



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí

Analýza metod hutnění válcovaného betonu

Analysis of Compaction Method of Roller Compacted Concrete

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

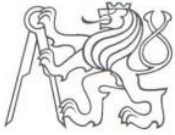
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

Ing. Petr Bílý, Ph.D.

Tomáš Trtík

Praha 2017



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Trtík Jméno: Tomáš Osobní číslo: 396032

Zadávací katedra: K133-Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: N3607-Stavební inženýrství

Studijní obor: 3608T008-Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Analýza metod hutnění válcovaného betonu

Název diplomové práce anglicky: Analysis of Compaction Method of Roller Compacted Concrete

Pokyny pro vypracování:

- výroba a hutnění zkušebních vzorků válcovaného betonu pomocí pneumatického kladiva,
- porovnání metody hutnění v laboratorních podmínkách a při realizaci,
- optimalizace vodního součinitele.

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 11.10.2016

Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku


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“.

11.10.2016
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

V Praze dne

.....

Tomáš Trtík

Rád bych poděkoval doc. Ing. Jitce Vaškové, CSc. za odborné vedení při tvorbě diplomové práce a konzultace. Děkuji také Ing. Petru Bílému, Ph.D. za cenné rady a připomínky a pomoc při provádění experimentů. Na závěr bych rád poděkoval Ing. Josefu Fládrovi, Ph.D. za pomoc a konzultace při provádění experimentů v laboratoři Fakulty stavební ČVUT a Bronislavu Sedláři ze společnosti CEMEX Czech Republic, s.r.o. za poskytnutí podkladů a materiálu k realizaci laboratorních zkoušek.

Katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí

Název diplomové práce: Analýza metod hutnění válcovaného betonu

Autor: Tomáš Trtík

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

Ing. Petr Bílý, Ph.D.

Abstrakt:

Válcovaný beton je v principu běžný beton ukládaný a hutněný pomocí strojů využívaných při pokládce asfaltových vozovek. Cílem této práce je analýza výroby vzorků válcovaného betonu v laboratorních podmínkách. Pro výrobu vzorků byly použity dvě metody hutnění a srovnávacím parametrem byla objemová hmotnost. První metoda hutnění je pomocí pneumatického kladiva, které představuje dynamické zhutňování. Jedná se o časově rychlou výrobu vzorků s velkým účinkem. Druhá užitá metoda hutnění má statický charakter. Vzorek je zatěžován přesně definovanou působící silou v lisu pro vytvoření stejných podmínek jako při válcování na stavbě. V České republice se běžně využívá pouze statického pojezdu válcem. První sada vzorků byla hutněna silou určenou na základě statické hmotnosti hutnícího válce a předpokládané kontaktní plochy mezi válcem a hutněným materiálem. V další části byla působící síla postupně zvětšována pro zjištění trendu zhutnění. Vzorky obou metod byly podrobeny zkoušce indexu zhutnitelnosti, která vypovídá o kvalitě hutnění. Po vyhodnocení zkoušek se ukázal rozdíl mezi statickým a dynamickým hutněním. Při statickém hutnění je větší počáteční odpor proti penetraci trnu, po překročení určité meze je tento odpor konstantní. Vzorky vyrobené pneumatickým kladivem aktivně vzdorovaly po celou dobu zkoušky. Byla provedena zhutňovací křivka, pro vytvoření vztahu mezi vlhkostí a objemovou hmotností.

Klíčová slova:

Válcovaný beton, hutnění, pneumatické kladivo, zkouška pevnosti betonu, odolnost proti CHRL, okamžitý index únosnosti

Department: Department of Concrete and Masonry Structures

Master's thesis title: Analysis of Compaction Method of Roller Compacted Concrete

Author: Tomáš Trtík

Supervisor: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

Ing. Petr Bílý, Ph.D.

Abstract:

Roller-Compacted Concrete (RCC) is an ordinary concrete poured and compacted with machines typically used for laying of asphalt road layers. The aim of this work is the analysis of specimens made from RCC in the laboratory. Two methods of compaction were used for the production of specimens and comparative parameter was bulk density. The first method of compaction is by using pneumatic hammers as dynamic compaction. Production of specimens is very fast with strong effect. The second method of compaction has a static character. The specimens were loaded with precisely defined force in loading machine to create the same conditions as during rolling. In the Czech Republic, only static rolling is commonly used. The first set of specimens was compacted by the force established on the basis of the static weight of the compaction roller and assumed contact surfaces between the roller and compacted material. In another part of the work, the force was gradually increased to find the curve of compaction. For both methods, immediate bearing index test was performed. This test is used to verify the quality of compaction. After evaluating, the tests showed difference between static and dynamic compaction. In static compaction, initial resistance to penetration of the mandrel is higher, after exceeding a certain limit the resistance is constant. Specimens made by pneumatic hammer actively resisted throughout the test. A curve defining the relation between moisture and bulk density was created.

