**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**
**FAKULTA STAVEBNÍ**
**ÚSTAV GEOTECHNIKY**

**Ing. Vladislav Horák, CSc.**

# EXPERIMENT V MECHANICE HORNIN A JEHO REALIZACE

TEZE HABILITAČNÍ PRÁCE

**BRNO 2001**

© 2001 V. Horák
ISBN 80–214–1823–0

# OBSAH


| | | |
|---|---|---|
| | **PŘEDSTAVENÍ AUTORA** | **4** |
| **1** | **ÚVOD** | **5** |
| **2** | **MATEMATICKÉ METODY** | **6** |
| 2.1 | Analytické metody | 6 |
| 2.2 | Numerické metody | 6 |
| **3** | **EXPERIMENTÁLNÍ METODY** | **7** |
| 3.1 | Laboratorní metody | 7 |
| 3.1.1 | Fyzikální modelování | 7 |
| 3.1.2 | Laboratoř mechaniky hornin | 8 |
| 3.1.2.1 | Fyzikální vlastnosti hornin | 9 |
| 3.1.2.2 | Mechanické vlastnosti hornin | 9 |
| 3.1.2.3 | Technické (technologické) vlastnosti hornin | 10 |
| 3.2 | Měření in situ | 11 |
| 3.2.1 | Polní zkoušky mechaniky hornin | 11 |
| 3.2.1.1 | Zjišťování stavu napjatosti | 12 |
| 3.2.1.2 | Přetvárnost | 13 |
| 3.2.1.3 | Pevnost | 14 |
| 3.2.1.4 | Indexové vlastnosti | 14 |
| 3.2.1.5 | Hydraulické zkoušky | 16 |
| 3.2.2 | Polní měření a monitoring | 16 |
| 3.2.2.1 | Horninový masiv a jeho analýza | 16 |
| 3.2.2.2 | Monitoring | 20 |
| **4** | **ZÁVĚR** | **21** |
| | **SEZNAM ODKAZŮ NA LITERATURU** | **22** |
| | **ABSTRACT** | **23** |

# PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Vladislav Horák se narodil roku 1953 v Hranicích na Moravě. Vysokoškolská studia ukončil na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně v roce 1977 obhajobou diplomové práce v oboru konstrukce a dopravní stavby na Katedře geotechniky.

Až do roku 1990 byl zaměstnán v GEOtestu Brno, postupně jako stavbyvedoucí, samostatný a odborný geotechnik a v závěru jako vedoucí geotechnik – řešitel. V GEOtestu Brno se zabýval geotechnickými a inženýrskogeologickými posudky, průzkumy, zkouškami a měřeními, jako i úkoly technického rozvoje.

V roce 1990 byl přijat konkurzem za odborného asistenta Ústavu geotechniky FAST VUT, kde v současné době přednáší na oboru „Konstrukce a dopravní stavby“ předměty Inženýrská geologie, Mechanika hornin a Podzemní stavby. Vedle přednášek rovněž vede i diplomové práce.

V roce 1993 obhájil na FAST VUT kandidátskou disertační práci, od roku 1995 je autorizovaným inženýrem pro obor geotechnika. Člen Technické normalizační komise č. 41 „Geotechnika“ ČNI (od roku 1993, od roku 1998 předseda její subkomise 3 – terminologie). V letech 1998 – 2000 člen odborné sekce č. 12 (pro zemní práce, odvodnění a spodní stavbu) Silniční společnosti. Od roku 1995 člen výboru České geotechnické společnosti ČSSI (r. 2000 – 2. místopředseda). Zástupce vedoucí Ústavu geotechniky FAST VUT, člen oborové pedagogické rady FAST VUT pro obor Konstrukce a dopravní stavby.

*Vladislav Horák*

# EXPERIMENT V MECHANICE HORNIN A JEHO REALIZACE

## 1 ÚVOD

Geotechnika je poměrně mladým oborem inženýrské činnosti. Vznikla přibližně před čtyřiceti lety, přičemž v posledních dvaceti letech vytváří a rozšiřuje svou obsahovou náplň celosvětově i v ČR velmi dynamicky. Z praktického hlediska se jedná o obor mezní, zahrnující soubor činností a aplikací poznatků, umožňujících co nejracionálnější využívání horninového prostředí spolupůsobícího se stavební konstrukcí (v celém procesu stavební činnosti).

Z pohledu vědecké disciplíny sdružuje geotechnika následující inženýrské obory:

a) aplikovanou geologii (inženýrskou geologii a hydrogeologii)
b) geomechaniku jako zvláštní obor mechaniky se zahrnutím
   ba) mechaniky zemin
   bb) mechaniky hornin
   bc) mechaniky sněhu a ledu
c) nauku o zakládání staveb
d) nauku o podzemním stavitelství.

Jak je z předchozího rozdělení patrné, významnou součástí geotechniky je nauka o mechanice hornin. Význam mechaniky hornin značně vzrostl (současně i s významem mechaniky zemin) především v souvislosti s moderními návrhovými a prováděcími metodami snažícími se maximálně využívat horninový materiál či prostředí jako spolupůsobící součásti zřizované konstrukce.

Nauka o mechanice hornin se zabývá materiály (a jejich vlastnostmi), které jsou velmi různorodé a především z hlediska mechanického chování (parametry pevností a přetváření) pořád ještě málo prozkoumané.

Složitost úkolu je způsobena především různorodostí hornin. U celistvé horniny (tedy horninové matérie) se mechanické charakteristiky mění v závislosti na petrografickém složení, na struktuře a na textuře. Značný vliv má i stupeň větrání. Skalní prostředí (masiv) je však obvykle navíc prostoupeno četnými plochami diskontinuity (vrstevní plochy, plochy břidličnatosti, pukliny, kliváž, dislokace ap.). Tyto plochy diskontinuity ovlivňují soudržnost horniny a mění (často i zásadně) její přetvárné a pevnostní parametry. Uplatňuje se zde četnost rozdělovacích ploch, jejich tvar, výplň a rozevření, soudržnost na plochách, orientace ploch vůči směru zatížení apod. (z toho vyplývá nehomogenita a anizotropie tělesa). Stanovení chování a vlastností horninového celku je potom nesnadnou záležitostí.

Mechanika hornin řeší celou řadu úloh:

- stanovení fyzikálních a mechanických vlastností horninové matérie a horninového masivu,
- chování horninového masivu ovlivněného inženýrským dílem (např. podzemní stavbou, přehradní hrází, komunikačním tělesem apod.),
- optimalizaci technologie rozpojování hornin,
- optimalizaci postupů a konstrukcí k zabezpečování výrubu či výkopu,
- stabilitní analýzy přírodních svahů a umělých zářezů v horninách.

Při řešení těchto úloh se používají následující metody:

**1** **Matematické**, zahrnující metody:

- **1.1** Analytické, při kterých se pomocí různých postupů určují základní závislosti a zákonitosti, charakterizující zkoumaný jev;
- **1.2** Numerické, používající matematické modelování metodou konečných či hraničních prvků (MKP, MHP);

**2** **Experimentální**, které jsou představovány metodami:

- **2.1** Laboratorními, s dalším rozčleněním na:
  - *2.1.1 Fyzikální modelování, kdy je stavěn a zatěžován model*
  - *2.1.2 Laboratoř mechaniky hornin, ve které se smluvenými postupy zkoumají vlastnosti horninové hmoty odebrané z horninového masivu;*
- **2.2** In situ přímé měření a pozorování v přírodních podmínkách, včetně ověřování chování skutečných systémů:
  - *2.2.1 Polní zkoušky mechaniky hornin*
  - *2.2.2 Polní měření a monitoring*

# 2 MATEMATICKÉ METODY

## 2.1 Analytické metody

V zásadě klasické, rozborové, vycházející obvykle z teorií pružnosti a pevnosti a stavební mechaniky. Často bývá výpočet (oproti skutečnosti) založen na výrazných zjednodušeních (např. lineárně pružné, homogenní a anizotropní prostředí), není však vyloučeno ani řešení pružně plastických výpočtových modelů. Obvykle bývá výpočet sestaven do formy charakteristických vzorců, přičemž rovněž obvyklé je použití řady koeficientů nebo výpočtových hodnot (např. tabulkových) ověřených experimentálně.

