VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

NESTMELENÉ SMĚSI DO PODKLADNÍCH VRSTEV VOZOVEK
UNBOUND MIXTURES TO THE PAVEMENT BASE LAYERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Jakub Žůrek
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jakub Žůrek
Název	Nestmelené směsi do podkladních vrstev vozovek
Vedoucí práce	Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

doc. Dr. Ing. Michal Varaus Vedoucí ústavu	prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc. Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor
ČSN EN 933-4 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index
výzkumné zprávy českých a zahraničních projektů se související tématikou (2000–2010)
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
ČSN EN 13287-47 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce je zaměřená na sledování vlastností mechanicky zpevněné zeminy (MZ) a štěrkodrtí (ŠD) do nestmelených podkladních vrstev vozovek pozemních komunikací. Návrh a posouzení využití sledovaného materiálu předpokládá ověření možnosti náhrady MZ za ŠD u méně zatížených a méně významných vozovek pozemních komunikací. Výsledkem práce je příkladové srovnání směsí s požadovanými parametry podle příslušných platných ČSN.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá možností využít alternativní materiály do podkladních vrstev vozovek. Vybrané zrnité materiály z lomů (frakce 0/22) a recyklát, jejich možné zatřídění v rámci používaných podkladních vrstev a posouzení vhodnosti pro danou konstrukční vrstvu. Dále se práce zabývá vhodností laboratorních zkoušek, které se u nás v současnosti používají, a klade si otázku, zdali jsou tyto zkoušky ideální či nikoli. Teoretická část shrnuje aktuálně používané podkladní vrstvy, jejich vlastnosti, technologii provádění a vysvětluje současný systém zkoušení. Cílem praktické části je pak stanovit mechanické vlastnosti zkoumaných materiálů, ty vzájemně porovnat a posoudit.

ABSTRACT

The subject of this bachelor's thesis is the possibility of using alternative materials in base road layers. Specifically It's about different granular material from mines (fraction 0/22) and recyclate, the possibility of their their classification within the used base layers and assessment of their suitability for specific structural layer. The thesis subject is also assessment of suitability of laboratory tests currently used in the Czech Republic and is trying to deal with the question whether these tests are ideal or not. The theoretical part summarizes the currently used base layers, their properties, technology of their implementation and It explains the current testing system. The aim of the thesis is to define mechanical properties of the examined materials, compare them and evaluate them.

KLÍČOVÁ SLOVA

konstrukce vozovky, únosnost, podkladní vrstva, zkouška otlukovosti, frakce kameniva, Proctorova zkouška, optimální vlhkost, okamžitý index únosnosti (IBI), kalifornský poměr únosnosti (CBR).

KEYWORDS

road construction, bearing capacity, base layer, test of abrasion, fraction of aggregate, Proctor test, optimal water content, Immediate Bearing Index, California Bearing Ratio.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Jakub Žůrek *Nestmelené směsi do podkladních vrstev vozovek.* Brno, 2018. 54 s., 75 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2018

Jakub Žůrek
autor práce

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 24. 5. 2018

Jakub Žůrek

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval Ing. Dušanu Stehlíkovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu, vstřícnost, cenné rady a připomínky, které mi pomohly při vypracování této bakalářské práce. Dále děkuji všem zaměstnancům laboratoře ústavu pozemních komunikací za pomoc při provádění laboratorních zkoušek. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině a přátelům, kteří mě podporovali během studia.

Obsah

1. Úvod ... 11
2. Cíl práce ... 13
3. Teoretická část ... 14
3.1 Základní pojmy ... 14
3.2 Rozdělení nestmelených směsí ... 15
3.2.1 Mechanicky zpevněné kamenivo (MZK) ... 15
3.2.2 Vibrovaný štěrk (VŠ) ... 16
3.2.3 Štěrkopísek (ŠP) ... 17
3.2.4 Mechanicky zpevněná zemina (MZ) ... 17
3.2.5 Štěrkodrť (ŠD) ... 17
3.3 Zkoušení nestmelených směsí ... 19
3.3.1 Proctorova zkouška ... 19
3.3.2 Zkoušky únosnosti CBR, IBI ... 20
3.3.3 Modul pružnosti ... 22
3.3.4 Zkouška odolnosti proti drcení (LA) ... 22
3.4 Zahraniční zkušenosti s využitím alternativních materiálů do podkladních vrstev ... 24
3.4.1 Itálie a funkční zkoušení nestmelených směsí ... 24
3.4.2 Itálie a podkladní vrstvy stmelené cementem ... 25
3.4.3 Využití druhotného materiálu z výrubu – spojené státy americké ... 26
4. Praktická část ... 27
4.1 Použitý zkušební materiál ... 27
4.2 Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor ... 29
4.2.1 Podstata zkoušky ... 29
4.2.2 Příprava zkoušky ... 29
4.2.3 Zpracování výsledků ... 30
4.2.4 Výsledky zkoušky ... 31
4.3 Zkoušky zhutnitelnosti ... 35
4.3.1 Podstata zkoušky ... 35
4.3.2 Popis zkoušky ... 35
4.3.3 Průběh zkoušky ... 36
4.3.4 Vyhodnocení zkoušky ... 37
4.3.5 Výsledky zkoušky ... 37
4.3.6 Souhrnné výsledky ... 41

4.4 stanovení poměru ÚNOSNOSTI – IBI a CBR 41
4.4.1 Podstata zkoušky 41
4.4.2 Popis zkoušky 42
4.4.3 Průběh zkoušky 42
4.4.4 Vyhodnocení zkoušky 42
4.5 Zkouška odolnosti proti drcení (otlukovosti) v bubnu (LA) 44
4.5.1 Podstata zkoušky 44
4.5.2 Popis zkoušky 45
4.5.3 Průběh zkoušky 45
5. Zhodnocení výsledků 47
6. Závěr 48
7. Seznam použitých zdrojů 49
8. Seznam obrázků 52
9. Seznam tabulek 53
10. Seznam grafů 54
11. Přílohy – protokoly zkoušek 55

1. ÚVOD

Konstrukce vozovky je souvrství složené z různých konstrukčních materiálů různých vlastností zhotovovaných celou řadou rozdílných technologií. Všechny vrstvy musí společně působit tak, aby byla konstrukce funkční tedy roznášela zatížení od dopravy i přečkávala celou řadu dalších vlivů zpravidla klimatických. Funkčností konstrukce vozovky rozumíme stav, který zajišťuje bezpečný a plynulý provoz na dané pozemní komunikaci. Konstrukce musí být tedy schopna odolávat bez vzniku deformací. Pokud dojde k poruše v rámci podkladní vrstvy je velice pravděpodobné, že se bude šířit v celé konstrukci dále až do ložních a krytových vrstev.

U nás se v současnosti používají nejběžněji podkladní vrstvy nestmelené. Konkrétně to jsou mechanicky zpevněné kamenivo (MZK), vibrovaný štěrk (VŠ), štěrkodrť (ŠD), štěrkopísek (ŠP) a mechanicky zpevněná zemina (MZ). Kvalitního materiálu pro tyto vrstvy ale ubývá a je třeba myslet do budoucna na zvyšující se potřebu recyklace těchto vrstev, popř. použití alternativních materiálů. Za alternativní materiál, který by mohl být využit v konstrukci vozovky do podkladní vrstvy, se dají považovat odpadní zbytky, tzv. nestandardní materiály v lomech, které vznikají jako nevyužitá část z výroby či stavební recykláty. Měla by se podporovat snaha používat tyto alternativní materiály a začít jimi nahrazovat materiály v současnosti používané, tam kde je to vhodné.

Problém je dodržení požadovaných vlastností, zejména mechanických (únosnost, odolnost proti drcení, zpracovatelnost apod.). Je proto třeba tyto materiály popsat, odzkoušet a posoudit, zdali jsou či nejsou vhodné a nejlépe je zatřídit v současném systému materiálového využití do pozemních komunikací.

Mechanicky zpevněná zemina (MZ) je pojem, pod který se schová hned několik zcela rozdílných materiálů a směsí, jsou to kvalitní zrnité materiály z lomů, recyklované stavební materiály či směsi hlín smíchané se zrnitým materiálem. U nás je v největší míře zažitá MZ v podobě třetí ze jmenovaných, která ale zpravidla dosahuje nejhorších vlastností. Pro dosažení požadovaných vlastností vrstvy v konstrukci vozovky při větším dopravním zatížení se více nabízí využít zrnité materiály z lomů, popř. recykláty, které by bylo vhodné vyčlenit nebo oddělit ve skupině MZ a stanovit pro ně konkrétní požadavky pro použití. Do této skupiny by pak mohla patřit většina

alternativně použitelných materiálů, jako jsou např. nestandardní zrnité směsi z lomů frakce 0/22 aj.

2. CÍL PRÁCE

Prvním cílem této bakalářské práce je sledování využitelnosti konkrétních tří materiálů, dle výše uvedeného rozdělení. Materiály budou podrobeny požadovaným laboratorním zkouškám, jejichž výsledky budou porovnány jak s referenční vhodnou směsí materiálu, a rovněž porovnány s požadovanými vlastnostmi tak, jak jsou stanoveny platnými technickými předpisy. Na základě těchto srovnání bude rozhodnuto o tom, zdali je možné daný materiál považovat za vhodný, popř. do jaké konstrukce je výhodné jej zabudovat.

Druhým cílem je samotné posouzení zkoušení. Zamyšlení se nad vhodností aktuálně používaných postupů, zejména nad posouzením únosnosti Californským poměrem únosnosti (CBR). Tato zkouška byla vyvinuta především pro zkoušení hlinitých materiálů v podloží vozovky a pro posuzování zrnitých materiálů a směsí pro nestmelené směsi navrhované v současné době nemusí dávat dostatečně přesné a spolehlivé výsledky.

3. TEORETICKÁ ČÁST

3.1 ZÁKLADNÍ POJMY

Kamenivo – zrnitý (sypký) anorganický materiál přírodního nebo umělého původu, s velikostí zrna do 125 mm [1]

Frakce kameniva – množina kameniva ohraničené velikostí oka horního a dolního síta

Úzká frakce kameniva – množina kameniva vymezena síty s poměrem velikostí ok rovným nebo menším dvěma

Široká frakce kameniva – množina kameniva vymezena síty s poměrem velikostí ok větším dvěma

Sítový rozbor – zkouška, jejíž podstata je roztřídění a oddělení materiálu pomocí sady sít do několika frakcí se sestupnou velikostí [2]

Zkouška Los Angeles – zkouška odolnosti kameniva proti drcení prováděna v bubnu otloukáním kameniva ocelovými koulemi

Součinitel Los Angeles – procentní podíl propadu zkušební navážky předem stanoveným sítem po dokončení zkoušky [3]

Zkušební navážka – vzorek použitý jako celek při jednotlivé zkoušce [3]

Ustálená hmotnost – hmotnost, která se při následujícím vážení po vysoušením trvajícím nejméně jednu hodinu nemění o více než 0,1 % [3]

Laboratorní vzorek – zmenšený vzorek získaný ze souhrnného vzorku pro laboratorní zkoušení [3]

Zkouška Proctor modifikovaný – zkušební metoda pro stanovení vzájemného vztahu mezi vlhkostí a srovnávací objemovou hmotností za použití Proctorovy modifikované energie zhutňování zkušebních těles. [4]

Maximální objemová hmotnost – objemová hmotnost, které směs dosáhne maximálním zhutněním při optimální vlhkosti

Optimální vlhkost – vlhkost, při které lze dosáhnout maximální míry zhutnění směsi

Kalifornský poměr únosnosti (California Bearing Ratio, CBR) – index užívaný pro stanovení charakteristik únosnosti směsi, stanovený po zhutnění, saturaci a případně po době zrání. [5]

Okamžitý index únosnosti (Immediate Bearing Index, IBI) – okamžitá hodnota poměru únosnosti stanovená bez použití zatěžovacího prstence okamžitě po zhutnění do zkušební formy. [5]

Únosnost – charakteristika vyjadřující odolnost dané vrstvy proti působení vnějších účinků zatížení (zejména od dopravy)

3.2 ROZDĚLENÍ NESTMELENÝCH SMĚSÍ

Jak již bylo zmíněno v úvodu, nestmelené směsi jsou u nás nejběžnějším materiálem v podkladní vrstvě konstrukcí vozovek. V současnosti platná norma (ČSN 73 6126-1) stanovuje požadavky na 4 typy nestmelených podkladních vrstev (jsou to mechanicky zpevněné kamenivo MZK, štěrkodrť ŠD, štěrkopísek ŠP a mechanicky zpevněná zemina MZ) pro zbylou pátou nestmelenou vrstvu (vibrovaný štěrk VŠ) jsou požadavky stanoveny v ČSN 73 6126-2. [6]

3.2.1 MECHANICKY ZPEVNĚNÉ KAMENIVO (MZK)

Je nejkvalitnější nestmelená podkladní vrstva používaná pro vysoká dopravní zatížení. Vyrábí se z nestmelené směsi drceného kameniva zrnění G_A nebo G_C s optimální vlhkostí v intervalu $-2\% \leq w_{opt} < 1\%$, rozprostřená a zhutněná za podmínek zajišťujících maximální dosažitelnou únosnost. Má plynulou čáru zrnitosti a míchá se z více úzkých frakcí kameniva v míchacích centrech (0/4, 4/8, 8/11,2 nebo 8/16, 11,2/22 nebo 16/32) na výsledné směsi 0/32 nebo 0/45 mm. Jsou na ni kladeny nejpřísnější technologické požadavky jako např.

odolnost proti drcení LA max. 40 %, odolnost síranem sodným max. 12 %. Pokládá se finišerem a hutní vibračními válci. CBR = min. 100 % (po nasycení). [6]

Obrázek 1: Pokládka mechanicky zpevněného kameniva [7]

3.2.2 VIBROVANÝ ŠTĚRK (VŠ)

Je vrstva tvořena kostrou z hrubého drceného kameniva se zavibrovaným výplňovým kamenivem jemnější frakce. Kostra je tvořena frakcí 32/63 (je nutné u ní dodržet příznivou hodnotu odolnosti proti drcení zrn) a výplňové kamenivo je pak maximálního zrna 16 mm např. úzká frakce 8/16. Vrstvu nelze pokládat přímo na podloží kvůli nesplnění filtračního kritéria. Únosnost vrstvy je postavena na únosnosti hrubého skeletu a je poměrně vysoká, ale kvůli technologické obtížnosti pokládky se dnes provádí minimálně. [6]

3.2.3 ŠTĚRKOPÍSEK (ŠP)

Je jediná nestmelená vrstva, která je prováděna ze směsi těženého kameniva, a to v třídě zrnitosti G_E nebo G_N. Používá se (kvůli špatným mechanickým vlastnostem, zejména únosnosti) pouze do spodní podkladní vrstvy konstrukce vozovky určené pro ochranné účinky vůči promrzání. Rozprostírá se přímo na zemní pláň zpravidla grejdry a hutní se statickými nebo vibračními válci. [6]

3.2.4 MECHANICKY ZPEVNĚNÁ ZEMINA (MZ)

Používá se jako spodní podkladní vrstva, která může být zhotovena ze směsi různých zrněných materiálů. Kromě směsi hlín se zrnitým materiálem to mohou být i recyklované materiály z demolic či betonové recykláty. Zároveň se jedná o používanou nestmelenou směs zejména pro spodní podkladní vrstvy konstrukce vozovek III. tříd. Podmínkou pro zhotovení vrstvy z MZ je výsledná hodnota CBR min. 20 % navržené směsi MZ. Je tedy možné vzít i jiný dostupný materiál, zbytkový materiál z lomu, cihelný recyklát aj., odzkoušet, zdali dosáhne požadované únosnosti a ověřit stálost parametrů. [6]

3.2.5 ŠTĚRKODRŤ (ŠD)

Nejpoužívanější nestmelenou směsí z drceného kameniva do konstrukčních podkladních vrstev vozovek je štěrkodrť s třídou zrnitosti G_E ($ŠD_A$) nebo G_N ($ŠD_B$). Získává se drcením přírodního kamene a dělá se běžně ve frakcích 0/32; 0/45; 0/63 popř. (0/125). Rozprostírá se grejdrem a hutní vibračními válci. U směsi štěrkodrti se nezkouší poměr únosnosti CBR [%], i když se o této zkoušce pro tento typ směsi uvažuje do budoucna zavést. Dosažitelná hranice min. hodnoty CBR pro směsi štěrkodrti z kvalitních přírodních a alternativních materiálů je CBR ≥ 50 %. [6]

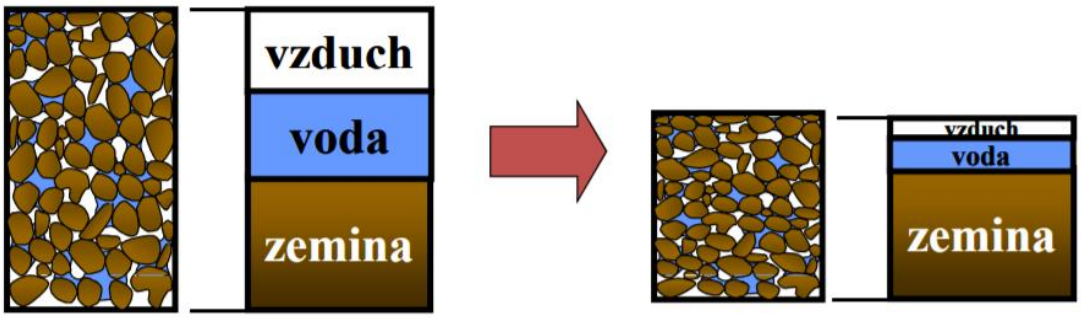
Obrázek 2: Štěrkodrť [8]