Key words:

Roller-Compacted Concrete, compaction, pneumatic hammers, compressive strength of concrete, flexural strength of concrete, resistance of concrete to deicing chemicals, immediate bearing index

Obsah

1. Úvod.....	9
1.1. Válcovaný beton	10
1.2. Složky válcovaného betonu	10
1.3. Příklady receptur použitých ve světě	11
2. Pokládka válcovaného betonu na stavbě	13
2.1. Hutnění při realizaci	13
2.2. Realizace v České republice.....	14
3. Metody hutnění v laboratoři	18
3.1. Pneumatické kladivo	18
3.2. Statický lis.....	20
3.3. Proctorova zkouška	25
4. Výroba zkušebních těles	26
4.1. Příprava čerstvého betonu.....	26
4.2. Pneumatické kladivo	27
4.3. Statický lis.....	29
4.4. Proctorova zkouška	30
5. Energie hutnění	31
5.1. Energie Proctorovy zkoušky	31
5.2. Energie pneumatického kladiva	32
5.3. Energie statického lisu	33
5.4. Stanovení potřebné doby hutnění pro pneumatické kladivo	34
5.5. Stanovení potřebné hutnicí síly pro lis	35
6. Křivka zhutnitelnosti	37
7. Zkoušky	40
7.1. Stupeň zhutnitelnosti.....	40
7.2. Pevnost v tlaku	42
7.3. Pevnost v tahu ohybem	46
7.4. Odolnost proti působení CHRL	48
7.5. Statický lis – vliv zvětšení působící síly na objemovou hmotnost vzorků	52
7.6. Porovnání krychelných a válcových vzorků zhotovených pomocí statického lisu.....	54

7.7. Porovnání krychelných a trámčových těles hutněných pneumatickým kladivem	55
7.8. IBI – Okamžitý index únosnosti.....	56
8. Závěr	60
Literatura.....	63
Seznam obrázků	66
Seznam tabulek	67
PŘÍLOHY	68
Příloha A.....	68
Příloha B.....	69
Příloha C	70
Příloha D	71
Příloha E.....	72
Příloha F.....	73
Příloha G	74
Příloha H	75

1. Úvod

Při výrobě laboratorních vzorků válcovaného betonu se nikde v literatuře neuvádí, jakému realizačnímu postupu válcování (hutnění) by vzorek měl odpovídat. Není specifikováno, zda se jedná pouze o statický pojezd válce, pouze dynamický pojezd válce nebo o jejich kombinaci. Nelze zjistit, kolik pojezdů válcem by mělo nastat pro dosažení požadované míry zhutnění. Jaký typ válce bude použitý, především pak jeho hmotnost. Při realizaci se v praxi používají válce s hmotností od 5 do 10 tun a výsledné hutnění lze umocnit dynamickým pojezdem.

U vzorků vytvářených pneumatickým kladivem je často zmíněn odkaz na normu, která se zabývá hutněním pomocí pneumatického kladiva a podle které bylo postupováno. Detailněji se výrobou vzorků pneumatickým kladivem zabývá Česká státní norma a norma americké společnosti pro testování a materiály, které jsou popsány v kapitole 3.1. Normy však řeší pouze postup výroby laboratorního vzorku, nikoliv soulad tohoto postupu s postupem pokládky válcovaného betonu na stavbě. Výsledkem tak může být vytvoření vzorku, který má výrazně jiné parametry než materiál vytvořený válcováním při realizaci na stavbě. V takovém případě nelze mluvit o reprezentativním testovacím vzorku.

Cílem diplomové práce bylo posouzení vhodnosti výroby vzorků válcovaného betonu celosvětově uznávaným postupem hutnění v laboratoři pomocí pneumatického kladiva. Tato dynamická metoda je porovnána s výsledky dosaženými pomocí statického hutnění vzorků v zatěžovacím lisu, které simuluje statický pojezd hutnicího válce bez dynamického hutnění.

Proctorova zkouška se používá pro určení optimální vlhkosti čerstvého betonu potřebné k dosažení maximální míry zhutnění a tedy maximální objemové hmotnosti. Stejnou objemovou hmotnost by měly mít vzorky určené pro zkoušky mechanických vlastností materiálu. Pokud bude mít vzorek určený pro zkoušky pevnosti výrazně vyšší objemovou hmotnost než materiál použitý na stavbě, je otázkou, zda lze mechanické vlastnosti na něm stanovené považovat za reprezentativní pro materiál vyrobený na stavbě. Z tohoto důvodu byla pevně určena doba hutnění pro pneumatické kladivo na základě výpočtu, který srovnává množství uvolněné energie. Cílem bylo vytvoření vzorku se srovnatelnou objemovou hmotností jako u Proctorovy zkoušky.

V experimentu byla vytvořena křivka zhutnitelnosti. Na základě výsledků zkoušek byla vybrána nevhodnější receptura betonu a provedena série zkoušek pro stanovení vlastností.

