



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra silničních staveb

DIPLOMOVÁ PRÁCE

***VYUŽITÍ ODPADU SKLA V SILNIČNÍM STAVITELSVÍ***

*Use of Glass Waste in Road Construction*

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Mondchein, Ph.D.**

**Bc. Robert Javůrek**

Praha 2017



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební  
Tháškova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Javůrek Jméno: Robert Osobní číslo: \_\_\_\_\_  
Zadávající katedra: katedra silničních staveb  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a doprava

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Využití odpadního skla v silničním stavitelství  
Název diplomové práce anglicky: Use of Glass Waste in Road Construction

Pokyny pro vypracování:

Vypracování řešerše v problematice využití skla a odpadního skla v konstrukčních vrstvách vozovek a v konstrukcích zemního tělesa, provedení experimentálního souboru zkoušek na vybraných materiálech, ověření možnosti jejich využití v nestmelených materiálech.

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Petr Mondschein, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 5.10.2016 Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2017

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

20.2.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



### Prohlášení

Prohlašuji, že zadanou diplomovou práci na téma „Využití odpadového skla v silničním stavitelství“ jsem vypracoval samostatně, bez cizí pomoci s jedinou výjimkou a to poskytnutí konzultací s vedoucím diplomové práce. Uvedl jsem veškerý seznam použité literatury a informačních zdrojů. Vše bylo provedeno v souladu s metodickým pokynem č. 1/2009 O dodržení etických principů v případě vysokoškolských státních závěrečných prací. Dále prohlašuji, že nemám žádné námítky pro užití této diplomové práce, či její části.

V Praze dne .....

.....

Bc. Robert Javůrek



## Anotace

Tato diplomová práce pojednává o možném využití odpadu skla v silničním stavitelství, konkrétně o použití tohoto materiálu v konstrukčních vrstvách vozovky. Úvod se zabývá konstrukčními vrstvami vozovky, popisem odpadového skla a informacemi, kde již bylo odpadové sklo použito a jakým způsobem. Následuje shrnutí vlastností vzorků a jejich další možné využití v konstrukci vozovky. V praktické části jsou popsány provedené laboratorní zkoušky, jejich dílčí výsledky a vyhodnocení zjištěných dat. V závěru je uvedeno rozhodnutí o možné využitelnosti zkoumaných materiálů.

## Klíčová slova

Odpadové sklo, pěnové sklo, fotovoltaické panely, konstrukce vozovky, křivka zrnitosti, maximální suchá objemová hmotnost, IBI, CBR



## Summary

This diploma thesis focuses on the utilization of waste glass in road building, i.e. on the use of this material in the constructional layers of a highway. The introduction deals with the constructional layers of a highway, the description of waste glass and the basic information on how and where this material (waste glass) has been used to date. The following sections deal with the description of the samples and other possibilities in their use in road construction, with appropriate laboratory tests. In the practical sections the samples are subjected to laboratory tests with intermediate results. The final sections deal with the comparison and evaluation of the achieved results. The aim of this thesis is to establish, on the basis of carried-out laboratory tests, whether these materials are suitable to use in road building.

## Key words

Waste glass, foam glass, photovoltaic panels, road construction, grading (granulometric) curve, maximum dry mass by volume, IBI, CBR



Obsah	
1	Úvod .....9
2	Konstrukce vozovky .....9
3	Sklo..... 13
3.1	Historie skla ..... 13
3.2	Složení, výroba a vlastnosti skla ..... 14
3.3	Recyklace skla ..... 16
3.4	Výroba, vlastnosti a využití pěnového skla ..... 17
3.5	Fotovoltaické panely a elektrárny ..... 19
4	Vzorky odpadu skla a jejich možné využití.....26
4.1	Dosavadní využití skelného odpadu v silničním inženýrství.....27
5	Náhrada tradičního jemnozrnného aktivního plniva v asfaltové směsi.....30
5.1.1	Úvod do asfaltových směsí .....30
5.1.2	Návrh směsi .....31
5.1.3	Náhrada tradičního plniva .....32
5.1.4	Příprava zkušebních těles .....32
5.1.5	Hlavní kritéria posouzení vhodnosti alternativních náhrad .....33
5.1.6	Základní fyzikální vlastnosti navržených směsí .....34
5.1.7	Odolnost vůči účinkům vody – ITSR.....35
5.1.8	Modul tuhosti .....38
5.1.9	Závěr .....39
6	Využití odpadu skla při úpravě zemin .....40
6.1	Požadavky na materiály zemního tělesa:.....40
6.2	Úprava zemin.....43
6.3	Laboratorní zkoušky materiálů pro zemní těleso .....45
6.3.1	Stanovení zrnitosti – síťový rozbor .....45
6.3.2	Stanovení optimální vlhkosti.....47



6.3.3	CBR/IBI-Kalifornský poměr únosnosti/Okamžitý index únosnosti	49
6.4	Laboratorní zkoušky	52
6.4.1	Laboratorní zkoušky zemina	54
6.4.2	Sítový rozbor zeminy	55
6.4.3	Optimální vlhkost-zemina	56
6.4.4	IBI zemina	57
6.4.5	CBR zemina	58
6.4.6	Souhrn laboratorních zkoušek-zemina	59
6.5	Laboratorní zkoušky-zemina x odpadové sklo [50:50]	60
6.5.1	Zemina a drcený polykrystalický fotovoltaický panel	60
6.5.2	Sítový rozbor-zemina x polykrystalické sklo	61
6.5.3	Optimální vlhkost-zemina x polykrystalické sklo	62
6.5.4	IBI zemina x polykrystalické sklo	63
6.5.5	CBR zemina x polykrystalické sklo	64
6.5.6	Souhrn laboratorních zkoušek – zemina x polykrystalické sklo	65
6.5.7	Zemina x amorfní sklo [50:50]	66
6.5.8	Sítový rozbor zemina x amorfní sklo	67
6.5.9	Optimální vlhkost-zemina x amorfní sklo	68
6.5.10	IBI-zemina x amorfní sklo	69
6.5.11	CBR-zemina x amorfní sklo	70
6.5.12	Souhrn laboratorních zkoušek pro zemina - amorfní skla	71
6.5.13	Kombinace zeminy s Refaglass 8/16	72
6.5.14	Sítový rozbor-zemina x refaglass 8/16	73
6.5.15	Optimální vlhkost-zemina x Refaglass 8/16	74
6.5.16	IBI-kombinace zeminy a Refaglass 8/16	75
6.5.17	CBR-zemina - Refaglass 8/16	76
6.5.18	Souhrn laboratorních zkoušek-zemina x Refaglass 8/16	77



6.6	Laboratorní zkoušky-zemina x Refaglass 0/1,6 [75:25] .....	78
6.6.1	Sítový rozbor-zemina x Refaglass 0/1,6.....	79
6.6.2	Optimální vlhkost-zemina x Refaglass 0/1,6 .....	80
6.6.3	IBI-zemina x Refaglass 0/1,6 [75:25].....	81
6.6.4	CBR-zeminy x Refaglass 0/1,6 [75:25].....	82
6.6.5	Souhrn laboratorních zkoušek-zemina x Refaglass 0/1,6 .....	83
6.7	Vyhodnocení směsí zeminy s odpadním sklem .....	84
6.7.1	Porovnání křivek zrnitosti .....	84
6.7.2	Porovnání hodnot IBI.....	85
6.7.3	Porovnání hodnot CBR .....	86
6.7.4	Závěr úpravy zemin pomocí odpadu skla.....	87
7	Závěr .....	89
8	Přílohy:.....	97
8.1	Příloha A.....	97
8.2	Příloha B.....	99
	.....	100





## 1 Úvod

Lidstvo využívá cesty po staletí, ať už cesty obchodní, lovecké či civilní. Jejich prvopočátky spadají do roku 4000 př. n. l. Jejich největší rozmach proběhl kolem roku 300 př. n. l. S výstavbou šel ruku v ruce technologický rozvoj-skladba vozovky ze tří vrstev. Bylo to v období starověkého Říma, odkud je i známé rčení "Všechny cesty vedou do Říma". Po pádu Římské říše následuje pro silniční inženýrství období temna. Během středověku až do poloviny 18. století byly zpevňovány jen vybrané úseky, a to po vzoru technologie římských cest. Ty se většinou nacházely ve vyspělých oblastech západní Evropy. Ostatní cesty byly převážně prašné, případně zpevněny pomocí kamenů. V následujícím období začíná další technologický rozvoj, který klade důraz na dobře zhutněný a odvodněný základ. Jedná se o konstrukci složenou z hrubého drceného kameniva s výplní, nejčastěji jemného kameniva, která je dnes známá pod názvem Makadam, podle vynálezce Johna Loudona McAdama. Tento rozvoj reaguje zejména na zvýšenou intenzitu poštovních vozů a s tím i na zvyšující se osobní přepravu. Z toho vyplývá, že silniční inženýrství reagovalo na vývoj a pokrok doby. Kvalitní infrastruktura je v každé době základem pro obchod, rychlou přepravu lidí či materiálů. [1,2,3]

V důsledku šetření neobnovitelných zdrojů je nezbytná snaha o recyklaci a využití možných náhrad za konvenční materiály. Proč tedy nezkusit v silničním inženýrství uplatnit materiál, který už není možné dále používat a měl by zůstat ležet na skládce? Když se tento materiál neosvědčí, alespoň můžeme s čistým svědomím říci, že jsme tento materiál zkusili využít v silničním stavitelství.

Cílem této diplomové práce je na základě laboratorních zkoušek ověřit, zda má odpad skla využití v konstrukci silničního tělesa.

## 2 Konstrukce vozovky

Pod pojmem **vozovka** si představujeme zpevněnou část pozemní komunikace, která svojí únosností a povrchovými vlastnostmi umožňuje bezpečnou, komfortní a rychlou jízdu vozidel. Vozovka se skládá z několika souvrství-konstrukčních vrstev (viz obr. 2.1). [4,5]



**Únosnost vozovky** je schopnost vozovky přenášet dopravní zatížení po celou dobu uvažované životnosti. [4,5]

**Konstrukční vrstva** je vrstva vozovky, která je tvořená z jednoho druhu stavebního materiálu nebo z různých materiálů, která se realizuje jedním uceleným technologickým postupem. Konstrukční vrstva může být položena v jedné nebo více pracovních operacích. Konstrukční vrstvy jsou děleny na:

- ❖ Stmelené pojivem (např. asfalt, cement)
- ❖ Nestmelené (bez použití pojiva) [4,5]

Konstrukce vozovky dále dělíme podle tuhosti na netuhé, tuhé a polotuhé.

**Netuhá vozovka** je vozovka s asfaltovým, dlážděným nebo nestmeleným krytem, která se pod zatížením chová převážně pružně, ale při dlouhodobém namáhání vlivem teplotních změn má schopnost se plasticky přetvářet, proto není nutné realizovat dilatační spáry. Mají relativně nízký modul pružnosti. Tento typ vozovky lze použít na všechny třídy dopravního zatížení a oblasti zatížení, což je činí nejrozšířenějším typem vozovek. A to zejména díky nízkým nákladům na realizaci, než je tomu u tuhých vozovek, ale náklady na jejich údržbu během doby životnosti jsou vyšší, dochází u nich ke vzniku trvalých deformací (vyjetí kolejí). [4,5]

**Tuhá vozovka** je vozovka s cementobetonovým krytem, který se chová dokonale pružně a jeho modul pružnosti je podstatně vyšší než u jiných vrstev. Má tedy na rozdíl od netuhé vozovky vysoký modul pružnosti a zároveň vysokou pevnost, proto je tento typ vozovky vhodný pro vysoké dopravní zatížení (dálnice, autobusové zastávky, letištní plochy...), ale náklady na jejich výstavbu jsou vyšší než u netuhých vozovek. Na rozdíl od netuhých vozovek je nezbytné při realizaci zhotovit dilatační spáry, které je nutné průběžně ošetřovat. Ale celkové výdaje na údržbu jsou nižší. Tuhý kryt výrazně přispívá k únosnosti celé vozovky, proto u něho není možné provádět takové výrazné změny tloušťek pro malé intenzity dopravního zatížení, jak je možné u netuhých vozovek. U tuhých vozovek nedochází ke vzniku trvalých deformací. [4,5]



**Polotuhá vozovka** se skládá z asfaltového krytu a podkladní vrstvy, která je stmelená hydraulickým pojivem. Polotuhé vozovky mají relativně vysoký modul a nízkou pevnost. U těchto vozovek je problém s požadavkem na pevnost hydraulicky stmelené směsi, snahou je eliminovat nekontrolovanou tvorbu příčných smršťovacích trhlin, které se prokopávají do asfaltového krytu a jsou viditelné na povrchu. [4,5]

**Kryt vozovky** je vrchní část vozovky, která je v přímém kontaktu s pneumatikami vozidel. Může být jednovrstvý nebo dvojevrstvý. [4,5]

**Obrusná vrstva**, neboli horní krytová vrstva, musí odolávat klimatickým podmínkám i chemickým rozmrazovacím prostředkům. Současně je zde požadavek na její povrchové vlastnosti, zejména vlastnosti protismykové, rychlý odvod vody, rovnost a hlučnost. Z těchto důvodů jsou na tuto vrstvu kladeny nejvyšší nároky z hlediska kvality materiálů i technologie provádění. Současným trendem je snižování tloušťky této vrstvy. Podle druhu obrusné vrstvy vozovky dělíme na:

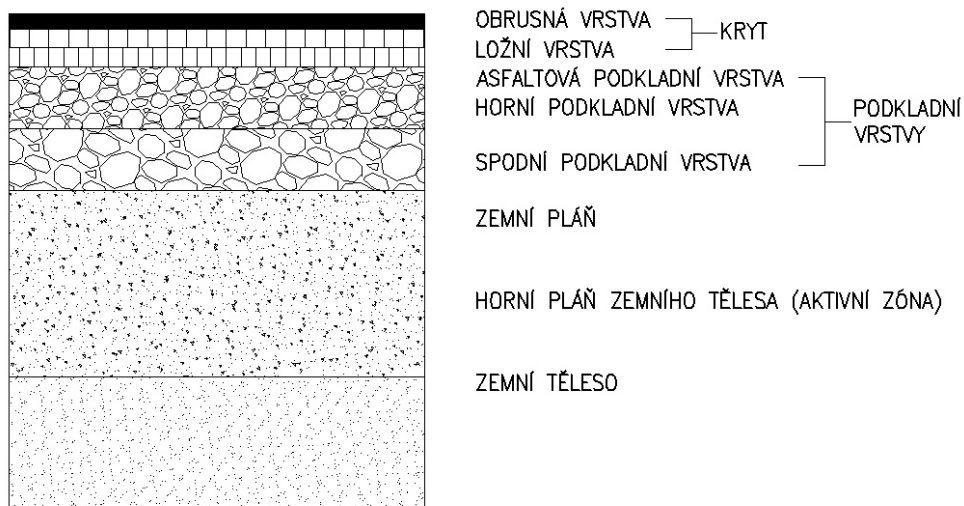
- ❖ Asfaltové
- ❖ Cementobetonové
- ❖ Dlážděné
- ❖ S nestmeleným krytem [4,5]

**Trvanlivost obrusné vrstvy** je doba, po kterou je tato vrstva schopná odolávat mechanickému namáhání od projíždějících vozidel a působení klimatických vlivů. [4]

**Ložní vrstva**, čili spodní krytová vrstva, je zřizována u asfaltových vozovek ze dvou důvodů. Zajišťuje kvalitní a rovný podklad pro pokládku obrusné vrstvy a současně zvyšuje tloušťku asfaltového krytu. Tím přispívá k potřebné únosnosti celé konstrukce vozovky. Vzhledem k tomu, že se nad ložní vrstvou nachází obrusná vrstva, nedochází u ní k mechanickému namáhání a ani není vystavena klimatickým vlivům. U této vrstvy je kladen důraz především na odolnost proti trvalým deformacím a celkovou tuhost. Ložní vrstva z asfaltových směsí je někdy prováděna i pod cementobetonovými kryty z důvodu ochrany podkladních vrstev před účinky vody a velmi nízkých teplot. [4,5]



**Podkladní vrstva** je spodní část konstrukce vozovky mezi krytem a zemní plání, určená k roznosu tlaku od kol projíždějících vozidel z krytu do podloží tak, aby zatížení podloží bylo minimální. Pod asfaltovými vrstvami obvykle leží dvě samostatné podkladní vrstvy, které jsou označovány jako horní a spodní podkladní vrstva. U vozovek s vyšším dopravním zatížením jsou tyto vrstvy obvykle kvalitativně odlišeny, v ostatních případech jsou obě vrstvy technologicky stejné. V případě velmi malého dopravního zatížení je možno zřídit pouze jednu podkladní vrstvu. Pokud je požadována vyšší tloušťka asfaltových vrstev, než je běžná tloušťka asfaltového krytu, zřizuje se asfaltová podkladní vrstva. Podkladní vrstvy jsou vystaveny nižšímu namáhání, v těchto vrstvách jsou používány kvalitativně horší materiály než u krytových vrstev, a i technologie zřizování je jednodušší. U podkladní vrstvy je požadována odolnost proti pronikání zeminy z podloží. [4,5]



Obr. 2.1 Konstrukce vozovky a její konstrukční vrstvy [5]

**Ochranná vrstva** je spodní vrstvou vozovky. Zřizuje se ve speciálních případech pod spodní podkladní vrstvou pro zlepšení některých ochranných funkcí, jako je například ochrana podloží před promrznáním. Všechny konstrukční vrstvy svým tepelným odporem chrání podloží vozovky před promrznáním. Vrstvy vozovky tedy mimo svoji primární úlohu plní ještě i funkci ochrannou, která je v běžných podmínkách zajištěna bez zvláštních opatření. Může však nastat situace, kdy bude zvýšen požadavek na ochrannou funkci a v tom případě se zřizuje ochranná vrstva, nejčastěji je provedena ze štěrkodrti. Při použití této vrstvy je třeba zdůvodnit, jakou ochrannou funkci má plnit. [4,5]



Nejčastěji se zřizuje z těchto důvodů:

- ❖ Za účelem ochrany podloží před promrzáním.
- ❖ Spodní nestmelená vrstva nesplňuje příslušná filtrační kritéria pro zabránění pronikání zeminy z podloží.
- ❖ Odvedení průsaků nebo výronu většího množství vody z podloží, pokud nelze její odvod efektivně zajistit odvodněním zemního tělesa.

[4,5]

### 3 Sklo

#### 3.1 Historie skla

Člověk sklo využívá již od doby kamenné, kdy se používal přírodní obsidián na výrobu ostrých nástrojů. Protože byl velmi vzácný, byla tato forma přírodního skla častým předmětem obchodu. Dle archeologických nálezů je předpokládáno, že první sklo bylo vyrobeno v Mezopotámii nebo ve starověkém Egyptě. Toto sklo bylo velmi nečisté a nejvíce se využívalo na výrobu ozdob, amuletů a šperků. [6,7,]

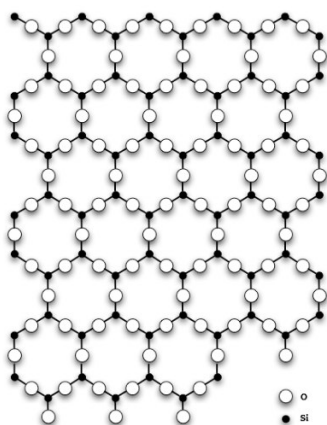
Velký pokrok ve výrobě skla udělali Římané, kteří dokázali vyrobit čiré sklo a v pozdější době dosáhli velmi vysoké technické úrovně při výrobě skleněných pohárů a nádob. [6,7]

Od 10. století se sklo začalo používat na okna chrámů, nejčastěji v podobě barevných vitráží a od 15. století byla zasklívána i okna paláců a radnic. V tuto dobu byl již znám český křišťál. V 19. století začala enormní tovární výroba tabulového a obalového skla. Následně se ve 20. století rozvíjí výrobní technologie, které umožňují vznik nových druhů skla, které rozšiřují oblasti jejich použití (optické kabely, obrazovky), dokonce se sklo stává i stavebním materiálem (obklady budov, sklovláknobeton, pěnové sklo). [6,7]

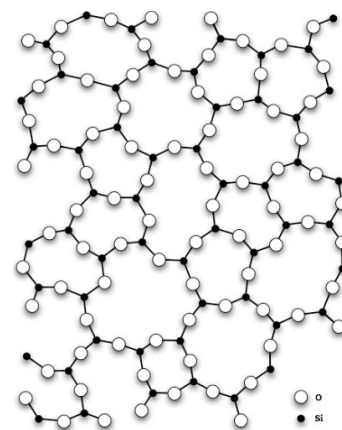


### 3.2 Složení, výroba a vlastnosti skla

Sklo je homogenní a amorfní látka, tedy látka, která nemá v pevném skupenství pravidelnou krystalickou strukturu, viz obr 3.1 a 3.2. Uspořádání částic je náhodné a určité zákonitosti jsou pouze v polohách navzájem sousedících atomů. Amorfní látky jsou považovány za izotropní, to znamená, že mají stejné fyzikální vlastnosti ve všech směrech (např. mechanické, tepelné apod.). [6,7,8,10]



Obr. 3.1  $\text{SiO}_2$  jako krystal [10]



Obr. 3.2  $\text{SiO}_2$  jako sklo [10]

Nejrozšířenější je sklo, jehož hlavní složkou je oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ). Pod pojmem sklo se tedy obvykle rozumí právě křemičité sklo. Hlavní surovinou pro jeho výrobu je sklářský písek. Křemičité sklo se vyrábí tavením, jedním ze způsobů vzniku amorfních látek je právě rychlé ochlazení taveniny, kdy částice nemají dostatek času k vytvoření krystalu. Výroba křemenného skla je energeticky velmi náročná, protože jeho teplota tání je  $1610\text{ }^\circ\text{C}$ . Z důvodu, aby se snížila teplota tavení oxidu křemičitého, jsou k němu přidávány různé přísady, nejčastěji uhličitan sodný (soda) a oxid vápenatý (pálené vápno), který zlepšuje chemickou odolnost. Tímto způsobem vzniká nejběžnější sodno-vápenaté sklo, ze kterého jsou vyráběny okenní tabule a obalové sklo. [6,7,9,10]

Tabule skla jsou dnes nejčastěji vyráběny litím (floating), odtud termín float sklo, který označuje ploché sklo i způsob jeho výroby.



### Postup výroby float skla:

- ❖ Sklářský kmen (základní vsázky) se skládá ze 73 % sklářského písku, 15 % sody, 10 % vápence a 2 % různých přísad, které jsou uskladněny v oddělených zásobnících. Odtud se naváží dle receptury odpovídající danému typu skla. Poté jsou smíchány a následně dopraveny do zásobníků před tavící pec. Během dopravy je přimícháno požadované množství skleněných střepů. Tak vzniká vsázka.
- ❖ Vsázka je tavena v peci při teplotách 1550-1600 °C, teplota je dosahována pomocí olejových nebo plynových hořáků. V průběhu tavení dochází k přeměně vsázky na sklovinu, u které v oblasti nejvyšších teplot dochází k procesu vyčeření plynů vzniklých rozkladnými reakcemi jednotlivých surovin. Sklovina se za určitý čas zbaví bublin a tepelně a chemicky se homogenizuje
- ❖ Jak sklovina vytéká z tavící pece, natéká do plavící lázně, kterou tvoří roztavený cín, kde je pomocí principu plavení vytvarovaná do kontinuálního pásu skla. Putováním z jednoho konce lázně na druhý teplota skloviny i cínu klesne z 1100 °C na 600 °C. Aby sklo mělo požadovanou tloušťku i šířku, jsou do lázně vloženy tvarovací nástroje, které pomáhají mechanicky upravovat parametry taženého pásu skla. Pohyb je zajištěn pomocí tahu válců chladící pece.
- ❖ Nanášení povlaků kovových oxidů probíhá při vysokých teplotách, často tak vznikají odpadní produkty, které jsou odtahovány do čistících jednotek a neutralizovány.
- ❖ Sklovina přetvořená v plavící lázni do formy kontinuálního, zatím plastického skleněného pásu, je vyzdvihnuta pomocí válců cínu a je dále vtažena do tunelu chladničky. Zde dochází k ochlazení dle chladící křivky. Cílem je zajistit perfektní rovinnost a eliminovat nerovnoměrnost vnitřního mechanického napětí, které by mohlo způsobovat lomy. Z chladničky vystupuje skleněný pás s teplotou okolo 60-80 °C a je připraven na řezání.



- ❖ Před samotným řezáním je na řadě kontrola detektorem vad a pak je skleněný pás automaticky nařezán na různě velké tabule. [10,11]

Pod pojmem sklo se skrývá mnoho materiálů lišících se složením, způsobem výroby i vlastnostmi. Jsou však charakteristické vlastnosti, které mají společné, mezi ně patří:

- ❖ Trvanlivost
- ❖ Nevodivost
- ❖ Recyklovatelnost
- ❖ Vysoká pevnost v tlaku
- ❖ Malá tepelná vodivost
- ❖ Dobrá chemická odolnost [12]

### 3.3 Recyklace skla

Recyklace skla je proces, při kterém se nejméně jednou vyrobené a již použité sklo vrací zpět do výroby skla nebo jiných materiálů, které je možné ze skla vyrobit. Sklo je druhotná surovina, produkt lidské činnosti, kterou lze velmi dobře recyklovat a mnohonásobně zpětně použít. To umožňuje úsporu jiných vstupních surovin. Před samotnou recyklací skla je důležitá separace a sběr použitého skla, které pochází z domácností, průmyslové výroby či demoliční činnosti. Právě pro relativně jednoduchou recyklaci skla je nutný jeden předpoklad, a to je jednodruhovitost vstupní suroviny. Z tohoto důvodu se nejnázve recykluje tabulové sklo, komplikace nastávají u skelných výrobků, při jejichž výrobě byla použita příměs nebo jiný materiál. [13,14]

Separace skla z domácností začíná prostřednictvím bílých a zelených kontejnerů umístěných v ulicích a na každém sídlišti. Odtud je transportováno do recyklačních provozů, kde skončí i skelný odpad z průmyslu nebo demolice. [13,14]





Na recyklačních linkách dochází k odstranění všech nečistot, nevhodných příměsí a nežádoucích materiálů (etikety, zátky, zbytky po předchozím obsahu apod.). Nejprve jsou velké a hrubé nečistoty odstraňovány ručně, aby nepoškodily recyklační stroje. Následuje strojní oddělování mechanicky i opticky, optické snímače fungují na jednoduchém principu – co nejde prosvítit, není považováno za sklo. [13,14]

Čištěné sklo se zároveň drtí na střepy o velikosti přibližně od 3 mm do 2,5 cm, které se následně mechanickými či optickými separátory třídí na jednotlivé frakce. Existují linky, na kterých je pomocí optických laserových separátorů sklo roztříděno i podle barvy na čiré, zelené nebo hnědé sklo. Jedna taková linka byla postavena i v České republice ve Stráži pod Ralskem. Linka je schopna ročně zpracovat až 90 000 tun skelného odpadu včetně autoskel. Záměrem je zavedení dalších technologií, které by například zpracovávaly zátky z lahví, folie z autoskel a další materiál. [13,14]

Jednodruhový recyklát je prodáván sklárnám k výrobě nového skla a ty méně kvalitní slouží ke zpracování na pěnové sklo nebo abraziva. Máme tedy technologie, které nám teoreticky umožňují recyklovat sklo do nekonečna, ale pouze za podmínky, že lze oddělit příměsí. To bohužel zatím neplatí pro fotovoltaické panely. [13,14]

### **3.4 Výroba, vlastnosti a využití pěnového skla**

Pěnové sklo se vyrábí z odpadu skelného recyklátu, který již nelze použít pro další výrobu ve sklárnách, nebo ho lze také vyrobit ze surovin používaných ve sklářské výrobě (sklářský písek, soda, vápenec a různé přísady). [15]

Před samotnou výrobou dochází k ještě jemnějšímu podrcení střepů na jemnou skleněnou moučku se zrnem okolo 90  $\mu\text{m}$ , takto jemného nadrcení se docílí již při prvním drcení. Tato skleněná moučka, která má vždy šedobílou barvu bez ohledu na barvu skleněných střepů, se promíchá s kypřícími přísadami a nanáší se na textilií, která má obdobnou funkci jako pečící papír. Poté je směs spečena v peci při teplotě kolem 800 °C po dobu přibližně 50 minut a z pece



vyjíždí v podobě souvislé desky, která se teplotním šokem sama rozláme na kousky do podoby, ve které se pěnové sklo prodává. [7, 15]

Toto činí z pěnového skla skvělý materiál, který nachází uplatnění zejména ve stavebnictví, kde nahrazuje konvenční izolační materiály (polystyren, skelnou vatu apod.), a to díky velmi dobrému teplotnímu součiniteli  $\lambda$ , inertnosti, nenasákavosti a dalším vlastnostem. [7,15]

Vzorek pro zkoušku dodala firma REFAGLASS s.r.o., která pěnové sklo prodává pod stejnojmenným označením Refaglass.

