

Předvídatelnost modulu přetvárnosti

Karel Pospíšil, Centrum dopravního výzkumu, Brno

Modul přetvárnosti je vedle míry zhutnění a vlhkosti jedním z nejdůležitějších parametrů zjišťovaných na hotové zemní pláni. Předvídatelnost jeho hodnoty již v době projektové přípravy je důležitou podmínkou pro optimální návrh.

Deformation modulus is besides compaction ratio and moisture content one of the most important parameter checked on finished formation level. Predictability of its value is an important condition for optimal design.

Úvod

Modul přetvárnosti, zejména jeho hodnota zjišťovaná statickou zatěžovací zkouškou ve druhém zatěžovacím cyklu, je vedle míry zhutnění a vlhkosti jedním z nejdůležitějších parametrů zjišťovaných na hotové zemní pláni. Modulem přetvárnosti se ověřují deformační charakteristiky hotové pláně. Předvídatelnost hodnoty modulu přetvárnosti je důležitou podmínkou pro ekonomický návrh zemních prací, neboť tato hodnota se zpravidla určuje právě až po jejich dokončení. Dokončená zemní pláň, či aktivní zóna pak buď splní nebo nesplní na ni kladená kritéria. Naměřili-li se tedy při stanovení míře zhutnění a vlhkosti nižší modul přetvárnosti, než je požadovaný, musí se aktivní zóna zpravidla rozrušit, upravit a znovu zhutnit. Je zřejmé, že tento postup přináší dodatečné náklady, dobře známé např. z výstavby železničního koridoru.

Z popsaného problému vyplývá, že je optimální již v době návrhu vědět, jakou hodnotu modulu přetvárnosti lze očekávat na zemní pláni při použití určitého druhu zemin, případně, jakou úpravu zemin navrhnout, aby očekávaná hodnota uvedeného modulu byla dostačující. Rozvinutím této úvahy lze dojít k otázce, zda existuje nějaká zkouška, která je prováděna již při geotechnickém průzkumu, ze které by se na výsledný modul přetvárnosti dalo usoudit.

Ze studia literatury vyplývá, že touto zkouškou by mohla být zkouška Kalifornského poměru únosnosti CBR, neboť lze najít celou řadu prací, které se zabývají korelováním CBR s některým z modulů zjišťovaných na zemní pláni. Bohužel v dostupné literatuře nebyl nalezen vztah mezi modulem přetvárnosti ve druhém zatěžovacím cyklu a CBR stanoveným za stejné nebo optimální vlhkosti. Proto se uvedeným výzkumem zabývalo Centrum dopravního výzkumu s cílem přinést do uvedené problematiky více světla.

Stanovení modulu přetvárnosti

Modul přetvárnosti se v silničním stavitelství stanovuje statickou zatěžovací zkouškou podle přílohy A, ČSN 72 1006: 1998 /1/. V této normě, resp. v jejích přílohách, jsou popsány ještě další moduly, které se mají stanovovat u staveb železničních a ostatních. Již sám tento fakt přináší řadu problémů, neboť moduly, byť jsou nazývány velmi podobně, jsou nesrovnatelné, neboť metodika jejich stanovení či přístrojové vybavení nutné k jejich měření jsou rozdílné.

Tento článek se zabývá problematikou modulu přetvárnosti u silničních staveb, jehož metodika byla převzata do zmíněné naší normy z německé normy DIN 18134 /2/. Česká norma, obdobně jako její německá předloha, předpokládá stanovení modulu přetvárnosti ve dvou zatěžovacích cyklech za použití kruhové desky o průměru 300 mm. Přípustné je použití i větších kruhových desek. Základním vztahem, ze kterého se při výpočtu modulu přetvárnosti vychází je vztah (1).

$$E_{def,i} = \frac{1,5 \cdot \Delta p \cdot r}{\Delta y} \quad [\text{MPa}], \quad (1)$$

kde

$E_{def,i}$ je modul přetvárnosti v i -tém zatěžovacím cyklu [MPa]; $i = 1$ pro 1. zatěžovací cyklus, resp. $i = 2$ pro druhý zatěžovací cyklus,
 Δp změna kontaktního napětí [MPa],
 r poloměr zatěžovací desky [m],
 Δy změna zatlačení zatěžovací desky při změně napětí Δp [m].

