď z časových důvodů, či s ohledem na nutnost použití komplikovaného zařízení).

Výsledek je stanoven jako \bar{O} z minimálně tří souběžných stanovení.

Výsledná hodnota nasákavosti koresponduje obvykle s hodnotou pórovitosti (viz výše), když u běžných skalních hornin je ověřována nižší o cca 1 až 2 procentní body. Nasákavost sama o sobě je pak velmi významným **ukazatelem stavu horniny** (stupeň navětrání či zvětrání).

Zdravé pevné horniny vykazují nasákavost běžně v mezích 1 až 3 %; vyskytují se však i kvalitní pevné horniny s nasákavostí vyšší.

VLHKOST je poměr hmotnosti vody, kterou lze z horniny odstranit sušením (105°C po dobu 48 hodin) ku hmotnosti vysušené horniny = **vlhkost hmotnostní**:

$$w = \frac{m_w - m_d}{m_d} 100 \quad [\%] \quad \text{kde: } m_w \quad \text{hmotnost vlhkého vzorku}$$

m_d hmotnost vysušeného vzorku

Velmi zřídka se stanovuje i **vlhkost objemová**.

Velkým problémem bývá zachování přirozené vlhkosti horniny při odebrání vzorků. Lze to realizovat prakticky pouze při odběru z kopných či báňských děl. Při jádrovém vrtání (ať již s vodním výplachem nebo nasucho) je vlhkost horniny velmi zkreslena.

Vlhkost bývá u běžných skalních hornin velmi nízká, běžně se ani nezjišťuje. Naopak nabývá na důležitosti u silně navětralých či zvětralých hornin a hornin poloskalních. Zvyšující se vlhkost totiž negativně ovlivňuje jejich mechanické charakteristiky.

Typické hodnoty vlhkosti činí pro:

- uhlí $5 \div 15 \%$
- miocenní jílovce $15 \div 24 \%$
- pískovce $0,5 \div 4 \%$
- vyvřelé horniny $0,1 \div 1 \%$.

PROPUSTNOST je schopnost horniny propouštět vodu.

U běžných hornin (z pohledu laboratoře MH) je vlastností nepříliš významnou, obvykle neověřovanou. Hlavním typem propustnosti horninového prostředí totiž bývá propustnost puklinová (pouze silně pórovité sedimenty disponují i propustností průlinovou). Laboratorně je potom puklinová propustnost krajně obtížně realizovatelná (s nutností modelovat puklinu resp. upínat vzorek s puklinami v propustoměru).

KAPILARITA je schopnost rozvádět a udržovat v pórech horniny vodu.

V mechanice hornin je vlastností zcela okrajovou (s významem pouze pro kámen jako stavební hmotu).

Fyzikálně-chemické vlastnosti horninové hmoty:

BOBTNAVOST a **SMRŠTITELNOST** je zvětšování (resp. zmenšování) objemu horniny přijímáním (ztrátou) vody. Tyto vlastnosti se uplatňují pouze u velmi specifické podskupiny poloskalních sedimentárních hornin – u jílovců, prachovců, jílovitých břidlic – tj.

hornin s vyšším nebo vysokým obsahem jílových minerálů. Tyto minerály poměrně rychle reagují na přijímání (=> bobtnání) nebo ztrátu (=> smršťování) vody ve své krystalické mřížce.

Bobtnavost i smržitelnost se stanovují jako lineární nebo objemové, a to se zatížením nebo bez zatížení (rozuměno v oboru odpovídajícímu zatížení od stavby).

Objemová nestálost hornin spolupůsobících se stavbou (ať již pozemní nebo podzemní) může mít na objekt velmi nepříznivý (až fatální) vliv.

Pro brněnské neogenní jíly je zkouškami ověřeno absolutní nabobtnání (bez zatížení) cca 10 % a naopak poměrné lineární smrštění 16 %.

Mechanické vlastnosti hornin

jsou výrazem chování horniny vůči působení vnějších sil. Vyjadřují schopnost odporovat porušení (= **pevnost**) nebo schopnost měnit pod zatížením tvar a objem (= **přetvárnost**). Hornina bývá testována v různých směrech: **ve směru svislém a směrech vodorovných** odpovídajících přirozenému uložení horniny či **ve směru kolmém či rovnoběžném ku foliaci nebo vrstevnatosti** horniny.

Mechanické vlastnosti se dělí na:

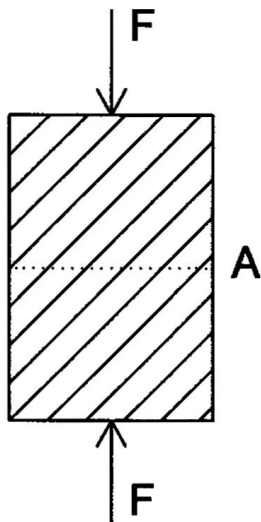
- **pevnostní**
- **indexové**
- **deformační**
- **reologické**

přičemž nejvyššího významu nabývají vlastnosti pevnostní a deformační.

Zkoušky pevnosti charakterizující horninu při porušení. Obsahují značné množství položek. Je třeba velmi zdůraznit, že **vlastní pevnost zásadně ovlivňuje způsob zatížení (namáhání) vzorku, stejně jako orientace zatížení vůči plochám oslabení (vrstevnatosti, foliace).**

PEVNOST V JEDNOOSÉM TLAKU (též „*prostá tlaková pevnost*“) je největší síla, kterou zkušební těleso snese při namáhání jednoosým tlakem, vztažená na počáteční průřez tohoto tělesa (obr. 10.6).

Jednoosá tlaková pevnost je stanovována na pravidelných tělesech (hranoly a válce, méně často krychle); značný význam zde má poměr výšky zkušebního tělesa k jeho příčnému rozměru (poměr výšky a šířky vzorku [štíhlostní poměr] by měl činit $2 \div 3$, výjimečně $1 \div 2$). Velmi důležité je zabroušení zatěžovaných ploch zkušebního tělíska, dostředné zatížení vzorku a (stejně jako u ostatních mechanických testů) pomalé nanášení zatěžující síly. Poměrně často bývá porovnávána pevnost v jednoosém tlaku stanovená po nasáknutí těles vodou či těles podrobených zmrazovacím cyklům (dvacet pět nebo padesát) s jednoosou pevností stanovenou na tělesech v tzv. „dodaném stavu“. Obdržíme tak **koeficient změknutí** (po nasáknutí horniny vodou), resp. **koeficient mrazuvzdornosti** (po výše uvedených 25 nebo 50 vykonaných zmrazovacích cyklech).



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

Obr. 10.6
Schéma zkoušky pro
stanovení pevnosti
v jednoosém tlaku

kde: F maximální dosažená síla při porušení jednoosým tlakem
A počáteční průřezová plocha vzorku

Výsledná pevnost je Ø výsledků alespoň z pěti tělísek, pokud možno připravených z jednoho balvanu či příbuzné metráže vrtného jádra. Velmi často bývá na těliscích testovaných na tlak souběžně stanovována i objemová hmotnost.

Pevnost v jednoosém tlaku má mezi ostatními pevnostmi stanovovanými na horninovém materiálu jisté výjimečné postavení. Je totiž součástí řady účelových (především tunelářských) klasifikací a sama o sobě je základní klasifikací horninového materiálu:

Klasifikace hornin podle pevnosti horninové matérie (ČSN 72 1002/1990,
ČSN 73 1001/1988)

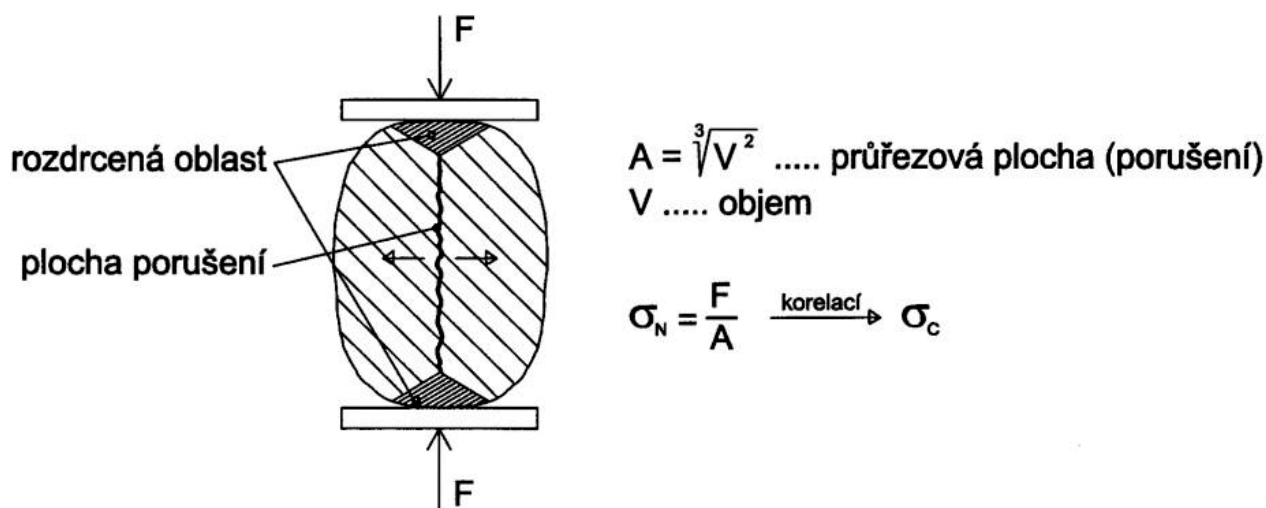
Tab. X.II

Třída pevnosti	Pevnost v jednoosém tlaku stanovená na horninovém tělisku σ_c [MPa]	
(R0)	(> 250)	skalní horniny
R1	> 150	
R2	50 ÷ 150	(nepříliš šťastně zvolená formální hranice) ↓
R3	15 ÷ 50	poloskalní horniny
R4	5 ÷ 15	
R5	1,5 ÷ 5	
R6	0,5 ÷ 5	(formální hranice) ↓ zeminy

Termín	Polní identifikace	Jednoosá tlaková pevnost MPa
Extrémně slabá	Lze vtlačit nehet	< 1
Velmi slabá	Rozpadá se pod údery špice geologického kladiva, lze škrábat nožem.	1 až 5
Slabá	Lze obtížně škrabat kapesním nožem, povrchový (mělký) vrub rázným úderem špice geologického kladiva.	5 až 25
Středně pevná	Nelze škrabat kapesním nožem, vzorek může být rozbit jedním rázným úderem geologického kladiva.	25 až 50
Pevná	Vzorek je nutno rozbít více než jedním úderem geologického kladiva.	50 až 100
Velmi pevná	Vzorek je nutno rozbít mnoha údery geologického kladiva.	100 až 250
Extrémně pevná	Vzorek může být geologickým kladivem pouze vyštípnut (oštípnut).	> 250

PEVNOST V DRCENÍ NEPRAVIDELNÝCH HORNINOVÝCH TĚLES

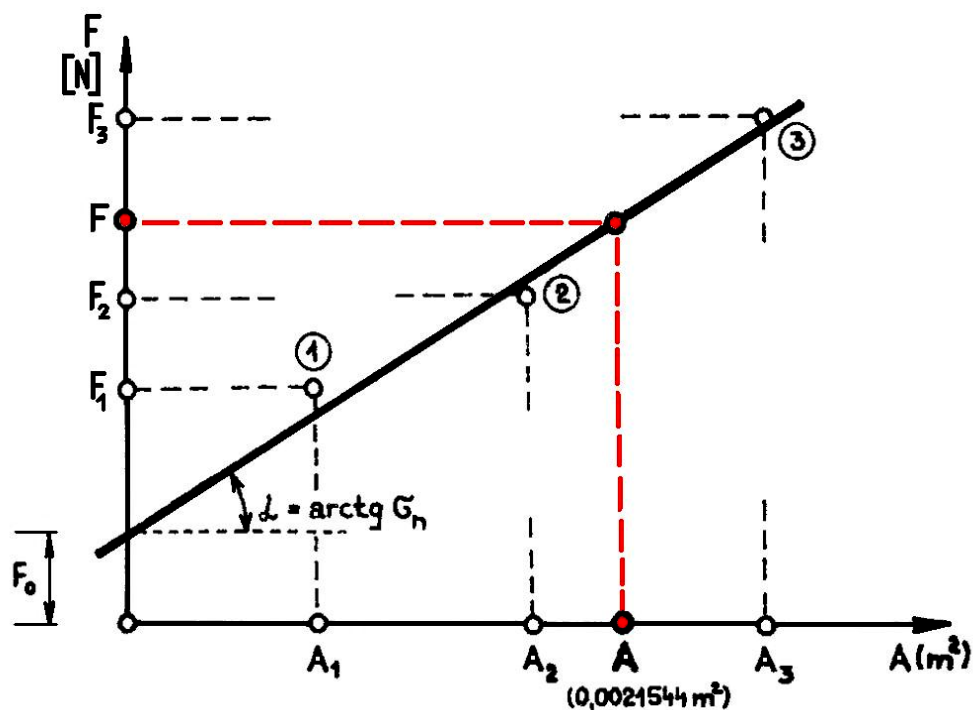
(někdy též „oříšková zkouška“) patří mezi testy prováděné poměrně zřídka, obvykle v jisté nouzi. Tato zkouška je vhodná pro poloskalní horniny v případech kdy není (z technických či časových důvodů) možné připravit pravidelná zkušební tělesa. Jedná se v zásadě o smluvní hodnotu vztaženou na pevnost zkušební tělesa tvaru rotačního elipsoidu **objemu 100 cm³** (cca velký ořech, menší vejce) a poměru výšky ku šířce 1,5 ÷ 2 : 1 – viz obr. 10.7. Zkušební těleso je ve skutečnosti porušováno příčným tahem. Významné je, že výsledky tohoto v zásadě náhradního stanovení lze přibližně korelovat s pevností horniny v jednoosém tlaku – tj. s **korelačním koeficientem 1,00** (J. Straka, 1967, J. Pauli – T. Holoušová, 1991).