Analytické metody jsou obecně rozšířeny pro svou jednoduchost a srozumitelnost. Lze jimi ověřit základní závislosti a zákonitosti a je možné s jejich použitím rozpracovat jednodušší (ale o to přehlednější) parametrické studie.

## 2.2 Numerické metody (MKP, MHP)

Metoda konečných prvků (MKP) je považována za velmi účinnou variační metodu řešení okrajových úloh mechaniky kontinua. MKP má (mimo jiné i v geotechnice) všestranné použití; k dispozici jsou dnes velké obecné, ale i speciálně zaměřené soustavy algoritmů a programů. Pro řešitele je důležité vytvořit co nejsprávnější model představovaný soustavou zvolených konečných prvků, stejně jako určit co nejcharakterističtější vlastnosti modelovaného prostředí jako vstupní údaje pro výpočet. V geotechnice je zřejmě hlavním problémem parametrické vyjádření nelinearity napětí a přetvoření (obvyklá formulace MKP je totiž kvazielastická). Nelineární vztah napětí - přetvoření při metodě kvazielastických parametrů lze aproximovat dle metody přírůstkové, iterační nebo smíšené.

Metoda hraničních prvků (MHP) je u nás poměrně méně známější než MKP. Její použití v geotechnice je typické při výpočtech stability svahů.

Jako ilustrující příklad použití výše uvedených metod je uvedeno posouzení možného vzniku poklesové kotliny na povrchu území pro zamýšlený silniční tunel Dobrovského na VMO v Brně (nutná průřezová plocha výrubu 116 $m^2$, délka tunelu cca 1000 m, složitá geologie, nevysoké nadloží) [10]:

Tab. I Odhad poklesů území – tunel Dobrovského v Brně [10]

| Metoda | Pokles nad osou [m] | Poznámka |
|---|---|---|
| empirická – M.L.Mirianthis (J. Mencl) | 0,094<br>0,169<br>0,418 | minimum<br>Ø<br>maximum |
| empirická – „odvážnou“ extrapolací vztahem Attewella a Farmera | 0,317<br>0,244 | řez E<br>řez C |
| poloempiricky (poloanalyticky) - budapešťské metro | 0,190<br>0,191 | řez A<br>řez D |
| MKP – technologie ražby podle Amberg Engineering a.s., bez zlepšení prostředí | 0,142 | řez A<br>postup 1 m |
| MKP – upravená technologie členěného výrubu | 0,125 | řez A<br>postup 1 m |
| MKP – technologie členěného výrubu se zlepšením prostředí v okolí tunelu tryskovou injektáží | 0,044<br>0,047 | řez A<br>řez B<br>postupy 1 m |

Jak analytické, tak především numerické metody jsou přitom velmi náročné (citlivé) na konstituční vztahy (tj. vlastnosti dotčeného prostředí) vstupující do výpočtu. Prakticky jedinou objektivní cestou (pomineme-li kvalifikovaný odborný odhad) je pak využití laboratorních a polních zkoušek a měření (viz dále).

# 3 EXPERIMENTÁLNÍ METODY

Tyto metody jsou od samého počátku nedílnou součástí geotechniky. Jako v celé řadě jiných oborů jsou zde nenahraditelné, a to především při určování vlastností horninové matérie a horninového masivu, při verifikaci chování geotechnických konstrukcí, při stanovení varovných stavů, při zpětné analýze, při stanovení vstupních parametrů pro numerické metody (MKP, MHP) apod. Experimentální metody lze dále rozdělit na laboratorní a polní (in situ).

## 3.1 Laboratorní metody

### *3.1.1 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.

**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, odpovídajících výše uvedeným principům.

**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 masivu.
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 měřící 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 co teorém $\pi$ (Buchinghamův teorém) [15].

### *3.1.2 Laboratoř mechaniky hornin*

je dnes integrální součástí vědní 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,
- když jinak než laboratorně žádanou vlastnost horniny nedokážeme ověřit (např. hustota, nasákavost),
- používá-li se zjišťovaná vlastnost jako klasifikační činitel, resp.
- když 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). Dále byly širokým kolektivem autorů vypracovány „Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice hornin“ [13]. V současné době jsou plně rozvinuty (i za účasti českých expertů) práce sjednocující provádění těchto laboratorních zkoušek v rámci Evropské unie.

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.

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

*3.1.2.1* *Fyzikální vlastnosti hornin*

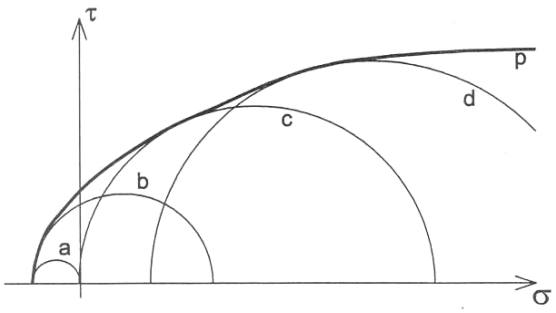
jsou obvykle (i když ne nutně) členěny na základní (hmotové), hydrofyzikální a fyzikálně-chemické. Autorem byly stanoveny fyzikální vlastnosti horniny na řadách čs. lokalit. Příklad shrnutí výsledků testů pro rozsáhlou oblast je uveden v následující tabulce [5]:

Tab. II Hodnoty objemových hmotností, hustoty a pevnosti v jednoosém tlaku granodioritů východní granitoidové zóny brněnského masivu [5]

| Typ horniny | Objemová hmotnost [$kgm^{-3}$] | Hustota [$kgm^{-3}$] | Pevnost v jednoosém tlaku (po nasáknutí) [MPa] |
|---|---|---|---|
| granodiorit zvětralý | 2 460 až 2 580 | < 2 630 | < 15 |
| granodiorit značně navětralý | 2 580 až 2 620 | 2 630 až 2 680 | 15 až 75 |
| granodiorit středně až mírně navětralý | 2 620 až 2 660 | 2 680 až 2 720 | 75 až 100 |
| granodiorit zdravý | 2 660 až 2 690 | 2 720 až 2 780 | > 100 |

*3.1.2.2* *Mechanické vlastnosti hornin*

bývají testovány v různých směrech - ve směru svislém a směrech vodorovných odpovídajících přirozenému uložení horniny či ve směru kolmém či rovnoběžném ku foliaci nebo vrstevnatosti hornin. Mechanické vlastnosti se dělí na pevnostní, deformační, indexové a reologické, přičemž nejvyšší důležitosti nabývají vlastnosti pevnostní a do jisté míry i deformační. Zkoušky pevnosti charakterizující horninu při porušení obsahují značné množství položek; vlastní pevnost zásadně ovlivňuje způsob zatížení (namáhání) vzorku, stejně jako orientace zatížení vůči plochám oslabení (vrstevnatost, foliace – viz výše). Příklad stanovení pevností v jednoosém tlaku je uveden v tabulce II [5]. Vztah některých typů namáhání je zřejmý z obr. 1.




a jednoosý tah
b brazilská zkouška
c jednoosý tlak
d trojosý tlak
p čára pevnosti

Obr. 1 Empirické kritérium porušení vyjádřené Mohrovými kružnicemi pro různé typy namáhání horniny [3,4]

Do jisté míry zvláštní postavení má v této skupině vlastností pevnost tahová. Jedná se o hodnotu nutnou pro určení materiálových parametrů pro stanovení kriteria porušení či pro výpočty MKP. Tahové zkoušky však (s výjimkou zkoušky brazilské) obvykle nebývají součástí zkušebního programu. Tahovou pevnost lze pak ověřit nepřímo – korelací s pevností v jednoosém tlaku [12]:

$$\sigma_t = T.p\left(\frac{\sigma_c}{p_a}\right)^t \qquad (1)$$

kde $\sigma_t$ …… pevnost horniny v jednoosém tahu

$\sigma_c$ ……. pevnost horniny v jednoosém tlaku

$T$ …….. bezrozměrová konstanta (parametr)

$t$ …….. dtto

$p_a$ …… atmosférický tlak ve stejných jednotkách jako $\sigma_t$ a $\sigma_c$.

