

# Vlastnosti směsného pojiva ve srovnání s vápnem a cementem

(Hans-Werner Schode, *Straße+Autobahn*, září 2006, str. 541 – 547)

Již déle než 60 let jsou v Německu prováděny stabilizace zemin s pojivem jako je zlepšení zemin při zemních pracích nebo zpevnování zemin při stavbě vozovek, které činí podstatný přínos k šetření přírodních zdrojů. Podle druhu zeminy a vlhkosti lze použít hydraulicky působící pojivo nebo stavební vápno. V roce 1994 byla poprvé při stavbě spolkové vozovky B 300, okružní komunikace u Peutenhausenu (Silniční úřad Ingolstadt) použita pro zlepšení zeminy směs těchto dvou pojiv. Záměrem směsného pojiva je kombinace specifických předností těchto dvou pojiv v jednom pracovním procesu. Pomocí směsného pojiva má dojít ke snížení vlhkosti u velmi vlhkých soudržných zemin a zemin se širokou zrnitostí a zároveň v jednom pracovním procesu dosáhnout zvýšení zamýšlené nebo eventuálně požadované pevnosti v tlaku. Podle vlastností pojiva činí doba reakce u cementu 1 hodinu a u vápna 24 hodin. Pro směsné pojivo ještě neexistují žádné předpisy. V rámci výzkumného úkolu bylo zkoumáno reaktivní chování směsného pojiva při úpravě zemin. V řadě zkoušek byly provedeny průkazní zkoušky a stanovení pevnosti s normalizovanými pojivy, vápnem a cementem, i s vybranými směsnými pojivy.

## 1. Úvod

Poprvé byl cement použit ke zlepšení únosnosti vozovky při stavbě dálnice již před 2. světovou válkou; přičemž byla cementem stabilizována zpravidla horní podkladní vrstva. Po 2. světové válce bylo pro zlepšení zemin, v některých projektech také pro zpevnění zemin, používáno především vápno [1]. Kvalita a životnost těchto vozovek tak byla rozhodně zlepšena. Zkušenosti, které v Německu existují pro úpravu zemin pomocí pojiva, jsou zdokumentovány v „Informačním listu pro zpevnění a zlepšení zemin pomocí pojiv“ [2]. Podle Informačního listu je **úprava zemin** rozdělena na **zpevnění zemin a zlepšení zemin**<sup>1</sup>.

**Zpevnění zemin** jsou činnosti, při kterých je přidáním pojiva zvýšena odolnost zemin proti zatěžování dopravou a působení klimatu. Zemina se tak stane trvale nosná a mrazuvzdorná.

**Zlepšení zemin** jsou činnosti ke zlepšení schopnosti pokládky a zhutnitelnosti zemin a k ulehčení provádění stavebních prací. Zlepšení zemin může být dosaženo přidáním pojiva, přidáním jiného vhodného stavebního materiálu nebo také jinými opatřeními.

Dále byl také v novém Informačním listu zaveden ještě pojem kvalifikované zlepšení zemin, který popisuje zlepšení zemin se zvýšenými požadavky na mrazuvzdornost a únosnost. Pomocí kvalifikovaného zlepšení zemin může být silně namrzavá zemina třídy citlivosti na mráz F3 na zemní pláni zlepšena tak, že vykazuje pouze minimální nebezpečí namrzání a může být stanovena třída citlivosti na mráz F2. Tento postup byl rovněž přijat při přepracování nových Doplňujících technických podmínek a směrnic pro zemní práce v silničním stavitelství (ZTVE-StB – **Z**usätzliche **T**echnische **V**ertragsbedingungen und **R**ichtlinien für **E**rdarbeiten im **S**traßenbau) a vedl k tomu, že tloušťka mrazuvzdorné konstrukce vozovky mohla být při vyměřování konstrukce vozovky podle Směrnic pro navrhování konstrukcí vozovek dopravních ploch (RStO – **R**ichtlinien für die **S**tandardisierung des **O**berbaus von Verkehrsflächen) zmenšena v daném případě o 10 cm.

Vápno je obvykle používáno u zemin s jemnou a širokou zrnitostí a cement u zemin se širokou a hrubou zrnitostí [3]. Vápno a cement byly dosud používány vždy ve dvou pracovních krocích, přičemž nejprve byla zemina pomocí vápna (přednostně bílé nehašené vápno nebo hašené vápno) upravena a bylo umožněno její zpracování a v následném kroku bylo dosaženo stabilizace nebo zvýšení únosnosti pomocí cementu nebo hydraulického pojiva. Při použití směsného pojiva jsou využity přednosti obou pojiv během jednoho pracovního kroku. Ačkoliv je již v Německu směsné pojivo nabízeno na trhu několika výrobci, reaktivní chování tohoto směsného pojiva ještě není dostatečně známo. V tabulce 1 je uveden tržní přehled směsného pojiva, které je v současné době používáno v Německu (stav v roce 2005).

<sup>1</sup> Poznámka překladatele: Podle Národních příloh k ČSN EN 14227-10, a -11 zemina upravená zahrnuje tyto typy: zeminu zpevněnou; zeminu stabilizovanou a zeminu zlepšenou.

