

Ing. Martin Marušák, VÚHU

## PŘEDBĚŽNÉ VÝSLEDKY Z VÝZKUMU PEVNOSTNÍCH A PŘETVÁRNÝCH VLASTNOSTÍ ZEMIN

### Úvod

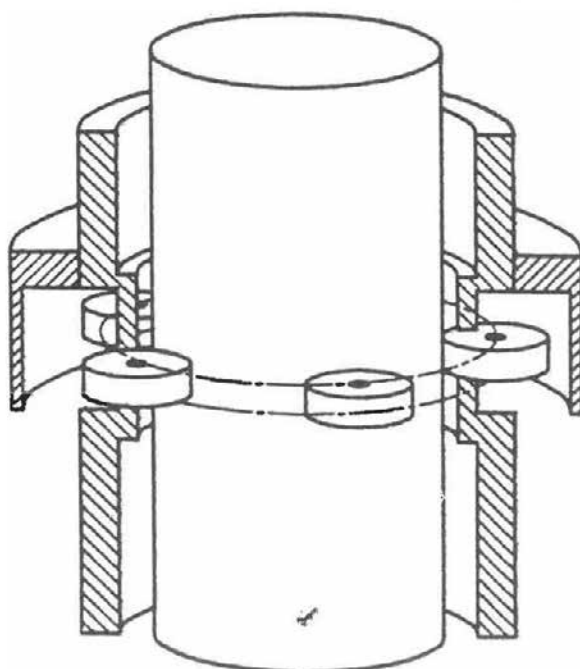
Nové metody výpočtů stability výsypek a skrývkových svahů, mezi něž patří například metoda konečných prvků, s sebou přináší nutnost přesně specifikovat vlastnosti materiálů, z nichž je sledovaná lokalita tvořena. K výpočtům je třeba znát celou řadu fyzikálně mechanických hodnot, jako je například hodnota zbytkové pevnosti  $c$ , úhel vnitřního tření, modul pružnosti  $E$ , Poissonovo číslo  $\nu$ , případně další parametry. Hodnoty jednotlivých veličin však zpravidla nejsou v celém rozsahu zatěžování konstantní, ale mění se v závislosti na řadě parametrů. To s sebou přináší řadu obtíží jak při realizaci výpočtů, tak při zjišťování těchto hodnot v laboratorních podmínkách.

Protože je metoda konečných prvků používána i ve VÚHU, byla zahájena dlouhodobá série měření, jejímž úkolem je zjistit potřebné mechanické vlastnosti skrývkových materiálů nacházejících se v SHR, a tyto vlastnosti pokud možno interpretovat ve formě vhodné pro aplikaci matematických modelů zemin. V praxi to tedy znamená, že například u hodnot modulu pružnosti a Poissonova čísla nebyla u každého zkoumaného vzorku stanovena pouze jediná jeho hodnota, ale více hodnot tak, aby bylo možno vysledovat závislost jejich změny na zatížení.

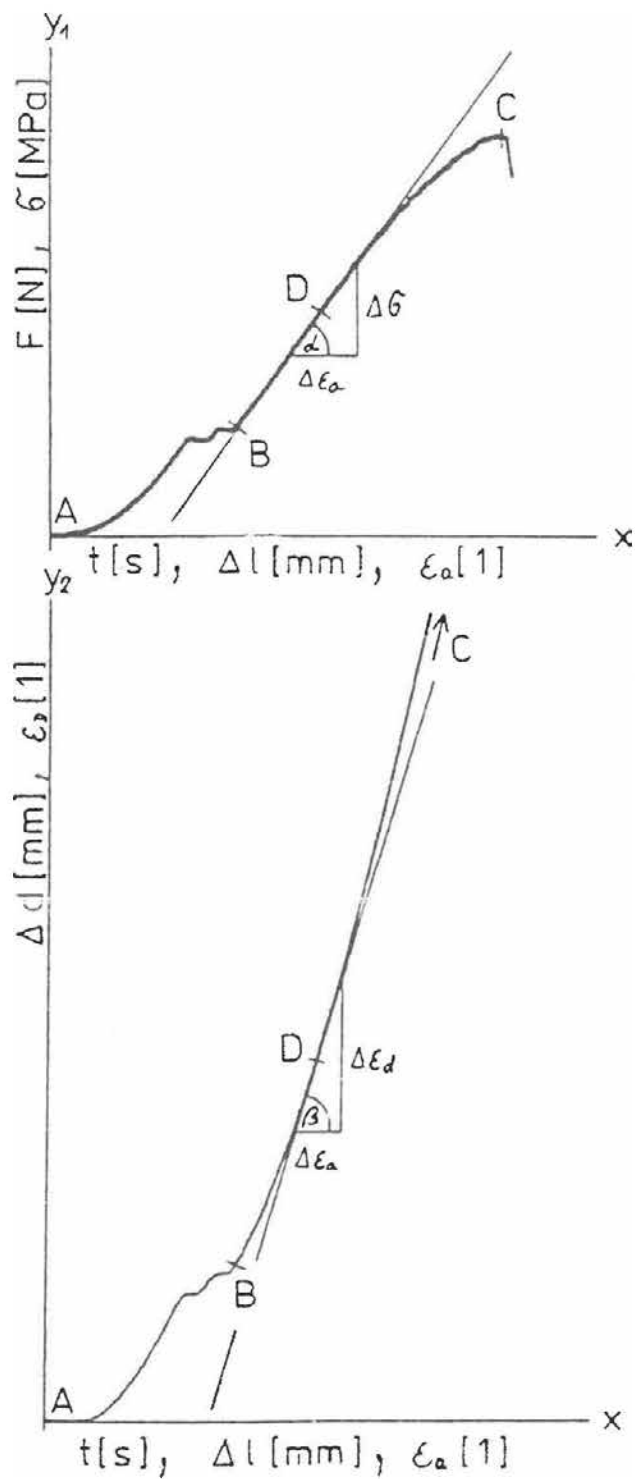
### Realizace měření

Vlastní měření za účelem zjišťování modulu pružnosti  $E$ , Poissonova čísla a meze pevnosti v prostém tlaku byla prováděna pomocí deformometru. Tato zkouška je v podstatě určitým rozšířením zkoušky v prosté pevnosti. Zkoušený materiál je opracován do tvaru válečku s rozměry  $\varnothing 38$  a délkou 76 mm a poté rovnoměrně zatěžován osovým tlakem až do porušení. Na rozdíl od zkoušky prostým tlakem se nesleduje pouze síla působící na zkušební tělísko, ale též jeho rozšíření ve střední zóně. Díky tomu lze přímo určit Poissonovo číslo. K měření rozšíření se používá válcová komora s měřicím řetězem opatřeným kladičkami, který vzorek obepíná uprostřed jeho výšky. Oba konce řetězu jsou přitom připevněny ke snímačům měřicím vzájemné posunutí. Zkušební komora se vzorkem a kladičkami měřicího řetězu je vyobrazena na obr. 1.