Výpočet modulu přetvárnosti se provede z křivek zatížení/zatlačení jednotlivých zatěžovacích větví, které se vyrovnají regresní křivkou 2. stupně. Tato křivka je popsána rovnicí (2):

$$y = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 \quad [\text{m}] \quad (2)$$

kde

y je zatlačení zatěžovací desky [m],
 p kontaktní napětí [MPa],
 a_0, a_1, a_2 konstanty regresního polynomu [m, m.MPa⁻¹, m.MPa⁻²].

Konstanty regresního polynomu a_0, a_1, a_2 se stanoví metodou nejmenších čtverců řešením rovnice (3) pro hodnoty křivky zatížení/zatlačení jednotlivých zatěžovacích větví:

$$\begin{bmatrix} n & \sum p_i & \sum p_i^2 \\ \sum p_i & \sum p_i^2 & \sum p_i^3 \\ \sum p_i^2 & \sum p_i^3 & \sum p_i^4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum p_i y_i \\ \sum p_i^2 y_i \end{bmatrix} \quad [\text{m}]. \quad (3)$$

Pro modul přetvárnosti, který se stanovuje podle uvedených předpisů v oboru kontaktního napětí $p_1 = 0,3p_{max}$, $p_2 = 0,7p_{max}$, lze upravit rovnici (1) za použití rovnice (2) pro uvedená kontaktní napětí takto:

$$E_{def,i} = \frac{1,5 \cdot \Delta p \cdot r}{\Delta y} \quad (4a)$$

vztah (1)

$$= 1,5 \cdot r \cdot \frac{p_1 - p_2}{y_1 - y_2} \quad (4b)$$

úprava vztahu (1)

$$= 1,5 \cdot r \cdot \frac{p_1 - p_2}{a_0 + a_1 p_1 + a_2 p_1^2 - a_0 - a_1 p_2 - a_2 p_2^2} \quad (4c)$$

úprava vztahu (1) za použití vztahu (2)

$$E_{def,i} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{p_1 - p_2}{a_1(p_1 - p_2) - a_2(p_1^2 - p_2^2)} \quad (4d)$$

pouhá matematická úprava
vztahu (4c)

$$= 1,5 \cdot r \cdot \frac{1}{a_1 + a_2(p_1 + p_2)} \quad (4e)$$

pouhá matematická úprava
vztahu (4d)

$$= \frac{1,5 \cdot r}{a_1 + a_2 p_{\max}} \quad (4f)$$

platí za podmínky
 $p_1 + p_2 = p_{\max}$ [MPa] (4f1)

kde

$p_{\max}$ [MPa] je maximální kontaktní napětí pod zatěžovací deskou pro příslušný zatěžovací cyklus.

Poznámka na okraj: Vztah (4f) uvádí německá i česká norma jako vztah, podle kterého má být modul přetvárnosti počítán. Z poznámky u vztahu (4f) však vyplývá, že k tomuto vztahu lze dojít nikoli jen v případě zmíněného kontaktního napětí $p_1 = 0,3p_{\max}$, $p_2 = 0,7p_{\max}$, ale v případě jakékoli kombinace těchto kontaktních napětí, kdy platí, že $p_1 + p_2 = p_{\max}$ /3/. To je při kombinaci např. $p_1 = 0,1p_{\max}$, $p_2 = 0,9p_{\max}$, nebo dokonce $p_1 = 0$, $p_2 = p_{\max}$. Z tohoto důvodu se jeví podmínka o oboru kontaktního napětí pro výpočet v českém i německém předpisu jako zavádějící.

Kalifornský poměr únosnosti CBR

Kalifornský poměr únosnosti CBR vyjadřuje poměr síly, kterou je třeba vyvodit k zatlačení penetračního válce do zkoušené zeminy danou rychlostí, ku síle, kterou je třeba vyvodit k zatlačení téhož válce do normového materiálu. Hodnota CBR se stanovuje podle ČSN 72 1016: 1992 /4/ a vyčísľuje se v procentech.