Obr. 10.7 Schéma zkoušky pro stanovení pevnosti v drcení nepravidelných těles

kde: A plocha porušení (průřezová plocha)
 V objem zkušební tělíska
 F maximální dosažená síla při porušení tělesa příčným tahem

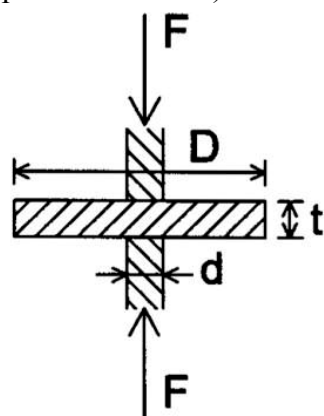
Jsou testovány soubory o četnosti min. 15 až 25 tělísek. Jedná se o zkoušku vztaženou k objemu tělesa 100 cm^3 . Ne vždy se podaří zhotovit zkušební tělesa právě takového objemu; bývá proto běžně zkoušeno více skupin tělísek (menšího a většího objemu) a výsledná hodnota je získána jednoduchou interpolací právě pro 100 cm^3 (obr. 10.8).



Obr. 10.8 Převedení výsledků tří souborů stanovení pevnosti v drcení nepravidelných horninových těles na hodnotu odpovídající \emptyset objemu 100 cm^3 ($A = 0,0021544 \text{ m}^2$). 1, 2, 3 – soubory stanovení (J. Pauli – T. Holoušová, 1991)

PEVNOST V TLAKU STANOVENÁ POMOCÍ SOUSÝCH ROUBÍKŮ

je stanovována na destičkách upnutých v axiátoru mezi dvěma roubíky o profilu který odpovídá tloušťce zkušební destičky (obr. 10.9). Zkouška je určena především pro křehké horniny; zkušební těleso se obvykle poruší systémem radiálních trhlin. Jedná se o zkoušku prováděnou řídkce, bez většího významu. Důvodem je náročnost přípravy zkušebních těles, potřeba axiátoru a zřejmá neexistence obecnějších korelací (vztažených např. k jednoosé pevnosti tlakové).



$$A' = f(D, d) \dots \text{ideální plocha porušení}$$

$$d = t$$

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

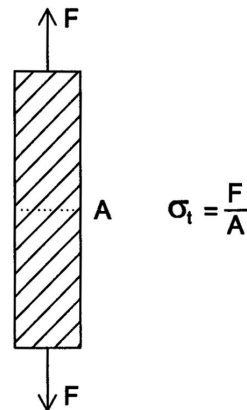
Obr. 10.9 Schéma zkoušky pro stanovení pevnosti v tlaku pomocí sousých razníků

- kde: F maximální síla dosažená při porušení tělesa
d = t Ø roubíků = tloušťka zkoušené destičky
D Ø horninového kotouče
A' redukovaná plocha porušení, závislá na Ø horninového kotouče a d razníku
(obvykle se odečítá z pomocného diagramu)

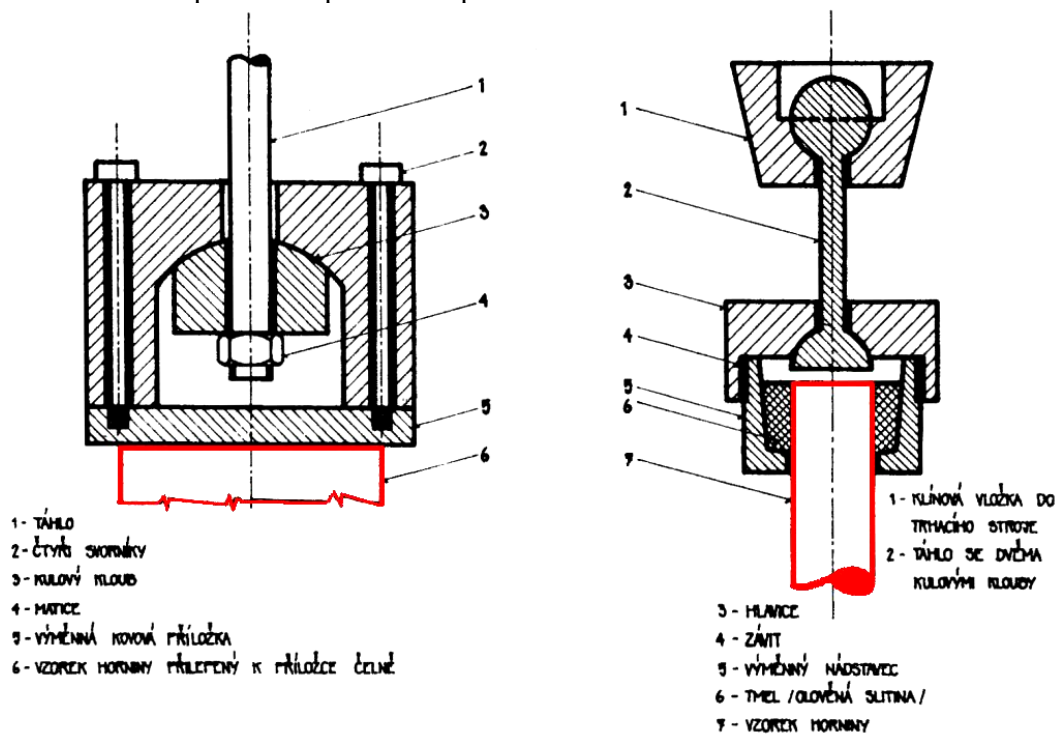
PEVNOST HORNINY V JEDNOOSÉM TAHU (též „prostá tahová pevnost“) je největší síla, kterou zkušební těleso snese při namáhání jednoosým tahem, vztažená na počáteční průřez tohoto tělesa (obr. 10.10).

Testovány jsou válečky či hranolky dostatečné délky (minimálně 5ti násobek příčného profilu!). Jistým problémem je přenos tahové síly z trhačky na zkoušený vzorek. Temování či zalévání čel vzorků olovem či kamencem (Straka, 1967) je v současnosti nahrazeno lepením. Velmi přísně musí být dodržen způsob namáhání vzorku. Jakákoliv mimostřednost velmi negativně ovlivní výsledek tohoto stanovení; vzorky jsou proto uchyceny do kloubových hlavice (obr. 10.11).

Obr. 10.10
Schéma zkoušky pro stanovení pevnosti v jednoosém tahu



- kde: F maximální síla dosažená při porušení tělesa jednoosým tahem
A počáteční průřezová plocha vzorku



Obr. 10.11 Hlavice s kulovými klouby pro zkoušení hornin v jednoosém tahu

Výsledná pevnost je $\bar{\sigma}$ výsledků alespoň z pěti tělísek, pokud možno připravených z jednoho balvanu či příbuzné metráže vrtného jádra.

PEVNOST HORNINY V PŘÍČNÉM TAHU (Brazilská zkouška) spočívá v zatěžování pravidelného tělíska (obvykle krychle, hranol, válec, ale i planparalelní deska) na dvou protilehlých rovnoběžných přímkách. Porušení pak nastane rozštěpením tělesa tahovým napětím v rovině spojující protilehlé přímky zatížení (obr. 10.12).

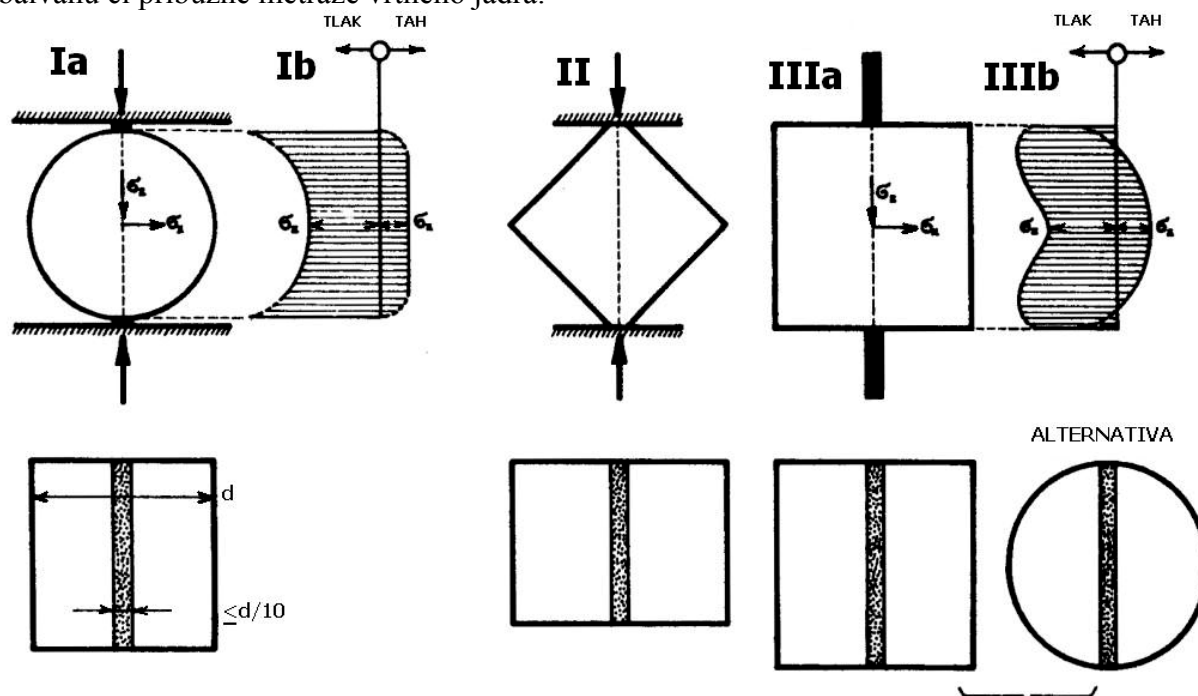
Pevnost v příčném tahu se stanoví z výrazů:

$$\sigma_t = 0,637 \frac{F}{dl} \quad \text{pro válec}$$

$$\sigma_t = 0,734 \frac{F}{hl} \quad \text{pro hranol, krychli}$$

kde: F maximální síla dosažená při porušení tělesa příčným tahem
d $\bar{\sigma}$ zkušebního válce
h vzdálenost čelistí lisu při počátku zkoušky (= diagonála hranolu, krychle)
l délka zkušebního tělíska

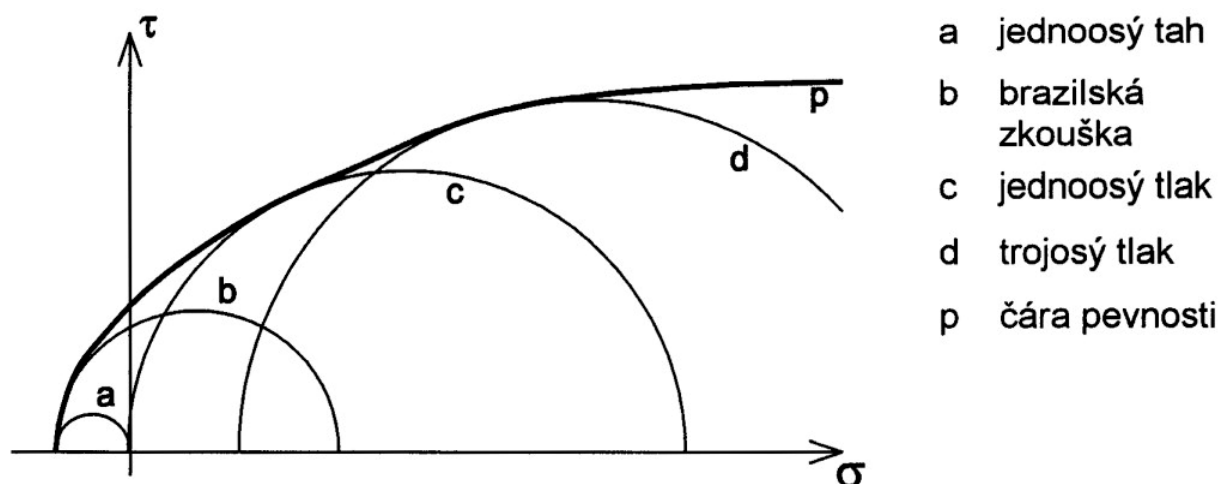
Výsledná pevnost je $\bar{\sigma}$ výsledků alespoň z pěti tělísek, pokud možno připravených z jednoho balvanu či příbuzné metráže vrtného jádra.



Obr. 10.12 Schéma zkoušky horniny v příčném tahu („Brazilská zkouška“)

Toto stanovení je velmi jednoduché, v komplexu laboratorních testů bývá realizováno velmi často. V literatuře (R. E. Goodman, 1980, J. Pauli – T. Holoušová, 1991) se uvádí, že takto ověřená tahová pevnost je poněkud vyšší než pevnost horniny v jednoosém tahu (viz výše).

Kim a Lade (1984) uvádějí, že Brazilská zkouška se stanovení jednoosé tahové pevnosti velmi blíží (obr. 10.13).

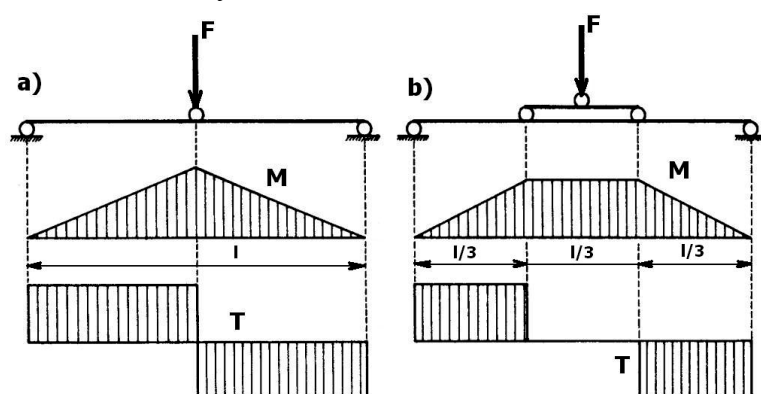


Obr. 10.13 Empirické kritérium porušení vyjádřené Mohrovými kružnicemi pro různé typy namáhání horniny (R. E. Goodman, 1980)

Pozn.: V této souvislosti stojí za připomenutí, že na rozdíl od soudržných a nesoudržných zemin u kterých se udává (v souladu s Coulombovou teorií porušení) hodnota úhlu vnitřního tření φ jako nezávislá na napětí (konstantní), je u hornin velikost úhlu vnitřního tření φ (= úhlu smykové pevnosti) hodnotou proměnnou, závislou na napjatosti horniny. Rovná se úhlu tečny k Mohrově obálce pevnosti. Jeho hodnota se postupně snižuje s rostoucí hodnotou osového (normálního) napětí σ . Je-li dosaženo v hornině plastického stavu, je úhel $\varphi = 0$ (obr. 10.13).

PEVNOST HORNINY V TAHU ZA OHYBU (někdy též za „rovinného ohybu“) je rovna nejvyššímu dosaženému napětí v dolních tažených vláknech ohýbaného zkušebního tělesa.

