

RNDr. Martin Šípek, Sokolovská uhelná, právní nástupce, a.s.
 Ing. Lenka Vaidišová, Výzkumný ústav pro hnědé uhlí, a.s.
 Ing. Jan Kurka, CSc., AZ Consult, s.r.o.

Přímá komparace výsledků terénního geotechnického měření a výsledků laboratorních měření na triaxiálním přístroji

Přijato: 2.11.2006, recenzováno: 27.11.2006

Direkte Vergleichung der Ergebnisse von den geotechnischen Terrainmessungen und der Ergebnisse der Labormessungen auf dem Triaxialgerät

Der vorgelegte Beitrag orientiert sich auf die Theorie der Interpretation von Ergebnissen der Penetrationsmessungen mittels der mathematischen Modellierung des Verhaltens der Penetrationsspitze durch die MKP-Methode (Methode der endlichen Elemente). Auf einem konkreten Fall der Penetrationssonde JPSP 3 ist eine Veranschaulichung der Ergebnisse der Ergebnisbewertung der Penetrationsmessungen angeführt und ihren Vergleich mit den Ergebnissen der Labormessungen auf einem Triaxialapparat. Im Beschluss des Beitrags wird Vergleichung der Ergebnisse der Penetrationsmessungen mit Drehsondierung (Vergleich der gewonnen Bindigkeitswerte) mit der Theorie der Pfahltragfähigkeit (Vergleich der gewonnen Werte des Winkels der inneren Reibung).

Direct Comparison of Results from Field Geotechnical Measurement and Results from Laboratory Measurement with a Triaxial Apparatus

The submitted article focuses on the interpretation of theoretical results from penetration measurement using mathematical modelling for penetration spike behaviour with the method MKP (method of final elements). Evaluation of results from penetration measurements and their comparison with the results of laboratory measurements with a triaxial apparatus were demonstrated on a concrete example of JPSP 3 penetration probe. The article is concluded with a comparison of penetration measurement and the vane test (comparison of the acquired consistence values) and the theory of the pile ultimate driving resistance (comparison of the acquired values from the

internal friction angle measurement).

Прямое сравнение результатов полевых геотехнических измерений и результатов лабораторных измерений на трехосном приборе

Предлагаемая статья ориентирована на теоретическую сторону интерпретации результатов пенетрационных измерений помощью математического моделирования ведения пенетрационного острия методом окончательных элементов. На конкретном примере пенетрационного зонда JPSP 3 приводится образец оценки результатов пенетрационных измерений и их сравнение с результатами лабораторных измерений на трехосном приборе. В заключение статьи дается сравнение результатов пенетрационных измерений с винтовым тестом (сравнение полученных величин когезии) и с теорией несущей способности сваев (сравнение полученных величин угла внутреннего трения).

Přímá komparace výsledků terénního geotechnického měření a výsledků laboratorních měření na triaxiálním přístroji

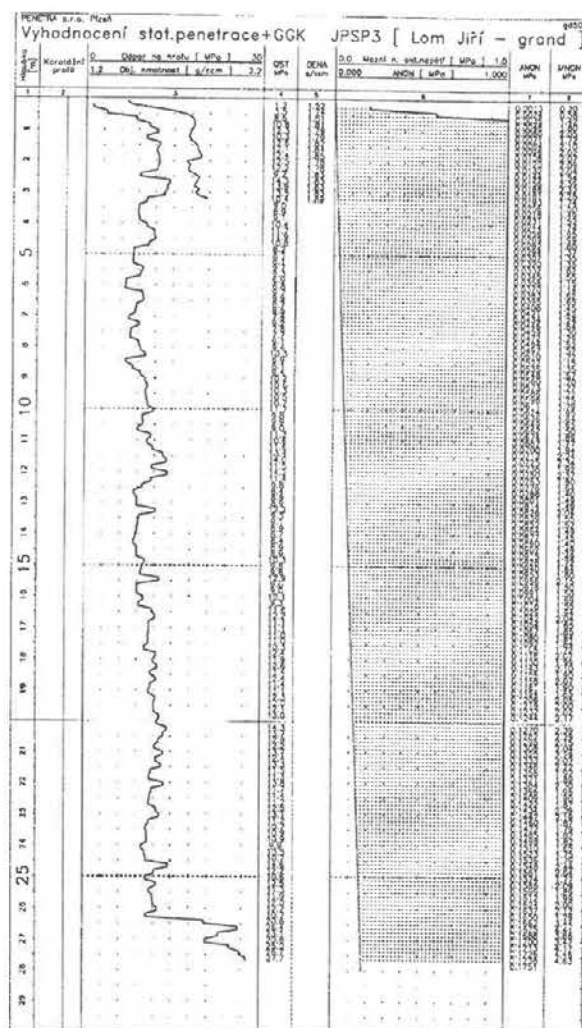
Předkládaný příspěvek se zaměřuje na teoretickou stránku interpretace výsledků penetračních měření pomocí matematického modelování chování penetračního hrotu metodou MKP (metodou konečných prvků). Na konkrétním příkladu penetrační sondy JPSP 3 je uvedena ukázka vyhodnocení výsledků penetračních měření a jejich porovnání s výsledky laboratorních měření na triaxiálním přístroji. Na závěr příspěvku je uvedeno srovnání výsledků penetračních měření s vrtulkovou zkouškou (srovnání získaných hodnot soudržnosti) a s teorií únosnosti pilot (srovnání získaných hodnot úhlu vnitřního tření).

Předkládaný článek se zaměřuje na tu část výsledků řešení grantového úkolu č.105/03/0992 „**Přímá komparace výsledků terénního geotechnického měření a výsledků laboratorních měření na triaxiálním přístroji**“, která se zabývá teoretickým zdůvodněním interpretace výsledků penetračních měření. Grantový úkol, probíhající v letech 2003 až 2005, byl řešen ve spolupráci Výzkumného ústavu pro hnědé uhlí, a.s., ve kterém probíhala laboratorní měření (Ing. Lenka Vaidišová ve spolupráci s Ing. Janem Kurkou, CSc.), a Sokolovské uhelné, právní nástupce, a.s., kde v prostoru jejích povrchových dolů byla realizována penetrační měření a jádrové vrty na odběr geomechanických vzorků.

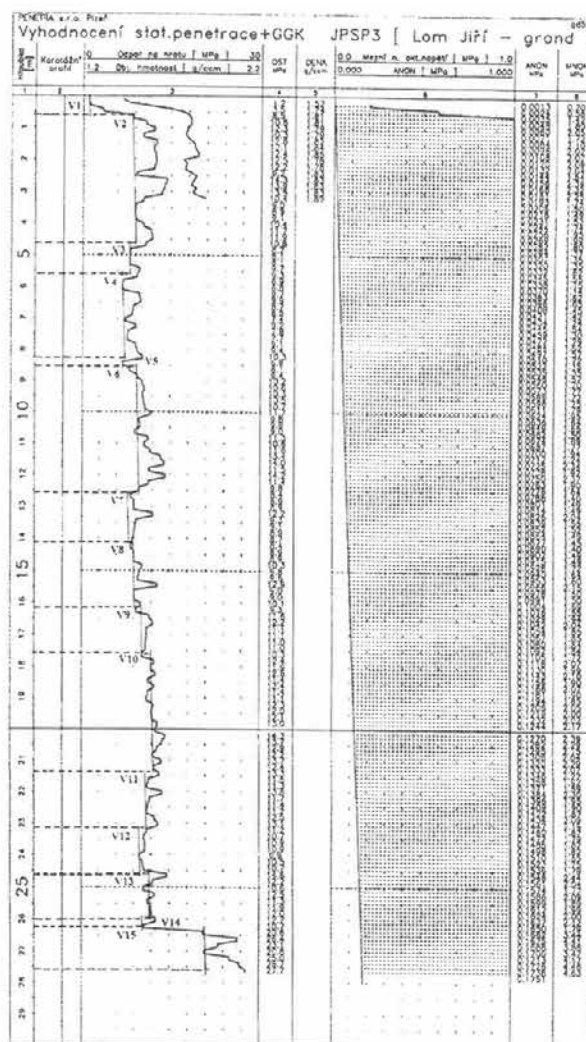
Možnost tzv. „přímo“ porovnat výsledky penetračních a laboratorních měření byla zajišťována velmi jednoduchým způsobem. Nejprve byla na daném místě provedena penetrační sonda, poté byl ve vzdálenosti zhruba do jednoho metru od penetračního stvolu realizován jádrový vrt, z kterého byly odebrány geomechanické vzorky pro laboratorní měření. V prvním roce řešení úkolu (r. 2003) se průzkum soustředil na jílovce cyprisového souvrství z nadloží sloje Antonín. Pro realizaci 6 penetračních sond (JPSP 3, JPSP 8, JPSP 8A, JPSP 12A, 12A1, 12A2) a 3 vrtů na odběr vzorků byly vybrány čelní skryvkové svahy lomu Jiří. V následujícím roce byly pro sledování (resp. porovnávání) pevnostních smykových parametrů vybrány tufitické jílovce vulkanodetritického souvrství, které se nacházejí v podloží uhelné sloje Antonín. V tomto roce byly realizovány celkem 4 penetrační sondy (SPD G1, SPD G2, SPD G3, JP 456) a 2 vrty pro odběr vzorků, a to v jižních svazích lomu Družba (SPD G1 až G3) a v severních svazích lomu Jiří (JP 456). V posledním roce řešení grantového úkolu (r. 2005) se na rozdíl od předchozích let, kdy se pozornost soustředila na tzv. „roslé“ zeminy skryvkových svahů, staly středem zájmu výsypkové zeminy. V prostoru vnitřní výsypky lomu Jiří byly provedeny 2 sondy (SPG 1, SPG 2) a 2 vrty, následně pak byla realizována 1 sonda (SPG 3) a 1 vrt na vnější Podkrušnohorské výsypce (v oblasti zvané Pastviny). Ve všech případech se jednalo o výsypkovou zeminu vzniklou založením odtěžených jílovců cyprisového souvrství.