Obr. 1



Obr. 2



Při vlastním měření jsou zaznamenávány a vyhodnocovány následující parametry :

- velikost osově síly působící na vzorek /N/,
- příčné rozšíření zkušebního tělíska /mm/,
- osově stlačení tělíska /mm/.

Vzhledem k tomu, že k zatěžování tělíska se používá lis umožňující realizovat pouze konstantní přírůstek deformace (nikoliv konstantní přírůstek síly, jak je doporučováno v metodice laboratorních zkoušek zemin), lze měření osověho stlačení pokládat pouze za informativní, případně ho úplně vynechat, neboť je lineární a je dané rychlostí pohybu lisu. U všech zde uvedených zkoušek byla použita rychlost zatěžování 1,5 mm/min.

Bezprostředním výsledkem zkoušky je záznam osově síly a příčné deformace zkušebního tělíska (obr. 2). Počáteční bod zkoušky je okamžik, kdy na vzorek začne působit osová zatěžovací síla - bod A. V počáteční fázi zatěžování, v úseku mezi body A a B, nebývá záznam síly zpravidla zcela hladký, neboť dochází k zatlačování drobných nerovností na čelech vzorku do materiálu, stlačování možných příčných trhlinek, případně dalším dějům. Úsek mezi body B a C představuje souvislou oblast se souvislou deformací a bod C pak nejvyšší hodnotu zatížení, při které zpravidla dojde k mechanickému porušení tělíska. K tomuto bodu se vztahuje mez pevnosti materiálu v prostém tlaku. Za předpokladu, že počáteční rozměry zkušebního tělíska jsou ve všech případech stejné a rychlost pohybu lisu konstantní, pak osa x záznamu odpovídá také času  $t$ , osově deformaci  $\Delta l$  (neboť  $\Delta l = v \cdot \Delta t$ , kde  $v$  je rychlost pohybu lisu = konst.) a poměrnému osovému zkrácení  $\epsilon$  (neboť  $\epsilon = \Delta l / l$ , kde  $l$  je původní výška vzorku = konst.) Na ose y záznamu síly lze odečítat osovou sílu  $F$  působící na vzorek a také napětí ve vzorku  $\sigma$  (neboť  $\sigma = F/S$ , kde  $S$  je plocha průřezu vzorku = konst.). Osa y záznamu příčné deformace představuje jednak vlastní příčnou deformaci  $\Delta d$ , ale také poměrné zkrácení  $\epsilon_D$  (neboť  $\epsilon_D = \Delta d / d$ , kde  $d$  je původní průměr vzorku = konst.). Je samozřejmé, že jednotlivé parametry na téže ose mají různé hodnoty i jednotky, nicméně navzájem jsou na sobě lineárně závislé.

Požadované hodnoty modulu pružnosti  $E$  a Poissonova čísla  $\nu$  jsou úměrné úhlům  $\alpha$  a  $\beta$ , které s osou  $x$  svírají tečny v určitém bodě zaznamenaných křivek (na obr. 2 např. bod D).

Aby bylo možno určit vztah, na základě kterého se tyto hodnoty mění v závislosti na zatížení, byly jednotlivé odečty prováděny vždy ve dvou bodech zaznamenaných křivek. Protože tyto body musely být jednoznačně definovány, byly určeny jako body odpovídající napětí na 35 a 70 % meze pevnosti v prostém tlaku. Tyto body lze definovat též jako body odpovídající míře bezpečnosti 2,86 a 1,43, pokud definujeme míru bezpečnosti jako poměr napětí na mezi pevnosti k libovolnému obecnému napětí.

Do poloviny října 1991 bylo provedeno měření na 15 vzorcích materiálu, při nichž bylo zpracováno kolem 120 zkušebních válečků. V první etapě (do poloviny května 91) bylo zpracováno a vyhodnoceno 7 vzorků rostlého jílovitého materiálu, u kterých nebyly zjišťovány hodnoty meze tekutosti, indexu plasticity a konzistenčního čísla. Protože se zdálo, že na těchto hodnotách mohou záviset i vzájemné vztahy mezi ostatními veličinami, u dalších odebíraných vzorků již tyto hodnoty byly laboratorně stanovovány. Protože výsledky získané z rostlých vzorků nelze jednoznačně aplikovat při výpočtech výsypek z porušených materiálů, byly navíc ve druhé etapě řešení ověřovány možnosti provádění zkoušek na deformometru též se vzorky z porušených materiálů. Sypanina uměle připravená strouháním a zbytky materiálu po obrábění zkušebních válečků s velikostí zrn max. 4 mm byly nejprve stlačeny ve čtvercové krabici vysokotlakého smykače do kompaktního bloku s rozměry 80 x 160 x 160 mm a teprve z něj byly připraveny zkušební válečky. Při konsolidaci materiálu po dobu jedné hodiny při tlaku

1 MPa byl sice blok kompaktní, ale válečky se při přípravě rozpadaly. Teprve při konsolidaci při tlaku 3 MPa po dobu jedné hodiny bylo možno ze vzniklého bloku připravit potřebná zkušební tělíska. Protože však i za těchto podmínek byla jejich příprava náročná a některá tělíska praskla, byly zkoušky prováděny i v tom případě, jestliže se podařilo připravit alespoň tři standardní tělíska. Hodnota vtláčné pevnosti nebyla u těchto uměle připravených materiálů zjišťována. Zkoušky materiálů ze sypaniny byly provedeny u čtyř vzorků, u jednoho z nich též ze sypaniny připravené konsolidací při tlaku 5 MPa. Výsledné hodnoty získané zprůměrováním výsledků získaných z jednotlivých zkušebních tělísek jsou uvedeny v tabulce 1, kde jsou jednotlivé vzorky za sebou seřazeny podle hodnot pevnosti v prostém tlaku.

### Získané výsledky

Po zpracování první série sedmi vzorků se vztahy mezi některými veličinami jeví jako poměrně výrazné, např. vztah lineární závislosti mezi hodnotou vtláčné pevnosti a E35. Bohužel však rozšířený soubor hodnot tento vztah nepotvrdil. Není možno ani prokázat jednoznačnou závislost hodnot modulů pružnosti, případně Poissonova čísla na vlhkosti nebo na hodnotách souvisících se stanovením plasticity. Zakreslíme-li jednotlivé získané hodnoty do grafu v závislosti na uvedených veličinách, vznikne vždy "mrak" bodů, z něhož lze těžko vysledovat jakoukoliv vzájemnou závislost.

Téměř s jistotou lze konstatovat, že hodnoty Poissonova čísla  $\nu_{70}$  (tedy získané při větším zatížení) jsou větší než hodnoty  $\nu_{35}$  (viz obr.4). Průměrná hodnota  $\nu_{35}$  je 0,27, průměrná hodnota  $\nu_{70}$  je 0,41.