Zmíněná česká norma ČSN 72 1016 předpokládá stanovení poměru únosnosti CBR v laboratoři většinou na upraveném vzorku zeminy při zkušební vlhkosti. V českých předpisech se pracuje i s hodnotami poměru únosnosti CBR, které jsou určovány při jiných vlhkostech zkušební vzorku.

Pro lepší orientaci jsou v následujících bodech shrnuty vlhkostní podmínky, které se v českém prostředí vyskytují:

1. **poměr únosnosti CBR stanovovaný při zkušební vlhkosti** – jeho stanovení předpokládá ČSN 72 1016: 1992 /4/, s jeho hodnotou pracuje norma ČSN 73 6133 /5/, která se zabývá návrhem zemního tělesa, viz tabulka 1,
2. **poměr únosnosti CBR stanovovaný za přirozené vlhkosti** – stanovuje se na neporušeném vzorku podle ČSN 72 1016: 1992 /4/,
3. **poměr únosnosti CBR stanovovaný při optimální vlhkosti dle zkoušky Proctor standard** – jeho stanovení přímo nepředpokládá norma ČSN 72 1016: 1992 /4/, ale pracují s ní Technické podmínky TP 77 /6/ platné pro návrh vozovek pozemních komunikací,
4. **poměr únosnosti CBR stanovovaný po čtyřdenním syčení zkušební vzorku vodou** – jeho stanovení

dnes výslovně neupravuje ČSN 72 1016: 1992 /4/, ale předchozí verze ČSN 72 1016: 1968 jej upravovala. S touto hodnotou pracuje v určitých případech pracuje ČSN 73 6133 /5/, viz tabulka 1, a pracují s ní i publikované korelační vztahy mezi poměrem únosnosti CBR a modulem přetvárnosti $E_{def,2}$, viz dále,

5. **poměr únosnosti CBR stanovovaný na zkušebním vzorku při jeho 95 % saturaci** – tyto hodnoty uvádí jako orientační ČSN 72 1002 /7/.

Z uvedeného výčtu je zřejmé, že je nezbytné vždy vědět, který poměr únosnosti CBR je v dané situaci vyžadován či uváděn. Bohužel v řadě materiálů se jejich autor omezí jen na označení CBR bez udání, při jaké vlhkosti je poměr únosnosti vlastně stanovován. Přitom vlhkostní podmínky při stanovení poměru únosnosti ovlivňují jeho hodnotu zásadně.

V tabulce 1 jsou uvedeny hodnoty poměru únosnosti CBR tak, jak je předepisuje pro zlepšené zeminy použité v jednotlivých částech zemního tělesa ČSN 73 6133 /5/. Většina hodnot poměru únosnosti CBR je předepisována při zkušební vlhkosti podle ČSN 72 1016 /4/ a jedna hodnota na vzorku uloženém na 7 dní do vlhkého prostředí (s nejméně 95 % relativní vlhkostí vzduchu) a po následné saturaci ponořením vzorku do vody na dobu 4 dní (CBR_{sat}).

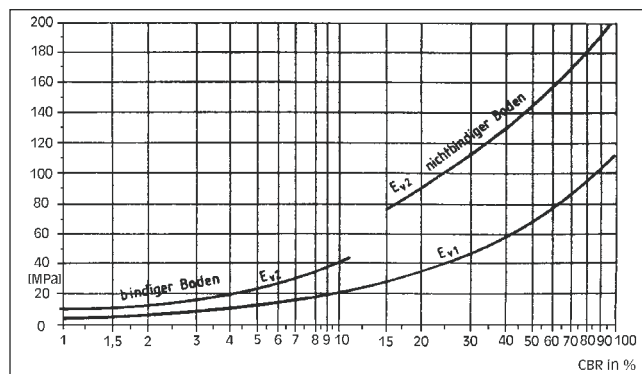
Místo použití	Druh zlepšení	
	Mechanické zlepšení	Zlepšení příměsí pojiva
V podloží násypu	min. 10 % CBR	min. 10 % CBR
V násypu	min. 10 % CBR	min. 10 % CBR
Vrstva v aktivní zóně	min. 15 % CBR	min. 10 % CBR_{sat}