Pevnost v tahu za ohybu je realizována namáháním zkušebního trámku (čtvercového, obdélníkového či kruhového profilu) ohybem - tzn. tlakem i tahem. Pro zajištění konstantního průběhu ohybového momentu ve střední části trámku (tzn. eliminaci posouvající síly) bývá vzorek zatěžován přes vahadlo (obr. 10.14). Vzhledem ke značným rozdílům tlakové a tahové pevnosti a obdobně i modulů pružnosti horniny v tlaku a v tahu je tato pevnost horniny o 60 až 70 % vyšší než pevnost v tahu jednoosém (Pauli - Holoušová, 1991). Ve vlastní mechanice hornin není tato zkouška příliš frekventována; větší význam má při testování kamene jako stavební suroviny.



Obr. 10.14 Průběh ohybových momentů a posouvajících sil v trámečcích testovaných v tahu za ohybu. a) bez vahadla, b) zatížení přes vahadlo

Pevnost v tahu za ohybu se stanoví z výrazů:

Při porušení vzorku ve vnitřní třetině:
$$\sigma_{to} = \frac{Fl}{bh^2}$$

Při porušení mimo střední část vzorku:
$$\sigma_{to} = \frac{3Fe}{bh^2}$$

kde: F maximální síla dosažená při porušení tělesa tahem za ohybu
l vzdálenost podpor při zatěžování vzorku
b šířka zkušebního tělíska
h výška zkušebního tělíska
e vzdálenost místa porušení od bližší podpory

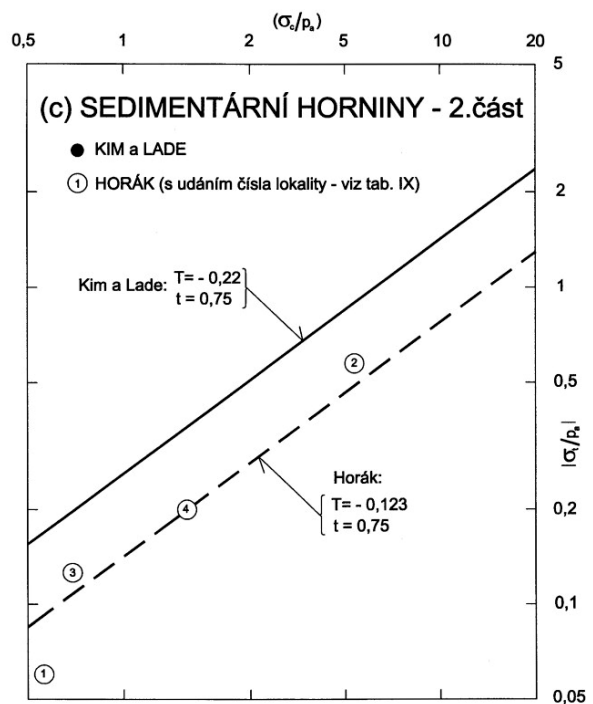
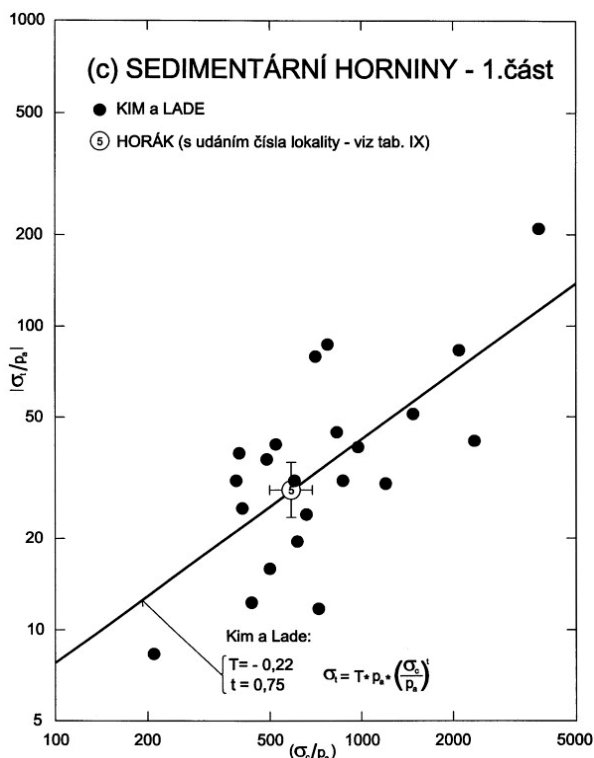
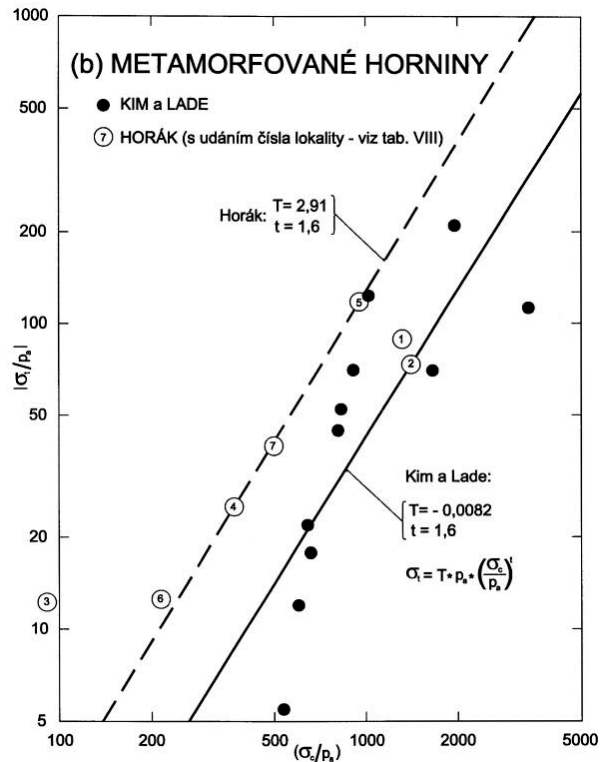
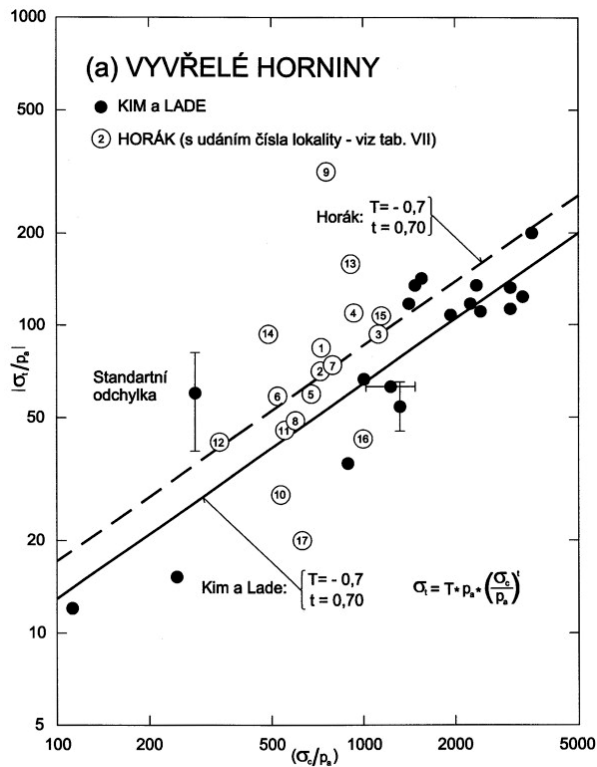
Tahové zkoušky horninové matérie či horninového prostředí (viz zkoušky in situ) nejsou v geomechanice zdaleka běžné. Tahová pevnost horniny je značně nižší než pevnost tlaková (podle různých autorů cca 20 až 50krát). Horniny s vysokou pevností v tahu se vyznačují i jinými vysokými pevnostmi (resp. i přetvárnými charakteristikami), naproti tomu však vysoké pevnosti v tlaku nemusí zaručit totéž u pevnosti tahové. Původním znakem zkoušek je vysoká variabilita výsledků. Hornina namáhaná tahem je velmi citlivá na sebemenší lokální oslabení či strukturně - texturní anomálie ve skladbě horniny. Stejně tak je hornina mimořádně citlivá i jen na minimální mimostřednost. Obtíže způsobuje proto i nutnost používat speciální (jednoúčelové) přípravky či zařízení.

Tahová pevnost je hodnotou nezbytně nutnou (mimo jiné) i pro určení materiálových parametrů potřebných pro stanovení kritéria porušení či pro výpočty MKP. Tahové zkoušky však (s výjimkou zkoušky brazilské) nebývají obvykle součástí standardního zkušebního programu. Jedinou možností zjistit pevnost horniny v tahu potom zůstává ověření nepřímé - na základě prokázaných korelačních vztahů. Je známo (a řada zkoušek především betonu, ale i zemin to potvrzuje), že pevnost v jednoosém tahu souvisí s pevností v jednoosém tlaku a je značně nižší (viz výše). Z širokého rozptylu experimentálně ověřených korelačních závislostí obou těchto pevností vyplývá, že případný univerzální korelační vztah by byl příliš hrubý (výše uvedená 1/20 až 1/50) než aby mohl být použitelný. Kim a Lade (1984) navrhli pro tři skupiny hornin (podle původu: vyvřelé, metamorfované a sedimentární) jednoduché dvouparametrické kritérium závislosti s použitím exponenciální funkce:

$$\sigma_t = T \cdot p_a \left(\frac{\sigma_c}{p_a} \right)^t$$

kde: σ_t pevnost horniny v jednoosém tahu
 σ_c pevnost horniny v jednoosém tlaku.
T bezrozměrová konstanta (parametr)
t dtto
 p_a atmosférický tlak ve stejných jednotkách jako σ_t a σ_c .

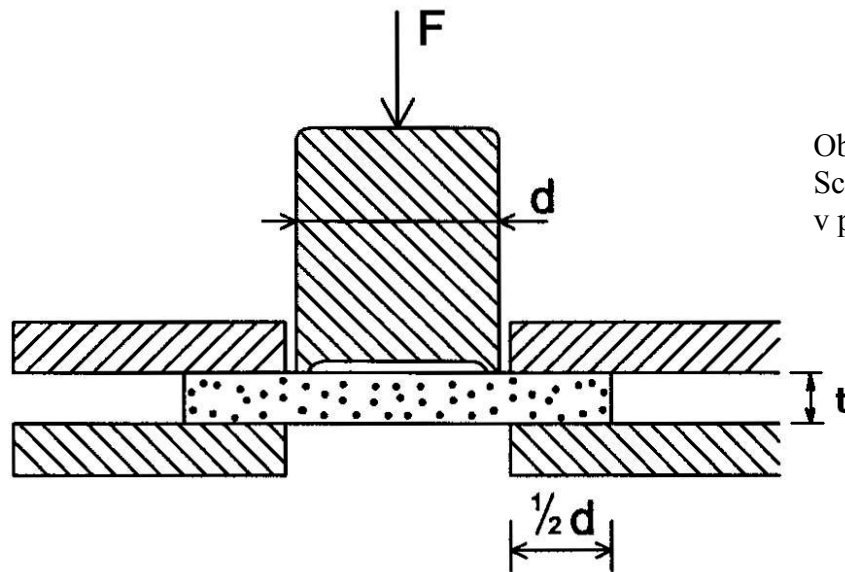
V. Horák (1992) doplnil a v zásadě potvrdil na základě výsledků zkoušek z lokalit bývalého Československa závěry Kima a Ladeho (obr. 10.15 až 10.18).



Obr. 10.15 až 10.18 Vzájemný vztah jednoosé pevnosti v tahu a v tlaku pro vyvřelé, metamorfované a sedimentární horniny (Kim a Lade, 1984. V. Horák, 1992)

PEVNOST HORNINY V PROSTÉM STŘIHU je nejvyšší síla potřebná k prostřížení horninové destičky vztažená na počáteční plochu namáhaného průřezu. Zkouška se realizuje na destičkách tloušťky 5 až 10 mm upnutých ve speciálním přípravku a prostřihovaných kruhovým razníkem (obr. 10.19).

Jedná se o zkoušku prováděnou v praxi poměrně často; praktická aplikace slouží obvykle pro odvození průběhu Mohrovy obálky pro horninový materiál v počátečních oborech napětí.



Obr. 10.19
Schéma zkoušky horniny
v prostém stříhu

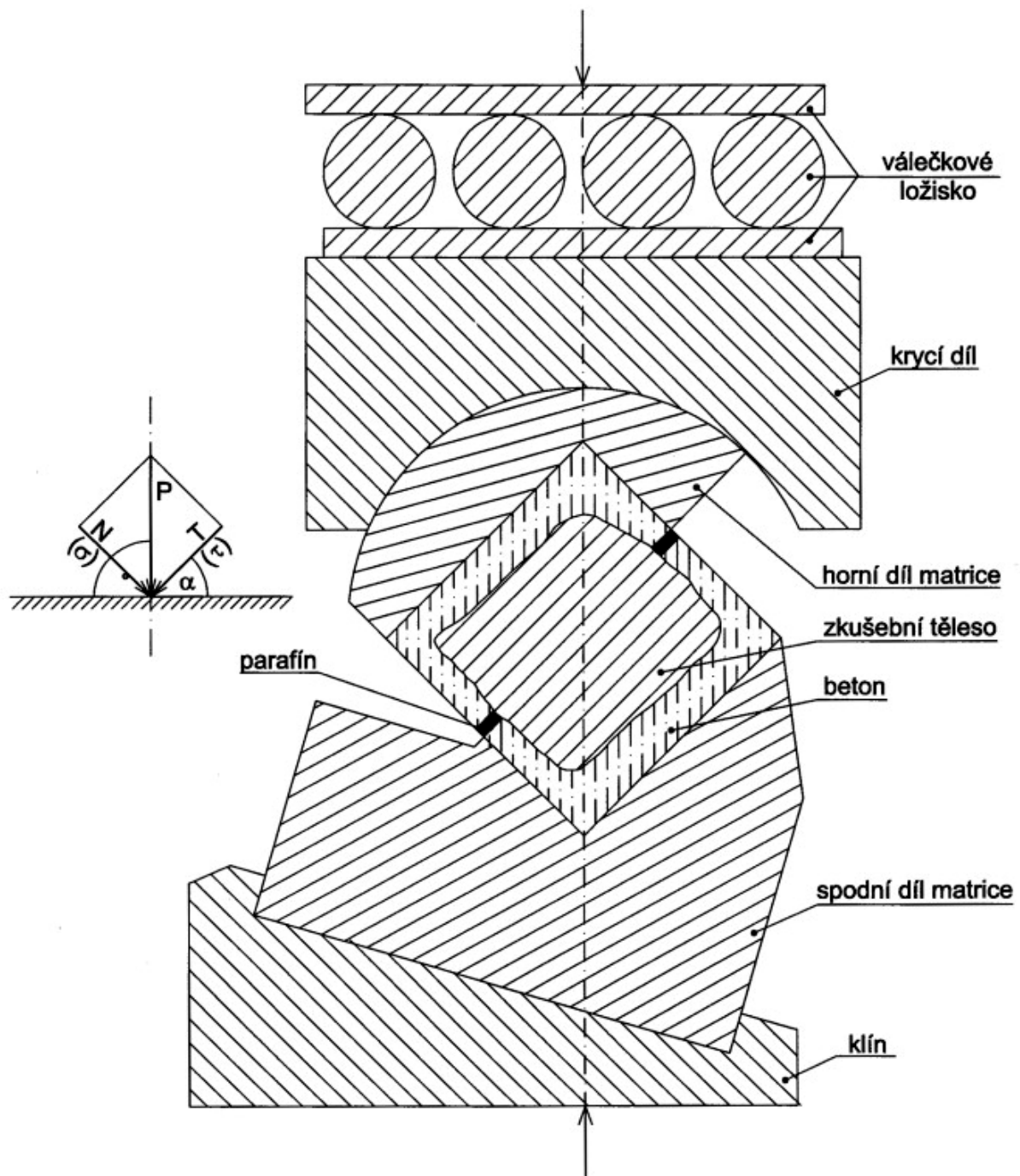
$$\tau_{\text{pst}} = \frac{F}{\pi d t}$$

kde: F maximální síla dosažená při porušení zkušební destičky stříhem
 $A = \pi d t$ počáteční plocha průřezu
d Ø kruhového razníku
t tloušťka zkušební destičky

Výsledná pevnost je Ø výsledků z pěti až sedmi zkušebních tělísek, pokud možno připravených z jednoho balvanu či příbuzné metráže vrtného jádra.