#### Vlastnosti deklarované výrobcem:

❖ Objemová hmotnost sypaná	$\rho_s=140-160 \text{ kg/m}^3$	
❖ Teplotní součinitel	$\lambda=0,08 \text{ W/m.K}$	
❖ Nasákavost zrna	0 obj. %	
❖ Organické znečištění	negativní	
❖ Chloridy	0,0	
❖ Sírany rozpustné v kyselině	0,0	
❖ Celkové sírany	0,0	
❖ Složky rozpustné ve vodě	0,0	
❖ Odolnost proti rozmrazování	1,3 % hmotnosti	
❖ Odolnost proti drcení	0,7 N/mm <sup>2</sup>	[16]

Například polystyren má  $\lambda=0,16 \text{ W/m.K}$  a skelná vata  $\lambda=0,04 \text{ W/m.K}$ . [12]

#### Chemické složení:

Výrobce chemické složení pěnového skla neudává, ale lze předpokládat, že bude obdobné jako u křemičitého skla, na základě použitých surovin a technologie pro výrobu pěnového skla. Tedy 71-75 % SiO<sub>2</sub>, 12-16 % Na<sub>2</sub>O, 10-15 % CaO a další menšinové příměsi. [17]

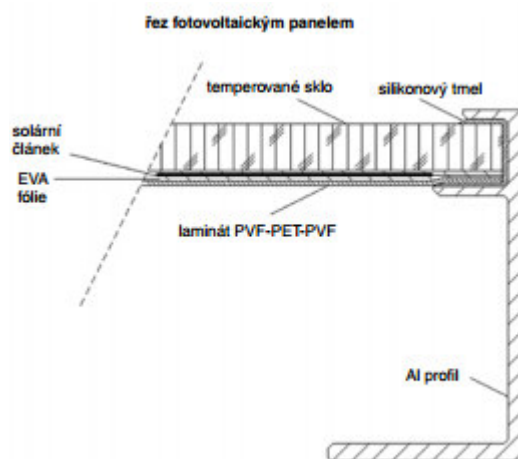
V současné době se pěnové sklo nejčastěji používá k izolaci:

- ❖ Základových desek a pasů
  - ❖ Mezistropních prostorů a kleneb
  - ❖ Plochých střech
- [15]



### 3.5 Fotovoltaické panely a elektrárny

V současnosti jsou nejvíce rozšířeny fotovoltaické (dále FV) panely na bázi křemíku, ať už Si-monokrystalické, polykrystalické či amorfni, na bázi tenkých vrstev. Křemík je jeden z nejrozšířenějších prvků na Zemi, značně je zastoupen i v zemské kůře, proto je relativně levný a dostupný. Fotovoltaické panely se skládají z temperovaného skla, solárního článku, EVA folie a hliníkového rámu (viz obr 3.3) [18]



Obr. 3.2 Schéma konstrukce fotovoltaického panelu [18]

Solární články jsou vyráběny za pomoci složité technologie začínající výrobou surového křemíku, který je vyráběn redukcí křemičitého písku v obloukové peci za teploty okolo 2000 °C. Roztavený křemík se v pravidelných intervalech odlévá a má čistotu až 99 %. Pro použití v polovodičové výrobě je však potřebná mnohem větší čistota, proto se křemík čistí technologií Siemens s chlórovým cyklem. Nejprve proběhne převod na trichlórisan a po destilaci se opět vyredukuje čistý křemík. Tato technologie výroby čistého křemíku je, ale velmi náročná na spotřebu energie a na ochranu bezpečnosti obsluhy i životního prostředí. Proto i zde dochází k vývoji technologií, které nepoužívají chlórový cyklus. Ty jsou zatím ve fázi testování, ale pokud se osvědčí, mohou výrazně snížit energetickou náročnost výroby čistého křemíku, případně i snížit jeho cenu. Po vyčistění vzniknou hrudky čistého křemíku, které prochází kontrolou elektrického odporu. Z tohoto polotovaru je ještě nutné vytvořit polykrystalické či monokrystalické ingoty. [18]



Výroba polykrystalických ingotů je jednodušší. Materiál se nalije do formy, kde se nechá pomalu a kontrolovaně chladnout. Chladnutí musí být pozvolné a řízené ohřevem, aby se vytvořila co největší monokrystalická zrna a aby v materiálu byla minimální reziduální pnutí a dislokace. Hranice zrn a další poruchy krystalu mohou pro elektrony tvořit potenciální bariéry, proto je jejich přítomnost nežádoucí. [18]

Výroba monokrystalických ingotů je o něco obtížnější a probíhá Czochralského metodou. Do taveniny o teplotě přibližně 1 415 °C se ponoří malý monokrystal jako zárodek. Ten se velmi pomalu z taveniny vytahuje, a přitom rotuje kolem své podélné osy. Celý proces probíhá v inertní atmosféře a za sníženého tlaku. [18]

Ingot polykrystalický či monokrystalický se nakonec příčně řeže na destičky, které tvoří základ fotovoltaických článků. I technologie řezání pokročila, neboť dříve bylo možné řezat destičky o minimální tloušťce 300 μm, nyní je možné řezat destičky o tloušťce až 100 μm. Z toho plyne i zmenšení prořezu a je evidentní pokrok v efektivitě procesu výroby. [18]

Difúze příměsí donorů či akceptorů do materiálu polovodiče pro vytvoření přechodu PN probíhá v difúzních pecích. Přechod PN je oblast na rozhraní příměsového polovodiče typu P a polovodiče typu N, přechod se pak chová jako hradlo, tzn. propouští elektrický proud pouze jedním směrem (toto je problematika polovodičů). Na přední straně fotovoltaického článku bývá poté vytvořena antireflexní úprava pro minimalizaci odrazu světla a tím efektivnější využití dopadajícího záření. [18,19]

### **Výrobní postup fotovoltaických panelů:**

Na přední straně fotovoltaického panelu je kalené sklo, které je velmi odolné proti nárazu. Fotovoltaické panely jsou testovány na nárazy i poměrně velkými kroupami. Na sklo je pokládána EVA (etylén vinyl acetát) fólie, která je čirá. Na fólii jsou skládány propojené fotovoltaické články tak, aby při definovaném osvětlení poskytovaly stejnosměrné napětí a výkon. Přes propojené články se opět pokládá plastová EVA folie a zádní stěnu panelu tvoří nejčastěji laminátová kompozice. [18]



Následuje odsátí vzduchu mezi vrstvami a zahřátí panelu nad teplotu tání EVA fólie, ta se rozteče a zalije články v prostoru mezi čelním sklem a zadní laminátovou stěnou panelu. Úplně na závěr se panely orámují a zatmelují silikonovým tmelem do hliníkových profilů. Po zaschnutí tmelu jsou fotovoltaické panely utěsněny proti vodě či jiným nečistotám. [18]

Životnost kvalitních fotovoltaických panelů na bázi krystalických polovodičů bývá 20 až 30 let s účinností blížící se k 20 %. Životnost fotovoltaických panelů je definována poklesem výkonu o 20 %. [18]

**Tenkovrstvé panely**, nebo také **amorfní panely**, jsou oproti krystalickým panelům vyráběny jinou technologií. Vyrábějí se ve vakuové komoře při teplotě okolo 200 °C, kdy se napařením nanáší vrstva amorfního křemíku na skleněnou tabuli. Při této technologii nemusí být podklad vždy tvořen pouze sklem, ale lze použít kovy či plasty. To znamená, že výsledná standartní tloušťka absorberu je 1 μm, což způsobuje značně nižší spotřebu materiálu. Takto vytvořené články mají ale nižší životnost a účinnost okolo 10 %. [20]

U krystalických i amorfních panelů platí tatáž zákonitost, maximální výkon záleží především na celkové ploše fotovoltaických článků, tedy na velikosti panelů. Dříve byly amorfní panely levnější záležitostí, ale v současnosti jsou ceny panelů téměř srovnatelné. [20]

Amorfní panely od krystalických panelů lze rozeznat na první pohled, krystalické panely jsou poznat díky výrazně černé barvě článků. Amorfní panely nemají tak výraznou barvu, paradoxně jsou tím pádem efektivnější v letních měsících, kdy dochází u krystalických panelů k přehřívání. Tenkovrstvé panely jsou také citlivější na rozptýlené slunečné záření, z tohoto důvodu se nejčastěji používají na nevhodně orientované střechy, nebo pokud by mělo být kolektorové pole orientované spíše k východu nebo západu. [18,20]



### **Chemické složení fotovoltaických panelů:**

Chemické složení drceného fotovoltaického panelu je obdobné jako pěnového skla viz Příloha A - Protokol o zkoušce (str.97) a to tedy: 72 % SiO<sub>2</sub>, 13,4 % Na<sub>2</sub>O, 8 % CaO a další menšinové příměsi.

Na rozdíl od pěnového skla drcené fotovoltaické panely obsahují nadlimitní množství olova a sumu BTEX látek (benzen, toluen, ethylbenzen, a xylen-aromatické uhlovodíky →hořlavé a toxické látky) viz. Příloha B. (str.99) Součástí protokolu je i zkouška vlivu těchto látek na ekosystém. [21,22]

Na zkoušku byli užití dva zástupci živočišné říše. Sladkovodní ryba - Danio pruhované (Brachydanio rerio) a drobný vodní korýš z řádu perlooček - Hrotnatka velká (Daphnia magna), na které neměl zvýšený obsah olova a BTEX látek žádný vliv. Těmto látkám byli taktéž vystaveni dva zástupci rostlinné říše Hořčice bílá (vyšší rostlina) a zelená sladkovodní řasa, u kterých docházelo ke stimulaci růstu oproti růstu ve zkušebním roztoku.

Tyto laboratorní zkoušky neprokázaly negativní vliv drcených fotovoltaických panelů na ekosystém, a proto bude dál zkoumáno jejich možné využití v silničním tělese.

Není zcela zřejmé, co způsobuje vysoké hodnoty BTEX látek, může to být nekvalitní materiál užitý na výrobu fotovoltaických panelů, EVA folie, polovodiče apod. Obdobně tomu je i u nadlimitních hodnot obsahu olova, to může být způsobeno užitím skla na bázi olovnatého skla.

**Olovnaté sklo** se vyrábí stejným způsobem jako křemičité sklo, ale základní vsázka obsahuje oxidy olova. Sklo je měkké, ale má vysoký index lomu světla. [6,10]



### Shrnutí fotovoltaických panelů:

U krystalických i amorfních panelů deklarují výrobci maximální pokles výkonu o 10 % za 10-12 let a o 20 % za 25 let. Tyto údaje samozřejmě ovlivňuje kvalita zhotovení panelů. Na nejstarších instalacích se pokles účinnosti po 25 letech pohybuje okolo 6-8 %. Skutečná životnost tedy může být výrazně delší než výrobci předpokládají. [23]

Rozdílné schopnosti panelů je předurčují k jejich využití, krystalické panely jsou vhodné tam, kde jsou zaručeny dobré světelné podmínky a výrazně se tak ušetří celková zabraná plocha. Obecně lze říci, že pokud výkon u krystalického panelu 1 kWp znamená plochu cca 8 m<sup>2</sup>, pak u amorfních panelů je potřeba cca 16 m<sup>2</sup>. Ale jak bylo uvedeno, amorfní panely mají větší účinnost při rozptylu světla a tím se více hodí na nevhodně orientované plochy. [23]



*Obr. 3.4 Drcený polykrystalický fotovoltaický panel*



*Obr. 3.5 Drcený amorfní fotovoltaický panel*

Z popisu konstrukce a výroby je patrné, proč se fotovoltaické panely obtížně recyklují. V případě krystalických panelů je to způsobeno EVA folií a u amorfních panelů je napařena vrstva amorfního křemíku přímo na skleněnou tabuli, viz obr 3.4 a 3.5. A to je důvodem, proč jsou drcené fotovoltaické panely po konci životnosti podrobovány laboratorním zkouškám za účelem zjištění, zda by měly následné využití v konstrukci silničního tělesa.



Vývoj instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren v České republice od roku 2007 (ke konci příslušného roku) je patrný z tabulky 3.1.

Rok	Instalovaný výkon [MWp]	Množství panelů [t]	Předpokládaný konec životnosti [rok]
2007	3,4	400	2030
2008	60	7 000	
2009	400	45 000	
2010	1450	160 000	2040
2011	50	6 000	

Tabulka 3.1 Přehled instalovaného výkonu v České republice [23]

V roce 2009 byl skokový nárůst o 340 MWp, kdy MWp znamená mega watt peak a je to údaj, kolik bude maximální výkon za ideálních podmínek slunečního svitu. O rok později to bylo téměř 1050 MWp.

Pro představu - fotovoltaická elektrárna Vepřek má nainstalovaný výkon 35,1 MW na rozloze 82,5 ha. Z toho vyplývá, že v roce 2010 fotovoltaické elektrárny zabraly plochu o rozloze cca 2470 ha. [23,24.25]

Tento rozvoj fotovoltaických elektráren byl odstartován v roce 2005, kdy byla zavedena podpora výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, tyto dotace bylo možné čerpat dvěma způsoby:

- ❖ Na základě garantované fixní ceny na 20 let s pravidelným ročním navýšením o 2 % s tím, že energii je povinen odebírat jeden z hlavních distributorů (ČEZ, E.ON, PRE)
- ❖ Na základě takzvaného zeleného bonusu, který je fixován na rok a jedná se o příspěvek k vyrobené elektrické energii, kterou si provozovatel elektrárny může spotřebovat sám nebo poskytnout třetí straně za libovolnou cenu [23]

V roce 2005 tyto bonusy činily v průměru 7 000 Kč/MWh, mezi lety 2006-2007 se průměr bonusů zvýšil dvojnásobně. Zákon bohužel nerefletoval na pokles ceny fotovoltaických panelů v letech 2008-2010, proto Česká republika zažila doslova boom ve výstavbě fotovoltaických elektráren, jak je patrné z tabulky 3.1. Od roku 2014 je dotace nulová. Tím, že docházelo k rychlému nákupu fotovoltaických panelů, mohla být kvalita velmi různorodá. [23,25]





Z tohoto důvodu lze předpokládat, že největší podíl odpadu v současnosti budou tvořit panely:

- ❖ Kazové, kdy skryté vady se projeví při prvních měsících a letech používání. U kvalitních panelů to bývá výrazně méně než 1 % z objemu dodávek
- ❖ Nekvalitně provedené, kdy se projeví výrobní chyby nebo byly při výrobě použity nekvalitní materiály
- ❖ Poničené nehodou nebo živelnou pohromou

Odhaduje se, že tento odpad bude od několika set až tisíc tun ročně. Obtížně se do instalací výkonu a odhadovaného odpadu započítávají fotovoltaické panely instalované na rodinných domech. Předpokladem je, že nekvalitní panely se budou vyřazovat dříve, jejich množství však není známé. [23,25]



#### 4 Vzorky odpadu skla a jejich možné využití

Z předchozích textů vyplývá, že budou zkoumány vzorky pěnového a drceného skla z fotovoltaických panelů, konkrétně polykrystalické a amorfni fotovoltaické panely, za účelem možného využití v silničním inženýrství.



*Obr. 4.1 Drcený polykrystalický fotovoltaický panel*



*Obr. 4.2 Drcený amorfni fotovoltaický panel*



*Obr. 4.3 Pěnové sklo-Refaglass*



#### 4.1 Dosavadní využití skelného odpadu v silničním inženýrství

Při hledání, zda již v silničním inženýrství bylo někdy sklo použito, bylo objeveno několik článků, kdy ve Spojených státech (stát s největší produkcí skelného odpadu) vytvořili takzvaný „glassphalt“, do českého jazyka by se toto spojení dalo přeložit jako skloasfalt. Do tohoto skloasfaltu ale byly použity střepy z barevného skla. To představuje problém pro barevnou stálost, střepy mohou být zelené, hnědé apod. Nejčastěji byl tento materiál používán na chodníky a silnice s rychlostním omezením 40 mph (cca 65 km/h). Glassphalt se měl především uplatnit v oblastech, kde docházelo k recyklaci skla. Myšlenka byla, že skleněný odpad částečně nahradí konvenční kamenivo asi z 10-20 %.

Nejprve byl použit odpad v podobě, v jaké opustí recyklační linku. Tato metoda se neosvědčila a tím i částečně způsobila odklon od využití tohoto odpadu, protože jej bylo nutné nejprve roztřídit do frakcí a na základě křivek zrnitostí připravovat směsi. Vývoj probíhal přibližně 20 let a bylo vybudováno relativně mnoho zkušebních úseků, ale od dalšího výzkumu se odstoupilo z ekonomických důvodů. Nebylo hospodárné ve většině částí Spojených států sbírat sklo, roztřídit jej, smíchat s přírodním kamenivem, nadávkovat modifikátory ke splnění specifikací a poradit si se změnou pracovních postupů nezbytných pro pokládku skloasfaltu (tyto změny nejsou přesně specifikovány). [26]

Z těchto úseků jsou zaznamenány informace o skloasfaltu, zejména zaujmou tyto:

- ❖ Byly použity (barevné) střepy frakce 0/12,7 mm
- ❖ Po položení není na první pohled rozdíl oproti konvenčním směsím, pokud nejsou větší zrna skla v obrusné vrstvě
- ❖ Při správné pokládce nepředstavuje skloasfalt nebezpečí pro člověka ani pneumatiky vozidel
- ❖ Povrch má mírně nižší protismykové vlastnosti, z těchto důvodů není vhodný pro povrchové úpravy chodníků a dálnic, pokud je ale ve směsi použito méně jak 10 % skleněného odpadu o velikosti zrn menší jak 6,35 mm, není žádný rozeznatelný vliv na protismykové vlastnosti a jsou totožné, jako u konvenčních směsí.



- ❖ Obsah skla ve směsi způsobuje, že skloasfalt v sobě déle drží teplo než konvenční směs asfaltu, to může být výhodné pro pokládky v chladném počasí nebo pro delší dopravy asfaltových směsí (u běžných nákladních vozidel by neměla doprava asfaltové směsi trvat déle než 2 hodiny)
- ❖ Také se zdálo, že skloasfaltové povrchy schnou po dešti rychleji, nejspíš v důsledku nenasákavosti skla
- ❖ Také tyto povrchy jsou více reflexní a mohou zlepšit viditelnost při jízdě v noci [26]

Sklo bylo také použito do podkladních vrstev. Například ulice Market Street v Hillyardu byla rekonstruována za použití 1 500 tun drceného skleněného odpadu, který byl využit při namíchání s kamenivem pro zhotovení 9 palcové (22,86 cm) podkladní vrstvy a na ní nanesena 8 palcová (20,3 cm) obrusná vrstva z konvenční asfaltové směsi, a to v délce 1,25 míle (cca 2 km). [27]

Opět je tu zmínka, že využití skelného odpadu stavbu prodražil, ale zároveň je jedním dechem dodáváno, že byly ušetřeny náklady na dopravu kameniva, a proto je tato zkušenost viděna pozitivně a že s dalším vývojem by mohlo být použití recyklovaného skla levnější. [27]

Shrneme-li si, co lze od skloasfaltu očekávat:

- ❖ Nenasákavost
- ❖ Dobrou chemickou odolnost
- ❖ Pevnost v tlaku
- ❖ Recyklovatelnost

Zajímavou alternativou na skloasfalt je díky práci Ing. Terezy Valentové hledání vhodných náhrad za tradiční jemnozrné aktivní plnivo v asfaltové směsi, tzn. použití odpadu skla v asfaltové směsi jako náhradu fileru.

Jelikož z textů vyplývá, že drcené sklo bylo použito v podkladních vrstvách s pozitivním ohlasem, zkusíme ho tedy použít pro případnou úpravu zemin nevhodných pro stavbu zemního tělesa.



Uplatnění odpadu skla v cementobetonových krytech bylo vyloučeno na základě informace o sklobetonu, který se skládá z portlandského cementu, skleněných vláken, anorganického plniva a dalších přísad. Proto bylo nutné, vzhledem k alkalickému prostředí hmot na cementové bázi, vyvinout alkalirezistentní skleněné vlákno. To znamená, že by zkoumaný skleněný odpad nemohl být v alkalickém prostředí využit. [28]

Rozebereme si problematiku jednotlivých vrstev a určíme hodnoty, které pro nás budou rozhodovat o vhodnosti využití těchto materiálů.



## **5 Náhrada tradičního jemnozrnného aktivního plniva (fileru) v asfaltové směsi**

**Filer** (kamenná moučka) – kamenivo s obsahem minimálně 70 % jemných částic s velikostí zrna pod 0,063 mm, které vzniká jako odpadní produkt při drcení a třídění kameniva. Funkcí fileru v asfaltové směsi je vytvoření spolu s asfaltovým pojivem mastix. V asfaltových směsích je užíván i tzv. přídatný filer vápencový nebo dolomitický ve frakci 0/0,125. [4,7]

### **5.1.1 Úvod do asfaltových směsí**

Asfaltová vrstva vzniká zhuštěním čerstvé asfaltové směsi, která se skládá ze směsí kameniva a asfaltového pojiva. Po zhuštění směsi vzniká třífázový systém, který se skládá z kameniva, asfaltového pojiva a vzduchových mezer. V něm kamenivo zaklíněním zrn vytváří kostru, jednotlivá zrna k sobě spojuje pojivo, které zrna obalí a zbylý prostor mezi zrny je vyplněn vzduchem. [29]

Velmi důležitou roli zde hraje kamenivo do velikosti zrn cca 2 mm, které po obalení asfaltem vytváří asfaltovou maltu (mastix), který je tužší než samotný asfalt. Výrazně se podílí na soudržnosti celého systému. [29]

Kamenivo představuje v asfaltové směsi zhruba 93-96 % hmotnosti, které je ve směsi zastoupeno v podobě hrubého a drobného kameniva a fileru. Z toho vyplývá, že na asfaltové pojivo připadá pouhých 4-7 % hmotnosti. Zastoupení jednotlivých složek se liší podle druhu asfaltové směsi a jejího použití.

Při prováděných laboratorních zkouškách byl filer z drcených fotovoltaických panelů a pěnového skla zkoušen na směsi typu asfaltový beton (ACL), určený pro ložnou vrstvu. Tato směs se vyznačuje plynulou křivkou zrnitosti, to znamená zastoupení zrn všech velikostí. [29]

Množství plniva v asfaltové směsi je specifikováno, stejně jako u drobného a hrubého kameniva, v hmotnostním poměru směsi. V případě, že se měrná (specifická) hmotnost výrazně liší od zbylého kameniva (k tomuto dochází v případě použití alternativních plniv z průmyslových či domácích odpadů), pak



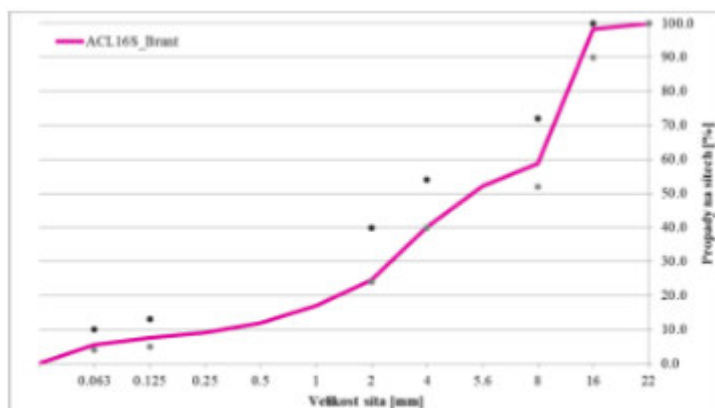
hmotnostní dávkování může způsobit absenci nebo naopak přebytek plniva ve výsledné směsi. V tomto případě nebyla měrná hmotnost známa a přistupovalo se tak k návrhu, jak tomu je u tradičního plniva vápencového fileru. [29]

### 5.1.2 Návrh směsi

Pro posouzení vlivu těchto náhrad tradičního fileru na vlastnosti asfaltové směsi byla zvolena směs typu ACL 16S – asfaltový beton určený pro ložní vrstvy vozovek pro třídu zatížení S až II. Kamenivo pro návrh a výrobu asfaltové směsi bylo použito z lomu Sýkořice a Brant s asfaltovým pojivem 50/70 (hodnoty penetrace při 25 °C). Za referenční směs je považována směs vyrobená z mletého vápence z vápenky Čertovy schody a.s. Návrh asfaltové směsi byl proveden v souladu s požadavky ČSN EN 13108-1, tedy podle procentuálního zastoupení jednotlivých složek, které je uvedeno v tab. 5.2. [29]

Návrh směsi	Množství [%]	Obsah v asfaltové směsi [%]
HDK 11/16 Brant	30,00	28,57
HDK 8/11 Brant	16,00	15,24
HDK 4/8 Sýkořice	6,00	5,71
HDK 2/5 Sýkořice	19,00	18,09
DDK 0/2 Sýkořice	26,00	24,76
Filer	3,00	2,86
Asfaltové pojivo 50/70		<b>4,78</b>

Tab. 5.2 Složení asfaltové směsi ACL 16S dle ČSN EN 13108-1.