Tabulka 1: Hodnoty návrhových modulů pružnosti zhutněných nestmelených vrstev dle TP 170

Mechanicky zpevněná zemina	MZ	150 MPa
Štěrkopísek	ŠP	120 MPa
Štěrkodrť	ŠD	400 MPa
Vibrovaný štěrk	VŠ	500 MPa
Mechanicky zpevněné kamenivo	MZK	600 MPa

3.3 ZKOUŠENÍ NESTMELENÝCH SMĚSÍ

Jedním z nejzákladnějších parametrů každé směsi, ze které chceme zhotovit konstrukční vrstvu, je zhutnitelnost. Zhutnitelnost se tradičně zkouší pomocí Proctorovy zkoušky (v případě nestmelených směsí pro podkladní vrstvy Proctorovy zkoušky modifikované) a jejím výstupem jsou dva základní údaje, a to optimální vlhkost a maximální objemová hmotnost. Pro pochopení samotné zkoušky je třeba říci, že stejně jako zemina je i směs kameniva třífázovým systémem skládajícím se ze složky pevné (s – solid), kapalné (w – water) a plynné (a – air). Podle poměru tří uvedených fází se mění vlastnosti směsi. Při hutnění směsi dochází k vyplňování mezer (pór) mezi většími zrny, do jejichž mezer zapadají ještě menší zrna (viz. obrázek 3.). [9]



Obrázek 3: Princip hutnění [10]

Velice důležitý je „mazací“ efekt vody, který hutnění usnadňuje. Nejprve platí, že se zvyšujícím se množství vody účinek mazání roste, a i objemová hmotnost se zvyšuje, ale po dosažení optimální vlhkosti při dalším přidáváním vody dojde k tomu, že voda začne vyplňovat i póry v kamenivu a účinek hutnění výrazně klesá. [9]

3.3.1 PROCTOROVA ZKOUŠKA

Proctorova zkouška tedy pracuje na principu zhotovení určitého množství rozměrově daných těles, která jsou zhutněna ze stejného materiálu, ale rozdílné vlhkosti. Postup zhotovení těles je různý pro materiály jemnozrnné, které jsou určeny do podloží, potom hovoříme o tzv. zkoušce Proctor standard, a pro materiály zrnité určené do konstrukce vozovky tedy Proctor modifikovaný. Obě verze fungují tak, že z dané výšky padá pěch o dané hmotnosti a hutní v pevně daném rastru úderů materiál ve formě o rozměrech A: Ø 100 mm a h = 120 mm nebo B: Ø 150 mm a h = 120 mm.

Obě verze se liší právě v hmotnosti pěchu, výšce dopadu a počtu zhutňovacích vrstev. Počet úderů na vrstvu je dán použitou formou (A = 25 úderů, B = 56 úderů).
Je možné hutnící zařízení i upravit v závislosti výška : hmotnost : počet úderů, ale vždy musí být dodržena výsledná hutnící energie, která je dána následujícím vztahem. [10]

$$E = \frac{m \cdot g \cdot h \cdot n \cdot i}{V}$$

E	je	celková hutnící energie [J]
m		hmotnost pěchu [kg]
g		gravitační zrychlení [ms^{-2}]
h		výška dopadu pěchu [m]
n		počet hutněných vrstev [-]
i		počet úderů na vrstvu [-]
V		objem hutnící formy [m^3]

Průběh zkoušky je tedy zhutnění minimálně pěti těles při rozdílných vlhkostech následné zvážení těles a zpětné vyhodnocení skutečné vlhkosti materiálu. Výsledkem Proctorovy zkoušky je znalost optimální vlhkosti, při které směs dosáhne maximální objemové hmotnosti a také hodnota maximální objemové hmotnosti. Hodnota optimální vlhkosti je velmi důležitá jak pro provádění dalších zkoušek, tak samozřejmě pro samotnou pokládku vrstvy na stavbě. Směs, která není pokládána při optimální vlhkosti, nemůže nikdy dosáhnout maximální možné míry zhutnění.

3.3.2 ZKOUŠKY ÚNOSNOSTI CBR, IBI

Penetrační zkouška CBR (kalifornský poměr únosnosti) a IBI (okamžitý index únosnosti) se používají hlavně z důvodu obtížného měření modulu pružnosti jak zemin, tak nestmelených směsí. Zkouška byla vyvinuta v roce 1930 v USA. Zkoušený materiál se zhutní pomocí Proctorova zařízení při optimální vlhkosti a následně se na něm přímo provede penetrační zkouška trnem (pro stanovení IBI), nebo se, i s formou, vloží do vodní lázně a nechá se 4 dny saturovat. Forma musí umožňovat přístup vody do celého zhutněného tělesa

(porézní dno, popř. vložit do lázně bez dna). Zatěžování probíhá zatlačováním trnu o průměru 50 mm rychlostí 1,27 mm/min. Stanovuje se síla, která je potřebná k zatlačení trnu o danou vzdálenost (2,5 mm a 5,0 mm). Tyto síly se potom porovnají s referenčními hodnotami sil historicky danými ze zkoušení drobného drceného štěrku (tato hodnota je považována za celosvětový standard. Výsledná hodnota CBR je pak větší ze dvou porovnaných sil při zmíněných penetracích. [11]

Obrázek 4: Lis pro provádění zkoušek IBI a CBR

Při zkoušení CBR u nestmelených podkladních směsí velmi záleží na přesném navlhčení a pečlivém smísení kameniva s vodou. Výsledky, jak jsem si sám při zkoušení ověřil, se výrazně liší již při minimální změně vlhkosti. Z některých vztahů mezi objemovou hmotností, intenzitou hutnění, vlhkostí a CBR byly odvozeny, poznatky, které jednoznačně potvrzují nepříznivý vliv příliš vysoké vlhkosti směsi při hutnění. Bylo rovněž zjištěno, že maximální hodnoty CBR se dosahuje při nižší vlhkosti, než je optimální. [11] [12]

Jak bylo zmíněno výše, existuje zkušební postup, který vynechává saturaci a ve vodě a tělesa zkouší ihned po zhutnění – IBI (okamžitý index únosnosti). Tato zkouška jde použít orientačně jako kontrolní (při známých podmínkách), pro objektivní posouzení směsi není vhodná. Zkouška umožňuje hlavně rychlé posouzení zejména na staveništi, pro umožnění technologického provozu na zhutněné nestmelené vrstvě je třeba dosáhnout minimálně

hodnoty IBI 40 %. Podstatné je, že neexistuje žádný korelační vztah mezi CBR a IBI, tedy vysoká hodnota IBI nemusí vůbec znamenat vysokou hodnotu CBR po saturaci. [11]

3.3.3 MODUL PRUŽNOSTI

Jak již bylo řečeno stanovit modul pružnosti směsi kameniva je obtížnější než stanovit únosnost penetrační zkouškou. Modul pružnosti je konstanta úměrnosti mezi vnějším působícím zatížením na těleso a poměrnou deformací tohoto tělesa. Velikost modulu pružnosti lze stanovit jako závislost deviátoru napětí na poměrné deformaci cyklickým měřením v triaxiálním přístroji. [11]

Obrázek 5: Triaxiální přístroj [13]

Dalším důvodem, proč stanovovat u směsí spíše modul pružnosti, místo únosnosti stanovované penetrační zkouškou, je možnost stanovení statistické závislosti modulů stanovených v laboratoři s moduly zjištěnými ze zkoušek provedených na stavbě (statická zatěžovací zkouška SZZ, popř. rázová zatěžovací zkouška lehkou dynamickou deskou LDD) a využití těchto korelací pro navrhování konstrukcí vozovek na konkrétní dopravní zatížení.

3.3.4 ZKOUŠKA ODOLNOSTI PROTI DRCENÍ (LA)

Zkouška odolnosti proti drcení (někdy nazývaná jako otlukovost) se provádí pro zjištění mechanické odolnosti kameniva, zejména při těžkém vibračním zhutňování. Při vysoké míře otluku kameniva dochází ke změně čáry zrnitosti, s čímž souvisí nejen změna mechanických vlastností kameniva jako zhutnitelnost, únosnost či optimální vlhkost, ale i namrzavosti apod. Zkouška, kterou se otlukovost kameniva provádí se nazývá zkouška Los Angeles

a provádí se v otlukovém bubnu. Úzká frakce kameniva zbavená nadsítného a podsítného se vloží do otlukového bubnu s ocelovými koulemi. Provede se samotná zkouška, buben se otáčí a ocelové koule drtí zrna kameniva, a materiál se vyjme z bubnu a provede se na něm sítový rozbor přes síto velikosti 1,6 mm. Zůstatek na sítě se vztáhne k hmotnosti původní navážky a vyjádří se v %. [11]

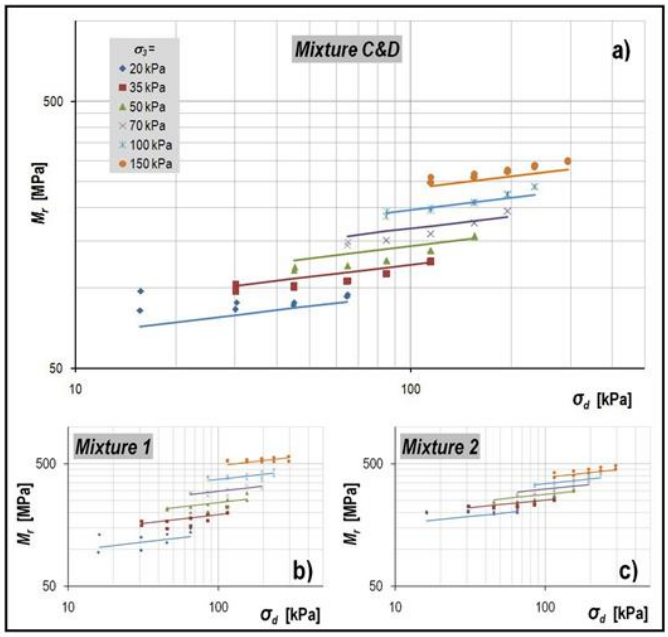
Obrázek 6: Buben pro zkoušku LA [14]

3.4 ZAHRANIČNÍ ZKUŠENOSTI S VYUŽITÍM ALTERNATIVNÍCH MATERIÁLŮ DO PODKLADNÍCH VRSTEV

Snaha využívat recyklovaných stavebních materiálů ve stavebnictví je, vzhledem k objemu jejich produkce, vysoká ve většině hospodářsky rozvinutých zemích. Cihelný recyklát, který byl zkoušen v rámci této bakalářské práce není zdaleka jediným recyklátem, který připadá v úvahu pro použití do konstrukce vozovky (podkladní vrstvy).

3.4.1 ITÁLIE A FUNKČNÍ ZKOUŠENÍ NESTMELENÝCH SMĚSÍ

Na univerzitách v Italských městech Perugia a L'Aquila byl proveden výzkum, který si stanovil za cíl porovnat mechanické vlastnosti recyklovaných materiálů s běžnými materiály z drceného kameniva. Recyklované směsi zkoušeli proto, aby prokázali jejich použitelnost v podkladních vrstvách pozemních komunikací, shodně jako tato bakalářská práce. Jako základní parametr byl brán výsledek ze zatěžování v triaxiálním přístroji, tedy modul pružnosti Mr. Zdůvodnění k použití triaxiální zkoušky vidí tato studie hlavně v simulaci skutečného zatížení zhotovených nestmelených vrstev na stavbě. Výsledkem je, že směs zhotovená z materiálu C & D (Construction and Demolition) se, i přes malý obsah hydraulických pojiv jako je vápno, chová jako směs z drceného kameniva, a mechanické vlastnosti jsou dostatečné pro zhotovování vrstev z těchto směsí. [15]

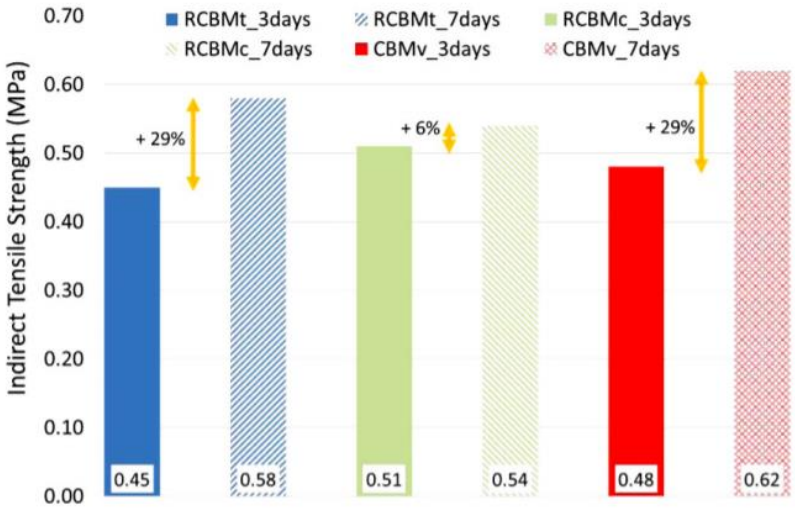


Graf 1: Srovnání modulů pružnosti (Itálie) [15]

Pozn. Směsi 1 a 2 jsou referenční, směs C & D je směs z recyklátu.

3.4.2 ITÁLIE A PODKLADNÍ VRSTVY STMELENÉ CEMENTEM

V Itálii se také běžně provádí podkladní vrstvy stmelené cementem (CBM=Cement Bound Mixtures). Jedná se sice o vrstvu hydraulicky stmelenou, ale i do této vrstvy je snaha místo nově vyrobeného drceného kameniva použít náhradní materiál. Byl proveden výzkum, který porovnával mechanické vlastnosti klasické vrstvy CBM s alternativní RCBMs (Recycled Cement Bound Mixtures for base layers), která byla zhotovena ve dvou verzích s různým výplňovým materiálem místo kameniva. Obě verze obsahovaly materiál označovaný C & D (Construction and Demolition), v jednom případě se jednalo o betonový recyklát ve druhém pak o cihelný recyklát. Závěrem je, že mechanické vlastnosti vrstev s recyklovaným výplňovým materiálem jsou sice horší, ale hodnoty jsou srovnatelné. Je však potřeba dodržet stálou jakost recyklovaných materiálů. Graf ukazuje výsledky zkoušky ITS (Indirect Tensile Strength = nepřímá pevnost v tahu). [16]

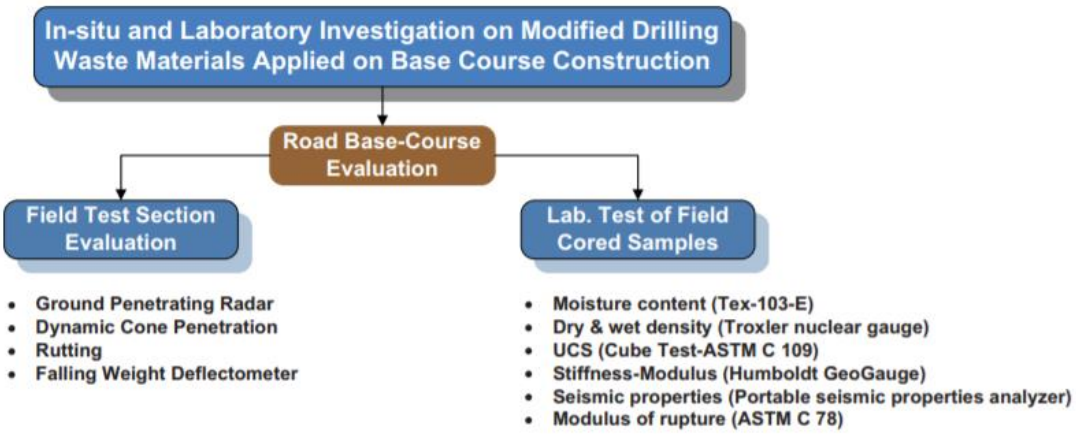


Graf 2: Výsledky zkoušky ITS (Itálie) [16]

Pozn. RCBMt = použitý cihelný recyklát
RCBMc = použitý betonový recyklát

3.4.3 VYUŽITÍ DRUHOTNÉHO MATERIÁLU Z VÝRUBU – SPOJENÉ STÁTY AMERICKÉ

Na ukázku toho, že není třeba se bát použít recyklované materiály do konstrukce vozovek lze použít i výzkum, který provedli vědci v Americkém státě Texas, kteří použili pro podkladní vrstvy komunikací materiál označovaný jako MDWMs (modified drilling waste materials) tedy odpadní materiál z vrtacích prací. Provedli řadu testů různými metodami jako GPR (Ground penetration radar), FWD (falling weight deflectometer), DPC (dynamic cone penetration) a došli k závěru, že je i tento materiál vhodný do konstrukce vozovek. [17]



Obrázek 7: Použité zkušební metody (USA) [17]

Na základě poznatků ze zahraničních výzkumů je důležité směřovat výzkum nestmelených směsí a využití alternativních materiálů i v České republice. Proto se v praktické části bakalářské práce zabývám možností využití tzv. nestandardních materiálů vzniklých při výrobě kameniva do podkladních vrstev vozovek.