PEVNOST HORNINY V KOMBINOVANÉM STŘIHU A TLAKU (též „ukloněné matrice“). Tento test vznikl do jisté míry jako méně hodnotná náhrada zkoušky triaxiální (viz dále). Poněvadž jsou však plocha i směr porušení tvrdě předurčeny, jedná se spíše o zkoušku stříhovou. Na vymezené ploše porušení pak působí tangenciální stříhové napětí a napětí normálové (obr. 10.20); při různých úhlech předurčené plochy porušení lze sestrojít *mezni křivku stříhové pevnosti horniny*. Testovány jsou krychle, velmi často bývá tato zkouška realizována i na nepravidelných těliscích poloskalních hornin zalitých do cementové matrice (obr. 10.20), když na takovýchto těliscích lze jen obtížně provádět stanovení jiných typů pevností. Úhel odklonu stříhového namáhání $\alpha = 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$. Při nižším resp. vyšším úhlu není zkouška relevantní.

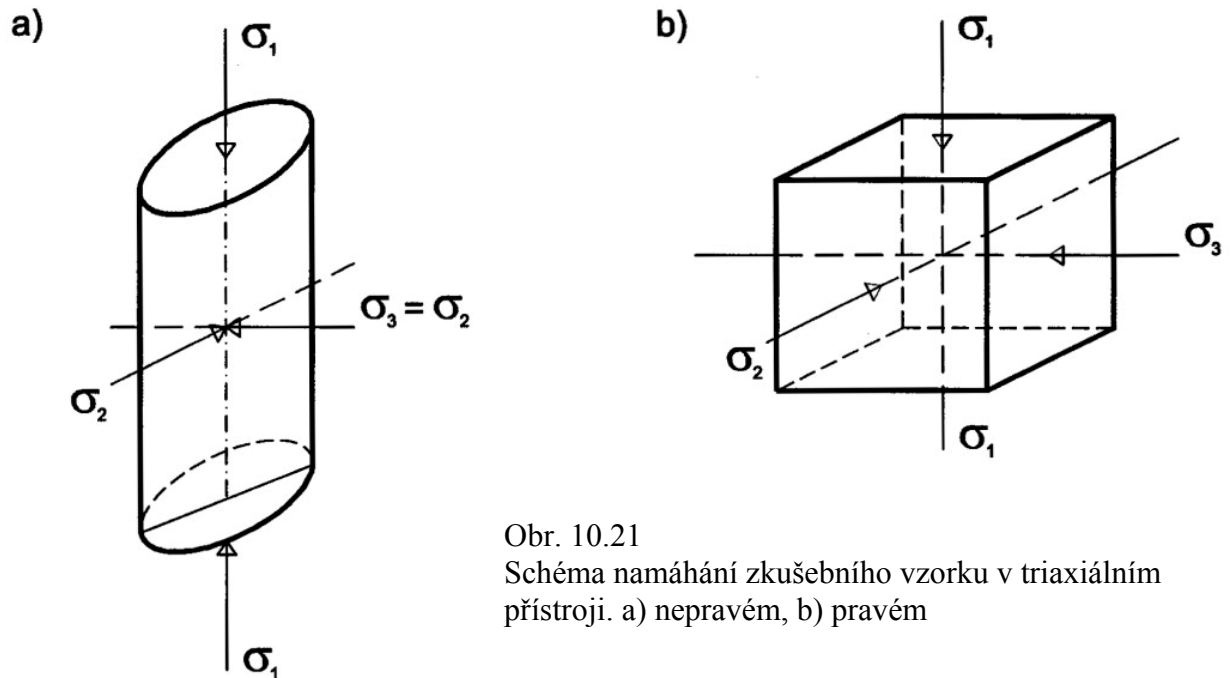
Jisté nebezpečí tohoto stanovení spočívá v tom, že výše uvedená *mezni křivka stříhové pevnosti* bývá nesprávně zaměňována s *obálkou Mohrových kružnic* vymežujících *triaxiální pevnost* horniny (obr. 10.12). Naopak někteří autoři (V. Mencl, V. Polák, J. Pachta) využívají jisté podobnosti obou křivek ke konstrukci obálky triaxiální pevnosti.



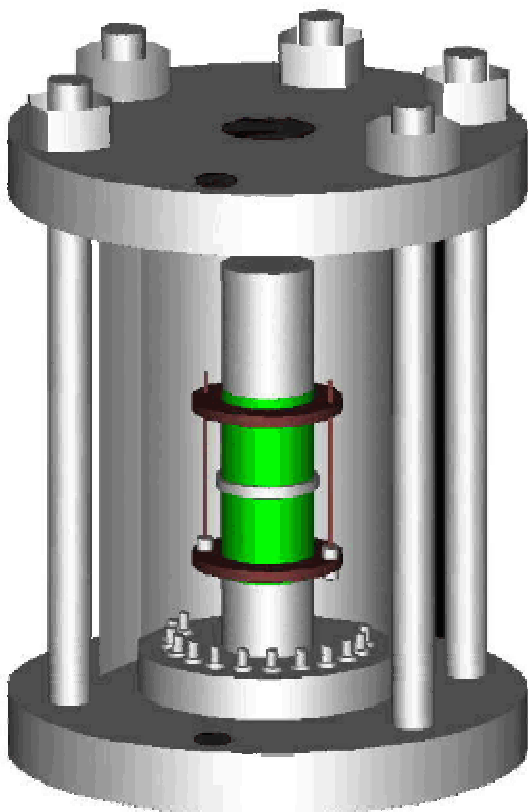
Obr. 10.20 Sestava (ukloněných) matic a silové působení při zkoušce pevnosti horniny v kombinovaném střihu a tlaku – zde na nepravidelném tělisku zalitém do betonové matrice

TRIAXIÁLNÍ PEVNOST modeluje pevnost horniny v tříosé napjatosti. Ta by měla odpovídat původnímu (přírodnímu) stavu nacházejícímu se uvnitř masívu. Stanovení triaxiální pevnosti je problém značné důležitosti, poněvadž se při triaxiálním namáhání vyvíjejí výraznější plastické deformace, při porušení zřetelné - je tedy využito zpevnění materiálu. Oproti tomu se většina skalních hornin při jednoosém namáhání porušuje křehce. Úhelným problémem laboratorního stanovení triaxiální pevnosti horniny je mimořádně složité a náročné (konstrukčně a tím i finančně) testovací zařízení. Zásadní princip spočívá v nutnosti realizovat zkoušku (resp. sérii zkoušek) v systému tzv. „řízené deformace“. Horninové

triaxiální přístroje obvykle nasazované testují horninové válce ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) – jedná se tedy o tzv. přístroje „nepravé“. V literatuře je popsáno i testování krychlí (obr. 10.21) v tzv. „pravém triaxiálu“.



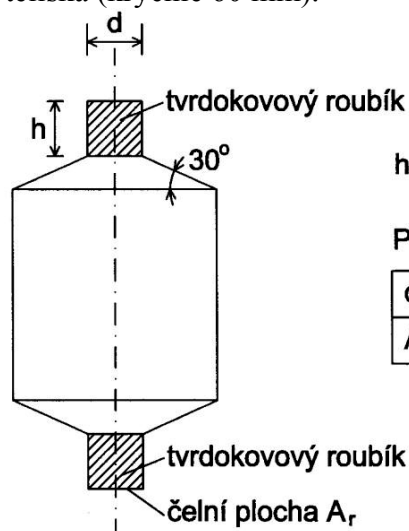
Obr. 10.21
Schéma namáhání zkušební vzorku v triaxiálním přístroji. a) nepravém, b) pravém



Obr. 10.22 Vysokotlaká triaxiální komora [až 70 MPa plášťového tlaku a 1 000 kN axiálního zatížení] (GCTS, Canada)

Indexové vlastnosti charakterizují horninu obvykle při porušení. Pro stanovení (výše uvedených) pevnostních (i deformačních) charakteristik je (až na výjimky) obvykle potřebné náročné (a drahé) testovací zařízení. Rovněž příprava zkušebních těles je běžně pracná a zdoluhavá (a tedy i drahá; někdy nákladnější než zkouška sama). V praktické mechanice hornin je pak často požadováno, resp. postačuje, rychlé, orientační posouzení charakteru horniny, při použití co možná jednoduchých zařízení (s operativním nasazením v laboratoři i v poli). Větší rozptyl výsledků takových zkoušek lze částečně eliminovat jejich vyšší četností. Mezi výsledky těchto **indexových zkoušek** a výsledky **zkoušek realizovaných na pravidelných těliscích** je obvykle možné stanovit relativně jednoduché korelační závislosti. Indexové zkoušky jsou ideální pro stanovení anizotropie pevnosti při různé orientaci zatížení (např. souběžně s osou vrtného jádra a kolmo na ni; kolmo a rovnoběžně s vrstevnatostí či foliací horniny).

VTLÁČNÁ PEVNOST (známá též co **Šrejnerova zkouška**) je odporem horniny proti vnikání vtlačovaného smluvního kaleného ocelového (tvrdokovového) roubíku. Základní zkušební roubík má kruhovou čelní plochu 3 mm^2 , další plochy jsou $5, 7, 8, 10 \text{ mm}^2$ (obr. 10.23). S velikostí zkušebního roubíku vtláčná pevnost klesá. Na jednom horninovém tělese se provede minimálně 7 měření, testována jsou zpravidla 1 až 2 tělíska (krychle 60 mm).



Obr. 10.23
Schéma roubíku pro vtláčnou zkoušku

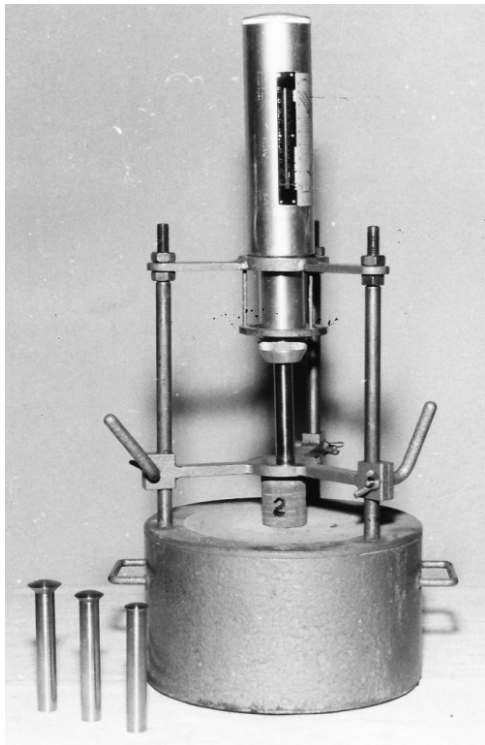
$$h : d = 1$$

Profilová řada tvrdokovových roubíků

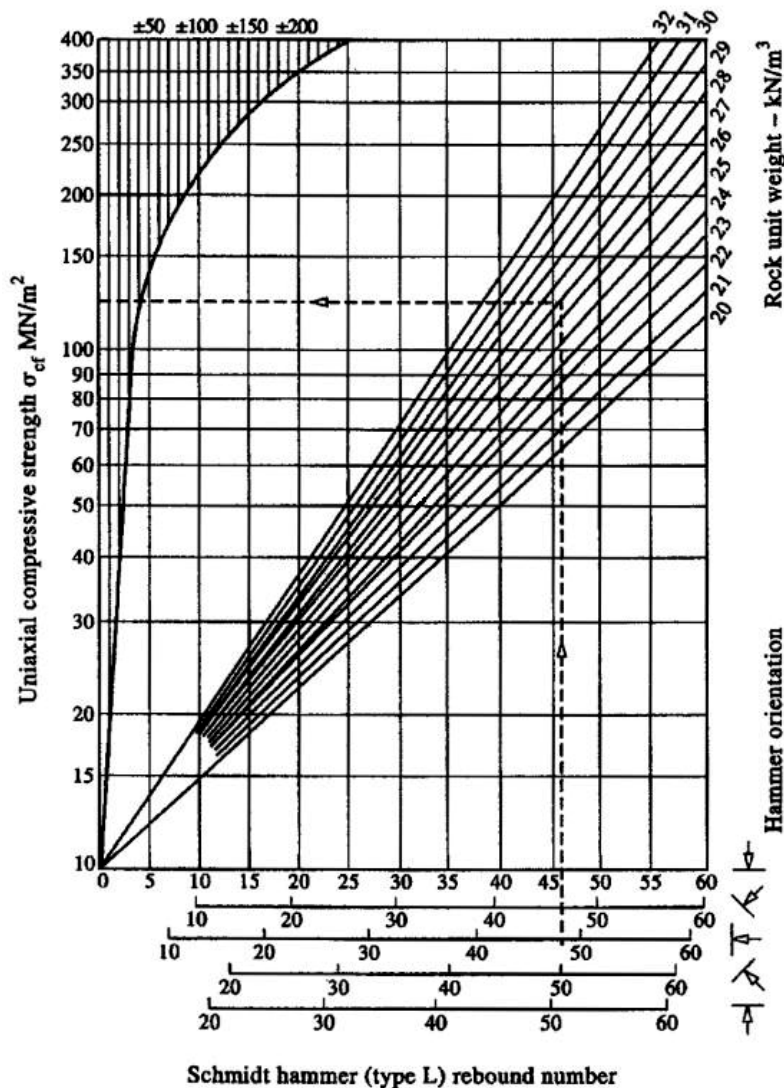
d [mm]	1,95	2,52	2,99	3,19	3,57
A_r [mm ²]	3	5	7	8	10

Zkouška vtláčné pevnosti je dobře porovnatelná s výsledky jednoosé tlakové zkoušky, orientačně lze stanovit i modul pružnosti. Tento test však postrádá největší klad indexových zkoušek: tzn. jednoduchost s možností nasazení in situ. K jeho realizaci je nutný hydraulický lis s komplikovanou regulací a sadou roubíků.