Hodnoty modulů pružnosti E35 a E70 vykazují značný rozptyl (viz obr.3) a pravděpodobně se zvětšují s rostoucí pevností v prostém tlaku.

Hodnota vtláčné pevnosti prakticky nejvýrazněji závisí na vlhkosti, tato závislost je naznačena na obr. 5.

Je zřejmé, že jednoznačné nalezení určitých zjednodušených souvislostí mezi hodnotami jednotlivých veličin bude poměrně problematické, pokud vůbec bude možné. Každopádně je na tyto účely statistický soubor o patnácti položkách poměrně malý a práce na rozšíření tohoto souboru dál pokračují.

Zajímavé je porovnání jednotlivých hodnot mezi rostlými vzorky a vzorky z uměle připravené sypaniny. Všechny sledované hodnoty, tedy E35, E70,  $\nu_{35}$ ,  $\nu_{70}$  a hodnota pevnosti v prostém tlaku jsou u vzorků ze sypaniny menší než u vzorků z rostlého materiálu (viz obr. 7, 8), ne však v určitém konstantním poměru. Naopak zvláště u hodnoty pevnosti v prostém tlaku došlo k výraznému vyrovnání hodnot u všech vzorků (viz obr. 6). Obdobná situace vznikla až na výjimku vzorku č. 1031 také u Poissonova čísla při zatížení na 70% meze pevnosti ( $\nu_{70}$ ).

Hodnoty Poissonova čísla při napětí 35 % meze pevnosti v prostém tlaku ( $\nu_{35}$ ) prakticky nelze u sypaniny konsolidované při 3 MPa považovat za platné, neboť u řady vzorků při tomto zatížení ještě žádná příčná deformace nevznikla nebo byla velmi malá. To je způsobeno tím, že v počáteční fázi zatěžování dochází nejprve ke zmenšování mezer mezi jednotlivými zrny a teprve později k příčné deformaci materiálu.

O jednoznačnosti vztahů mezi sypaninou a rostlým materiálem platí to samé co u souboru hodnot rostlých vzorků. Statistický soubor je zatím příliš malý na to, aby mohl dát spolehlivé výsledky.

I v dalším období tedy budou zkoušky na deformometru pokračovat, hlavně z toho důvodu, aby bylo možné získat dostatečně velký počáteční statistický soubor, který je schopen dát reprezentativní výsledky. Na základě dosavadních výsledků je však možno usoudit, že se pravděpodobně nepodaří najít jednoduchý

Tabulka výsledků - rostlé vzorky:

Tabulka 1

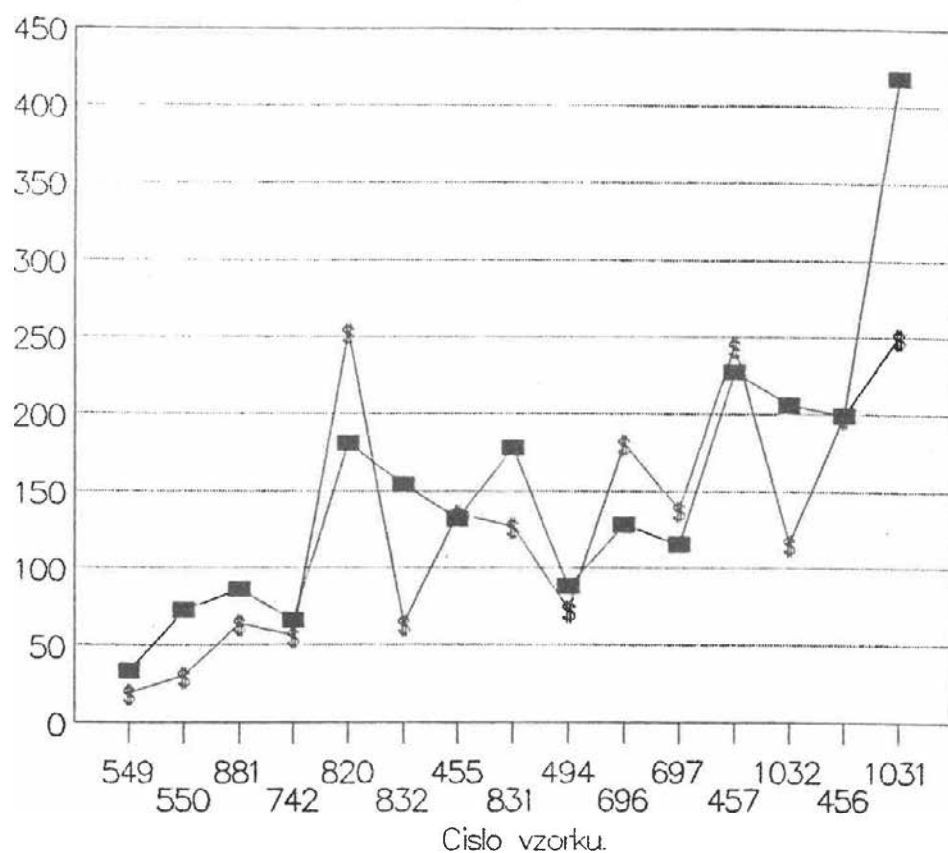
| vzor.<br>číslo | pr. tlak<br>MPa | E35<br>MPa | E70<br>MPa | v35<br>1 | v70<br>1 | I35<br>MPa | I70<br>MPa | vtlač.<br>MPa | vlh.<br>% | mez.<br>tek. | ind.<br>plast | konz.<br>čís. |
|----------------|-----------------|------------|------------|----------|----------|------------|------------|---------------|-----------|--------------|---------------|---------------|
| 549            | 0.53            | 33         | 19         | 0.211    | 0.332    | 210        | 421        | 1.65          | 35.5      |              |               |               |
| 550            | 0.93            | 72         | 30         | 0.226    | 0.380    | 369        | 739        | 2.54          | 32.9      |              |               |               |
| 881            | 1.08            | 86         | 64         | 0.467    | 0.57     | 431        | 861        | --            | 15.7      | 54.4         | 32.4          | 1.15          |
| 742            | 1.22            | 66         | 56         | 0.383    | 0.414    | 483        | 966        | 11.96         | 15.9      | 37.4         | 20.1          | 1.16          |
| 820            | 1.39            | 181        | 253        | 0.49     | 0.491    | 553        | 1105       | 9.15          | 16.9      |              |               |               |
| 832            | 1.65            | 154        | 64         | 0.336    | 0.496    | 654        | 1303       | 11.34         | 16.9      | 53.4         | 28.2          | 1.28          |
| 455            | 1.76            | 132        | 135        | 0.202    | 0.455    | 698        | 1396       | 7.12          | 23.3      |              |               |               |
| 831            | 1.80            | 178        | 127        | 0.328    | 0.328    | 716        | 1433       | 4.63          | 24.1      | 71.6         | 43.1          | 1.10          |
| 494            | 1.87            | 88         | 73         | 0.204    | 0.489    | 744        | 1487       | 4.66          | 22.8      |              |               |               |
| 696            | 1.89            | 128        | 181        | 0.227    | 0.478    | 749        | 1499       | 15.72         | 11        | 30.4         | 12.9          | 1.47          |
| 697            | 1.97            | 115        | 138        | 0.319    | 0.405    | 781        | 1562       | 7.70          | 13.8      | 38.3         | 18.7          | 1.31          |
| 457            | 2.51            | 227        | 244        | 0.128    | 0.208    | 996        | 1992       | 10.56         | 21.7      |              |               |               |
| 1032           | 2.51            | 206        | 116        | 0.284    | 0.426    | 995        | 1991       | 22.49         | 15.9      | 43.8         | 22.2          | 1.29          |
| 456            | 2.52            | 199        | 199        | 0.124    | 0.257    | 999        | 1998       | 9.85          | 22.9      |              |               |               |
| 1031           | 3.50            | 418        | 250        | 0.131    | 0.383    | 1387       | 2774       | 11.41         | 15.0      | 39.9         | 22.1          | 1.27          |