4. PRAKTICKÁ ČÁST

V této kapitole budou popsány postupy a vyhodnocení zkoušek, které byly provedeny v laboratoři Ústavu pozemních komunikací, Fakulty stavební v Brně. Část obsahuje jednotlivé výsledky zkoušek všech čtyř ověřovaných materiálů (tabulky i grafy) a jejich vzájemné porovnání. Jednotlivé zkoušky i použité materiály jsou zdokumentované fotografiemi pro lepší představu o jejich stavu a kvalitě. Všechny použité zkušební postupy byly v souladu s platnými normami a předpisy.

4.1 POUŽITÝ ZKUŠEBNÍ MATERIÁL

V laboratorní části byly použity 4 různé materiály. Konkrétně to byly: štěrkodrť z lomu Plaňany jako referenční nestmelená směs (viz. obr. 8), zbytkový materiál z lomu Tachov (viz. obr. 9), zbytkový materiál z lomu Dolánky (viz. obr. 10) a recyklát (viz. obr. 11). Materiály budou již dále nazývány pracovními označeními Plaňany, Recyklát, Tachov a Dolánky.

Obrázek 8: Vzorek Plaňany

Obrázek 9: Vzorek Tachov

Obrázek 10: Vzorek Dolánky

Obrázek 11: Vzorek Recyklát betonový (recyklační linka DUFONEV, R.C., a.s.)

4.2 STANOVENÍ ZRNITOSTI – SÍTOVÝ ROZBOR

4.2.1 PODSTATA ZKOUŠKY

Zkoušení probíhalo dle normy ČSN EN 933–1 a ČSN EN 933–1 změna a 1. Podstata zkoušky je roztřídění a oddělení materiálu pomocí sady sít do několika frakcí se sestupnou velikostí otvorů. Otvory sít a počet sít se volí dle druhu vzorků a požadované přesnosti. Použitá metoda byla prosévání za sucha. [2]

Kamenivo se tedy roztřídí na jednotlivé frakce. Jednotlivé množiny zachycené na sítech se zváží a vypočte se jejich procentuální podíl k počáteční hmotnosti vzorku. Výsledky jsou vyhodnoceny do tzv. křivky (popř. čáry) zrnitosti pro jednotlivé materiály zvlášť (viz. graf 3 až graf 6). [18]

4.2.2 PŘÍPRAVA ZKOUŠKY

Pro provedení sítového rozboru byl po homogenizaci z každého materiálu odebrán vzorek o hmotnosti mezi 0,3 kg až 0,5 kg, který byl vysušen v sušárně při stálé teplotě 110 °C do ustálené hmotnosti. Po vysušení se vzorek nechal zchladnout na laboratorní teplotu a byla zaznamenána jeho hmotnost jako hodnota M1. Vysušený materiál byl nasypán na sestavený sloupec sít (horní

síto má největší velikost ok a pod dolním nejjemnějším sítem se ještě nachází dno). Na sloupec sít s materiálem se nasadí víko, aby nedošlo ke ztrátě jemných částic z důvodů prášení. Bylo použito mechanické prosévání pomocí vibračního přístroje, na kterém celý sloupec sít stojí (viz. obr. 12).

Obrázek 12: Vibrační prosévací přístroj se sadou sít

4.2.3 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

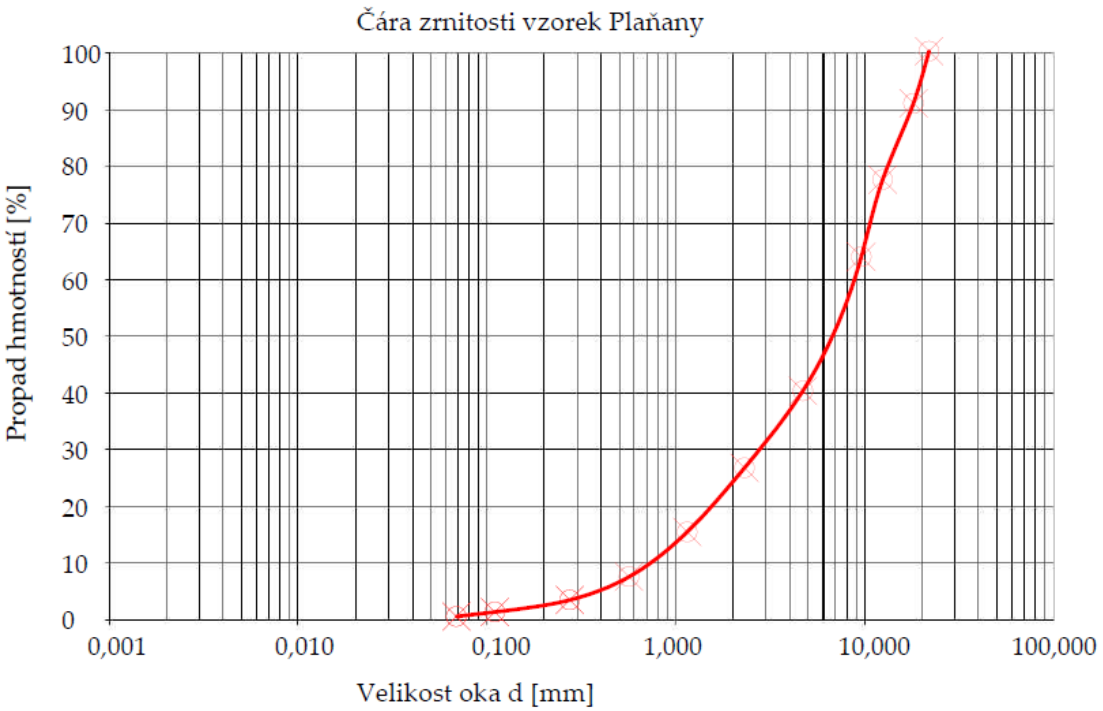
Po ukončení mechanického prosévání se nejprve odebralo horní síto s největší velikostí oka, materiál na něm zachycený byl ještě proset ručně, aby se dosáhlo maximální míry prosetí. A byla zaznamenána hmotnost množiny zrn zachycených na daném sítě jako hmotnost R1. Stejně se pokračovalo odebíráním zbylých sít se zaznamenáváním hmotností R2 – R10, a rovněž byla zaznamenána hmotnosti všech částic, které propadly i přes nejjemnější síto 0,063 mm až na dno jako hmotnost P. Všechny hodnoty byly zaznamenány v tabulce (viz. tabulka 2 až tabulka 5) z nichž byly zhotoveny grafy (graf. 3 až graf 6).

4.2.4 VÝSLEDKY ZKOUŠKY

- Vzorek Plaňany

Tabulka 2: Sítový rozbor (vzorek Plaňany)

Vzorek Plaňany (M1 = 451,9 g)			
OTVOR SÍTA	HMOTNOST ZŮSTATKU	% ZŮSTATKU	Σ % PROPADU
[mm]	[g]	[%]	[%]
16	40,9	9,1	90,9
11,2	60,9	13,5	77,4
8	61,4	13,6	63,8
4	106,7	23,6	40,2
2	61,8	13,6	26,6
1	51,3	11,3	15,3
0,5	35,5	7,9	7,4
0,25	18,6	4,1	3,3
0,125	9,4	2,1	1,2
0,063	3,7	0,8	0,4
0	1,7	0,4	
	Σ = 451,9 g	Σ = 100 %	

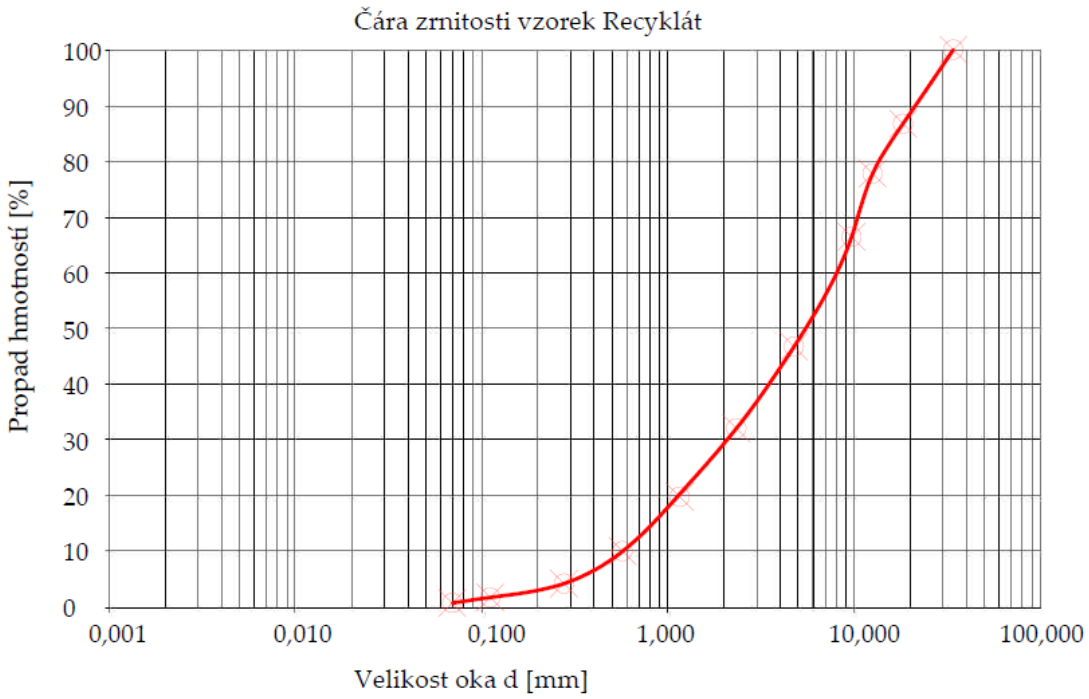


Graf 3: Čára zrnitosti (vzorek Plaňany)

- Vzorek Recyklát

Tabulka 3: Sítový rozbor (vzorek Recyklát)

Vzorek Recyklát (M1 = 378,9 g)			
OTVOR SÍTA	HMOTNOST ZŮSTATKU	% ZŮSTATKU	Σ % PROPADU
[mm]	[g]	[%]	[%]
16	50,5	13,3	86,7
11,2	34,1	9	77,7
8	43,3	11,4	66,3
4	74,7	19,7	46,6
2	55,6	14,7	31,9
1	46,7	12,3	19,6
0,5	37	9,8	9,8
0,25	22,1	5,8	4
0,125	9,4	2,5	1,5
0,063	3,6	1	0,5
0	1,9	0,5	
	Σ = 378,9 g	Σ = 100 %	

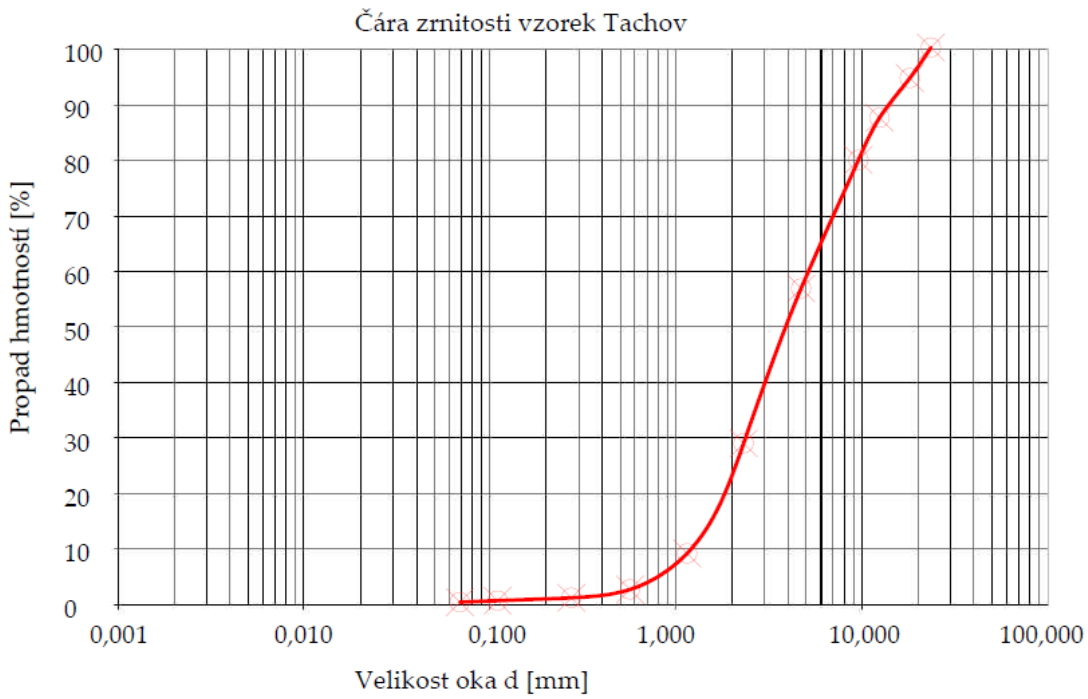


Graf 4: Čára zrnitosti (vzorek Recyklát)

- Vzorek Tachov

Tabulka 4: Sítový rozbor (vzorek Tachov)

Vzorek Tachov (M1 = 390,6 g)			
OTVOR SÍTA	HMOTNOST ZŮSTATKU	% ZŮSTATKU	Σ % PROPADU
[mm]	[g]	[%]	[%]
16	21,2	5,4	94,6
11,2	28,2	7,2	87,4
8	29,7	7,6	79,8
4	90,3	23,1	56,7
2	108,7	27,9	28,8
1	77,6	19,8	9
0,5	25,4	6,5	2,5
0,25	5,9	1,5	1
0,125	2	0,5	0,5
0,063	1	0,3	0,2
0	0,6	0,2	
	Σ = 390,6 g	Σ = 100 %	

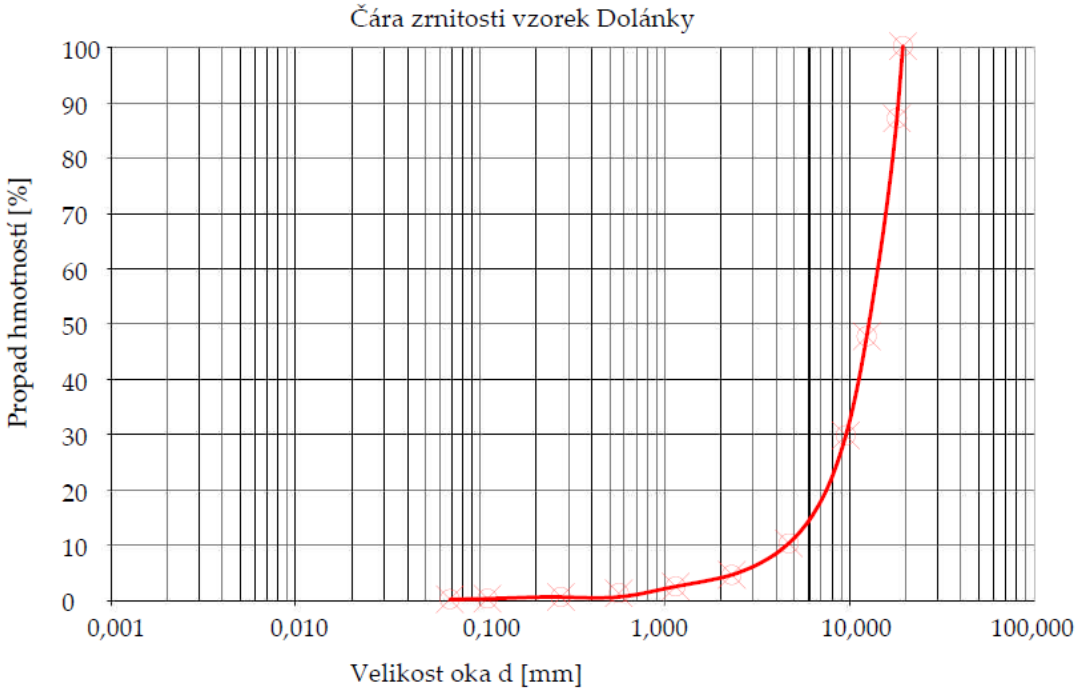


Graf 5: Čára zrnitosti (vzorek Tachov)

- Vzorek Dolánky

Tabulka 5: Sítový rozbor (vzorek Dolánky)

Vzorek Dolánky (M1 = 407,5 g)			
OTVOR SÍTA	HMOTNOST ZŮSTATKU	% ZŮSTATKU	Σ % PROPADU
[mm]	[g]	[%]	[%]
16	52,9	13	87
11,2	160,6	39,4	47,6
8	72,9	17,9	29,7
4	79,3	19,5	10,2
2	23,2	5,7	4,5
1	8,7	2,1	2,4
0,5	4,8	1,2	1,2
0,25	3	0,7	0,5
0,125	1,4	0,3	0,2
0,063	0,4	0,1	0,1
0	0,3	0,1	
	Σ = 407,5 g	Σ = 100 %	



Graf 6: Čára zrnitosti (vzorek Dolánky)

4.3 ZKOUŠKY ZHUTNITELNOSTI

4.3.1 PODSTATA ZKOUŠKY

Pro stanovení zhutnitelnosti všech čtyř materiálů byla zvolena zkouška Proctor modifikovaný. Zkoušení probíhalo dle normy ČSN EN 13286–2. Bližší teoretické vysvětlení zkoušky se nachází v teoretické části v kapitole 3.3 Zkoušení nestmelených směsí.