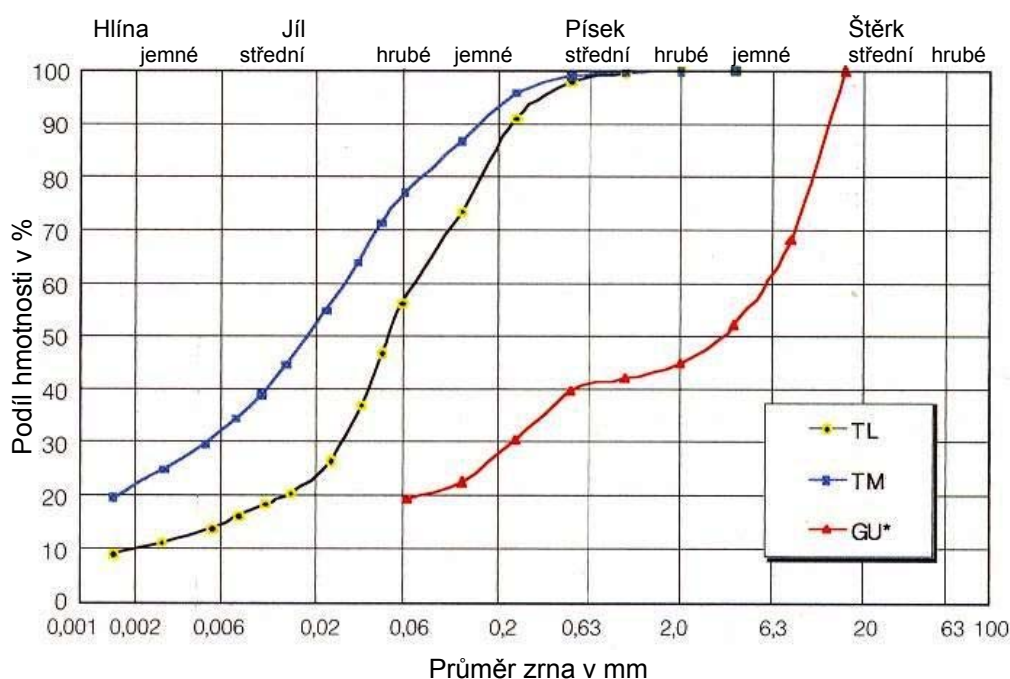
Výrobce	Název výrobku	Složky			Údaje výrobce	Poznámky
		Vápno	Cement	Ostatní		
		%	%	%		
BZH, Hartmannsdorf	Festical	20 - 70		30 - 80 (BFA)	Hydraulické směsné pojivo ke zlepšení a zpevnění zemin z reaktivního vápna, latentních hydraulických a pucolánových přísad (popílek z hnědého uhlí z filtru)	BFA = popílek z hnědého uhlí z filtru Žádné údaje k přesnému složení složek a kvalitě
Dyckerhoff Zement, Wiesbaden	Varilith F Varilith FF Varilith TF Varilith T	cca 70 cca 50 cca 30 bez údajů	cca 30 cca 50 cca 70 bez údajů		Převlhčené zeminy Převlhčené zeminy, vyšší pevnosti Suché zeminy, vyšší pevnosti Suché zeminy	Lze přimísiť minerální a pucolánové přísady
Georoc, Dotternhausen + Lizenznehmer dornburger Zement Oberaue – GHT, Hamm	Dorosol C 30 Dorosol C 50 Dorosol C 70	30 50 70	35 25 15	35 (T) 25 (T) 15 (T)	Jiné složení může být namícháno na přání zákazníka	T = pálená živičná břidlice, má v jemně mletém stavu hydraulické a pucolánové vlastnosti
	Dorosol Pro C	–	–	–	Směsné pojivo s malým podílem prachu	Složky jako Dorosol C
Hauri Bötzingen	Phocal C 30 Phocal C 50 Phocal C 70	30 50 70		70 (HBR) 50 (HBR) 30 (HBR)	Hydraulický podíl z fonolitu + cementového slínku	HBR = pojivo pro obrusné vrstvy, třída pevnosti 32,5 E
HeidelbergerCement, Werk Wetzlar	Budfix	bez údajů	bez údajů	bez údajů (SM)	Složení ze složek cement, vápno a minerální přísady podle průkazných zkoušek	SM = kamenná moučka
HeidelbergerCement, Werk Leimen	Multicrete Standard Multicrete Typ S nebo M	30 50	70 50		Typ M nebo S podle požadavků na počáteční nebo koncové pevnosti	
	DUOLIT 30 DUOLIT 50 DUOLIT 70 DUOLIT F 30 DUOLIT F 50 DUOLIT F 70	30 50 70 30 50 70	70 50 30 50 – 65 30 – 45 10 – 25	5 – 20 (FA) 5 – 20 (FA) 5 – 20 (FA)	FA = popílek	
Schwenk, Ulm	Bodenbinder 300 Bodenbinder 500 Bodenbinder B40	30 50 40	70 50 60		Je možné přidat latentní hydraulické a pucolánové přísady	Bodenbinder B40 je vyráběn v závodě Bernburg
Walhalla Kalk, Regensburg	Terramix 508 Terramix U 530 Terramix 529	cca 30 cca 50 cca 70	cca 70 cca 50 cca 50		Hydraulické složky s pomalejší charakteristikou tvrdnutí	
	Terramix 513 Terramix 503 Terramix 507	cca 30 cca 50 cca 70			Hydraulické složky s rychlejší charakteristikou tvrdnutí	
Zement- und Kalkwerk Otterbein, Großenlütder	Terrafix	bez údajů	bez údajů		Směsné pojivo z bílého jemného vápna a hydraulického pojiva	

Tabulka 1 – Přehled směsného pojiva na německém trhu

Ve výzkumném úkolu FA 5.130 „Výzkum reaktivního chování směsného pojiva k úpravě zemin“ bylo zkoumáno, jak mohou být využita směsná pojiva ve srovnání s normovanými pojivy, vápnem a cementem, ke zlepšení zemin, jaká srovnání ohledně únosnosti a změny vlhkosti mohou být učiněna a jakou dobu reakce pro směsné pojivo je třeba zvolit.