Níže jsou uvedeny základní teoretické vztahy pro vyhodnocení výsledků penetračních měření, včetně výsledků matematického modelování chování penetračního hrotu. Na příkladu penetrační sondy JPSP 3 (jedná se o sondu z r. 2003 zachycující jílovce cyprisového souvrství v čelních svazích lomu Jiří) je pak uvedena praktická ukázka vyhodnocení výsledků penetračních měření a jejich porovnání s výsledky laboratorních měření na triaxiálním přístroji.

Základem pro vyhodnocení penetračního průzkumu je vyhledání minimálních hodnot odporu na penetračním záznamu. Těmito minimálními hodnotami odporu se metodou nejmenších čtverců proloží přímky, tzv. přímky minim. Na **obr. 1B** je na příkladě penetračního záznamu sondy JPSP 3 uvedena ukázka vyhledání a proložení přímek naměřenými hodnotami odporu. Tímto proložením se penetrační záznam rozčlení na jednotlivé geomechanické vrstvy (viz. *vrstvy VI až VI5*). Při vyhodnocení penetračních měření se vychází z **teoreticko-empirického korelačního převodníku**, který byl nacejchován na základě výsledků matematického modelování pomocí metody MKP.



Obr. 1A Penetrační záznam sondy JPSP 3



Obr. 1B Penetrační záznam sondy JPSP 3 rozčleněný na jednotlivé geomechanické vrstvy

Pro převod parametrů přímek minim (směrnice přímky a průsečíku této přímky s povrchem terénu, tj. při $h=0$) na parametry smykové pevnosti se používá matematický převodník $q = f(h, \varphi, c, \gamma, k_c)$ – viz vztahy 1.1, 1.2, 1.3, které umožňují na základě korelace stanovit z penetračního odporu smykové pevnostní parametry zemin :

$$q = \{[(0,95 - \sin \varphi) \cdot \gamma \cdot h \cdot k_k \cdot \text{tg}^4(45^\circ + \varphi/2) + 2c \cdot k_k \cdot \text{tg}^3(45^\circ + \varphi/2) + 2c \cdot \text{tg}(45^\circ + \varphi/2)]^2 + 3 \cdot [(0,95 - \sin \varphi) \cdot \gamma \cdot h \cdot k_k \cdot \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \cdot k_k \cdot \text{tg}(45^\circ + \varphi/2)]^2\}^{1/2} \quad (\text{vztah 1.1})$$

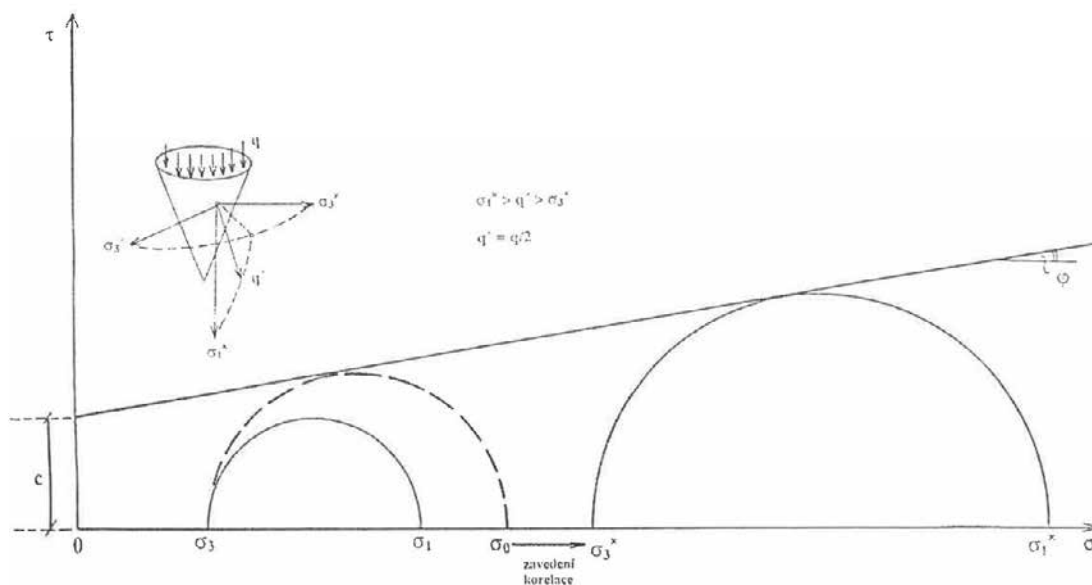
$$\frac{dq}{dh} = 1/q \cdot \{3 \cdot \sigma_3^x \cdot [(0,95 - \sin \varphi) \cdot \gamma \cdot k_k \cdot \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2)] + \sigma_1^x \cdot [(0,95 - \sin \varphi) \cdot \gamma \cdot k_k \cdot \text{tg}^4(45^\circ + \varphi/2)]\}$$

(vztah 1.2)

$$c = q_{h=0} / 2 \cdot \text{tg}(45^\circ + \varphi/2) \cdot \{[1 + k_k \cdot \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2)]^2 + 3 \cdot k_k^2\}^{1/2}$$

(vztah 1.3)

Pro objasnění odvození **vztahu 1.1** je uveden **obr. 2**. Symboly σ_1^x , σ_3^x označují hlavní napětí (ve vertikálním a horizontálním směru), která vznikají na plášti penetračního hrotu při průniku hrotu zeminou. Platí pro ně $\sigma_1^x > q' > \sigma_3^x$ (q' - napětí na plášti hrotu).



Obr. 2 Rozložení napětí na penetračním hrotu

Obecně platí, že $\sigma^2 + \tau^2 = \sigma_1^{x2} \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_2^{x2} \cdot \cos^2 \beta + \sigma_3^{x2} \cdot \cos^2 \gamma$, kde α , β , γ (směrové kosiny) jsou úhly, které svírá vnější normála všeobecně odkloněné plošky se směry hlavních napětí σ_1^x , σ_2^x , σ_3^x . Pro penetrační hrot lze připustit zjednodušující předpoklad, že $\sigma_2^x \equiv \sigma_3^x$ (osově symetrický model řešení). Dále pro tento hrot platí (viz. **obr. 3**), že $\alpha = 60^\circ$, $\beta \equiv \gamma$. Vzhledem k tomu, že pro směrové kosiny obecně platí: $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$, tak vychází pro úhel $\beta \equiv \gamma$ hodnota $\beta = 52,24^\circ$. Potom lze napětí na plošce tečné k plášti penetračního hrotu vyjádřit následovně:

$$\sigma^2 + \tau^2 = q'^2 = 0,25 \cdot \sigma_1^{x2} + 2 \cdot \sigma_3^{x2} \cdot \cos^2 52,24^\circ = 0,25 \cdot \sigma_1^{x2} + 0,75 \cdot \sigma_3^{x2}.$$

Po jednoduché úpravě získáme vztah $4 \cdot q'^2 = \sigma_1^{x2} + 3 \cdot \sigma_3^{x2}$, a jelikož platí, že $q' = q/2$, tak lze následovně psát:

$$q^2 = \sigma_1^{x2} + 3 \cdot \sigma_3^{x2}, \text{ resp. } q = (\sigma_1^{x2} + 3 \cdot \sigma_3^{x2})^{1/2}.$$