Obr. 5.1 Navržená čára zrnitosti ACL 16S dle ČSN EN 13108-1



### 5.1.3 Náhrada tradičního plniva

V této diplomové práci jsou tedy posuzovány tři alternativní náhrady tradičního fileru, které byly dávkovány ve stejném poměru. Jedná se o náhrady z fotovoltaických panelů a pěnového skla, získané prosátím zkušebních vzorků na sítích, kdy byl použit propad pod sítím 0,25 mm. Tuto vstupní složku můžeme označit za náhradu s frakcí 0/0,125. Vzorky z polykrystalického a amorfního FV panelu byly získány relativně snadno, tato zrna jsou po prvním drcení fotovoltaických panelů hojně zastoupena. V případě pěnového skla to bylo trochu komplikovanější, ale díky jeho snadné obrusnosti a „křehkosti“ se také podařilo získat dostatečně velký vzorek. [29]

Toto případné využití pěnového skla bylo od výrobce přijato s nadšením, při výrobě i skladování vzniká velké množství prachu z pěnového skla. Dokonce je prodáván i Refaglass 0/4, ale tento prach může být znovu použit pro výrobu dalšího pěnového skla. [29]



Obr. 5.2 Pěnové sklo po lehké manipulaci

### 5.1.4 Příprava zkušebních těles

Referenční směs byla vyrobena klasickým postupem:

1. Do míchačky je vloženo přehřáté kamenivo a promícháno
2. Následně je přidáno asfaltové pojivo a směs je promíchána
3. Jako poslední přichází na řadu filer

Dodržení tohoto postupu je nezbytné pro správné obalení zrn kameniva pojivem. Pokud by byl filer přidán do míchačky dříve, pojivo by se s ním navázalo na zrna kameniva a dostatečně by tak nepřilnulo na samotná zrna kameniva. Teplota míchání zkoušené směsi byla 150 °C. [29]





Z takto vyrobené asfaltové směsi jsou následně vyrobena zkušební Marshallova tělesa pomocí Marshallova pěchu (odtud jejich název), který tělesa hutní 2x75 nebo 2x25 údery, v závislosti na typu prováděné zkoušky, které se budou na těchto tělesech provádět. [29]

### 5.1.5 Hlavní kritéria posouzení vhodnosti alternativních náhrad

Aby bylo možné dokázat ovlivnění daných směsí alternativním druhem fileru, bylo provedeno větší množství zkušebních testů. Výsledky budou na rozdíl od úpravy zemin odpadem skla ihned prezentovány, jelikož některé typy zkoušek vystavují zkušební tělesa určitým podmínkám, které by se těžko pamatovaly. [29]

Zjišťovaly se tyto vlastnosti:

- ❖ **Fyzikální** – objemová hmotnost zhutněná, maximální objemová hmotnost, mezerovitost
- ❖ **Mechanické** – modul tuhosti, odolnost vůči účinkům vody, odolnost proti šíření trhlin

V rámci výzkumu byla také část věnována simulovanému dlouhodobému stárnutí, které se poté uplatní pro tělesa v rámci stanovení modulů tuhosti. Metody stárnutí nám přibližně umožňují simulovat chování dané směsi v konstrukci vozovky po několika letech, a to během několika dnů. Také nám poskytují informace, jaké mají vliv námi použité náhrady klasického fileru a jak na ně působí metoda dlouhodobého laboratorního stárnutí. Tento výzkum mohl proběhnout na základě zkušeností z výzkumné činnosti silniční laboratoře ČVUT v Praze, které rozhodly o zvolení vybrané simulace dlouhodobého stárnutí. Tato metoda zahrnuje podmínky temperování těles při teplotě 85 °C po dobu 5 dní. [29]

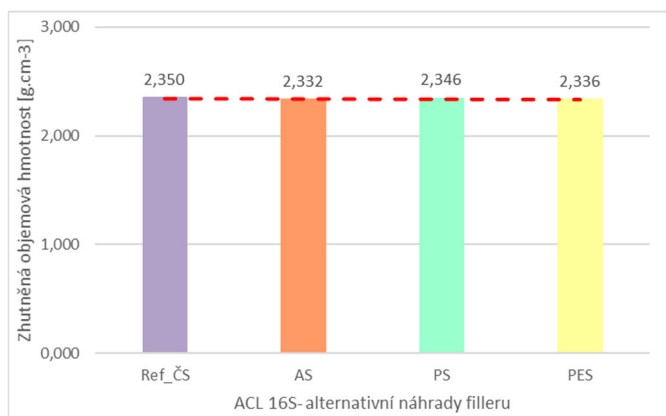
Popisky:

- ❖ Ref\_ČS je referenční směs vyrobená z mletého vápence z vápenky Čertovy schody a.s.
- ❖ AS směs vyrobená z drceného amorfního FV panelu
- ❖ PS směs vyrobená z drceného polykrystalického FV panelu
- ❖ PES směs vyrobená z pěnového skla

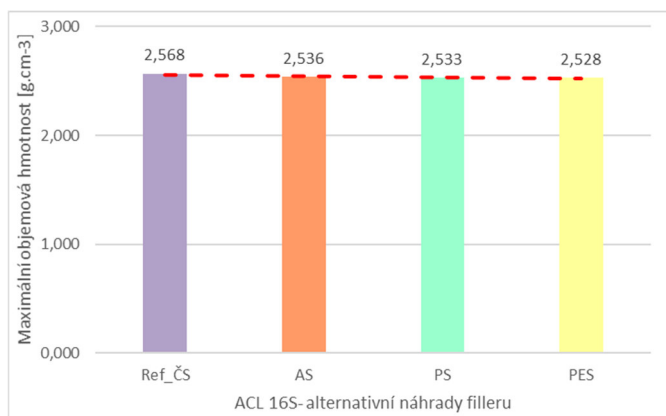


### 5.1.6 Základní fyzikální vlastnosti navržených směsí

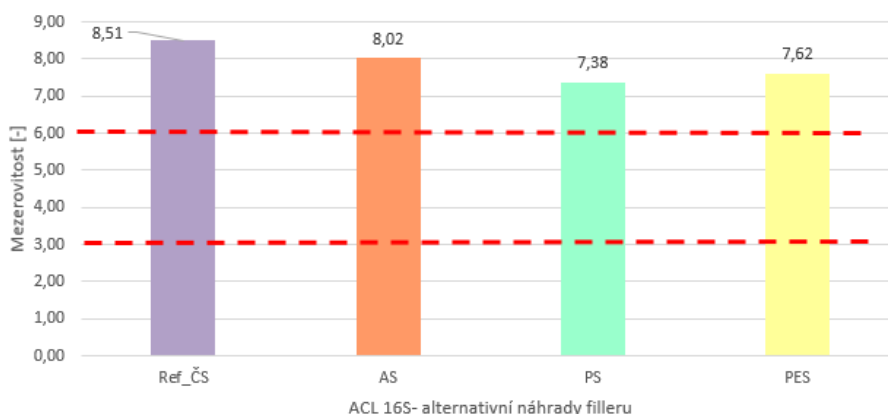
Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí vychází z normy ČSN EN 12697-8 a její výpočet závisí na objemové hmotnosti zhutněného zkušebního tělesa, viz obr. 5.1 (zde můžeme vidět, že zatím náhrada klasického fileru nemá vliv na hutnění) a maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi, viz obr. 5.2 (zde také náhrada klasického fileru nic výrazně neovlivnila). Porovnání stanovené mezerovitosti, viz obr 5.3, s vyznačením přípustného intervalu mezerovitosti 3-6 %-obj., který předepisuje norma ČSN EN 13108-1. S ohledem na čáru zrnitosti a stanoveného množství pojiva, použitého při tomto výzkumu vychází mezerovitost všech variant (i referenční směsi) nad požadovanou horní mez. Nejbližše se této hranici dosahuje varianta s drceným polykrystalickým FV panelem s hodnotou 7,38 % blízko k němu má pěnové sklo s hodnotou 7,62 %-obj. (vliv měrné hmotnosti zrn). Nejhůře je na tom referenční směr s 8,51 %-obj. [29]



Obr. 5.1 Porovnání zhutněné objemové hmotnosti navržených směsí dle ČSN 13108-1



Obr. 5.2 Porovnání maximální objemové hmotnosti navržených směsí dle ČSN 13108-1



Obr. 5.3 Porovnání mezerovitosti navržených směsí s požadavky dle ČSN 13108-1

### 5.1.7 Odolnost vůči účinkům vody – ITSR

Degradace mechanických vlastností materiálu v důsledku vlhkosti v mikrostruktuře významně přispívá k předčasnému porušení asfaltových vozovek, z tohoto důvodu bude výsledek zkoušky ITSR jedním z hlavních kritérií při posuzování vhodnosti náhrad za tradiční plnivo. Tento proces se týká termodynamických, chemických, fyzikálních i mechanických složek asfaltové směsi a je nutné ho zahrnout do návrhu vozovky. Studie prokazují, že struktura, stáří, mezerovitost směsi ve vozovce společně s množstvím a četností srážek mají na poškození největší vliv. Zajímavé je, že opakované dopravní zatížení a doprava těžkých nákladních vozidel mají při tomto procesu okrajový efekt. [29]

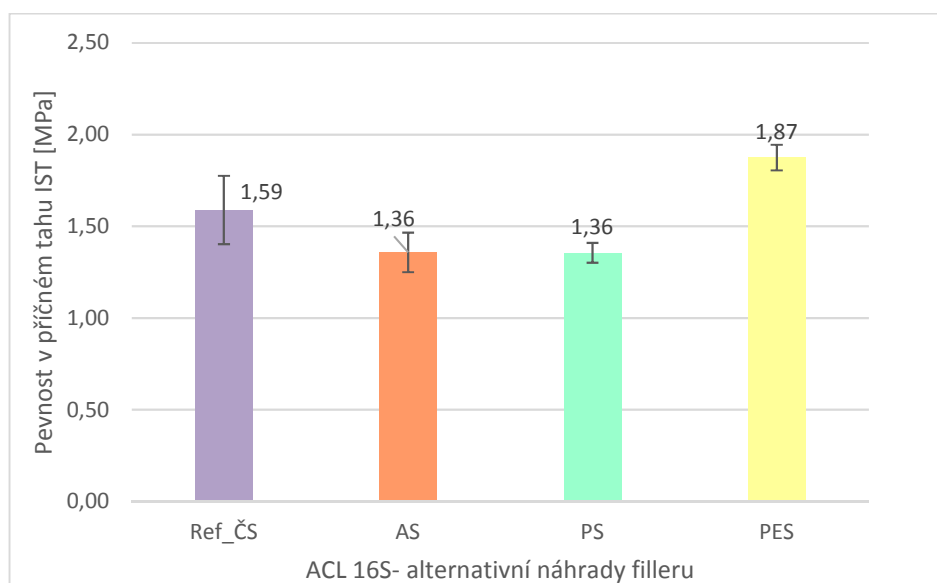
Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě byla provedena dle technické normy ČSN EN 12697-12 a modifikovanou metodou dle AASHTO T-283. Podstatou zkoušky je rozdělení zhotovených zkušebních vzorků z každé asfaltové směsi do tří skupin:

1. Suchá tělesa udržována na vzduchu při laboratorní teplotě
2. Tělesa vystavená sycení vodou s následným uložením ve vodní lázni při teplotě  $40 \pm 1$  °C po dobu  $70 \pm 2$  hodiny
3. Tělesa vystavena zrychlenému procesu stárnutí s následným uložením při teplotě  $-18 \pm 3$  °C po dobu minimálně 16 hodin a po uplynutí této doby jsou tělesa přesunuty do vodní lázně, kde jsou vystaveny teplotě  $60 \pm 1$  °C po dobu  $24 \pm 1$  hodiny.

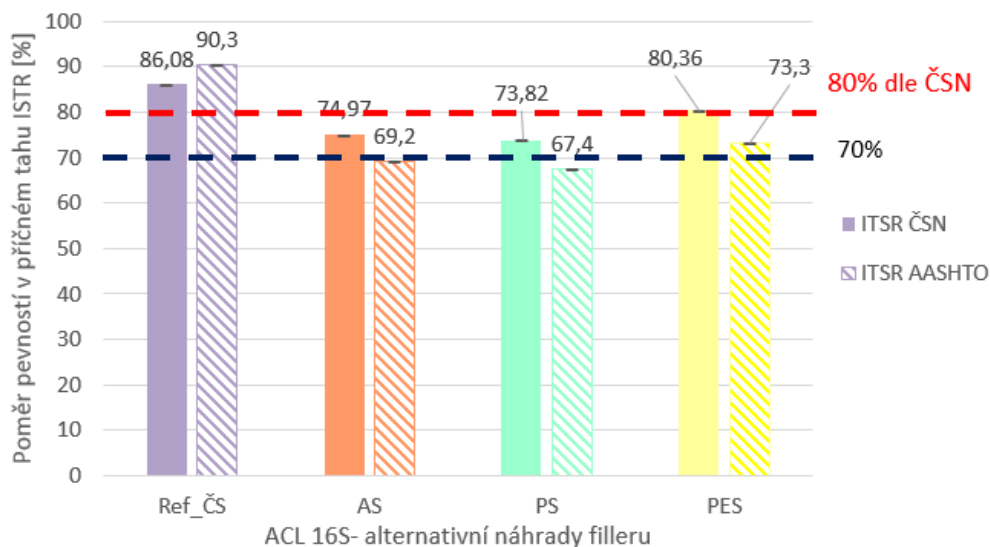


Takto se tělesa připravila na stanovení pevnosti v příčném tahu dle ČSN EN 12697-23 při předepsané zkušební teplotě. Stanovil se poměr pevností v příčném tahu skupiny těles temperovaných ve vodní lázni v porovnání pevností v příčném tahu skupiny těles udržovaných na vzduchu a vyjádří se v procentech. Na grafu, viz obr. 5.4 jsou znázorněny pevnosti v příčném tahu těles na suchu a na obr. 5.6 jsou znázorněny pevnosti v příčném tahu těles za mokra, tyto hodnoty se odráží i na grafu, viz obr. 5.5 na kterém jsou procentuálně vyneseny poměry pevnosti v příčném tahu pro obě zkušební metody. [29]

Pěnové sklo zde dosáhlo největší pevnosti v příčném tahu 1,87 MPa, zatímco drcené amorfní i polykrystalické FV panely s totožnou hodnotou 1,36 MPa těsně zaostávají za referenční směsí, která dosáhla hodnoty 1,59 MPa.



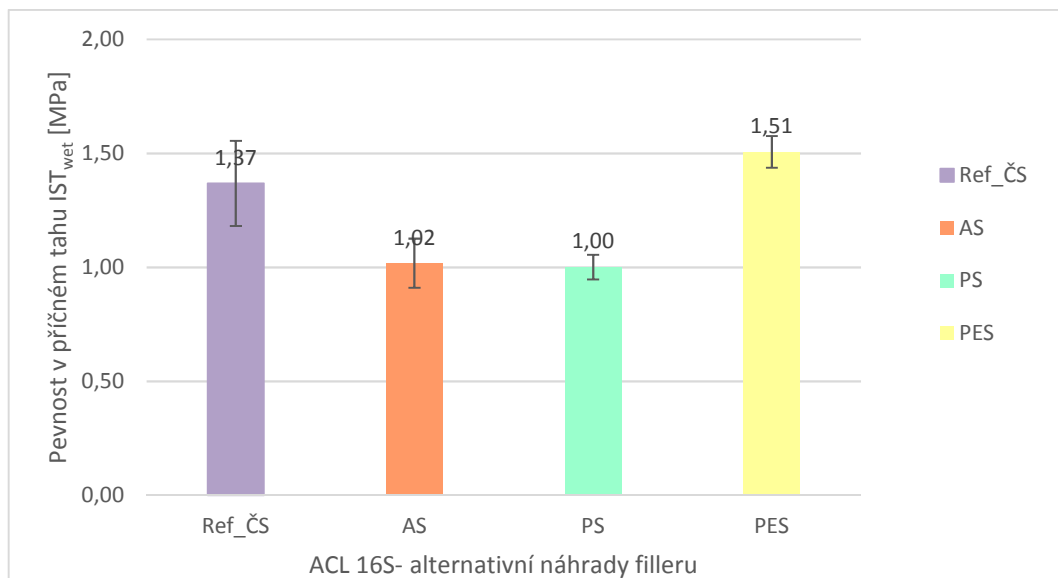
Obr. 5.4 Porovnání pevností v příčném tahu těles na suchu-ITS



Obr. 5.5 Porovnání poměru pevností v příčném tahu-ITSR dle ČSN a AASHTO

Při porovnání poměru pevnosti v příčném tahu různých náhrad tradičního plniva bylo uplatněno kritérium dle ČSN EN 13108-1, která stanovuje minimální hodnotu ITRS pro směsi ACL 16S 80%, tato hodnota byla splněna pouze v případě referenční směsi s tradičním plnivem s rezervou cca 6% a u náhrady z pěnového skla, která tuto hranici překročila o 0,36%. Náhrady z drcených fotovoltaických panelů se k této hranici blíží, ale touto zkouškou neprošly. Varianta modifikované americké zkušební metody dle AASHTO, která nestanovuje minimální požadované hodnoty. Byla zvolena hranice s ohledem na podmínky, kterým jsou zkušební tělesa vystavena 70 % ISTR. I přes méně příznivé podmínky s využitím jednoho zmrazovacího cyklu, je patrné, že tuto hranici opět překročí pouze referenční směs a náhrada z pěnového skla. Náhrady z drcených fotovoltaických panelů skončily sice ještě blíž této hranici, ale nepřekročily ji. Z toho plyne, že náhrada z fotovoltaických panelů velmi negativně ovlivňuje citlivost směsi na vodu. [29]

Na obr. 5.6 můžeme vidět porovnání pevností v příčném tahu za mokra, kdy opět nejlepších hodnot dosáhlo pěnové sklo 1,51 MPa a za ním je referenční směs s 1,37 MPa, směsi z fotovoltaických panelů mají opět stejnou hodnotu a to 1 MPa.



Obr. 5.6 Porovnání pevností v příčném tahu těles za mokra- $ITS_{wet}$

### 5.1.8 Modul tuhosti

Modul tuhosti byl stanoven dle ČSN EN 12697-26 metodou opakovaného namáhání v příčném tahu IT-CY nedestruktivní zkouškou při různých teplotách (0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C). V tabulce 5.1 jsou uvedeny získané hodnoty naměřených modulů tuhosti, bohužel moduly tuhosti pro nezestárlá tělesa se již kvůli vytíženosti přístroje nestihly naměřit a z důvodů nefunkčnosti míchačky nebyla zhotovena tělesa z referenční směsi pro tuto zkoušku, ale hodnota tuhosti u klasického plniva je u nezestárlých těles přes 10 000 MPa. Z dat, která máme k dispozici ale můžeme udělat některé závěry. [29]

Směs	Modul tuhosti nezestárlých těles [MPa]				Teplotní citlivost $S_0/S_{40}$ [-]
	0 °C	15 °C	27 °C	40 °C	
Ref_ČS	-	-	-	-	-
AS	16 327	6 369	1 690	401	40,7
PS	16 593	7 310	1 842	546	30,4
PES	20 762	12 182	5 809	1 935	10,7

Tab. 5.1 Moduly tuhosti před a po zestárnutí stanovené dle ČSN EN 12697-26

Při porovnání naměřených modulů pro nezestárlá tělesa při teplotě 15 °C dosahuje nejnižších hodnot náhrada z amorfního FV panelu 6 369 MPa, která má z použitých náhrad největší mezerovitost 8,02 %-obj. O něco lepší modul tuhosti



má náhrada v podobě polykrystalického FV panelu 7 310 Mpa, která měla mezerovitost okolo 7,6 %-obj. Nejvyššího modulu tuhosti dosáhlo pěnové sklo 12 182 Mpa s nejnižší mezerovitostí 7,3%-obj. Z toho vyplývá, že modul tuhosti se odvíjí od samotné tuhosti směsi a mezerovitosti. Pěnové sklo má i nejnižší teplotní citlivost, oba fotovoltaické panely mají tyto hodnoty vysoké, to je nejspíš i důvod nižšího modulu tuhosti. [29]

### **5.1.9 Závěr využití odpadu skla jako náhrady za tradiční plnivo v asfaltové směsi**

Náhrady pocházejí ze stejného materiálu, skla, přesto se při stejném dávkování od sebe výsledky náhrady z fotovoltaických panelů i pěnového skla výrazně liší. To dokazuje význam tradičního vápencového fileru a fileru v asfaltové směsi všeobecně.

Je zajímavé, že náhrady z FV panelů zhoršují citlivost na vodu, která je pro životnost konstrukce vozovky významná. Jelikož je sklo nenasákavé, bylo předpokládáno, že výsledná směs bude méně citlivá na vodu. Tím, že amorfni i polykrystalická náhrada nepřesáhly požadovanou 80 % hranici dle ČSN EN 13108-1, bylo by vhodné je využít v kombinaci s jiným materiálem, např. i s tradičním vápencovým filerem, ale vezmeme-li v potaz, že pozitivně neovlivnily žádný výsledek, bylo by vhodnější od této náhrady upustit a zkusit využívat tyto materiály pro úpravy zemin.

Naopak pěnové sklo velmi překvapilo, mělo nejnižší mezerovitost, vysoký modul tuhosti (12 182MPa) a nízkou teplotní citlivost. Sice překročilo požadovanou 80% hranici s rezervou 0,3 %, zatím se ale jeví, jako možná použitelná náhrada tradičního fileru a s velkým nadšením očekáváme, jaké hodnoty modulu tuhosti naměříme po zestárnutí směsi. Současně mělo vysokou pevnost v příčném tahu za sucha 1,87 MPa a za mokra 1,51 MPa. Což je opět více než referenční směs, ta měla pevnost v příčném tahu za sucha 1,59 MPa a za mokra 1,37 MPa.



## **6 Využití odpadu skla při úpravě zemin**

### **6.1 Požadavky na materiály zemního tělesa:**

Primárním materiálem, který je používán na stavbu zemního tělesa, je **zemina** v místě projektované výstavby. Hlavním parametrem pevnosti zemin je pevnost ve smyku. Zeminy v přírodě i ve stavebních konstrukcích jsou nejčastěji porušeny smykem. Pevnost ve smyku je spjatá se zaklíněním zrn do sebe, elektrochemickými pochody na kontaktech zrn a negativním pórovým tlakem. [4]

Nejdůležitější vlastností zemin, které ovlivňují její výslednou pevnost, jsou zrnitost a plasticita. Velmi podstatný vnější vliv na pevnost zemin je vlhkost. U různých typu zemin se stejná vlhkost bude projevovat odlišným způsobem. [4]

Vliv vlhkosti na chování zemin nám pro představu pomáhá určit číslo konzistence. Souhrn těchto vlastností je pak pro nás určující pro vlastnosti zeminy při samotné výstavbě, kde je kladen důraz především na zpracovatelnost, zhutnitelnost (zhutnění – zvýšení únosnosti a objemové hmotnosti, díky eliminaci vzduchových pórů ze zeminy mechanickým způsobem pomocí zhutňovacích prostředků) a únosnost. V určitých případech, kdy se vyžadují další pomocné parametry, je hodnota laboratorních zkoušek CBR a IBI. Pro potřeby návrhu zemního tělesa se zjišťují i další vlastnosti, jako jsou např. smyková pevnost, propustnost a stlačitelnost. Pokud se zjistí, že zemina je pro stavbu zemního tělesa nevhodná z důvodu nesplnění požadovaných parametrů, je možné tuto zeminu **upravit** za účelem splnění těchto parametrů. Z hlediska vhodnosti zemin pro stavbu zemního tělesa je dělíme dle ČSN 73 6133 na nepoužitelné, nevhodné, podmíněčně vhodné a vhodné viz tab. 6.1. [4]





	NEPOUŽITELNÉ k jakémukoli použití	NEVHODNÉ k přímému použití bez úpravy	PODMÍNEČNĚ VHODNÉ k přímému použití bez úpravy	VHODNÉ k přímému použití bez úpravy
Podmínky použití	Nelze upravit běžnými technologemi, použití se zpravidla vylučuje	Musí se vždy upravit	Podle dalších vlastností se rozhodne, zda lze použít přímo bez úpravy zda se musí upravit	Lze použít přímo bez úpravy
Aktivní zóna	Organické zeminy s obsahem organických látek větším než 6 % (bahno, rašelina, humus, ornice), CE ME	ML, MI, CL, CI  MH, MV, CH, CV	S-F  MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC	SW, GW, G-F
Násyp		MH, MV CH, CV	MG, CG, MS, CS, SP, SM, SC, GP, GM, GC  ML, MI, CL, CI	SW, GW, G-F  S-F

Tab. 6.1 použitelnost zemín pro stavbu zemního tělesa [4]

Tato tabulka by měla mít spíše informativní charakter o vhodnosti a způsobu použití zeminy. Aby nedocházelo k jejímu rutinnímu používání, jsou téměř všechny zeminy zařazeny do kolonky podmíněčně vhodné. To má za následek, že téměř vždy musí být skutečné vlastnosti a podmínky použití prověřeny. Důvodem je skutečnost, že stejně klasifikované zeminy mají podobné jen některé vlastnosti a jak bylo uvedeno, chování zeminy závisí na její vlhkosti. Z toho důvodu je vhodnější způsob pro určení použitelnosti zeminy na základě předpisů:

- 1) Pokud  $w_L > 50 \%$  nebo  $I_c \leq 0,5$  nebo  $\rho_{d \max, PS} < 1500 \text{ kg.m}^3$  (násyp),  $\rho_{d \max, PS} < 1600 \text{ kg.m}^3$  (aktivní zóna), **zemina se musí upravit**; požadavek na maximální objemovou hmotnost neplatí pro umělé materiály, jejichž účelem je vylehčení zemního tělesa a pro zeminy upravené pojivy.
- 2) **Musí se upravit** objemově nestabilní zeminy a horniny (bobtnavé jíly a jílovité břidlice), u nichž i při běžných klimatických podmínkách bude v zemním tělese docházet k objemovým změnám větším jak 3 %.
- 3) Pokud zeminu nelze zpracovat, protože její vlhkost není v intervalu přípustné vlhkosti a tuto vlhkost nelze ovlivnit nebo se jedná o zeminu stejnozrnnou, **zemina se musí upravit**; optimální vlhkost stanovená při zkoušce Proctor standart může být z hlediska reálně vyšší hutnicí práce na stavbě příliš vysoká, proto se může interval přípustné vlhkosti přiměřeně upravit. Množství vzduchových pórů v zemině po zhutnění by nemělo být vyšší než 12 % z důvodu nebezpečí nadměrného samovolného dohutňování zemního tělesa a snadné saturace vlhkosti [4].



Další posouzení se provádí podle účelu použití:

- a) Při použití do aktivní zóny se zeminy dále posoudí podle únosnosti CBR. Zeminu je možné použít bez úpravy, pokud je hodnota CBR minimálně 15 %.
- b) Při použití do násypu se zemina obvykle posuzuje podle hodnoty IBI. Zeminu je možné použít bez úpravy, pokud je hodnota IBI rovna min. 10 % pro násyp a 5 % pro podloží násypu. [4]

Další možné materiály pro zhotovení zemního tělesa:

**Kamenitá sypanina** – je velmi kvalitní materiál pro stavbu zemního tělesa včetně aktivní zóny. Kamenitá sypanina není tak citlivá na vlhkost jako je tomu u zeminy. Tím je její použití možné i při náhlých změnách počasí. Zpracovatelnost závisí jen na její zrnitosti. Při použití kamenité sypaniny do aktivní zóny i při jejím styku s podložím násypu je zvýšený požadavek na schopnost odolávat pronikání jemnějšího nestmeleného materiálu do hrubšího materiálu kamenité sypaniny. [4,30]

Sypaniny z vedlejších produktů:

**Popílek** – je jemný prach vznikající při spalování mletého uhlí v energetických zařízeních, který je zachytáván ve filtrech. Rozeznáváme křemičitý popílek a vápenný popílek. Oba druhy popílku mají pucolánové vlastnosti, to znamená, že při smíchání s oxidem nebo hydroxidem vápenatým za přítomnosti vody tvrdne a vytváří pevnou směs. Vápenný popílek má ještě navíc i hydraulické vlastnosti. Při použití v zemním tělese na ně platí stejné požadavky jako na zeminy. [4,30]

**Struska** – nejčastěji se používá vzduchem chlazená vysokopecní struska, která vznikla pomalým ochlazováním. Používá se stejným způsobem jako kamenitá sypanina, nesmí však obsahovat volný oxid vápenatý, který se při styku s vodou mění v hydroxid vápenatý, v důsledku této reakce mění svůj objem. Rozpínavost strusky lze posuzovat laboratorními metodami. [4,30]



**Recyklované materiály** – zejména se jedná o recyklovanou stavební suť, recyklovaný beton a kamenivo. Používají se stejným způsobem jako výše zmíněné materiály za předpokladu, že neobsahují žádné nežádoucí látky s negativním vlivem na životní prostředí a látky, které mění své vlastnosti působením klimatických jevů. [4,30]

Když porovnáme tyto „konvenční“ materiály se vzorky skla, je hned zřejmé, že se jedná o vhodný materiál pro úpravu zemin, zejména díky inertnosti skleněných produktů.