## 2. Metodika výzkumu

Pro výzkum byly zvoleny 3 druhy zemin ze skupiny TL, TM, GU podle DIN 18196 (obrázek 1) a bylo vybráno pět různých druhů pojiva. Kromě vstupního pojiva z portlandského cementu (100% CEM I třídy pevnosti 32,5 R) a bílého vápna (100% CL 90 Q) byla vyrobena 2 směsná pojiva MB 50/50 a MB 30/70 s podílem vápna 50 % a 30 %. V oddělené řadě zkoušek byl použit namísto rychle reagujícího CEM i pomalu tuhnoucí cement CEM III (vysokopecní cement s třídou pevnosti 32,5 N) ve složení s 50% CL 90 Q. Při zkouškách byly použity doby reakce 1 hodina, 4 hodiny a 24 hodin. Změny vlhkosti při přidání pojiva byly zkoumány pomocí Proctora. Pevnostní chování zkušebních těles bylo zjišťováno zkouškami v tlaku v jednoosém přístroji a zkouškami CBR. Dále bylo provedeno měření teploty směsí zemin a pojiva bezprostředně po výrobě zkušebního tělesa.

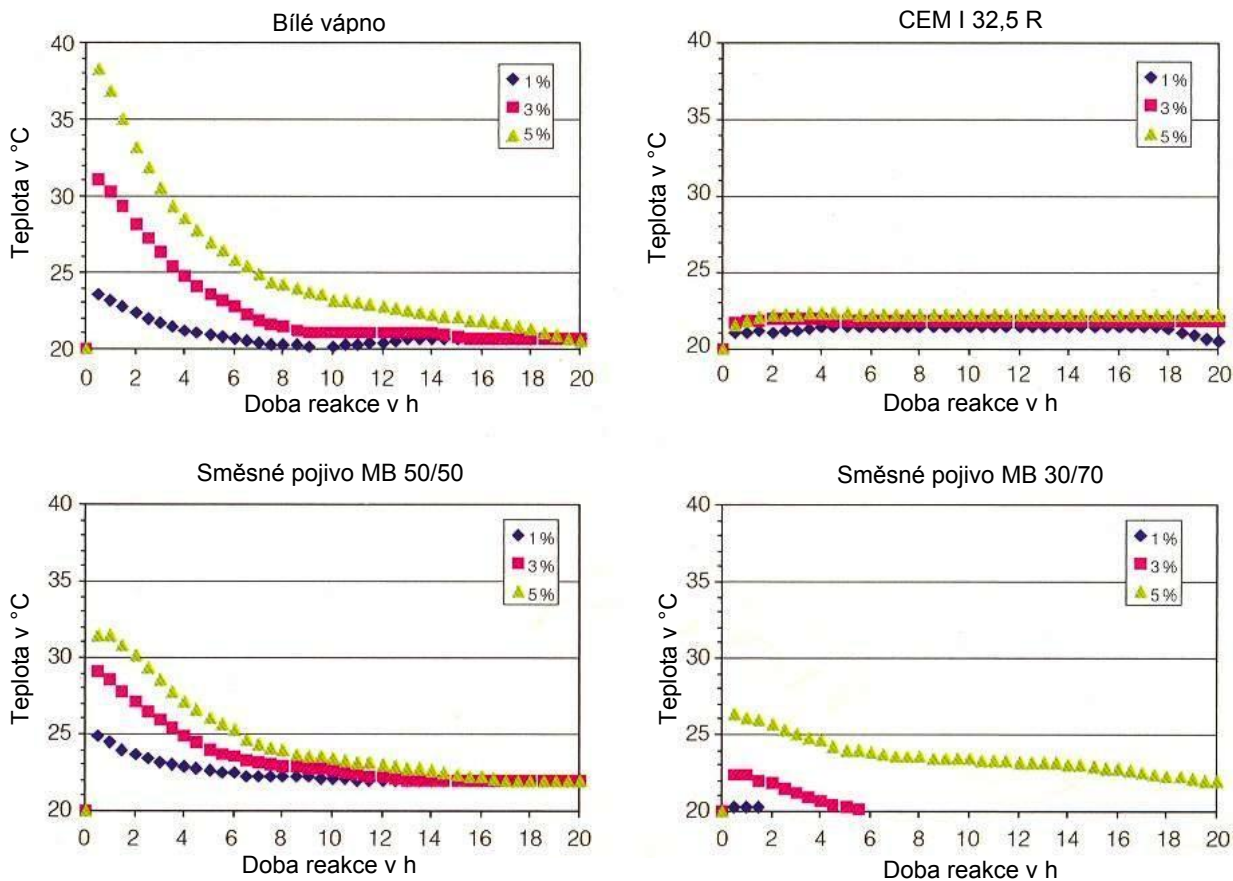


Obrázek 1 – Zrnitost zkoumaných zemin

## 3. Výsledky zkoušek

### Měření teploty

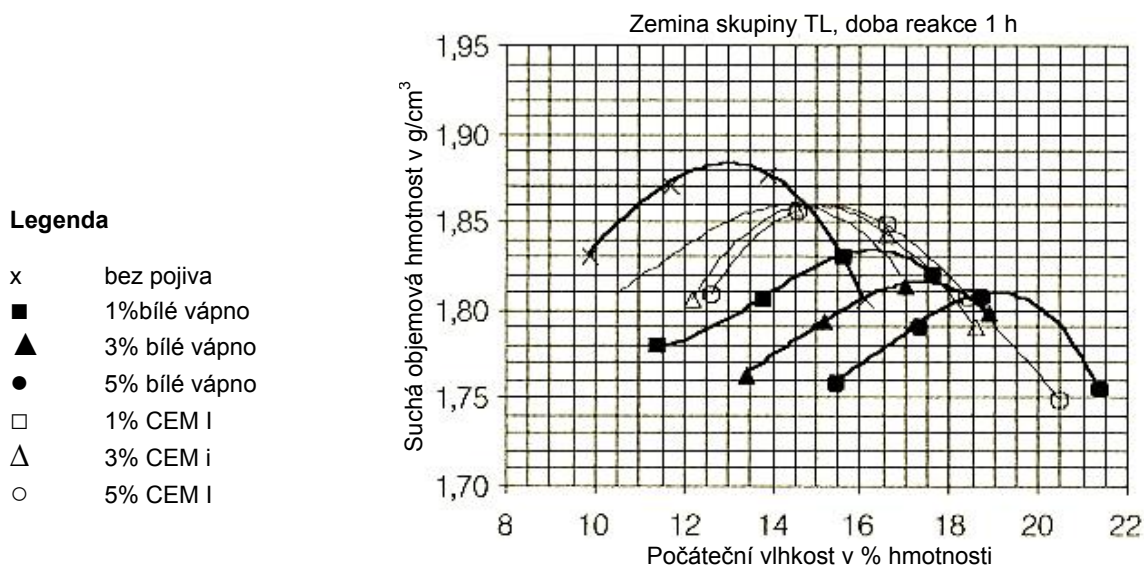
Bezprostředně po smísení pojiva byly vzorky naplněny do čtvercových zkušebních forem a lehce ručně zhutněny. Následně byla zavedena teplotní sonda a teplota se nepřetržitě měřila