SKLEROSKOPICKÁ TVRDOST HORNINY je v současnosti nejpropracovanější zkouškou indexovou s možností nasazení jak v laboratoři, tak především v poli (viz dále). Používáno je jednoduché, jasně definované zařízení, zkouška je velmi rychlá, korelace na jednoosou tlakovou pevnost je prokázána (obr. 10.26). V laboratoři dříve používaný Shoreho, případně Nieberdingův skleroskop byl zcela vytlačen Schmidovým kladívkem (původně určeným pro zkoušení umělých stavebních hmot - betonů, cihel apod.). Horninové vzorky (krychle, hranoly, válce, desky) jsou v laboratoři, případně i v poli, testovány obvykle kladívkem typu L (o nárazové energii $0,75 \text{ J}$). Nutností je pevné upnutí testovaného vzorku horniny na masivní podložku (obr. 10.24 a 10.25).



Obr. Obr. 10.24
a 10.25
Měření
skleroskopické
tvrdosti horniny
Schmidtovým
kladívkem typu
L. Vzorek je
pevně upnutý na
masivní podložce
a kladívko je
vedené
přípravkem
(Hučka, 1964, fy
MATEST s.r.l.,
Bergamo, Italy)



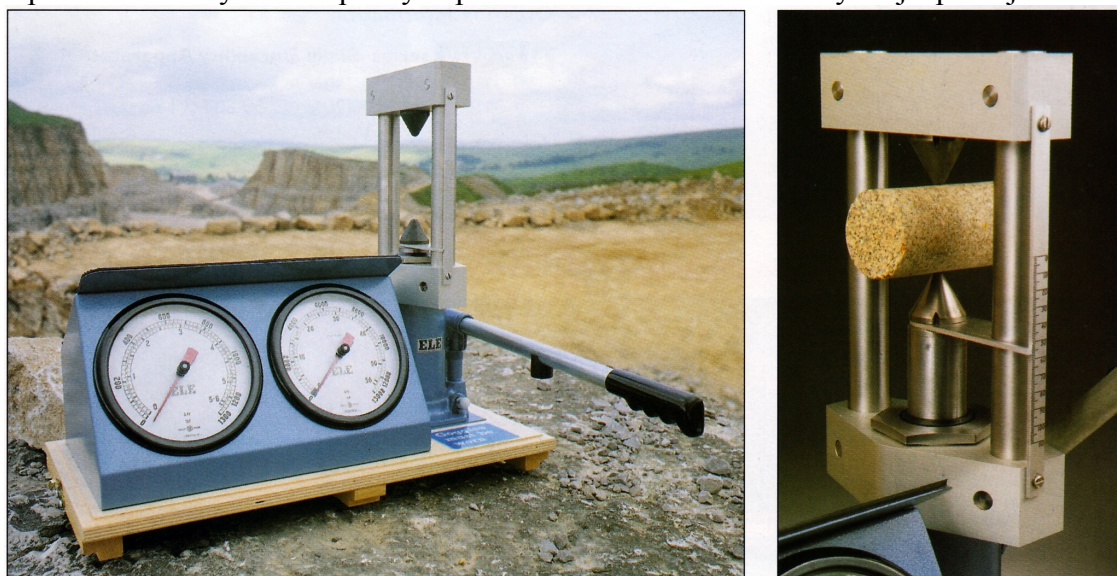
Obr. 10.26
Korelační závislost mezi
odskokem Schmidta
kladívka typu L a jednoosou
tlakovou pevností horniny.
Zohledněna je orientace
Schmidta kladívka při
zkoušce a objemová tíha
horniny (Z. T. Bieniawski)

INDEX PEVNOSTI V BODOVÉM ZATÍŽENÍ (point load test - též tlaková zkouška podle Bieniawského a Franklina) je v zásadě smluvní zkouškou, kdy tělesa (obvykle úlomky vrtného jádra, ale i nepravidelná tělíska) jsou namáhána dvojicí koaxiálních ocelových kuželových hrotů do porušení (obr. 10.27).

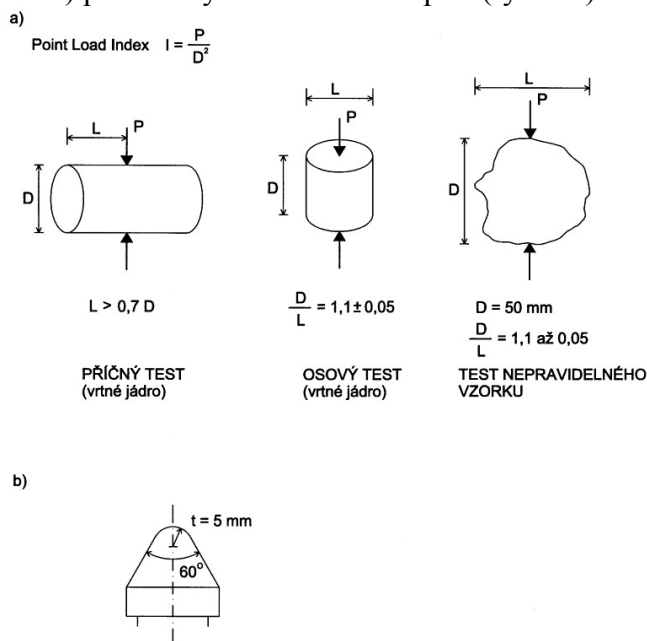
Výsledek je upraven na smluvní počáteční vzdálenost hrotů 50 mm a dále na tzv. tvar plochy porušení (základní tvar plochy porušení je čtverec o straně 50 mm).

Zkouška je velmi rychlá a její výsledek je jednoduše převoditelný na jednoosou tlakovou pevnost. Velmi dobře je použitelná pro posouzení pevnostní anizotropie horniny. Standardně se používá pro testování úlomků jádra kolmo k ose a rovnoběžně s osou. Zkouší se i vzorky nepravidelné (kolmo i rovnoběžně k vrstevnatosti či foliaci). Orientace zatížení i nutné minimální rozměry vzorků jsou patrné z obr. 10.28. Praktický význam tohoto stanovení i vzhledem k možnosti použití zkušebního přístroje v laboratoři i v poli (během všech etap průzkumu i stavby) stoupá.

Aplikace zkoušky u málo pevných poloskalních hornin nemusí být nejmúspěšnější.



Obr. 10.27 Přístroj pro stanovení indexu pevnosti horniny v bodovém zatížení („Point load test“) použitelný v laboratoři i v poli (fy ELE)



Obr. 10.28
a) Index pevnosti v bodovém zatížení při různé orientaci zkoušky a nutné rozměry vzorků, b) Normalizovaný kuželový hrot

Index pevnosti v bodovém zatížení se stanoví ze vztahu:

$$I_{(k,r,n)} = \frac{F}{h^2}$$

kde: F maximální dosažená síla při porušení tělesa bodovým zatížením
h vzdálenost hrotů v okamžiku zahájení zkoušky (= výška vzorku)
k test kolmo k ose vrtného jádra
r test rovnoběžně s osou vrtného jádra
n test nepravidelného vzorku

Je-li vzdálenost hrotů na počátku zkoušky jiná než 50 mm, je nutné vypočítaný I upravit podle grafického digramu právě na tuto vzdálenost => I_{50} .

Dále je nutné upravit I_{50} na základní plochu porušení (za kterou se považuje čtverec o straně $h = 50$ mm), tj na hodnotu I_{50}^s : - pro zkoušku kolmo k ose jádra $I_{50}^s = 1,27 I_{50(k)}$

- pro zkoušku rovnoběžně s osou jádra $I_{50}^s = I_{50(r)}$

- pro zkoušku nepravidelných těles $I_{50}^s = I_{50(n)} \frac{h^2}{A_p}$

kde: h vzdálenost hrotů v okamžiku zahájení zkoušky (= výška vzorku)
 A_p skutečná plocha porušení (přibližně čtvercová).

Pevnost horniny v jednoosém tahu odvozená z indexu pevnosti v bodovém zatížení (podle doporučení návrhu EN ISO 14689-1) se vypočítá ze vztahu:

$\sigma_c = (20 \text{ až } 25) I_{50}^s$ (nejčastěji doporučovaný je korelační koeficient 24, v ČR 20).

Jednotlivé soubory by měly čítat 7 až 10 ks vzorků.

Přetvárné vlastnosti charakterizují vztah mezi zatížením (napětím) a deformací u horninového zkušebního tělesa, bez zahrnutí reologických vlivů.

Při zatížení se každá hmota určitým způsobem deformuje. Pružná hmota má vztah mezi napětím a deformací definován Hookovým zákonem:

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

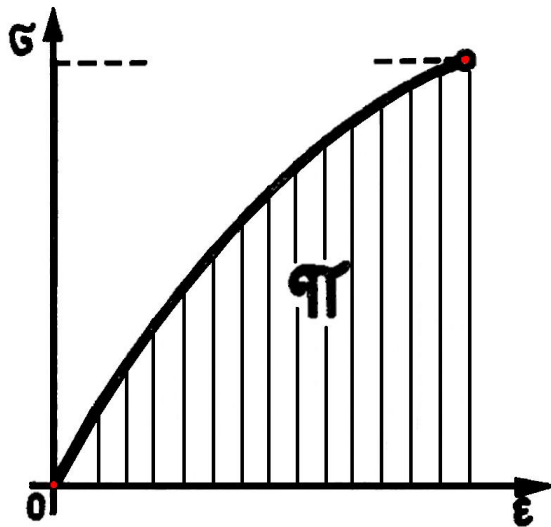
kde: σ napětí (zatížení)
E modul pružnosti (Youngův modul)
 ε poměrná deformace způsobená napětím σ

Jedná se o přímou úměrnost mezi napětím a deformací (s konstantou E); závislost se označuje jako **lineární pružnost**.

Často (u geomateriálů [zemín, hornin] typicky) není E konstantní; vztah mezi napětím a deformací je vyjádřen diferenciální rovnicí **nelineární pružnosti**:

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

Grafický vztah mezi deformací a napětím (zatížením) se nazývá **pracovním diagramem**. Jeho plocha $\pi = \int \sigma \cdot d\varepsilon$ představuje **měrnou přetvárnou práci** (tj. práci na jednotku objemu) při deformaci vzorku (obr. 10.29):



Obr. 10.29
Měrná přetvárná práce při
deformaci horninového vzorku
(J. Pauli – T. Holoušová (1991))

Horniny nejsou hmotou dokonale pružnou. Při zatěžování v nich vznikají kromě **pružných deformací** i **deformace nepružné (plastické, vazké)**, které po odlehčení trvají. **Je zde tedy deformace celková, složená z deformace pružné a plastické (trvalé).**

Poměrná deformace je podíl deformace a měrné základny ve sledovaném směru: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$.

Rozeznáváme poměrné deformace pružné, plastické a celkové; podle sledovaného směru pak podélné (osové, ve směru zatížení) a příčné (v rovině kolmé ke směru zatížení). Poměrné deformace jsou bezrozměrné.

Podle druhu deformace, z níž je pro příslušné zatížení stanoven modul rozeznáváme:

- **modul pružnosti E** (z pružné poměrné deformace)
- **modul přetvárnosti** (modul deformace) E_{def} **sečnový** (sekantový) z celkové poměrné deformace
- okamžitý **modul přetvárnosti** E_{def} **tečnový** (tangentový) [někdy E_t] daný vztahem

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

- kromě těchto modulů lze dále stanovit i **modul pružnosti ve smyku G**. Ten se obvykle nezískává přímým měřením, nýbrž dopočtem:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

- Rovněž dopočítáván je někdy i **modul objemové stlačitelnosti K**:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad \text{kde: } \nu \quad \text{Poissonovo číslo}$$