## 6.2 Úprava zemin

Zeminy, které nesplňují požadované parametry (viz 4.2), tedy nevhodné zeminy, lze použít ke stavbě zemního tělesa jen po jejich úpravě, a to lze provést dvěma způsoby. Buď na místě (in situ) nebo ve (specializovaném) míchacím centru. Cílem úpravy může být splnění parametrů i zlepšení zpracovatelnosti zeminy, snížení optimální vlhkosti při hutnění nebo snížení namrzavosti. Po zkušenostech již víme, že ke snížení namrzavosti nedochází úpravou zemin vždy, a proto se vyloučení namrzavosti musí případně ověřit přímým měřením. [4,30]

Úprava zemin se provádí mechanicky nebo chemicky. Každý z těchto dvou způsobů je účinný pro určité druhy zemin, a proto jej nelze zaměňovat.

- ❖ **Mechanická úprava** se provádí smísením nevhodné zeminy s jinou zeminou (materiálem) za účelem zlepšení čáry zrnitosti, což má za důsledek zlepšení zpracovatelnosti a mechanických vlastností. Mechanická úprava se používá především pro stejnozrnné štěrky a písky, nebo zeminy bez výrazného podílu plastických příměsí. Může nastat i situace, kdy smísením dvou granulometricky nevhodných zemin vznikne zemina vhodná. Mechanická úprava nemusí být účinná u jemnozrnných materiálů, které přidaný materiál obalí a nedojde k výrazné změně vlastností. Jemnozrnné zeminy jsou vhodné pro chemickou úpravu nebo je možné způsob mechanické i chemické úpravy kombinovat. [4,30]



- ❖ **Chemická úprava** se provádí za pomoci přidání vhodného pojiva. Pro úpravu jemnozrnných zemin, spraší a sprašových hlín se používá vzdušné vápno. Pro úpravu písčito-hlinitých zemin a stejnozrnných písčitých štěrkových zemin se používá cement nebo hydraulická silniční pojiva. U chemické úpravy je problém s nehomogenitou prostředí, proto se používají takzvaná směsná hydraulická pojiva, která obsahují jak vápno, tak i složky podobné cementu a jsou tak účinná pro větší spektrum zemin. Jako pojivo lze použít i popílek, pokud splní požadované vlastnosti. Chemicky upravená zemina mění své vlastnosti okamžitě vlivem snížení vlhkosti a snížení plasticity ve prospěch únosnosti. [4,30]

Úpravou zemin se má dosáhnout alespoň takových parametrů, které jsou požadovány pro zeminy k přímému použití bez úpravy (viz kapitola 4.2). Aby byla úprava účinná a použitelná, musí být v laboratoři zpracována receptura minimálně s těmito údaji:

- ❖ Druh a dávkování přidávané zeminy (materiálu) nebo pojiva. Při mechanické úpravě musí být přesně uvedeno, o jakou zeminu (materiál) se jedná a odkud, protože účinnost navržené směsi je závislá na použití přesně stejné zeminy (materiálu), který byl použit při laboratorních zkouškách. Totéž platí i pro chemickou úpravu zemin, kde musí být uveden druh pojiva i jeho výrobce, protože od různých výrobců může mít stejné pojivo různé vlastnosti.
- ❖ Srovnávací laboratorní objemová hmotnost a optimální vlhkost, údaje jsou nutné pro kontrolu míry zhutnění.
- ❖ Dosažené požadované pevnostní charakteristiky upravené zeminy (IBI, CBR).
- ❖ Někdy se kontroluje i namrzavost, protože úprava zemin nemusí nutně zlepšit tento parametr. [4]



## 6.3 Laboratorní zkoušky materiálů pro zemní těleso

### 6.3.1 Stanovení zrnitosti – síťový rozbor

Číslo a název normy: ČSN EN ISO 17892-4 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti

**Podstata zkoušky:** Materiál se roztřídí a oddělí pomocí sady normovaných sít do několika zrnitostních podílů s klesající velikostí částic. Velikosti otvorů sít a počet sít jsou voleny podle druhu vzorku a požadované přesnosti. Hmotnost částic zachycených na sítích se uvádí v procentech k počáteční hmotnosti vzorku.

#### Postup zkoušky:

Příprava zkušebních navážek se provede dle Obr. 6.1. Zkušební navážka se vysuší při teplotě  $110 \pm 5$  °C do ustálené hmotnosti, ponechá se vychladnout, zváží se a zaznamená se hodnota  $M_1$ .

Druh zeminy	hmotnost vysušené zeminy [g]
Písčité	až 75
Soudržné s malým nebo žádným obsahem písku	30 až 50
Velmi plastické až plastické jíly	10 až 30

Obr. 6.1 Minimální velikost zkušební navážky [32]

1. Praní, vzorek zeminy se vloží do nádoby, přidá se dostatečné množství vody a promíchá – uvolní se jemné částice. Poté se prosívá přes síto 0,063 mm, na které se umístí ochranné síto např. 2 mm. Vzorek se nalije na zkušební síta a promývá vodou tak dlouho, dokud voda protékající zkušebním sítem 0,063 není čistá.
2. Prosévání, sestaví se sada zkušebních dle normové řady (vzestupně). Sloupec sít obsahuje dno i víko. Vypraný, vysušený a zvážený vzorek se vsype na sloupec sít, sloupcem sít se ručně nebo mechanicky třese do ustálené hmotnosti.



3. Váží se jednotlivá síta, začíná se největším, zváží se zachycený materiál na sítě (nesmí dojít ke ztrátě vzorku) a zaznamenává se hmotnost na jednotlivých sítech  $R_1, R_2, R_j$ . Materiál na dně se zváží jako P.
4. Pokud se součet hmotností  $R_j + P$  odlišuje od  $M_2$  o víc jak 1 %, musí se zkouška opakovat.

Výpočet se provede viz tab 6.2, souhrnné procento propadu se vynese do grafu-  
křivka zrnitosti.

ZRNITOST – SÍTOVÝ ROZBOR dle ČSN EN 933-1			
Celková suchá hmotnost $M_1$ [g]			
Suchá hmotnost po praní $M_2$ [g]			
Velikost otvorů síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu $R_i$ [g]	Procento zbytku na sítech $100 \times R_i/M_1$ [%]	Souhrnné procento propadu $100 - \Sigma(100 \times R_i/M_1)$ [%]
63			
31,5			
16			
8			
4			
2			
1			
0,5			
0,25			
0,125			
0,063			
P (zbytek na dně)		-	-
Kontrola:	$[(M_2 - (\Sigma R_i + P)) \times 100] / M_2 = \dots < 1\%$		
f – procento jemných částic	$f = [(M_1 - M_2) + P] \times 100 / M_1$		

Tab. 6.2 Tabulka zrnitosti [31]

Křivka zrnitosti nám pomůže určit čísla křivosti a nestejnozrnnosti:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}}$$

kde:  $C_u$  je číslo nestejnozrnnosti

$C_c$  je číslo křivosti

$d_{60}$  velikost zrna, odpovídající hodnotě propadu 60 % odečtené z čáry zrnitosti

$d_{30}$  velikost zrna, odpovídající hodnotě propadu 30 % odečtené z čáry zrnitosti

$d_{10}$  velikost zrna, odpovídající hodnotě propadu 10 % odečtené z čáry zrnitosti



Rozsah čísla nestejnozrnnosti:

- ❖  $C_u < 5$  stejnozrnná zemina
- ❖  $C_u = 5-15$  středně nestejnozrnná zemina
- ❖  $C_u > 15$  nestejnozrnná zemina

Číslo křivosti – charakterizuje přibližně tvar křivky zrnitosti

- ❖  $C_c = 1-3$

Zeminy s hodnotami  $C_c$  v rozsahu 1-3 a číslu nestejnozrnnosti  $C_u > 5$  považujeme za dobře zrněné. [31,32]

### 6.3.2 Stanovení optimální vlhkosti

Číslo a název normy: ČSN EN 13286-2 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška

**Podstata zkoušky:** Zhutnitelnost zemin se vyjadřuje maximální objemovou hmotností  $\rho_{d \max}$ , která se dosáhne určitým zhutněním v normovém moždíři za použití normového pěchu při určité vlhkosti- $w$ .

Výstupem zkoušky Proctor (standart, modifikovaný) je závislost mezi objemovou hmotností vysušené zeminy  $\rho_d$  a vlhkostí  $w$ , ze které lze stanovit optimální vlhkost  $w_{opt}$ , při které je dosaženo maximální objemové hmotnosti zeminy  $\rho_{d \max}$ .

Z charakteru hutnicí křivky se dá zjistit také citlivost materiálu na změnu vlhkosti. V případě citlivých zemin má menší změna vlhkosti od vlhkosti optimální (i pouze o 2–3 %) za následek velký pokles objemové hmotnosti vysušené zeminy.

Pro stanovení zhutnitelnosti podle Proctorovy standardní zkoušky se užije pěchu hmotnosti 2500 g, dopadajícího na zhuřňovanou zeminu z výšky 300 mm. Zkoušky se uskutečňují v různých provedeních, lišících se od sebe průměry užitých normových moždířů.



Postup zkoušky:

1. Zemina je rozdělena na dílčí zkušební vzorky o hmotnosti cca 4,5 kg. První zkušební vzorek se smíchá s vodou tak, aby vlhkost zeminy byla nižší než předpokládaná optimální vlhkost.
2. Směs se nechá homogenizovat, je nutné směs dobře promíchat
3. Zváží se samotný zkušební moždíř
4. Zemina se ukládá do zkušebního moždíře s namontovaným nástavcem postupně ve třech stejně vysokých vrstvách a každá vrstva se zhutní 25 údery pěchu
5. Po ukončení zhutnění se odejme nástavec a povrch zeminy se zarovná. Vzorek zeminy i s moždířem se zváží.
6. Zemina se odstraní z moždíře, vzorek se umístí na předem zváženou váženku a opět se zváží, poté se dá sušit na 24 hod při 105 °C se určí jeho přesná vlhkost, ta se vypočítá dle vzorce:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \text{ [%]}$$

kde:  $w$  je vlhkost zeminy v %

$m_w$  hmotnost vody obsažená v zemině [kg]

$m_s$  hmotnost suchých pevných částic zeminy

Po určení vlhkosti se vypočítá suchá objemová hmotnost  $\rho_d$  dle vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s}{V} (1 + w) = \rho_d (1 + w) \rightarrow \rho_d = \frac{\rho}{w+1}$$

kde:  $\rho$  je objemová hmotnost zeminy [kg.m<sup>3</sup>]

$m$  hmotnost zeminy i s obsaženou vodou [kg]

$V$  celkový objem zeminy-póry i pevné částice zeminy





7. Pro další hutnění se použijí další dílčí zkušební vzorky, které se míchají tak, že jejich vlhkost je vyšší. Nejčastěji se dělá takzvaný pětibodový Proctor (5 zkušebních vzorků)
8. Proveďte se vynesení závislosti  $\rho_d$  na  $w$  a z grafu se určí  $\rho_{d \max, PS}$  a  $w_{opt}$

Vývoj hutnící techniky (střední a těžké vibrační válce) způsobil i úpravu zkoušky Proctor standart na Proctor modifikovaný viz. tab. 6.3. Proctor modifikovaný dosahuje lepší zhutnitelnosti za menší vlhkosti (větší hutnící energie). [33,34]

		PS	PM
hmotnost pěchu	[kg]	2,5	4,5
zdvih pěchu	[mm]	300	457
objem mozdíře	[cm <sup>3</sup> ]	942	2119,5
počet vrstev		3	5
počet úderů na každou vrstvu		25	56

Tab. 6.3 Rozdíl mezi Proctor standart a modifikovaný [33]

### 6.3.3 CBR/IBI-Kalifornský poměr únosnosti/Okamžitý index únosnosti

Číslo a název normy: ČSN EN 13286-47 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání

Podstata zkoušky: Zkouška byla určena pro měření únosnosti podkladních půd při výstavbě silnic. Využívána byla také jako kontrola únosnosti neupravených startovacích a přistávacích drah letadel. V dnešní době CBR (California Bearing Ratio) slouží jako průkazná a kontrolní zkouška při vyhodnocení únosnosti podloží a konstrukčních vrstev vozovek.

Kalifornský poměr únosnosti je číslo v % vyjadřující poměr síly potřebné k zatlačení standartního trnu konstantní rychlostí do stanovené hloubky vzorku zeminy, či směsi vůči síle potřebné k zatlačení téhož trnu do stejné hloubky v normovém kamenivu. Normové kamenivo pro tuto zkoušku je drcený vápenec nacházející se v Kalifornii (CBR=100%).



Variantou zkoušky CBR je IBI (Immediate Bearing Index), což je okamžitá hodnota Kalifornského poměru únosnosti bez použití zatěžovacího prstence. IBI se zjišťuje krátce po úpravě zemin. V případě zemin upravených hydraulickými pojivy do 90 min po smíchání směsi, v případě vápna ne však dřív jak za 60 min.

Postup zkoušky:

1. Příprava zeminy: Vzorek se navlhčí na optimální vlhkost (stanovené Proctorovou zkouškou zhutnění). Uvede se, na jakou hodnotu byl vzorek navlhčen. Směs se nechá homogenizovat.
2. Příprava vzorku: Pomocí Proctorovy standardní zkoušky se připraví vzorek. (viz 6.3.2).
3. Zrání vzorku (aktivní zóna požadavek  $CBR_{96}=15\%$ ), z tohoto důvodu se moždív upevní na perforovanou podkladní desku zkoušenou částí dolů (nehnutelná strana) a osadí se nástavcem. Celá sestava se umístí do nádoby s vodou, tak že je celý vzorek ponořen. Na povrch vzorku se osadí přitěžovací prsteneček, který během zrání simulují konstrukci vozovky. Umístí se úchylkoměr pro měření lineární bobtnání a odečte se nulté čtení  $h_0$ . Po 96 hodinách se odečte čtení  $h_1$  a provede se zkouška CBR.
4. Usazení vzorku do lisu: Před samotným měřením se vzorek zeminy otočí. Připravený vzorek se umístí do středu zatěžovacího lisu. Vrchní strana vzorku se osadí zatěžovacím trnem o průměru 50 mm a zatěžovacími prstenci (v případě zjišťování IBI se prstence nepoužívají)
5. Měření: Poté se spustí samotné měření, během kterého je trn vháněn do vzorku zeminy konstantní rychlostí 1,27 mm/min. Během měření se zaznamenává hodnota síly potřebná k zatlačení trnu o každého 0,5 mm. Měření končí při zaboření trnu o 10 mm.



6. Vyhodnocení se provádí dle výpočtu:

$$IBI/CBR = \frac{F}{F_s} \times 100 [\%] \quad \text{hodnota se zaokrouhlí dle tab.6.5}$$

Kde:

F je potřebná síla k zatlačení trnu do stanovené hloubky ve zkoušené zemině [kN]

F<sub>s</sub> je standardní síla potřebná k zatlačení trnu do stanovené hloubky v normovém kamenivu (dle tab. 6.4) [kN]

<i>Penetrace [mm]</i>	<i>Standardní síla [kN]</i>
2,5	13,2
5	20

Tab. 6.4 Hodnoty standardních sil pro normové kamenivo [36]

<i>Interval výsledků CBR / IBI</i>	<i>Zaokrouhlení [%]</i>
0 - 9	0,5
10 - 29	1
> 29	5

Tab. 6.5 Pravidlo pro zaokrouhlení CBR/IBI [36]

<i>Zemina</i>	<i>CBR [%]</i>
hlína s extrémně vysokou plasticitou (při optimální vlhkosti)	2 – 5
šterkovitá hlína (při optimální vlhkosti)	8 – 18
šterk dobře zrněný	40 - 80

Tab. 6.6 Orientační hodnoty CBR dle zkoušené zeminy [36]

<i>Místo</i>	<i>IBI [%]</i>
rychlá kontrola únosnosti zemin - pojezd běžnou stavební technikou	≥ 5
podloží násypu neupravených zemin - kontrolní a průkazní zkoušky	≥ 5
podloží násypu u upravených zemin - kontrolní a průkazní zkoušky	≥ 10

Tab. 6.7 Orientační hodnoty IBI [37]



Oprava při špatném dosednutí trnu:

- ❖ nalezení inflexního bodu „i“ – bod kde se zakřivení mění z konvexního na konkávní
- ❖ zakreslení tečny k opravované křivce procházející inflexním bodem
- ❖ průsečík tečny s horizontální osou určí opravu penetrace  $\Delta p$ ,
- ❖ měřítko penetrace se posune směrem doprava o vzdálenost  $\Delta p$ ,
- ❖ maximální hodnota  $\Delta p = 2,5$  mm i v případě, že po korekci vyjde  $\Delta p > 2,5$  mm.
- ❖ síla odpovídající penetraci trnu do hloubky  $2,5\text{mm} + \Delta p$
- ❖ síla odpovídající penetraci trnu do hloubky  $5,0\text{mm} + \Delta p$

Lineární bobtnání se vyjádří součinitelem bobtnavosti  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{h_1 - h_0}{h_0} \quad [-]$$

[34,35,36]

## 6.4 Laboratorní zkoušky

Hlavní kritéria pro vyhodnocení vhodnosti úpravy zemin odpadem skla vychází z ČSN 73 6133 z požadavků na vhodné zeminy. Jak bylo výše uvedeno, téměř všechny zeminy jsou zatříděny jako podmíněčně vhodné a musí splnit tato kritéria:

1. Pokud  $w_L > 50$  % nebo  $I_c \leq 0,5$  nebo  $\rho_{d \max, PS} < 1500$  kg.m<sup>3</sup> (násyp),  $\rho_{d \max, PS} < 1600$  kg.m<sup>3</sup> (aktivní zóna), **zemina se musí upravit**; požadavek na maximální objemovou hmotnost neplatí pro umělé materiály, jejichž účelem je vylehčení zemního tělesa a pro zeminy upravené pojivy.
2. **Musí se upravit** objemově nestabilní zeminy a horniny (bobtnavé jíly a jílovité břidlice), u nichž i při běžných klimatických podmínkách bude v zemním tělese docházet k objemovým změnám větším jak 3%.
3. Pokud zeminu nelze zpracovat, protože její vlhkost není v intervalu přípustné vlhkosti a tuto vlhkost nelze ovlivnit nebo se jedná o zeminu stejnozrnnou, **zemina se musí upravit**. [37]



Další posouzení se provádí podle účelu použití:

- a) Při použití do aktivní zóny se zeminy dále posoudí podle únosnosti CBR. Zeminu je možné použít bez úpravy, pokud je hodnota CBR minimálně 15 %.
- b) Při použití do násypu se zemina obvykle posuzují podle hodnoty IBI. Zeminu je možné použít bez úpravy, pokud je hodnota IBI rovna min. 10 % pro násyp a 5 % pro podloží násypu. [37]

Tato diplomová práce má za účel zjistit vhodnost využití odpadového skla při úpravě zemin a z výše uvedených podmínek se především zaměří na zhutnitelnost a únosnost.

Z tohoto důvodu se jednotlivé směsi budou posuzovat podle:

1. Hodnoty CBR
2.  $\rho_{d \max, PS} < 1600 \text{ kg.m}^3$  (toto kritérium neplatí pro Refaglass)
3.  $W_{opt}$
4. Hodnoty IBI
5. Také se bude sledovat průběh křivky zrnitosti, ale pro její větší přesnost by bylo nutno provést hustoměrnou zkoušku, proto má spíš informativní charakter

Aby bylo možné tato data vyhodnotit a porovnat, jsou zkoušky provedeny na samotné zemině.



### 6.4.1 Laboratorní zkoušky zemina



*Obr. 6.2 Zemina ve váženě*



*Obr. 6.3 Zemina s měřidlem*



### 6.4.2 Sítový rozbor zeminy

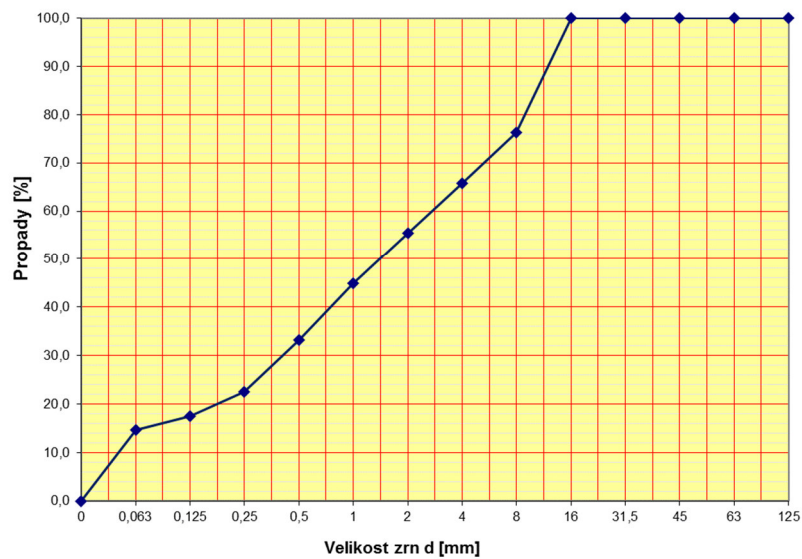
Sítový rozbor-Zemina			
Velikost oka síta [mm]	Hmotnost zůstatku na síti [g]	Procento zůstatku na síti [%]	Souhrnné procento propadu [%]
125	0,0	0,0	100,0
63	0,0	0,0	100,0
45	0,0	0,0	100,0
31,5	0,0	0,0	100,0
16	0,0	0,0	100,0
8	145,1	23,7	76,3
4	64,3	10,5	65,8
2	63,3	10,3	55,4
1	64,9	10,6	44,8
0,5	70,9	11,6	33,2
0,25	65,3	10,7	22,6
0,125	31,2	5,1	17,5
0,063	17,7	2,9	14,6
0	89,1	14,6	0,0

Tab. 6.9 Sítový rozbor zeminy

Kontrola, $C_u$ , $C_f$ - Zemina	
Celkem	611,8
Navážka	614,6
Kontrola	0,5   <1%
$d_{10}$	0,04
$d_{30}$	0,43
$d_{60}$	2,91
$C_u$ =	<b>69,31</b>
$C_c$ =	<b>1,49</b>

Tab. 6.8 Kontrola, číslo křivosti a nestejzomnosti

Křivka zrnitosti - Zemina



Obr. 6.4 Křivka zrnitosti zemina



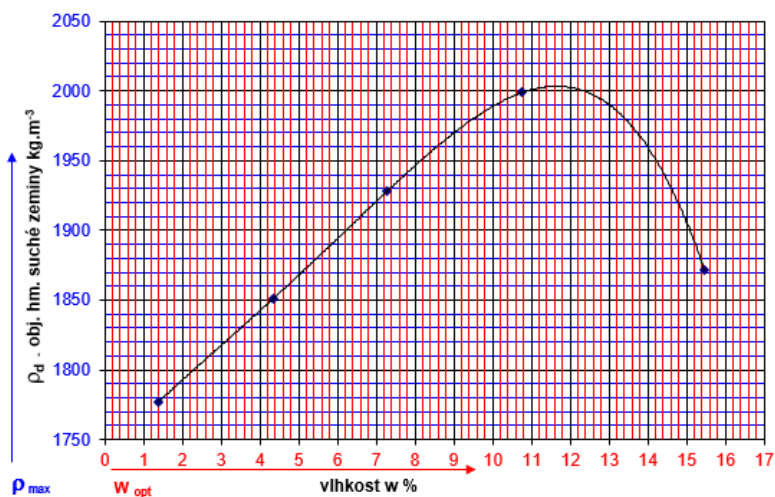
### 6.4.3 Optimální vlhkost-zemina

Určení vlhkosti-Zemina				
váženka [g]	váženka + mokrá zeminy [g]	váženka + vysušená zemina [g]	Vlhkost [%]	Předpokládaná vlhkost [%]
199,8	2382,3	2352,7	1,37	0
199,7	2188,5	2105,8	4,34	3
217,6	2187	2053,2	7,29	6
209,8	2675,4	2436	10,75	10
99	2080,2	1814,8	15,47	15

Tab. 6.10 Výpočet vlhkosti obsažené ve vzorcích po PS

Optimální vlhkost-Zemina				
Směs zeminy a vody [g]	Vysušený vzorek [g]	w [%]	$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_d$ [kg.m <sup>-3</sup> ]
3819,8	3767,99	1,4	1801,3	1776,9
4095,3	3925,01	4,3	1931,2	1850,9
4387	4088,95	7,3	2068,8	1928,2
4694,1	4238,32	10,8	2213,6	1998,7
4583,6	3969,58	15,5	2161,5	1871,9

Tab. 6.11 Určení suché objemové hmotnosti zeminy po zjištění vlhkosti vzorků po PS



Obr. 6.5 Proctorova křivka-závislost maximální suché objemové hmotnosti na vlhkosti pro zeminu





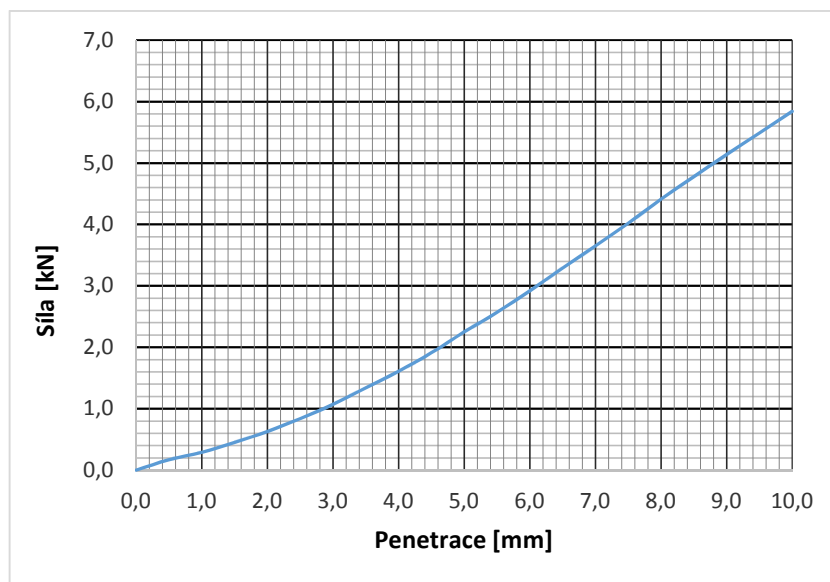
#### 6.4.4 IBI zemina

IBI-Zemina			
Penetrace [mm]	Standartní síla [kN]	Síla [kN]	IBI [%]
0,0		0	
0,5		0,17	
1,0		0,29	
1,5		0,45	
2,0		0,63	
2,5	13,2	0,84	8
3,0		1,07	
3,5		1,34	
4,0		1,61	
4,5		1,91	
5,0	20,0	2,25	17
5,5		2,57	
6,0		2,92	
6,5		3,29	
7,0		3,65	
7,5		4,02	
8,0		4,41	
8,5		4,78	
9,0		5,14	
9,5		5,49	
10,0		5,84	

Tab. 6.12 IBI zemina-naměřené síly při penetraci trnu

Oprava	
$\Delta\rho=$	0,57
$F_{2,5+\Delta\rho}=$	1,09
$F_{5,0+\Delta\rho}=$	3,46

Tab. 6.13 Oprava zkresleného měření špatným dosednutím trnu



Obr. 6.6 Grafické znázornění závislosti síly na penetraci trnu – konvexní průběh dokazuje špatné dosednutí trnu



### 6.4.5 CBR zemina

CBR-Zemina			
Penetrace [mm]	Standartní síla [kN]	Síla [kN]	CBR [%]
0,0		0,00	
0,5		0,21	
1,0		0,37	
1,5		0,59	
2,0		0,85	
2,5	13,2	1,15	9
3,0		1,44	
3,5		1,90	
4,0		2,15	
4,5		2,52	
5,0	20,0	2,89	15
5,5		3,26	
6,0		3,66	
6,5		4,06	
7,0		4,45	
7,5		4,84	
8,0		5,21	
8,5		5,58	
9,0		5,95	
9,5		6,32	
10,0		6,70	

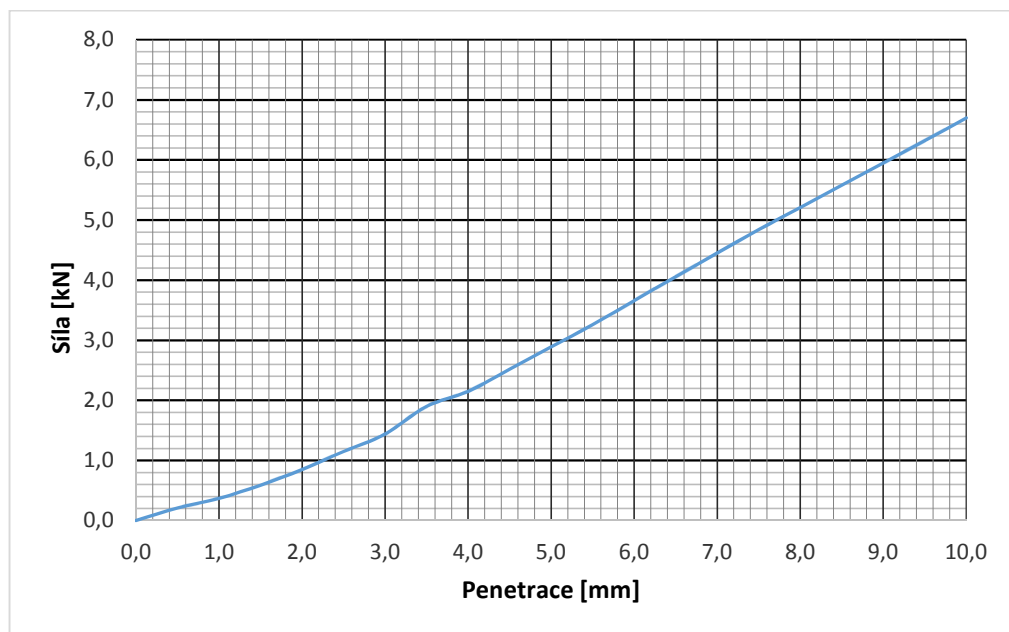
Tab. 6.16 CBR zemina-naměřené síly při penetraci trnu

Oprava	
$\Delta p =$	0,20
$F_{2,5+\Delta p} =$	1,24
$F_{5,0+\Delta p} =$	2,98

Tab. 6.15 Oprava zkresleného měření špatným dosednutím trnu

Lineární bobtnání	
$h_0 =$	0,02
$h_1 =$	0,07
$\alpha =$	2,50

Tab. 6.14 Výpočet součinitele lineární bobtnavosti



Obr. 6.7 Grafické znázornění závislosti síly na penetraci trnu – konvexní průběh dokazuje špatné dosednutí trnu



#### 6.4.6 Závěr-zemina

Zemina má plynulou křivku zrnitosti, to znamená, že jsou v ní přibližně rovnoměrně zastoupeny všechny zrna. Z křivky zrnitosti byly zjištěny čísla nestejnozrnnosti  $C_u=69,31$  a křivosti  $C_c=1,49$ , z těch vyplývá že zemina je dobře zrněná nestejnozrnná, lze ji klasifikovat jako štěrkovitou hlínu MG, neobsahuje zrna menší jak 0,002 mm. Zemina by se měla podrobit hustoměrné zkoušce, ale v této fázi je diplomové práce zaměřena především na prokázání použitelnosti odpadu skla pro úpravu zemin, z tohoto důvodu by byla zkouška provedena při následných laboratorních zkouškách, po získání pozitivních výsledků.