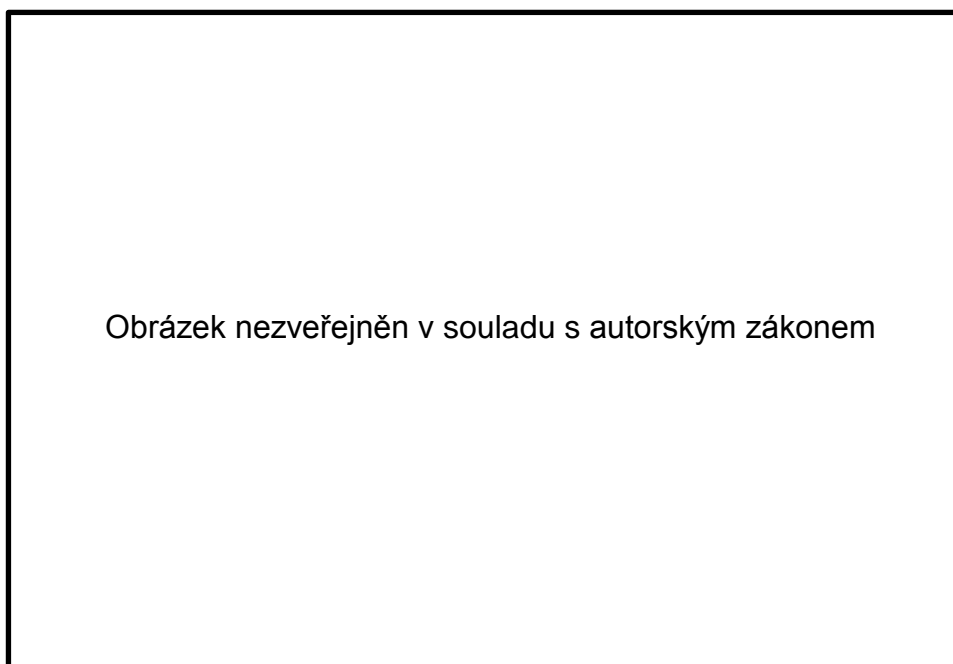
1.1. Válcovaný beton

Válcovaný beton je velmi suchá směs betonu, která je ukládána finišery a pojížděna hutnicími vibračními válci využívanými pro pokládku běžných asfaltových vozovek. Hlavní složkou betonu je kamenivo, portlandský cement a voda. Mezi vedlejší složky lze zařadit příměsi (struska, popílek) a také přísady (zpomalovací a plastifikační přísady).

Válcovaný beton lze použít pro konstrukce silniční infrastruktury (parkoviště, letištní plochy, dočasné vozovky silnic, odpočívadla). Druhou možností jsou vodní díla, především pak přehrady.

1.2. Složky válcovaného betonu

Válcovaný beton se složením významně neliší od běžného betonu. Základní složky jsou kamenivo, cement a voda. Beton by měl být natolik suchý, aby unesl váhu hutnicího válce a nedocházelo k boření, ale zároveň dostatečně vlhký, aby došlo k dobrému rozmístění cementové pasty.



Obrázek 1-1 Porovnání poměrného obsahu složek v běžném a válcovaném betonu [15]

Cement

Lze použít všechny cementy splňující normu ČSN EN 197-1 [9]. Procentuální hmotnostní zastoupení použitého cementu se obvykle pohybuje okolo 10-12%. Nejčastěji jsou používány CEM I a CEM II, kde CEM II má nízký vývin hydratačního tepla spolu s pomalejším počátečním tuhnutím, je tedy vhodný pro masivní konstrukce.

Kamenivo

Kamenivo má vliv na zpracovatelnost čerstvého betonu, objemovou hmotnost, pevnost. Při návrhu složení kameniva je důležitá křivka zrnitosti, která by měla být plynulá a skládat se z velkého množství frakcí. Mělo by dojít k rozptýlu jednotlivých zrn a následnému obalení cementovou složkou. Jemná složka kameniva má vliv na zpracovatelnost, povrch finální vrstvy, trvanlivost, a proto by měla být zastoupena ve větší míře.

Voda

Množství vody ve válcovaném betonu je nutné snížit na takovou hranici, při které bude zajištěna maximální objemová hmotnost betonu. Tato hranice se zjišťuje pomocí Proctorovy zkoušky. Znakem válcovaného betonu je téměř nulový pokles při zkoušce sednutí čerstvého betonu, který je způsoben nízkým vodním součinitelem.

Určité množství vody je obsaženo v kamenivu a je třeba tuto vlhkost zohlednit v množství přidané vody. Kvalita vody by měla být ověřena, nejlepší variantou je pitná voda.

Přísady

U válcovaných betonů podobně jako u běžných betonů lze použít přísady pro zlepšení některých vlastností. Přidávají se plastifikační přísady, přísady zpomalující tuhnutí, které zlepšují soudržnost směsi a tím dopomáhají k větší míře hutnění. Umožňují zvýšit dobu zpracovatelnosti nad 1 hodinu, což je běžná doba zpracovatelnosti válcovaného betonu.