Tab. 1 Požadované hodnoty poměru únosnosti (CBR) zlepšené zeminy /5/

Tab. 1 Requested values of CBR /5/

Korelace modulu přetvárnosti a poměru únosnosti

V literatuře, zejména zahraniční, lze najít grafické či tabulkové vyjádření obou geotechnických veličin. V Německu se uvedenou problematikou zabýval prof. Floss. Výsledky zkoumání byly publikovány v odborném tisku, např. /8/. V této práci je uveden graf závislosti mezi modulem přetvárnosti v prvním i druhém zatěžovacím cyklu, v grafu označené E_{v1} a E_{v2} , na poměru únosnosti CBR, viz obr. 1.



Obr. 1 Závislosti modulů přetvárnosti E_v [MPa] na poměru únosnosti CBR [%], /8/.

Fig. 1 Relationship between deformation modulus E_v [MPa] and California Bearing Ratio (CBR) [%], /8/.

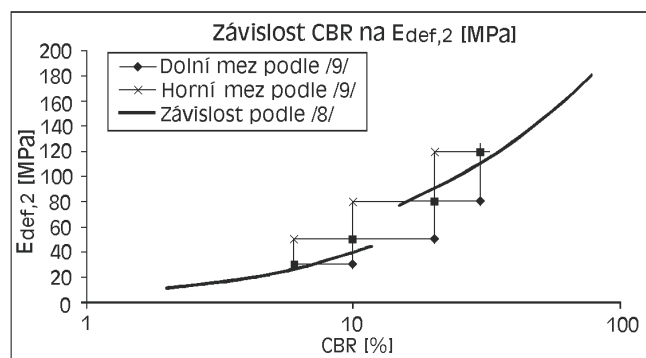
Další publikace uvedeného vztahu pochází z francouzského prostředí. Se vztahem mezi poměrem únosnosti CBR a modulem přetvárnosti ve druhém zatěžovacím cyklu pracuje ve své publikaci Caroff et al. /9/. V této publikaci jsou uvedeny vztahy mezi CBR a modulem přetvárnosti E_{v2} tabelárně, viz tab. 2.

Třída únosnosti zeminy	CBR [%]	$E_{v2}=E_{def,2}$ [MPa]
S ₀	0 - 3	nebylo měřeno
S ₁	3 - 6	nebylo měřeno
S ₁₂	6 - 10	30 - 50
S ₂	10 - 20	50 - 80
S ₂₃	20 - 30	80 - 120
S ₃	není reprezentativní	120 - 200
S ₄	není reprezentativní	nad 200

Tab. 2 Vztah poměru únosnosti CBR a modulu přetvárnosti podle /9/

Tab. 2 Relation of CBR and deformation modulus according to /9/

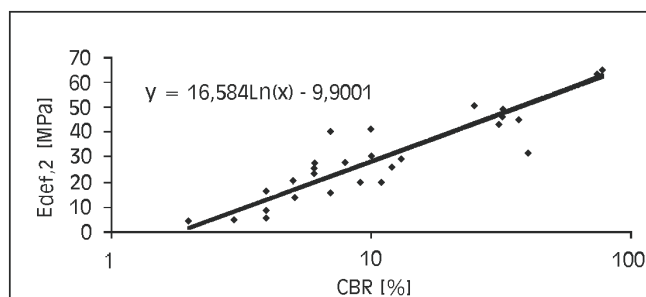
Závislost dle grafu z obrázku 1 lze zakreslit společně se závislostí z tabulky 2 do jednoho grafu, čímž se provede srovnání závislostí publikovaných v /8/ a /9/. Uvedené srovnání ukazuje obr. 2.