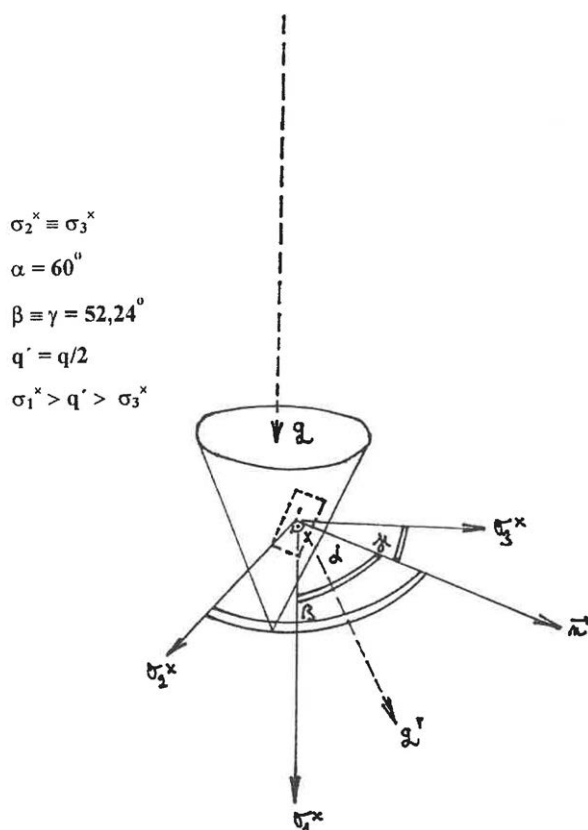
Pro hlavní vertikální napětí před začátkem penetračního měření platí $\sigma_1 = \gamma \cdot h$. Pro hlavní horizontální napětí v zemině před začátkem penetračního měření byl použit vztah $\sigma_3 = (0,95 - \sin \Phi) \cdot \sigma_1$, tj. $\sigma_3 = (0,95 - \sin \Phi) \cdot \gamma \cdot h$. Pro korelační bod σ^0 byl zaveden vztah $\sigma^0 = \sigma_3 \cdot \text{tg}^2(45^\circ + \Phi/2) + 2c \cdot \text{tg}(45^\circ + \Phi/2)$. Vlastní korelace byla do řešení zavedena pomocí vztahu $\sigma_3^x = k_k \cdot \sigma^0$, kde k_k znamená koeficient korelace. Hlavní horizontální a vertikální napětí σ_3^x , σ_1^x vznikající při průniku hrotu zeminou (tj. při roztlačení zeminy) jsou definována takto:

$$\sigma_3^x = k_k \cdot \sigma^0 = \sigma_3 \cdot k_k \cdot \text{tg}^2(45^\circ + \Phi/2) + 2c \cdot k_k \cdot \text{tg}(45^\circ + \Phi/2)$$

$$\sigma_3^x = (0,95 - \sin \Phi) \cdot \gamma \cdot h \cdot k_k \cdot \text{tg}^2(45^\circ + \Phi/2) + 2c \cdot k_k \cdot \text{tg}(45^\circ + \Phi/2)$$

$$\sigma_1^x = \sigma_3^x \cdot \text{tg}^2(45^\circ + \Phi/2) + 2c \cdot \text{tg}(45^\circ + \Phi/2)$$

$$\sigma_1^x = (0,95 - \sin \Phi) \cdot \gamma \cdot h \cdot k_k \cdot \text{tg}^4(45^\circ + \Phi/2) + 2c \cdot k_k \cdot \text{tg}^3(45^\circ + \Phi/2) + 2c \cdot \text{tg}(45^\circ + \Phi/2).$$



Obr. 3

Dosadíme-li výše uvedené vztahy pro σ_1^x a σ_3^x do vztahu $q = (\sigma_1^{x2} + 3 \cdot \sigma_3^{x2})^{1/2}$ získáme **vztah 1.1**, kde odpor na penetračním hrotu je funkcí hloubky, úhlu vnitřního tření, soudržnosti, objemové tíhy zeminy a koeficientu korelace.

$$q = \{ [(0,95 - \sin \varphi) \cdot \gamma \cdot h \cdot k_k \cdot \operatorname{tg}^4(45^\circ + \varphi/2) + 2c \cdot k_k \cdot \operatorname{tg}^3(45^\circ + \varphi/2) + 2c \cdot \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi/2)]^2 + 3 \cdot [(0,95 - \sin \varphi) \cdot \gamma \cdot h \cdot k_k \cdot \operatorname{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \cdot k_k \cdot \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi/2)]^2 \}^{1/2} \quad (\text{vztah 1.1})$$

kde	q	- odpor na penetračním hrotu (kPa)
	h	- hloubka (m)
	φ	- úhel vnitřního tření ($^\circ$)
	c	- soudržnost (kPa)
	γ	- objemová tíha zeminy (kN.m ⁻³)
	k_k	- koeficient korelace

Pouze na základě znalosti hodnoty odporu v daném místě nelze stanovit dvojici pevnostních parametrů (úhel vnitřního tření a soudržnost). K tomu je třeba mít k dispozici dvě podmínky. Z tohoto důvodu se sleduje úklon přímky minim (směrnice), protože teprve na základě hodnoty odporu v daném místě a trendu nárůstu odporu s hloubkou od daného místa lze stanovit dvojici pevnostních parametrů. Po derivaci vztahu 1.1 dle hloubky získáme **vztah 1.2**, ve kterém pro úklon přímky minimálních hodnot, resp. pro směrnici přímky minim platí:

$$dq/dh = 1/q \cdot \{3 \cdot \sigma_3^x \cdot [(0,95 - \sin \varphi) \cdot \gamma \cdot k_k \cdot \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2)] + \sigma_1^x \cdot [(0,95 - \sin \varphi) \cdot \gamma \cdot k_k \cdot \operatorname{tg}^4(45 + \varphi/2)]\} \quad (\text{vztah 1.2})$$

Dosadíme-li do **vztahu 1.1** hloubku $h=0$ získáme hodnotu odporu na povrchu terénu. Po jednoduché matematické úpravě získáme ze vztahu 1.1 vztah pro penetrační odpor v nulové hloubce $q_{h=0}$:

$$q_{h=0} = \{3 \cdot [2c \cdot k_k \cdot \operatorname{tg}(45 + \varphi/2)]^2 + [2c \cdot k_k \cdot \operatorname{tg}^3(45 + \varphi/2)] + 2c \cdot \operatorname{tg}(45 + \varphi/2)\}^{1/2}$$

$$q_{h=0} = \{12c^2 \cdot k_k^2 \cdot \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2) + 4c^2 \cdot k_k^2 \cdot \operatorname{tg}^6(45 + \varphi/2) + 8c^2 \cdot k_k \cdot \operatorname{tg}^4(45 + \varphi/2) + 4c^2 \cdot \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2)\}^{1/2}$$

$$q_{h=0} = \{4c^2 \cdot \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2) \cdot [3 \cdot k_k^2 + k_k^2 \cdot \operatorname{tg}^4(45 + \varphi/2) + 2 \cdot k_k \cdot \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2) + 1]\}^{1/2}$$

$$q_{h=0} = 2c \cdot \operatorname{tg}(45 + \varphi/2) \cdot \{[1 + k_k \cdot \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2)]^2 + 3 \cdot k_k^2\}^{1/2}$$

Z tohoto vztahu lze vyjádřit **soudržnost c** následovně:

$$c = q_{h=0} / 2 \cdot \operatorname{tg}(45 + \varphi/2) \cdot \{[1 + k_k \cdot \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2)]^2 + 3 \cdot k_k^2\}^{1/2} \quad (\text{vztah 1.3})$$

Pozn. - Při vyhodnocování výsledků penetračních měření se postupuje následovně:

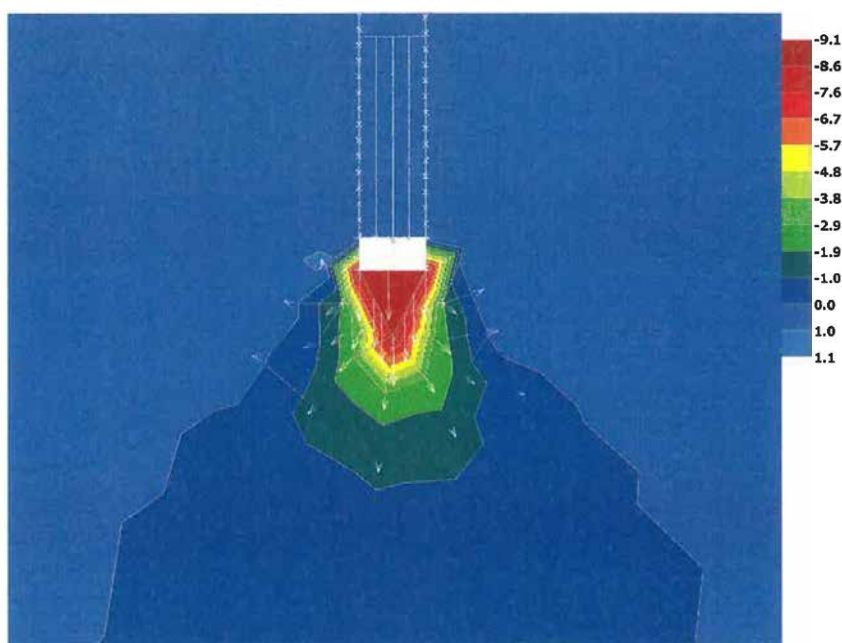
- za využití **vztahu 1.2** se iteračním procesem vyhledá hodnota úhlu vnitřního tření, při které vykazují shodnost směrnice přímky naměřených minim a směrnice daná **vztahem 1.2** – **naměřená přímka minim a teoretická přímka minim vykazují shodný úklon, ale jsou vzájemně posunuty o různé hodnoty soudržnosti.**
- za využití **vztahu 1.3** se stanoví hodnota soudržnosti c , při které se vzájemně překryjí naměřená přímka minim a teoretická přímka minim daná **vztahem 1.1.**