Autor [8, 9] doplnil a v zásadě potvrdil na základě výsledků zkoušek hornin z československých lokalit závěry [12]. Hodnoty korelačních koeficientů pro stanovení pevnosti horniny v jednoosém tahu jsou uvedeny v tabulce III:

Tab. III Hodnoty korelačních koeficientů pro stanovení $\sigma_t$ [8, 9]

| Horninový typ (podle původu) | | Vyvřelé horniny | Metamorfované horniny | Sedimentární horniny |
|---|---|---|---|---|
| Kim a | T | - 0,53 | - 0,0082 | - 0,22 |
| Lade | t | 0,70 | 1,60 | 0,75 |
| Horák | T | - 0,70 | 2,91 | - 0,123 |
| | t | 0,70 | 1,60 | 0,75 |

*3.1.2.3 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 (bez jakéhokoliv podceňování) ve vlastní mechanice hornin v podstatě okrajový význam. Pro stanovení technologických vlastností jsou běžně používány jednoúčelové přístroje či zařízení, často dosti sofistikované.

V každé (především však v závěrečné) fázi laboratorního výzkumu si musí být geotechnik vědom, že v laboratoři ověřené vlastnosti či parametry odpovídají víceméně pouze horninové matérii (hmotě), když jsou závislé v zásadě jen na jejím petrografickém složení, struktuře a textuře. S vlastnostmi horninového masivu tedy nejsou obecně totožné.

Vyplývá to z rozměrů dotčeného (testovaného) tělesa. Laboratorní měření postihuje tělísko rozměrů běžně v desítkách až stovkách $cm^3$, nejvýše několik $dm^3$ (navíc vytržené z přirozených vazeb). Při zabudování inženýrské konstrukce je však ovlivněno (resp. spolupůsobí) běžně mnoho tisíc $m^3$ horninového masivu. A horninový masiv je prostoupen četnými rozdělovacími plochami (vrstevní plochy, plochy břidličnatosti, dislokace, kliváž,

pukliny apod.). Tyto plochy diskontinuity snižují soudržnost horniny a mění její přetvárné a pevnostní vlastnosti. Uplatňuje se zde četnost ploch, jejich tvar a výplň, soudržnost na plochách, rozevření ploch, úhel ploch vůči směru zatížení apod. Značný vliv má i větrání. Stanovení vlastností horninového celku (masivu) je pak nesnadnou záležitostí. Jedinou možností je pak přenést experiment do pole (tj. do masivu či na konstrukci).

## 3.2 Měření in situ

se uplatňují v geotechnickém průzkumu i při ověřování chování již prováděné, resp. dokončené konstrukce ve spolupůsobení s horninovým prostředím pro ověření charakteristik vystihujících chování masivu, příp. posouzení vestavované spolupůsobící konstrukce ve stavebních i provozních stadiích.

### *3.2.1 Polní zkoušky mechaniky hornin*

Mechanické charakteristiky horninového masivu (obdobně jako horninové matérie - i když zde s relativně nižším dopadem) nejsou konstanty (jak je poměrně často nesprávně uváděno; mimo jiné i v základní geotechnické české normě). Jsou to nelineárně proměnné veličiny v závislosti na složkách napjatosti (případně na drahách napětí a přetvoření). Jejich zjišťování, jak již bylo výše řečeno, je standardně komplikováno heterogenitou a anizotropií horninového prostředí. Proto, a jen proto, jsou realizovány zkoušky a měření přímo v poli, na větších plochách, resp. objemech v měřítku horninových bloků.

Vyšší serióznost informace je zaplacena řadou nevýhod:

- zkoušky a měření in situ jsou samy o sobě drahé (což vyplývá z potřeby nákladných, obvykle jednoúčelových zařízení v kombinaci s vysoce kvalifikovaným personálem),
- jejich časová náročnost je vyšší až vysoká,
- vyžadují obvykle nákladné přípravné práce (pro vlastní zkušební místa), tak práce přístupové (štoly, šachty, rozrážky, rýhy), běžně dražší (a to i podstatně) než zkoušky samy; jistou výjimkou jsou zkoušky a měření ve vrtech,
- v převážné většině se jedná o stanovení lokální, jejichž výsledky jsou (resp. musí být) extrapolovány na horninový masiv; umisťují se proto pokud možno do charakteristických partií masivu; situování zkoušky či měření bývá pak poměrně často výsledkem kompromisu,
- umístění polních zkoušek bývá často vůbec problematické; zvláštním případem jsou díla zřizovaná plnoprofilovými vrtacími stroji (TBM) s výrazným konfliktem postupu ražby a zkušební činnosti.

Rozsah a typy navržených a realizovaných polních zkoušek a měření by měl záviset především na náročnosti navrhované stavební konstrukce, potažmo na výstižnosti a složitosti použitého matematického či fyzikálního modelu hodnotícího spolupůsobení projektované konstrukce a horninového prostředí.

K tomuto kritériu pak přistupují obvykle hlediska ekonomická a časová. Je pak zřejmé, že širší nasazení polních zkušebních prací je přijatelné při přípravě (a často i při provádění) velmi náročných až mimořádných inženýrských staveb - např. vodohospodářských (vodní dílo - VD, přečerpávací vodní elektrárna - PVE) či podzemních (tunely městských drah, dálniční tunely, podzemní úložiště).

Charakteristiky, vystihující vlastnosti (resp. chování) horninového masivu, jsou obvykle členěny do následujících skupin: napjatostní, přetvárné, pevnostní, indexové, hydraulické. Zdaleka nejčastějšími polními testy v mechanice hornin jsou ověření přetvárnosti a pevnosti a zkoušky indexové.

*3.2.1.1 Zjišťování stavu napjatosti*

spočívá obvykle v ověření složek tenzoru původní geostatické napjatosti (tj. primární stav), méně častěji pak ve vymezení průběhu rozvolněné zóny a horninové klenby v okolí podzemního díla (tj. sekundární stav napjatosti).

Přes (značný) [17] sortiment zkušebních metod není zjištění stavu napjatosti masivu dodnes zcela vyřešenou úlohou, či snad naopak poněvadž se jedná o úlohu velmi složitou, je sortiment navržených metod rozsáhlý. Prakticky všechny metody kvantitativního určování stavu napjatosti (s cílem stanovit úplný elipsoid napjatosti) jsou odvozeny podle teorie pružnosti. Základním předpokladem je zde homogenní a izotropní výpočtový model, v řadě případů tedy ne právě srovnatelný se situací in situ (především v důsledku rozčlenění masivu systémy ploch diskontinuit).

Značnou komplikací ověření stavu napjatosti horninového prostředí je navíc nutnost definování úplného elipsoidu napjatosti, což extrémně znamená uspořádat komplikovaně měření do tří os (obvykle ortogonálních x, y, z - pro získání tří složek tenzoru napjatosti).

*3.2.1.2 Přetvárnost*

charakterizuje (obdobně jako u horninové hmoty) vztah mezi zatížením a deformací prostředí, a to v měřítku horninových bloků.