Obr. 2 Srovnání závislostí modulu přetvárnosti na poměru únosnosti CBR podle /8/ a /9/

Fig. 2 Comparison of relationships between deformation modulus E_v [MPa] and California Bearing Ratio (CBR) [%], according to /8/ and /9/

Z obr. 2 je zřejmé, že závěry prací /8/ a /9/ se v podstatě shodují. Pro vztah poměru únosnosti CBR a modulu přetvárnosti ve druhém zatěžovacím cyklu (určovaného podle dnes platné metodiky) nebyly v literatuře nalezeny žádné další relevantní informace, které by vycházely z původního výzkumu. Z citované práce /9/ navíc vyplývá, že pro porovnávání poměru únosnosti CBR s modulem přetvárnosti je používána hodnota poměru únosnosti měřená na saturovaném vzorku, nikoli tedy za vlhkosti určené podle ČSN 72 1016: 1992 /4/.

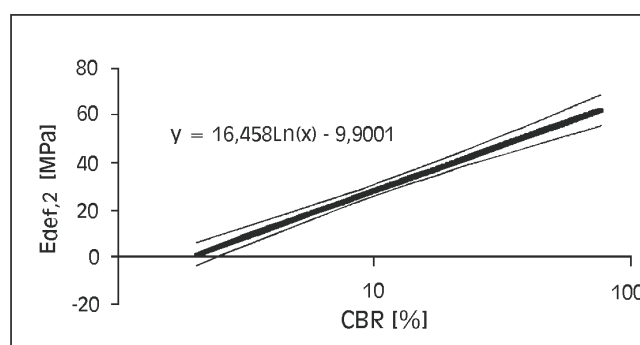


Obr. 3 Regresní funkce proložená metodou nejmenších čtverců naměřenými hodnotami

Fig. 3 Regression function fitted by least square method through measured points

V Centru dopravního výzkumu (CDV) byl před nedávnem ukončen výzkum, který měl za cíl zobektivizovat vztah obou geotechnických veličin za podmínek, které předpokládají české předpisy. Výzkum byl prováděn na sedmi druhích zemin tak, že k in situ (na stavbě a v LGZP /10/) naměřené hodnotě modulu přetvárnosti ve druhém zatěžovacím cyklu $E_{def,2}$ byla v laboratoři na neporušeném vzorku zjištěna hodnota poměru únosnosti CBR. Tímto způsobem bylo získáno celkem 38 uspořádaných dvojic [CBR, $E_{def,2}$], výsledky byly publikovány v /11/.

Obr. 3 ukazuje rozložení naměřených hodnot a obr. 4 pak interval spolehlivosti (konfidenční interval) skutečné regresní funkce na hladině významnosti $\alpha = 0,01$. Koeficient korelace regresní funkce byl $r = 0,937247$. Zde je nutno poznamenat, že celkový počet měření není dostatečný pro analýzu rozptylu, nicméně vlastní regresní funkce a její konfidenční interval byly určeny s vysokou mírou spolehlivosti.



Obr. 4 Interval spolehlivosti regresní funkce na hladině významnosti $\alpha = 0,01$

Fig. 4 Regression function confidence interval on significance level $\alpha = 0,01$

