

NASTAVENÍ LABORATORNÍHO PROGRAMU PŘI PRŮZKUMU NESTABILNÍCH SVAHŮ A SEDÁNÍ NÁSYPŮ

DESIGN OF A LABORATORY TESTING PROGRAMME FOR THE INVESTIGATION OF UNSTABLE SLOPES AND EMBANKMENT SETTLEMENT

Ivan Poul

¹Projekce iGEO s.r.o., nám. 28. října 1899/11, 602 00 Brno, e-mail: ivan.poul@igeo.cz

Abstrakt

Příspěvek se zabývá nastavením laboratorního programu při průzkumných pracích pro geotechnicky rizikové úlohy, zejména pro nestabilní svahy a násypová tělesa se sklony k sedání. V těchto případech není laboratorní program administrativním doplňkem vrtů, ale zdrojem parametrů pro stabilitní výpočet, posouzení deformací a návrh sanačních nebo konstrukčních opatření. Základní otázkou proto není počet zkoušek, ale jejich vazba na řešený mechanismus: smykovou poruchu, konsolidaci, stlačitelnost, změnu vodního režimu nebo proměnlivost mechanických vlastností s hloubkou. Text rozlišuje úlohy, pro které jsou rozhodující pevnostní parametry, od úloh, kde jsou klíčové parametry deformační a konsolidační. Zdůrazněna je také nutnost kalibrace nepřímých polních metod průkaznými laboratorními nebo přímými in situ zkouškami. Pro zjednodušení se jedná pouze o modifikovaný model Mohr-Coulomb pro zeminy a Hoek-Brown pro horniny.

Klíčová slova: laboratorní program, smyková pevnost, sedání násypů, stabilita svahu, oedometrická zkouška, triaxiální zkouška, krabicová smyková zkouška, CPTu, DP, kalibrace metod

Abstract: The paper deals with the design of a laboratory testing programme for geotechnically demanding investigation tasks, particularly unstable slopes and embankment structures prone to settlement. In such cases, the laboratory programme is not merely an administrative supplement to borehole investigations but a source of parameters required for stability analyses, deformation assessment, and the design of remediation or structural measures. Therefore, the fundamental issue is not the number of tests performed, but their relevance to the governing mechanism being investigated: shear failure, consolidation, compressibility, changes in groundwater conditions, or variability of mechanical properties with depth. The text distinguishes between problems where strength parameters are decisive and those where deformation and consolidation parameters are the key factors. Emphasis is also placed on the necessity of calibrating indirect field methods using reliable laboratory tests or direct in situ testing. For simplification purposes, the evaluation is limited to the modified Mohr–Coulomb model for soils and the Hoek–Brown model for rocks.

Keywords: laboratory testing programme, shear strength, embankment settlement, slope stability, oedometer test, triaxial test, direct shear test, CPTu, dynamic penetration testing, method calibration

1. Úvod

Laboratorní program je v české průzkumné praxi často sestavován jako běžný balík zkoušek: zrnitost, vlhkost, meze plasticity, případně několik objemových hmotností. Pro základní popis zemin může být takový postup dostačující. U geotechnicky rizikových úloh je však podstatné něco jiného. Projektant nepotřebuje vědět pouze to, jak se zemina jmenuje podle klasifikace, ale jak se bude chovat při zatížení, odvodnění, smyku nebo dlouhodobé konsolidaci.

Nestabilní svahy a sedání násypů ukazují tento rozdíl velmi dobře. U svahu rozhoduje zejména smyková pevnost zemin, pórové tlaky a skutečná poloha potenciální (lépe ověřené) smykové plochy. U násypu nebo jeho podloží rozhoduje stlačitelnost, konsolidační chování, objemová tíha a změna vlastností s hloubkou a velikost pórových tlaků. Stejný laboratorní program proto nemůže být automaticky vhodný pro obě úlohy.

Laboratorní program se má navrhovat od konce. Nejdříve je třeba vědět, jaký výpočet bude proveden, jaký mezní stav má být posouzen a které parametry do něj budou vstupovat. Teprve potom má smysl rozhodovat, jaké vzorky odebrat a jaké zkoušky objednat. Pokud tento krok chybí, vznikne formálně správný průzkum, ale výsledky zůstanou jen obtížně použitelné pro projektování konstrukce.