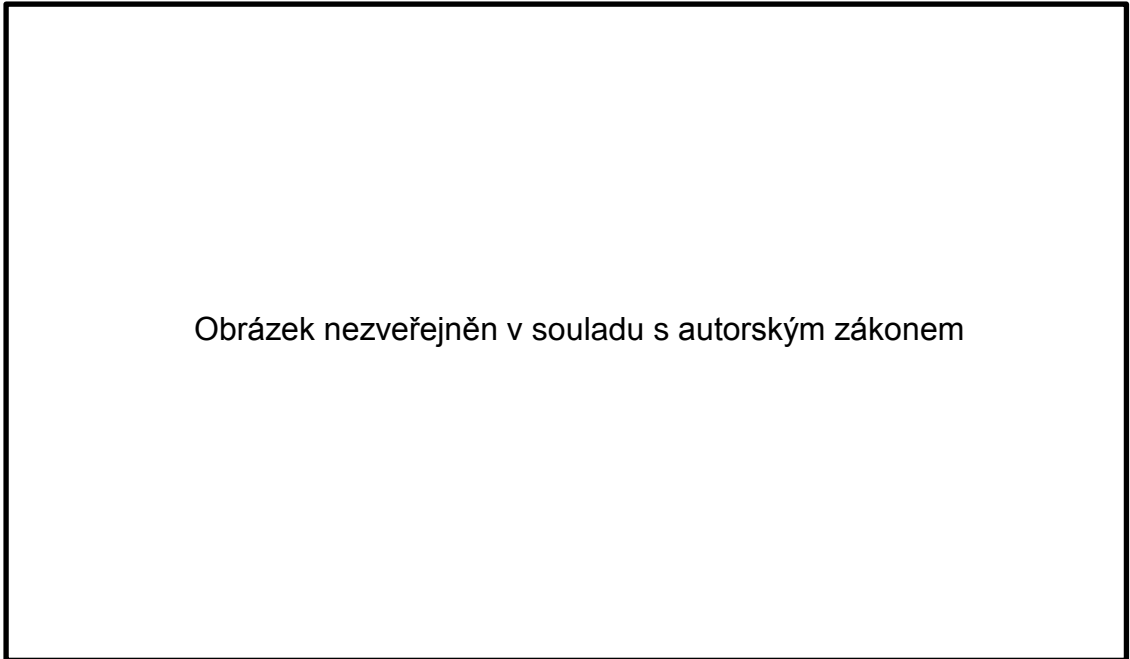
Příměsi

K částečnému nahrazení pojiva (cementu) lze použít popílek, křemičitý úlet nebo strusku. Výhoda je v ekonomické úspoře vzhledem k ceně cementu. Příměsi mohou snížit potenciál alkalické reakce kameniva a prodloužit dobu zpracovatelnosti.

1.3. Příklady receptur použitých ve světě

V tabulce 1-1 jsou uvedeny příklady receptur použitých při realizaci staveb v Severní Americe. Referenční receptura použitá v minulosti na některých realizacích v České republice je sušší než většina amerických receptur.

Tabulka 1-1 Příklady použitých receptur ve světě



2. Pokládka válcovaného betonu na stavbě

2.1. Hutnění při realizaci

K hutnění se používají tandemové válce se dvěma běhouny podobně jako u asfaltových vozovek. Pojezd válce může být statický či dynamický s nejčastěji uváděnou hmotností válce kolem 10 t. Začátek hutnění by měl nastat ideálně ihned po pokládce, nejdéle však do 15 minut. Jelikož neexistuje jednotný postup pro válcování, lze dohledat různé parametry a požadavky na hutnění v člancích o válcovaném betonu (VB). Jako příklad byly vybrány z literatury tři popisy postupu hutnění a doporučení.

Frost durability of roller-compacted concrete pavements [5]:

Hutnění se provádí pomocí tandemových válců se statickou zátěží 15 až 30 kN/m³, které se používají ve statickém či vibračním modu. Rychlost by měla být omezena na 3 km/h pro vytvoření rovnoměrného povrchu. Počet přejezdů by se měl pohybovat od 4 do 10 pro dosažení požadované míry zhutnění. Pro vyšší kvalitu povrchu může být následně použit pneumatikový válec, který zatáhne povrch.

Guide Specification for Construction of Roller-Compacted Concrete Pavements [6]:

Neuvádí konkrétní parametry rychlosti ani počet přejezdů a odkazuje se na návrh projektanta. Požaduje však při pohybu válce používat pouze vibrační pojezd a hmotnost tandemového válce 10 t. Pro vytvoření finálního povrchu se má použít pneumatikový válec a připouští se možnost posledního pojezdu tandemovým válcem pro vyrovnání povrchu, pouze však se statickým pojezdem. Pokud není možnost položit pruh vozovky v celé šíři, válec by se měl pohybovat min. 300 mm od kraje vozovky. Položení nového sousedního pruhu by mělo být do 30 minut, aby nevznikl studený spoj dle ASTM C1040.