Pořad. číslo	Název zeminy	Symbol	Obsah jem. částic f [%]	Poměr únosnosti		Modul $E_{def,2}$ [MPa]	Skup. zemín
				za opt. vlhkosti	za 95% saturace		
1	šterkovitá hlína	F1 MG	35 - 65	8 - 18	5 - 10	20 - 40	V - VII
2	šterkovitý jíl	F2 CG	35 - 65	5 - 10	3 - 7	15 - 30	V - VII
3	písečtá hlína I	F3 MS ₁	35 - 50	5 - 25	4 - 15	15 - 45	III - V
4	písečtá hlína II	F3 MS ₂	50 - 65	3 - 15	2 - 5	5 - 40	VII - IX
5	písečtý jíl I	F4 CS ₁	35 - 50	5 - 30	5 - 20	15 - 50	IV - V
6	písečtý jíl II	F4 CS ₂	50 - 65	2 - 20	0 - 4	0 - 40	VII - IX
7	hlína s nízkou plasticitou	F5 ML	nad 65	2 - 20	2 - 7	0 - 40	VII - IX
8	hlína se střední plasticitou	F5 MI	nad 65	2 - 15	1 - 6	0 - 40	VII - IX
9	jíl s nízkou plasticitou	F6 CL	nad 65	3 - 20	1 - 8	5 - 40	VIII - X
10	jíl se střední plasticitou	F6 CI	nad 65	2 - 20	0 - 6	0 - 40	VIII - X
11	hlína s vysokou plasticitou	F7 MH	nad 65	3 - 7	0 - 4	5 - 25	VII - IX
12	hlína s velmi vysokou plasticitou	F7 MV	nad 65	2 - 6	0 - 3	0 - 20	VIII - X
13	hlína s extrémně vysokou plasticitou	F7 ME	nad 65	2 - 5	0 - 2	0 - 20	IX - X
14	jíl s vysokou plasticitou	F8 CH	nad 65	2 - 7	0 - 3	0 - 25	VIII - X
15	jíl s velmi vysokou plasticitou	F8 CV	nad 65	1 - 7	0 - 3	0 - 25	VIII - X
16	jíl s extrémně vysokou plasticitou	F8 CE	nad 65	1 - 6	0 - 3	0 - 20	IX - X
17	písek dobře zrněný	S1 SW	do 5	-	-	70 - 120	I - II
18	písek špatně zrněný	S2 SP	do 5	-	-	40 - 70	II - III
19	písek s příměsí jemnozrnné zeminy	S3 S-F	5 - 15	8 - 70	6 - 25	20 - 65	III - V
20	písek hlinitý	S4 SM	15 - 35	6 - 50	4 - 15	15 - 55	III - V
21	písek jílovitý	S5 SC	15 - 35	4 - 30	2 - 12	10 - 50	III - V
22	šterk dobře zrněný	G1 CW	do 5	-	-	100 - 120	I - II
23	šterk špatně zrněný	G2 GP	do 5	-	-	70 - 120	I - III
24	šterk s příměsí jemnozrnné zeminy	G3 G-F	5 - 15	20 - 90	6 - 60	35 - 65	I - III
25	šterk hlinitý	G4 GM	15 - 35	10 - 60	4 - 40	25 - 60	I - III
26	šterk jílovitý	G5 GC	15 - 35	5 - 30	3 - 20	15 - 50	II - IV

Tab. 3 Orientační hodnoty poměru únosnosti CBR podle ČSN 72 1002 a vypočtené hodnoty modulu přetvárnosti $E_{def,2}$

Tab. 3 Approximate values of CBR according to ČSN 72 1002 and calculated values of deformation modulus $E_{def,2}$

Poznámka: V tabulce 3 jsou uvedeny intervaly, kterých může nabývat modul přetvárnosti $E_{def,2}$, i u zemin s označením SW, SP, GW, GP, pro které ČSN 72 1002 nestanoví orientační hodnoty poměru únosnosti CBR. Tyto hodnoty byly poskytnuty doc. Kudrnou /12/ a byly zřejmě stanoveny na základě jeho zkušeností.

Na základě výsledků výzkumu CDV /11/ byla sestavena tabulka, která uvádí orientační hodnoty modulu přetvárnosti ve druhém zatěžovacím cyklu pro jednotlivé zeminy, viz tabulka 3. Za základ této tabulky jsou použity údaje z normy ČSN 72 1002 /7/, která ve své informativní příloze B uvádí orientační hodnoty poměru únosnosti pro jednotlivé druhy zemin a v příloze A pak jednotlivé zeminy zařazuje do skupin podle vhodnosti do podloží. Tabulka 3 je tedy kompilací relevantních údajů z citovaných příloh ČSN 72 1002 a navíc obsahuje informaci o dosažitelném modulu přetvárnosti, který byl zjištěn na základě uvedeného výzkumu CDV /11/.

Závěr

V některých českých předpisech, např. TP 78 /13/, se pracuje s hodnotou CBR = 5 %, jakožto s hodnotou, která má být dostatečná pro únosnost zeminy zemní pláň. I když zde není explicitně uvedeno, za jakých vlhkostních podmínek má být poměr únosnosti CBR zjišťován, lze předpokládat, že touto vlhkostí má být zkušební vlhkost podle ČSN 72 1016 /4/. Přitom má být na hotové zemní pláni dosaženo modulu přetvárnosti ve druhém zatěžovacím cyklu nejméně 45 MPa a u hrubozrnných zemin dokonce 120 MPa.