každých 30 minut po dobu až 48 hodin. Nejsilnější reakce se zvýšením teploty o cca 20 °C ve směsi pojiva a zeminy byla naměřena u bílého vápna v množství 5 % hmotnosti během prvních 30 minut. Po cca 12 až 14 hodinách docházelo již jen k velmi malým zvýšením teploty. U cementu se teplota na rozdíl od počáteční teploty zvýšila jen nepatrně. U obou směsných pojiv byla naměřena v závislosti na množství přidaného vápna pozoruhodná zvýšení teplot po dobu cca 8 až 10 hodin u MB 50/50 a po dobu cca 4 až 6 hodin u MB 30/70 (obrázek 2).



Obrázek 2 – Měření teploty u zemin skupiny TL, porovnání pojiv

### Proctorovy zkoušky

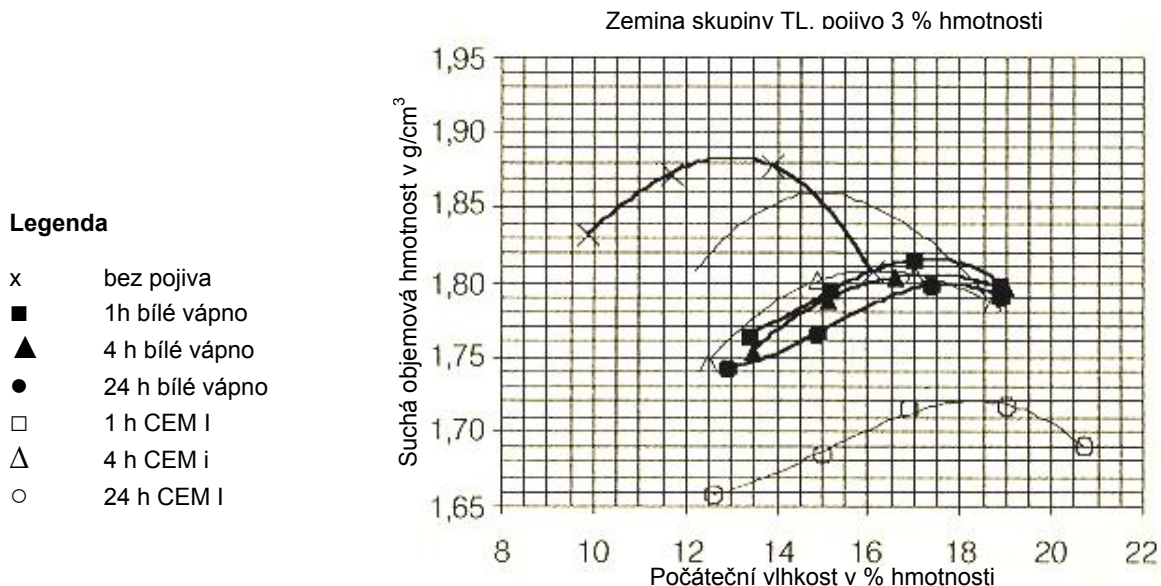
Při zlepšení zemin pomocí vápna je známo, že se Proctorova křivka vápnem zlepšených zemin posouvá k vlhké straně a odebírá Proctorovu objemovou hmotnost [4]. Snížení suché objemové hmotnosti je možné vztáhnout na malou sypnou hmotnost vápna ve srovnání se zemínou, z velké části je také zapříčiněno tvorbou hrudek, které vyvolává pevná struktura, a které není možné porušit hutněním. Při zkouškách s cementem není tato skutečnost tak zcela jednoznačná, suchá objemová hmotnost se však rovněž sníží a optimální vlhkost se zvýší (obrázek 3).