2. Laboratorní program podle geotechnické úlohy

Základní chybou je postup, při kterém se nejprve stanoví seznam laboratorních zkoušek a teprve následně se hledá jejich využití. Správný přístup je opačný – nejdříve je nutné jednoznačně definovat geotechnický problém a až na jeho základě navrhnout laboratorní program (např. EN 1997-2 ed. 2 Anx. C).

Geotechnická úloha	Rozhodující mechanismus	Potřebné parametry	Typické zkoušky
Nestabilní svah	smyk po ploše, změna pórových tlaků, přetížení	ϕ_{ef} , c_{ef} , c_u , γ , případně reziduální parametry	krabicová smyková zkouška, triaxiál, laboratorní/vrtulková zkouška, objemová hmotnost
Násypové těleso	stlačení a dotvarování násypového materiálu	E_{def} , E_{oed} , mv , cv , γ , w , k , míra zhutnění	edometr, objemová hmotnost, vlhkost, propustnost, případně triaxiál
Podloží násypu	konsolidace měkkých a jemnozrnných vrstev	E_{def} , E_{oed} , cv , k , γ , w , mocnost stlačitelných vrstev	neporušené vzorky, oedometr, propustnost, doplnění CPTu/DP
Použitelnost zemin do násypu	vhodnost materiálu a jeho hutnitelnost	zrnitost, plasticita, vlhkost, CBR_{sat} , případně smykové/deformační vlastnosti	zrnitost, Atterbergovy meze, Proctor standard, CBR_{sat} , doplňkové mechanické zkoušky

Tab. 1: Vazba laboratorního programu na geotechnickou úlohu (srovnej s ČSN EN 1997-2 tab. 2.2. a 2.3). Počet vzorků viz odst. 2.4.2.4, kvalita vzorků tab. 3.1.

Geotechnical problem	Controlling mechanism	Required parameters	Typical tests
Unstable slope	Shear along a failure surface, changes in pore water pressure, surcharge loading	ϕ_{ef} , c_{ef} , c_u , γ , possibly residual strength parameters	Direct shear test, triaxial test, laboratory/vane shear test, bulk density
Embankment body	Compression and creep deformation of embankment material	E_{def} , E_{oed} , mv , cv , γ , w , k , , degree of compaction	Oedometer test, bulk density, water content, permeability test, optionally triaxial test
Embankment foundation soil	Consolidation of soft and fine-grained layers	E_{def} , E_{oed} , cv , k , γ , w , thickness of compressible layers	Undisturbed samples, oedometer test, permeability test, supplemented by CPTu/DPT
Suitability of soils for embankment construction	Material suitability and compactability	Grain-size distribution, plasticity, water content, CBR_{sat} , optionally shear strength and deformation properties	Grain-size analysis, Atterberg limits, Proctor Standard test, CBR_{sat} , supplementary mechanical

Table 1: Relationship between the laboratory testing programme and the geotechnical problem (compare with Tables 2.2 and 2.3 of EN 1997-2). Number of samples according to Section 2.4.2.4; sample quality according to Table 3.1.

U svahů je třeba si položit otázku, zda je rozhodující mělké povrchové porušení, hluboká smyková plocha, reaktivace starého sesuvu, změna hladiny podzemní vody nebo přetížení koruny svahu. Současně je nutné posoudit, zda byly zeminy smykově porušeny až v důsledku sesuvu, nebo zda ke smykovému porušení došlo již dříve a sesuv představuje pouze jeho následný projev. U násypů je naopak zásadní určit, zda dochází k deformacím vlastního násypového tělesa, jeho podloží, nebo obou částí konstrukce současně. U jemnozrnných zvodnělých zemin se stabilita svahu posuzuje jak v režimu neodvodněné smykové pevnosti (např. při rychlé výstavbě nebo pomalém rozptylu tlaků pórové vody), tak i v režimu odvodněných podmínek, které rozhodují o dlouhodobé stabilitě. Teprve odpovědi na tyto otázky určí potřebný rozsah laboratorních zkoušek.

Pro stabilitní výpočty jsou rozhodující zejména efektivní smykové parametry ϕ_{ef} , a c_{ef} , neodvodněná smyková pevnost c_u , objemová tíha γ a informace o hydrogeologických poměrech a vodním režimu. U opakovaně nebo dlouhodobě aktivních sesuvů může být nezbytné stanovit také reziduální smykové parametry, jejichž laboratorní určení je však technicky náročné a vyhledání smykové plochy (ploch).