Z výše uvedených **vztahů 1.1 až 1.3** je patrné, že určení smykových pevnostních parametrů závisí na stanovení koeficientů korelace k_k . **Pro určení těchto koeficientů byla využita metoda konečných prvků. Pomocí programu GEO 4 MKP (produkt firmy Fine, s.r.o.) bylo matematicky modelováno chování penetračního hrotu.**

V první části matematického modelování bylo třeba vytvořit model hrotu, který přijatelným způsobem simuluje penetrační měření, a přitom vykazuje značnou konvergenční odolnost, tj. nemá problémy s konvergencí výsledků v širokém rozsahu smykových pevnostních parametrů při požadovaném hloubkovém dosahu této simulace do 25 až 30 metrů. Program GEO 4 MKP byl vytvořen na modelování prostoru v metrech až stovkách metrů. Při výpočtech v centimetrech neumožňuje zaokrouhlovat objekty pod velikost jednoho centimetru. Přitom používaný Begemannův hrot má průměr 3,56 cm při úhlu 60°. Vzhledem k výše uvedenému omezení nebylo možné tento hrot zcela přesně napodobit. Použit byl hrot o průměru 4,00 cm a úhlu 53° (tj. v 2D projekci hrotu se jednalo o trojúhelník o výšce 4,00 cm). Tuto tvarovou nepřesnost lze považovat za minimální a nemající významný vliv na dosažené výsledky matematického modelování.

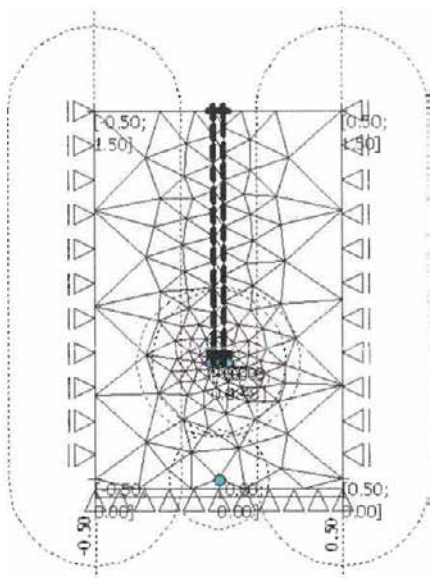
Při penetračním měření se soutyčí nad penetračním hrotem ve fázi měření odporu na hrotu vůbec nepohybuje. Veškerý tlak na hrot je přenášán pouze pomocí vnitřního soutyčí, které nemá žádný kontakt se zemínou. Tato situace byla původně modelována pomocí kontaktních prvků, které měly za úkol při působení přitížení na hrot tzv. „odtrhnout“ zeminu kolem soutyčí tak, aby se veškeré přitížení přenášelo pouze na zeminu kolem hrotu, tj. aby zemina kolem soutyčí nebyla strhávána pohybujícím se soutyčím do směru pronikajícího hrotu. Tento požadavek však kontaktní prvky, kterými bylo celé modelové soutyčí nad hrotem „obaleno“, nesplňovaly. Při výpočtech docházelo k nežádoucímu strhávání zeminy kolem soutyčí do směru pohybu hrotu. Nakonec byl tento problém úspěšně vyřešen velmi

jednoduchou cestou, a to tak, že velmi malý prostor přímo nad penetračním hrotem byl deaktivován, takže při výpočtech byl vyloučen (doslova „vyříznut“) z řešení. Rozměry tohoto neaktivního prostoru byly minimalizovány (4×2 cm) na tu míru, jakou program MKP umožňoval - při dalším zmenšení tohoto prostoru již začínaly výrazné problémy s generováním sítě, program hlásil problematické místo v konstrukci modelu a výpočty přestaly konvergovat. Tento neaktivní prostor zabezpečoval, že veškeré přetížení hrotu bylo přenášeno pouze na zeminu kolem hrotu. Na **obr. 4** jsou barevně vykresleny vertikální deformace vznikající při průniku hrotu zeminou a posuny zeminy (viz. bílé šipky). Modrá barva kolem soutyčí dokladuje, že v tomto prostoru nedochází k žádným deformacím a následným posunům zeminy.

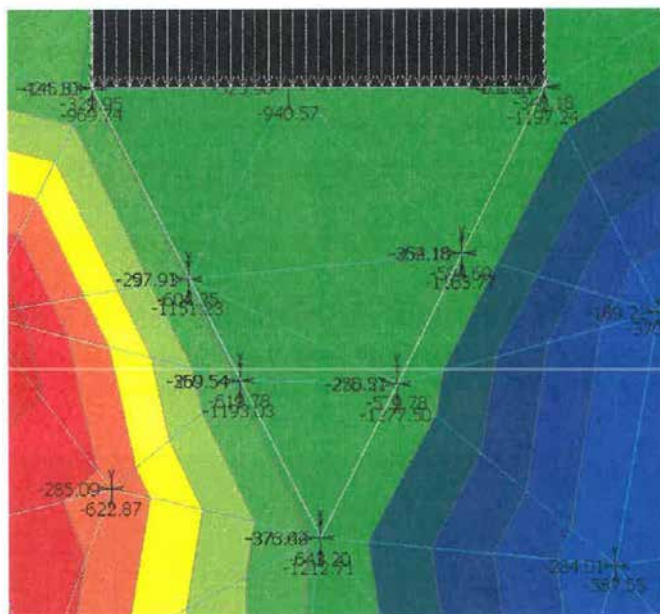


Obr. 4 Vertikální deformace vznikající při průniku hrotu

Při vytváření výpočetní sítě byly prostory vzdálené od modelovaného hrotu pomocí dvou linií a jednoho volného bodu tzv. „podhuštěny“, a naopak oblast kolem hrotu pomocí dvou volných uzlů byla tzv. „zahuštěna.“ Bylo to provedeno z důvodu, aby se výpočet soustředil do oblasti kolem penetračního hrotu a nebyl zbytečně zatěžován výpočetními operacemi v místech, která nejsou pro řešení důležitá.



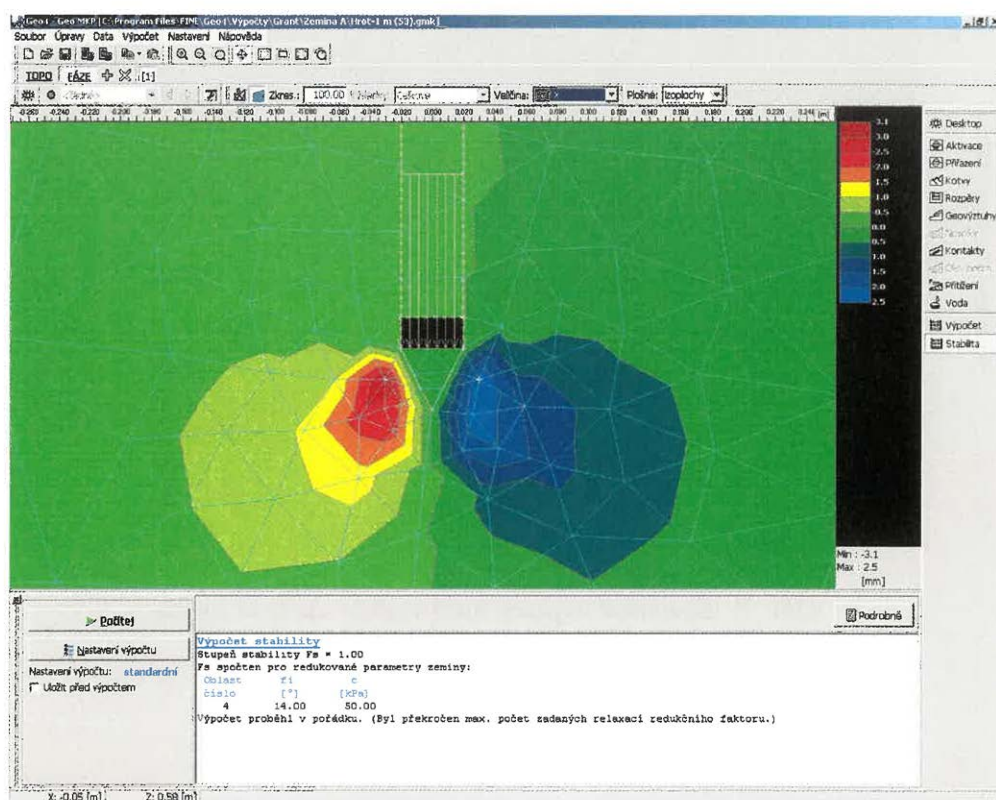
Obr. 5 Nastavení výpočetního desktopu

Obr. 6 Detail hrotu zachycující rozmístění hlavních napětí σ_1^x , σ_3^x

Při takto nastavené síti bylo možné hustotu prvků kolem modelovaného hrotu považovat za přijatelnou. Jak dokladuje **obr. 6**, každou stranu hrotu zastihly 4 výpočetní prvky.