Obrázek 3 – Srovnání Proctorových křivek směsi zeminy a pojiva s bílým jemným vápnem a CEM I

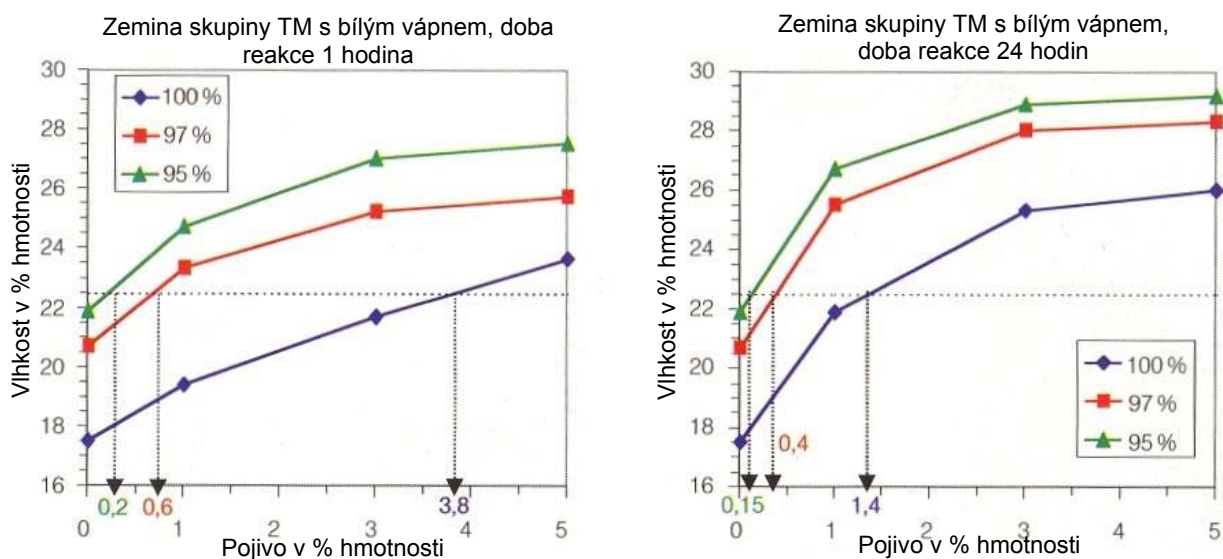
Zkoušky se směsným pojivem ukázaly, že Proctorovy křivky mohly být upraveny podle podílu vápna mezi křivkami pro cement a vápno. Srovnání obou pojiv 50/50 s pomalu a rychle reagujícím cementem prokazuje, že při době reakce 1 hodina pomalu reagující cement CEM III má nepatrně větší Proctorovu objemovou hmotnost na rozdíl od rychle reagujícího cementu CEM I. Při době reakce 4 hodiny a 24 hodin není možné pozorovat žádné rozdíly.

Prodloužení doby reakce má u bílého vápna je velmi malý vliv na Proctorovu křivku. Prodloužením doby reakce z 1 hodiny na 24 hodin zůstává optimální vlhkost téměř nezměněna, Proctorova objemová hmotnost se zmenší o cca 2 % až 3 % hmotnosti. V rozporu s tím má prodloužení reakční doby u cementu zřetelný vliv na suchou objemovou hmotnost a optimální vlhkost (obrázek 4).



**Obrázek 4 – Změna Proctorových křivek u bílého vápna a CEM I při různých dobách reakce**

Ze srovnání Proctorových křivek počáteční vlhkosti a vlhkosti po smísení pojiva může být odhadnut požadovaný obsah pojiva při dané vlhkosti výchozí zeminy – např. při přirozené vlhkosti. Prodloužením doby reakce je zapotřebí zřetelně menší množství pojiva, aby bylo dosaženo stejného stupně zhutnění (obrázek 5).

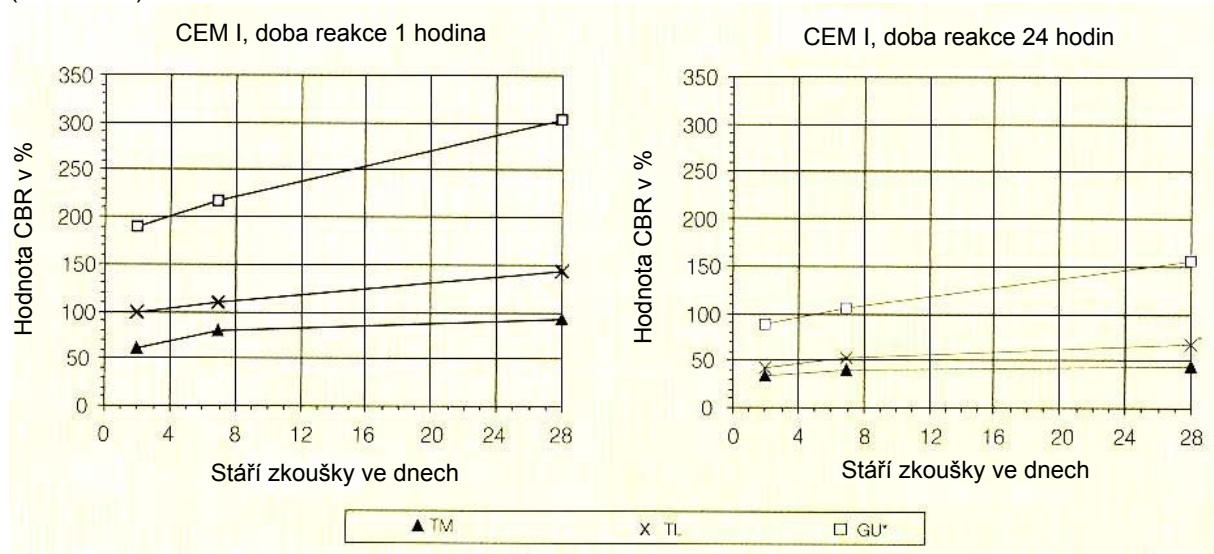


**Obrázek 5 – Srovnání požadovaného množství pojiva při době reakce 1 hodina a 24 hodin (počáteční vlhkost  $W_1 = W_{opt} + 5\%$ )**