Roller-Compacted Concrete [7]:

Pokud se používá menší válec (méně než 10t), tloušťka hutněné vrstvy by neměla být větší než 15 cm, aby bylo zaručené dostatečné zhutnění v celé vrstvě betonu na požadovanou objemovou hmotnost. Je doporučeno kontrolovat objemovou hmotnost směsi za použití nukleárního hustoměru, zvláště v případě menších válců. Krajnice by měla být odstraněna, pokud není hutněna do 15 minut od pokládky.

Požadavky na postup hutnění lze shrnout následovně:

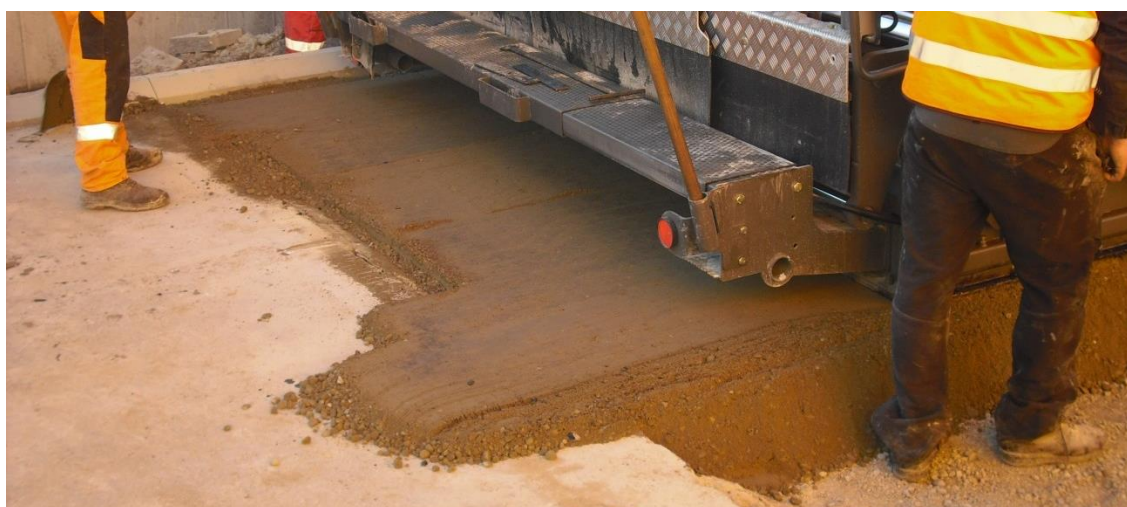
- Použití tandemových válců o hmotnosti 10 t,
- Počet jednotlivých pojezdů se pohybuje kolem šesti s tím, že se doporučuje první dva pojezdy (tedy ve směru pokládky a zpět) hutnit pouze statickým pojezdem a zbývající čtyři dynamickým pojezdem,
- Následně použít pneumatikový válec pro zatažení horní vrstvy betonu,
- Finální jeden statický pojezd tandemovým 10t válcem pro vyrovnání nerovností,
- Tloušťka vrstvy VB by se měla pohybovat od 10 cm do 25 cm.

Za splnění těchto podmínek lze předpokládat, že bude dosažena požadovaná objemová hmotnost na úrovni 98% modifikované Proctorovy zkoušky, která byla provedena v laboratoři. Objemová hmotnost by měla být ověřena pomocí metody označována termínem „nuclear density gauge“.

Správné a dostatečné hutnění má vliv také na pevnost válcovaného betonu. [7] Při nekvalitním hutnění dochází k poklesu 5% pevnosti v tlaku za každé 1% vzduchu, které mohlo být odstraněno, ale nebylo. Některé směsi nelze účinně hutnit do hloubky kvůli špatně navržené receptuře. To je způsobeno špatnou zpracovatelností kvůli segregaci hrubého kameniva. Při dobré zpracovatelnosti lze dosáhnout plného zhutnění na jednu vrstvu šesti pojezdy tandemovým vibračním válcem.

2.2. Realizace v České republice

Realizace válcovaného betonu, při které jsem byl přítomen, proběhla dne 3.12.2015 v Praze – Velké Chuchli. Jednalo se o parkoviště a příjezdové cesty k obchodnímu domu. Válcovaný beton plnil funkci podkladní a vyrovnávací vrstvy pod finální asfaltový povrch. Následující okomentovaný popis zachycuje postup realizace. Beton byl ukládán běžným finišerem.



Obrázek 2-1 Pokládka válcovaného betonu - navázání na stávající vrstvu



Obrázek 2-2 Povrch válcovaného betonu po pokládce

Na povrchu byly jasně viditelné větší frakce kameniva (obrázek 2-2). Vrstva betonu byla jednotná a bez viditelných poruch. V tomto okamžiku by čerstvý beton měl být zhutněn na 85% hodnotu Proctorovy modifikované zkoušky.