Z Proctorovy křivky určíme  $w_{opt}= 11 \%$  a  $p_{d,max PS} = 2004 \text{ kg.m}^{-3} > 1600 \text{ kg.m}^{-3}$  zemina splňuje podmínku normy a je vhodná k užití do aktivní zóny.

S hodnotou IBI 17 % by se po této čerstvě zhutněné zemině dalo pojíždět běžnou stavební technikou i by mohla být použita do podloží násypu, u obou je požadavek  $IBI_{min} 5 \%$ .

U hodnot CBR i IBI musela být provedena oprava, viz tab. 6.13 a 6.15. Hodnota CBR 15 % je přesně minimální hodnota požadovaná normou, mohla by se tedy použít bez další úpravy. Pro návrh vozovky dle TP70 by se uvažovalo podloží PII, kde je požadavek na CBR 5-15 %. Součinitel lineárního bobtnání  $\alpha=2,5$  zatím nemáme s čím porovnat.

Samotná zemina se musela dobře promíchat, ideálně přendat do další nádoby a znovu promíchat, jemnozrnná složka se „přilepila“ do krajů a i při nadávkování relativně vysoké vlhkosti bylo možné na dně nádoby narazit na úplně suchý materiál.



## 6.5 Laboratorní zkoušky-zemina x odpadové sklo [50:50]

Poměr zeminy ku odpadovému sklu 50:50 byl zvolen z důvodu zřetelnějšího ovlivnění vlastností zeminy.

[Z:P] – směs zeminy a drceného polykrystalického FV panelu

[Z:A] – směs zeminy a drceného amorfního FV panelu

[Z:R] – směs zeminy a refaglass 8/16

[Z:RP] – směs zeminy a refaglass 8/1,6

### 6.5.1 Zemina a drcený polykrystalický fotovoltaický panel



Obr. 6.8 Zemina s polykrystalickým panelem v poměru 50:50 ve váženec



Obr. 6.9 Zemina s polykrystalickým panelem v poměru 50:50 s pravítkem



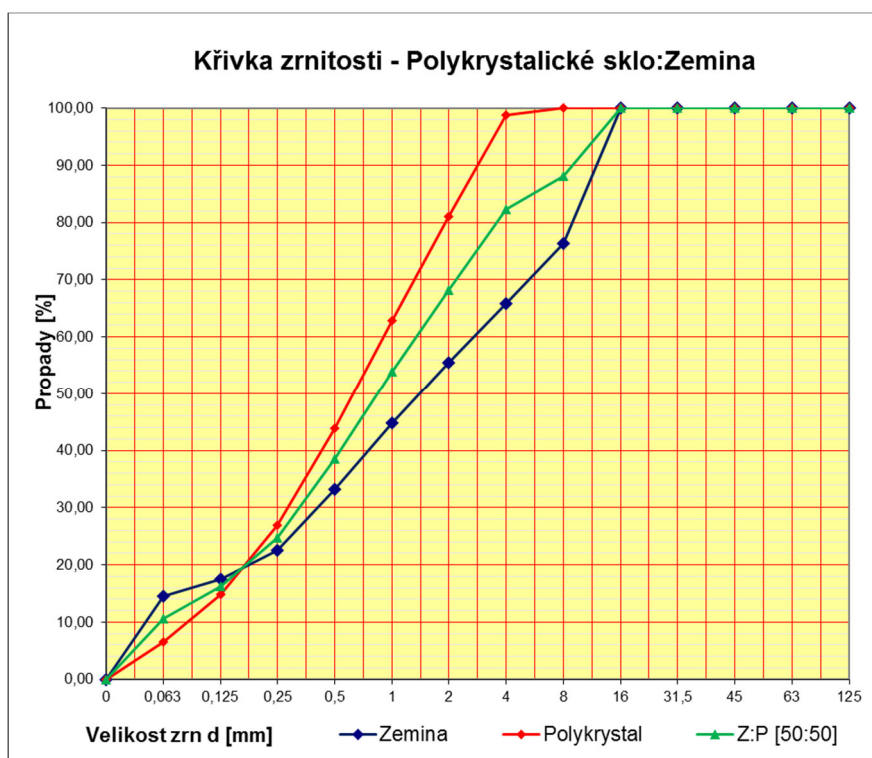
### 6.5.2 Síťový rozbor-zemina s drceným polykrystalickým FV panelem

Polykrystal:zemina [50:50]			
Souhrnné procento propadu [%]			
Velikost oka síta [mm]	Zemina	Polykrystal	Z:S [50:50]
125	100,0	100,0	100,0
63	100,0	100,0	100,0
45	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0
16	100,0	100,0	100,0
8	76,3	100,0	88,2
4	65,8	98,7	82,3
2	55,4	81,1	68,3
1	44,8	62,9	53,8
0,5	33,2	43,9	38,6
0,25	22,6	27,0	24,8
0,125	17,5	14,9	16,2
0,063	14,6	6,5	10,6
0	0,0	0,0	0,0

Tab. 6.18 Síťový rozbor zeminy s drceným polykrystalickým FV panelem [50:50]

Zemina:Polykrystal	
$d_{10}$	0,06
$d_{30}$	0,35
$d_{60}$	0,86
$C_u$	<b>14,33</b>
$C_c$	<b>2,31</b>

Tab. 6.17 Číslo nestejnozrnnosti a křivosti pro kombinaci zeminy s polykrystalickým FV panelem



Obr. 6.8 Křivka zrnitosti pro kombinaci zeminy s drceným polykrystalickým FV panelem



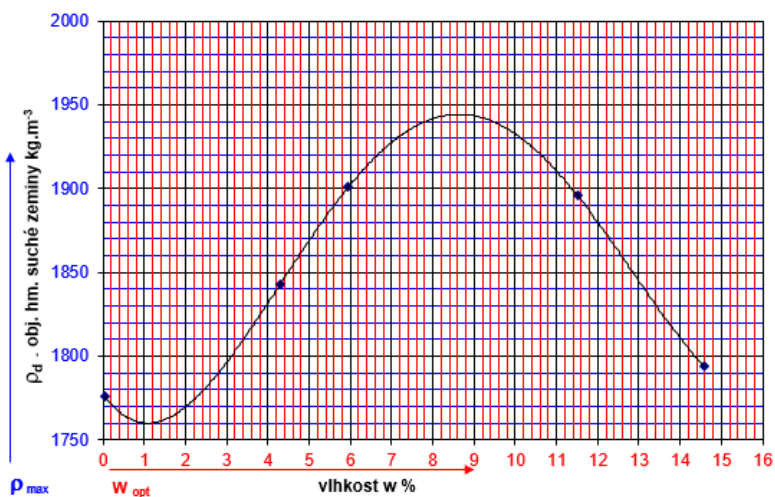
### 6.5.3 Optimální vlhkost-zemina s polykrystalickým FV panelem

Určení vlhkosti-Zemina x polykrystal				
váženka [g]	váženka + mokrá zeminy [g]	váženka + vysušená zemina [g]	Vlhkost [%]	Předpoklad vlhkosti [%]
209,7	703,3	703,1	0,04	0
906,5	4976,3	4808,9	4,29	5
1086,6	5339,3	5100,6	5,95	10
1859,7	6315,9	5855,9	11,51	15
1245,9	5555,7	5006,9	14,59	20

Tab. 6.19 Určení vlhkosti po zkoušce PS pro kombinaci zeminy s polykrystalickým FV panelem

Optimální vlhkost- Zemina x polykrystal				
Směs zeminy a vody [g]	Vysušený vzorek [g]	w [%]	$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_d$ [kg.m <sup>-3</sup> ]
3767,7	3766,17	0,0	1776,7	1776,0
4075,1	3907,48	4,3	1921,7	1842,7
4270,3	4030,61	5,9	2013,7	1900,7
4482,6	4019,87	11,5	2113,9	1895,7
4358,5	3803,5	14,6	2055,3	1793,6

Tab. 6.20 Určení suché objemové hmotnosti po zjištění vlhkosti vzorků po PS pro kombinaci zeminy s polykrystalickým FV panelem



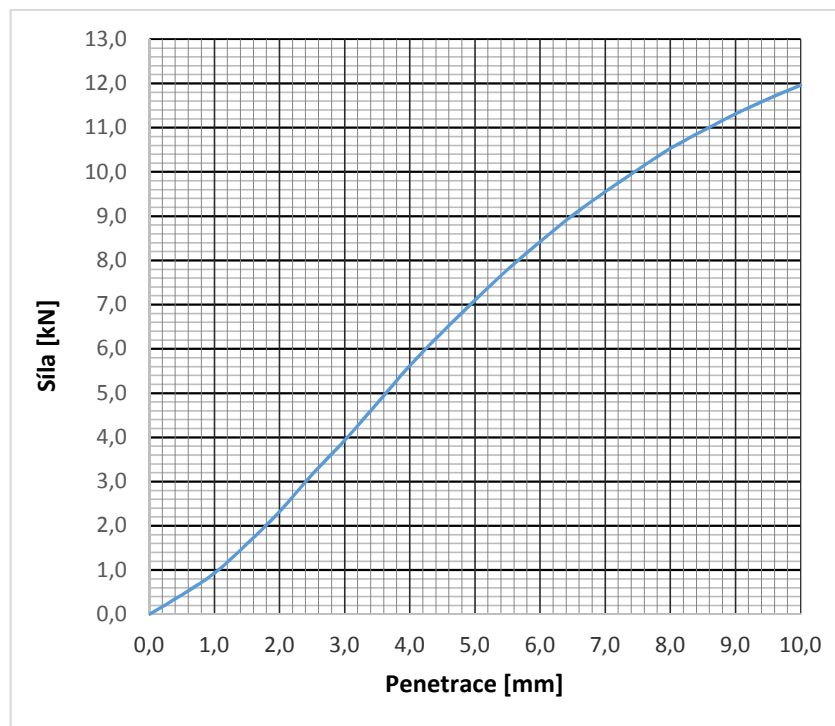
Obr. 6.9 Proctorova křivka-závislost maximální suché objemové hmotnosti na vlhkosti pro kombinaci zeminy s polykrystalickým FV panelem



### 6.5.4 IBI zemina s drceným polykrystalický FV panelem

IBI-Zemina:Polykrystal [50:50]			
Penetrace [mm]	Standartní síla [kN]	Síla [kN]	IBI [%]
0,0		0,00	
0,5		0,44	
1,0		0,93	
1,5		1,59	
2,0		2,32	
2,5	13,2	3,16	24
3,0		3,93	
3,5		4,77	
4,0		5,62	
4,5		6,38	
5,0	20,0	7,10	35
5,5		7,79	
6,0		8,42	
6,5		9,02	
7,0		9,55	
7,5		10,05	
8,0		10,53	
8,5		10,93	
9,0		11,31	
9,5		11,65	
10,0		11,96	

Tab. 6.21 IBI zemina v kombinaci s polykrystalickým FV panelem-naměřené síly při penetraci trnu



Obr. 6.10 Grafické znázornění závislosti síly na penetraci trnu kombinace zeminy s polykrystalickým FV panelem



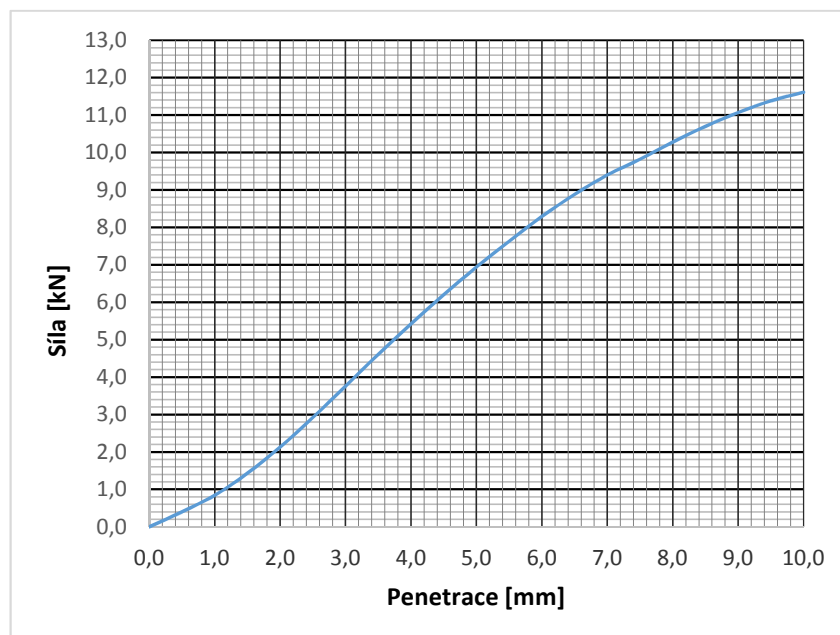
### 6.5.5 CBR zemina s drceným polykrystalickým FV panelem

CBR-Zemina:Polykrystal [50:50]			
Penetrace [mm]	Standartní síla [kN]	Síla [kN]	CBR [%]
0,0		0,00	
0,5		0,40	
1,0		0,84	
1,5		1,43	
2,0		2,13	
2,5	13,2	2,92	20
3,0		3,76	
3,5		4,61	
4,0		5,42	
4,5		6,20	
5,0	20,0	6,94	35
5,5		7,63	
6,0		8,29	
6,5		8,88	
7,0		9,40	
7,5		9,82	
8,0		10,28	
8,5		10,70	
9,0		11,07	
9,5		11,38	
10,0		11,61	

Lineární bobtnání	
$h_0 =$	0,01
$h_1 =$	0,02
$\alpha =$	1,00

Tab. 6.22 Výpočet součinitele lineární bobtnavosti

Tab. 6.23 CBR zemina v kombinaci s polykrystalickým FV panelem - naměřené síly při penetraci trnu



Obr. 6.11 Grafické znázornění závislosti síly na penetraci trnu kombinace zeminy s polykrystalickým FV panelem





### 6.5.6 Závěr–zemina s drceným polykrystalickým FV panelem

Zemina v kombinaci s drceným polykrystalickým FV panelem má plynulou křivku zrnitosti, to znamená, že jsou v ní přibližně rovnoměrně zastoupeny všechny zrna. Z křivky zrnitosti byly zjištěny čísla nestejnozrnnosti  $C_u=14,33$  a křivosti  $C_c=2,3$  ty nám říkají, že vzniklá směs je středně nestejnozrnná.

Z Proctorovy křivky určíme  $w_{opt}= 8,5 \%$  a  $p_{d,max PS} = 1945 \text{ kg.m}^{-3} > 1600 \text{ kg.m}^{-3}$ , směs splňuje podmínku normy a je vhodná k užití do aktivní zóny.

S hodnotou IBI 35 % by se po této čerstvě zhutněné zemině dalo pojíždět běžnou stavební technikou i by mohla být použita do podloží násypu, u obou je požadavek  $IBI_{min} 5 \%$ .

U křivek CBR i IBI je náznak konvexního průběhu, ale hodnoty jsou dost vysoké, takže zůstaneme na straně bezpečnosti, také tento jev může způsobovat samotná kombinace zeminy a skla. Hodnota CBR 35 % je podstatně vyšší než minimální hodnota požadovaná normou. Pro návrh vozovky dle TP70 by se uvažovalo podloží PI, kde je požadavek na CBR víc jak 10 %. Součinitel lineárního bobtnání  $\alpha=1$ .

Směs vzniklá kombinací zeminy a drceného polykrystalického FV panelu se po přidání vody lépe homogenizovala, zlepšila se jí zpracovatelnost a podle vysoké hodnoty CBR i hutnitelnost.



### 6.5.7 Zemina s drceným amorfním FV panelem [50:50]



Obr. 6.12 Zemina v kombinaci s amorfním FV panelem 50:50 ve váženice



Obr. 6.13 Zemina v kombinaci s amorfním FV panelem 50:50 a měřidlem

Z obrázků (obr.6.9 a 6.15) je patrné, že polykrystalické sklo je při stejném poměru v zemině výraznější, je to způsobeno jemnějším namletím amorfního skla, to je způsobeno konstrukcí amorfního fotovoltaického panelu, který je subtilnější než polykrystalický.



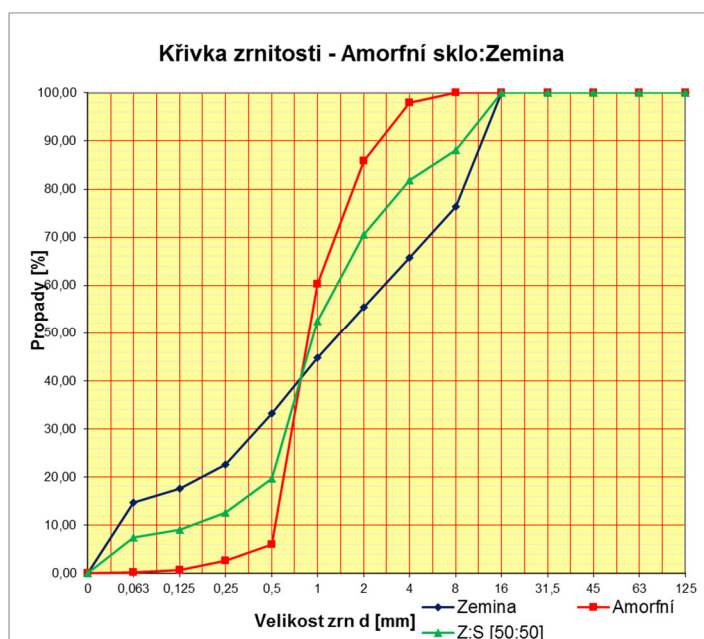
### 6.5.8 Síťový rozbor zemina s drceným amorfním FV panelem

Amorfní:zemina [50:50]			
Souhrnné procento propadu [%]			
Velikost oka síta [mm]	Zemina [100%]	Amorfní [100%]	Z:A [50:50]
125	100,0	100	100,0
63	100,0	100	100,0
45	100,0	100	100,0
31,5	100,0	100	100,0
16	100,0	100	100,0
8	76,3	100	88,2
4	65,8	97,9	81,9
2	55,4	85,9	70,7
1	44,8	60,3	52,6
0,5	33,2	6,0	19,6
0,25	22,6	2,6	12,6
0,125	17,5	0,6	9,1
0,063	14,6	0,1	7,4
0	0,0	0,0	0,0

Zemina:Amorfní	
d <sub>10</sub>	0,06
d <sub>30</sub>	0,21
d <sub>60</sub>	0,67
C <sub>u</sub> =	<b>10,66</b>
C <sub>c</sub> =	<b>1,01</b>

Tab. 6.24 Číslo nestejnozrnnosti a křivosti pro kombinaci zeminy s amorfním FV panelem

Obr. 6.14 Síťový rozbor zeminy s amorfním FV panelem



Obr. 6.15 Křivka zrnitosti směs zeminy s amorfním FV panelem



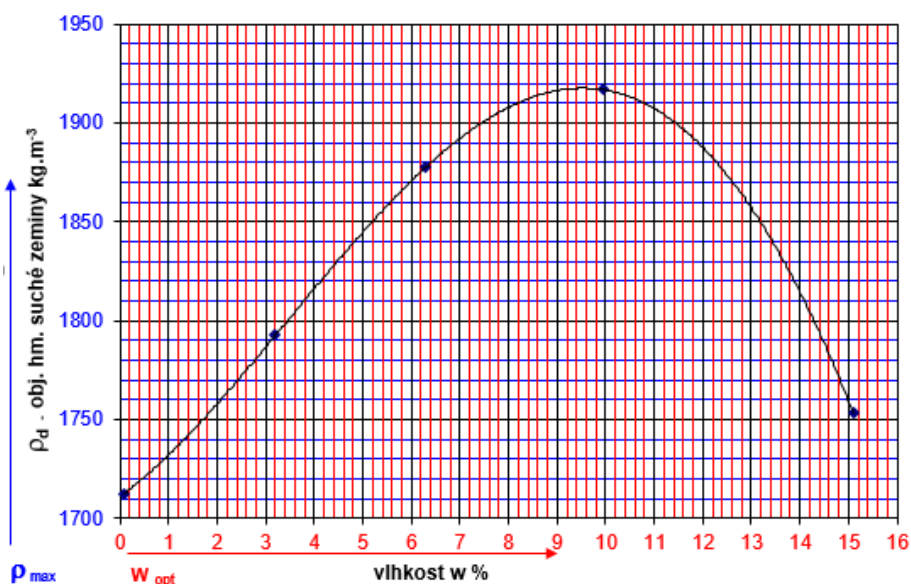
### 6.5.9 Optimální vlhkost-zemina s drceným amorfním FV panelem

Určení vlhkosti-Zemina x Amorfní				
váženka [g]	váženka + mokrá zeminy [g]	váženka + vysušená zemina [g]	Vlhkost [%]	Předpoklad vlhkosti [%]
906,4	4538	4535,2	0,08	0
217,5	1119,1	1091,2	3,19	3
199,7	1350,1	1281,9	6,30	6
199,6	1621,5	1493	9,94	10
209,7	2267,7	1997,8	15,09	15

Tab. 6.25 Výpočet vlhkosti pro kombinaci zeminy s amorfním FV panelem po PS

Optimální vlhkost-Zemina x Amorfní				
Směs zeminy a vody [g]	Vysušený vzorek [g]	w [%]	$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_d$ [kg.m <sup>-3</sup> ]
3633	3630,2	0,1	1713,7	1712,4
3921,1	3799,76	3,2	1849,6	1792,4
4231,6	3980,73	6,3	1996,0	1877,7
4467,4	4063,67	9,9	2107,2	1916,8
4279,1	3717,91	15,1	2018,4	1753,7

Tab. 6.26 Výpočet maximální suché objemové hmotnosti pro kombinaci zeminy s amorfním FV panelem



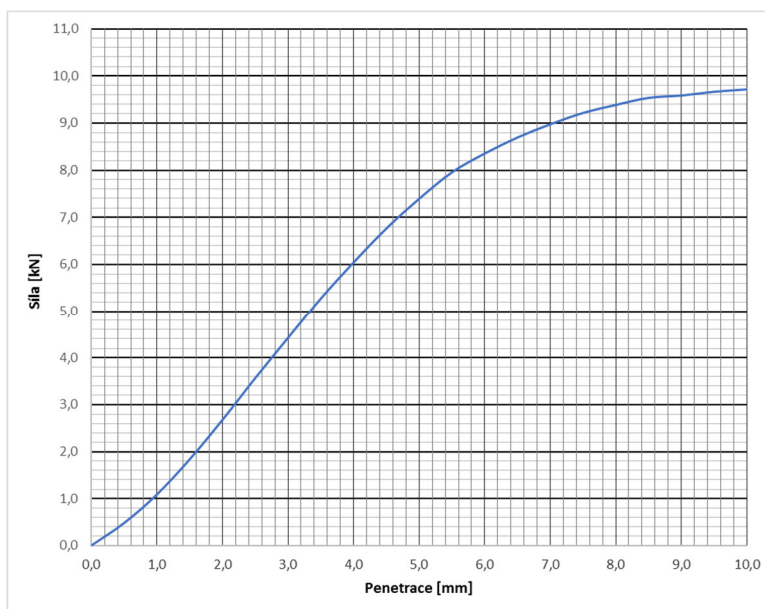
Obr. 6.16 Proctorova křivka pro kombinaci zeminy s amorfním FV panelem



### 6.5.10 IBI-zemina s drceným amorfnním FV panelem

IBI-Zemina:Amorfnní [50:50]			
Penetrace [mm]	Standartní síla [kN]	Síla [kN]	IBI [%]
0,0		0,00	
0,5		0,48	
1,0		1,09	
1,5		1,84	
2,0		2,68	
2,5	13,2	3,57	27
3,0		4,43	
3,5		5,28	
4,0		6,05	
4,5		6,77	
5,0	20,0	7,4	35
5,5		7,96	
6,0		8,36	
6,5		8,7	
7,0		8,98	
7,5		9,22	
8,0		9,39	
8,5		9,54	
9,0		9,59	
9,5		9,67	
10,0		9,72	

Tab. 6.27 IBI zemina v kombinaci s amorfnním FV panelem -naměřené síly při penetraci trnu



Obr. 6.17 Grafické znázornění závislosti síly na penetraci trnu kombinace zeminy s amorfnním FV panelem



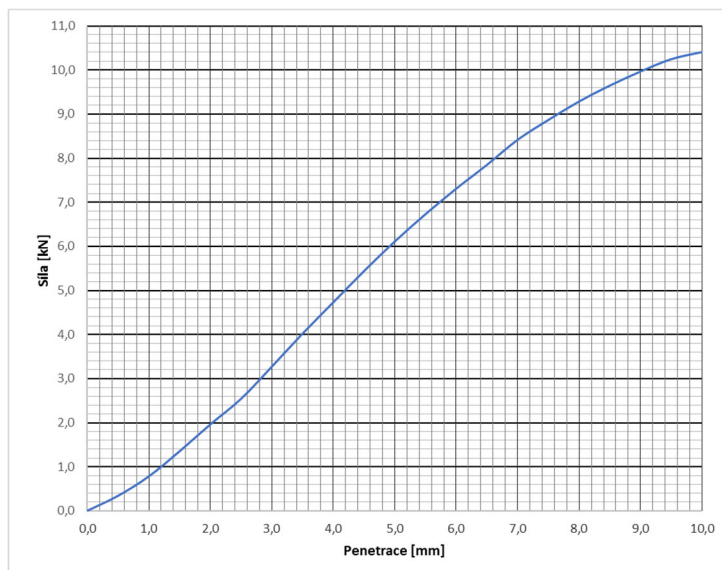
### 6.5.11 CBR-zemina s drceným amorfnním FV panelem

CBR-Zemina:Amorfnní [50:50]			
Penetrace [mm]	Standartní síla [kN]	Síla [kN]	CBR [%]
0,0		0,00	
0,5		0,34	
1,0		0,78	
1,5		1,35	
2,0		1,96	
2,5	13,2	2,54	19
3,0		3,27	
3,5		4,02	
4,0		4,73	
4,5		5,44	
5,0	20,0	6,11	30
5,5		6,73	
6,0		7,31	
6,5		7,85	
7,0		8,42	
7,5		8,87	
8,0		9,29	
8,5		9,65	
9,0		9,97	
9,5		10,25	
10,0		10,41	

Tab. 6.29 IBI zemina v kombinaci s amorfnním FV panelem -naměřené síly při penetraci trnu

Lineární bobtnání	
$h_0=$	0,01
$h_1=$	0,02
$\alpha=$	1,00

Tab. 6.28 Výpočet součinitele lineární bobtnavosti pro kombinaci zemina s amorfnním FV panelem



Obr. 6.18 Grafické znázornění závislosti síly na penetraci trnu kombinace zeminy s amorfnním FV panelem



### 6.5.12 Závěr-zemina s drceným amorfním FV panelem

Zemina v kombinaci s drceným amorfním FV panelem nemá tak plynulou křivku zrnitosti, a to se projevilo na číslech nestejnozrnnosti  $C_u=10,66$  a křivosti  $C_c=1,01$  ty nám říkají, že vzniklá směs je středně nestejnozrnná.