Při hodnocení deformací a sedání jsou klíčové parametry stlačitelnosti a konsolidace, zejména oedometrický modul deformace E_{oed} , deformační modul E_{def} (stanovený měřením v terénu), součinitel konsolidace c_v , Poissonovo číslo ν , součinitel hydraulické vodivosti k , objemová tíha γ , vlhkost w a napěťová historie zeminy vyjádřená poměrem překonsolidace OCR aj.

3. Vzorky a přímé metody

Laboratorní výsledek začíná už způsobem odběru vzorku (ČSN EN ISO 22475-1). Mechanická zkouška na vzorku, který neodpovídá požadované třídě kvality, může poskytnout číslo, ale nemusí poskytnout použitelný parametr. Vrtý a bagrované sondy proto nejsou pouze prostředkem pro popis vrstev. U geotechnicky rizikových úloh slouží zejména k odběru vzorků pro průkazné laboratorní testování a k ověření výsledků polních metod.

Při mechanickém testování lze pracovně rozlišit metody přímé a nepřímé. Mezi přímé metody lze zařadit laboratorní mechanické analýzy, polní vrtulkovou zkoušku a zatěžovací zkoušku deskou. Nepřímé metody, například dynamické a statické penetrační sondy, dilatometrii, presiometrii nebo geofyziku, neposkytují mechanické parametry samy o sobě, ale prostřednictvím interpretace, korelací a místní zkušeností. To není jejich slabina, pokud jsou správně kalibrovány.

Vrtulková zkouška je vhodným příkladem přímé metody pro jemnozrnné saturované zeminy. Ve vrtu lze rychle stanovit neodvodněnou smykovou pevnost c_u . Výsledek však nesmí být mechanicky přepsán do výpočtu bez úpravy a interpretace. Je třeba zohlednit vlastnosti zeminy, zejména mez tekutosti w_L a podmínky, za kterých je parametr použitelný (EC7-2 příloha I).

Zatěžovací zkouška deskou je naopak velmi praktická pro ověření deformačního chování v terénu. Při použití větší desky (>450 mm) lze lépe postihnout chování většího objemu zeminy do větší hloubky než u malého laboratorního vzorku (hloubka dosahu také závisí na smykové pevnosti, uplatňuje se tu Mohr-Anderonovův model křehkého porušení). U násypů a úprav podloží může být zatěžovací zkouška deskou vhodným kalibračním prvkem pro dynamické penetrace i pro kontrolu předpokladů návrhu. Vrcholným testem je vybudování testovacího polygonu a přímé měření napjatosti, pórových tlaků a zejména sedání.

4. Laboratorní program pro stabilitu svahů

U nestabilních svahů je laboratorní program navázán přímo na stabilitní výpočet. Nestačí určit, zda jde o jíl, prach, písek nebo navážku. Rozhodující je, jaké pevnostní parametry mají být použity ve výpočtu a zda odpovídají skutečnému mechanismu poruchy. U svahu, který se již smykově porušil nebo je dlouhodobě deformován, je použití vrcholových parametrů chybné. V takové úloze mohou být rozhodující pórové tlaky a parametry reziduální a ověření jejich platnosti zpětnou analýzou.

Pro stabilitní posouzení je obvykle nutné získat efektivní smykové parametry ϕ_{ef} a c_{ef} , případně neodvodněnou smykovou pevnost c_u . Zároveň musí být známa objemová tíha a vodní režim. Hladina podzemní vody nebo pórové tlaky nejsou vedlejší údaj. V jemnozrnných zeminách i rozpukaných horninách mohou rozhodnout o tom, zda je svah ve výpočtu stabilní, nebo zda je nutné navrhovat sanaci. Důležitá je take observační metoda v terénu porovnávající současný stav s minulostí.