4.3.2 POPIS ZKOUŠKY

Pro všechny materiály byla použita zkušební forma s průměrem 100 mm a výškou 120 mm. Hutnění probíhalo ve třech vrstvách a každá vrstva byla hutněna 42 údery pěchu o hmotnosti 3 kg, který dopadal z výšky 457 mm. 42 úderů vychází z podmínky celkové hutnící energie rovné 2,7 MJ * m^{-3} (viz. následující výpočet).

$$E = \frac{m \cdot g \cdot h \cdot n \cdot i}{V} \qquad i = \frac{E \cdot V}{m \cdot g \cdot n \cdot h} \qquad i = \frac{2{,}7 \cdot 942}{4{,}5 \cdot 9{,}81 \cdot 3 \cdot 457}$$

i ≅ 42 úderů

Obrázek 13: Zhutňovací zařízení na provádění Proctorovy zkoušky

4.3.3 PRŮBĚH ZKOUŠKY

Z každého jednotlivého materiálu bylo nachystáno 5 dílčích vzorků, které byly zváženy při své aktuální vlhkosti a byly dále ještě vlhčeny 2; 3; 4; 5 a 6 hmotnostními procenty vody. Z každého různě vlhkého vzorku bylo zhutněno v hutnící formě těleso po třech vrstvách s tím, že horní vrstva nesmí přesáhnout hranu formy o více než 10 mm. Po zhutnění byl odebrán horní prstenec a těleso bylo špachtlí zarovnáno do roviny. Celá forma i s materiálem byla zvážena, následně byla odečtena hodnota, již dříve zvážené, samotné formy a byla tak stanovena hmotnost zhutněného materiálu. Dále byla forma rozebrána, těleso rozpůleno a přibližně z jeho středu byly odebrány dva vzorky pro stanovení skutečné vlhkosti materiálu. Tyto vzorky byly zváženy a v keramických miskách vysušeny v sušárně do ustálené hmotnosti. Vlhkost byla stanovena dle následujícího výpočtu. [19]

$$w = \frac{m_w - m_d}{m_d}$$

w	je	dílčí vlhkost jednoho ze dvou odebraných vzorků [%]
m_w		hmotnost vzorku před vysušením [kg]
m_d		hmotnost vzorku po vysušení [kg]

Se znalostí skutečné vlhkosti směsi lze stanovit objemová hmotnost zhutněné suché směsi ρ_d.

$$\rho_d = \frac{100 \cdot \rho}{100 + w}$$

ρ_d	je	objemová hmotnost zhutněné suché směsi [$kg \cdot m^{-3}$]
ρ		objemová hmotnost vlhké směsi [$kg \cdot m^{-3}$]
w		vlhkost směsi [%]

Tento postup byl zopakován pro všech 5 dílčích vzorků o různých vlhkostech a rovněž pro všechny 4 materiály.

4.3.4 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

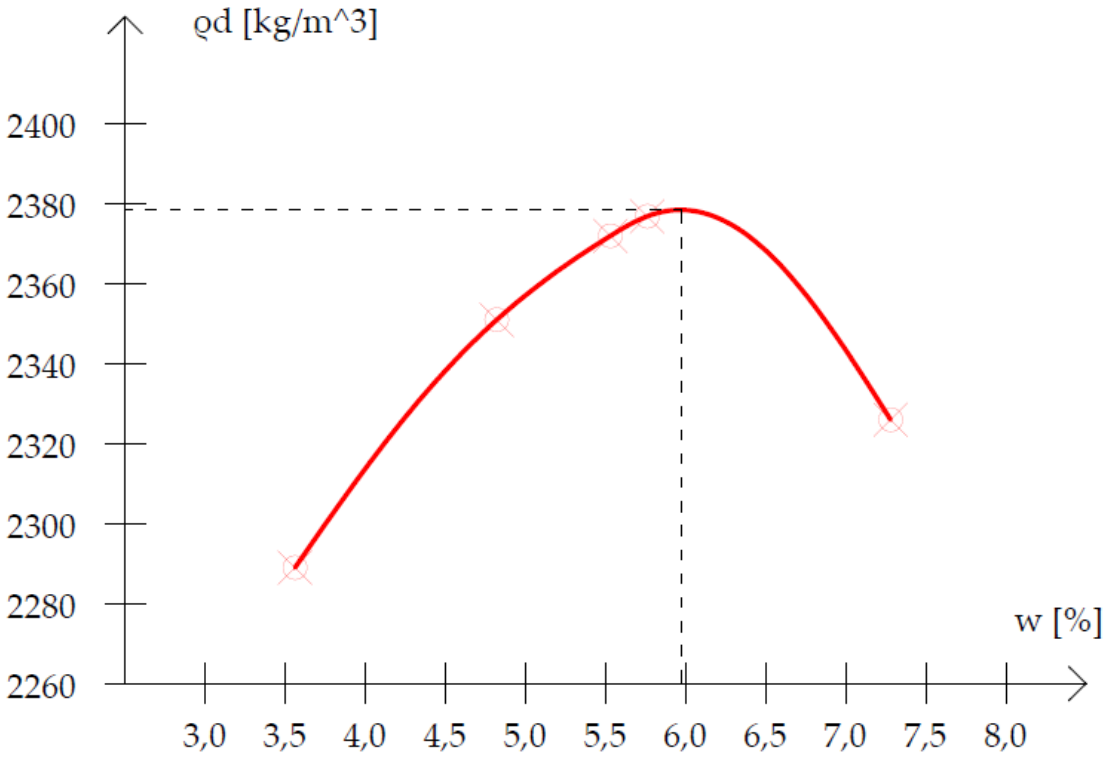
Cílem Proctorovy zkoušky je stanovit maximální objemovou hmotnost, které směs může dosáhnout při optimální vlhkosti. Z každého jednotlivého měření lze vytvořit jeden bod grafu. Spojením všech bodů grafu hladkou křivkou získáme funkci, která znázorňuje vliv vlhkosti na objemové hmotnosti, přičemž nalezením extrému dostaneme požadované výsledky.

4.3.5 VÝSLEDKY ZKOUŠKY

- Vzorek Plaňany

Tabulka 6: Proctor modifikovaný (vzorek Plaňany)

m	md	mw	w	Øw	M	ρ	ρd
[g]	[g]	[g]	[%]	[%]	[g]	[kg*m3]	[kg*m3]
94,2	90,9	3,3	3,63	3,56	2233	2370	2289
104,0	100,5	3,5	3,48				
98,5	93,9	4,6	4,90	4,82	2321	2464	2351
103,8	99,1	4,7	4,74				
110,3	105,1	5,2	4,95	5,53	2358	2503	2372
107,7	101,5	6,2	6,11				
111,3	105,3	6,0	5,70	5,75	2368	2514	2377
113,0	106,8	6,2	5,81				
94,0	87,1	6,9	7,92	7,28	2351	2496	2326
131,7	123,5	8,2	6,64				

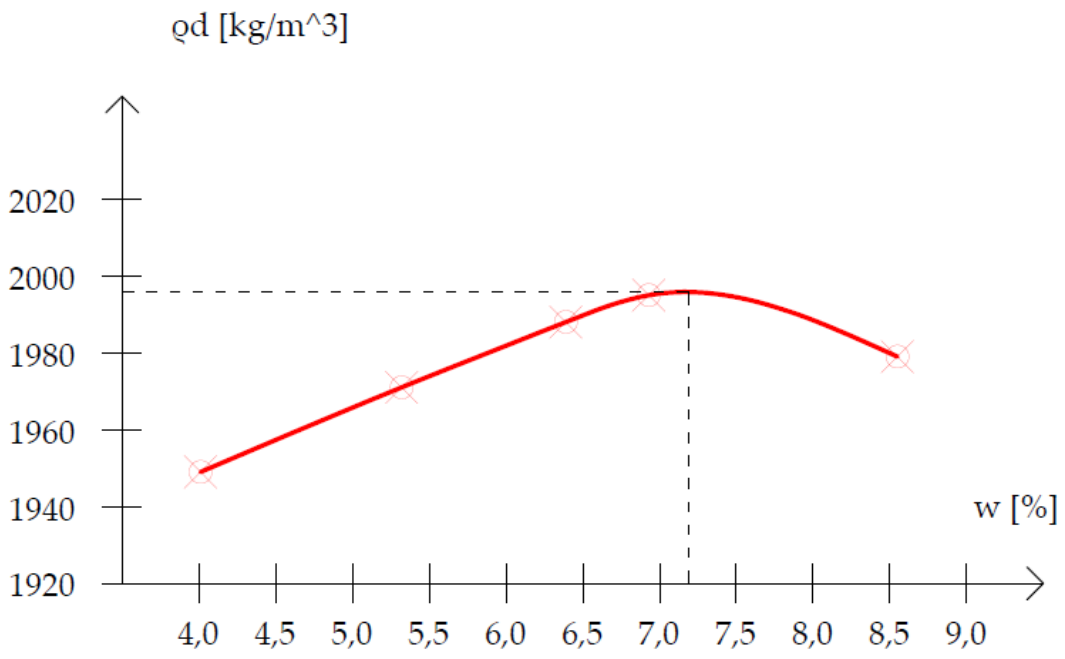


Graf 7: Proctor modifikovaný (vzorek Plaňany)

- Vzorek recyklát

Tabulka 7: Proctor modifikovaný (vzorek Recyklát)

m	md	mw	w	Øw	M	ρ	ρd
[g]	[g]	[g]	[%]	[%]	[g]	[kg*m3]	[kg*m3]
97,4	93,8	3,6	3,84	4,01	1910	2028	1949
102,0	97,9	4,1	4,19				
109,2	104,2	5,0	4,80	5,32	1955	2075	1971
105,1	99,3	5,8	5,84				
117,8	110,8	7,0	6,32	6,39	1992	2115	1988
98,9	92,9	6,0	6,46				
105,8	98,4	7,4	7,52	6,93	2010	2134	1995
107,2	100,8	6,4	6,35				
98,1	90,8	7,3	8,04	8,55	2024	2149	1979
105,9	97,1	8,8	9,06				

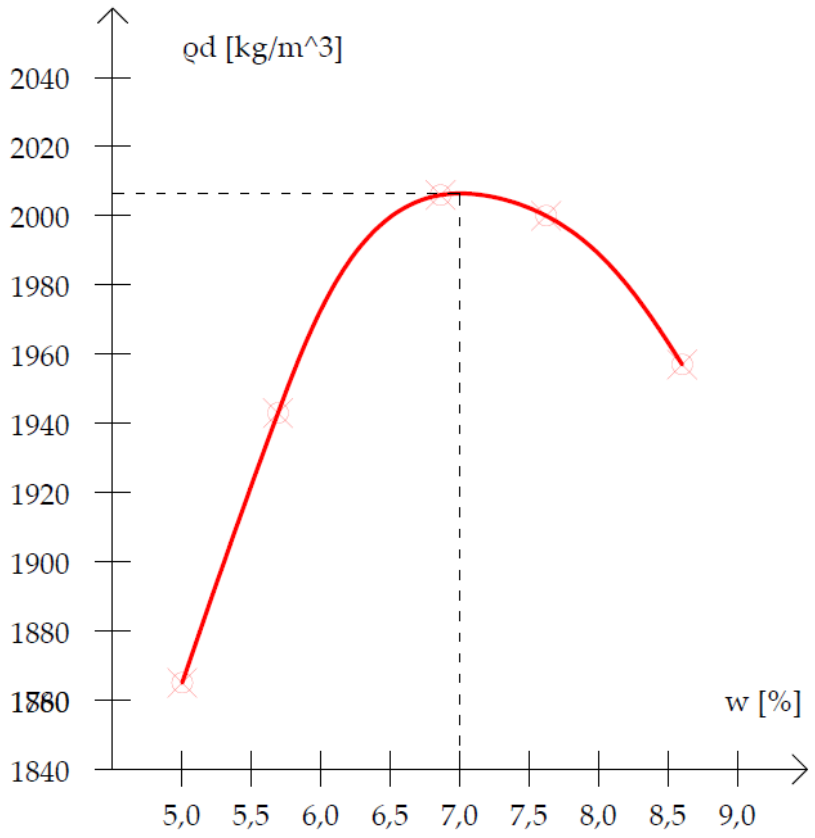


Graf 8: Proctor modifikovaný (vzorek Recyklát)

- Vzorek Tachov

Tabulka 8: Proctor modifikovaný (vzorek Tachov)

m	md	mw	w	Øw	M	ρ	ρd
[g]	[g]	[g]	[%]	[%]	[g]	[kg*m3]	[kg*m3]
92,9	88,5	4,4	4,97	5,00	1845	1959	1865
91,8	87,4	4,4	5,03				
113,6	107,4	6,2	5,77	5,69	1934	2053	1943
111,2	105,3	5,9	5,60				
95,8	89,9	5,9	6,56	6,86	2019	2143	2006
98,8	92,2	6,6	7,16				
93,3	87,1	6,2	7,12	7,62	2028	2153	2000
102,5	94,8	7,7	8,12				
99,7	91,3	8,4	9,20	8,60	2002	2125	1957
120,1	111,2	8,9	8,00				

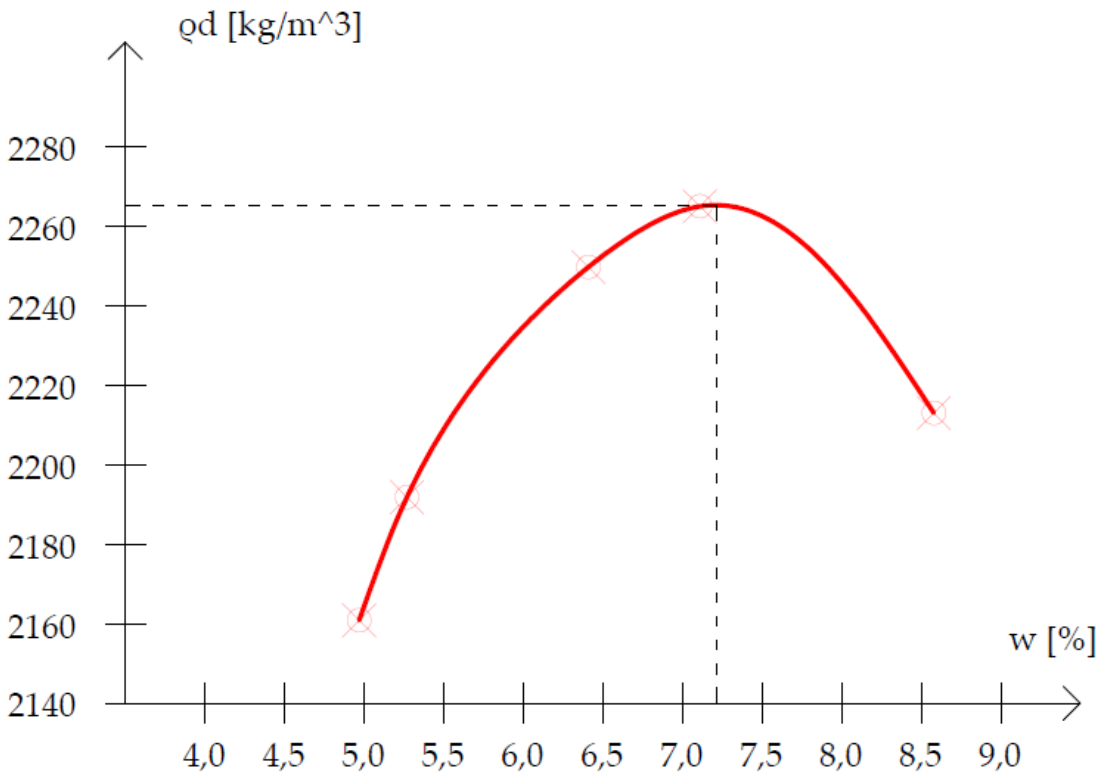


Graf 9: Proctor modifikovaný (vzorek Tachov)

- Vzorek Dolánky

Tabulka: Proctor modifikovaný (vzorek Dolánky)

m	md	mw	w	Øw	M	ρ	ρd
[g]	[g]	[g]	[%]	[%]	[g]	[kg*m3]	[kg*m3]
99,4	93,6	5,8	6,20	4,97	2137	2269	2161
108,2	104,3	3,9	3,74				
98,2	93,5	4,7	5,03	5,26	2174	2308	2192
99,7	94,5	5,2	5,50				
122,6	115,3	7,3	6,33	6,40	2254	2393	2249
126,6	118,9	7,7	6,48				
100,2	93,3	6,9	7,40	7,11	2285	2426	2265
114,3	107,0	7,3	6,82				
99,1	90,7	8,4	9,26	8,58	2264	2403	2213
106,5	98,7	7,8	7,90				



Graf 10: Proctor modifikovaný (vzorek Dolánky)

4.3.6 SOUHRNNÉ VÝSLEDKY

Tabulka 10: Výsledky zkoušky zhutnitelnosti

Vzorek	Optimální vlhkost [%]	Max. objemová hmotnost [kg*m-3]
Plaňany	6,0	2380
Recyklát	7,2	2000
Tachov	7,0	2010
Dolánky	7,2	2270

4.4 STANOVENÍ POMĚRU ÚNOSNOSTI – IBI A CBR

4.4.1 PODSTATA ZKOUŠKY

Jedná se o penetrační zkoušku, při níž je cílem zjistit odpor zhutněného materiálu proti vniku trnu. Bližší teoretické vysvětlení zkoušky se nachází v teoretické části v kapitole 3,3 Zkoušení nestmelených směsí. Zkouška byla

prováděna dle normy ČSN EN 13286–47.