Pro stanovení koeficientu korelace k_k pro daný typ zeminy bylo zapotřebí znát průběh nárůstu odporu s hloubkou, aby bylo možné stanovit průběh přímky minim. Situování hrotu do různých hloubek se řešilo dvěma způsoby. Při prvním způsobu se použil základní model (tj. hrot v hloubce uložení $h=1$ m) a povrch terénu se přitížil geostatickým napětím, které odpovídalo hloubkám uložení hrotu 3 m, 5 m, 7 m, 10 m, 15 m, 20 m a 25 m. Při druhém způsobu byly přímo vytvořeny ještě výpočetní modely s hloubkou uložení hrotu 3 m, 5 m a 7 m. Při větších hloubkách se pak model se situováním hrotu v hloubce 7 m přitížil na povrchu terénu odpovídajícím geostatickým napětím, aby uložení hrotu odpovídalo hloubkám 10 m, 15 m, 20 m a 25 m. Prakticky u všech typů zemin byly pro kontrolu provedeny dvě série výpočtů, a to jak s prvním, tak i druhým způsobem zavedení vlivu hloubky uložení hrotu na dosažené hodnoty odporu. Výsledky se od sebe lišily pouze s malou diferencí. Ze dvou získaných závislostí odporu na hloubce byla použita ta méně příznivá závislost, tj. s menším nárůstem odporu s hloubkou.

U každého typu zeminy se pro jednotlivé hloubky uložení hrotu postupně měnilo přitížení hrotu až výpočet vykázal stupeň stability **$F = 1.0$** , při kterém **došlo výpočetně ke zplastizování zeminy**.



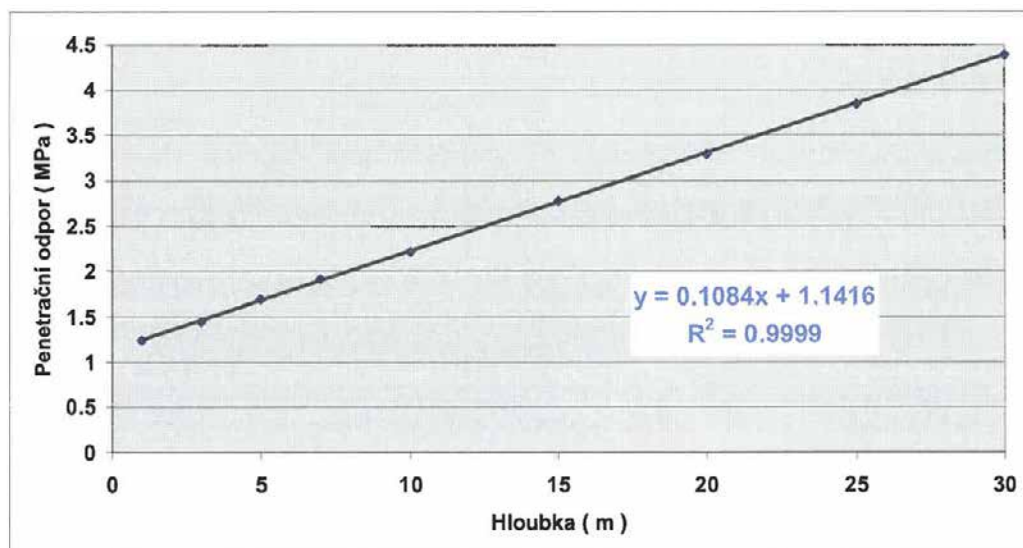
Obr. 7 Ukázka výpočtu při dosažení stupně stability $F = 1$

Při matematickém modelování bylo použito celkem 27 typů zemin (kombinací ϕ/c) a bylo provedeno 342 výpočtů metodou MKP. **Výsledky modelování plně potvrdily doposud používané principy interpretace výsledků penetračních měření** a vedly ke stanovení koeficientů korelace k_k pro objemové tíhy zeminy $\gamma = 19,5 \text{ kN.m}^{-3}$ a $\gamma = 16,0 \text{ kN.m}^{-3}$.

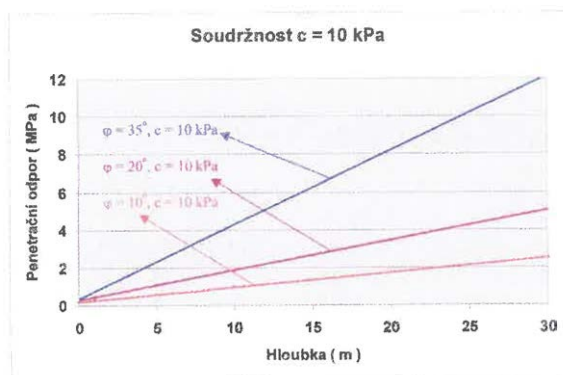
Základní principy interpretace penetračních měření:

- danému typu homogenní zeminy lze přiřadit lineární závislost odporu na hloubce, kterou lze matematicky vyjádřit přímkovou závislostí. Průběh této přímky charakterizuje pevnostní vlastnosti dané zeminy.
- čím větší úklon přímky minim, tím vyšší hodnotu úhlu vnitřního tření daná zemina vykazuje.
- čím přímka minim protíná povrch terénu ve větší vzdálenosti od počátku, tím vyšší hodnoty soudržnosti daná zemina vykazuje. Zeminy se stejným úhlem vnitřního tření mají rovnoběžné přímky minim a tyto přímky jsou proporcionálně posunuty o velikosti hodnot soudržnosti.

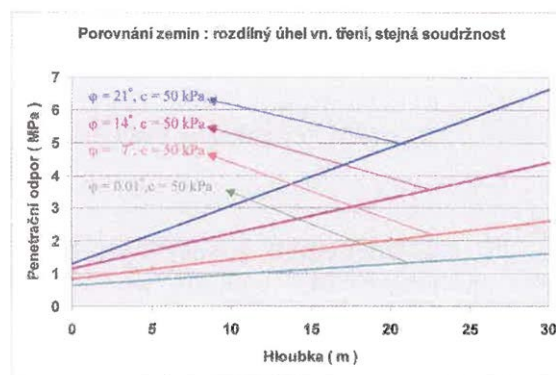
Na obr.8 je uvedena ukázka závislosti penetračního odporu na hloubce dle výpočtů metodou MKP pro zeminu o parametrech $\phi=14^\circ$, $c=50 \text{ kPa}$, $\gamma=19,5 \text{ kN.m}^{-3}$. Z obrázku je patrné, že tato **závislost je lineární**, což potvrzuje oprávněnost použití tzv. přímky minim pro stanovování smykových pevnostních parametrů.



Obr. 8 Závislost odporu na hloubce uložení hrotu

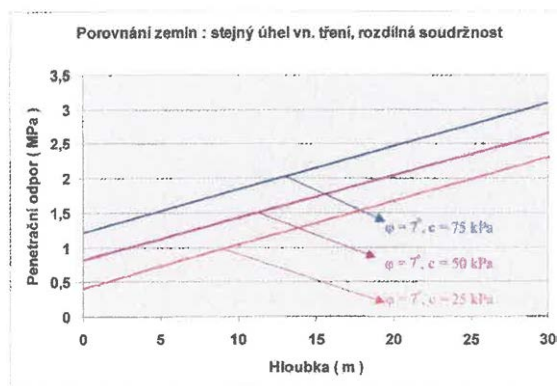
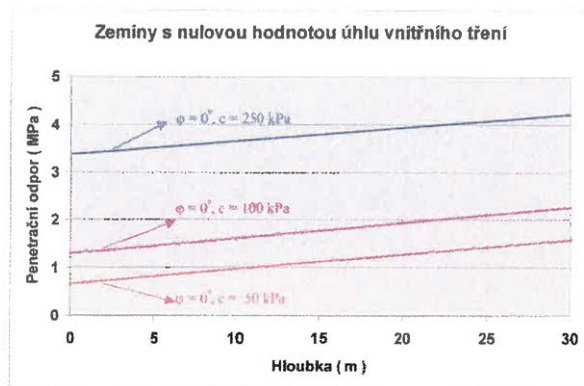


Obr. 9A Zemina se stejným c , rozdílným φ
 c – soudržnost
 φ – úhel vnitřního tření



Obr. 9B Zemina se stejným c , rozdílným φ

Čím větší úklon přímky minim, tím vyšší hodnotu úhlu vnitřního tření daná zemina vykazuje – viz. **obr. 9A a 9B**. V nárůstu úklonu přímek je patrná proporcionalita s nárůstem hodnot úhlu vnitřního tření jednotlivých zemin. **Obr. 9B** byl uveden také proto, aby dokladoval, že přímky závislosti odporu na hloubce při stejné hodnotě soudržnosti ($c = 50$ kPa) nemají povrch terénu protnout v naprosto stejném místě, ale jejich průsečíky se mají vyskytovat v určitém rozmezí, neboť dle **vztahu 1.3** je odpor v nulové hloubce funkcí jak soudržnosti, tak úhlu vnitřního tření, který mají uváděné zeminy rozdílný. Výsledky matematického modelování jsou v tomto případě ve vynikající shodě s teoretickými předpoklady, protože čím je vyšší hodnota úhlu vnitřního tření, tím je průsečík s povrchem terénu více vzdálen od počátku souřadného systému.