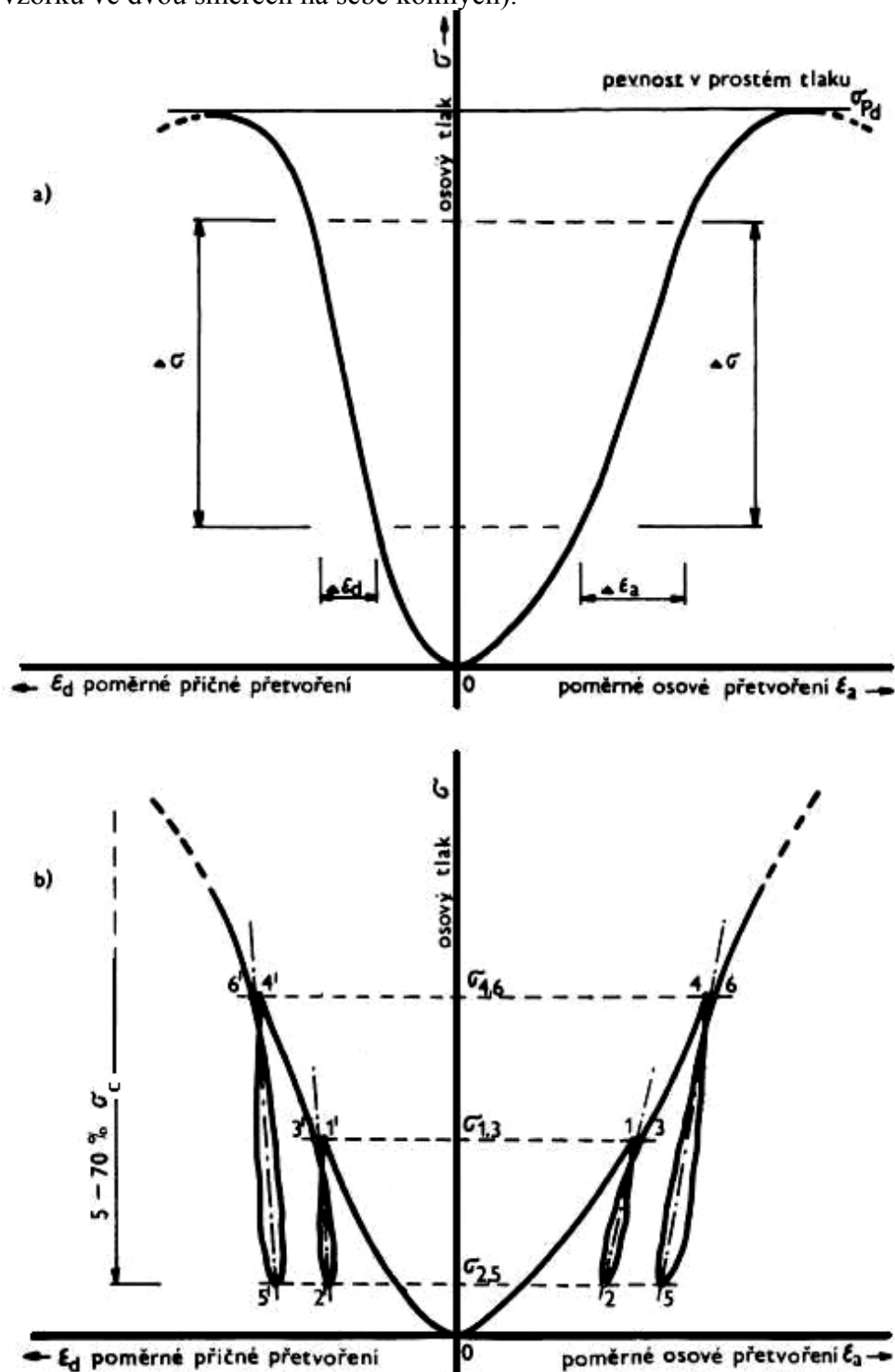
- moduly mají rozměr napětí (zatížení).

Testovány jsou horninové hranoly nebo válce (\varnothing nebo $d = 40 \div 50$ mm) dostatečné výšky ($l = 100 \div 150$ mm, tj. 2 až 3 \varnothing vzorku). Hornina bývá obvykle zatěžována jednoosým tlakem. Deformační charakteristiky odpovídající jednoosému tahu bývají stanovovány jen zcela výjimečně. Zkouška může být provedena (obr. 10.30):

a) **jednorázovým (monotonním) zatížením**

b) **cyklickým zatěžováním**

Způsob a přesnost snímání deformace by měly být relevantní rozměru vzorku a vzniklým hodnotám přetvoření. Měřeno je přetváření podélné (osové) a příčné (v polovině výšky vzorku ve dvou směrech na sebe kolmých).



Obr. 10.30
Pracovní
diagram při
stanovení
přetvárných
charakteristik
horninové
matérie
jednorázovým
a cyklickým
zatěžováním a
odlehčováním
(Metodiky
laboratorních
zkoušek
v mechanice
hornin, 1987)

Měřené veličiny:

- Osový tlak: $\sigma = \frac{F}{A}$
kde: F působící osová síla
A počáteční plocha příčného průřezu zkušební tělesa

- Poměrné přetvoření zkušební tělesa se vypočítá ze vztahu:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta l}{l} \quad \varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d}$$

- kde: ε_a poměrné osově přetvoření
- ε_d poměrné příčné přetvoření
- l počáteční délka měrné základny (výška vzorku)
- Δl změna délky měrné základny
- d počáteční příčný rozměr (šířka) zkušební tělesa
- Δd změna příčného rozměru zkušební tělesa

Přetvárné charakteristiky: viz pracovní diagram na obr. 10.30

- **Modul přetvárnosti** při monotónním zatěžování: $E_{def} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_a}$
kde: $\Delta \sigma$ rozsah osového tlaku pro lineární průběh závislosti $\sigma - \varepsilon_a$
 $\Delta \varepsilon_a$ rozsah přetvoření pro lineární průběh závislosti $\sigma - \varepsilon_a$
- **Modul přetvárnosti** při cyklickém zatěžování pro první zatěžovací cyklus:

$$E_{def} = \frac{\sigma_{1,3}}{\varepsilon_{a1}}$$

- kde: $\sigma_{1,3}$ je maximální úroveň osového tlaku první zatěžovací větve
- ε_{a1} průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 1 přetvárné křivky

- **Modul přetvárnosti** při cyklickém zatěžování pro druhý (a analogicky i další) zatěžovací

cyklus:
$$E_{def} = \frac{\sigma_{4,6} - \sigma_{1,3}}{\varepsilon_{a4} - \varepsilon_{a1}}$$

- kde: $\sigma_{4,6}$ max. úroveň osového tlaku zatěžovací větve druhého cyklu
- $\sigma_{1,3}$ max. úroveň osového tlaku zatěžovací větve prvního cyklu
- ε_{a4} průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 4 přetvárné křivky
- ε_{a1} průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 1 přetvárné křivky

- **Modul pružnosti** při cyklickém zatěžování, stanovený z hysterézní smyčky (odlehčením) prvního a druhého zatěžovacího cyklu (analogicky i z hysterézních smyček dalších cyklů):

$$E = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,5}}{\frac{\varepsilon_{a1} + \varepsilon_{a3}}{2} - \varepsilon_{a2}}$$

- kde: $\sigma_{1,3}$ max. úroveň osového tlaku příslušné zatěžovací větve
- $\sigma_{2,5}$ min. úroveň osového tlaku příslušné odlehčovací větve
- ε_{a1} průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 1 přetvárné křivky
- ε_{a2} průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 2 přetvárné křivky

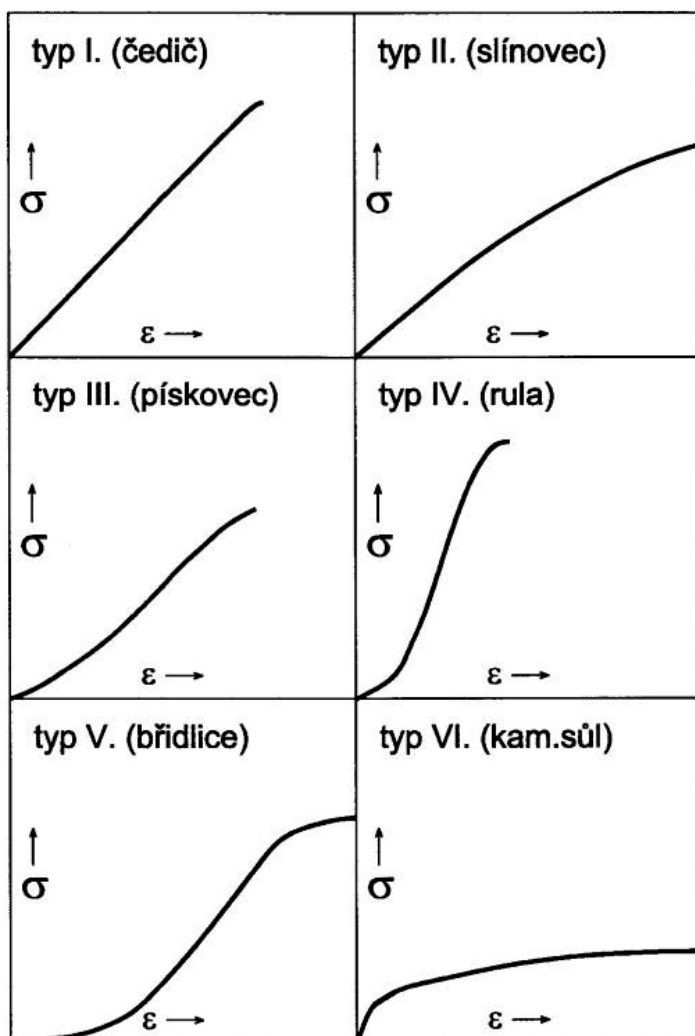
- ε_{a3} průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 3 přetvárné křivky
- Vztah mezi příčnou a podélnou (osovou) deformací je dán **Poissonovým číslem** ν (resp. inverzní hodnotou **Poissonovy konstanty** $m = \frac{1}{\nu}$). Poissonovo číslo přiřazené k modulu pružnosti se stanoví z hysterézní smyčky prvního a druhého zatěžovacího cyklu

$$\nu = \frac{\frac{\varepsilon_{d1} + \varepsilon_{d3}}{2} - \varepsilon_{d2}}{\frac{\varepsilon_{a1} - \varepsilon_{a3}}{2} - \varepsilon_{d2}}$$

(analogicky i z hysterézních smyček dalších cyklů)

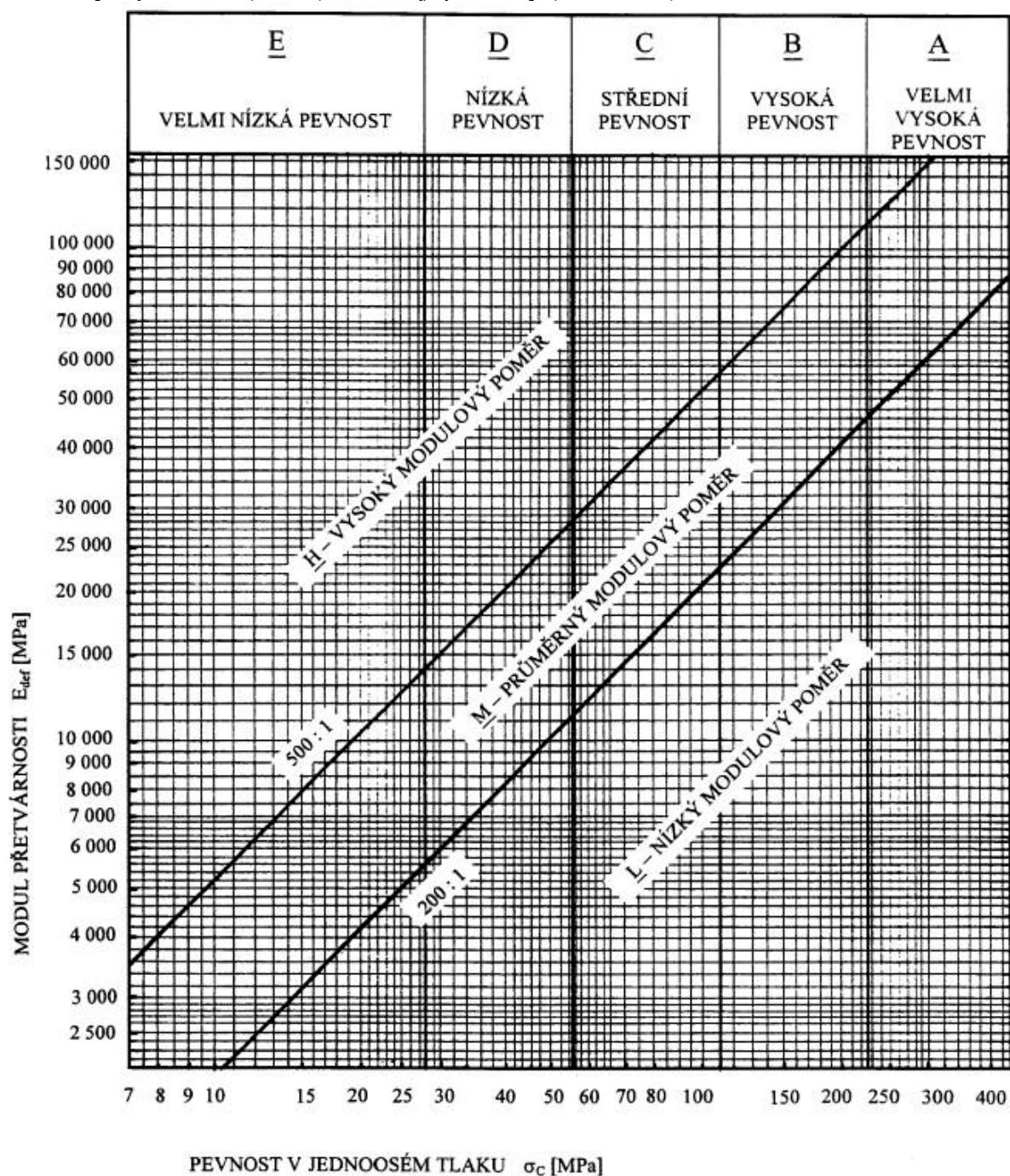
- kde:
- ε_{a1} průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 1 přetvárné křivky
 - ε_{a2} průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 2 přetvárné křivky
 - ε_{a3} průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 3 přetvárné křivky
 - ε_{d1} průměrná hodnota poměrného příčného přetvoření v bodě 1 přetvárné křivky
 - ε_{d2} průměrná hodnota poměrného příčného přetvoření v bodě 2 přetvárné křivky
 - ε_{d3} průměrná hodnota poměrného příčného přetvoření v bodě 3 přetvárné křivky

Na závěr zkoušky se zatěhuje vzorek až do porušení, tak, aby bylo možné vyčíslit pevnost horniny v jednoosém tlaku σ_c .



Obr. 10.31
Typické křivky pracovních diagramů různých hornin zatěžovaných osovým tlakem až do porušení (Miller, 1966)

Tzv. „**modulový poměr**“ (Deere - Miller, 1966) = podíl **modulu přetvárnosti E_{def}** ku **pevnosti v jednoosém tlaku σ_c** , je důležitým ukazatelem chování horninového materiálu při zatěžování. Horniny s vysokým modulovým poměrem (> 500) se chovají křehce, horniny se středním modulovým poměrem ($200 \div 500$) se chovají středně křehce a horniny s nízkým modulovým poměrem (< 200) se chovají plasticky (obr. 10.32).



Obr. 10.32 Inženýrská klasifikace základního materiálu horniny ASTM (Deere – Miller, 1966)

Sonické metody stanovení modulu pružnosti uváděné v literatuře (**ultrazvuková či rezonanční**) nemají v běžné mechanice hornin větší uplatnění, a to především pro neexistenci obecnější korelace pro převod na hodnoty statické; mají naopak značný význam především v defektoskopii (při hledání skrytých poruch materiálu).