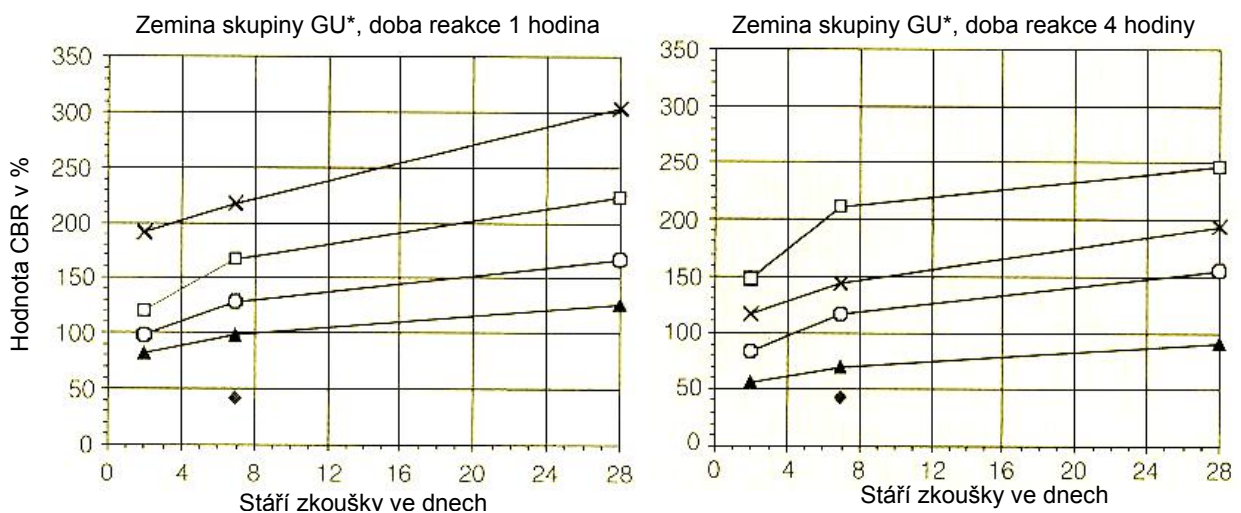
Obrázek 5 ukazuje vliv doby reakce při zlepšování zemin s CL 90 Q. Podobných výsledků, i když ne stejným průběhem, je dosaženo za použití cementu. To však způsobuje, že u hydraulického pojiva s narůstající dobou reakce dochází k vývoji pevnosti a tím se vytváří obtížně zhutnitelná, písčítá směs. Mezerovitost je tak vyšší a pevnosti i modul tuhosti zemin je ve srovnání s dobou reakce 1 hodina zřetelně snížen. Prodloužení doby reakce až na 24 hodin má – pokud vůbec – smysl pouze u bílého vápna. U směsného pojiva musí být doba reakce hydraulických složek přizpůsobena v závislosti na podílu cementu, vhodné jsou vzhledem k těmto aspektům doby reakce mezi 4 a 6 hodinami.

### Zkoušky CBR

Prodloužení doby reakce má za důsledek, že hodnoty CBR se při použití cementu velmi a při použití vápna v omezeném rozsahu snižují (obrázek 6). S narůstajícím stářím vzorků je nárůst pevnosti při prodloužené době reakce u vápna a cementu velmi snížen. Prodloužení doby reakce z 1 hodiny na 4 hodiny se však projevuje u směsného pojiva příznivě, částečně byl zjištěn nárůst pevnosti (obrázek 7).



Obrázek 6 – Změny hodnot CBR v závislosti na stáří zkoušky a době reakce u pojiva CEM I



### Legenda

- ◆ bez pojiva
- ▲ bílé vápno
- × CEM I 32,5 R
- MB 30/70
- MB 50/50

Obrázek 7 – Vývoj pevnosti v průběhu doby u zemin skupin GU\*

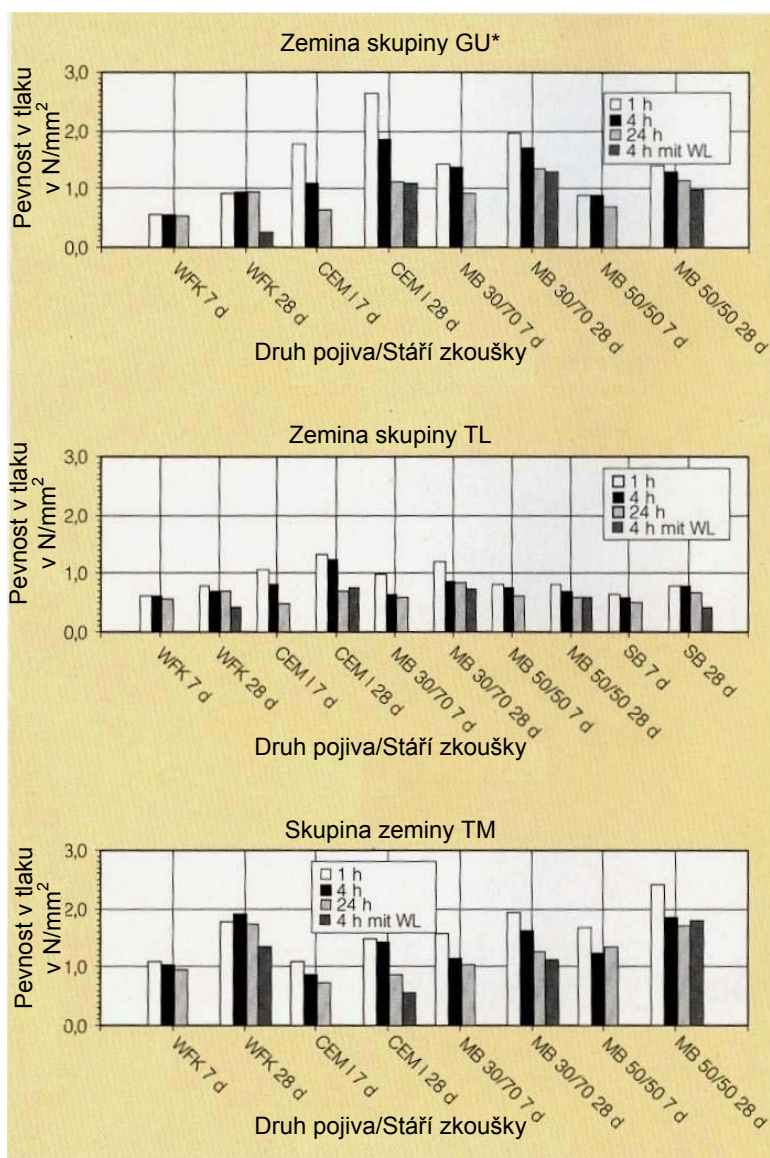
Pokládková vlhkost se projevuje na velikosti hodnoty CBR. U zemin se širokou zrnitostí skupiny GU\* a u lehce plastické zeminy skupiny TL byly naměřeny největší hodnoty CBR na suché straně