4.4.2 POPIS ZKOUŠKY

Pro všechny materiály byla použita zkušební forma o průměru 150 mm a výšce 120 mm. Tělesa byla zkoušena v lisu s ocelovým nástavcem (trnem) jehož hrot je proveden z tvrzené oceli.

4.4.3 PRŮBĚH ZKOUŠKY

Pro každý jednotlivý materiál bylo provedeno zjištění vlhkosti odebráním několika vzorků, jejich zvážením, vysušením na ustálenou teplotu a opětovným zvážením. Materiál se dovlhčil na optimální vlhkost, která byla již dříve zjištěna Proctorovou zkouškou. Byla sestavena forma (typ B) do níž byl následně ručně hutněn materiál. Hutněno bylo v 5 vrstvách po 56 úderech na vrstvu, ručním pěchem o hmotnost 4,5 kg z výšky 457 mm. Po zhutnění poslední vrstvy byl odebrán krycí prstenec a těleso bylo zarovnáno špachtlí do roviny. Na zarovnané ploše byla ihned provedena zkouška IBI (immediate bearing index = okamžitý index únosnosti). Tím vznikl otvor po vtlačení trnu, který byl zadělán zbylým materiálem. Dále byla forma zbavena podložky a zhutněný materiál jen s tělem formy byl položen do vodní lázně, v níž se saturoval po dobu min. 4 dnů (96 hodin). Zabránění rozplavení částic bylo savým papírem. Po vyjmutí vzorku z vodní lázně na něm byla provedena zkouška CBR (california bearing ratio), jedná se o identický postup, jen prováděný na saturovaném (vyzrálém) vzorku. [20]

4.4.4 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

CBR i IBI se počítá pomocí shodného vztahu, v němž se liší pouze hodnota standardní síly, se kterou je naměřená síla v poměru.

$$CBR\ (IBI) = \frac{F}{F_s} \cdot 100 \quad [\%]$$

CBR (IBI)	je	index únosnosti stanovený po době zrání (ihned)
F		síla potřebná pro zatlačení trnu do stanovené hloubky
F_s		standardní síla potřebná k zatlačení trnu

Tabulka 11: Normové síly pro CBR i IBI [5]

Penetrace [mm]	Standartní síla pro CBR i IBI [kN]
2,5	13,2
5,0	20,0

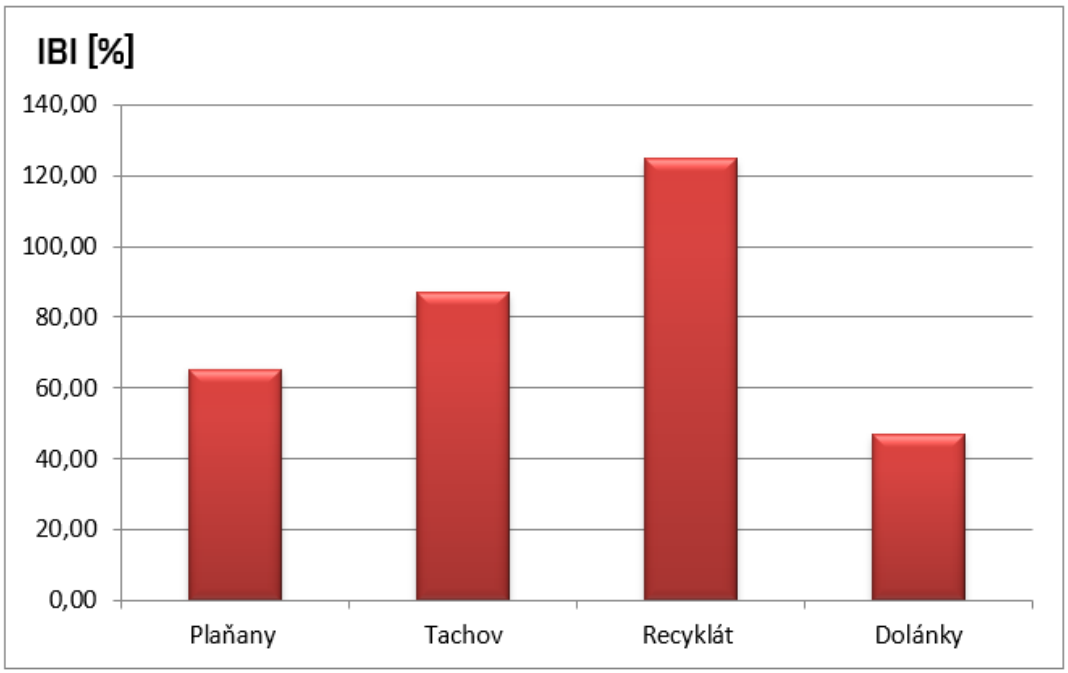
Výsledná hodnota CBR nebo IBI je pak větší z hodnot stanovených pro penetrace 2,5 mm a 5,0 mm.

Tabulka 12: Naměřené síly při daných penetracích (IBI)

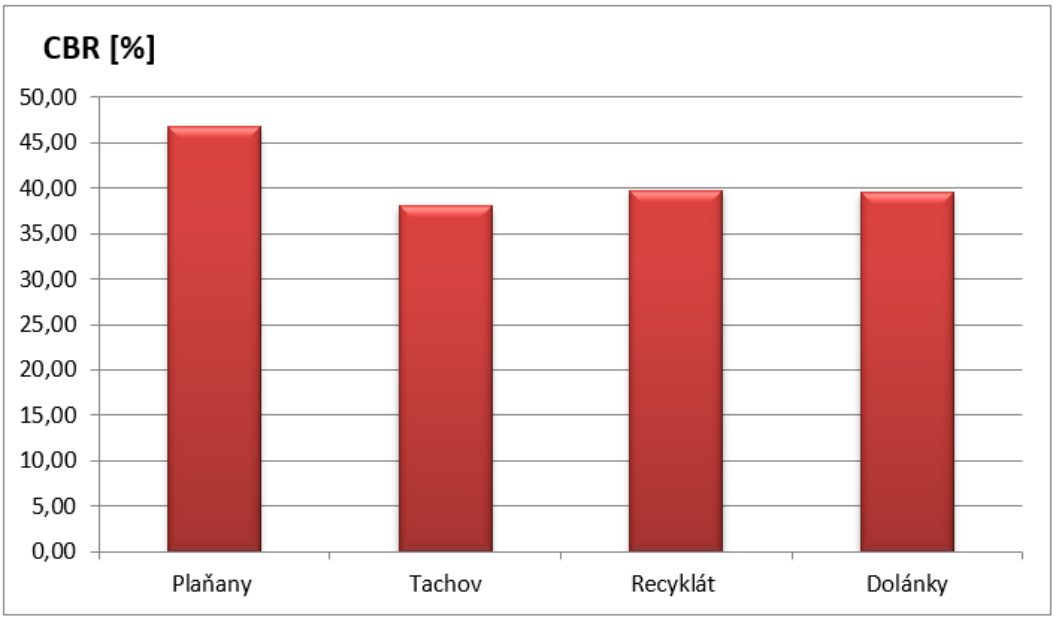
Vzorek	Síla při penetraci 2,5 mm [kN]	Síla při penetraci 5,0 mm [kN]
Plaňany	2,24	13,05
Recyklát	9,64	26,93
Tachov	6,47	17,40
Dolánky	2,14	9,35

Tabulka 13: Naměřené síly při daných penetracích (CBR)

Vzorek	Síla při penetraci 2,5 mm [kN]	Síla při penetraci 5,0 mm [kN]
Plaňany	5,23	9,35
Recyklát	4,53	7,95
Tachov	3,99	7,62
Dolánky	5,08	7,9



Graf 11: Výsledky zkoušky IBI



Graf 12: Výsledky zkoušky CBR

4.5 ZKOUŠKA ODOLNOSTI PROTI DRCENÍ (OTLUKOVOSTI) V BUBNU (LA)

4.5.1 PODSTATA ZKOUŠKY

Jedná se o zkoušku, která má za úkol ověřit geometrickou stálost zrn v dané směsi při zatěžování mechanickými rázy. Zkouška spočívá v mechanickém zatěžování materiálu ocelovými koulemi, které do něj naráží při otáčení

zkušebního bubnu. [3]

4.5.2 POPIS ZKOUŠKY

Úzká frakce kameniva (8/16 nebo 10/14) se zbaví nadsítného a podsítného a vysuší se. Vloží se do otlukového bubnu zhotoveného z konstrukční oceli běžně rozměrů 508 ± 5 mm (délka) a 711 ± 5 mm (průměr) a přidá se do bubnu 11 ocelových koulí každá o průměru mezi 45 mm a 49 mm, každá koule musí vážit 400 g a 445 g a všechny dohromady musí vážit mezi 4 690 g a 4 860 g. [3] [21]

4.5.3 PRŮBĚH ZKOUŠKY

Každý ze čtyř materiálů byl proset dle ČSN EN 933–1 k získání úzké frakce 8/16, která se následně sušila v sušárně při 110 ± 5 °C. Vysušený materiál byl zvážen, ale vzhledem k nedostatku materiálu nebylo u všech možné použít vzorek o hmotnosti 5 000 g a byly proto použity i redukované vzorky. Jednotlivé vzorky byly postupně vloženy do zkušebního bubnu společně s 11 ocelovými koulemi a byl spuštěn mechanizmus, který s bubnem udělá 500 otáček, rychlostí 31–33 otáček za minutu. Po skončení práce bubnu a sednutí jemných zrn, která v bubnu poletují, byl zkoušený vzorek materiálu vybrán a byl znovu proset, tentokrát přes síto vel. 1,6 mm. Podíl zrn zachycený na sítu 1,6 mm byl zvážen. Součinitel LA byl pak vypočten dle následující rovnice: [3] [22]

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

LA	je	součinitel Los Angeles
m	je	hmotnost všech zrn zachycených na sítě 1,6 mm

Hodnoty 5 000 a 50 v rovnici jsou koeficienty odpovídající použité hmotnosti vzorku 5 000 g, tyto byly variovány podle hmotnosti daného redukovaného vzorku.

Tabulka 14: Výsledky zkoušky Los Angeles

Vzorek	Hmotnost zkuš. vzorku [g]	Hmotnost na sítě 1,6 mm [g]	Součinitel LA [-]
Plaňany	2200	1388	37
Recyklát	5000	2978	40
Tachov	3500	2312	34
Dolánky	5000	3845	23

Obrázek 14: Prosévací zařízení se sadou sít

5. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Nejdůležitějším podkladem pro zhodnocení výsledků jsou zkoušky okamžitého indexu únosnosti a kalifornského poměru únosnosti. Jejich vzájemné srovnání u jednoho vzorku navíc ukazuje, jak je daný materiál citlivý na změnu vlhkosti. Dále pak vyhodnocení zkoušky otlukovosti v bubnu (Los Angeles) odhaluje možné technologické potíže na staveništi, a to problém s hutněním mocnější vrstvy těžkými válci.

CBR u referenčního materiálu (Plaňany) vychází sice více než u ostatních vzorků, ale i tak je to pouze 47 %, což je na hrubozrnný drcený materiál velmi málo, na vině může být samotná metoda zkoušení, která není pro tyto materiály nejvhodnější. Recyklát vychází vysoce únosný při ideální vlhkosti, potom je IBI = 125 %, ale po saturaci tato hodnota klesá na 40 % CBR. Vzorek Tachov je na tom podobně, ale hodnota neklesá tak dramaticky (z IBI 87 % na CBR 38%). Naopak vzorek Dolánky vykazuje nízkou citlivost vůči vodě, protože nízká hodnota IBI 47 % téměř neklesá na hodnotu CBR 40 %. Pro vyšší přesnost výsledků by bylo vhodné zkoušet více těles zhotovených z daných materiálů, protože jak u zkoušky IBI, tak u zkoušky CBR je možné, že dojde k zaklínění zrna přímo v oblasti, kde dosedá trn lisu, nebo naopak může dojít k rozvolnění oblasti pod trnem, při nevhodném uspořádání zrn ve středu formy.

Výsledky zkoušky Los Angeles ukazují přibližnou vyrovnanost v odolnosti proti otluku u materiálů Plaňany, Recyklát a Tachov (37 %, 40 % a 34 %), lepšího výsledku dosahuje jen vzorek Dolánky (23 %).

Tabulka 15: Souhrnné zhodnocení výsledků

Vzorek	Opt. vlhkost [%]	Max. objemová hm. [kg/m3]	IBI [%]	CBR [%]	LA [%]
Plaňany	6,0	2380	65	47	37
Recyklát	7,2	2000	125	40	40
Tachov	7,0	2010	87	38	34
Dolánky	7,2	2270	47	40	23

6. ZÁVĚR

Při porovnání všech 3 alternativních materiálů s materiálem referenčním vycházejí výsledky velice podobně. Únosnost stanovovaná zkouškou CBR se liší jen velmi nepatrně, a to v řádu jednotek, při zkouškách IBI vyházejí dva z nich dokonce výrazně lepší než zkoušená štěrkodrť. Všechny 3 materiály bezpečně dosáhly hranice 20 % CBR, která je minimem pro to, aby mohly být posuzovány jako mechanicky zpevněná zemina (MZ) a použity ve spodní podkladní vrstvě. Využitelnost těchto materiálů by proto měla být, jak se předpokládalo v cílech práce, hlavně ve spodní podkladní vrstvě vozovek s nižší třídou dopravního zatížení (III ~ VI). Vzhledem k výsledkům zkoušky Los Angeles by neměl být problém provádět i mocnější vrstvy z těchto materiálů.

Zkoušení únosnosti metodou CBR (IBI) nemusí dávat spolehlivé výsledky, které by přesně odpovídaly únosnosti vrstvy ze stejného materiálu provedené na stavbě. Náhodné rozmístění relativně velkých zrn v malé formě může způsobit velký pokles i nárůst únosnosti, který neodpovídá realitě. Rovněž materiály jako štěrkodrť vykazují velkou citlivost na přesné a rovnoměrné navlhčení, které je při provádění zkoušky obtížné dodržet. Zkouška je daleko vhodnější pro jemnozrnné směsi, tedy pro materiály, kvůli kterým byla původně vyvinuta.

Pokud by se našla ochota a snaha investorů intenzivněji používat alternativní materiály v konstrukčních vrstvách méně významných pozemních komunikací, bylo by vhodné rozčlenit směsi pro mechanicky zpevněnou zeminu na více kategorií (zrnité materiály, recykláty, hlinité materiály aj.). Nebo definovat zcela nové pojmy v rámci nestmelených podkladních vrstev, do kterých by bylo možné je zatřídit, stanovit pro ně podmínky a technologické postupy.

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] Adámek, J. et al.*: Stavební materiály. Brno: skripta FAST VUT v Brně, Akademické nakladatelství CERM, 1997. 205 s*

[2] ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Praha: Český normalizační institut, 1999.

[3] ČSN EN 1097-2. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 2: Metody pro stanovení odolnosti proti drcení*. Praha: Český normalizační institut, 2010.

[4] 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, 2005.

[5] 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,2005.

[6] Stehlík, D.: *Praktické aplikace v pozemních komunikacích-Modul 07: Nestmelené podkladní vrstvy, skripta FAST VUT v Brně*: Brno 2006

[7] *Dálnice-Silnice.cz* [online]. [04. 05. 2018]. Dostupné z http://www.dalnice-silnice.cz/Fotky/D11/D11_07.jpg

[8] *Nákladní autodoprava Macalík* [online]. [04. 05. 2018]. Dostupné z http://www.autodopravamacalik.cz/sterky-pisky.html

[9] Slezák, J.: *Vliv vrstvy obsypového materiálu sondy na citlivost měření metodou EIS.* Brno, 2013. 78 s., 5 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí

práce doc. Ing. Jana Pařílková, CSc..

[10] Stehlík, D. Šperka, P. Puda, A.: *BM001 Pozemní komunikace I – Zkoušení zemin a materiálů v podloží pozemní komunikace – Zhutnitelnost, CBR, IBI*. Brno 27. 9. 2016 Vysoké učení technické v Brně

[11] Zajíček, J. et al.*: Technologie stavby vozovek. Praha 2014. 394 s*

[12] Kenneth, B. Woods.: *Highway Engineering Handbook*. USA, 1960.