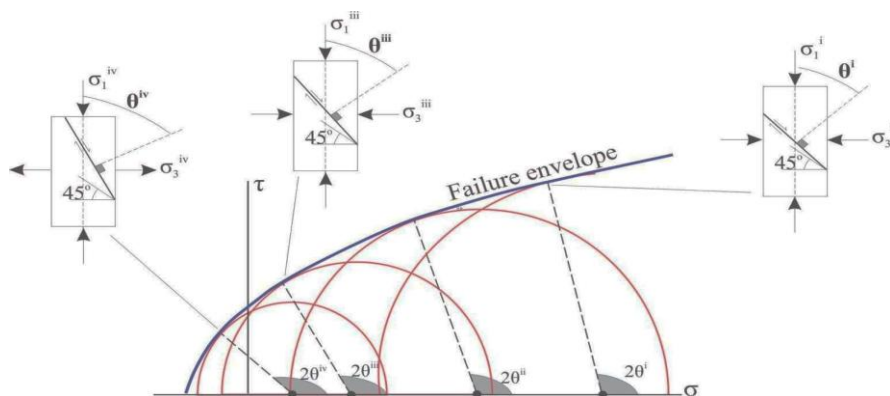
Volba zkoušky musí odpovídat druhu zeminy a měřítku problému. Jemnozrnné zeminy lze testovat v běžných smykových nebo triaxiálních přístrojích (v případě triaxiálu pozor na skryté smykové plochy). U kamenitých navážek, jílovitých štěrků, zvětralých poloskalních hornin nebo hrubozrnných směsí už je běžný rozměr vzorku nedostatečný (dle normy ČSN EN ISO 17892-10 musí být max. velikost zrna 10 % výšky testovaného tělesa zeminy). V takovém případě má smysl uvažovat velkoobjemové smykové zkoušky nebo kombinaci laboratorních dat s polními metodami.

Zrnitost a meze plasticity mají ve stabilitní úloze podpůrnou roli. Pomáhají zeminu klasifikovat, zvolit vhodný typ mechanické zkoušky a interpretovat její chování. Geotechnicky významné jílové minerály zahrnují zejména smektity, illit, kaolinit, vermikulit a chlority, které ovlivňují bobtnavost, plasticitu a smykové vlastnosti Zemin (pozor na tzv. quick clays). Samy o sobě však tyto znalosti nejsou smykovou pevností. Pokud se stabilita svahu počítá z parametrů odhadnutých podle popisu nebo zrušené normy pro plošné zakládání ČSN 73 1001, vzniká model, který bývá zbytečně konzervativní, nebo naopak nebezpečně optimistický.

zemina	φ_{ef} (°) úhel vnitřního tření	c_{ef} (kPa) soudržnost
štěrk	35-45	0-15
písek	28-40	0-15
prach	25-35	5-25
jíl (smektity)	18-25	20-160
jíl (vermikulitů)	25-30	5-10

Tab. 2: Mechanické vlastnosti zemin při realizaci saturované konsolidované odvodněné smykové zkoušky (autorova zkušenost)

Tab. 2: Mechanical properties of soils determined by saturated consolidated drained shear testing (author's experience)



Obr. 1: Zobrazení nelineární Mohrovy obálky a vlivu distribuce napětí ve vzorcích hornin během jednotlivých zkoušek na stanovení velikosti úhlu vnitřního tření (brazílská zkouška odpovídá nejmenší Mohrově kružnici). Získané parametry efektivní smykové pevnosti jsou následně derivací nelineární funkce pro požadovanou úroveň efektivního napětí (platí pro neporušený masiv).

Fig. 1: Visualization of the nonlinear Mohr envelope and the influence of stress distribution within rock specimens during different tests on the resulting friction angle (the Brazilian test corresponds to the smallest Mohr circle). The obtained effective shear strength parameters are subsequently derived from the nonlinear function for the required effective stress level (valid for intact rock only).

5. Laboratorní program pro sedání násypů

U násypů je hlavním problémem deformace. Sedat může vlastní násypové těleso, stlačitelné podloží nebo obě části konstrukce současně. Laboratorní program proto musí vycházet z konkrétního mechanismu deformace – zda se posuzuje krátkodobá deformace, rychlé přitížení během výstavby, dlouhodobé konsolidační sedání, sekundární stlačení, změny vlhkosti, účinky hutnění nebo únosnost po zatížení.

Základní laboratorní metodou pro hodnocení jemnozrnných zemin je oedometrická zkouška. Umožňuje stanovit parametry stlačitelnosti, koeficient konsolidace a koef. hydraulické vodivosti, které jsou nezbytné pro výpočet velikosti a časového průběhu sedání. Výsledky jsou však výrazně ovlivněny kvalitou vzorku, jeho porušením při odběru a reprezentativností zkoušené vrstvy. Jeden kvalitní oedometrický výsledek může být velmi cenný, ale bez znalosti prostorové proměnlivosti podloží nemusí charakterizovat celé řešené území. V souladu s ČSN EN 1997-2 je proto nutné výsledky vyhodnocovat statisticky a posuzovat jejich reprezentativnost. Vhodné je porovnání výsledků zatěžovacích pokusů v terénu, měření deskou a výsledky z oedometru. Metodika je to komplikovaná, neboť z oedometru přichází jednoosá stlačitelnost pracující s pružným a plastickým chováním (při přiblížení se k nulové pórovitosti deformace nenarůstá). Zatěžovací zkouška deskou je složitější, kdy při nižších napětích vzniká pouze pružná deformace, ale při narůstajícím zatížení se začíná projevovat deformace plastická a mnohdy i křehká (vývoj aktivního klínu Mohr-Andersonova modelu $90^\circ - \varphi_{ef}$).