Polními zkouškami jsou běžně stanovovány pro horninový masiv pouze moduly pružnosti (E, $E_r$, resp. $E_{seis}$ či $E_{dyn}$) a moduly přetvárnosti ($E_{def}$, resp. $E_p$), rozuměno v tlaku, stejně jako Winklerovský součinitel (obvykle značený k). Poissonova čísla (v tlaku či tahu) stejně jako moduly tahové a modul pružnosti ve smyku (G) jsou polní zkouškou stanovovány velmi zřídka. V poli je přetvárnost nejčastěji stanovována statickými zatěžovacími zkouškami deskou a deformmetrickými sondami ve vrtech, když zvláštní pozornost, především při nasazení zatěžovacích desek, musí být věnována jejich rozměru a konstrukci (ve všech režimech tuhá deska). Vyhodnocení statických zatěžovacích zkoušek se v současné době provádí nejčastěji podle teorie pružného poloprostoru [např. 1, 2, 11, 14, 18].

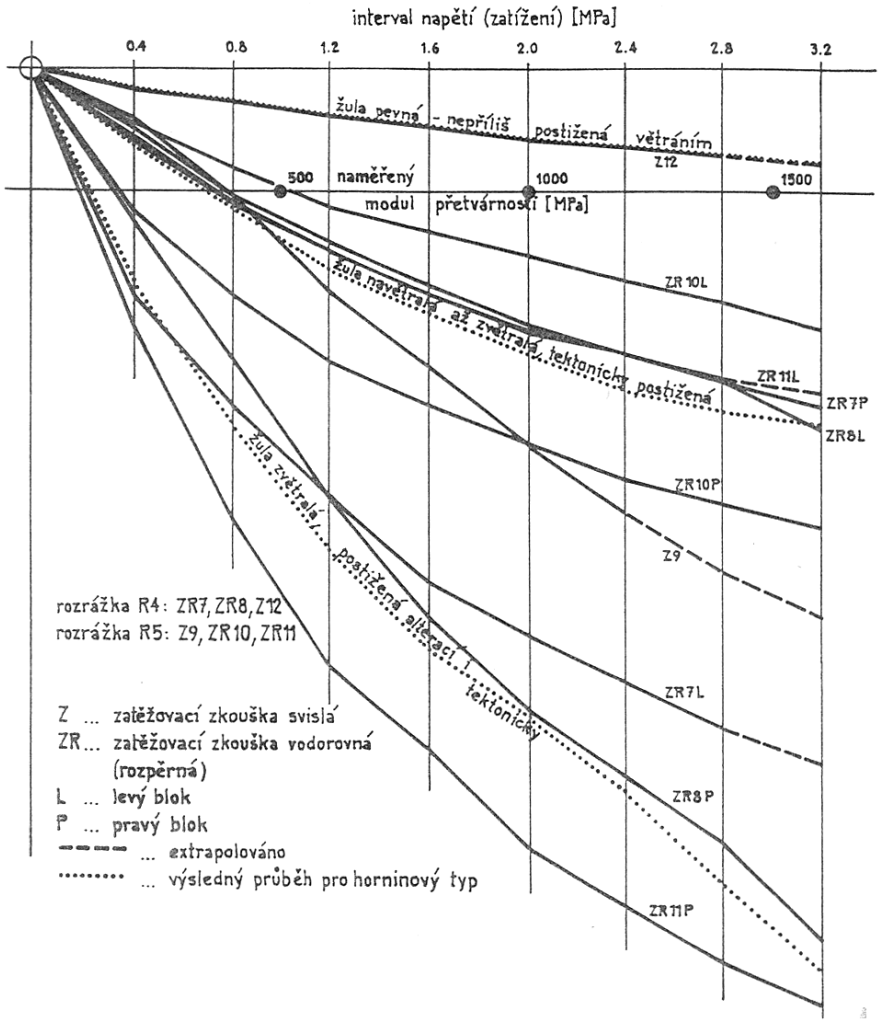
Autorem byla realizována řada i velmi rozsáhlých souborů měření na mnoha českých a slovenských lokalitách, jako např. při průzkumu pro kolektorovou síť v Jihlavě (tab. IV). S ohledem na to, že přetvárné charakteristiky jsou vázány na interval napětí (zatížení) lze výsledné hodnoty více měření vyjadřovat nejjednodušeji pomoci grafického průměru (obr. 2).

Tab. IV Výsledné moduly přetvárnosti $E_{def}$ a pružnosti E pro jednotlivé typy hornin.
Jihlava – kolektor - viz obr. 2

| Interval napětí [MPa] | | 0 – 0,4 | 0 – 0,8<br>0,4 – 0,8 | 0 – 1,2<br>0,8 – 1,2 | 0 – 1,6<br>1,2 – 1,6 | 0 – 2,0<br>1,6 – 2 0 | 0 – 2,4<br>2,0 – 2,4 | 0 – 2,8<br>2,4 – 2,8 | 0 – 3,2<br>2,8 – 3,2 | 0 – 3, 2 - 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Typ horniny | | Moduly přetvárnosti $E_{def}$ [MPa] a pružnosti E [MPa] | | | | | | | | |
| Žula pevná nepříliš postižená zvětráním | s<br>t<br>E | 1180 | 1420<br>1780 | 1560<br>1940 | 1710<br>2440 | 1710<br>2440 | 1870<br>3000 | 1930<br>2360 | 2120*)<br>3500*) | 3760 |
| Žula navětralá až zvětralá, tektonicky postižená | s<br>t<br>E | 330 | 355<br>380 | 370<br>410 | 410<br>575 | 435<br>565 | 465<br>680 | 505<br>1125 | 555<br>1730 | 1190 |
| Žula zvětralá, postižená alterací i tektonicky | s<br>t<br>E | 120 | 140<br>170 | 155<br>205 | 170<br>255 | 190<br>360 | 205<br>335 | 210<br>270 | 220<br>270 | 540 |

s – sekantový modul přetvárnosti
t – tangenciální modul přetvárnosti
*) extrapolováno

**Jihlava – kolektor - žula**




Obr. 2 Graficky provedené zhodnocení naměřených modulů přetvárnosti – Horák, 1987

*3.2.1.3 Pevnost*

charakterizuje horninový masiv (ať již tvořící vlastní inženýrskou konstrukci, či s vestavěnou konstrukcí spolupůsobící) při porušení. Uvádíme-li u horninové matérie, že: „vlastní pevnost zásadně ovlivňuje způsob zatížení (namáhání), stejně jako orientace zatížení vůči plochám oslabení …“, pak pro pevnost horninového masivu (realizovanou polními zkouškami v měřítku horninových bloků) to platí dvojnásob. Velmi výrazně se v tomto případě uplatňují oba faktory.

Z pohledu mechanismu namáhání horninového prostředí (resp. způsobu porušení masivu) lze odvodit následující typy pevností: smykovou, jednoosou tlakovou, trojosou tlakovou (triaxiální) a jednoosou tahovou.

Horniny se ponejvíce – což je pro geomateriály ostatně typické – porušují smykem. Příčina spočívá v tom, že dvouparametrická smyková pevnost (představovaná soudržností resp. počáteční smykovou pevností příp. zaklínováním a dále třením) tvoří hlavní vzdorující reakci proti pohybu části horninového tělesa zatíženého soustavou aktivních sil pohyb vyvolávajících.