Z Proctorovy křivky určíme  $w_{opt}= 9,5 \%$  a  $p_{d,max PS} = 1918 \text{ kg.m}^{-3} > 1600 \text{ kg.m}^{-3}$ , směs splňuje podmínku normy a je vhodná k užití do aktivní zóny.

S hodnotou IBI 35 % by se po této čerstvě zhutněné zemině dalo pojíždět běžnou stavební technikou i by mohla být použita do podloží násypu, u obou je požadavek  $IBI_{min} 5 \%$ .

U křivek CBR i IBI je opět náznak konvexního průběhu, ale hodnoty jsou dost vysoké. Hodnota CBR 30 % je podstatně vyšší než minimální hodnota požadovaná normou. Pro návrh vozovky dle TP70 by se uvažovalo o podloží PI, kde je požadavek na CBR víc jak 10 %. Součinitel lineárního bobtnání  $\alpha=1$ .

Směs vniklá kombinací zeminy a amorfního FV panelu má podle údajů z čísel křivosti a nestejnozrnnosti horší parametry zrnění než samotná zemina a směs s drceným polykrystalickým FV panelem, ale naměřená hodnota CBR 30 % je solidní podklad pro konstrukci vozovky.

Drcený Amorfní FV panel jemnějším zrněním ještě lépe přispěl ke zpracovatelnosti směsi, ale při manipulaci má větší prašnost než kombinace zeminy s drceným polykrystalickým FV panelem.





### 6.5.13 Kombinace zeminy s Refaglass 8/16



Obr. 6.19 Zemina smíchaná s Refaglass 8/16



Obr. 6.20 Zemina smíchaná s Refaglass 8/16 s  
pravítkem

Z obrázků je patrné, že u Refaglassu je problém s dávkováním, z důvodu nízké hmotnosti pěnového skla by bylo vhodné jeho množství určovat dle objemu. Zatímco u předchozích vzorků poměr 50:50 byl okem patrný, v tomto případě se může zdát, že Refaglass ve směsi dominuje, na objem ano.

U této směsi byl, jako u ostatních směsi proveden teoretický návrh křivky zrnitosti, ale při seznámení s materiálem byla odhalena jeho „křehkost“ a byl schválně proveden síťový rozbor po zkoušce Proctor standart, jak moc si bude podobná teoretická a skutečná křivka po zhutnění.





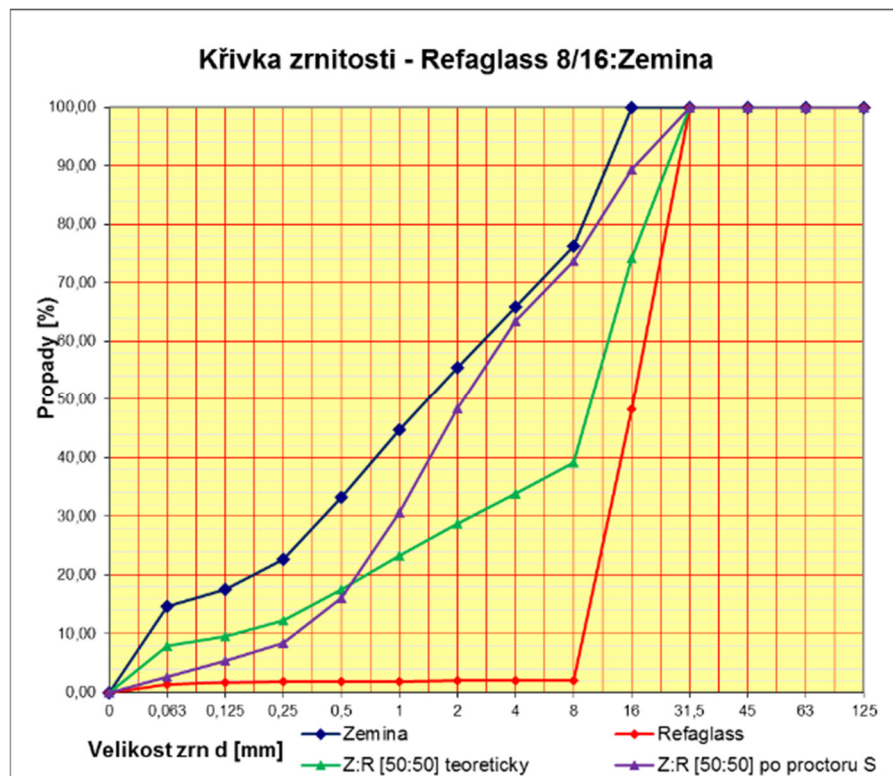
### 6.5.14 Sítový rozbor-zemina x Refaglass 8/16

Sítový rozbor-Refaglass 8/16:Zemina [50:50]				
Souhrnné procento propadu [%]				
Velikost oka síta [mm]	Zemina	Refaglass	Z:R [50:50] teoreticky	Z:R [50:50] po proctoru S
125	100,0	100,0	100,0	100,0
63	100,0	100,0	100,0	100,0
45	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
16	100,0	48,3	74,2	89,4
8	76,3	2,0	39,2	73,8
4	65,8	2,0	33,9	63,4
2	55,4	2,0	28,7	48,5
1	44,8	1,9	23,4	30,7
0,5	33,2	1,9	17,6	16,2
0,25	22,6	1,9	12,3	8,4
0,125	17,5	1,7	9,6	5,3
0,063	14,6	1,4	8,0	2,6
0	0,0	0,0	0,0	0,0

Teoreticky		Po Proctoru S	
Zemina:Refaglas [50:50]		Zemina:Refaglas [50:50]	
d <sub>10</sub>	0,15	d <sub>10</sub>	0,30
d <sub>30</sub>	2,50	d <sub>30</sub>	0,97
d <sub>60</sub>	12,80	d <sub>60</sub>	3,56
C <sub>u</sub> =	<b>87,07</b>	C <sub>u</sub> =	<b>11,86</b>
C <sub>c</sub> =	<b>3,32</b>	C <sub>c</sub> =	<b>0,88</b>

Tab. 6.30 Výpočet čísel křivosti a nestejzozrnnosti

Tab. 6.31 Sítový rozbor kombinace zeminy a Refaglass 8/16



Obr. 6.21 Křivka zrnitosti zeminy v kombinaci s Refaglass 8/16



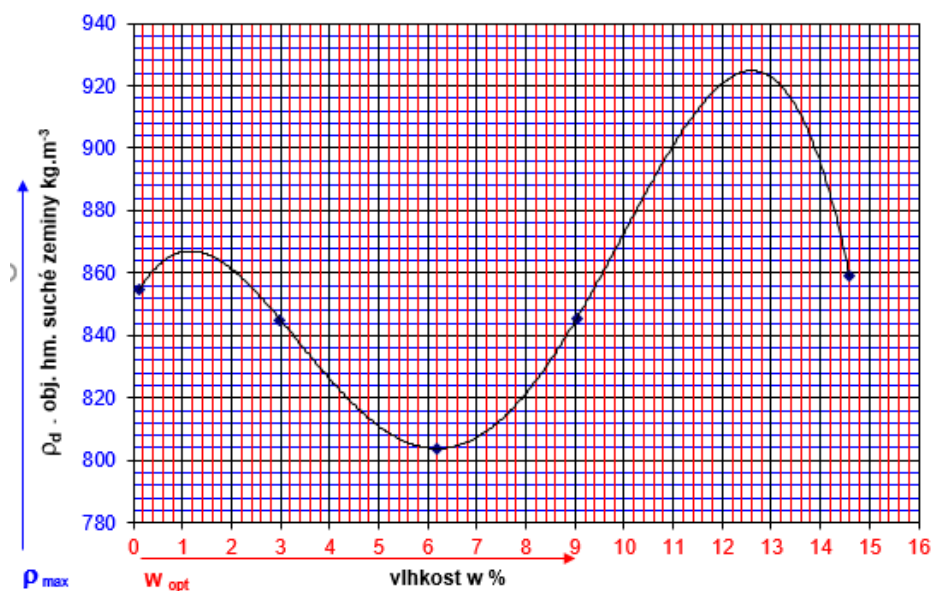
### 6.5.15 Optimální vlhkost-zemina x Refaglass 8/16

Určení vlhkosti-refaglass 0/18				
váženka [g]	váženka + mokrá zemina [g]	váženka + vysušená zemina [g]	Vlhkost [%]	Předpoklad vlhkosti [%]
1226,8	3040,4	3038,1	0,13	3
217,5	1336,7	1304,2	2,99	5
199,7	1315,1	1250,2	6,18	7
199,7	1378,5	1280,9	9,03	10
209,6	1565,6	1392,9	14,59	13

Tab. 6.32 Výpočet vlhkosti kombinaci zeminy a Refaglass 8/16 po PS

Optimální vlhkost-zemina x refaglass				
Směs zeminy a vody [g]	Vysušený vzorek [g]	w [%]	$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_d$ [kg.m <sup>-3</sup> ]
1814,9	1812,6	0,1	855,9	854,8
1845,7	1792,1	3,0	870,4	845,1
1809,8	1704,5	6,2	853,4	803,8
1954,3	1792,49	9,0	921,6	845,3
2088,3	1822,33	14,6	984,8	859,4

Tab. 6.33 Výpočet maximální suché objemové hmotnosti kombinace zeminy s Refaglass 8/16



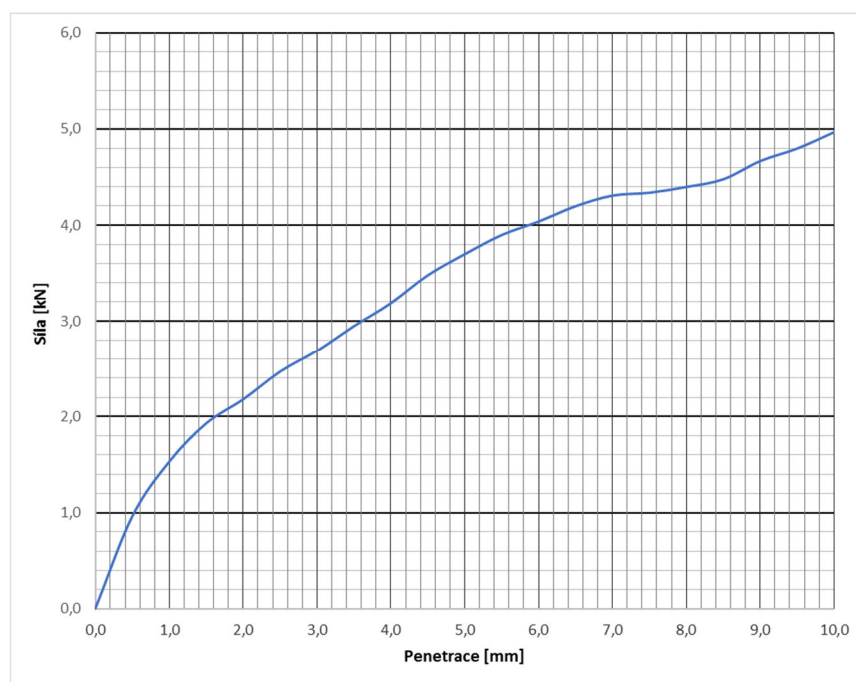
Obr. 6.22 Proctora křivka závislosti maximální suché objemové hmotnosti pro kombinaci zeminy a Refaglass 8/16



### 6.5.16 IBI-kombinace zeminy a Refaglass 8/16

IBI-Zemina:Refaglass [50:50]			
Penetrace [mm]	Standartní síla [kN]	Síla [kN]	IBI [%]
0,0		0	
0,5		0,96	
1,0		1,53	
1,5		1,93	
2,0		2,18	
2,5	13,2	2,47	19
3,0		2,69	
3,5		2,95	
4,0		3,19	
4,5		3,48	
5,0	20,0	3,7	19
5,5		3,9	
6,0		4,04	
6,5		4,2	
7,0		4,31	
7,5		4,34	
8,0		4,4	
8,5		4,48	
9,0		4,67	
9,5		4,8	
10,0		4,97	

Tab. 6.34 IBI zemina v kombinaci s Refaglass 8/16 -naměřené síly při penetraci trnu



Obr. 6.23 Grafické znázornění závislosti síly na penetraci trnu kombinace zeminy s Refaglass 8/16



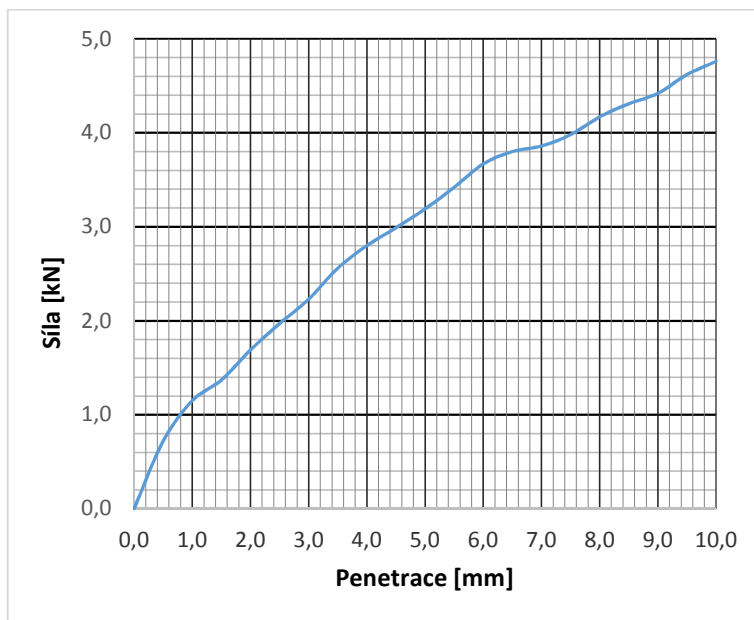
### 6.5.17 CBR-zemina - Refaglass 8/16

CBR-Zemina:Refaglass[50:50]			
Penetrace [mm]	Standartní síla [kN]	Síla [kN]	CBR [%]
0,0		0,00	
0,5		0,72	
1,0		1,15	
1,5		1,37	
2,0		1,69	
2,5	13,2	1,97	15
3,0		2,23	
3,5		2,56	
4,0		2,80	
4,5		2,99	
5,0	20,0	3,19	16
5,5		3,42	
6,0		3,67	
6,5		3,80	
7,0		3,86	
7,5		3,98	
8,0		4,17	
8,5		4,31	
9,0		4,42	
9,5		4,62	
10,0		4,76	

Lineární bobtnání	
$h_0 =$	0,01
$h_1 =$	-0,04
$\alpha =$	-3,00

Tab. 6.35 Výpočet součinitele lineárního bobtnání

Tab. 6.36 IBI zemina v kombinaci s Refaglass 8/16 -naměřené síly při penetraci trnu



Tab. 6.37 Grafické znázornění závislosti síly na penetraci trnu kombinace zeminy s Refaglass 8/16



### 6.5.18 Souhrn laboratorních zkoušek-zemina x Refaglass 8/16

Zemina v kombinaci s Refaglass 8/16 má křivku zrnitosti po zkoušce Proctor standart plynulejší než při teoretickém návrhu, ale ani v jednom případě nespádají čísla nestejnozrnnosti  $C_{u,teoreticky}=87,07$  a křivosti  $C_{c,teoreticky}=3,32$ ,  $C_{u,PS}=11,86$  a křivosti  $C_{c,PS}=0,88$  do ideálních mezí, respektive se potvrzuje to, že na základě určených teoretických čísel se bude směs obtížně hutnit.



Obr. 6.24 Refaglass-ukázka nemožnosti ideálního seříznutí formy

Z Proctorovy křivky toho moc neurčíme, bylo obtížné formu správně zarovnat viz obr. 6.26, ale jelikož není moc velký rozptyl, můžeme udělat průměr  $\rho_{pd}=841,7 \text{ kg.m}^{-3} > 1600 \text{ kg.m}^{-3}$ , směs tuto podmínku splňovat nemusí. Vlhkost  $w_{opt}=11,9 \%$  byla určena na základě zkušeností z předchozích laboratorních zkoušek.

S hodnotou IBI 19 % by se po této čerstvě zhutněné směsi dalo pojíždět běžnou stavební technikou i by mohla být použita do podloží násypu, u obou je požadavek  $IBI_{min} 5 \%$ .

U křivek CBR i IBI není tak hladký průběh, jako u ostatních vzorků, je to způsobeno drcením zrn Refaglassu. Hodnota CBR 16 % splňuje minimální hodnotu požadovanou normou.

Součinitel lineárního bobtnání  $\alpha=-3$  je překvapivý, ale je to způsobeno zráním vzorku ve vodě, v důsledku toho, že pěnové sklo plave, nejspíš došlo k uvolnění několika zrn a následnému poklesu.



## 6.6 Laboratorní zkoušky-zemina x Refaglass 0/1,6 [75:25]

Materiál na tyto zkoušky byl získán pomocí zkoušky Los Angeles. Když nám z této zkoušky zbyl propad pod sítím 1,6 mm, tak proč ho také nezkoušet jako možnou úpravu zemin, výrobce distribuuje Refaglass 0/4.



Obr. 6.25 Zemina smíchaná s Refaglass 0/1,6 ve váženec



Obr. 6.26 Zemina smíchaná s Refaglass 0/1,6 s měřidlem

Z obrázku 6.27 a 6.28 je patrná převládající šedivá barva vzorku Refaglass 0/1,6.





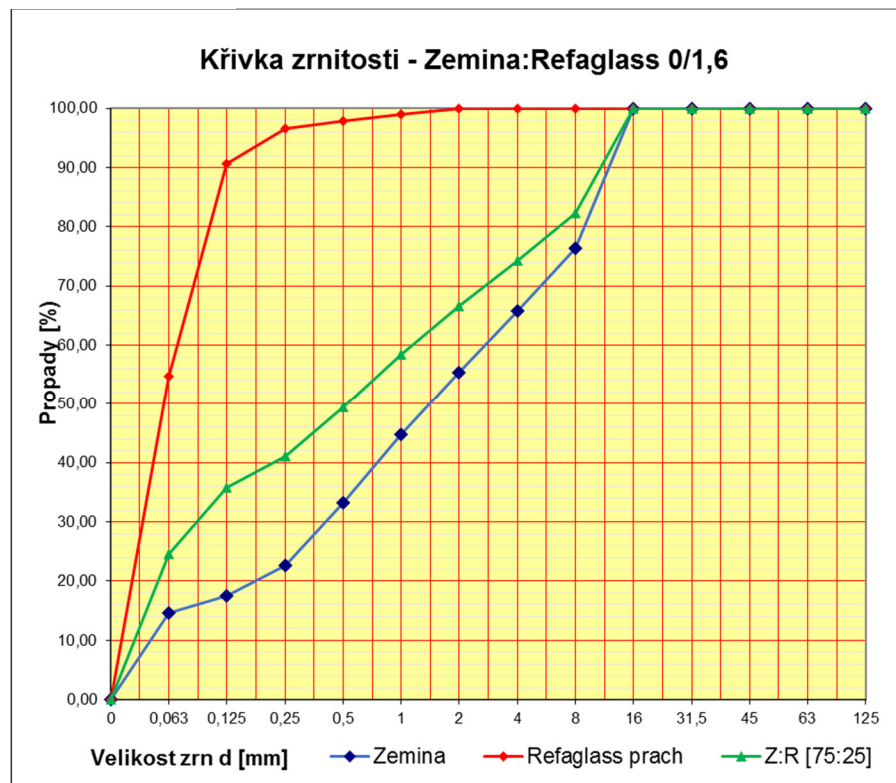
### 6.6.1 Sítový rozbor-zemina x Refaglass 0/1,6

Sítový rozbor-Zemina:Refaglass 0/1,6			
Velikost oka síta [mm]	Souhrnné procento propadu [%]		
	Zemina	Refaglass prach	Z:R [75:25]
125	100,0	100,0	100,0
63	100,0	100,0	100,0
45	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0
16	100,0	100,0	100,0
8	76,3	100,0	82,2
4	65,8	100,0	74,4
2	55,4	100,0	66,6
1	44,8	98,9	58,3
0,5	33,2	97,8	49,4
0,25	22,6	96,5	41,1
0,125	17,5	90,7	35,8
0,063	14,6	54,7	24,6
0	0,0	0,0	0,0

Zemina:Refaglass 0/1,6	
d <sub>10</sub>	0,03
d <sub>30</sub>	0,06
d <sub>60</sub>	1,18
C <sub>u</sub> =	<b>45,91</b>

Tab. 6.38 Výpočet čísel křivosti a nestejzornosti

Tab. 6.39 Sítový rozbor zeminy v kombinaci s Refaglass 0/1,6



Tab. 6.40 Křivka zrnitosti zeminy v kombinaci s Refaglass 8/16



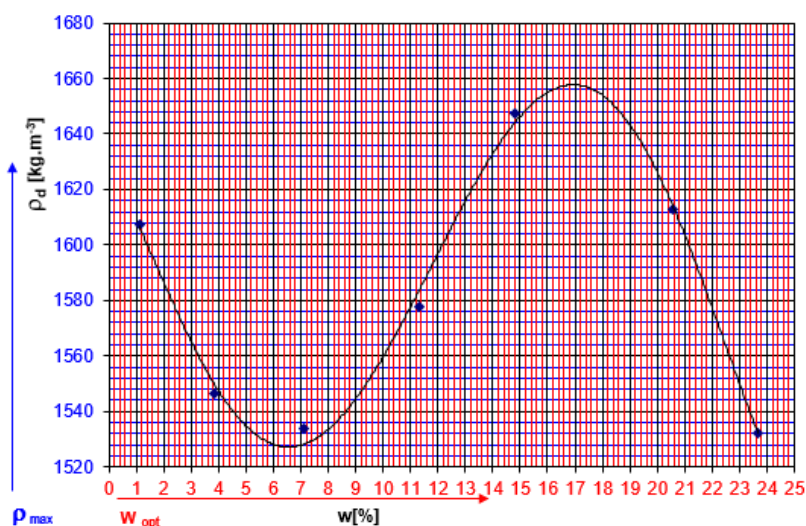
### 6.6.2 Optimální vlhkost-zemina x Refaglass 0/1,6

Určení vlhkosti - zemina x refaglass 0/1,6			
váženka	váž+mokrý zeminy	váž+vysušená zemina	Vlhkost
74,1	566,3	560,9	1,11
68,5	741,7	716,6	3,87
81,3	682,3	642,4	7,11
76,3	667,9	607,8	11,31
75,1	734	649,1	14,79
76,3	1059,8	891,9	20,59
68,5	1515,1	1238	23,69

Tab. 6.41 Výpočet vlhkosti vzorku po zkoušce PS

Optimální vlhkost-zemina x Refaglass 0/1,6				
Směs kameniva a vody (g)	Vysušený vzorek (g)	w (%)	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$\rho_d$ (kg.m <sup>-3</sup> )
1531,8	1514,99	1,1	1625,3	1607,5
1513,8	1457,36	3,9	1606,2	1546,3
1548,2	1445,42	7,1	1642,7	1533,6
1654,9	1486,78	11,3	1755,9	1577,5
1782,5	1552,82	14,8	1891,3	1647,6
1832,7	1519,83	20,6	1944,6	1612,6
1786,3	1444,13	23,7	1895,3	1532,3

Tab. 6.42 Výpočet maximální suché objemové hmotnosti kombinace zeminy s Refaglass 0/1,6



Tab. 6.43 Proctora křivka-závislost maximální suché objemové hmotnosti na vlhkosti pro kombinaci zeminy s Refaglass 0/1,6

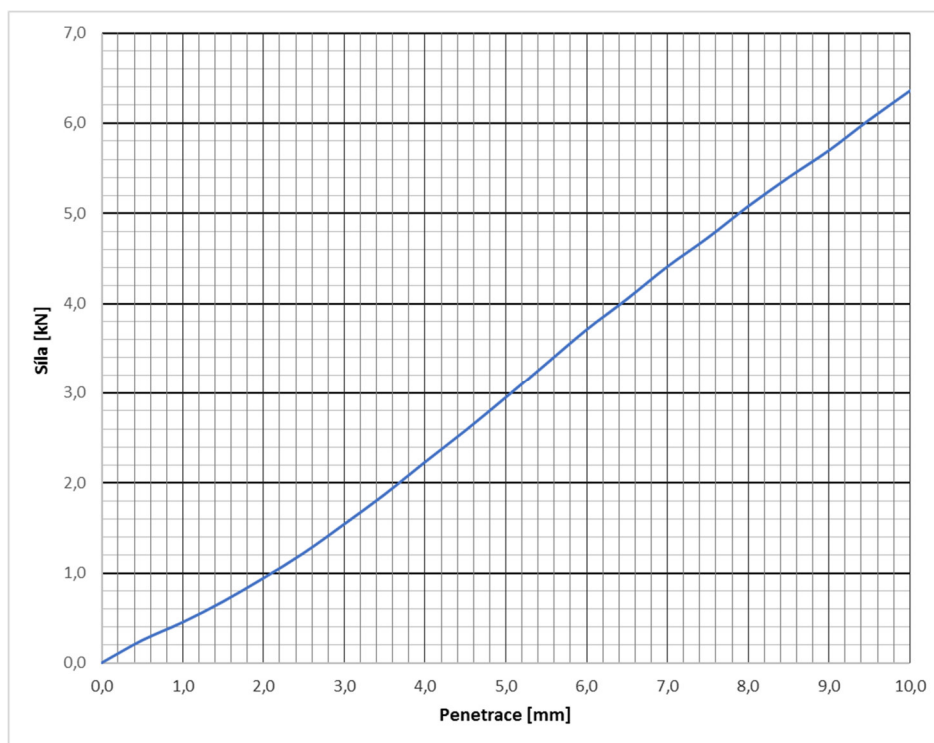




### 6.6.3 IBI-zemina x Refaglass 0/1,6 [75:25]

IBI-Zemina:Refaglass 0/1,6 [75:25]			
Penetrace [mm]	Standartní síla [kN]	Síla [kN]	IBI [%]
0,0		0	
0,5		0,25	
1,0		0,45	
1,5		0,68	
2,0		0,94	
2,5	13,2	1,22	9
3,0		1,54	
3,5		1,87	
4,0		2,23	
4,5		2,58	
5,0	20,0	2,95	15
5,5		3,33	
6,0		3,71	
6,5		4,05	
7,0		4,41	
7,5		4,73	
8,0		5,08	
8,5		5,4	
9,0		5,7	
9,5		6,04	
10,0		6,36	