[13] *SILNICE ŽELEZNICE* [online]. [17. 05. 2018]. Dostupné z http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/recyklovane-stavebni-materialy-do-stmelenych-smesi-podkladnich-vrstev-pozemnich-komunikaci/

[14] *SILAP* [online]. [17. 05. 2018]. Dostupné z http://www.silap .cz/?category_name=stroje

[15] G, Cerni. S, Colagrande.: *Resilient modulus of recycled aggregates obtained by means of dynamic tests in a triaxial apparatus.* (2012), Dostupné z https://www.sciencedirect.com/

[16] P. Tataranni et al., *A laboratory and field study on 100 % Recycled Cement Bound 50 ixtur efor base layers, Int. J. Pavement Res. Technol*. (2017), Dostupné z https://www.sciencedirect.com/

[17] C,-S, Shon. C,K, Estakhri.: *In-situ and laboratory investigation of modified drilling waste materials applied on base-course construction.* (2017), Dostupné z https://www.sciencedirect.com/

[18] Šefránková, R.: *Úprava zemin v podloží vozovek.* Brno, 2017. 68 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

[19] Hepner, U.: *Návrh stmelených zmesí do vozoviek*. Brno, 2016. 50 s.,

Bakalárská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedúci práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

[20] Kotas, V.: *Experimentální zkoušení modulu pružnosti podkladních vrstev vozovek*. Brno, 2017. 63 s., 52 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D

[21] Varaus, M.*: Pozemní komunikace II modul 2 KAMENIVO. Brno: skripta FAST VUT v Brně, 2005. 17 s*

[22] Antošová, K.: *Recyklované kamenivo do pozemních komunikací.* Brno, 2015. 93 s., 128 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Pokládka mechanicky zpevněného kameniva [7] 16
Obrázek 2: Štěrkodrť [8] 18
Obrázek 3: Princip hutnění [10] 19
Obrázek 4: Lis na provádění zkoušek CBR a IBI 21
Obrázek 5: Triaxiální přístroj [18] 22
Obrázek 6: Buben pro zkoušku LA [19] 23
Obrázek 7: Použité zkušební metody (USA) [22] 26
Obrázek 8: Vzorek Plaňany 27
Obrázek 9: Vzorek Tachov 28
Obrázek 10: Vzorek Dolánky 28
Obrázek 11: Vzorek Recyklát 29
Obrázek 12: Vibrační deska se sadou sít 30
Obrázek 13: Stroj na provádění Proctorovy zkoušky 35
Obrázek 14: Prosévací zařízení se sadou sít 46

9. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Odhadované únosnosti jednotlivých nestmelených vrstev 18
Tabulka 2: Sítový rozbor (vzorek Plaňany) 31
Tabulka 3: Sítový rozbor (vzorek Recyklát) 32
Tabulka 4: Sítový rozbor (vzorek Tachov) 33
Tabulka 5: Sítový rozbor (vzorek Dolánky) 34
Tabulka 6: Proctor modifikovaný (vzorek Plaňany) 37
Tabulka 7: Proctor modifikovaný (vzorek Recyklát) 38
Tabulka 8: Proctor modifikovaný (vzorek Tachov) 39
Tabulka 9: Proctor modifikovaný (vzorek Dolánky) 40
Tabulka 10: Výsledky zkoušky zhutnitelnosti 41
Tabulka 11: Normové síly pro CBR i IBI [5] 43
Tabulka 12: Naměřené síly při dané penetraci (IBI) 43
Tabulka 13: Naměřené síly při dané penetraci (CBR) 43
Tabulka 14: Výsledky zkoušky Los Angeles 46
Tabulka 15: Souhrnné zhodnocení výsledků 47

10. SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Srovnání modulů pružnosti (Itálie 1) [21] 24
Graf 2: Výsledky zkoušky ITS (Itálie 2) [20] 25
Graf 3: Čára zrnitosti (vzorek Plaňany) 31
Graf 4: Čára zrnitosti (vzorek Recyklát) 32
Graf 5: Čára zrnitosti (vzorek Tachov) 33
Graf 6: Čára zrnitosti (vzorek Dolánky) 34
Graf 7: Proctor modifikovaný (vzorek Plaňany) 38
Graf 8: Proctor modifikovaný (vzorek Recyklát) 39
Graf 9: Proctor modifikovaný (vzorek Tachov) 40
Graf 10: Proctor modifikovaný (vzorek Dolánky) 41
Graf 11: Výsledky zkoušky IBI 44
Graf 12: Výsledky zkoušky CBR 44

11. PŘÍLOHY – PROTOKOLY ZKOUŠEK

Sítový rozbor Plaňany: ..... str. 56
Sítový rozbor Recyklát: ..... str. 57
Sítový rozbor Tachov: ..... str. 58
Sítový rozbor Dolánky: ..... str. 59
Odolnost proti drcení Plaňany: ..... str. 60
Odolnost proti drcení Recyklát: ..... str. 61
Odolnost proti drcení Tachov: ..... str. 62
Odolnost proti drcení Dolánky: ..... str. 63
Proctorova zkouška Plaňany: ..... str. 64
Proctorova zkouška Recyklát: ..... str. 65
Proctorova zkouška Tachov: ..... str. 66
Proctorova zkouška Dolánky: ..... str. 67
Okamžitý index únosnosti Plaňany: ..... str. 68
Okamžitý index únosnosti Recyklát: ..... str. 69
Okamžitý index únosnosti Tachov: ..... str. 70
Okamžitý index únosnosti Dolánky: ..... str. 71
Kalifornský poměr únosnosti Plaňany: ..... str. 72
Kalifornský poměr únosnosti Recyklát: ..... str. 73
Kalifornský poměr únosnosti Tachov: ..... str. 74
Kalifornský poměr únosnosti Dolánky: ..... str. 75

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

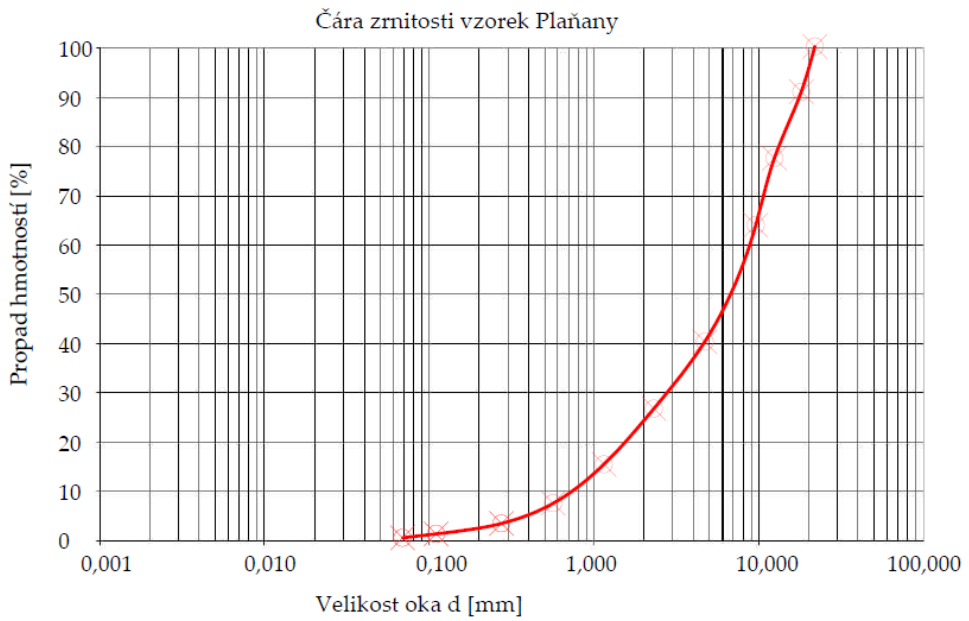
Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor

Vzorek – Plaňany

Norma: ČSN EN 933-1
Datum: 20. 11. 2017
Metoda: Prosévání za sucha
Celková vysušená hmotnost M1 = 451,9 g

Teplota vzduchu: 23 °C
Teplota sušení: 110 °C
Pracovník: Žůrek Jakub

Prům. oka	Zbytek na sítě		Propad
d [mm]	[g]	[%]	[%]
16	40,9	9,1	90,9
11,2	60,9	13,5	77,4
8	61,4	13,6	63,8
4	106,7	23,6	40,2
2	61,8	13,7	26,6
1	51,3	11,4	15,3
0,5	35,5	7,9	7,4
0,25	18,6	4,1	3,3
0,125	9,4	2,1	1,2
0,063	3,7	0,8	0,4
<0,063	1,7	0,4	0,0
celkem	451,9	100%	



Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

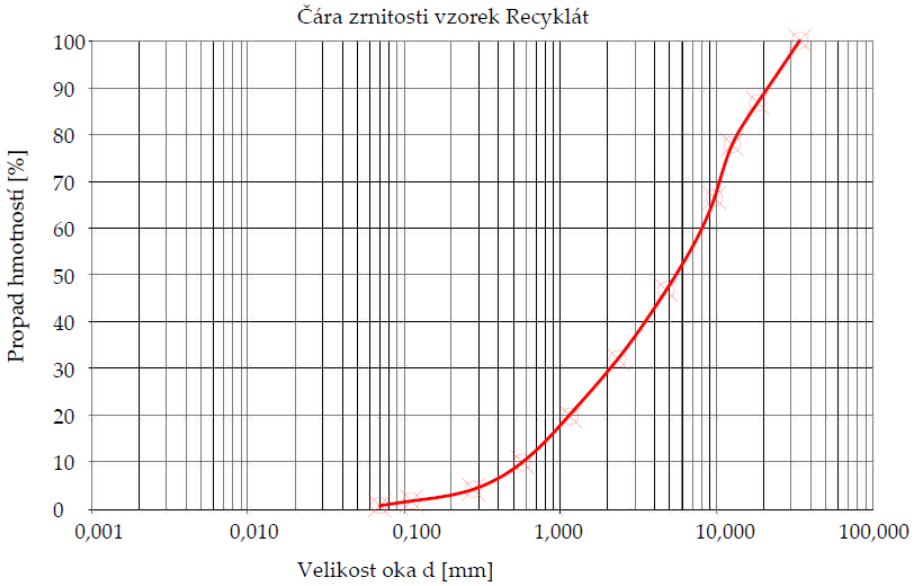
Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor

Vzorek – Recyklát

Norma: ČSN EN 933-1
Datum: 20. 11. 2017
Metoda: Prosévání za sucha
Celková vysušená hmotnost M1 = 378,9 g

Teplota vzduchu: 23 °C
Teplota sušení: 110 °C
Pracovník: Žůrek Jakub

Prům. oka	Zbytek na sítě		Propad
d [mm]	[g]	[%]	[%]
16	50,5	13,3	86,7
11,2	34,1	9,0	77,7
8	43,3	11,4	66,3
4	74,7	19,7	46,6
2	55,6	14,7	31,9
1	46,7	12,3	19,6
0,5	37,0	9,8	9,8
0,25	22,1	5,8	4,0
0,125	9,4	2,5	1,5
0,063	3,6	1,0	0,5
<0,063	1,9	0,5	0,0
celkem	378,9	100%	



Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

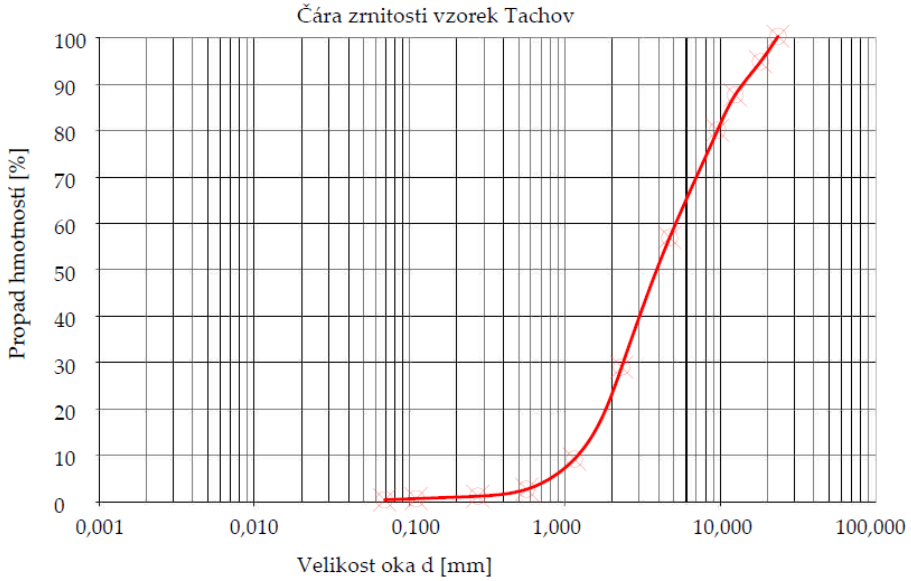
Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor

Vzorek – Tachov

Norma: ČSN EN 933-1
Datum: 20. 11. 2017
Metoda: Prosévání za sucha
Celková vysušená hmotnost M1 = 390,6 g

Teplota vzduchu: 23 °C
Teplota sušení: 110 °C
Pracovník: Žůrek Jakub

Prům. oka	Zbytek na sítě		Propad
d [mm]	[g]	[%]	[%]
16	21,2	5,4	94,6
11,2	28,2	7,2	87,4
8	29,7	7,6	79,8
4	90,3	23,1	56,7
2	108,7	27,8	28,8
1	77,6	19,9	9,0
0,5	25,4	6,5	2,5
0,25	5,9	1,5	1,0
0,125	2,0	0,5	0,5
0,063	1,0	0,3	0,2
<0,063	0,6	0,2	0,0
celkem	390,6	100%	



Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

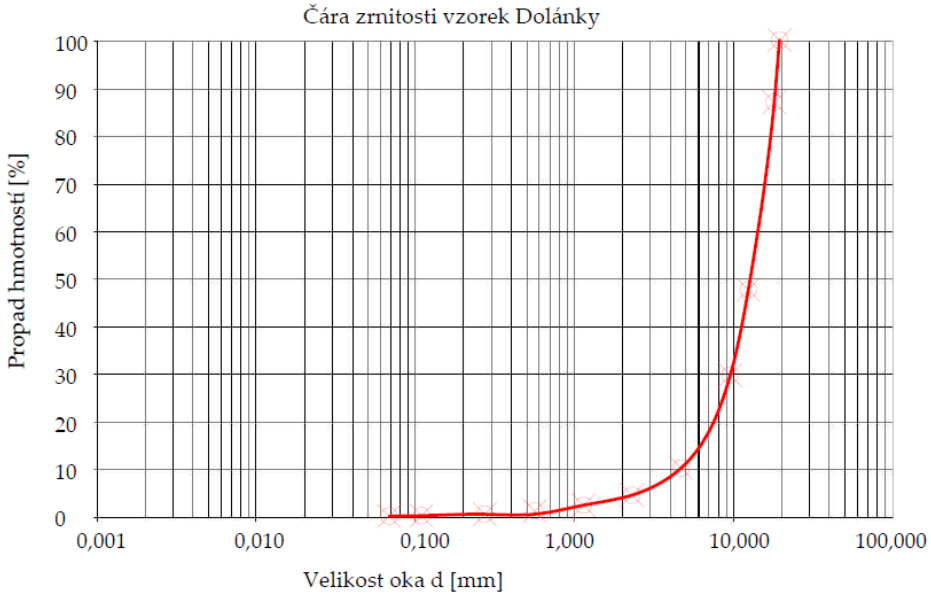
Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor

Vzorek – Dolánky

Norma: ČSN EN 933-1
Datum: 20. 11. 2017
Metoda: Prosévání za sucha
Celková vysušená hmotnost M1 = 407,5 g

Teplota vzduchu: 23 °C
Teplota sušení: 110 °C
Pracovník: Žůrek Jakub

Prům. oka	Zbytek na sítě		Propad
d [mm]	[g]	[%]	[%]
16	52,9	13,0	87,0
11,2	160,6	39,4	47,6
8	72,9	17,9	29,7
4	79,3	19,5	10,2
2	23,2	5,7	4,5
1	8,7	2,1	2,4
0,5	4,8	1,2	1,2
0,25	3,0	0,7	0,5
0,125	1,4	0,3	0,2
0,063	0,4	0,1	0,1
<0,063	0,3	0,1	0,0
celkem	407,5	100%	



Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

Stanovení odolnosti proti drcení

Vzorek – Plaňany

Norma: ČSN EN 1097-2	Teplota vzduchu: 20 °C
Datum: 2. 5. 2018	Pracovník: Žůrek Jakub
Frakce: 8/16	

Hmotnost zkušební navážky	(2200 ± 5) [g]
Hmotnost zkušebních ocelových koulí	4690–4860 [g]
Hmotnost zůstatku na zkušebním sítě 1,6 mm	1388 [g]
Součinitel Los Angeles	36,9

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

Stanovení odolnosti proti drcení

Vzorek – Recyklát

Norma: ČSN EN 1097-2	Teplota vzduchu: 20 °C
Datum: 2. 5. 2018	Pracovník: Žůrek Jakub
Frakce: 8/16	

Hmotnost zkušební navážky	(5000 ± 5) [g]
Hmotnost zkušebních ocelových koulí	4690–4860 [g]
Hmotnost zůstatku na zkušebním sítě 1,6 mm	2978 [g]
Součinitel Los Angeles	40,4

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

Stanovení odolnosti proti drcení

Vzorek – Tachov

Norma: ČSN EN 1097-2	Teplota vzduchu: 20 °C
Datum: 2. 5. 2018	Pracovník: Žůrek Jakub
Frakce: 8/16	

Hmotnost zkušební navážky	(3500 ± 5) [g]
Hmotnost zkušebních ocelových koulí	4690–4860 [g]
Hmotnost zůstatku na zkušebním sítě 1,6 mm	2312 [g]
Součinitel Los Angeles	33,9

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

Stanovení odolnosti proti drcení

Vzorek – Dolánky

Norma: ČSN EN 1097-2	Teplota vzduchu: 20 °C
Datum: 2. 5. 2018	Pracovník: Žůrek Jakub
Frakce: 8/16	