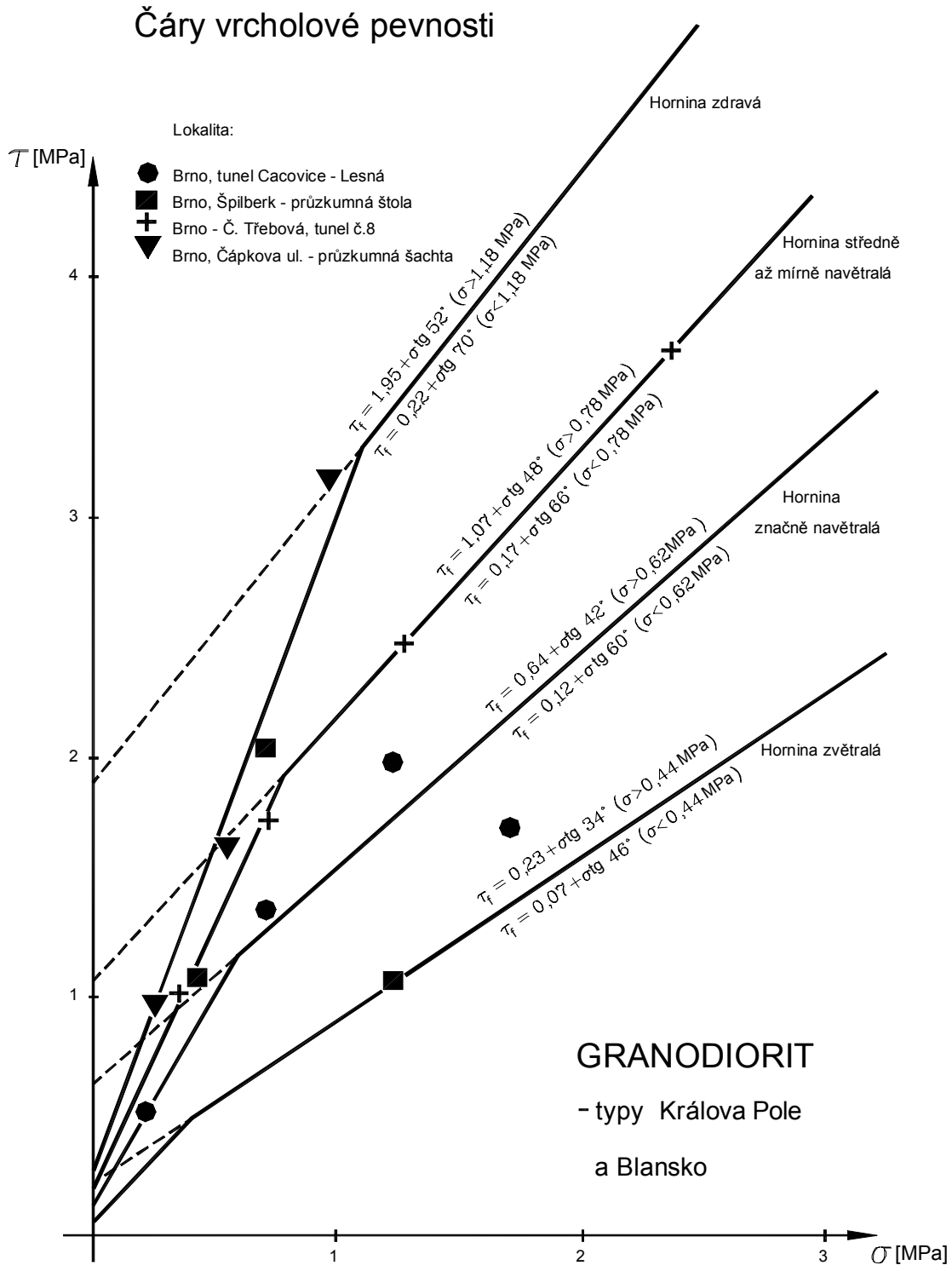
Podle uspořádání zkušební sestavy lze smykové zkoušky realizovat nejběžněji s předurčenou (vynucenou) plochou porušení, s volnou plochou porušení, příp. po plochách nespojitosti (po odlučných plochách).

Transformací výsledků smykových zkoušek na jednotlivých blocích horniny do Mohr-Coulombova zobrazení obdržíme čáry charakterizující stavy napjatosti, při kterých dochází ke změnám chování horninového prostředí (kluz, vrcholová a reziduální pevnost). Příslušné čáry, vyjadřující pevnosti či meze jsou u hornin představovány v tomto zobrazení obecnými křivkami s křivostí měnící se v závislosti na oboru normálného napětí (obr. 1). S ohledem na to, že z praktických důvodů jsou v jedné sadě realizovány obvykle čtyři smykové bloky (při různých normálných přítlacích) bývají předmětné čáry konstruovány jako přímka. Je-li to možné (s ohledem na testovaný obor normálného napětí) pak ve formě bilineární, lépe vystihující čáru měnící se křivosti. Příklad takového zhodnocení několika sérií smykových zkoušek autorem pro granodiority typu Královo Pole a Blansko je uveden na obr. 3 [5].

Jednoosá či trojosá tlaková pevnost, stejně jako pevnost jednoosá tahová jsou ověřovány v poli jen výjimečně. Platí to především pro pevnost tahovou. V případě potřeby (např. nutnost ustavení konstitučních vztahů při modelování MKP) lze zde použít korelačního vztahu mezi pevností v tlaku a v tahu (viz vztah (1) a tab. III).

*3.2.1.4 Indexové vlastnosti*

Jak bylo řečeno již výše je pro stanovení přetvárných a pevnostních charakteristik in situ nutné náročné, drahé a jednoúčelové testovací zařízení. Příprava zkušebních míst je velmi pracná (často nákladnější než samotná zkouška či měření). Až na výjimky jsou pak polní měření záležitostí bodovou, když výsledky jednotlivých měření jsou na masiv následně extrapolovány. A obdobně jako u laboratorních testů je v praktické mechanice hornin velmi často potřebné rychlé posouzení horniny, s použitím co nejjednoduššího přístrojového vybavení, podle potřeb ve větších metrážích (štoly, tunely) či plochách (stěny). Těmto požadavkům vyhovuje stanovení indexových charakteristik (či alespoň jedné charakteristiky), realizovatelných ve zmíněných metrážích či plochách vyšší četností a snadno korelovatelných do běžně používaných parametrů.




Obr. 3 Zhodnocení čtyř sérií smykových zkoušek s předurčenou plochou porušení. Granodiority typů Královo Pole a Blansko (Horák, 1988)

Jako polní lze zatím realizovat pouze dvě stanovení indexových vlastností:
Index pevnosti v bodovém zatížení (point load test), stanovený na nepravidelných tělíscích či úlomcích vrtných jader přímo v poli.
Skleroskopická tvrdost horniny je obdobně jako v laboratoři realizována Schmidtovým kladívkem původně konstruovaným pro testování betonu. Nejčastěji používaným typem je kladívko typu N, všestranně vyhovující vzhledem ke snadnému transportu i manipulaci a stejně tak i nárazovou energií 2,25 J. Při měření skleroskopické tvrdosti na přirozených plochách nespojitosti pro potřebu některých tunelářských klasifikací (např. Q systém – Barton et al.) je pak používáno, obdobně jako v laboratoři, kladívko typu L (nárazová energie 0,75 J).

Principem zkoušky, metodikou i vyhodnocením měření se detailně zabýval [16]. Autor pak s úspěchem zavedl statistické vyrovnání silně oscilující čáry tvrdosti (odskoků) s použitím klouzavého průměru z po sobě následujících hodnot měření.

Skleroskopická tvrdost horninového materiálu je velmi dobře korelovatelná (při použití jednoduchého dvouparametrického vztahu) na pevnost horniny v jednoosém tlaku (tzn. na nejpoužívanější mechanickou vlastnost a klasifikační charakteristiku).

$$R = \frac{1}{\frac{a}{\sigma_c} + b} \tag{2}$$

$R$ ….. odskok Schmidtova kladívka [%]
$\sigma_c$ …. pevnost horninové matérie v jednoosém tlaku [MPa]
$a, b$ … parametry [1]

Autorem práce byla provedena celá řada měření především na stavbách podzemních (např. obr. 4). Toto polní měření může pak velmi dobře korespondovat i s výsledky laboratorních měření fyzikálních vlastností horniny (obr. 5) [6].