Proctorovy křivky při pokládkové vlhkosti  $0,9 \cdot W_{PR}$ , u středně plastické zeminy skupiny TM není zjištělý žádný vliv při zkouškách v rámci rozdílu ve vlhkosti mezi  $0,9 W_{PR}$  a  $1,1 W_{PR}$ .

Uložení ve vodě nemá u zemin se širokou zrnitostí skupiny GU\* za použití cementu téměř žádný vliv, při použití L 90 Q má však velký vliv na hodnotu CBR. Největší pokles hodnoty CBR byl zjištěn vždy při prodloužení doby reakce z 1 hodiny na 4 hodiny.

### Pevnosti v tlaku v jednoosém přístroji

S narůstajícím stářím vzorku se u všech zemin a pojiv zvyšuje pevnost v tlaku. Prodloužení doby reakce má za důsledek, že se u cementu a u bílého vápna vyskytují nepatrné ztráty pevnosti. Zkoušky se směsným pojivem mohou být zařazeny mezi obě výchozí pojiva, přičemž prodloužení doby reakce směsného pojiva 30/70 má o něco větší vliv na pevnosti v tlaku než směsného pojiva 50/50. Výměnou druhů cementu u pojiva bylo zjištěno, že u pomalu reagujícího CEM III vznikají o něco větší ztráty pevnosti než u CEM I. Uložení ve vodě má rovněž velký vliv na pevnost, v důsledku uložení ve vodě vznikají ztráty pevnosti všeobecně mezi 20 % a 40 %. Největší ztráty pevnosti v důsledku uložení ve vodě byly naměřeny cca 60 % u zemin skupiny GU\* za použití bílého vápna (obrázek 8).

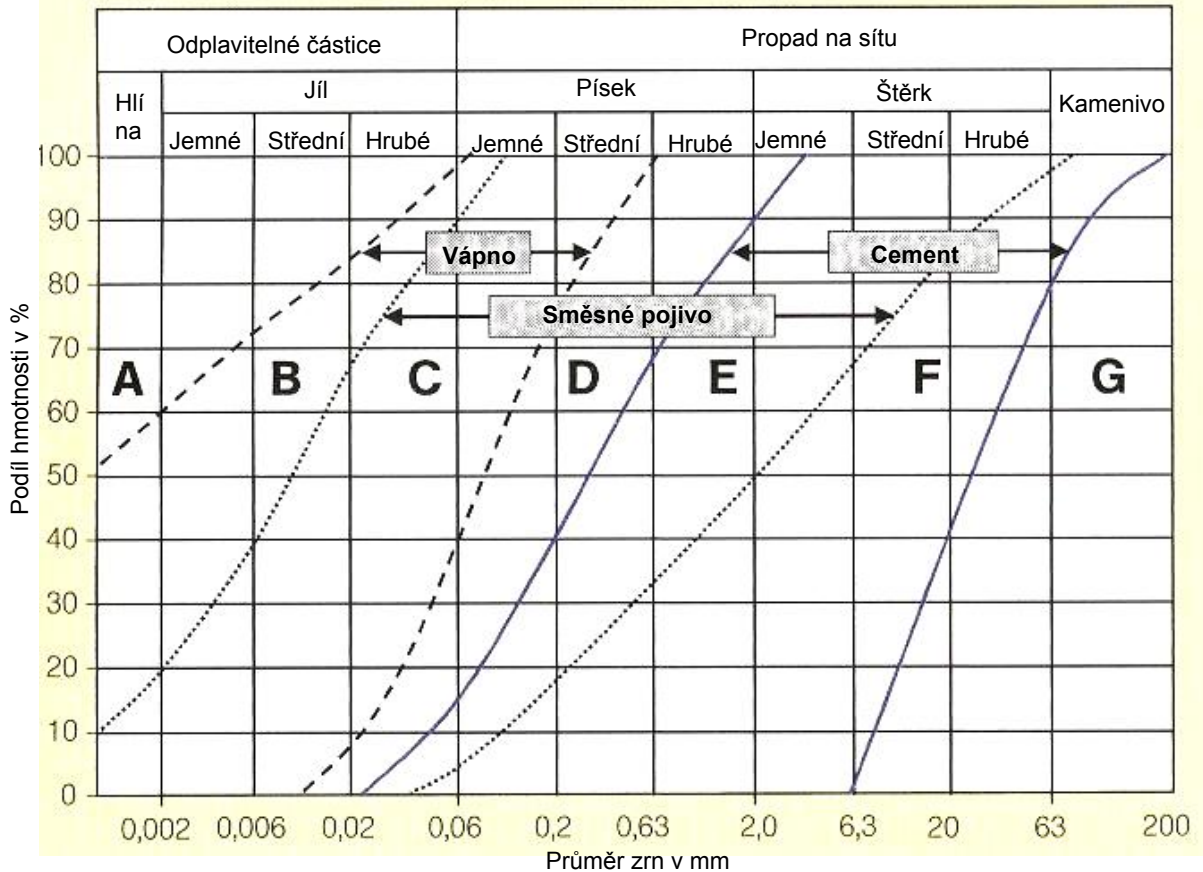


Obrázek 8 – Zkouška v tlaku v jednoosém přístroji s pojivem 3 % hmotnosti

#### 4. Závěr

Ze zkoušek bylo možné odvodit následující výsledky:

- a) Směsná pojiva mohou být použita pro zlepšení zemin se širokou zrnitostí a lehce až středněplastických zemin. V jednom pracovním procesu je u vhodných zemin dosaženo současně snížení přirozené vlhkosti a zvýšení únosnosti. V závislosti na křivce zrnitosti mohou být zvolena vhodná pojiva podle obrázku 9.