U násypových těles je nutné sledovat také objemovou hmotnost (a stálost), vlhkost, míru zhutnění a případně hydraulické vlastnosti materiálu. Mechanické vlastnosti se mohou s hloubkou měnit v důsledku rozdílného materiálového složení, předchozího zatížení a postupující konsolidace. Z tohoto důvodu je vhodné kombinovat laboratorní zkoušky s penetračními metodami. Penetrace poskytuje informace o průběhu vlastností s hloubkou, zatímco laboratorní zkoušky poskytují diskrétní přímé parametry využitelné pro výpočty.

$E_{oed} = E_{def} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	$\nu = \frac{1 - \sin \varphi_{ef}}{2 - \sin \varphi_{ef}}$	$E_{def} = \beta \cdot E_{oed}$	$\beta = \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 - \nu}$
Z teorie pružnosti vychází vztah pro přepočet E_{oed} na E_{def} a obráceně	Stanovení Poissonova čísla pomocí Jákyho vztahu (jedná se o funkci ef.úhlu vnitřního tření)	Přepočet oedomerického modulu na deformační lze také pomocí koef. β	Maziov koeficient β pro přepočet oedomerického modulu na deformační
Based on the theory of elasticity, a relationship can be derived for the conversion between the oedometer modulus of deformation E_{oed} and the deformation modulus E_{def} , and vice versa.	Determination of Poisson's ratio using Jaky's relationship (as a function of the effective angle of internal friction).	The conversion of the oedometer modulus to the deformation modulus can also be performed using the conversion coefficient β	Mazio's coefficient β for the conversion of the oedometer modulus to the deformation modulus

I.Poul, 2026

Tab. 3: Vztahy pro přepočet E_{oed} na E_{def}

Table 3: Relationships for the conversion of E_{oed} to E_{def}

$q_{dyn,k} = q_{dyn}(N_{10} - xM_v)$	Korekce počtu úderů dynamické penetrace se provádí s ohledem na vliv tření na soutyčí pomocí naměřeného torzního momentu M_v podle metodiky Matyse a kol. 1990. Hodnota korekčního součinitele x se obvykle pohybuje v rozmezí 0,02 až 0,1
	The correction of the dynamic penetration blow count is performed by considering the friction effect along the rods using the measured torsional moment M_v , according to the methodology of Matys et al. 1990. The correction coefficient x usually ranges from 0.02 to 0.1.

Tab. 4: Korelace výsledků DPH

Table 4: Correlations of DPH results

Dynamické penetrace jsou vhodné zejména pro vymezení rozhraní vrstev a změn ulehlosti zemin. U jílovitých a lepidlivých zemin však mohou být výsledky DP velmi významně ovlivněny třením na soutyčí. Bez odpovídajících korekcí a kalibrace mohou vést k nadhodnocení únosnosti, což představuje významné geotechnické riziko (zejména pro pružinové modely hlubinného založení). Statická penetrace, zejména s měřením pórového tlaku (CPTu), poskytuje spojitější a lépe interpretovatelný obraz geotechnického profilu. I zde však platí, že převod naměřených hodnot na výpočtové parametry je odborný interpretační krok, nikoliv pouze odečet jedné hodnoty ze záznamu (viz ČSN EN 1997-2 příloha D, EN 1997-2 ed.2 Apx. 2E a Robertson & Cabal 2024).

6. Kalibrace laboratorních a polních výsledků

Nejdůležitější částí celého průzkumu není počet vrtů ani počet laboratorních protokolů, ale jejich vzájemná návaznost a možnost statistického vyhodnocení výsledků a vyloučení odlehlých hodnot. Laboratorní zkouška poskytuje parametr na konkrétním vzorku (pro danou polohu z hloubky odběru). Polní metoda ukazuje proměnlivost prostředí v hloubce nebo v ploše. Geologický model vysvětluje, proč se prostředí mění. Teprve spojením těchto tří částí vzniká geomechanický model použitelný pro projektování stavby.