Hutnění válcovaného betonu bylo realizováno tandemovým válcem s hmotností válce 7,5t. Počet pojezdů byl 4 (pojezdem je míněn přesun z jednoho na druhý konec válcovaného úseku). Válec pracoval pouze ve statickém režimu, tedy bez dynamického pojezdu. Na obrázku 2-3 je zachycen přejezd válce, kde pravá část nebyla válcována a je vidět rozhraní. Vrstva betonu byla hutněna v celé tloušťce, nebyla rozdělena na více částí.



Obrázek 2-3 Válcování tandemovým válcem ve statickém pojezdu

Pro lepší porovnání obrázek 2-4 zachycuje hranu hutněné vrstvy. Rozdíl mezi hutněnou a nehutněnou vrstvou je 2-3 cm. Po ukončení hutnění by míra zhutnění měla dosahovat hodnoty 96% modifikované Proctorovy zkoušky.



Obrázek 2-4 Hrana hutněné a nehutněné vrstvy

Problematickým místem bývají okraje, kde nemusí být dosaženo plného zhutnění. Volně nasypáný okraj nemůže být hutněn, protože hrozí deformace vrstvy betonu pod tíhou válce. Tento okraj může být hutněn až po položení sousední vrstvy, přičemž položení by mělo proběhnout do 30 minut, aby nevznikl studený spoj.



Obrázek 2-5 Pokládka sousední vrstvy válcovaného betonu

Krajnice u betonového obrubníku musí být hutněna pomocnou vibrační deskou. Rozdíl ve vrstvách betonu před hutněním je 3 cm (obrázek 2-6).



Obrázek 2-6 Nezhutněná vrstva u kraje betonového obrubníku



Obrázek 2-7 Konečná krajnice ve směru pokládky musí být zaříznuta a odstraněna



Obrázek 2-8 Povrch válcovaného betonu 7 dní od pokládky

3. Metody hutnění v laboratoři

Hutnění znamená působení vnější síly, která způsobí stlačení betonu a tedy eliminaci vzduchových pórů. Zlepší se tím řada mechanických vlastností betonu jako je pevnost, objemové změny a propustnost.

Metod, jak lze v laboratorních podmínkách napodobit hutnění při realizaci, je několik. Při experimentech v rámci diplomové práce byly použity tři metody hutnění, z nichž dvě lze zařadit mezi dynamické (pneumatické kladivo, Proctorova zkouška) a jednu lze označit za statickou (statický lis).

3.1. Pneumatické kladivo

Výrobou vzorků pomocí vibračního kladiva se podrobně zabývá Americká společnost pro testování a materiály ASTM (American Society for Testing and Materials), konkrétně norma ASTM C1435 [3]. Norma specifikuje nároky na formu a tvar hutnicího nástavce včetně tolerancí. Uvádí požadavky na typ použitého kladiva. Minimální příkon kladiva by měl být 900 W a musí mít alespoň 2000 nárazů za minutu. Minimální hmotnost kladiva bez hutnicího nástavce by měla být 10 kg. V české normě ČSN EN 13286-4 [4] tyto důležité parametry nejsou uvedeny.

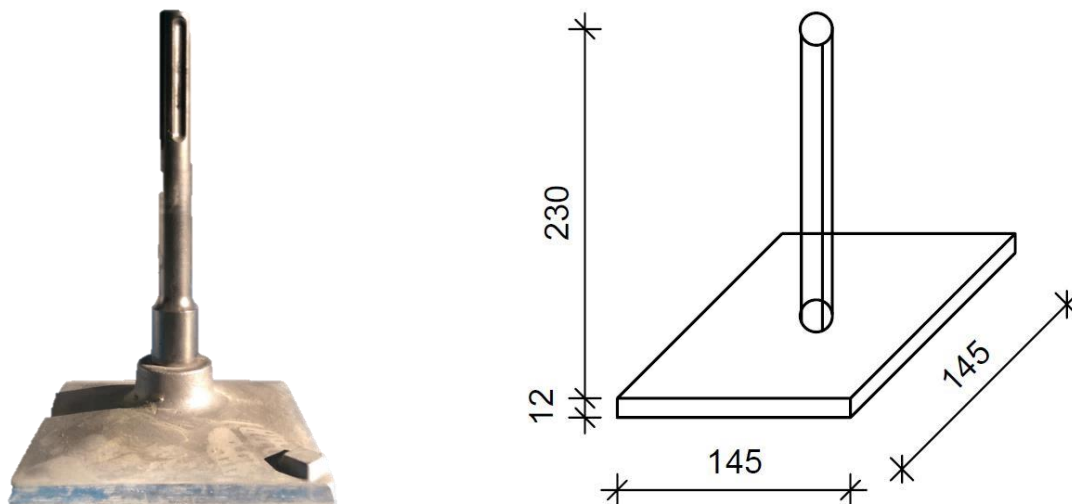
Dle ASTM C1435 [3] musí být hutnění uskutečněno nejpozději do 45 minut po ukončení míchání směsi. Čerstvý beton by měl být naplněn zhruba do 1/3 formy a hutněn. Ukončení hutnění lze provést v momentě, kdy čerstvý beton vyplní prostor mezi hutnicím nástavcem a vnitřní stranou formy. Následně se může přidat další vrstva čerstvého betonu a cyklus se opakuje. Pokud se nezaplní prostor mezi hutnicím nástavcem a vnitřní hranou formy do 20 s, hutnění se má zastavit a má se přidat další vrstva. Vzorek je zhotovený v momentě, kdy rozdíl mezi zhutněnou vrstvou betonu a horní hranou formy je menší než 3 mm.