Hmotnost zkušební navážky	(5000 ± 5) [g]
Hmotnost zkušebních ocelových koulí	4690–4860 [g]
Hmotnost zůstatku na zkušebním sítě 1,6 mm	3845 [g]
Součinitel Los Angeles	23,1

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

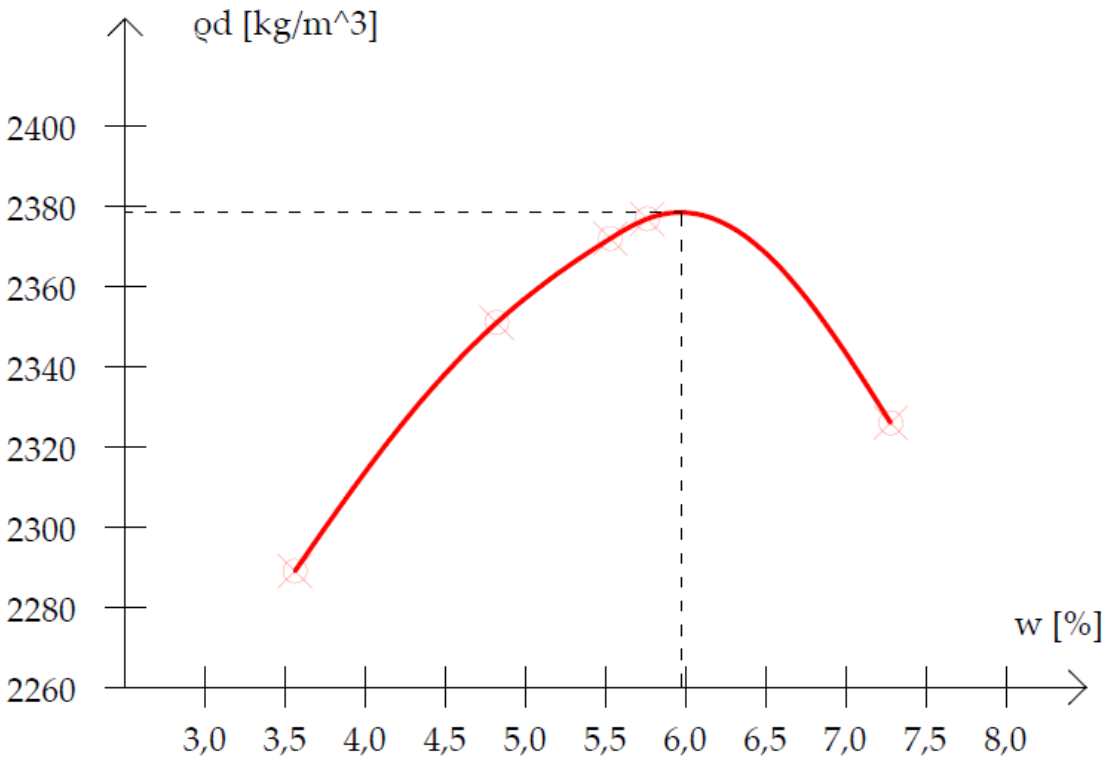
Zkouška zhutnitelnosti – Proctorova zkouška

Vzorek – Plaňany

Norma: ČSN EN 13286-2
Datum: 11. 3. 2018
Metoda: Proctor modifikovaný

Teplota vzduchu: 23 °C
Pracovník: Žůrek Jakub

Param. zhut. tělesa			Objem. Hmotnosti	
Číslo	Vlhkost [%]	Hmotnost [g]	Saturovaná [kg/m3]	Suchá [kg/m3]
1	3,56	2233	2370	2289
2	4,82	2321	2464	2351
3	5,53	2358	2503	2372
4	5,75	2368	2514	2377
5	7,28	2351	2496	2326



Wopt = 6,0 %
Max. obj. hmot. = 2380 kg/m3

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

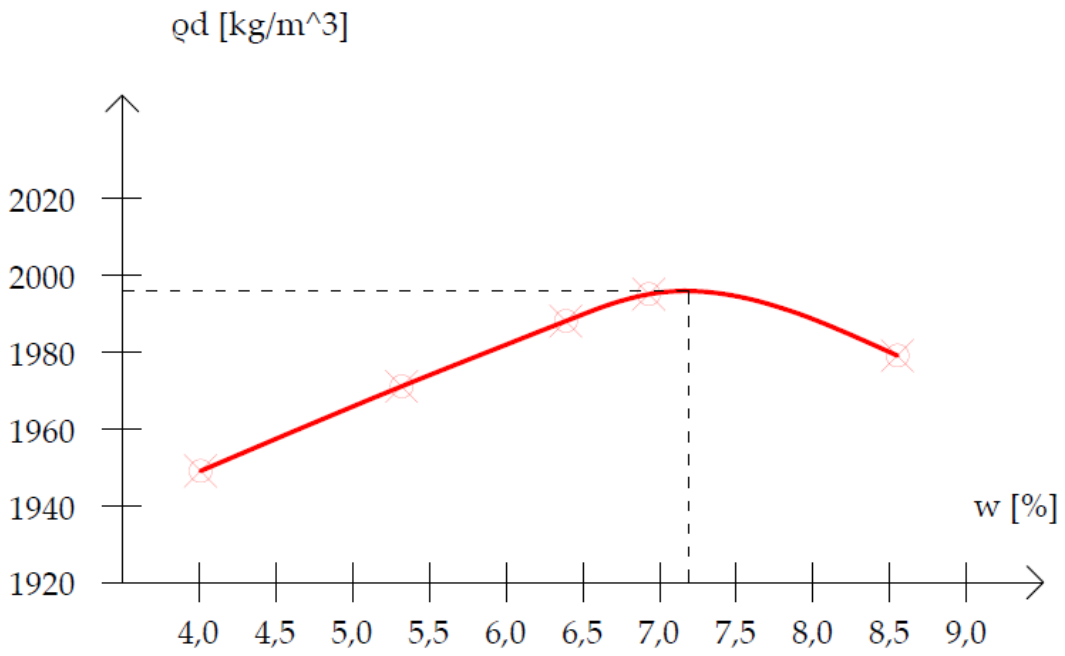
Zkouška zhutnitelnosti – Proctorova zkouška

Vzorek – Recyklát

Norma: ČSN EN 13286-2
Datum: 11. 3. 2018
Metoda: Proctor modifikovaný

Teplota vzduchu: 23 °C
Pracovník: Žůrek Jakub

Param. zhut. tělesa			Objem. Hmotnosti	
Číslo	Vlhkost [%]	Hmotnost [g]	Saturovaná [kg/m3]	Suchá [kg/m3]
1	4,01	1910	2028	1949
2	5,32	1955	2078	1971
3	6,39	1992	2115	1988
4	6,93	2010	2134	1995
5	8,55	2024	2149	1979



Wopt = 7,2 %
Max. obj. hmot. = 2000 kg/m3

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

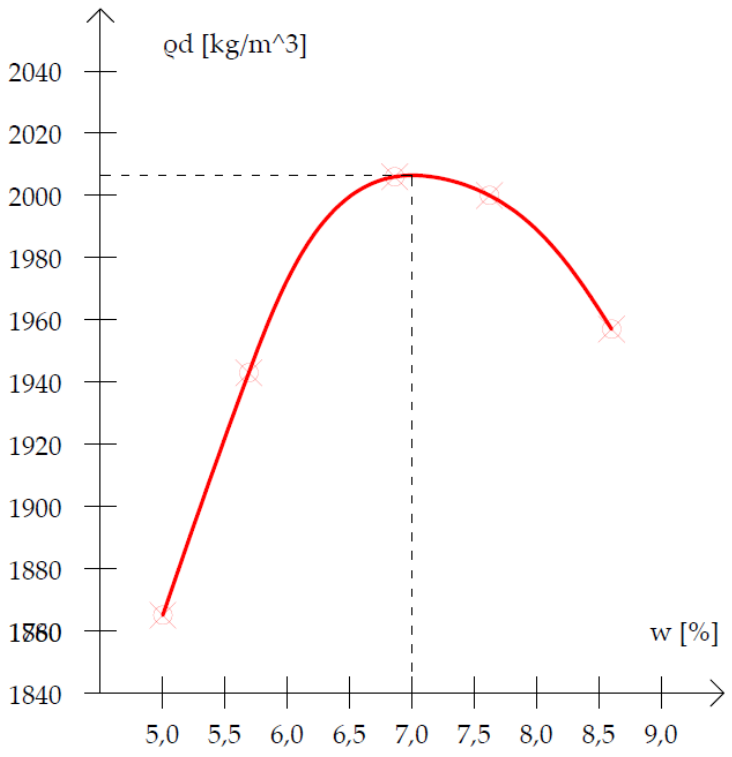
Zkouška zhutnitelnosti – Proctorova zkouška

Vzorek – Tachov

Norma: ČSN EN 13286-2
Datum: 11. 3. 2018
Metoda: Proctor modifikovaný

Teplota vzduchu: 23 °C
Pracovník: Žůrek Jakub

Param. zhut. tělesa			Objem. Hmotnosti	
Číslo	Vlhkost [%]	Hmotnost [g]	Saturovaná [kg/m3]	Suchá [kg/m3]
1	5,00	1845	1959	1865
2	5,69	1934	2053	1943
3	6,86	2019	2143	2006
4	7,62	2028	2153	2000
5	8,60	2002	2125	1957



Wopt = 7,0 %
Max. obj. hmot. = 2010 kg/m3

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

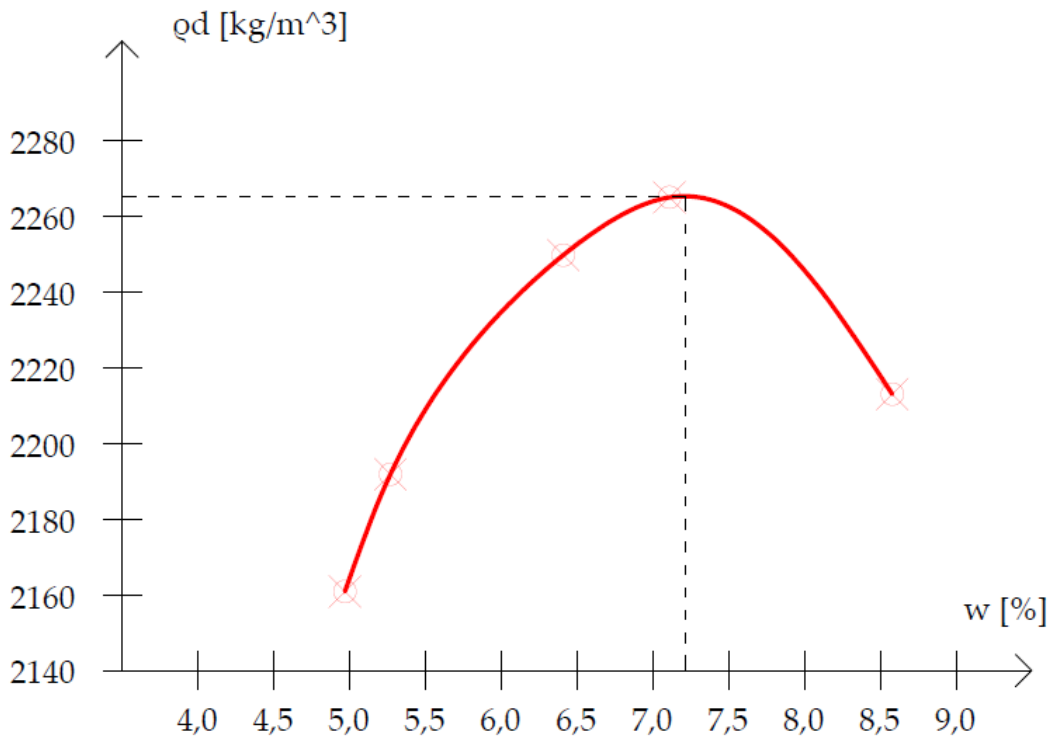
Zkouška zhutnitelnosti – Proctorova zkouška

Vzorek – Dolánky

Norma: ČSN EN 13286-2
Datum: 11. 3. 2018
Metoda: Proctor modifikovaný

Teplota vzduchu: 23 °C
Pracovník: Žůrek Jakub

Param. zhut. tělesa			Objem. Hmotnosti	
Číslo	Vlhkost [%]	Hmotnost [g]	Saturovaná [kg/m3]	Suchá [kg/m3]
1	4,97	2137	2269	2161
2	5,26	2174	2308	2192
3	6,40	2254	2392	2249
4	7,11	2285	2426	2265
5	8,58	2264	2403	2213



Wopt = 7,2 %
Max. obj. hmot. = 2270 kg/m3

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

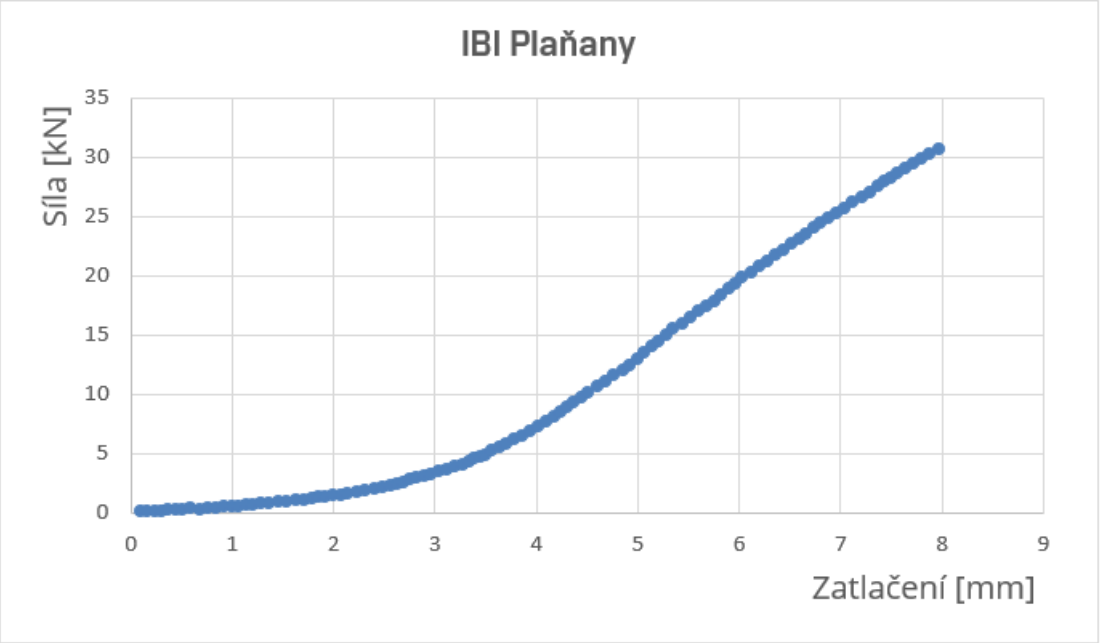
Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

Okamžitý index únosnosti

Vzorek – Plaňany

Norma: ČSN EN 13286-47
Datum: 19. 3. 2018

Teplota vzduchu: 23 °C
Pracovník: Žůrek Jakub



Použitá forma:	150 mm průměr, 120 mm výška
Postup hutnění:	ručním pěchem v 5 vrstvách po 56 úderech
Vlhkost:	6,0 %
Výsledná hodnota IBI:	65 %

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

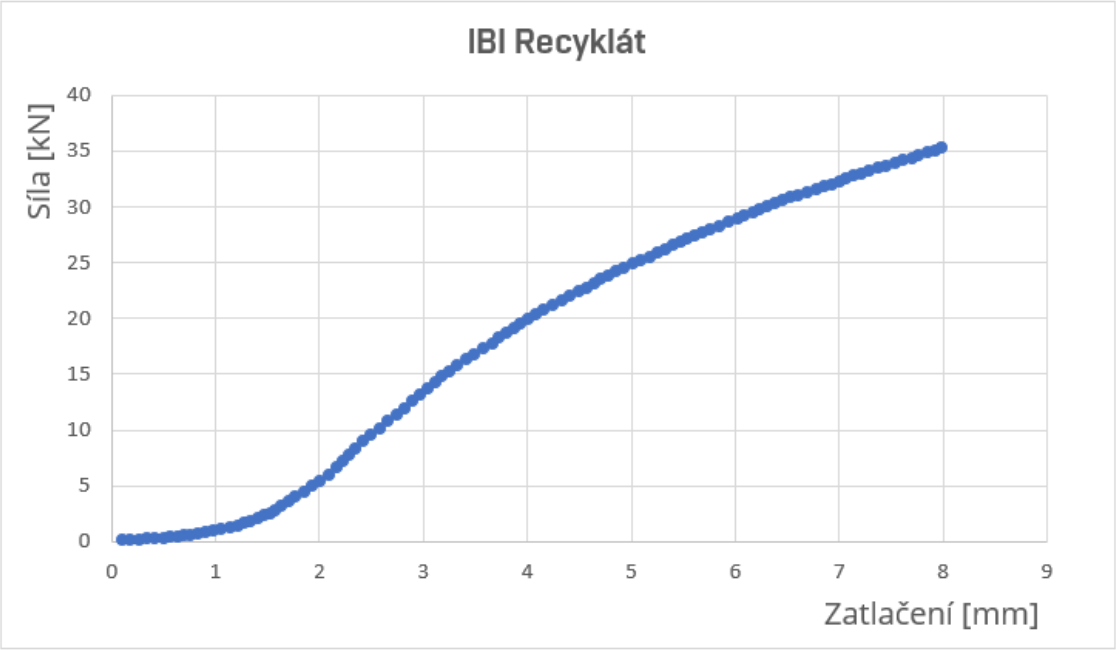
Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