Nepřímé metody je nutné kalibrovat metodami přímými. V praxi to znamená například ověřit, zda stlačitelnost odvozená z DP nebo CPTu odpovídá oedometrickým výsledkům (nyní je na stole otázka při jakém napjatostním režimu jsou interpretace porovnány). U jemnozrnných zemin lze dynamické penetrace kalibrovat pomocí vrtulkové zkoušky a testováním tření soutyčí bez působení hrotu. U zemin, kde je možné provést zatěžovací zkoušku deskou, lze penetrační výsledky porovnat s deformačním chováním ověřeným přímo v terénu.

Kalibrace není formální akademický požadavek (viz EN 1997-2 ed. 2). Bez ní může být návrh buď zbytečně drahý, nebo rizikový. Pokud penetrační sonda ukáže zvýšený odpor v hloubce, je třeba vědět, zda jde o skutečné zlepšení mechanických vlastností, o změnu granulometrie, o vliv tření na soutyčí nebo o jiný jev. Pokud oedometr ukáže vysokou stlačitelnost, je nutné ověřit, jak mocná je taková vrstva a zda je plošně spojitá (pomocí penetrační zkoušky). Samotné číslo nestačí.

Metoda	Charakter výstupu	Typická úloha	Poznámka
Edometr	stlačitelnost, koef. hydraulické vodivosti	sedání násypu a podloží	Citlivé na kvalitu neporušeného vzorku, volba zatěžovacích kroků, s vodou, bez vody
Krabicová smyková zkouška	ϕ_{ef} , c_{ef} , případně reziduální parametry	stabilita svahu, smyk po ploše	nutná volba normálových napětí odpovídajících úloze, s vodou, bez vody
Triaxiální zkouška	pevnostní a deformační parametry, koef. hydraulické vodivosti	stabilita, deformace, složitější napjatostní stavy	vhodná tam, kde nestačí prostý smykový model (pozor na smykově porušené zeminy)
Vrtulková zkouška	c_u in situ	saturované jemnozrnné zeminy	výsledek vyžaduje korekce (pomocí w_L)
Zatěžovací deska	E_{def} , chování při zatížení	násypy, podloží, kontrola zlepšení zemin	vhodné pro kalibraci polních nepřímých metod
DP / CPTu	spojitý záznam odporu a odvozené parametry	rozhraní vrstev, proměnlivost s hloubkou	vyžaduje kalibraci přímými metodami

Tab. 2: Příklad návaznosti metod na typické výstupy pro návrh (porovnej s ČSN EN 1997-2 tab. 2.2 a 2.3).

Method	Type of output	Typical application	Note
Oedometer test	Compressibility, coefficient of permeability	Settlement of embankments and foundation soils	Sensitive to the quality of undisturbed samples; selection of loading steps; tests with or without water saturation
Direct shear test	ϕ_{ef} , c_{ef} , possibly residual strength parameters	Slope stability, shear along a failure surface	Requires selection of normal stresses corresponding to the analysed problem; tests with or without water saturation
Triaxial test	Strength and deformation parameters, coefficient of permeability	Stability, deformation, complex stress states	Suitable where a simple shear model is insufficient (attention required for previously sheared soils)
Shearvane test	c_u in situ	Saturated fine-grained soils	Results require correction (e.g., using liquid limit w_L)
Plate load test	E_{def} , load–deformation behaviour	Embankments, subsoil, verification of soil improvement	Suitable for calibration of indirect in situ methods
DP / CPTu	Continuous recording of resistance and derived parameters	Layer interfaces, variability with depth	Requires calibration using direct methods

Table 2: Example of the relationship between testing methods and typical design parameters (compare with Tables 2.2 and 2.3 of EN 1997-2).

7. Klasifikační zkoušky a veřejné zakázky

Klasifikační zkoušky nejsou zbytečné; zrnitost, vlhkost, meze plasticity a objemová hmotnost jsou důležité pro zařazení zemin, kontrolu použitelnosti materiálu a základní interpretaci (ČSN 73 6133, TP 76, SŽ S4, ČSN 75 2410). Jedná se o zjednodušené řešení výběru vhodné zeminy a vyloučení zemin problémových. Informační krize nastává ve chvíli, kdy tyto zkoušky nahrazují (nějakým způsobem odhadem) mechanické parametry tam, kde je nutné provést stabilitní výpočet nebo posouzení sedání, případně hutnicí pokus.