Stanovit přesnou sílu působící na vzorek pod pneumatickým kladivem je složité, protože závisí na více parametrech. Nejdůležitějším parametrem je intenzita jednotlivých úderů a počet úderů při jmenovitých otáčkách. Norma ČSN EN 13286-4 [4], která řeší charakteristiky vibračního pěchu, žádný z těchto parametrů neuvádí. Upravuje pouze požadavek na kontrolu působícího statického tlaku, kterým by měla obsluha tlačit pěch proti vzorku. Velikost přítlaku by se měla pohybovat mezi 300 N až 400 N, aby se pěch od čerstvého betonu neodrážel. Dosažení tohoto tlaku bylo kontrolováno a naměřená hodnota byla 330 N.

Dalším neméně podstatným parametrem je doba hutnění. Norma ČSN EN 13286-4 [4] uvádí pojem dosažení maximálně možného zhutnění

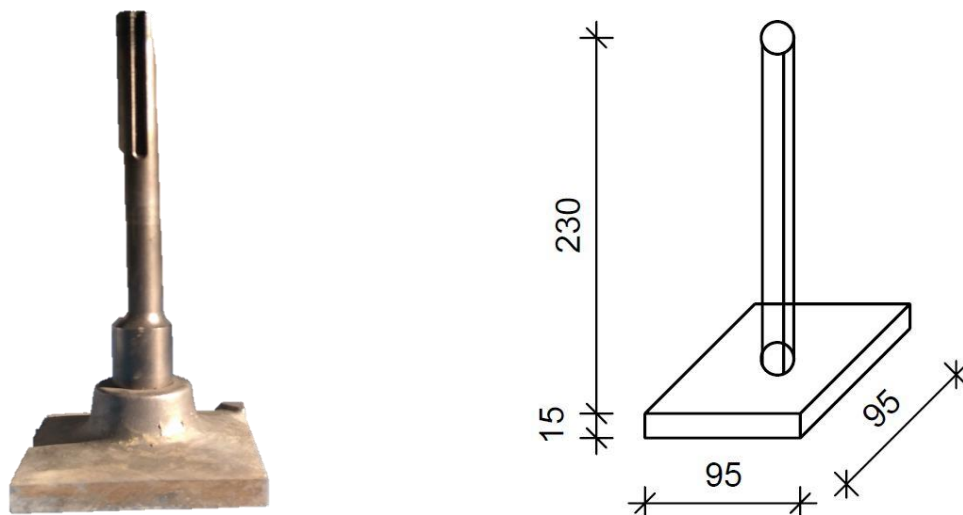
(obvykle stačí 1 minuta na vrstvu). Doba hutnění se pohybovala kolem 10 s (výpočet viz kapitola 5.4), nepřekročila však 11 s. Po uplynutí této doby směs nevykazovala pohyb. Delší doba hutnění by zkušební vzorek více ztuhlila, je ovšem otázkou, zdali by tento vzorek následně odpovídal výrobnímu procesu při realizaci.

Na obrázku 3-1 je zobrazen hutnicí nástavec na pneumatické kladivo určený pro výrobu krychelných vzorků válcovaného betonu. Hrana krychle je 150 mm a zkoušena je pevnost v tlaku.



Obrázek 3-1 Čtvercový hutnicí nástavec o straně 145 mm s upnutím SDS MAX

Hutnicí nástavec o hraně 100 mm určený pro výrobu trámčů z válcovaného betonu je zobrazen na obrázku 3-2.