Okamžitý index únosnosti

Vzorek – Recyklát

Norma: ČSN EN 13286-47
Datum: 19. 3. 2018

Teplota vzduchu: 23 °C
Pracovník: Žůrek Jakub



Použitá forma:	150 mm průměr, 120 mm výška
Postup hutnění:	ručním pěchem v 5 vrstvách po 56 úderech
Vlhkost:	7,2 %
Výsledná hodnota IBI:	125 %

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

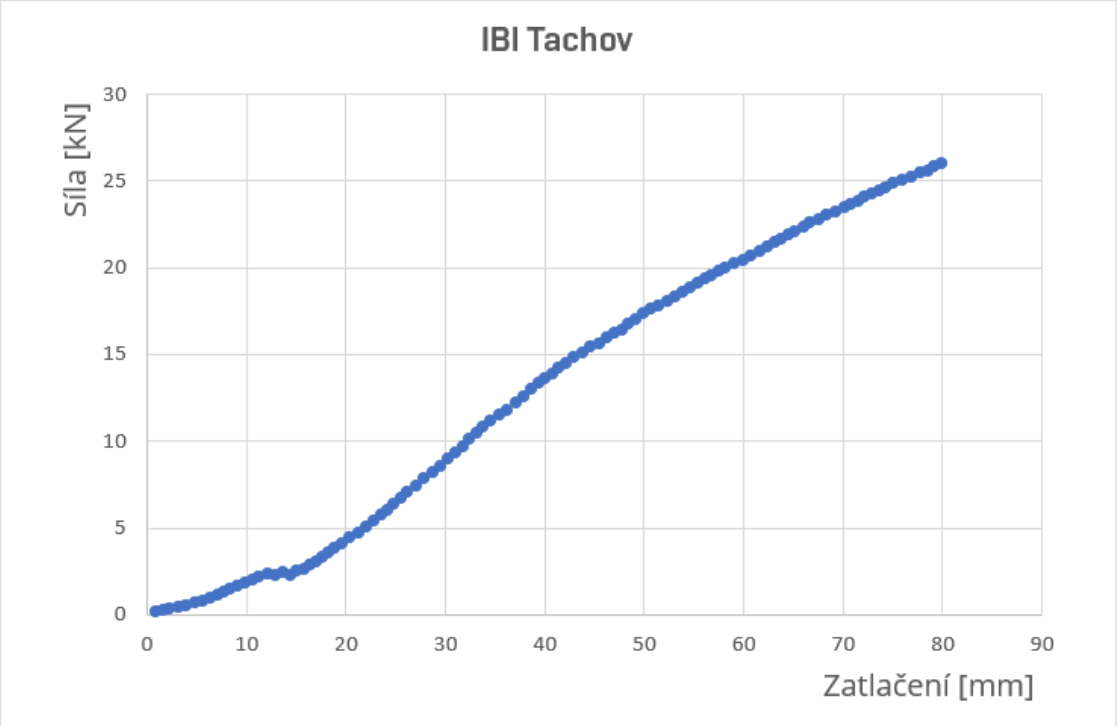
Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

Okamžitý index únosnosti

Vzorek – Tachov

Norma: ČSN EN 13286-47
Datum: 19. 3. 2018

Teplota vzduchu: 23 °C
Pracovník: Žůrek Jakub



Použitá forma:	150 mm průměr, 120 mm výška
Postup hutnění:	ručním pěchem v 5 vrstvách po 56 úderech
Vlhkost:	7,0 %
Výsledná hodnota IBI:	87 %

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

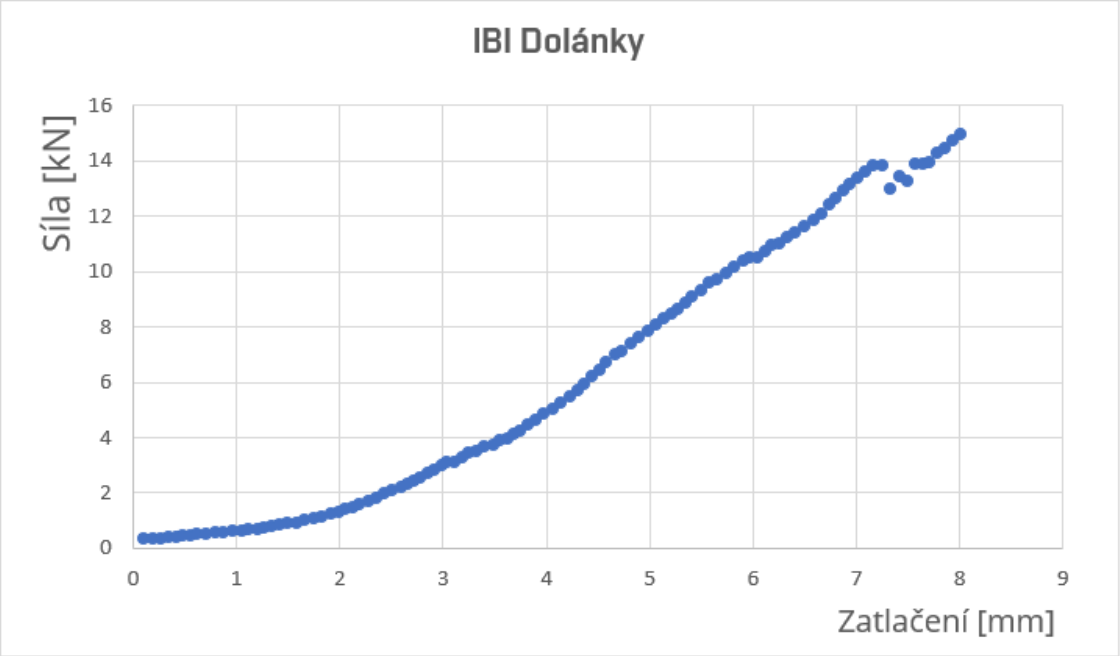
Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

Okamžitý index únosnosti

Vzorek – Dolánky

Norma: ČSN EN 13286-47
Datum: 19. 3. 2018

Teplota vzduchu: 23 °C
Pracovník: Žůrek Jakub



Použitá forma:	150 mm průměr, 120 mm výška
Postup hutnění:	ručním pěchem v 5 vrstvách po 56 úderech
Vlhkost:	7,2 %
Výsledná hodnota IBI:	47 %

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

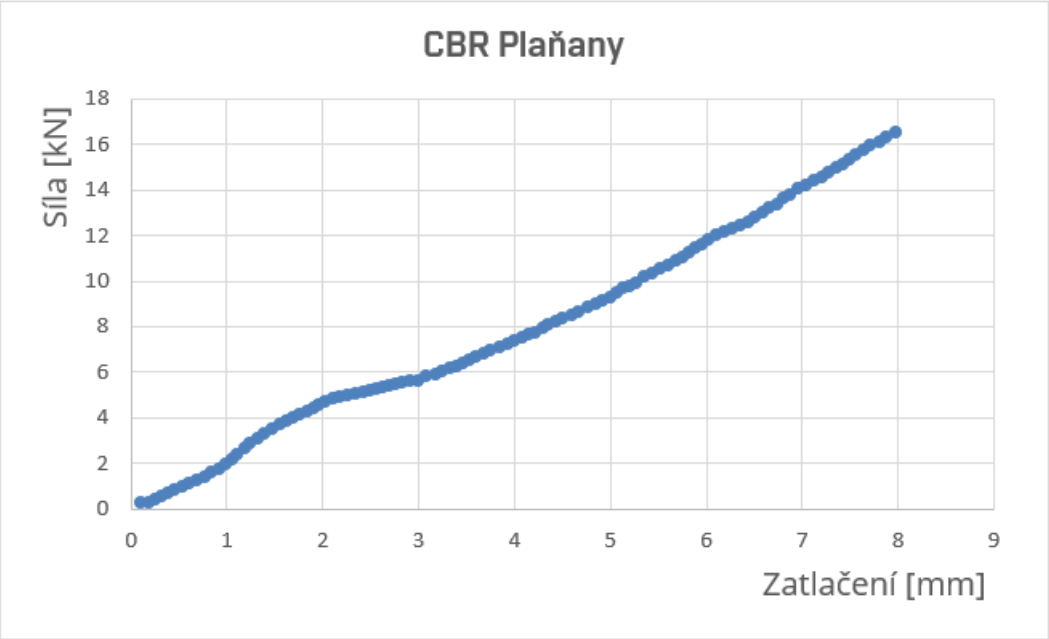
Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

Kalifornský poměr únosnosti

Vzorek – Plaňany

Norma: ČSN EN 13286-47
Datum: 9. 4. 2018

Teplota vzduchu: 22 °C
Pracovník: Žůrek Jakub



Použitá forma:	150 mm průměr, 120 mm výška
Postup hutnění:	ručním pěchem v 5 vrstvách po 56 úderech
Doba zrání:	saturováno ve vodě po dobu 4 dní
Výsledná hodnota CBR:	47 %

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

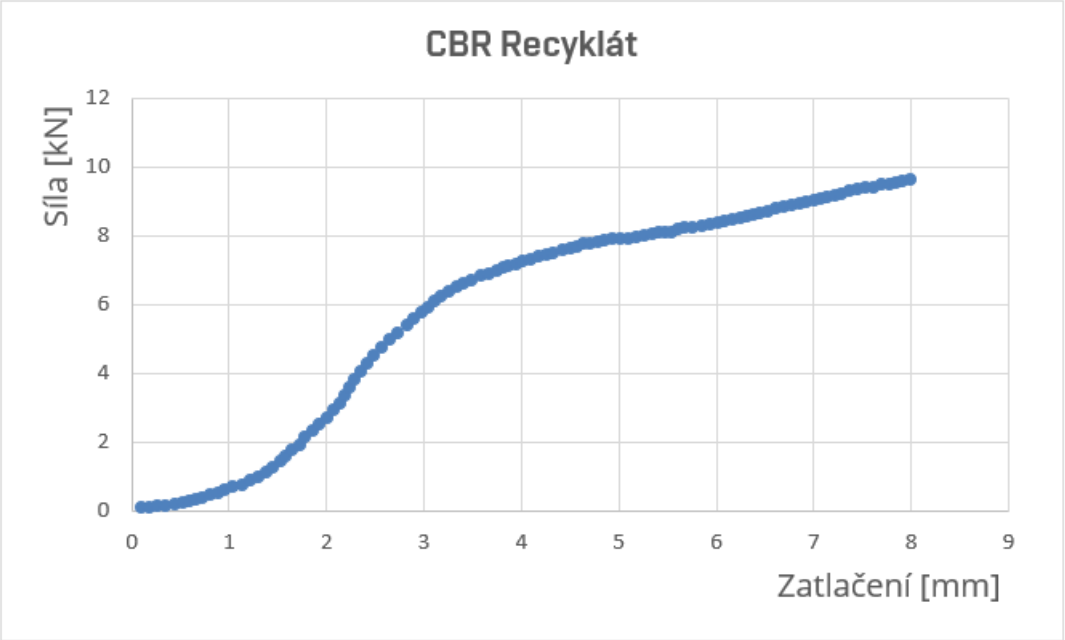
Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

Kalifornský poměr únosnosti

Vzorek – Recyklát

Norma: ČSN EN 13286-47
Datum: 26. 3. 2018

Teplota vzduchu: 22 °C
Pracovník: Žůrek Jakub



Použitá forma:	150 mm průměr, 120 mm výška
Postup hutnění:	ručním pěchem v 5 vrstvách po 56 úderech
Doba zrání:	saturováno ve vodě po dobu 6 dní
Výsledná hodnota CBR:	40 %

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

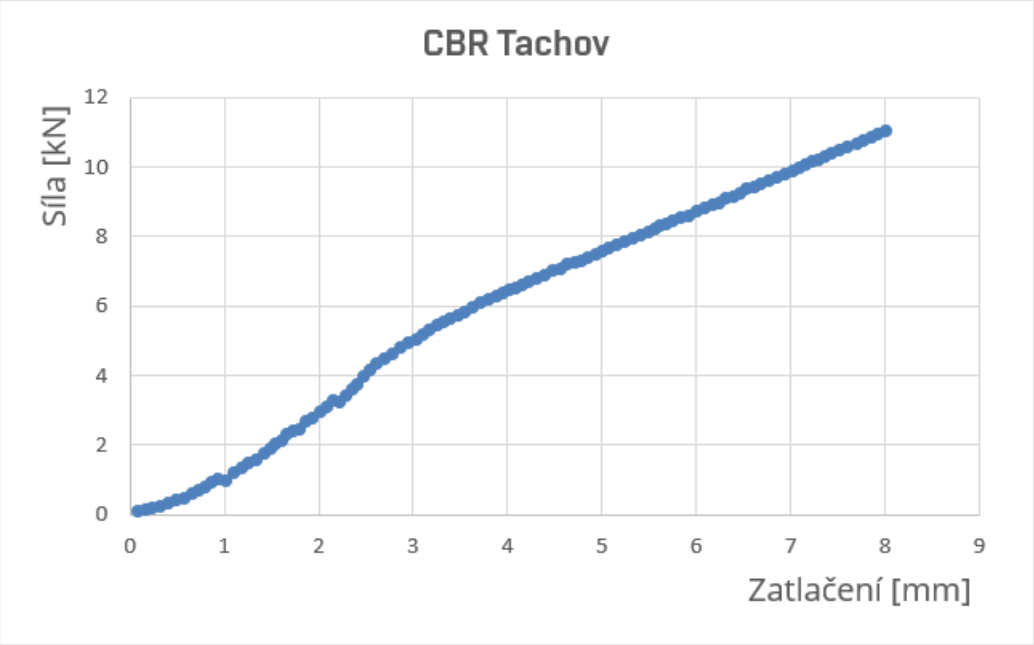
Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

Kalifornský poměr únosnosti

Vzorek – Tachov

Norma: ČSN EN 13286-47
Datum: 26. 3. 2018

Teplota vzduchu: 22 °C
Pracovník: Žůrek Jakub



Použitá forma:	150 mm průměr, 120 mm výška
Postup hutnění:	ručním pěchem v 5 vrstvách po 56 úderech
Doba zrání:	saturováno ve vodě po dobu 6 dní
Výsledná hodnota CBR:	38 %

Laboratoř pozemních komunikací
Fakulta stavební

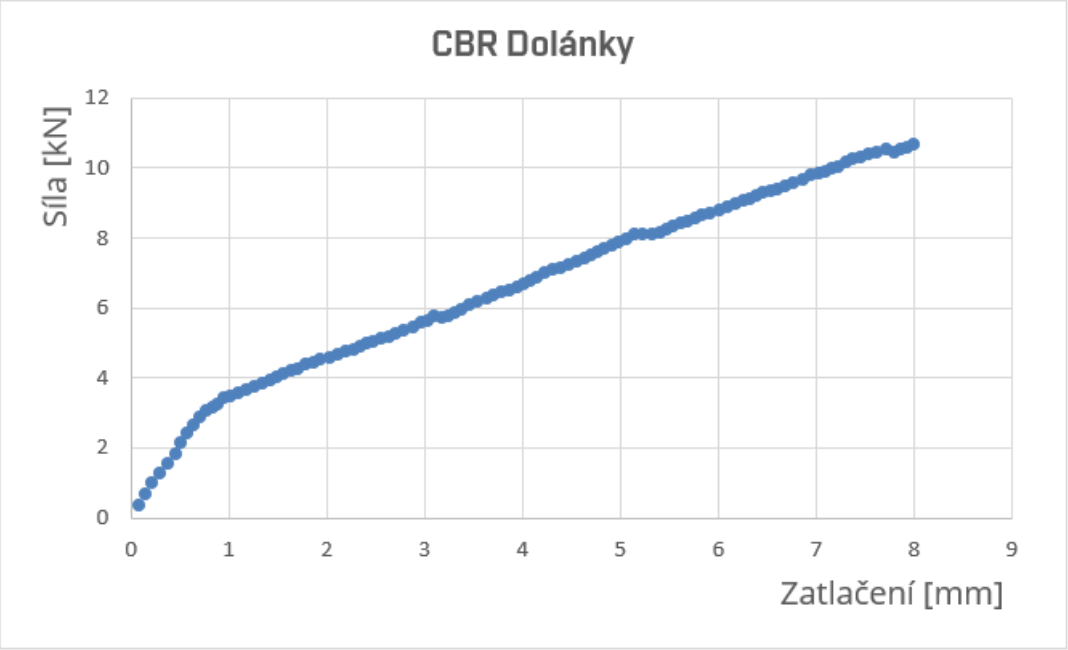
Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno

Kalifornský poměr únosnosti

Vzorek – Dolánky

Norma: ČSN EN 13286-47
Datum: 26. 3. 2018

Teplota vzduchu: 22 °C
Pracovník: Žůrek Jakub



Použitá forma:	150 mm průměr, 120 mm výška
Postup hutnění:	ručním pěchem v 5 vrstvách po 56 úderech
Doba zrání:	saturováno ve vodě po dobu 6 dní
Výsledná hodnota CBR:	40 %