Obr. 10A Zemina se stejným ϕ , rozdílným c Obr. 10B Zemina se stejným ϕ , rozdílným c

Čím přímka minim protíná povrch terénu ve větší vzdálenosti od počátku (od osy 0.0), tím vyšší hodnoty soudržnosti daná zemina vykazuje – viz. **obr. 10A** a **10B**. Zeminy se stejným úhlem vnitřního tření mají rovnoběžné přímky minim a tyto přímky jsou proporcionalně posunuty o velikosti hodnot soudržnosti.

Za použití **vztahů 1.1, 1.2, 1.3** byly zjištěny koeficienty korelace k_k pro zeminy s objemovou tíhou $\gamma=19,5 \text{ kN.m}^{-3}$. Tyto koeficienty byly vyneseny do grafu a metodou nejmenších čtverců byl těmito koeficienty proložen polynom 3. stupně – viz. **obr. 11**. Tímto způsobem se získala **korelace 1.2**:

$$k_k = -0,000002 \cdot \varphi^3 - 0,001 \cdot \varphi^2 + 0,1215 \cdot \varphi + 0,5589$$

korelace 1.2

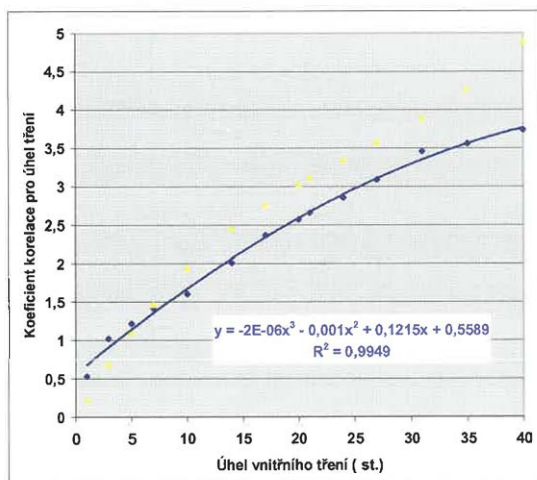
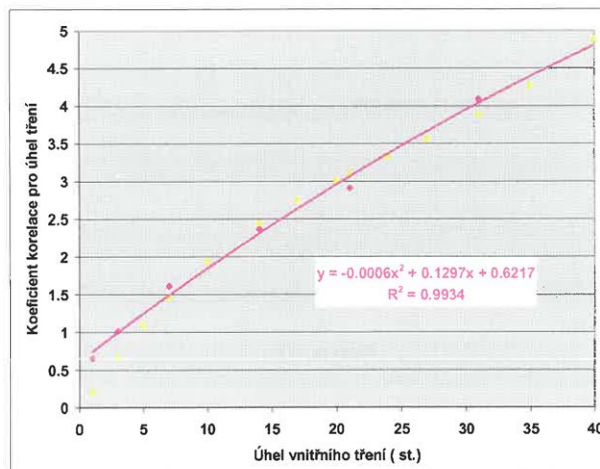
Při zpracování koeficientů korelace k_k pro zeminy s objemovou tíhou $\gamma=16,0 \text{ kN.m}^{-3}$ se postupovalo zcela obdobným způsobem. Vynesením těchto koeficientů do grafu, ve kterém byl těmito koeficienty proložen metodou nejmenších čtverců polynom 2. stupně, se získala **korelace 1.3** – viz. **obr.12**: $k_k = -0,0006 \cdot \varphi^2 + 0,1297 \cdot \varphi + 0,6217$

korelace 1.3

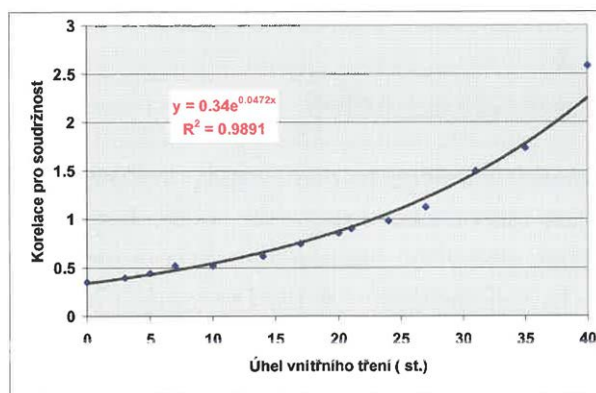
První korelační vztah, který byl používán ještě před využitím matematického modelování pomocí MKP, byl stanoven pro sypaninu vnitřní výsypky lomu Jiří. Na této výsypce, která se systematicky sleduje za využití penetračních měření od r. 1993, byl k dispozici rozsáhlý soubor výsledků těchto měření, který bylo možné porovnat se souborem výsledků regresních výpočtů. Na základě tohoto porovnání byl stanoven první korelační vztah – viz. **korelace 1.1**. Tento korelační vztah byl limitován skutečností, že sypanina vnitřní výsypky je prakticky tvořena pouze jíly a jílovci cyprisového souvrství (tj. sypanině chybí typová rozmanitost). Pro sypaninu vnitřní výsypky lomu Jiří byl pro **koeficienty korelace k_k** stanoven vztah:

$$k_k = 0,0001 \cdot \varphi^3 - 0,0075 \cdot \varphi^2 + 0,2634 \cdot \varphi - 0,0408$$

korelace 1.1

Obr. 11 Koeficienty k_k pro $\gamma=19,5 \text{ kN.m}^{-3}$ Obr. 12 Koeficienty k_k pro $\gamma=16,0 \text{ kN.m}^{-3}$

Na **obr. 11** jsou vedle **korelace 1.2** (*modře vyznačené*) také uvedeny koeficienty korelace k_k platné pro **korelaci 1.1** (viz. *žluté trojúhelníčky*). Tyto korelační vztahy 1.2 a 1.1 jsou společně uvedeny pro možnost vzájemného vizuálního porovnání.

Obr. 13 Korelace pro soudržnost k_c

Na **obr. 12** jsou vedle **korelace 1.3** (*ružově vyznačené*) také uvedeny koeficienty korelace k_k platné pro **korelaci 1.1** (viz. *žluté trojúhelníčky*). Tyto korelační vztahy 1.3 a 1.1 jsou společně uvedeny pro možnost vzájemného vizuálního porovnání.

Korelace 1.3 a **korelace 1.1** (korelace stanovená bez použití MKP) jsou pro úhly vnitřního tření $\varphi_{\text{tot}} > 5^\circ$ prakticky identické – viz. **obr. 12**. Jedná se o celkem neočekávané zjištění, které pozitivně překvapilo. Ukázalo se, že i když **korelace 1.1** byla získána na typově i velikostně značně omezeném souboru vstupních dat, tak byla stanovena i pro vyšší hodnoty úhlu vnitřního tření přijatelným způsobem, který koresponduje s výsledky matematického modelování. Výrazněji se **korelace 1.1** a **1.3** liší pouze v rozmezí $\varphi=0^\circ-5^\circ$, ale vzhledem k velmi nízkým hodnotám úhlu vnitřního tření činí rozdíl ve stanovení tohoto parametru cca $\pm 1^\circ$.

Při zpracování výsledků matematického modelování vyvstala potřeba korigovat hodnoty soudržnosti získané dle **vztahu 1.3**. Hodnoty soudržnosti získané z odporu v nulové hloubce totiž přesně neodpovídaly výpočetním hodnotám soudržnosti zadaným do výpočtů metodou MKP.

Porovnáním hodnot tzv. výpočetní soudržnosti (tj. soudržnosti vkládané do výpočtů metodou MKP) a soudržnosti dle **vztahu 1.3** byl stanoven jejich vzájemný poměr (viz. *korelační poměr* k_c). Tyto korelační koeficienty k_c byly vyneseny do grafu a metodou nejmenších čtverců byla pro tyto koeficienty stanovena následující exponenciální závislost:

$$k_c = 0,34 \cdot e^{0,0472 \cdot \varphi}$$

Z grafu, resp. z **obr. 13** je patrné, že hodnoty soudržnosti získané použitím **vztahu 1.3** pro zeminy, které mají úhel vnitřního tření vyšší než 23° , je třeba násobit a naopak pro zeminy, které mají úhel vnitřního tření menší než 23° , je třeba hodnoty soudržnosti dle **vztahu 1.3** dělit. Obojí, tj. násobení i dělení dosahuje maximální hodnoty 2 až 2.5.