Tabulka výsledků - sypanina:

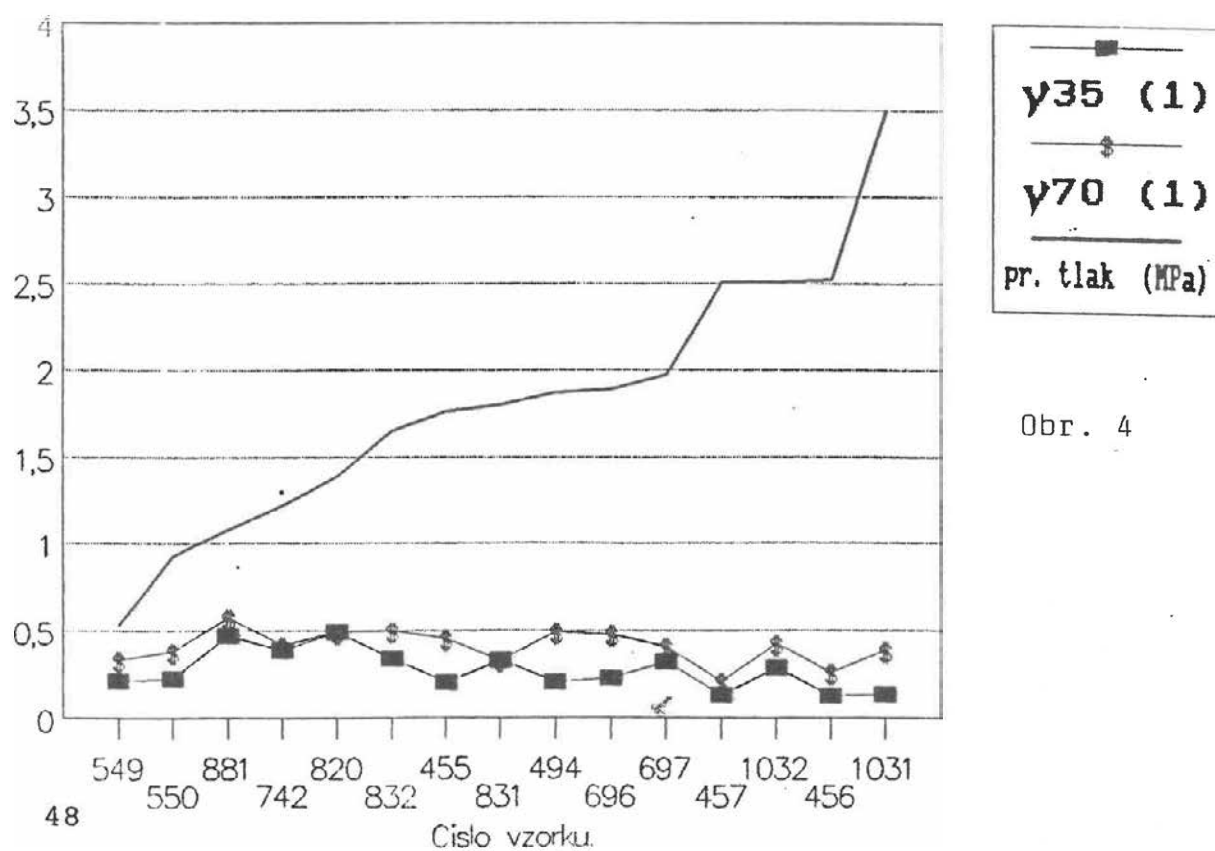
| vzor.<br>číslo | pr. tlak<br>MPa | E35<br>MPa | E70<br>MPa | v35<br>1 | v70<br>1 | I35<br>MPa | I70<br>MPa | vlh.<br>% |
|----------------|-----------------|------------|------------|----------|----------|------------|------------|-----------|
| 1031s3         | 0.64            | 78         | 44         | 0        | 0.116    | 354        | 508        | 12.9      |
| 832s3          | 0.69            | 66         | 31         | 0.070    | 0.400    | 275        | 550        | 25.2      |
| 1032s3         | 0.73            | 83         | 41         | 0.033    | 0.393    | 290        | 576        | 15.3      |
| 742s3          | 0.75            | 28         | 19         | 0.250    | 0.400    | 299        | 597        | 15.6      |
|                |                 |            |            |          |          |            |            |           |
| 832s5          | 1.09            | 97         | 27         | 0.227    | 0.451    | 432        | 863        | 25.2      |

## Průběh hodnot E35 a E70

E [MPa]