Zrnitostní rozbor je vhodný například u dopravních staveb. Zrnitost však nepředstavuje smykovou pevnost ani stlačitelnost. Obdobně Atterbergovy meze umožňují charakterizovat jemnozrnné zeminy, ale nenahrazují oedometrické zkoušky, krabicový smyk, triaxiální zkoušky ani vhodné metody *in situ*.

Ve veřejných zakázkách bývá laboratorní program často definován pouze jako položkový seznam. Takové zadání je sice jednoduché pro ocenění, ale nemusí odpovídat potřebám geotechnického návrhu. Pokud je předem stanoven pouze počet zrnitostních rozborů, vlhkostí a mezí plasticity bez vazby na očekávaný mechanismus poruchy, nelze očekávat, že výsledky automaticky poskytnou parametry pro návrh sanace svahu nebo posouzení sedání násypu.

Vhodnější je etapový postup. V první fázi se provedou základní identifikační a klasifikační zkoušky. Na základě geologického modelu, výsledků sond a předběžné interpretace se následně volí cílené mechanické zkoušky na reprezentativních vzorcích rozhodujících geotechnických typů vycházejících z požadavků projektanta na řešení dané úlohy. Takový postup je odborně náročnější, ale poskytuje výsledky využitelné pro vlastní návrh.

Pro návrh rozsahu průzkumných prací, tedy počtu vrtů, kopaných sond a penetračních zkoušek, je vhodné vycházet z ČSN EN 1997-2 a EN 1997-2 ed.2 a případně ze zahraničních předpisů, například AASHTO R 13 nebo USACE EM 1110-1-1804. Zejména u liniových staveb (silnice, železnice) AASHTO podporuje využití hustší sítě levnějších nepřímých metod (CPT, DP apod.) doplněné menším počtem vrtů sloužících ke kalibraci a ověření geologického modelu. Některé zahraniční předpisy (např. AS 1726 nebo NZS 4402) počty a typy sond přímo neurčují, ale vycházejí z odborné odpovědnosti geotechnického inženýra (nikoliv geologa), který navrhuje a ověřuje výpočtový model.

Doporučený poměr průzkumných metod může vycházet přibližně z kombinace 30 % CPTu, 30 % dynamických penetračních zkoušek, 30 % vrtů a 10 % přímého testování zemin a hornin (v odůvodněných případech s využitím geofyzikálních metod). Jednotlivé metody v terénu i laboratoři by měly být vzájemně kalibrovány a výsledky následně využity k vytvoření uceleného geotechnického modelu.

8. Závěr

Laboratorní program při průzkumu nestabilních svahů a sedání násypů nesmí být chápán pouze jako doplněk terénních prací. Představuje klíčovou část geotechnického průzkumu, která rozhoduje o tom, zda budou získané výsledky použitelné pro výpočty stability svahů, odhad sedání i návrh sanačních opatření. Základní otázkou proto není počet provedených laboratorních zkoušek, ale jejich účel a správné zaměření na změnu napjatosti při přechodu z původního do projektovaného stavu, včetně změn hydraulického režimu a vývoje pórových tlaků.

V případě stabilitních úloh musí být laboratorní program zaměřen především na stanovení pevnostních parametrů zemin a hornin, jejich deformačních charakteristik a parametrů ovlivňujících proudění podzemní vody. U násypů je naopak nezbytné zaměřit se zejména na stanovení stlačitelnosti, rychlosti konsolidace a prostorové proměnlivosti mechanických vlastností s hloubkou. Je nutné zohlednit například rozdílnou míru předchozího zatížení, stupeň překonsolidace, cementaci nebo změny mineralogického složení jílové frakce (např. zastoupení smektitu, vermikulitu nebo slíd). V obou případech mají klasifikační laboratorní zkoušky pouze podpůrný význam a nemohou nahradit přímé stanovení mechanických parametrů potřebných pro geotechnické výpočty.

Průkazná laboratorní analýza, kvalitní odběr neporušených vzorků podle ČSN EN ISO 22475-1, polní geotechnické zkoušky, geofyzikální profilování a geologická interpretace musí tvořit jeden vzájemně provázaný celek. Nepřímé metody je nezbytné kalibrovat metodami přímými a laboratorní výsledky vždy vztahovat ke skutečné prostorové proměnlivosti geologického prostředí. Ve složitých geologických podmínkách je vhodné využít geofyzikální

metody, například mělká refrakční seismika (MRS) nebo elektrickou odporovou tomografií (ERT), které umožňují zpřesnit geologický model mezi jednotlivými sondami (u předkvartérních hornin lze vyhledat i tektonické zlomy).