Reologické vlastnosti

Reologie je v obecném smyslu nauka o tečení nebo přetváření hmot, ovšem s tím, že proces přetváření sleduje v čase. Nezabývá se tedy ustálenými stavy, ale sleduje jejich změny a rychlost. Zkoumá zvláště změny napětí a přetvoření v závislosti na čase a rychlosti přetváření. Tím se snaží vystihnout skutečné přetvárné vlastnosti hmot, tj. i hornin (J. Aldorf a kol., 1979).

Ve svém rozsahu zahrnuje i procesy, které jsme zvyklí chápat jako samostatné. Je to zejména otázka lineárně pružné hmoty, na které byla vybudována celá vědní disciplína, která ovšem z hlediska přetvárnosti patří do reologie. Obdobně je to i s teorií plasticity.

Reologické vlastnosti můžeme obecně vyjádřit různými druhy **reologických modelů**. Pro účely mechaniky hornin (a následně podzemní, resp. inženýrské stavitelství) jsou obvykle používány tříčlenná schémata **napětí - přetvoření - čas**, která lze vyjádřit buď prostorovými nebo plošnými diagramy. Při použití plošných diagramů za parametrického vyjádření jedné ze tří proměnných, dostáváme diagramy dvou nejvýznamnějších reologických vlastností hmot - **plouživosti a relaxace** (ochabování):

- funkce **plouživosti** $\epsilon = f(\sigma = \text{konst.}, t)$
(tzn. sledování průběhu deformace v čase při konstantním zatížení)
- funkce **relaxace** $\sigma = g(\epsilon = \text{konst.}, t)$
(což značí sledování průběhu napětí v čase při konstantní deformaci).

Prostorovým vyjádřením těchto závislostí [nebo obecné závislosti $f(\sigma, \epsilon, t) = 0$] získáme plochu, kterou Mikeska (1970) nazývá topografickou nebo též deformační plochou.

Obecně je přetvárnost hmot definována teoretickou, velmi složitou funkcí, jejíž praktické použití by bylo krajně obtížné. Z tohoto důvodu zavádí reologie modelování. V zásadě jsou používány modely myšlenkové (logické) a matematické (v inverzní souvislosti). Model rozděluje proces přetváření na elementární procesy idealizovaných základních prvků. Tyto základní látky jsou:

- a) **Tuhá látka** (TU) - nepřetváří se ani při libovolně velkém namáhání
- b) **Tekutá látka** (TE) - neklade žádný odpor pohybu při jakýchkoli rychlostech
- c) **Pružná látka** (PR) - známá Hookova látka, pro kterou platí vztah mezi napětím a přetvořením: $\sigma = E \cdot \epsilon$ $\tau = G \cdot \gamma$ [modelem této látky je pružina]
- d) **Vazká kapalina** - VA - mezi napětím a rychlostí pohybu je přímá úměrnost:

$$\sigma = \lambda \frac{d \epsilon}{d t} \quad \tau = \eta \frac{d \gamma}{d t}$$

[reologickým modelem je hydraulický kataraktický válec]

- e) **Tvárná látka** (TV) - přetváří se až do meze plasticity jako látka tuhá a po překročení této meze jako látka tekutá [modelem jsou dvě smýkající se desky]
- f) **Vláčná látka** - VL - po dosažení meze vláčnosti je závislost mezi napětím a rychlostí přetváření stejná jako u vazké kapaliny:

$$\sigma = \sigma_{VL} + \lambda \frac{d \epsilon}{d t} \quad \tau = \tau_{VL} + \eta \frac{d \gamma}{d t}$$

[reologickým modelem je válec s písem naplněným pískem]

Pomocí těchto základních látek, kde:

- σ normálové napětí
- τ tangenciální napětí
- ϵ poměrné přetvoření

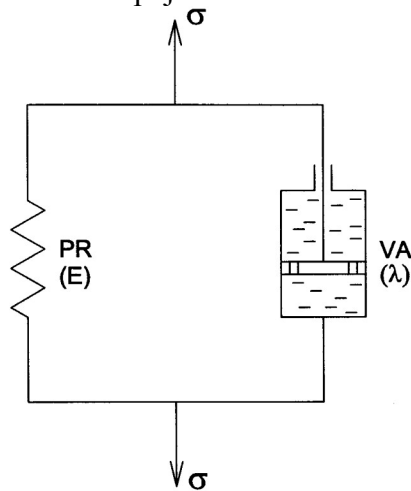
- γ poměrné zkosení
- E modul pružnosti
- G modul pružnosti ve smyku
- λ součinitel normální vazkosti
- η součinitel tangenciální vazkosti
- t čas,

můžeme získat skládáním látky složité, nahrazující svým chováním výstižněji látky skutečné.

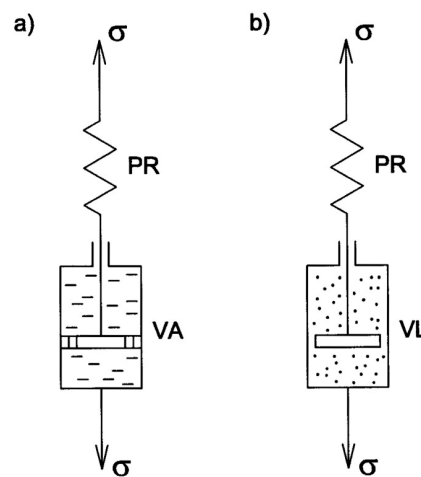
Analytická řešení jsou známa pro velké množství modelů. Pro mechaniku hornin z nich mají význam především:

- pružně vazký model Kelvinův PR/VA (obr. 10.33)
- vazkopružný model Maxwellův VA-PR (obr. 10.34)
- model pružně tvárné hmoty bez zpevnění PR-TV (obr. 10.35)
- model pružně tvárné hmoty se zpevnění PR-TV (obr. 10.36)
- tříprvkový pružný pružně vazký model PR-(PR/VA) (obr. 10.37)
- tříprvkový pružný vazkopružný model PR-(VA-PR) - (Poyntingův - Thomsonův model) (obr. 10.38)
- Binghamův reologický model PR-TV-VA (obr. 10.39).

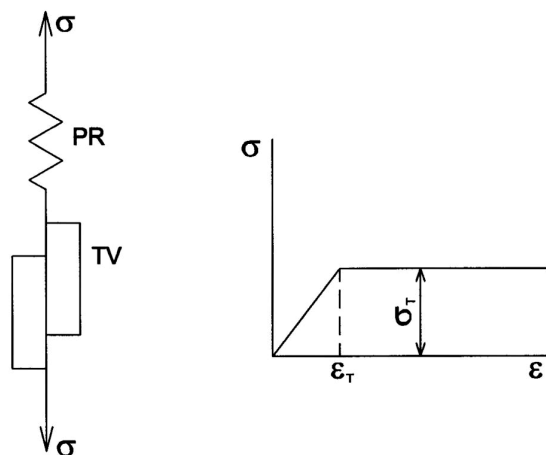
[Pozn.: V označení modelů značí lomící čára (/) paralelní zapojení a vodorovná čárka (-) sériové zapojení základních reologických látek].



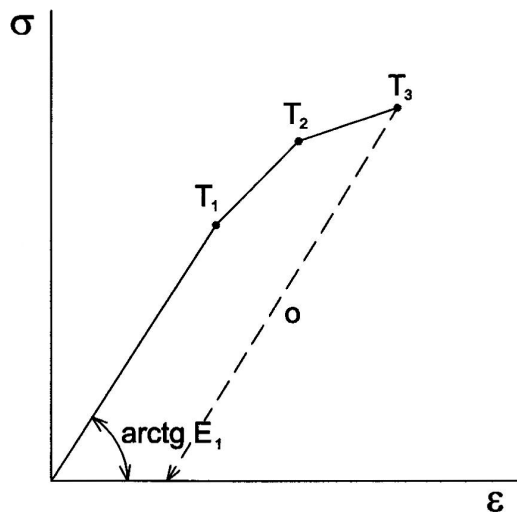
Obr. 10.33 Model pružně vazký (Kelvinův)



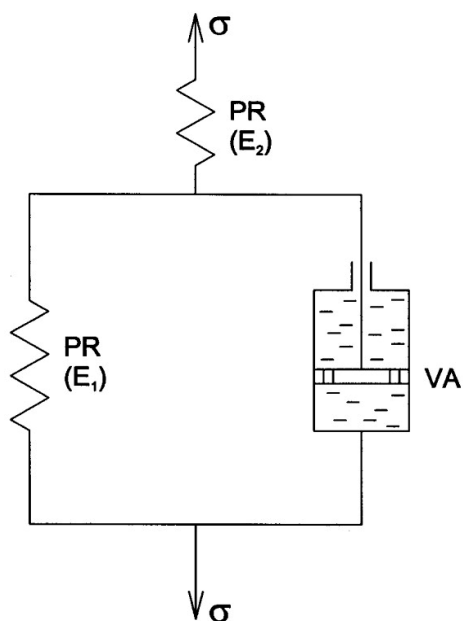
Obr. 10.34 Model vazkopružný a) vazkopružná hmota, b) pružně vláčná hmota



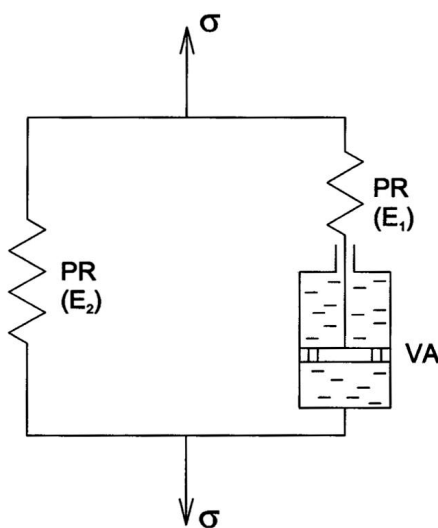
Obr. 10.35 Model pružně tvárné hmoty bez zpevnění



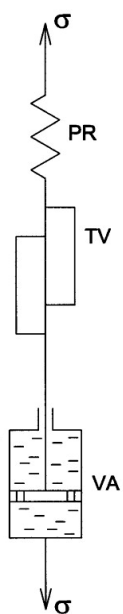
Obr. 10.36
Deformační charakteristika
pružně tvárné hmoty
s přímkovým zpevněním.
o - odlehčovací větev
přetvárného diagramu



Obr. 10.37 Tříprvkový pružný-pružně
vazký model



Obr. 10.38 Tříprvkový pružný-vazkopružný
model (Poyntingův-Thomsonův)

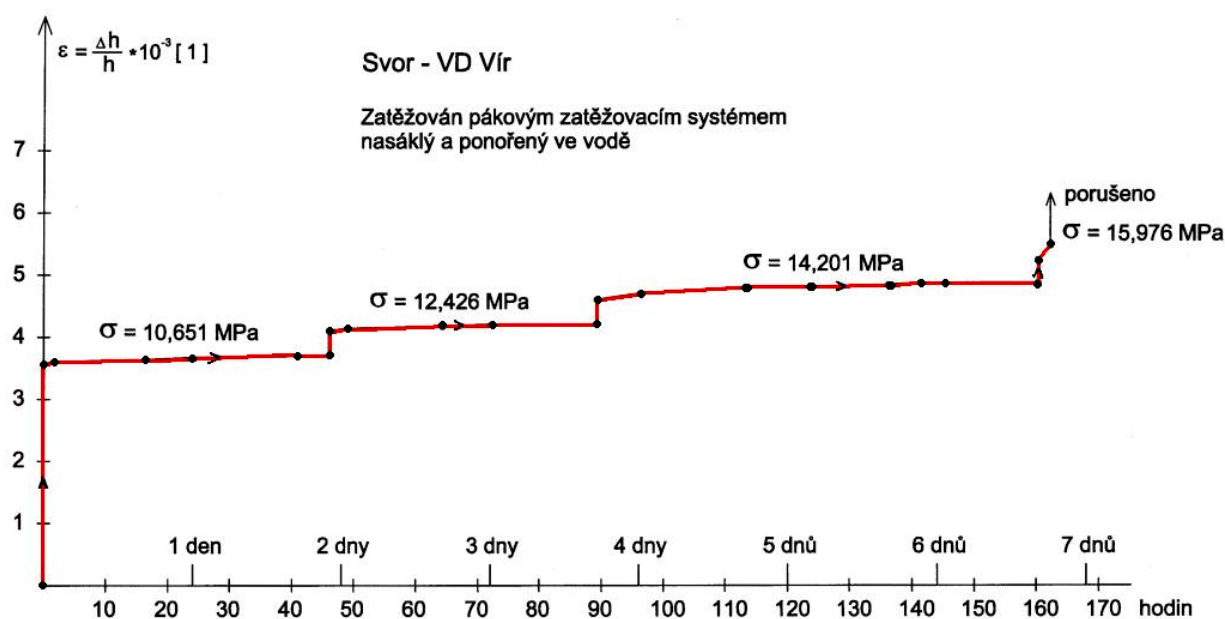


Obr. 10.39 Binghamův reologický model

Obecně lze říci, že přetvárné chování reologického modelu je ekvivalentní přetvárnému chování skutečné horniny, když deformační plochy (viz výše) splývají. Protože tento stav nastává jen málokdy, musíme při srovnání určovat mnohdy podmínky nahrazování jen v určitých intervalech přetvárného procesu.

Samotné reologické modelování ovšem neumožňuje stanovit podmínky pevnosti. Vedle mezní čáry plasticity (stanovené z experimentů) můžeme používat energetických podmínek pevnosti a plasticity nebo při klasických (nereologických) řešeních podmínky Mohrovy.