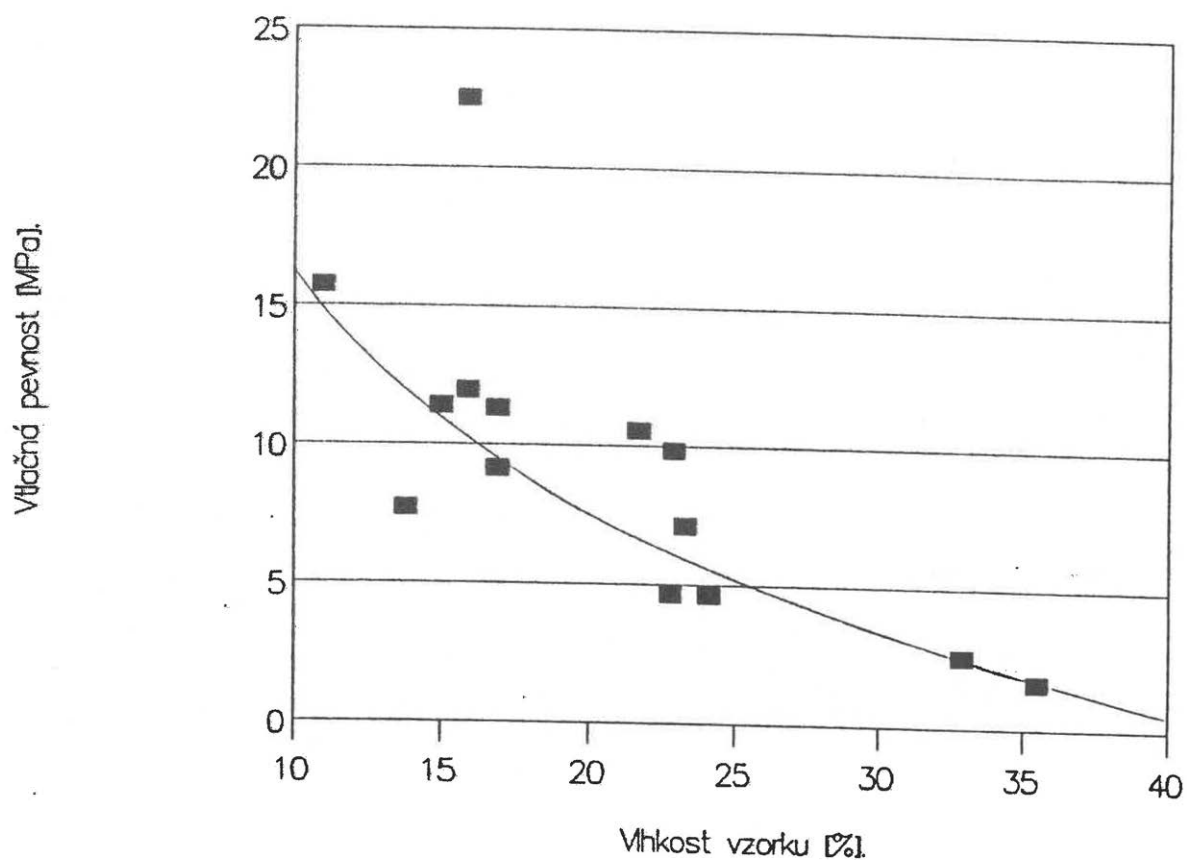


Obr. 3

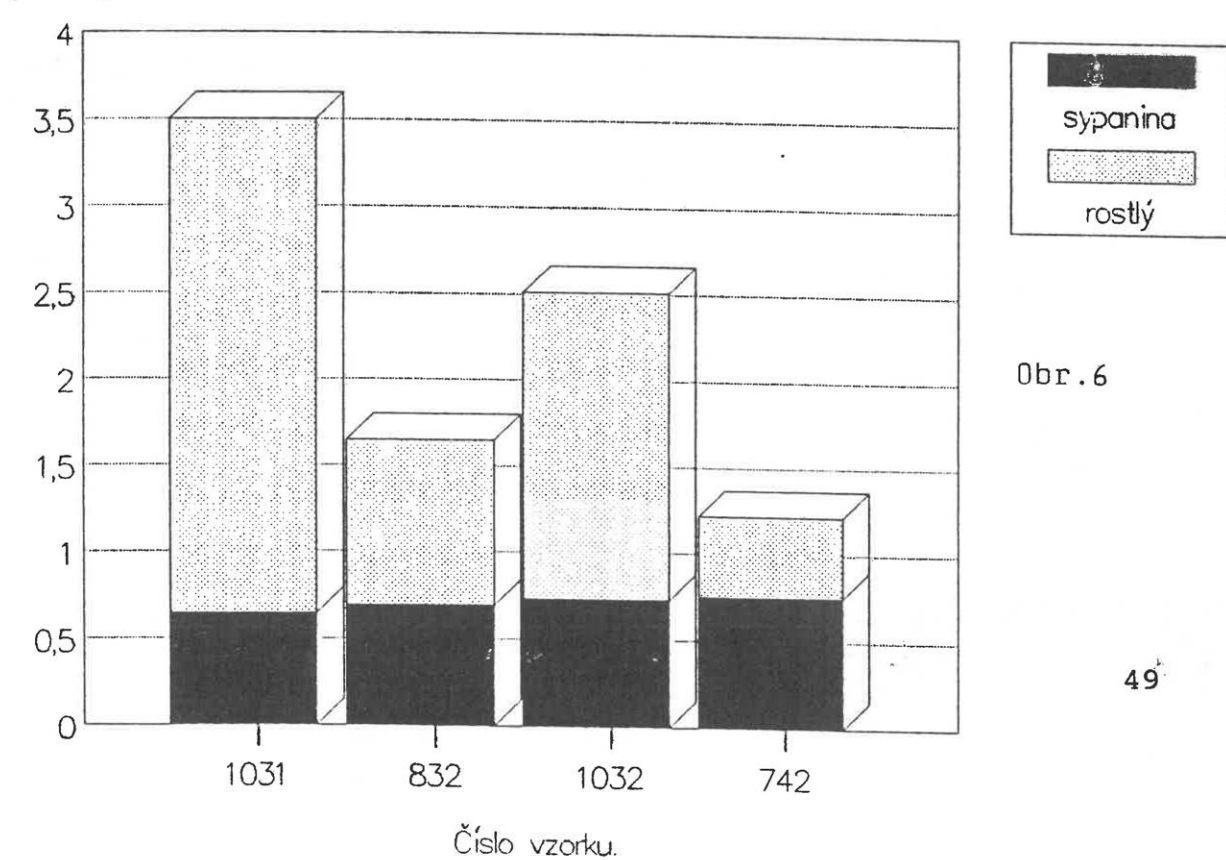
Průběh hodnot prostého tlaku,  $\gamma_{35}$  a  $\gamma_{70}$ 