V horninovém prostředí představují významný zdroj informací také karotážní měření ve vrtech. Získané údaje lze za pomoci vrtného jádra převést na geomechanické charakteristiky, jako jsou *TCS*, *SCR*, *RQD*, *JRC* a *GSI* (např. Hoek 2007, ČSN EN 1997-2 ed.2), a následně je využít při sestavení Hoekova–Brownova modelu porušeného horninového masivu. Při hodnocení stability horninových svahů je přitom nezbytné věnovat zvláštní pozornost diskontinuitám, neboť ke ztrátě stability zpravidla dochází překročením smykové pevnosti na puklinách, poruchových zónách nebo silně zvětralých polohách. Teprve propojením výsledků laboratorních zkoušek, terénních měření a geologické interpretace vzniká geomechanický model, který nepředstavuje pouze popis geologických vrstev, ale poskytuje technický podklad pro numerické modelování a návrh geotechnických opatření.

$$TCR = \left(\frac{l_{\text{sum of pieces}}}{l_{\text{tot core run}}} \right) \times 100\%$$

$l_{\text{sum of pieces}}$ = Sum of length of core pieces

$l_{\text{tot core run}}$ = Total length of core run

$$SCR = \left(\frac{l_{\text{total length of core in pieces with full core diameter}}}{l_{\text{tot core run}}} \right) \times 100\%$$

$l_{\text{sum of solid core pieces with full diameter}}$ = Sum of length of solid, cylindrical, core pieces

$l_{\text{tot core run}}$ = Total length of core run

$$RQD = \left(\frac{l_{\text{sum of length of core pieces } > 100\text{mm}}}{l_{\text{tot core run}}} \right) \times 100\%$$

$l_{\text{sum of length of core pieces } > 10\text{cm}}$ = Sum of length of core pieces that are > 100 mm (4 inches) measured along the centerline

$l_{\text{tot core run}}$ = Total length of core run

Laboratorní program by proto neměl být navrhován podle rozsahu běžně objednávaných zkoušek (TP76, SŽ S4), ale podle parametrů, které budou skutečně vstupovat do geotechnických výpočtů. U nestabilních svahů a násypů tento princip platí dvojnásob. Laboratorní i terénní zkoušky musí být navrženy tak, aby simulovaly podmínky, které nastanou během výstavby i v průběhu následného provozu stavby; tedy změny napjatosti, pórových tlaků, nasycení a dlouhodobé konsolidace. Pouze tak lze získat vstupní parametry, které budou odpovídat skutečnému chování geotechnické konstrukce.

Literatura a technické podklady

- Hoek, E. (2007). Practical Rock Engineering. Rocscience. - <https://www.rocsience.com/learning/practical-rock-engineering>
- Matys M., Ťavoda O., Čuninka M. (1990): Poľné skúšky zemín. - Alfa Bratislava.
- Robertson, P. & Cabal, K. (2024): Guide to Cone Penetration testing. - <https://cpt-robertson.com/wp-content/uploads/2024/09/cpt-guide-7th-2024.pdf>
- AASHTO R 13: *Standard Practice for Geotechnical Engineering Field Investigations*.
- AS 1726:2017: *Geotechnical Site Investigations*.
- ČSN EN 1997-1 Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla.
- ČSN EN 1997-2 Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy.
- ČSN EN ISO 17892-5: Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 5: Zkouška stlačitelnosti v edometru postupným přitěžováním
- ČSN EN ISO 17892-10 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 10: Krabicová smyková zkouška
- ČSN EN ISO 22475-1 Geotechnický průzkum a zkoušení – Odběr vzorků a měření podzemní vody.
- ČSN 73 6133 Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací.
- EN 1997-2 (ed. 2) – Eurocode 7: Geotechnical design – Part 2: Ground investigation and testing
- NZGS: *Ground Investigation Specification*.
- NZS 4402: *Methods of Testing Soils for Civil Engineering Purposes*.
- SŽ S4: Železniční spodek
- TP 76: Geotechnický průzkum pro pozemní komunikace.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE), EM 1110-1-1804: *Geotechnical Investigations*.