Tab. 6.44 IBI zemina v kombinaci s Refaglass 0/1,6 -naměřené síly při penetraci trnu



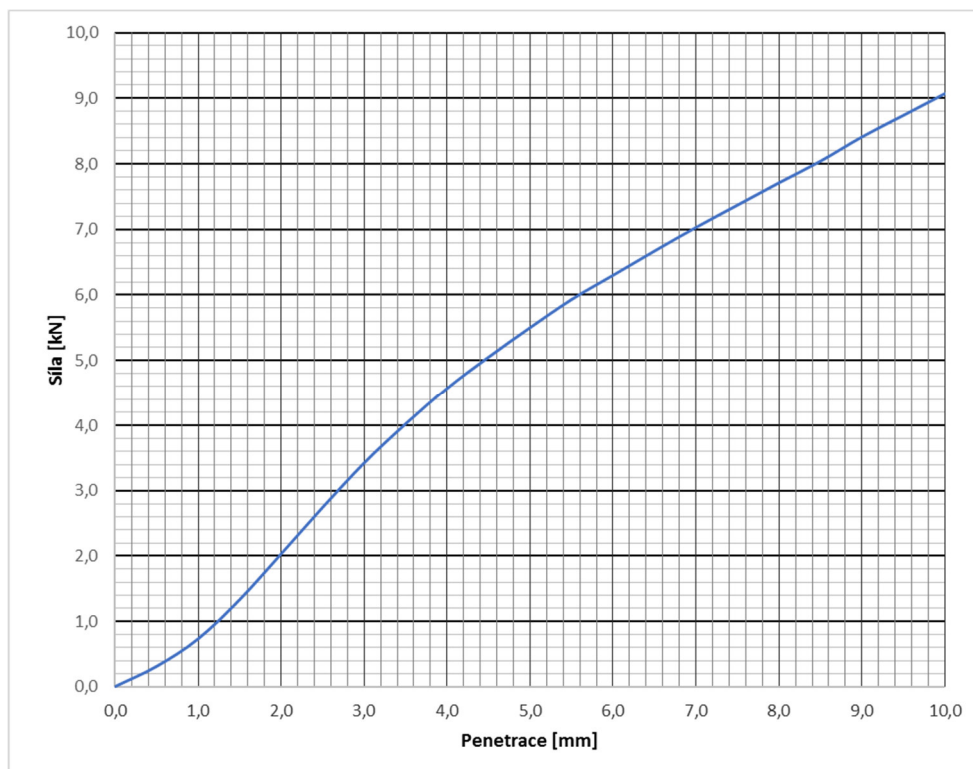
Obr. 6.27 Grafické znázornění závislosti síly na penetraci trnu kombinace zeminy s Refaglass 0/1,6



### 6.6.4 CBR-zeminy x Refaglass 0/1,6 [75:25]

CBR-Zemina:Refaglass [75:25]			
Penetrace [mm]	Standartní síla [kN]	Síla [kN]	CBR [%]
0,0		0,00	
0,5		0,31	
1,0		0,73	
1,5		1,33	
2,0		2,03	
2,5	13,2	2,74	21
3,0		3,42	
3,5		4,02	
4,0		4,57	
4,5		5,05	
5,0	20,0	5,50	28
5,5		5,93	
6,0		6,30	
6,5		6,67	
7,0		7,03	
7,5		7,37	
8,0		7,71	
8,5		8,04	
9,0		8,41	
9,5		8,74	
10,0		9,07	

Tab. 6.45 CBR zemina v kombinaci s Refaglass 0/1,6 -naměřené síly při penetraci trnu



Obr. 6.28 Grafické znázornění závislosti síly na penetraci trnu kombinace zeminy s Refaglass 0/1,6



### 6.6.5 Souhrn laboratorních zkoušek-zemina x Refaglass 0/1,6

U zeminy v kombinaci s Refaglass 0/1,6 je na křivce zrnitosti vidět prudký nárůst, to je způsobeno větším obsahem jemných zrn. Z křivky jsme určili čísla nestejnozrnosti  $C_u=45,91$  a křivosti  $C_c=0,16$ . Směs je tedy nestejnozrná.

Z Proctorovy křivky určíme  $w_{opt}= 17 \%$  a  $p_{d,max PS} = 1657 \text{ kg.m}^{-3} > 1600 \text{ kg.m}^{-3}$ , směs splňuje podmínku normy a je vhodná k užití do aktivní zóny. Ale otázkou je, zda by se i tento prach považoval za vylehčující příměs.

S hodnotou **IBI 15 %** by se po této čerstvě zhutněné zemině dalo pojíždět běžnou stavební technikou i by mohla být použita do podloží násypu, u obou je požadavek  $IBI_{min} 5 \%$ .

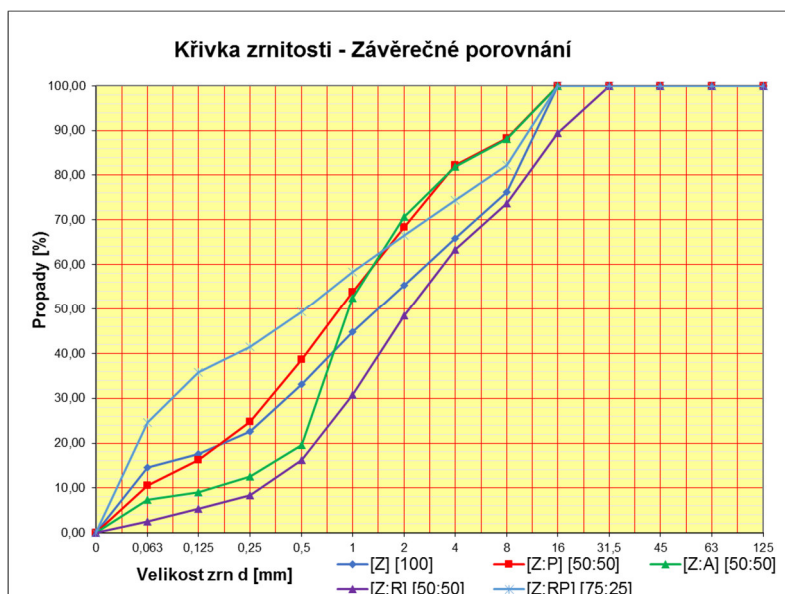
U křivek CBR i IBI lze opět spatřit konvexní průběh. Hodnota **CBR 28 %** je však podstatně vyšší než minimální hodnota požadovaná normou. Pro návrh vozovky dle TP70 by se uvažovalo o podloží PI, kde je požadavek na CBR víc jak 10 %. Bohužel u této směsi nebylo měřeno lineární bobtnání z důvodu vrácení zapůjčeného úchylkoměru od katedry železnic.

Směs vniklá kombinací zeminy a Refaglassu 0/1,6 má hodnotu **CBR 28 %**, na rozdíl od ostatních zkoumaných směsí je zde poměr zeminy ku Refaglass 0/1,6 75:25, přitom hodnota CBR je téměř srovnatelná se směsí, kde byly užity drcené fotovoltaické panely v poměru 50:50, ale zároveň došlo ke zvýšení  $w_{opt}$  o cca 5%. Z tohoto důvodu by bylo vhodné pro úpravu zemin použít kombinaci Refaglass 0/1,6 a drcených fotovoltaických panelů za účelem dosažení vysoké hodnoty CBR a nižší hodnotě  $w_{opt}$ .



## 6.7 Vyhodnocení směsí zeminy s odpadním sklem

### 6.7.1 Porovnání křivek zrnitosti



Obr. 6.29 Křivky zrnitostí zkoušených směsí a zeminy

Z křivek zrnitosti je patrné, že k největšímu ovlivnění docházelo na intervalu 0 až 0,5 mm. Výrazně vyčnívají směsi s Refaglass 0/18 a 0/1,6 to je dáno jejich zrnitostí, která byla výrazně odlišná od vzorků z drcených fotovoltaických panelů.

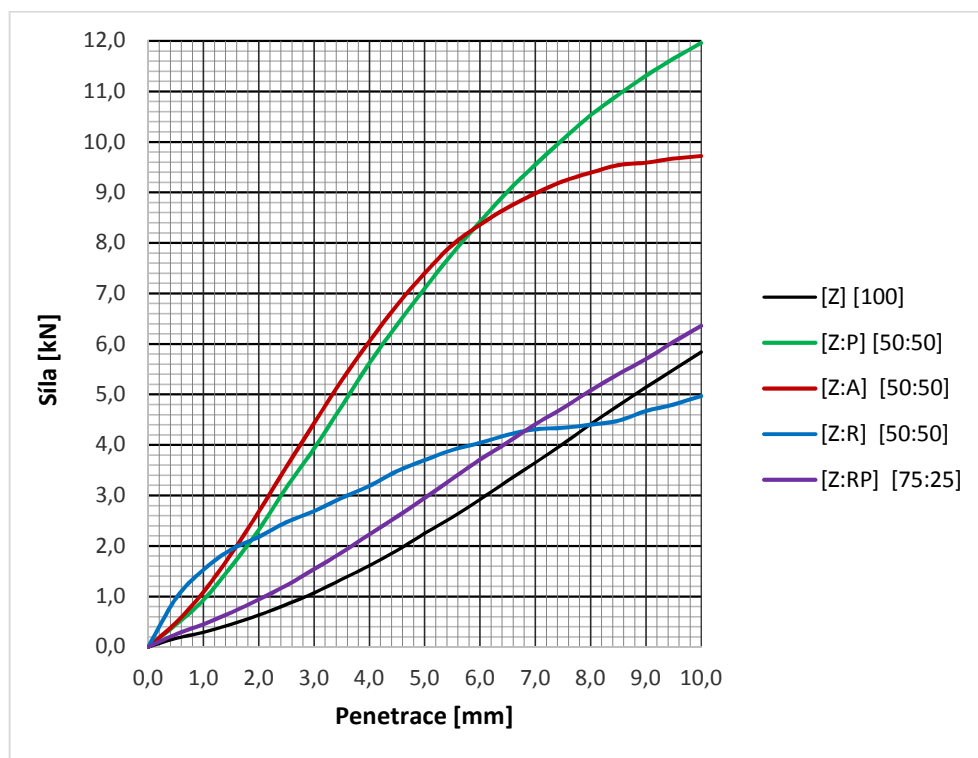
Bylo by obtížné posuzovat namrzavost vzniklých směsí dle Scheibleho kritéria namrzavosti, ale je předpoklad, že bude lepší než u samotné zeminy vlivem nenasákavosti skla, bylo by vhodné ověřit přímou laboratorní zkouškou.



### 6.7.2 Porovnání hodnot IBI

IBI	[Z] [100]	[Z:P] [50:50]	[Z:A] [50:50]	[Z:R] [50:50]	[Z:RP] [75:25]
2,5	8	24	27	19	9
5	17	35	35	19	15

Tab. 6.46 Hodnoty IBI zeminy a zkoumaných směsí



Obr. 6.30 Průběh zkoušky IBI porovnání

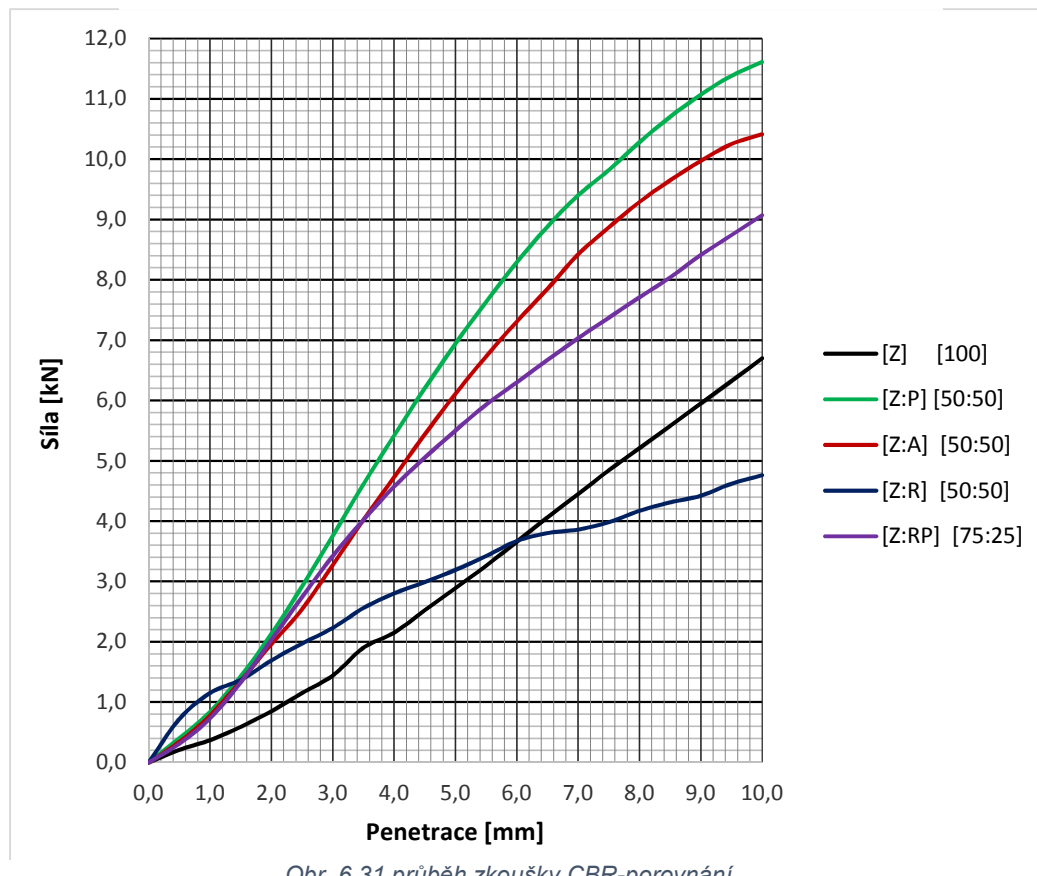
Z průběhu závislosti síly na penetraci je evidentní vliv drcených fotovoltaických panelů. Je to ovlivněno i nižší optimální vlhkostí při hutnění. Vychází to ze samotného názvu zkoušky - okamžitý index únosnosti. Hodnoty IBI a CBR není možné mezi sebou převádět, ideálním ukázkovým případem je směs zeminy a Refaglass 0/1,6 v porovnání se samotnou zemínou, kdy má zemina po opravě zkresleného měření hodnotu IBI 17 % a směs má hodnotu 15 %, ale na následujícím porovnání uvidíme podstatný rozdíl v hodnotách CBR.



### 6.7.3 Porovnání hodnot CBR

CBR	[Z] [100]	[Z:P] [50:50]	[Z:A] [50:50]	[Z:R] [50:50]	[Z:RP] [75:25]
2,5	9	22	19	15	21
5	15	35	30	16	28

Tab. 6.47 Hodnoty CBR zeminy a zkoumaných směsí



Obr. 6.31 průběh zkoušky CBR-porovnání

Zde vidíme, že CBR zeminy je po opravě 15 % a směs zeminy a Refaglass 0/1,6 má hodnotu 28 %, tedy skoro dvojnásobnou. Opět je možné spatřit dominanci směsí z drčených fotovoltaických panelů, ke kterým se blíží již zmíněná směs zeminy a Refaglass 0/1,6. Hodnota CBR směsi zeminy a Refaglass 8/16 je 16 %, to je téměř srovnatelné s hodnotou samotné zeminy. Jak bylo řečeno, pro nás je rozhodující hodnota CBR, jelikož zkouška CBR je průkazná zkouška pro únosnost podloží.



#### 6.7.4 Závěr úpravy zemin pomocí odpadu skla

	CBR [%]	$\rho_{d,max}$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	w [%]	IBI [%]	$C_u$	$C_c$	$\alpha$
[Z:P] [50:50]	35	1945	8,5	35	14,33	2,31	1
[Z:A] [50:50]	30	1918	9,5	35	10,66	1,01	1
[Z:RP] [75:25]	28	1657	17	15	45,91	0,13	-
[Z:R] [50:50]	16	841,7	11,9	19	11,86	0,88	-3
[Z] [100]	15	2004	11,8	17	69,31	1,49	2,5

Tab. 6.48 Přehled naměřených hodnot

Získané hodnoty jsou srovnány do přehledné tabulky seřazené podle nastavených kritérií pro posuzování vlivu odpadu skla na úpravu zemin. Z té vyplývá, že nejlepšími hodnotami dosáhla směs zeminy a drceného polykrystalického fotovoltaického panelu.

#### Drcené fotovoltaické panely:

Směsi z fotovoltaických panelů mají výrazně vyšší hodnotu CBR okolo 30 % než samotná zemina 15 %. Překvapivě snížily hodnoty maximální suché objemové hmotnosti. Konkrétně směs s drceným polykrystalickým FV panelem má  $\rho_{d,max}=1945 \text{ kg.m}^3$  u směsi s drceným amorfním FV panelem je tato hodnota  $\rho_{d,max}=1918 \text{ kg.m}^3$  zatímco samotná zemina má  $\rho_{d,max}=2004 \text{ kg.m}$ . Drcené fotovoltaické panely měly pozitivní vliv na zpracovatelnost směsi a i na snížení optimální vlhkosti při hutnění. Samotná zemina měla 15 % a u směsí z drcených fotovoltaických panelů je tato hodnota v průměru 9 %. Je pravděpodobné, že při použití Proctor modifikovaný by se dosáhlo vyšších hodnot CBR při ještě nižší optimální vlhkosti. Směsi z drcených FV panelů snížily součinitel lineárního bobtnání, opět vliv nenasákavosti skla.

Z výše uvedeného a vlastností skla (trvanlivost, chemická odolnost apod.) je zřejmé, že drcené fotovoltaické panely jsou nanejvýš vhodné pro úpravu zemin, směsi vždy s přehledem přesáhly minimální hodnoty stanovené dle ČSN 73 6133. Je tu i případná možnost - sklo ze zemin vyseparovat a znovu použít.



### **Pěnové sklo:**

V tomto případě už nelze výsledky brát komplexně a zaměříme se na jednotlivé směsi.

Směs zeminy a Refaglass 8/16 má CBR 16 %, a to je víc, než měla samotná zemina, ale o pouhé 1 %. Došlo u ní k předpokládanému poklesu  $\rho_{d,max}=841,7\text{kg.m}^3$  (samotná zemina  $\rho_{d,max}= 2004 \text{ kg.m}^3$ ) U této směsi nebylo možné určit optimální vlhkost, byla stanovena odhadem. Součinitel lineárního bobtnání  $\alpha= -3$ , jak bylo popsáno, byl nejspíš způsoben uvolněním zrn při zrání vzorků ve vodě.

Kritéria dle ČSN 73 6133 jsou splněna, ale vzhledem k naměřeným hodnotám má pěnové sklo efektivnější použití. Vezmeme-li v úvahu, že je nutné ho nejprve vyrobit, jeho cenu a výborné tepelně izolační vlastnosti, bylo by použití tohoto materiálu pro úpravu zemin škoda.

Směs zeminy a Refaglass 0/1,6 dosáhla hodnoty CBR 28 % oproti samotné zemině 15 %, tady je vhodné zdůraznit poměr 75:25, ale ke zhutnění bylo potřeba větší množství vody v důsledku optimální vlhkosti 17 %, to je způsobeno větším obsahem jemnozrnných částic v této směsi. Když ji porovnáme s hodnotou, které měly směsi z fotovoltaických panelů, je tato hodnota téměř dvojnásobná. Je zde patrný pokles  $\rho_{d,max} =1657 \text{ kg.m}^3$  oproti zemin  $\rho_{d,max} =2004 \text{ kg.m}^3$ .

Kritéria dle ČSN 73 6133 tato směs s přehledem splnila, ačkoliv tento materiál nevznikl úmyslně, stejně jako prach z pěnového skla při jeho výrobě. Dalo by se tu uvažovat o jeho využití v kombinaci například s drceným sklem z fotovoltaických panelů. Když se podíváme na CBR samotné zeminy 15 % a směs zeminy s Refaglass 0/1,6 v poměru 75:25 tato hodnota vzrostla na 28 %.





## **7 Závěr**

Závěrem je možno konstatovat, že odpad skla by v silničním inženýrství našel své uplatnění a je možná až s podivem, že tomu tak ještě není. Ano, pěnové sklo je poměrně nový materiál, který je nyní zejména ve stavebnictví propagován s ohledem na jeho tepelně izolační vlastnosti. Na základě poznatků z této diplomové práce, je pěnové sklo materiálem, který má mnoho překvapivých vlastností a tím jistě širokou škálu možného využití i v silničním inženýrství.

### **1. Využití odpadu skla v asfaltových směsích**

Pěnové sklo se osvědčilo jako možná náhrada tradičního vápencového fileru používaného do asfaltových směsí, kdy dokonce dosahovalo lepších výsledků než referenční směs. V jediném, celkem podstatném kritériu ITSR- odolnosti vůči účinkům vody, bylo horší. Ale splnilo požadavky dle ČSN EN 13108, pokud tedy další měření neprokáží negativní dopad pěnového skla na požadavky asfaltové směsi, jedná se o vhodnou náhradu tradičního vápencového fileru, nebo alespoň o materiál, který by se s ním mohl případně kombinovat.

Oproti tomu směsi, ve kterých byly použity drcené fotovoltaické panely, tímto kritériem neprošly a ani u nich nebyla zaznamenána vlastnost, která by byla touto náhradou pozitivně ovlivněna. V důsledku toho se o nich, jako o možné náhradě tradičního plniva nebo materiálu vhodného pro kombinaci do asfaltové směsi, nedá uvažovat (viz kapitola 5.1.9 Závěr využití odpadu skla jako náhrada tradičního plniva).

Bylo by zajímavé podrobit laboratorním zkouškám asfaltovou směs, ve které by bylo použito za náhradu tradičního fileru jemněji rozdrcených fotovoltaických panelů, tedy na skelnou moučku používanou při výrobě pěnového skla, a po následném porovnání výsledků měření udělat definitivní závěr.



## 2. Využití odpadu skla při úpravě zemin

Pěnové sklo se ve frakci 8/16 neosvědčilo jako vhodný materiál pro úpravu zemin, ale pěnové sklo v podobě frakce 0/1,6 mělo velmi dobré výsledky a je to tedy vhodný materiál na úpravu zemin, případně pro kombinaci s jiným materiálem. Na trhu je dostupný Refaglass 0/4, u kterého lze předpokládat jeho podobné využití.

Drcené fotovoltaické panely použité při úpravě zeminy měly na rozdíl od použití v asfaltové směsi velmi pozitivní vliv na zpracovatelnost a zhutnitelnost.

Tento způsob jejich dalšího zpracování se jeví efektivním a použitelným po skončení jejich životnosti. Dle tab. 3.1 nás v roce 2030 čeká první vyřazování přibližně 400 tun fotovoltaických panelů a s přibývajícím lety se toto číslo bude zvyšovat. Proto by bylo vhodné mít budoucí vizi, jak tento „odpad“ smysluplně využít. Je možné, že v případě nalezení cesty k recyklování fotovoltaických panelů přijde silniční inženýrství o vhodný materiál pro úpravu zemin (viz kapitola 6.7.4 -Závěr využití odpadu skla pro úpravu zemin).

Alternativní využití drcených fotovoltaických panelů by mohlo být v ložní vrstvě pod dlažební prvky, kde se užívá drobné drcené nebo těžené kamenivo frakce 0/2, 0/4, případně 0/8 a 4/8 v tloušťce 30-50 mm. Vzhledem k tomu, že byly oba vzorky drcených fotovoltaických panelů dodány ve frakci 0/4, lze je takto využít bez dalších úprav. [39]

Závěrem lze říci, že zkušenosti a výsledky získané při zpracování této diplomové práce částečně přibližují chování zeminy a asfaltové směsi. Tyto poznatky je možno použít při dalším zkoumání odpadu vhodného pro silniční stavitelství. Odpadní materiály by při využití v konstrukci vozovky mohly mít vliv na odolnost vůči nepříznivým klimatickým vlivům a únosnost jednotlivých konstrukčních vrstev, obdobně jako možné využití fileru z pěnového skla v asfaltové směsi nebo použití drcených fotovoltaických panelů pro úpravu zemin.