Jako příklad reologického chování horniny byl dlouhodobě (reologicky) testován vzorek svoru odebraný při průzkumu pro sanaci hráze VD Vír. Tento dlouhodobě zatěžovaný vzorek pak vykázal v jednoosém tlaku pouze cca 75 % pevnosti vzorku zatíženého do porušení jednorázově. Snížení připadá na vrub reologie (obr. 10.40)



Obr. 10.40 Vzorek horniny dlouhodobě (reologicky) zatěžovaný jednoosým tlakem a jeho osové přetváření

Technické (technologické) vlastnosti hornin

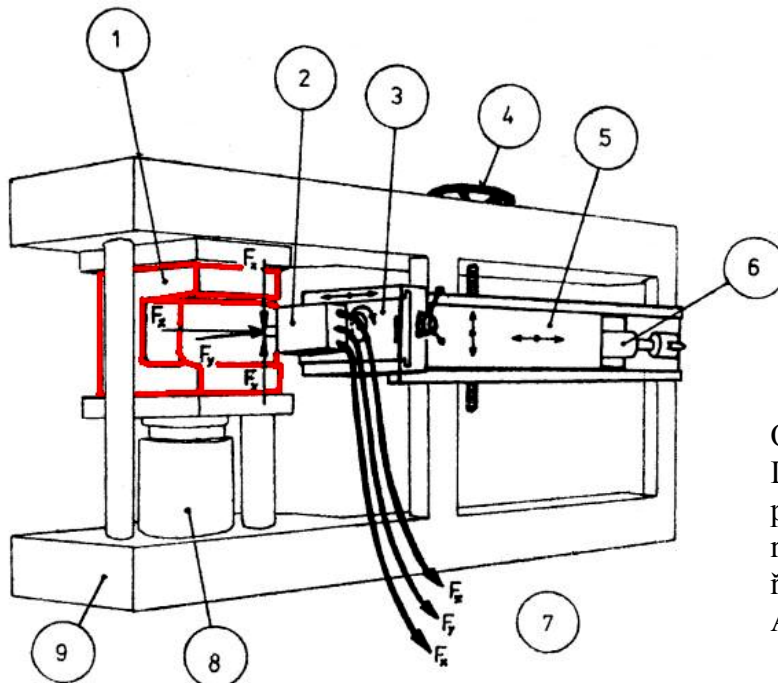
oceňují horninu jako surovinu nebo stavební materiál (kámen, kamenivo); zvláštní skupinou jsou vlastnosti popisující mechanizované rozpojování horniny. Celá tato skupina vlastností má ve vlastní mechanice hornin (bez jakéhokoli podceňování) víceméně okrajový význam. Pro stanovení technologických vlastností jsou běžně používány jednoúčelové přístroje či zařízení, často dosti sofistikované. Obvyklý soupis těchto zkoušek obsahuje:

MRAZUVZDORNOST (též „odolnost vůči vlivu povětrnosti“) - pravidelné horninové vzorky, resp. frakce kameniva, plně nasáknuté vodou, jsou podrobeny 25 nebo 50 zmrazovacím cyklům (vždy 24 hodin na -20°C a opětné rozmrazení při ponoření do vody opět na 24 hodin). Po těchto cyklech je stanoven %ní nebo poměrný úbytek pevnosti v prostém tlaku σ_c (již zmíněno u jednoosé tlakové zkoušky), příp. úbytek hmotnosti testované frakce kameniva.

Mrazuvzdornost je významnou vlastností pro posouzení kvality stavebního kamene a kameniva vystaveného extrémním vlivům povětrnosti (šterkové kolejové lože, podkladní vrstvy vozovek, kamenivo pro obalovny apod.).

VRTATELNOST = rychlost postupu vrtání při známých podmínkách (obvykle bývá u nás hodnocena v šesti nebo dvanácti třídách; čím vyšší třída, tím obtížnější postup vrtání). Přesně je stanovována ve speciálních stendech s měřením řady parametrů vrtání do konkrétního bloku horniny (přítlaky, postupy, kroutící momenty, opotřebení a zahřívání vrtného nástroje, kvalita výplachu apod. - v Československu prováděl tato měření bývalý Výzkumný ústav geologického inženýrství Brno).

ROZPOJITELNOST ŘEZNÝMI NÁSTROJI = řezný odpor při zabírání zkušební nožem. Měří se v laboratorním zkušební pluhu. Jeho jediný exemplář v ČR se nachází v Ústavu geoniky AV Ostrava (obr. 10.41).

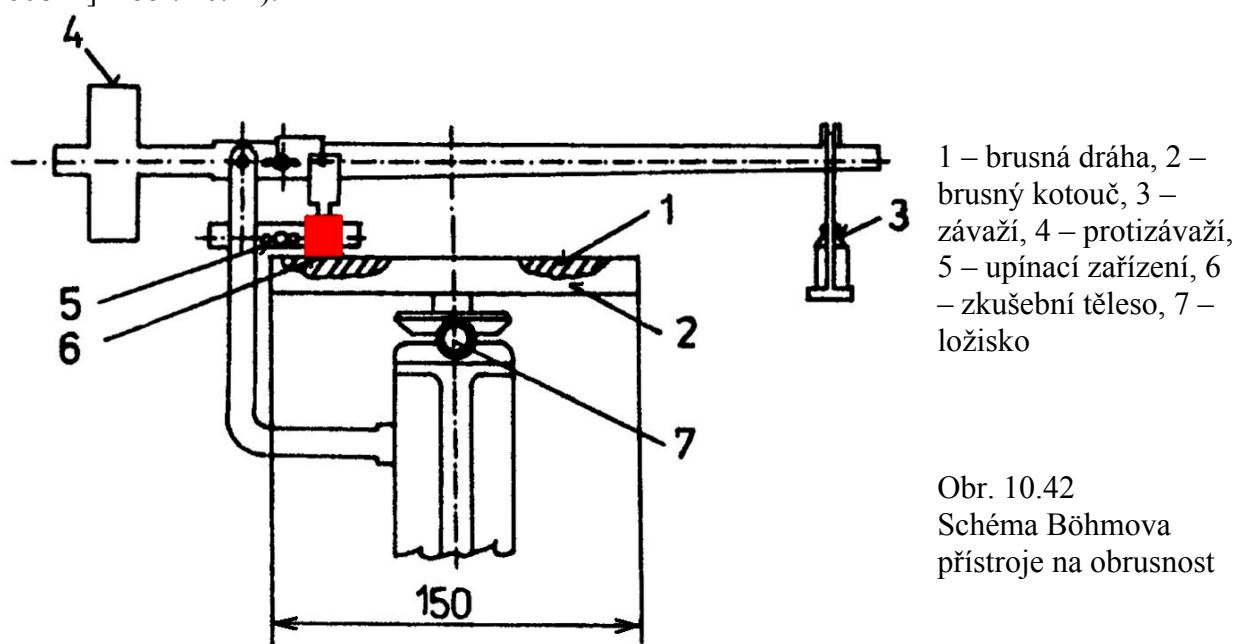


Obr. 10.41
Laboratorní zkušební pluh pro posouzení rozpojitelnosti horniny řeznými nástroji (ÚGN AV Ostrava)

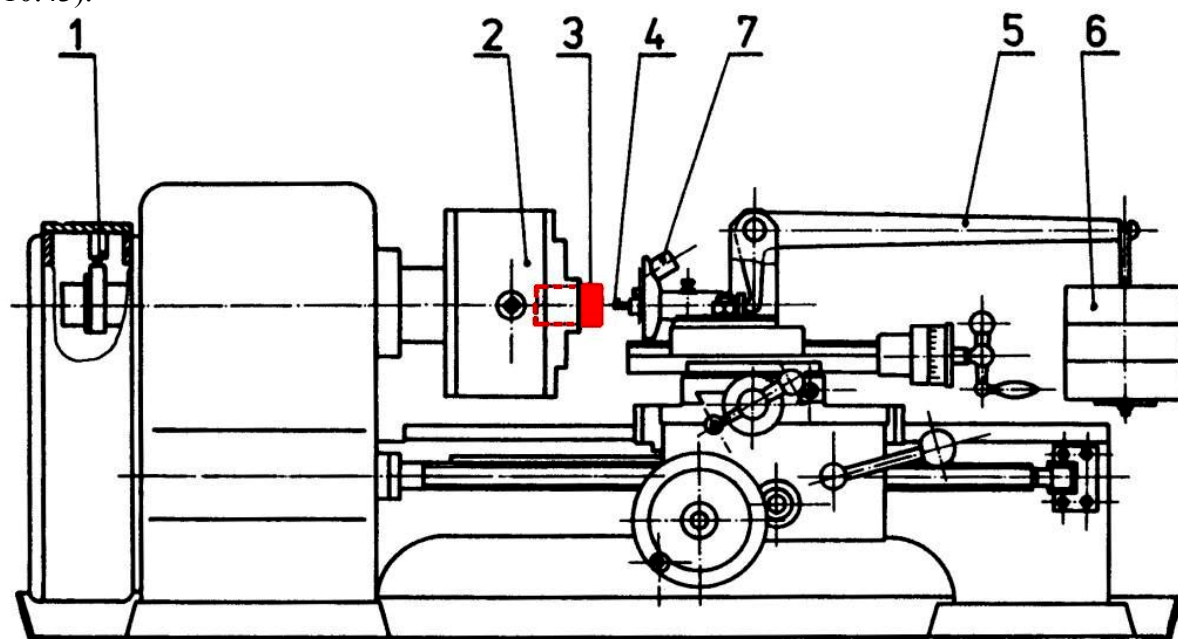
- 1 Zkušební těleso
- 2 Snímač řezných odporů se zkušební nožem
- 3 Deska pro uchycení snímače se šroubem pro nastavení hloubky zabírky
- 4 Šroub vertikálního nastavení zkušební nože
- 5 Pohyblivý jezdec (suport)
- 6 Válec vyvolávající pohyb nože řezu
- 7 Kabely pro přenos snímaných řezných odporů
- 8 Upínací zařízení zkušební tělesa
- 9 Rám stroje

ABRAZIVITA (obrusnost) = ztráta objemu vzorku horniny (kostka, hranol) upnutého do smluvního brousícího přístroje a vykonávšícího předepsanou brusnou dráhu na brusném kotouči

(v ČR byly nebo jsou používány přístroje podle Amslera či podle Böhma [s brusnou dráhou 608 m] – obr. 10.42).



ABRAZIVNOST = schopnost horniny opotřebovávat rozpojovací nástroj. Měření se provádí s rotujícím vzorkem horniny upnutým do abrazivometru - tj. modifikovaného soustruhu. Na vzorek je přitlačěn normalizovaný roubík, jehož úbytek je monitorován (obr. 10.43).

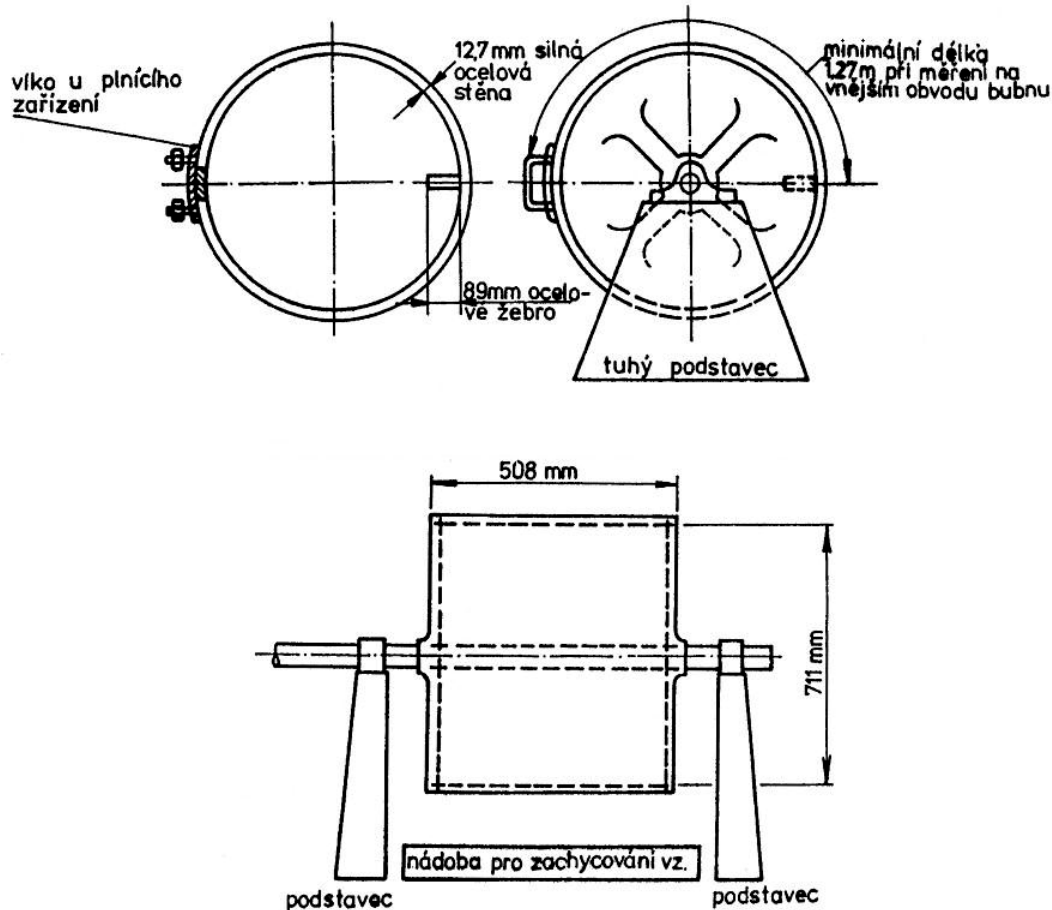


- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1. POČÍTAČ OBRÁTEK | 5. PÁKOVÝ MECHANISMUS KONST. PŘÍTLAKU |
| 2. SKLÍČIDLO PRO UPEVNĚNÍ ZKUŠ. TĚLESA | 6. ZÁVAŽÍ |
| 3. ZKUŠEBNÍ TĚLESO | 7. OOSÁVÁNÍ |
| 4. NORMALIZOVANÝ KOVOVÝ ROUBÍK | |

Obr. 10.43 Abrazivometr (VVUÚ Ostrava)

DRTITELNOST = odpor proti rozduřování drcením, resp. typ rozduřování drcením. Zkouška je prováděna ve smluvních drtičích.

OTLUKOVOST (tzv. zkouška Los Angeles). Otloukáním ve smluvním bubnu (s žebrem a 12 ks ocelových koulí – obr. 10.44) je stanoven úbytek hmotnosti předepsaných frakcí kameniva.



Obr. 10.44 Los Angeleský přístroj pro zkoušky otlukovosti

Index otlukovosti je stanoven ze vztahu:

$$O = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100 \quad [\%]$$

kde: m_1 hmotnost navážky předepsané frakce kameniva
 m_2 hmotnost propadu sítem 2 mm po zkoušce otlukovosti

Otlukovost je významnou vlastností pro posouzení kvality například kameniva do šterkového kolejevého lože.

LEŠTITELNOST - posuzuje se kvalita pokusně vyleštěné plochy na povrchu vzorku. Leštiteľnost je velmi významná pro posouzení možností využití kamene jako dekoračního materiálu.