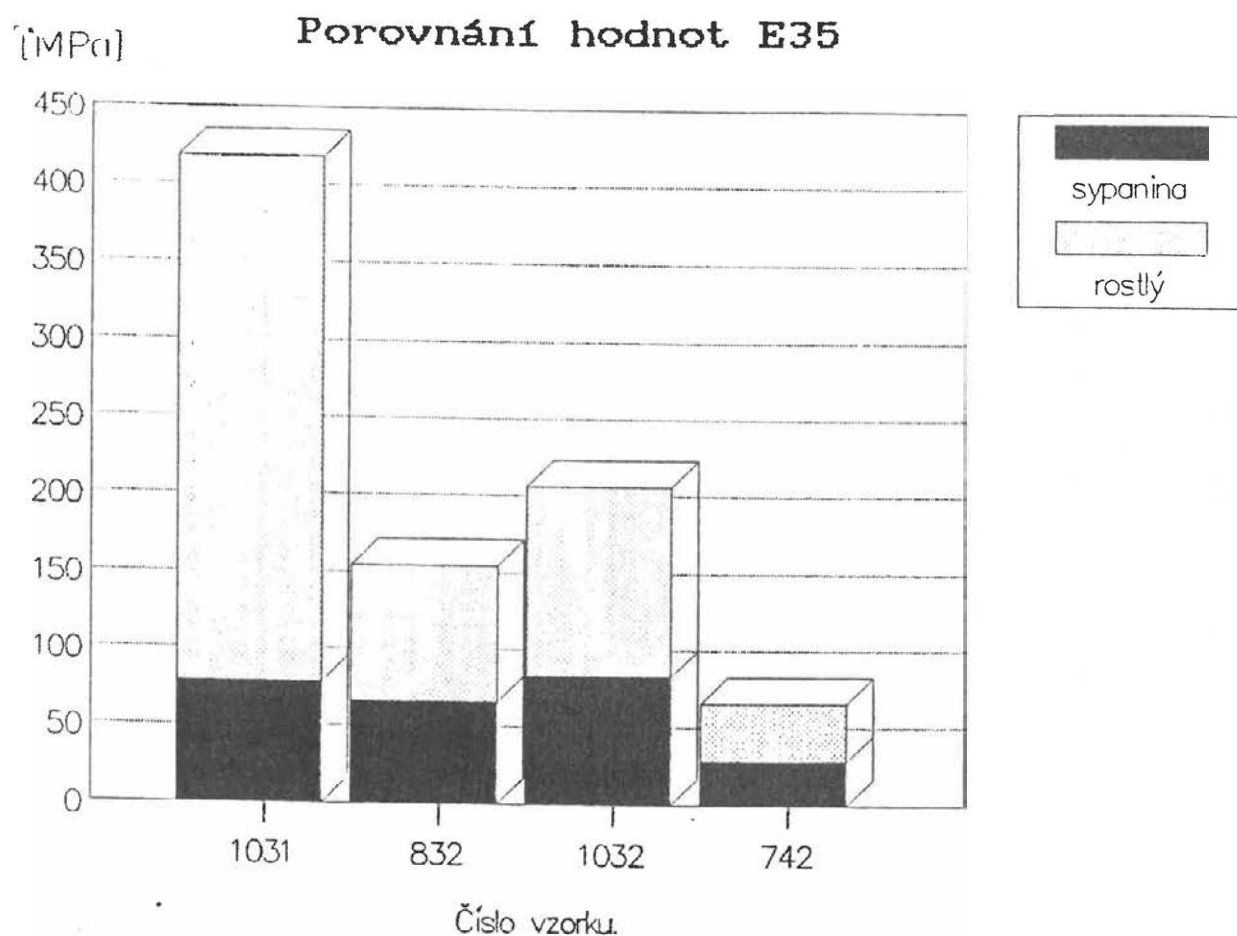
Obr. 4

# Závislost vtláčné pevnosti na vlhkosti

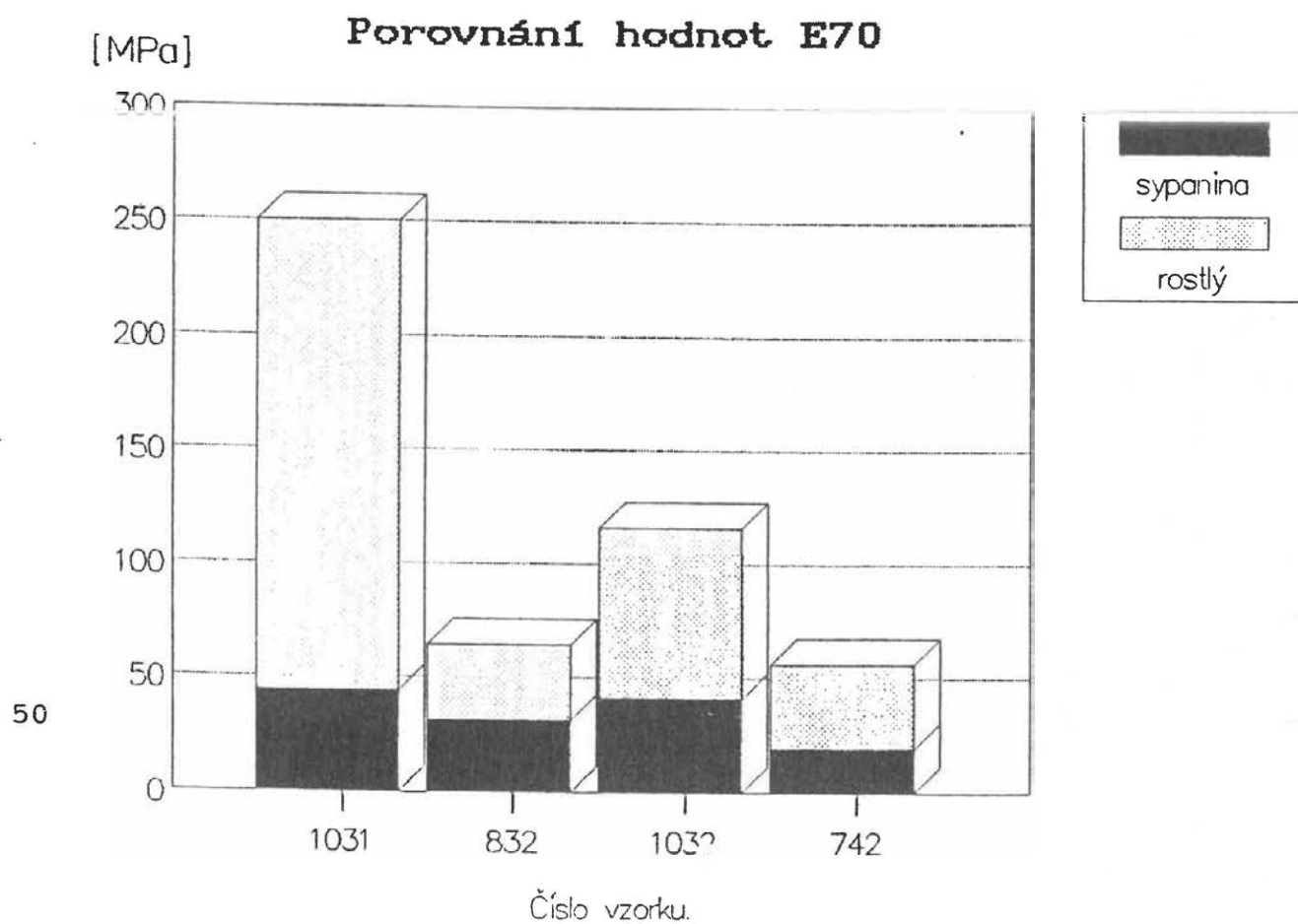


## Porovnání hodnot prostého tlaku

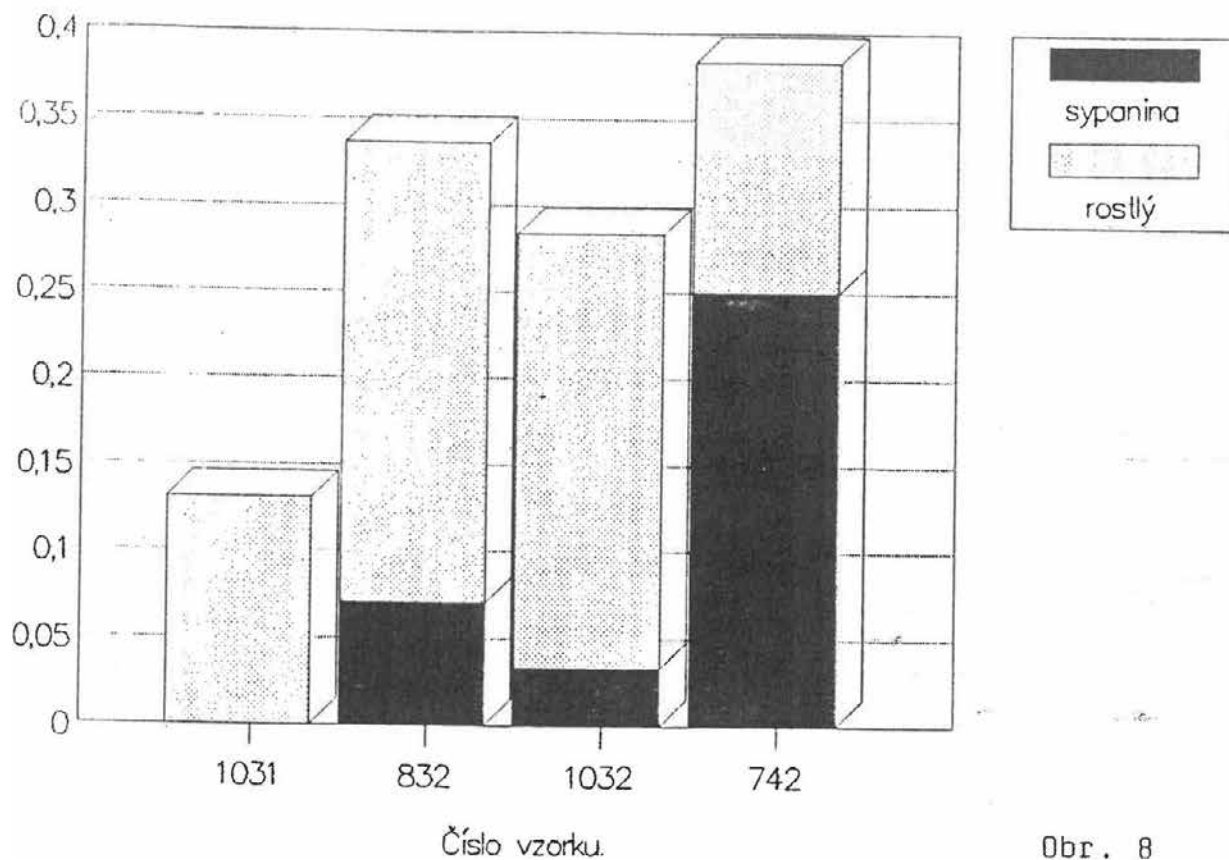




Obr. 7

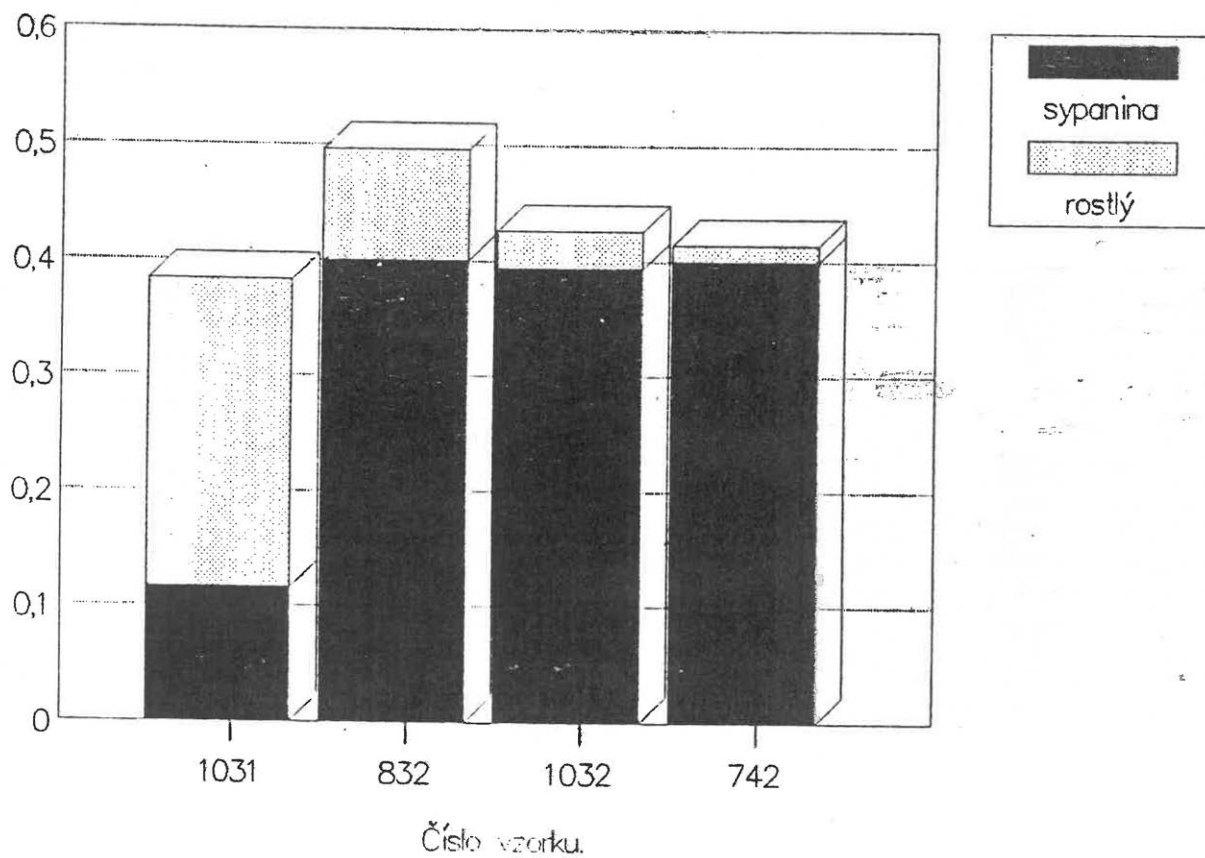


[1]

Porovnání hodnot  $\gamma_{35}$ 

Obr. 8

[1]

Porovnání hodnot  $\gamma_{70}$ 

a "čistý" matematický model, který by popisoval chování materiálu a změnu jeho vlastností v souvislosti se změnou zatížení, případně jiných faktorů. Pro realizaci výpočtů metodou konečných prvků bude třeba vždy materiál idealizovat, případně provést měření na konkrétní lokalitě, na kterou budou výpočty zaměřeny.