Oblast A	Nevhodné, nelze drtit
Oblast B	TA: pouze vápnó
Oblast C	TM, TL, UM: vápnó a MB 50/50
Oblast D	GU*, SU*: MB 30/70 a MB 50/50
Oblast E	GU, SU: MB 30/70 a CEM
Oblast F	GW, GI: CEM
Oblast G	Nevhodné, příliš hrubé

**Obrázek 9 – Vymezení oblastí zrnitosti pro zlepšení a zpevnění zemin**

- b) Pomocí bílého vápnó je vlhkost zemin zřetelně snížena, jako při přidání cementu. Při zlepšení zemin pomocí bílého vápnó je požadováno méně pojiva než při zlepšení zemin pomocí cementu. Množství pojiva při zlepšování zeminy pomocí pojiva leží mezi množstvím pro vápnó a cement.
- c) Přidáním bílého vápnó je Proctorova objemová hmotnost ve srovnání s cementem více redukována a optimální vlhkost se posouvá na Proctorově křivce směrem k vlhké straně. Při tomto účinku je možné zařadit směsná pojiva v souvislosti na podílu vápnó mezi pojiva bílé vápnó a cement.

- d) U zemin se širokou zrnitostí a lehce plastických zemin (TL, GU\*) se stanovuje pevnost při stejném obsahu pojiv pomocí hydraulického podílu pojiva. Nejvyšších pevností je dosaženo u čistého cementu nebo směsného pojiva s vysokým podílem cementu. U středněplastických zemin (TM) vykazují směsná pojiva největší pevnosti. U středně plastických zemin s oblastí přesahu k TA a u vysoceplastických zemin je dosaženo nejvyšších pevností za použití vápna.
- e) Prodloužení doby reakce (doby mezi vmísením pojiva a zhutněním) má silný vliv na Proctorovu objemovou hmotnost a na pevnosti. Proctorova objemová hmotnost je u všech pojiv snížena, optimální vlhkost je zvýšena. Zároveň je prodloužením doby reakce také snížena pevnost směsi zeminy a pojiva. Zřetelné zmenšení pevností se vyskytuje u prodloužených dob reakce u cementu. Zde by měla být dodržována doba reakce pro zpevňování zemin jedna hodina podle TP BF-StB, část B 11.1 (Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau – Technické zkušební podmínky pro zeminy a horniny v silničním stavitelství). V tomto případě je dosažena nejvyšší únosnost a směs zeminy a pojiva vykazuje nejmenší citlivost na uložení ve vodě.
- f) Pro bílé vápno jsou žádoucí delší doby reakce. Zadání podle TP BF-StB, část B 11.5 s dobou reakce 24 hodin vedou ke zvětšení posunu Proctorovy křivky. Při současném zohlednění vývoje pevnosti mohou být zvoleny kratší doby reakce – s ohledem na pracovní postupy v praxi.
- g) Doby reakce směsných pojiv jsou v závislosti na hydraulickém podílu stanoveny mezi 3 a 5 hodinami. Následující doby mezi zapracováním pojiva a zhutněním by měly být dodrženy:

<b>Pojivo</b>	–	CEM I	MB*	CL 90 Q
<b>Doby reakce</b>	h	1	4	≥ 6
* Přizpůsobení doby reakce směsného pojiva mohou být provedeny v závislosti na složkách hlavního pojiva				

Doby reakce směsných pojiv jsou ovlivněny také tuhnutím cementu. Pokud je namísto CEM I zvoleno pojivo CEM III s pomalejší charakteristikou tvrdnutí, může být doba reakce prodloužena.

## Bibliografie

- [1] Vosteen, B.: Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Kalken – Ausführungsbeispiele und Langzeitbeobachtungen, Entwicklungen im Erdbau bei der Qualitätssicherungen, Vorträge der FGSV-Tagung Erd- und Grundbau am 26. und 27. 10. 1995 in Landshut (FGSV C 7)  
*(Zpevnění a zlepšení zemin pomocí vápna – Příklady provedení a dlouhodobá pozorování, Trendy v zemních pracích při zajišťování kvality, Přednášky zasedání FGSV na téma zemní práce a zakládání staveb, 26. a 27. 10. 1995 v Landshutu)*
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt für Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln, FGSV Verlag, Köln 2004 (FGSV 551)  
*(Výzkumná společnost pro silniční stavitelství a dopravu: Informační list pro zpevňování a zlepšování zemin pomocí pojiva, Nakladatelství FGSV, Kolín 2004)*
- [3] Floss, R.: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTVE-StB 94/97), Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau, Kirschbaum Verlag Bonn  
*(Doplňující technické smluvní podmínky a směrnice pro zemní práce v silničním stavitelství, Komentář a příručka zemní práce a horniny, Nakladatelství Kirschbaum Bonn)*
- [4] Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie: Bodenverbesserung – Bodenverfestigung mit Kalk, 2004  
*(Spolkový svaz německého vápenného průmyslu: Zlepšení zemin – Zpevnění zemin vápnem, 2004)*