Z publikovaných a citovaných výsledků zahraničních autorů /8/ a /9/ však vyplývá, že pravděpodobná hodnota poměru únosnosti zjišťovaná na saturovaném vzorku, při které lze dosáhnout modulu přetvárnosti $E_{def,2} = 45$ MPa, je asi CBR = 11 %, srov. obr. 1. Uvážíme-li dále, že poměr únosnosti stanovený na saturovaném vzorku je výrazně nižší než u vzorku s optimální vlhkostí, srov. hodnoty z tabulky 3 převzaté z ČSN 72 1002, lze dovodit, že požadavek na hodnotu poměru únosnosti CBR stanovený při optimální či zkušební vlhkosti musí být také výrazně vyšší.

Z výzkumu CDV vyplývá hodnota CBR zjišťovaná za stejné vlhkosti, jako je měřen modul přetvárnosti. Podle tohoto výzkumu je pravděpodobnou střední hodnotou pro modul přetvárnosti $E_{def,2} = 45$ MPa přibližně CBR = 28 %.

Pro úplnost a korektnost uvedených skutečností je třeba uvést, že v době vzniku TP 78 /13/ v roce 1995 neplatila norma ČSN 72 1006: 1998, podle které se modul přetvárnosti dnes určuje, a že v americké a britské literatuře lze nalézt hodnotu CBR = 5 % jako dostatečnou pro podloží pozemních komunikací. Tato hodnota se zde však většinou stanovuje na saturovaném vzorku a navíc se v těchto zemích nepoužívá modul přetvárnosti, nýbrž moduly pružnosti či modul reakce, které se stanovují odlišně od modulu přetvárnosti. Zavedení modulu přetvárnosti převzetím německého předpisu /2/ se tedy u nás změnila situace.

Literatura

- /1/ ČSN 72 1006 Kontrola zhutnění zemin a sypanin, 1998.
- /2/ DIN 18134 – Plattendruckversuch, DIN, 1995.
- /3/ RÁKOSNÍKOVÁ, R.: Rozbor ČSN 72 1006, nepublikovaný materiál CDV, Brno 2002.

- /4/ ČSN 72 1016 Laboratorní stanovení poměru únosnosti zemin (CBR), 1992.
- /5/ ČSN 73 6133 Navrhování a provádění zemního tělesa pozemních komunikací, 1998.
- /6/ Navrhování vozovek pozemních komunikací, Technické podmínky Ministerstva dopravy a spojů ČR č. 77 (TP 77), MSD ČR, 1995.
- /7/ ČSN 72 1002 Klasifikace zemin pro dopravní stavby, 1993.
- /8/ FLOSS, R.: Bodenmechanische Gesichtspunkte bei Auswahl und Dimensionierung von Strassenbefestigungen. In: Strasse und Autobahn, pp. 17–26, January 1973.
- /9/ CARROFF, G., CASAN, Y., GUIONNET, C., MOSSON, P., PUECH, J-P.: La conception des chaussées d'autoroute. In: Revue générale des routes, n° 767, pp. 14–17, 11/1998.
- /10/ POSPÍŠIL, K.: Laboratorní geotechnické zkušební pole v Centru dopravního výzkumu, Geotechnika, 2002, č. 2, s. 18–19.
- /11/ POSPÍŠIL, K.: Návrh a kontrola zemních prací, In: Silniční obzor 3/2002, pp. 63–67.
- /12/ KUDRNA, J.: Doplněk k připomínkám Ing. Pospíšila k TP 77, In: Poznámky k projednávání TP 77 na Ředitelství silnic a dálnic ČR, červen 2002, nepublikováno.
- /13/ Katalog vozovek pozemních komunikací, Technické podmínky Ministerstva dopravy a spojů ČR č. 78 (TP 78), MSD ČR, 1995.

Ing. Karel Pospíšil, Ph.D., Centrum dopravního výzkumu, Líšeňská 33a, 636 00 Brno, sekce dopravní infrastruktury, Olbrachtova 1740, 666 01 Tišnov, telefon: 549 429 342, e-mail: pospisil@cdv.cz