#### Použité vzorky:

K měření byly použity vzorky následujících materiálů:

- Vzorek č. 455: Chabařovice, jílovec šedočerný, slabě slídnatý, objem. hmotnost  $2040 \text{ kg/m}^3$ , specific. hmotnost  $2670 \text{ kg/m}^3$ , vlhkost 23,3 %
- Vzorek č. 456: Chabařovice, jílovec šedý až šedočerný, slabě slídnatý, objem. hmotnost  $2060 \text{ kg/m}^3$ , specific. hmotnost  $2660 \text{ kg/m}^3$ , vlhkost 22,9 %
- Vzorek č. 457: Chabařovice, jílovec šedý, slabě prachovitý, slabě slídnatý, objem. hmotnost  $2070 \text{ kg/m}^3$ , specific. hmotnost  $2700 \text{ kg/m}^3$ , vlhkost 21,7 %
- Vzorek č. 494: VČSA, jílovec šedý až šedohnědý, slabě slídnatý, objem. hmotnost  $2030 \text{ kg/m}^3$ , specific. hmotnost  $2630 \text{ kg/m}^3$ , vlhkost 22,8 %
- Vzorek č. 549: Merkur 2, jílovec šedočerný, mastný, slabě slídnatý, objem. hmotnost  $1860 \text{ kg/m}^3$ , specific. hmotnost  $2600 \text{ kg/m}^3$ , vlhkost 35,5 %
- Vzorek č. 550: Merkur 2, jílovec šedočerný, mastný, slabě slídnatý, s úlomky zuhelnatělých rostlin, objem. hmotnost  $1900 \text{ kg/m}^3$ , specific. hmotnost  $2690 \text{ kg/m}^3$ , vlhkost 32,9 %
- Vzorek č. 696: Šverma - 5. řez, prachovitý jílovec, objem. hmotnost  $2250 \text{ kg/m}^3$ , specific. hmotnost  $2720 \text{ kg/m}^3$ , vlhkost 11 %
- Vzorek č. 697: Šverma, prachovitý jílovec, objem. hmotnost  $2200 \text{ kg/m}^3$ , specific. hmotnost  $2670 \text{ kg/m}^3$ , vlhkost 13,8 %
- Vzorek č. 742: VMG, jílovec šedý, silně prachovitý, objem. hmotnost  $2210 \text{ kg/m}^3$ , specific. hmotnost  $2670 \text{ kg/m}^3$ , vlhkost 15,9 %
- Vzorek č. 820: Kopisty, jílovec šedý, prachovitý (jádro), objem. hmotnost  $2150 \text{ kg/m}^3$ , specific. hmotnost  $2780 \text{ kg/m}^3$ , vlhkost 16,9 %
- Vzorek č. 831: Vršany, jílovec světle šedý s vtroušeninou žlutavého horninového materiálu, objem. hmotnost  $2030 \text{ kg/m}^3$ , specific. hmotnost  $2690 \text{ kg/m}^3$ , vlhkost 24,1 %
- Vzorek č. 832: Vršany, jílovec šedobílý slabě prachovitý s ojedinělými zlomky zuhelnatělých rostlin, objem. hmotnost  $2110 \text{ kg/m}^3$ , specific. hmotnost  $2580 \text{ kg/m}^3$ , vlhkost 16,9 %

Vzorek č.1031: VČSA, jílovec šedý, silně karbonátický, objem. hmotnost 2 490 kg/m<sup>3</sup>, specific. hmotnost 2 970 kg/m<sup>3</sup>, vlhkost 15 %

Vzorek č.1032: Vršany, jílovec šedobílý, slabě prachovitý, objem. hmotnost 2 140 kg/m<sup>3</sup>, specific. hmotnost 2 710 kg/m<sup>3</sup>, vlhkost 15,9 %

#### Dodatek:

V lednu 1992 byla uzavřena další dílčí etapa tohoto výzkumu vydáním výzkumné zprávy č. 7/92. Na deformometru bylo úspěšně odzkoušeno celkem 30 vzorků rostlého materiálu a 7 vzorků z uměle připravené sypaniny. Poprvé zde byly určeny matematické závislosti mezi jednotlivými veličinami a to mezi modulem pružnosti a pevností v prostém tlaku a dále mezi Poissonovým číslem a konzistencí.

Tyto vztahy je možno vyjádřit rovnicemi:

$$\begin{aligned} \sigma_{t1} \dots \text{pevnost v prostém tlaku [MPa]} \\ E35 &= 90,7 \sigma_{t1} - 50 & [\text{MPa}] \\ E70 &= 84,0 \sigma_{t1} - 43 & [\text{MPa}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_C \dots \text{konzistence} \\ v35 &= -0,736 I_C + 1,24 & [1] \\ v70 &= -0,375 I_C + 0,92 & [1] \end{aligned}$$

Není samozřejmě možné tvrdit, že tyto vztahy jsou zcela přesné a neměnné, neboť ani zde neposkytuje statistický soubor 30 hodnot se značným vzájemným rozptylem vyšší mírou jistoty.

Ukázalo se, že určitá závislost by mohla snad také existovat mezi modulem pružnosti a penetrací, avšak rozptyl hodnot je zde ještě větší než v předchozích případech.

U vzorků z uměle připravené sypaniny se potvrdila tendence k vyrovnání hodnot pevností v prostém tlaku na hodnotu přibližně 0,7 MPa bez ohledu na pevnost téhož materiálu v rostlém stavu.

U hodnot  $v70$  dochází k tomu, že při zvětšujícím se Poissonově čísle se hodnoty získané z rostlého a sypaného materiálu výrazně sbližují. Vyšším Poissonovým číslem jsou charakterizovány materiály měkké a plastické. U těchto materiálů zřejmě dochází k lepšímu spojení jednotlivých zrn sypaniny a vzorek tedy snese větší rozšíření bez toho, aniž by se porušil.

Mezi rostlým materiálem a materiálem z uměle připravené sypaniny existují i zásadní rozdíly v charakteru porušení vzorku. Zatímco rostlý materiál se porušuje v rovinných nebo kuželových skluzových plochách s úhlem asi 45° vzhledem k ose zatěžování, materiál z uměle připravené sypaniny se porušuje téměř výhradně v ploše kolmé k ose zatěžování, avšak povrch je tvořen výstupky z jednotlivých zrn, jejichž boky mají k ose zatěžování sklon 45°.