Níže je uvedena ukázka vyhodnocení penetračního měření na příkladě sondy, jejíž penetrační záznam je uveden na **obr.1B**. Jedná se o sondu z r. 2003, která zachytila jílovce cyprisového souvrství. Pro tuto zeminu byla při vyhodnocení použita **korelace 1.3** (pro zeminy s objemovou tíhou $\gamma=16,0 \text{ kN.m}^{-3}$). Hodnoty soudržnosti byly stanovovány ze **vztahu 1.3** s využitím soudržnostní korelace $k_c=0,50 \cdot 0,34 \cdot e^{0,0472 \cdot \varphi}$.

Totální parametry smykové pevnosti sondy JPSP 3

Vrstva	Mocnost vrstvy	Nadmořská výška vrstvy	φ_{tot}	c_{tot}	γ
0,0- 0,6 m	0,6 m	367,2-366,6 m	$20,9^\circ$	19,9 kPa	$17,5 \text{ kN.m}^{-3}$
0,6- 4,6 m	4,0 m	366,6-362,6 m	$20,5^\circ$	144,8 kPa	$18,1 \text{ kN.m}^{-3}$
4,6- 5,6 m	1,0 m	362,6-361,6 m	$18,9^\circ$	130,0 kPa	$18,5 \text{ kN.m}^{-3}$
5,6- 8,2 m	2,6 m	361,6-359,0 m	$18,8^\circ$	105,8 kPa	$18,7 \text{ kN.m}^{-3}$
8,2- 8,4 m	0,2 m	359,0-358,8 m	$18,8^\circ$	98,4 kPa	$18,6 \text{ kN.m}^{-3}$
8,4-12,6 m	4,2 m	358,8-354,6 m	$13,0^\circ$	178,1 kPa	$18,8 \text{ kN.m}^{-3}$
12,6-14,2 m	1,6 m	354,6-353,0 m	$18,7^\circ$	106,1 kPa	$18,8 \text{ kN.m}^{-3}$
14,2-16,2 m	2,0 m	353,0-351,0 m	$19,8^\circ$	109,5 kPa	$18,8 \text{ kN.m}^{-3}$
16,2-17,6 m	1,4 m	351,0-349,6 m	$18,0^\circ$	137,3 kPa	$18,8 \text{ kN.m}^{-3}$
17,6-21,4 m	3,8 m	349,6-345,8 m	$15,8^\circ$	182,7 kPa	$18,9 \text{ kN.m}^{-3}$
21,4-23,2 m	1,8 m	345,8-344,0 m	$17,9^\circ$	137,6 kPa	$18,9 \text{ kN.m}^{-3}$
23,2-24,6 m	1,4 m	344,0-342,6 m	$18,6^\circ$	106,3 kPa	$18,9 \text{ kN.m}^{-3}$
24,6-26,0 m	1,4 m	342,6-341,2 m	$18,6^\circ$	126,4 kPa	$18,9 \text{ kN.m}^{-3}$
26,0-26,2 m	0,2 m	341,2-341,0 m	$18,6^\circ$	113,1 kPa	$18,9 \text{ kN.m}^{-3}$
26,2-27,6 m	1,4 m	341,0-339,6 m	$19,7^\circ$	277,6 kPa	$18,9 \text{ kN.m}^{-3}$
			$17,8^\circ$	145,8 kPa	$18,7 \text{ kN.m}^{-3}$

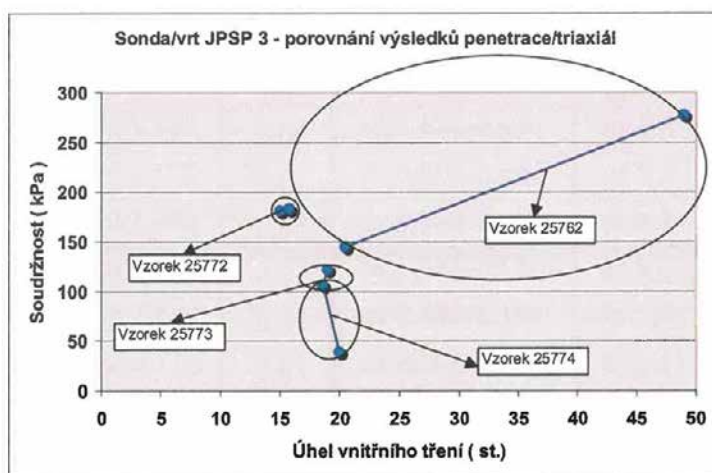
Výsledky vyhodnocení této penetrační sondy (viz. výše) lze porovnat s výsledky měření na triaxiálním přístroji na vzorcích odebraných z vrtu (viz. níže), který byl realizován v bezprostřední blízkosti penetrační sondy JPSP 3.

Výsledky z triaxiálu : vzorek č./hloubka odběru	Totální smykové parametry	
25762/ 2.0- 2.6 m	$\varphi = 49^\circ$	$c = 277 \text{ kPa}$
25772/22.0-22.4 m	$\varphi = 15^\circ$	$c = 181 \text{ kPa}$
25773/23.0-23.4 m	$\varphi = 19^\circ$	$c = 122 \text{ kPa}$
25774/23.4-23.8 m	$\varphi = 20^\circ$	$c = 39 \text{ kPa}$

Tabulka porovnávající výsledky penetračních a laboratorních měření na triaxiálním přístroji doplněná o diferenci ve stanovení pevnostních smykových parametrů v procentech pro sondu/vrt JPSP 3.

Vzorek	Totální úhel vnitřního tření dle penetrace/triaxiálu	Diference e %	Totální soudržnost dle penetrace/triaxiálu kPa/kPa	Diference %
25762	20.5°/49.0°	42	144.8/277.0	52
25772	15.8°/15.0°	5	182.7/181.0	0
25773	18.6°/19.0°	2	106.3/122.0	13
25774	18.6°/20.0°	7	106.3/ 39.0	273

Na **obr. 14** jsou v souřadném systému φ/c pomocí dvojice bodů zobrazeny výsledky porovnání. Jeden z dvojice bodů spojených úsečkou zobrazuje výsledky penetračních měření, druhý výsledky laboratorních měření. Čím jsou body blíže sobě, tím větší shodu výsledků se podařilo dosáhnout (a naopak). Z důvodu usnadnění orientace v **obr. 14** byla proložena body příslušné dvojice elipsa, aby tuto dvojici jednoznačně určila. Spojnice bodů rovnoběžná s jednou ze souřadných os zachycuje dvojici bodů, ve které alespoň jeden z parametrů smykové pevnosti vykazuje shodu výsledků penetračních a laboratorních měření. Z **obr. 14** je patrné, že u sondy JPSP 3 se podařilo ve dvou případech (vzorky 25772, 25773) dosáhnout velmi malou diferencí výsledků penetračních a laboratorních měření. Na třetím vzorku (25774) vykazoval totální úhel vnitřního tření velmi slušnou shodu výsledků penetrace/triaxiál. Pouze v jednom případě se obě měření výsledkově zcela rozešla (vzorek 25762).



Obr. 14 Porovnání výsledků penetrace/triaxiál

V rámci statistického vyhodnocení výsledků penetračních a laboratorních měření **na všech vzorcích** odebraných v rámci plnění grantového úkolu č.105/03/0992 bylo zjištěno, že při stanovování totálního úhlu vnitřního tření vykazalo **31,6 % měření** diferenci menší než 10 %. Do 30 % difference při stanovování ϕ se vešlo **52,7 % měření**. Při stanovování totální soudržnosti vykazalo **36,8 % měření** diferenci menší než 20 %. Do 30 % difference při stanovování c se vešlo **47,3 % měření**. Při společném statistickém vyhodnocení obou pevnostních parametrů bylo zjištěno, že ve **47,4 % měření** se podařilo oba parametry stanovit s akceptovatelnou diferencí výsledků (tj. s diferencí cca do 30 %). V **73,7 % měření** se podařilo alespoň jeden z pevnostních parametrů stanovit s nízkou diferencí výsledků.

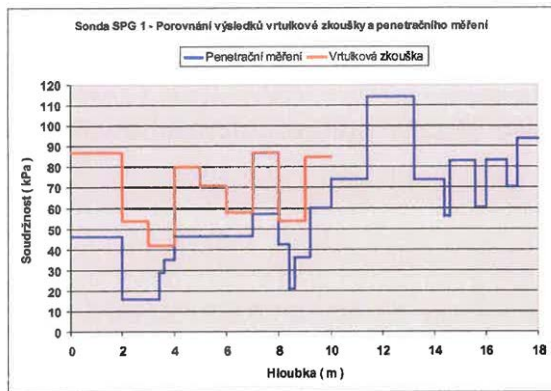
Při rozdělení vzorků na vzorky z let 2003-2004 (tzv. „rostlé“ zeminy ze skrývkových řezů lomů Jiří a Družba) a z r. 2005 (zeminy z výsypky) bylo konstatováno, že i když se jedná o rozdílné zeminové typy, tak výsledky porovnání vykazují velmi podobné údaje o procentuálním rozložení diferencí, tj. procentuální podíl měření, při kterých byla dosažena akceptovatelná shoda výsledků, se u těchto zemin příliš neliší.