*3.2.1.5 Hydraulické vlastnosti*

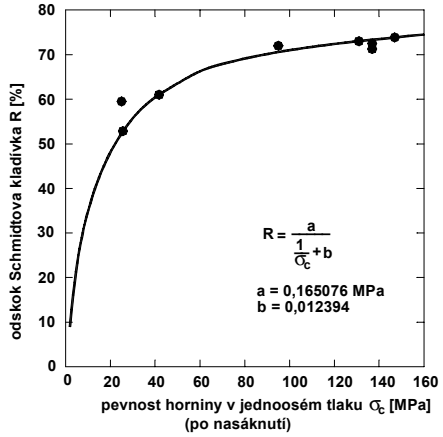
Popisují horninový masiv s ohledem na chování vody v masivu obsažené. Z tohoto pohledu se nejčastěji zabýváme pohybem vody (propustnost masivu, rychlost proudění) resp. tlakem, kterým může podzemní voda působit na stavební konstrukci.

### *3.2.2 Polní měření a monitoring*

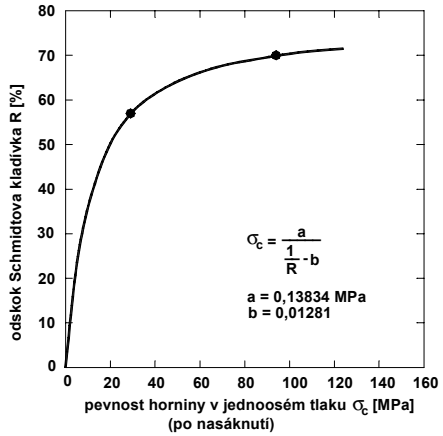
*3.2.2.1 Horninový masiv a jeho analýza*

Jen velmi obtížně lze stanovit mechanické vlastnosti celého předmětného horninového komplexu, a to proto, že čím větší geologický prostor je studován, tím více se v něm uplatňují strukturní fenomény, které způsobují, že na horninové prostředí je nutné nahlížet jako na prostředí anizotropní a nehomogenní. Právě strukturní jevy vedou geotechniku k poznání, že k serióznímu stanovení chování horninového masivu je nutné do řešení případ od případu zahrnovat i statistická data postihující vliv strukturních prvků nacházejících se ve spolupůsobícím masivu. V rozměrech horninového prostoru běžně dotčeného stavební činností je pak zahrnutí

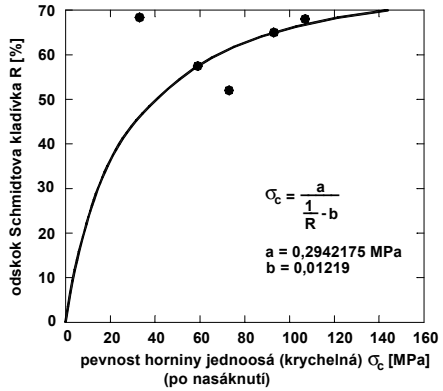
**PYROXENICKÝ ANDEZIT A JEHO KLASTIKA**
**(Banská Šťavnica - NOŠ)**