### Použité zdroje:

- [1] Historické cesty. Historicke cesty. [online]. 10,9 2016 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.historicke-cesty.cz/historicke-cesty/vyvoj-historickych-cest-ve-svete/#01>
- [2] Římské cesty. Wikipedia. [online]. 10.9 2016 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%98%C3%ADmsk%C3%A9\\_cesty](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%98%C3%ADmsk%C3%A9_cesty)
- [3] Makadam. Wikipedia. [online]. 6.12 2016 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Makadam>
- [4] ZAJÍČEK, Jan a kolektiv. Technologie stavby vozovek. Praha: ČKAIT, 2014. ISBN 978-80-87438-59-6.
- [5] MONDSCHNEIN, Petr. Přednáška 1 student.pdf. Silniční laboratoř. [online]. 8.1.2017 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://mondy.webnode.cz/prednasky/>
- [6] Výroba skla. Wikipedia [online]. 2017 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDroba\\_skla](https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDroba_skla)
- [7] JIRÁSEK, Jakub a Martin VAVRO. Nerostné suroviny a jejich využití. Ostrava: VŠB, 2008. ISBN 978-802-4813-783.
- [8] Amorfnní látka. Wikipedia [online]. 2013 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Amorfn%C3%AD\\_l%C3%A1tka](https://cs.wikipedia.org/wiki/Amorfn%C3%AD_l%C3%A1tka)
- [9] Jak se sklo vyrábí? Asociace sklářského a keramického průmyslu ČR [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.askpcr.cz/o-skle/jak-se-sklo-vyrabi/>
- [10] Sklo. Wikipedia [online]. 2017 [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sklo>
- [11] Základní sklo (float). AGC Glass Europe. [online]. © 2012 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.agc-glass.eu/Czech/Homepage/V-robky/Zakladni-sklo-float-/page.aspx/1097>
- [12] Vlastnosti skla. sklovestavebnictvi. [online]. © 2006-2016 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.sklovestavebnictvi.cz/vlastnosti-skla/>
- [13] JAK SE RECYKLUJE SKLO. TRÍDĚNÍ ODPADU.CZ. [online]. © 2007 – 2017 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.trideniodpadu.cz/jak-se-recykluje-sklo>
- [14] Recyklace skla. Wikipedia. [online]. 9. 2. 2016 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Recyklace\\_skla](https://cs.wikipedia.org/wiki/Recyklace_skla)
- [15] Jak se vyrábí pěnové sklo A-GLASS. REC Group. [online]. © 2015 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.recgroup.cz/jak-se-vyrabi-penove-sklo-a-glass/>
- [16] Prohlášení o vlastnostech. REFAGLASS. [online]. © 2016 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: [http://www.refaglass.cz/wp-content/uploads/2016/09/Prohl%C3%A1%C5%A1en%C3%AD-00\\_04-v.01092015.pdf](http://www.refaglass.cz/wp-content/uploads/2016/09/Prohl%C3%A1%C5%A1en%C3%AD-00_04-v.01092015.pdf)



- [17] Analýza skleněných střepů [online]. Katedra analytické chemie [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/user-files/files/uloha5-Analyza%20skla.pdf>
- [18] Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. FCC PUBLIC [online]. 2010 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40646.pdf>
- [19] Přejech P-N. Wikipedia. [online]. 15.12.2016 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99echod\\_P-N](https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99echod_P-N)
- [20] TENKOVSTVÉ PANELY. e-shop TERMS. [online]. © 2013 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://eshop.terms.eu/cz/e-shop/c68831/tenkovstve-panely.html>
- [21] Areny. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Areny>
- [22] JUROS - O firmě [online]. Copyright © [cit. 29.04.2017]. Dostupné z: [http://www.jurosul.cz/uploads/dokumenty/koncentrace\\_skodlivin\\_v\\_susine.pdf](http://www.jurosul.cz/uploads/dokumenty/koncentrace_skodlivin_v_susine.pdf)
- [23] Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti. tzbinfo. [online]. © 2001-2017 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/7868-recyklace-fotovoltaickych-panelu-na-konci-zivotnosti>
- [23] Podpora výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů v České republice. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Podpora\\_v%C3%BDroby\\_elekt%C5%99iny\\_z\\_obnoviteln%C3%BDch\\_zdroj%C5%AF\\_v\\_%C4%8Cesk%C3%A9\\_republice](https://cs.wikipedia.org/wiki/Podpora_v%C3%BDroby_elekt%C5%99iny_z_obnoviteln%C3%BDch_zdroj%C5%AF_v_%C4%8Cesk%C3%A9_republice)
- [24] Největší české elektrárny. Fotovoltaické panely. [online]. © 2012 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.fotovoltaickepanely.eu/fotovoltaika/nejvetsi-ceske-elektrarny/>
- [25] Jak to bylo a je s fotovoltaikou v Česku | Peníze.cz. Peníze.cz - Půjčky, Kurzy měn, Akcie, Hypotéky, Bydlení, Daně [online]. Copyright © 2000 [cit. 21.02.2017]. Dostupné z: <http://www.penize.cz/nakupy/275131-jak-to-bylo-a-je-s-fotovoltaikou-v-cesku>
- [26] City using crushed glass for road-building. The Spokesman-Review. [online]. © 2017 [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: <http://www.spokesman.com/stories/2009/oct/02/city-street-paved-in-crushed-glass/>
- [27] Recycled Glass in Asphalt. Clean Washington Center. [online]. [1996] [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: [http://www.cwc.org/gl\\_bp/gbp4-0201.htm](http://www.cwc.org/gl_bp/gbp4-0201.htm)
- [28] Sklobeton. Wikipedia. [online]. 24. 11. 2015 [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sklobeton>
- [29] VALENTOVÁ, T., J. ALTMAN a J. VALENTIN. Náhrada tradičního jemnozrnného aktivního plniva v asfaltové směsi. Praha.
- [30] TP 94 Úprava zemin. Ministerstvo dopravy České republiky, listopad 2013.



- [31] Mechanika zemin [online]. [cit. 04.04.2017]. Dostupné z:  
[http://people.fsv.cvut.cz/~Pruskjan/Fakulta%20dopravni/Prednaska%2024\\_9.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/~Pruskjan/Fakulta%20dopravni/Prednaska%2024_9.pdf)
- [32] ČSN EN ISO 17892-4 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [33] ČSN EN 13286-2. Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [34] Zkoušení zemin a materiálů v podloží pozemní komunikace – zhutnitelnost a únosnost [online]. Copyright © [cit. 01.05.2017]. Dostupné z:  
[http://lences.cz/skola/subory/-%20-%20PREDMETY%20%20\(semester%201%20-%2010\)%20-%20-6-semester/-%20BM02%20-%20Pozemni%20komunikace%20II/Cviceni/T%C3%A9ma%201%20-%20Zkou%C5%A1en%C3%AD%20zemin%20a%20mater%C3%A1l%C5%AF%20v%20podlo%C5%BE%C3%AD%20PK.pdf](http://lences.cz/skola/subory/-%20-%20PREDMETY%20%20(semester%201%20-%2010)%20-%20-6-semester/-%20BM02%20-%20Pozemni%20komunikace%20II/Cviceni/T%C3%A9ma%201%20-%20Zkou%C5%A1en%C3%AD%20zemin%20a%20mater%C3%A1l%C5%AF%20v%20podlo%C5%BE%C3%AD%20PK.pdf)
- [35] ČSN EN 13286-47. Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [36] MOHYLA, Marek. KALIFORNSKY POMĚR ÚNOSNOSTI podklady do cvičení. Geotechnika. [online]. 8.1.2017 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z:  
<http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/kalifornsky-pomer-unosnosti.pdf>
- [37] TP 170 Navrhování vozovek pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy České republiky, listopad 2004
- [38] ČSN 73 6133. Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [39] Betonové dlažby a stavební prvky - Presbeton [online]. Copyright ©Q [cit. 01.05.2017]. Dostupné z: <http://www.presbeton.cz/uploads/knihovna/pracovni-postupy/04-obecne-zasady-pokladky-dlazeb.pdf>



## Seznam obrázků:

OBR. 2.1 KONSTRUKCE VOZOVKY A JEJÍ KONSTRUKČNÍ VRSTVY .....	12
OBR. 3.1 SiO <sub>2</sub> JAKO KRYSTAL .....	14
OBR. 3.2 SiO <sub>2</sub> JAKO SKLO .....	14
OBR. 3.3 SCHÉMA KONSTRUKCE FOTOVOLTAICKÉHO PANELU .....	19
OBR. 3.4 DRCENÝ POLYKRystalický FOTOVOLTAICKÝ PANEL .....	23
OBR. 3.5 DRCENÝ AMORFNÍ FOTOVOLTAICKÝ PANEL .....	23
OBR. 4.1 DRCENÝ POLYKRystalický FOTOVOLTAICKÝ PANEL .....	26
OBR. 4.2 DRCENÝ AMORFNÍ FOTOVOLTAICKÝ PANEL .....	26
OBR. 4.3 PĚNOVÉ SKLO-REFAGLASS .....	26
OBR. 5.1 POROVNÁNÍ ZHUTNĚNÉ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI NAVRŽENÝCH SMĚSÍ DLE ČSN 13108-1 .....	34
OBR. 5.2 POROVNÁNÍ MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI NAVRŽENÝCH SMĚSÍ DLE ČSN 13108-1 .....	34
OBR. 5.3 POROVNÁNÍ MEZEROVITOSTI NAVRŽENÝCH SMĚSÍ S POŽADAVKY DLE ČSN 13108-1 .....	35
OBR. 5.4 POROVNÁNÍ PEVNOSTÍ V PŘÍČNÉM TAHU TĚLES NA SUCHU-ITS.....	36
OBR. 5.5 POROVNÁNÍ POMĚRU PEVNOSTÍ V PŘÍČNÉM TAHU-ITSR DLE ČSN A AASHTO .....	37
OBR. 5.6 POROVNÁNÍ PEVNOSTÍ V PŘÍČNÉM TAHU TĚLES ZA MOKRA-ITS <sub>wet</sub> .....	38
OBR. 6.1 MINIMÁLNÍ VELIKOST ZKUŠEBNÍ NAVÁŽKY .....	45
OBR. 6.2 ZEMINA VE VÁŽENCE .....	54
OBR. 6.3 ZEMINA S MĚŘIDLEM .....	54
OBR. 6.4 KŘIVKA ZRNITOSTI ZEMINA.....	55
OBR. 6.5 PROCTOROVA KŘIVKA-ZÁVISLOST MAXIMÁLNÍ SUCHÉ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI NA VLHKOSTI PRO ZEMINU.....	56
OBR. 6.6 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI SÍLY NA PENETRACI TRNU – KONVEXNÍ PRŮBĚH DOKAZUJE ŠPATNÉ DOSEDNUTÍ TRNU.....	57
OBR. 6.7 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI SÍLY NA PENETRACI TRNU – KONVEXNÍ PRŮBĚH DOKAZUJE ŠPATNÉ DOSEDNUTÍ TRNU.....	58
OBR. 6.8 ZEMINA S POLYKRystalickým SKLEM V POMĚRU 50:50 S PRAVÍTKEM.....	60
OBR. 6.9 ZEMINA S POLYKRystalickým SKLEM V POMĚRU 50:50 VE VÁŽENCE .....	60
OBR. 6.10 KŘIVKA ZRNITOSTI PRO KOMBINACI ZEMINY S POLYKRystalickým SKLEM .....	61
OBR. 6.11 PROCTOROVA KŘIVKA-ZÁVISLOST MAXIMÁLNÍ SUCHÉ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI NA VLHKOSTI PRO KOMBINACI ZEMINY S POLYKRystalickým SKLEM .....	62
OBR. 6.12 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI SÍLY NA PENETRACI TRNU KOMBINACE ZEMINY S POLYKRystalickým SKLEM..	63
OBR. 6.13 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI SÍLY NA PENETRACI TRNU KOMBINACE ZEMINY S POLYKRystalickým SKLEM..	64
OBR. 6.14 ZEMINA V KOMBINACI S AMORFNÍM SKLEM 50:50 VE VÁŽENCE .....	66
OBR. 6.15 ZEMINA V KOMBINACI S AMORFNÍM SKLEM 50:50 A MĚŘIDLEM .....	66
OBR. 6.16 ÍTOVÝ ROZBOR ZEMINY A AMORFNÍHO SKLA .....	67
OBR. 6.17 KŘIVKA ZRNITOSTI SMĚS ZEMINY A AMORFNÍHO SKLA .....	67
OBR. 6.18 PROCTOROVA KŘIVKA PRO KOMBINACI ZEMINY S AMORFNÍM SKLEM .....	68



OBR. 6.19 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI SÍLY NA PENETRACI TRNU KOMBINACE ZEMINY S AMORFNÍM SKLEM .....	69
OBR. 6.20 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI SÍLY NA PENETRACI TRNU KOMBINACE ZEMINY S POLYKRystalickým SKLEM..	70
OBR. 6.21 ZEMINA SMÍCHANÁ S REFAGLASS 8/16.....	72
OBR. 6.22 ZEMINA SMÍCHANÁ S REFAGLASS 8/16 S PRAVÍTKEM.....	72
OBR. 6.23 KŘIVKA ZRNITOSTI ZEMINY V KOMBINACI S REFAGLASS 8/16 .....	73
OBR. 6.24 PROCTORA KŘIVKA ZÁVISLOSTI MAXIMÁLNÍ SUCHÉ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI PRO KOMBINACI ZEMINY A REFAGLASS 8/16 .....	74
OBR. 6.25 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI SÍLY NA PENETRACI TRNU KOMBINACE ZEMINY S REFAGLASS 8/16 .....	75
OBR. 6.26 REFAGLASS-UKÁZKA NEMOŽNOSTI IDEÁLNÍHO SEŘÍZNUTÍ FORMY .....	77
OBR. 6.27 ZEMINA SMÍCHANÁ S REFAGLASS 0/1,6 VE VÁŽENCE .....	78
OBR. 6.28 ZEMINA SMÍCHANÁ S REFAGLASS 0/1,6 S MĚŘIDLEM.....	78
OBR. 6.29 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI SÍLY NA PENETRACI TRNU KOMBINACE ZEMINY S REFAGLASS 0/1,6 .....	81
OBR. 6.30 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI SÍLY NA PENETRACI TRNU KOMBINACE ZEMINY S REFAGLASS 0/1,6 .....	82
OBR. 6.31 KŘIVKY ZRNITOSTÍ ZKOUŠENÝCH SMĚSÍ A ZEMINY.....	84
OBR. 6.32 PRŮBĚH ZKOUŠKY IBI POROVNÁNÍ.....	85
OBR. 6.33 PRŮBĚH ZKOUŠKY CBR-POROVNÁNÍ .....	86

## Seznam tabulek:

TAB. 5.1 MODULY TUHOSTI PŘED A PO ZESTÁRNUTÍ STANOVENÉ DLE ČSN EN 12697-26 .....	38
TAB. 6.1 POUŽITELNOST ZEMIN PRO STAVBU ZEMNÍHO TĚLESA .....	41
TAB. 6.2 TABULKA ZRNITOSTI .....	46
TAB. 6.3 ROZDÍL MEZI PROCTOR STANDART A MODIFIKOVANÝ [33] .....	49
TAB. 6.4 HODNOTY STANDARTNÍCH SIL PRO NORMOVÉ KAMENIVO .....	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.</b>
TAB. 6.5 PRAVIDLO PRO ZAOKROUHLĚNÍ CBR/IBI.....	51
TAB. 6.6 ORIENTAČNÍ HODNOTY CBR DLE ZKOUŠENÉ ZEMINY [36].....	51
TAB. 6.7 ORIENTAČNÍ HODNOTY IBI [36].....	51
TAB. 6.8 KONTROLA, ČÍSLO KŘIVOSTI A NESTEJNOZRNOSTI .....	55
TAB. 6.9 SÍTOVÝ ROZBOR ZEMINY .....	55
TAB. 6.10 VÝPOČET VLHKOSTI OBSAŽENÉ VE VZORCÍCH PO PS .....	56
TAB. 6.11 URČENÍ SUCHÉ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI ZEMINY PO ZJIŠTĚNÍ VLHKOSTI VZORKŮ PO PS.....	56
TAB. 6.12 IBI ZEMINA-NAMĚŘENÉ SÍLY PŘI PENETRACI TRNU .....	57
TAB. 6.13 OPRAVA ZKRESLENÉHO MĚŘENÍ ŠPATNÝM DOSEDNUTÍ TRNU .....	57
TAB. 6.14 VÝPOČET SOUČiniteLE LINEÁRNÍ BOBTNAVOSTI .....	58
TAB. 6.15 OPRAVA ZKRESLENÉHO MĚŘENÍ ŠPATNÝM DOSEDNUTÍ TRNU .....	58
TAB. 6.16 CBR ZEMINA-NAMĚŘENÉ SÍLY PŘI PENETRACI TRNU .....	58
TAB. 6.17 ČÍSLO NESTEJNOZRNOSTI A KŘIVOSTI PRO KOMBINACI ZEMINY S POLYKRystalickým FV PANELEM.....	61
TAB. 6.18 SÍTOVÝ ROZBOR ZEMINY S DRCENÝM POLYKRystalickým FV PANELEM [50:50] .....	61



TAB. 6.19 URČENÍ VLHKOSTI PO ZKOUŠCE PS PRO KOMBINACI ZEMINY S POLYKRystalICKÝM FV PANELEM.....	62
TAB. 6.20 URČENÍ SUCHÉ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI PO ZJIŠTĚNÍ VLHKOSTI VZORKŮ PO PS PRO KOMBINACI ZEMINY S POLYKRystalICKÝM FV PANELEM .....	62
TAB. 6.21 IBI ZEMINA V KOMBINACI S POLYKRystalICKÝM FV PANELEM-NAMĚŘENÉ SÍLY PŘI PENETRACI TRNU .....	63
TAB. 6.22 VÝPOČET SOUČiniteLE LINEÁRNÍ BOBTNAVOSTI .....	64
TAB. 6.23 CBR ZEMINA V KOMBINACI S POLYKRystalICKÝM FV PANELEM-NAMĚŘENÉ SÍLY PŘI PENETRACI TRNU.....	64
TAB. 6.24 ČÍSLA NESTEJNOZRNOSTI A KŘIVOSTI PRO KOMBINACI ZEMINY S AMORFNÍM FV PANELEM.....	67
TAB. 6.25 VÝPOČET VLHKOSTI PRO KOMBINACI ZEMINY S AMORFNÍM FV PANELEM PO PS .....	68
TAB. 6.26 VÝPOČET MAXIMÁLNÍ SUCHÉ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI PRO KOMBINACI ZEMINY S AMORFNÍM FV PANELEM .....	68
TAB. 6.27 IBI ZEMINA V KOMBINACI S AMORFNÍM FV PANELEM -NAMĚŘENÉ SÍLY PŘI PENETRACI TRNU .....	69
TAB. 6.28 VÝPOČET SOUČiniteLE LINEÁRNÍ BOBTNAVOSTI PRO KOMBINACI ZEMINA S AMORFNÍM FV PANELEM .....	70
TAB. 6.29 IBI ZEMINA V KOMBINACI S AMORFNÍM FV PANELEM -NAMĚŘENÉ SÍLY PŘI PENETRACI TRNU .....	70
TAB. 6.30 VÝPOČET ČÍSEL KŘIVOSTI A NESTEJNOZRNOSTI .....	73
TAB. 6.31 SÍTOVÝ ROZBOR KOMBINACE ZEMINY A REFAGLASS 8/16 .....	73
TAB. 6.32 VÝPOČET VLHKOSTI KOMBINACEI ZEMINY A REFAGLASS 8/16 PO PS.....	74
TAB. 6.33 VÝPOČET MAXIMÁLNÍ SUCHÉ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI KOMBINACE ZEMINY S REFAGLASS 8/16 .....	74
TAB. 6.34 IBI ZEMINA V KOMBINACI S REFAGLASS 8/16 -NAMĚŘENÉ SÍLY PŘI PENETRACI TRNU .....	75
TAB. 6.35 VÝPOČET SOUČiniteLE LINEÁRNÍHO BOBTNÁNÍ .....	76
TAB. 6.36 IBI ZEMINA V KOMBINACI S REFAGLASS 8/16 -NAMĚŘENÉ SÍLY PŘI PENETRACI TRNU .....	76
TAB. 6.37 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI SÍLY NA PENETRACI TRNU KOMBINACE ZEMINY S REFAGLASS 8/16 .....	76
TAB. 6.38 VÝPOČET ČÍSEL KŘIVOSTI A NESTEJNOZRNOSTI .....	79
TAB. 6.39 SÍTOVÝ ROZBOR ZEMINY V KOMBINACI S REFAGLASS 0/1,6.....	79
TAB. 6.40 KŘIVKA ZRNITOSTI ZEMINY V KOMBINACI S REFAGLASS 8/16 .....	79
TAB. 6.41 VÝPOČET VLHKOSTI VZORKU PO ZKOUŠCE PS.....	80
TAB. 6.42 VÝPOČET MAXIMÁLNÍ SUCHÉ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI KOMBINACE ZEMINY S REFAGLASS 0/1,6 .....	80
TAB. 6.43 PROCTORA KŘIVKA-ZÁVISLOST MAXIMÁLNÍ SUCHÉ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI NA VLHKOSTI PRO KOMBINACI ZEMINY S REFAGLASS 0/1,6.....	80
TAB. 6.44 IBI ZEMINA V KOMBINACI S REFAGLASS 0/1,6 -NAMĚŘENÉ SÍLY PŘI PENETRACI TRNU .....	81
TAB. 6.45 CBR ZEMINA V KOMBINACI S REFAGLASS 0/1,6 -NAMĚŘENÉ SÍLY PŘI PENETRACI TRNU .....	82
TAB. 6.46 HODNOTY IBI ZEMINY A ZKOUMANÝCH SMĚSÍ .....	85
TAB. 6.47 HODNOTY CBR ZEMINY A ZKOUMANÝCH SMĚSÍ.....	86
TAB. 6.48 PŘEHLED NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	87





## 8 Přílohy:

### 8.1 Příloha A

#### GEMATEST<sup>®</sup> spol. s r.o.

Laboratoř analytické chemie Černošice

Dr.Janského 954, 252 28, Černošice II

Tel.: 251 642 189, analytika@gematest.cz, www.gematest.cz



L 1291.2

Zkušební laboratoř akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s. pod č. 1291.2 podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005

### PROTOKOL O ZKOUŠCE

Zadavatel : AQUATEST a.s., Geologická 4, 152 00 Praha 5  
Odebral : zadavatel  
Metoda odběru : -  
Datum dodání : 23.10.2014  
Analýzy provedeny : 23.10.2014 - 7.11.2014

Č.prot. : 465/14  
Č.zakázky : 405/14  
Strana : 1/2

Lab.č.	Označení vzorku	Popis vzorku	Datum odběru
43018	20128	pevný vzorek	neuveдено

### VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Ukazatel	20128	Jednotka
z.žih. 1000 °C	0,29	% hm. suš.
SiO <sub>2</sub>	71,68	% hm. suš.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	% hm. suš.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13	% hm. suš.
TiO <sub>2</sub>	<0,01	% hm. suš.
CaO	7,95	% hm. suš.
MgO	6,30	% hm. suš.
Na <sub>2</sub> O	13,42	% hm. suš.
K <sub>2</sub> O	<0,05	% hm. suš.

Protokol o zkoušce nesmí být bez písemného souhlasu laboratoře reprodukován jinak než celý.  
Výsledky zkoušek se vztahují pouze ke zkoušeným vzorkům.



Č.prot.: 465/14

Strana: 2/2

Pozn. k metodám

Ukazatel	SOP	Metoda	Nej.	Statut zk.
z.žih. 1000 °C	SOP P03 B	ČSN 72 0103	±5%	A
SiO <sub>2</sub>	SOP P04	ČSN 72 0105-1	±5%	A
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SOP P05	plamenová AAS	±5%	N
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SOP P06	ČSN 72 0110-1	±5%	A
TiO <sub>2</sub>	SOP P07	ČSN 72 0112-2		A
CaO	SOP P08	ČSN 72 0113-1,2,3	±5%	A
MgO	SOP P09	ČSN 72 0114-1,2,3	±5%	A
Na <sub>2</sub> O	SOP P10	ČSN 72 0119-2	±5%	A
K <sub>2</sub> O	SOP P10			A

Rozšířená nejistota jednotlivých stanovení je součinem standardní nejistoty a koeficientu rozšíření  $k=2$ , což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95%. Naměřená nejistota nezahrnuje nejistotu vzorkování.

A - akreditovaná metoda      SA - subdodávka akreditovaná  
N - neakreditovaná metoda      SN - subdodávka neakreditovaná

V Černošicích 7.11.2014

Ing. Jan Manda  
zástupce vedoucího laboratoře



## 8.2 Příloha B

### PROTOKOL O ZKOUŠKÁCH č. 7102/16

List č. 2/3

Tab. č. 10.1

Ukazatel	SOP	Metoda	Jednotka	Limitní hodnota	Výsledek	Nejistota	A/N	Hodnocení
Arsen	SOP 5.14.1	ČSN EN ISO 11885	mg/kg suš.	max. 10	<5,0		A	vyhovuje
Kadmium	SOP 5.14.1	ČSN EN ISO 11885	mg/kg suš.	max. 1	<0,50		A	vyhovuje
Chrom	SOP 5.14.1	ČSN EN ISO 11885	mg/kg suš.	max. 200	16,6	±20%	A	vyhovuje
Rtuť	SOP 5.9.2	ČSN 75 7440	mg/kg suš.	max. 0,8	<0,100		A	vyhovuje
Nikl	SOP 5.14.1	ČSN EN ISO 11885	mg/kg suš.	max. 80	13,5	±20%	A	vyhovuje
Olovo	SOP 5.14.1	ČSN EN ISO 11885	mg/kg suš.	max. 100	194	±20%	A	nevyhovuje
Vanad	SOP 5.14.1	ČSN EN ISO 11885	mg/kg suš.	max. 180	<5,0		A	vyhovuje
Suma BTEX	SOP 7.3.2	EPA Method 8260 B	mg/kg suš.	max. 0,4	5,03	±55%	A	nevyhovuje
Suma PAU (12)	SOP 9.1.2	ČSN P CEN/TS 16181	mg/kg suš.	max. 6	0,057	±30%	A	vyhovuje
Uhlovodíky C10-C40	SOP 6.7.2	ČSN EN 14039	mg/kg suš.	max. 300	46,5	±25%	A	vyhovuje
PCB suma kong. (7)	SOP 7.1.2	EPA Method 8082 A	mg/kg suš.	max. 0,2	<0,005		A	vyhovuje
EOX	SOP 21.2.1 (2) DIN 38 414-S17		mg/kg suš.	max. 1	<1,0		A	vyhovuje

Suma PAU (12) zahrnuje antracen, benzo(a)antracen, benzo(b)fluoranthén, benzo(k)fluoranthén, benzo(a)pyren, benzo(g,h,i)perylene, fenantren, fluoranthén, chrysen, indeno(1,2,3-c,d)pyren, naftalen a pyren.

PCB suma kong. (7) zahrnuje kongenery č. 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180.

Tab. č. 10.2

Ukazatel	Výsledek	Jednotka	Sloupec I		Sloupec II	
			Požadavek	Vyhodnocení	Požadavek	Vyhodnocení
Inhibice růstu <i>Sinapis alba</i>	-18	%	≤30	vyhovuje	<-30,30>	vyhovuje
Imobilizace <i>Daphnia magna</i>	0	%	≤30	vyhovuje	≤30	vyhovuje
Inhibice růstu <i>Desmodesmus subspicatus</i>	-15	%	≤30	vyhovuje	<-30,30>	vyhovuje
Mortalita <i>Brachydanio rerio</i>	0	%	0	vyhovuje	0	vyhovuje

Vodný výluh odpadu byl připraven postupem dle ČSN EN 12457-4 a vyhl. č. 294/2005 Sb.

Použité organismy:

*Daphnia magna* - hrotnatka velká (drobný vodní korýš z řádu perlooček)

*Sinapis alba* - hořčice bílá (vyšší rostlina)

*Desmodesmus subspicatus* (zelená sladkovodní řasa)

*Brachydanio rerio* - danio pruhované (sladkovodní ryba)

Vysvětlivky:

Případné záporné hodnoty značí stimulaci růstu ve vodném výluhu oproti růstu v kontrolním roztoku.

Použité metody:

Název ukazatele	SOP	Metoda	A/N
Inhibice růstu <i>Sinapis alba</i>	SOP 21.14.2 (2)	Metodický pokyn odboru odpadů ke stanovení ekotoxicity odpadů, Věstník MŽP, částka 4/2007	A
Imobilizace <i>Daphnia magna</i>	SOP 21.14.1 (2)	ČSN EN ISO 6341	A
Inhibice růstu <i>Desmodesmus subspicatus</i>	SOP 21.14.4 (2)	ČSN EN ISO 8692	A
Mortalita <i>Brachydanio rerio</i>	SOP 21.14.3 (2)	ČSN EN ISO 7346-1 ČSN EN ISO 7346-2	A



## PROTOKOL O ZKOUŠKÁCH č. 7102/16

List č. 3/3

Zkušební metody označené (2) byly provedeny na pracovišti laboratoří AQUATEST v areálu ÚVR Mníšek pod Brdy 600, 252 10 Mníšek pod Brdy.

Nejistota je vyjádřena jako dvojnásobek standardní nejistoty a charakterizuje interval hodnot, ve kterém lze očekávat skutečnou hodnotu s pravděpodobností 95%.

Tato nejistota nezahrnuje nejistotu odběru vzorků a nevádí se u výsledků pod mezi stanovitelnosti.

A - akreditovaná metoda

### Informace, které mají vztah k určité zkoušce nebo údaje o odchylkách ze zkušebních specifikací :

Prvková analýza (SOP 5.14.1, 5.9.2) - předúprava: rozklad lučavkou královskou za varu podle ČSN EN 13346 a ČSN EN 13657.

Za technickou stránku protokolu o zkouškách zodpovídá:  
pracovník výstupu výsledků - J. Hülová

Za laboratoře schválil :  
Ředitelka úseku laboratoří - Ing. Radana Mráčková Dvořáková

V Praze dne : 25.10.2016

**AQUATEST a.s.**  
zkušební laboratoře  
152 00 Praha 5, Geologická 4

*Hülová*  
*R. Mráčková*