Na základě grafického a statistického vyhodnocení bylo možné konstatovat, že při porovnání výsledků penetračních a laboratorních měření na triaxiálním přístroji procentuálně značná část výsledků měření vykazala shodu s akceptovatelnou diferencí výsledků ve stanovení pevnostních parametrů.

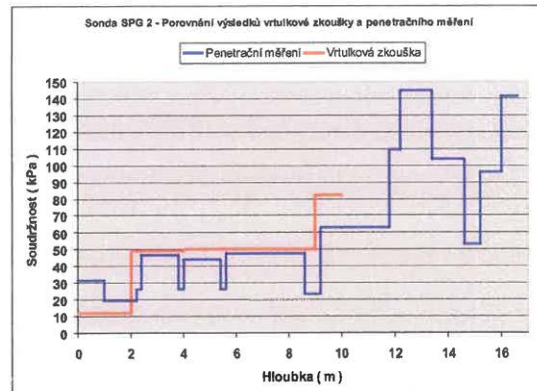
Na závěr je uvedeno porovnání výsledků penetračních a vrtulkových zkoušek. Jedná se o sondy z vnitřní výsypky lomu Jiří realizované v r. 2005.

Z porovnání (viz. **obr. 15A a 15B**) je patrné, že výsledky **vrtulkové zkoušky a penetračního měření vykazují** u sond SPG 1 a SPG 2 **vyznikající shodu**, a to především v případě sondy SPG 2. U obou sond vykazuje (kopíruje) soudržnost dle penetrace, resp. dle vrtulkové zkoušky „velmi důsledně“ naprosto stejný trend nárůstu a poklesu pevnosti. Soudržnost dle penetračních měření dosahuje sice o něco nižších hodnot než u vrtulkových zkoušek, ale je třeba upozornit na skutečnost, že u vrtulkové zkoušky přebírá veškerou pevnost zeminy soudržnost ($\phi_{\text{tot}}=0^\circ$), u penetrační zkoušky je část této pevnosti přenášena i úhlem vnitřního tření, i když v případě sond SPG 1 ($\phi_{\text{tot}}=5,3^\circ$) a SPG 2 ($\phi_{\text{tot}}=4,1^\circ$) přechází na úhel vnitřního tření pouze velmi malý podíl celkové pevnosti sypaniny výsypky.

Vrtulkové zkoušky mají pouze malý hloubkový dosah (cca do 10-15 m), což představuje pro tuto polní metodu průzkumu oproti penetrační zkoušce, která dosahuje hloubek i přes 80 m (např. sondy z vnitřní výsypky lomu Jiří realizované pro potřeby SU, a.s.), značnou nevýhodu. Ale vzhledem ke zjištěné shodě je možné používat vrtulkové zkoušky pro tzv. „nacejchování“ soudržnosti. Soudržnost totiž představuje pevnostní parametr, který se obvykle stanovuje ještě obtížněji (tj. jeho určení je zatíženo větší chybou) než úhel vnitřního tření. Při nakorelování soudržnosti pro malé hloubky lze pak s větší jistotou (tj. větší bezpečností) stanovovat hodnoty tohoto parametru i pro větší hloubky, tentokrát již pouze na základě výsledků penetračních měření.

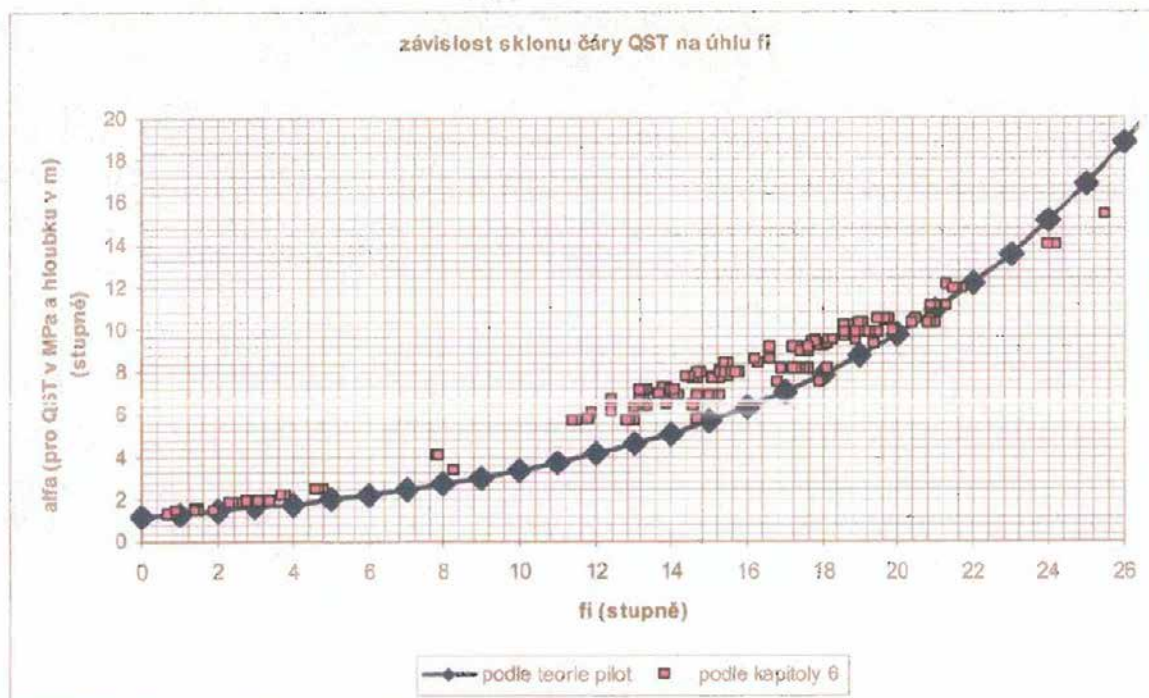


Obr. 15A Sonda SPG 1



Obr. 15B Sonda SPG 2

Ing. Jan Kurka, CSc. provedl v rámci řešení grantového úkolu č.105/03/0992 srovnání výsledků stanovení hodnot úhlu vnitřního tření dle únosnosti piloty stanovené podle obecného řešení teorie 1. skupiny mezních stavů a dle výše popsané teorie interpretace penetračních měření – viz. **obr. 16**.

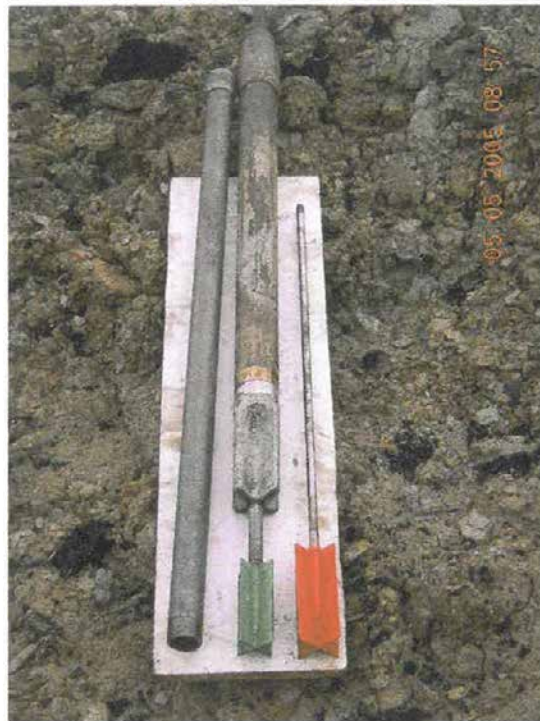


Obr. 16 Porovnání hodnot úhlu vnitřního tření ϕ_i dle únosnosti pilot/dle penetrace (viz. podle kapitoly 6)

Z **obr. 16** je zřejmé, že dvěma po teoretické stránce naprosto odlišnými cestami se podařilo dosáhnout velmi podobných výsledků při stanovení hodnot úhlů vnitřního tření. Toto je třeba považovat za nepochybný úspěch a doklad, že lze z terénních geotechnických měření stanovovat smykové pevnostní vlastnosti zemin.



Obr. 17 Penetrační hrot



Obr. 18 Vrtulky pro vrtulkovou zkoušku

Literatura

1. Vaidišová, Šípek, Kurka: Přímá komparace výsledků terénního geotechnického měření a výsledků laboratorních měření na triaxiálním přístroji – **Závěrečná zpráva projektu GA ČR číslo 105/03/0992**. VÚHU, a.s., Most 11/2005, OGTR-107/05