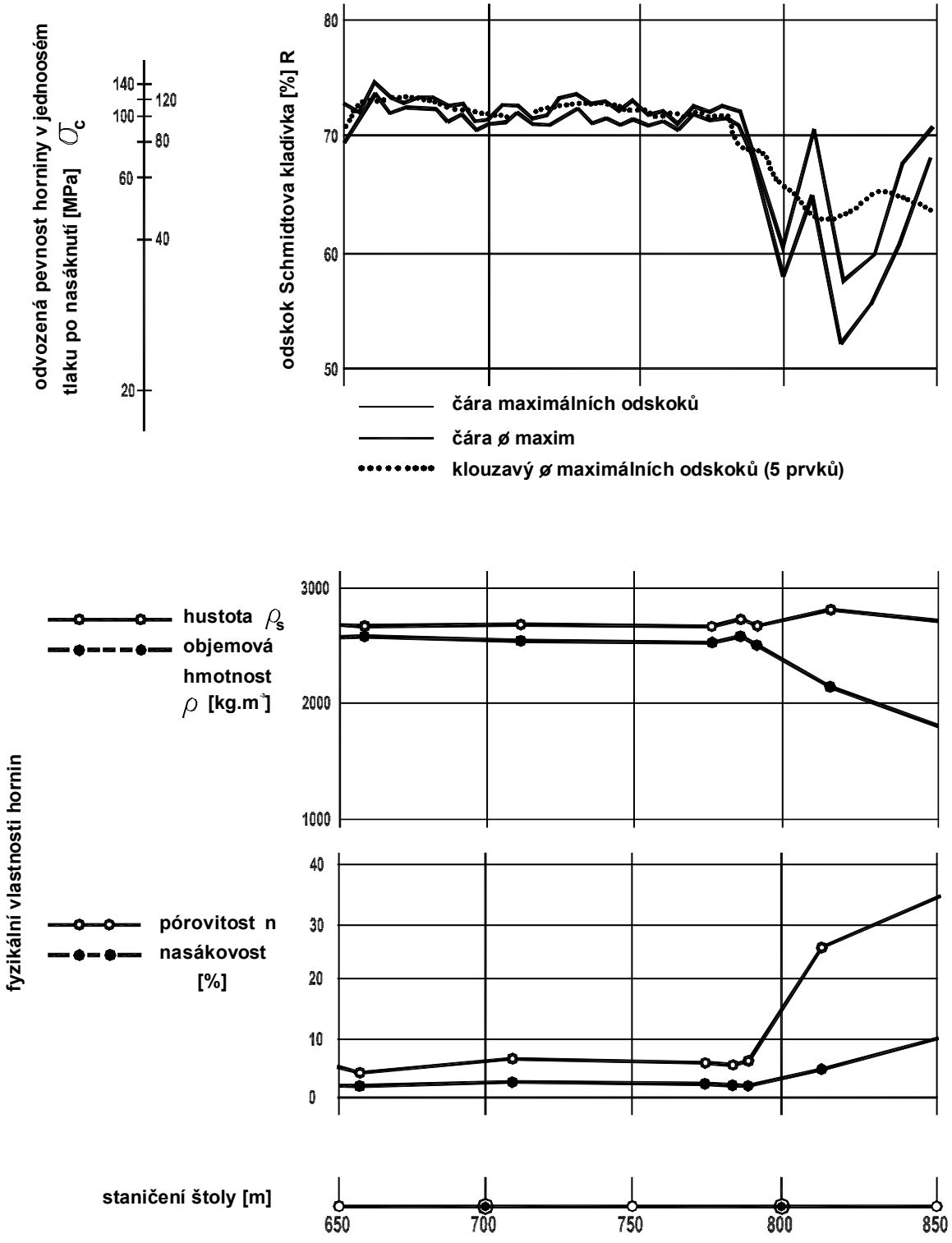

**ŽULA**
**(Znojmo - rotunda)**




**AMFIBOLITICKÉ RULY - AMFIBOLITY**
**víceméně migmatitizované**
**(tunel Branisko)**

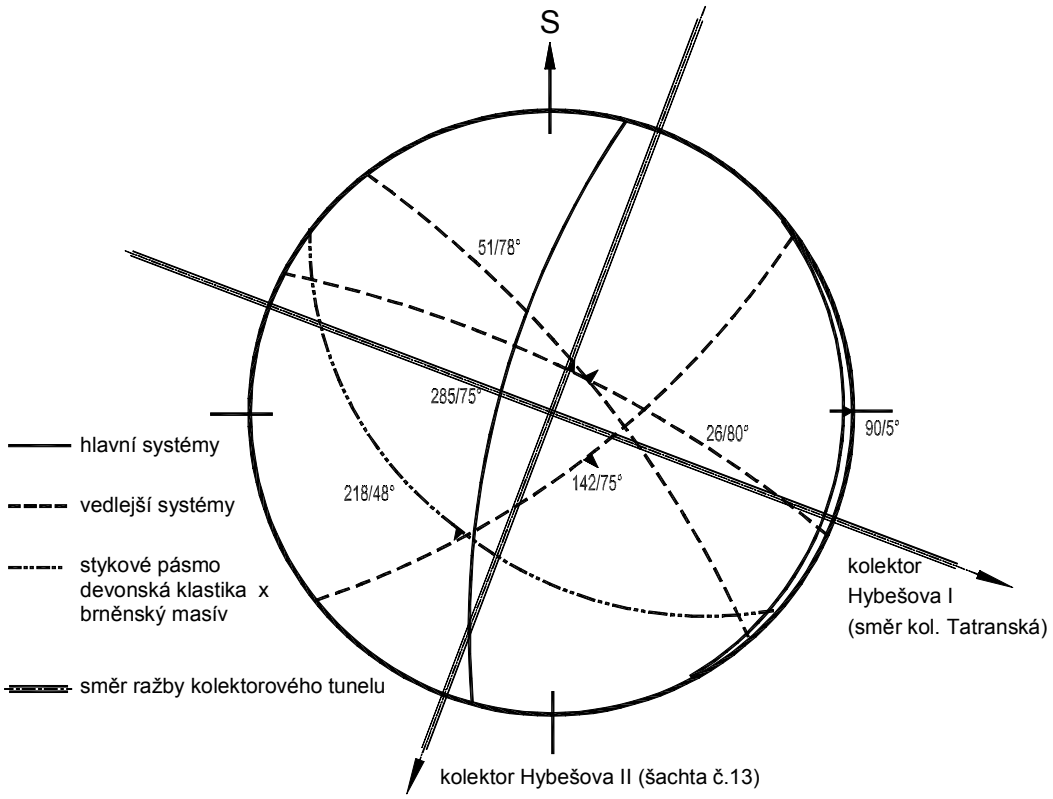



Obr. 4 Závislosti pevnosti horniny v tlaku na odskoku Schmidtova kladívka typu A (Horák, 1983, 1995, 1998)




Obr. 5 Srovnání výsledků polního měření Schmidtovým kladívkem korelovaného s pevností v jednoosém tlaku s výsledky laboratorních stanovení fyzikálních vlastností horniny po délce ražby podzemního díla – Nová odvodňovací štola Banská Štiavnica – pyroxenický andezit (Horák, 1989)

vlivu strukturní stavby víceméně rozhodné. Právě z těchto důvodů bývají projektovány mimo jiné i velkorozměrové polní zkoušky.Charakteristickým jevem určujícím strukturu horninového masivu je dělitelnost hornin – tzn. schopnost hornin odlučovat se podle ploch, velmi často seskupených do určitých systémů. V praktické mechanice hornin je pro většinu typů ploch nespojitosti (diskontinuity) standardně používán pojem puklina. I když se tím dopouštíme z hlediska geologické klasifikace vědomé nepřesnosti je takovéto pojmenování z pohledu technického účelu přípustné (i s přihlédnutím ke skutečnosti, že pukliny ve smyslu geologickém jsou běžně zdaleka nejčastějším typem oslabující diskontinuity). Klasifikovat pukliny je nutné z hlediska kvalitativního, kvantitativního i prostorově geometrického. Příklad vzájemného vztahu staticky ověřených puklinových systémů se zavedením směrů ražby tunelu je vykreslen na obr. 6.




Obr. 6 Vzájemný vztah puklinových systémů se zohledněním směrů ražby tunelu. Brno – kolektor Hybešova.
Bazální devonská klastika (pískovce a slepence old-red facie) a jejich styk s brněnským masivem. Dolní polokoule – velké oblouky, (Horák, 1986)

Kvalitativní a kvantitativní klasifikace ploch diskontinuity, jako i jejich prostorová orientace a geometrické rozmístění, jsou v současné době v oboru mechaniky hornin velmi preferovaným směrem vývoje směřujícím ke komplexnímu prostorovému řešení staveb (především podzemních) spolupůsobících s dotčeným horninovým masivem. Při exploataci masivu je tedy (zvláště s ohledem na moderní metody matematického modelování) nezbytně nutné identifikovat teorii puklinatosti.

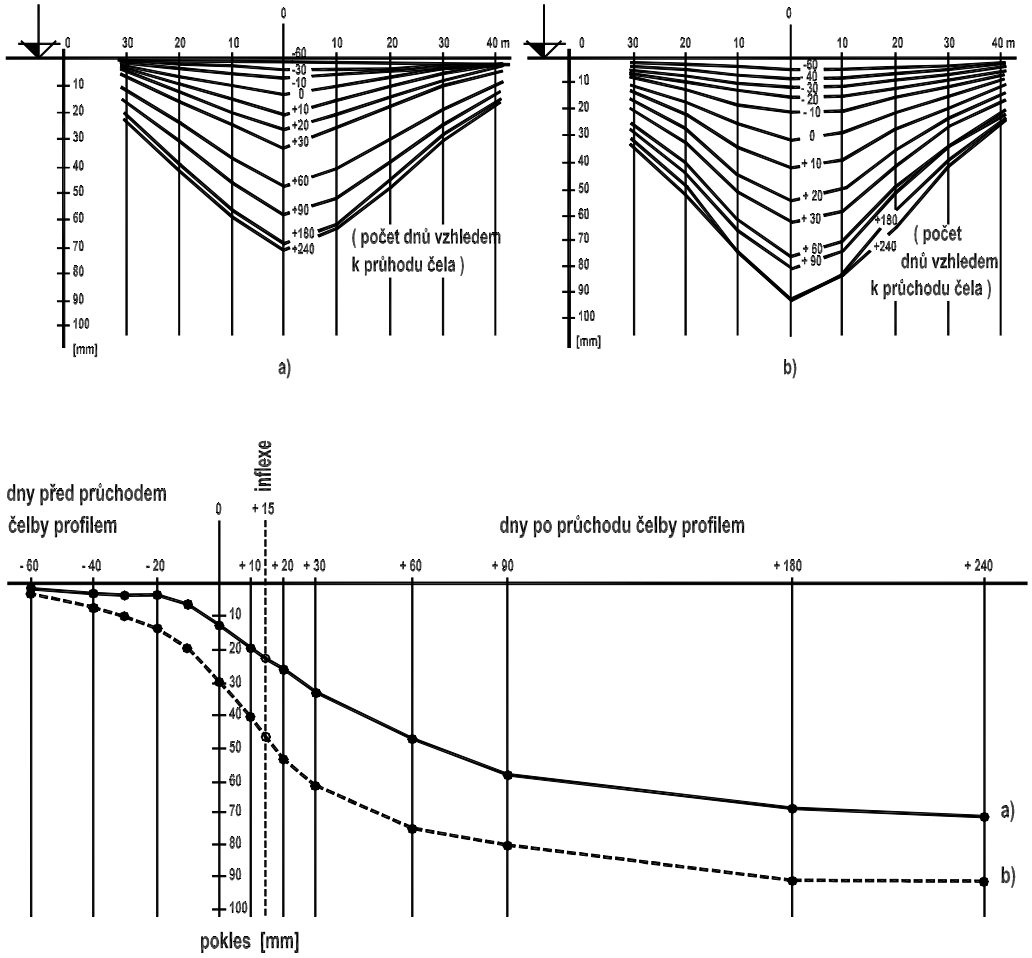
*3.2.2.2 Monitoring*

je souborem činností (především měření, resp. sledování) zaměřených na horninové prostředí či stavební konstrukci (běžně při jejich vzájemném spolupůsobení). Cílem monitoringu je ověřit zda chování konstrukce či masivu (resp. spolupůsobícího systému) odpovídá ve všech stadiích realizace i provozu předpokladům návrhu nebo zda je momentální či dlouhodobý stav systému bezpečný (observační procedura). Pouze monitorováním můžeme potvrdit tzv. „varovné stavy“ (příp. na bezpečné straně jich nedosáhnout). Nejběžnějšími veličinami sledovanými při monitorování jsou deformace (posuny, poklesy, pootočení) a stavy napjatosti resp. zatížení (tlaky, tahy, smyk).

Návrh monitorovacího systému a jeho instalace se nazývá instrumentací.

Monitoring (co nejrozsáhleji nasazený a co nejrychleji, pokud možno v reálném čase, vyhodnocený) je nezbytnou podmínkou uplatnění jedné z nejprogresivnějších současných metod navrhování geotechnických konstrukcí metody observační; nicméně monitoring nelze s touto metodou ztotožnit.

Některé výsledky monitorování deformací povrchu území při stavbě kolektorových tunelů v Brně ověřené autorem vyplývají z obr. 7 [7].




Obr. 7 Brno – kolektor Tkalcovská. Vývoj poklesové kotliny nad osou tunelu. Časová závislost deformace povrchu území vztažená k průchodu čelby sledovaným řezem

a) Neogenní jíly pevné, nepříliš rozpukané

b) Neogenní jíly méně pevné, silně rozpukané

(Horák, 1992)

# 4 ZÁVĚR

Význam matematických a experimentálních metod je plně potvrzen současnými trendy při řešení závažných problémů se kterými se v rámci intenzívně se rozvíjejícího oboru geotechniky setkává i mechanika hornin (navrhování konstrukcí, řešení stavu napjatosti a deformace horninového tělesa spolupůsobícího se stavební konstrukcí, zjišťování a použití konstitučních vztahů při aplikaci numerických metod apod.).Lze pak pouze očekávat, že tento význam i nadále poroste.

Například nynější postupy pro navrhování geotechnických konstrukcí (EC 7) hovoří o použití (mimo jiné) jak numerických metod, tak metod a postupů experimentálních když lze postupovat (jednotlivě či v kombinaci) při návrhu metodami:

- statického výpočtu,
- přijetím předepsaných opatření,
- experimentálních modelů a zatěžovacích zkoušek, příp.
- observačně.

Celkovou představu o chování konkrétního horninového tělesa spolupůsobícího se stavební konstrukcí při jeho zatěžování či odlehčování lze pak opět získat:

- numerickým modelováním,
- fyzikálním modelováním v laboratoři, či
- měřením in situ (monitorováním v měřítku 1:1), resp. kombinací těchto postupů (viz např. „zpětná analýza“).

Mimořádného významu nabývají experimentální metody s rozvojem numerických metod při ověřování a stanovování geotechnických dat vstupujících do výpočtu (tzv. „konstitučních vztahů“).

Numerické a s nemenším významem i experimentální metody zaujaly v mechanice hornin pevné, nezastupitelné místo, přičemž zároveň vzrůstá i jejich vzájemná vazba a význam.

# SEZNAM ODKAZŮ NA LITERATURU


[1] Bohyník, Julius, Groma, Bartolomej: Stanovenie pretvárnych charakteristík hornín pod zaťažovacou deskou. IGHP Žilina, 1990

[2] Feda, Jaroslav: Určování vlastností základové půdy pomocí zatěžovací zkoušky deskou. Sborník přednášek semináře Polní geotechnické metody. Liberec, 1982

[3] Goodman, Richard, E.: Introduction to Rock Mechanics. John Wiley&Sons, London – N.Y.-Sydney,1980

[4] Goodman, Richard, E.: Měchanika skalnych parod. Strojizdat, Moskva, 1987

[5] Hanák Jaroslav, Horák, Vladislav: Geotechnické vlastnosti granodioritů východní granitoidové zóny brněnského masivu. Ročenka GMS 1986-1987, str. 219-231, GEOTEST Brno, 1988

[6] Horák, Vladislav: Zkušenosti s prováděním polních zkoušek v dlouhých podzemních dílech ražených strojně na plný profil. Sborník příspěvků „Polní geotechnické metody – Liberec 89“, str. 121-126, DT ČSVTS, Ústí nad Labem, 1989

[7] Horák, Vladislav: Deformation measuring carried out during the construction of a service tunnel – Malinovsky Square, Brno. Sborník VUT v Brně, ročník 1992, číslo 1, str. 29-36, VUT, Brno, 1992

[8] Horák, Vladislav: Prognóza mechanického chování hornin a její využití v geomechanice. Kandidátská disertační práce, VUT FAST Brno, 1992

[9] Horák, Vladislav: A new method for the experimental relation between rock pressure strength and rock tensile strength. Sborník příspěvků mezinárodní konference RILEM „Behaviour of concrete structures“, str. 56-59, Expertcentrum, Bratislava, 1995

[10] Horák, Vladislav, Miča, Lumír: Viewing possibility of creation of the settlement trough on the surface of the area above the tunnel and matching the mathematics modeling with the empirical (semi-empirical) methods. Proc. Int. Con. Underground Construction 2000 pp.245-251, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2000

[11] Kameníček, Ivan, Trávníček, Ivan: Zkoušky na hornině in situ - návrh a výběr zkoušek pro projekci. Závěrečná zpráva dílčího úkolu P-12-526-00-08-2.2, VUT FAST, katedra geotechniky, Brno, 1975

[12] Kim, M. K., Lade, P. V.: Modelling rock strength in three dimensions, Int. J.Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. Vol.21, No.1, pp.21-33, 1984

[13] Kolektiv pod vedením J. Zavorala: Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin, III. Mechanika hornin. ČGÚ Praha, 1987

[14] Malgot, Jozef, Klepsatel, František, Trávníček, Ivan: Mechanika hornín a inžinierska geológia. ALFA Bratislava, 1992

[15] Nazari, Ferydun: Geotechnika I. VUT FAST Brno, ES VUT Brno, 1981

[16] Pavlík, Jiří: Srovnání tvrdosti hornin zjištěných Schmidtovým kladívkem in situ s některými laboratorními zkouškami. Úkol TR 0153, GEOTEST Brno, 1973

[17] Pavlík, Jiří: Způsoby měření napjatosti horninového masivu. SVÚ Intergeotechnika N-01-347-813; dílčí úkol 2.4.6. GEOTEST Brno, 1987

[18] Sinha, R. S.: Investigations and testing. Underground Structures - Design and Construction, Elsevier, 1991

[19] Vaníček, Ivan: Geotechnika – aktuální poznatky, nejnovější trendy. Stavební ročenka 2000, str. 160-173, ČSSI-ČKAIT, Praha, 1999

[20] Záruba, Quido, Mencl, Vojtěch: Inženýrská geologie, kapitola 3, mechanické vlastnosti hornin, SIS ČSSI, Brno, 1999

**ABSTRACT**

This paper focuses on problems with the experimental methods in rock mechanics (rock mechanics are included as a significant part of geotechnics). Rock mechanics solve many tasks and use many mathematical and experimental methods. Both these methods are closely related one another.

Mathematical methods are divided into analytical and numerical methods. Analytical methods are regarded as classical, generally extended for their simplicity and comprehensibility. Numerical methods (especially MKP) are considered to be modern methods, with various usages in geotechnics (and also in rock mechanics). Analytical and numerical methods put high demands on constitutional relations entering calculation.

The only objective way how to determine these constitutional relations and to verify results which have been uncovered trough mathematical modelling is to realise laboratory and in-situ experiments and measurements (eventually investigation).

Experimental methods are being realised in laboratory and in-situ. In laboratory, there can be posed and loaded models (most often made of equivalent materials) and also tested rocks. Laboratory testing consists of many items. The author lays stress on mechanical characteristics determination (especially strain and tensile strength).

In-situ rock testing (complemented with measurements and investigation) has remarkable significance within rock mechanics. It results from the fact, that rock massif is sectioned by discontinuity areas (mainly cracks) – rock environment divided by structural – textural phenomenon becomes anisotropical and heterogeneous. It is necessary to study huge blocks of rock massive.

The major part of the paper is dedicated to applying mentioned works for rock massive characteristics (constitutional relation) determination and for determination of the rock conduct as an co-operative component of constructive system and rock environment. An estimation of separate testing types and measurements is implemented in the paper and introduced a range of results verified at many Czech and Slovak localities.

In the conclusion of the paper, there are summarised monitoring fundamentals and assessed mathematical and experimental methods significance in connection with geotechnical construction designing methods.