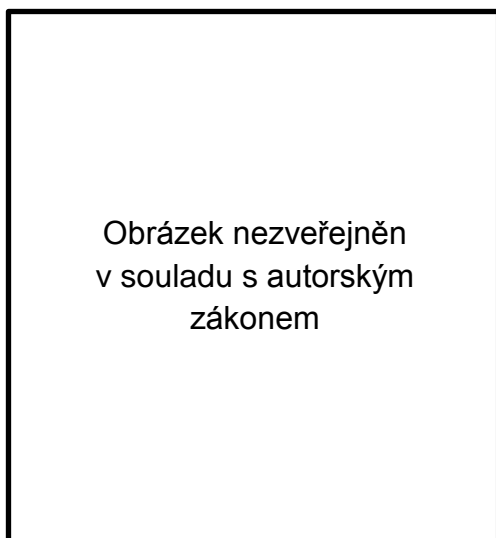


Obrázek 3-2 Čtvercový hutnicí nástavec o straně 95 mm s upnutím SDS MAX.

Na trámčích se zkouší pevnost v tahu za ohybu. Nástavec lze použít i pro hutnění krychelných vzorků o hraně 150 mm. Vzhledem k menší ploše nástavce

je větší uvolněná energie než v případě hutního nástavce o hraně 150 mm. Každá vrstva musí být hutněna minimálně 4x, což ještě umocňuje míru zhutnění. Tento postup však nebyl použit, neboť dosažená míra zhutnění by byla nereálně velká.

Použité pneumatické kladivo se řadí se svou intenzitou nárazu spíše ke slabším kladivům, pro účel výroby zkušebních vzorků válcovaného betonu je však zcela dostačující. Technická specifikace použitého pneumatického kladiva je zobrazena na obrázku 3-3. Pneumatické kladivo s upnutým hutním nástavcem je na obrázku 3-4.



Obrázek 3-3 Technická specifikace[1]



Obrázek 3-4 Kladivo GBH 5-38 D

3.2. Statický lis

Tato metoda byla začleněna jako srovnávací pro pneumatické kladivo, které využívá dynamického účinku. Statický lis by měl svými parametry lépe simulovat statický pojezd válce bez vibrace, který se podle informací od odborníků z praxe v České republice převážně používal na dosavadních realizacích. U statického lisu lze přesně nastavit působící sílu a tato normálová síla je známa. Sílu pneumatického kladiva lze zpětně určit za pomoci statického lisu, pokud si vlastnosti a parametry zkušebních vzorků odpovídají.

Dne 3.12.2015 jsem byl přítomen na realizaci válcovaného betonu v Praze – Velké Chuchli. Všechny mé odhady působících sil, kontaktních ploch a účinku válcování byly založeny na této zkušenosti. Vzorový válec použitý do výpočtu kontaktního napětí pod bubnem je shodný s válcem použitým na stavbě.

Na stránkách výrobce lze ve specifikaci válce dohledat zatížení na nápravu uvedenou na obrázku 3-5 a přesný technický rozkres válce na obrázku 3-6.

Obrázek nezveřejněn v souladu s autorským zákonem

Obrázek 3-5 Zatížení na nápravu válce (static linear load) [2]

Obrázek nezveřejněn v souladu s autorským zákonem

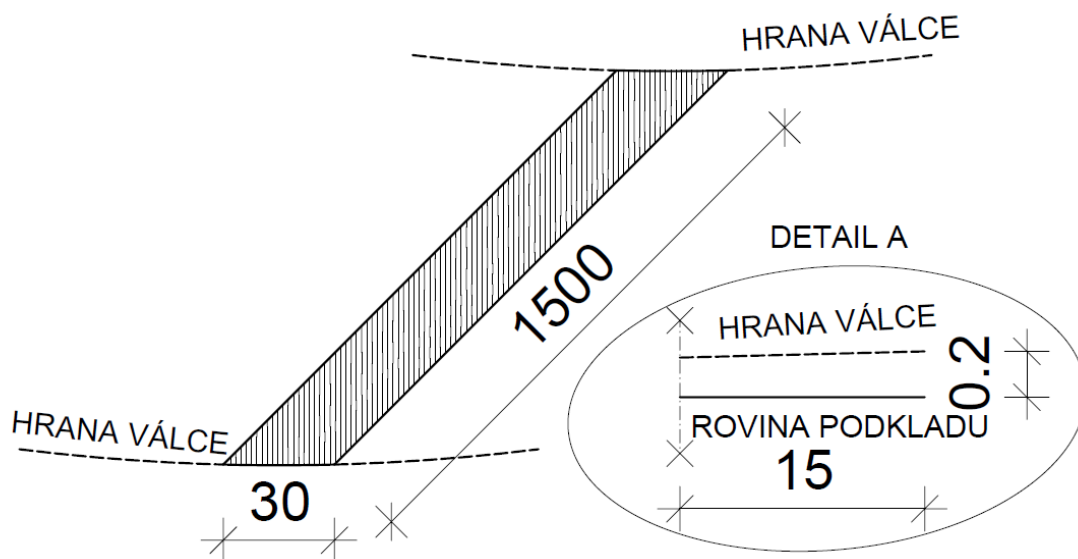
Obrázek 3-6 Technický rozkres použitého válce [2]

Pro další úvahy bylo nutné odhadnout tzv. „zatěžovací šířku“. Jedná se o rozměr válce v příčném směru (ve směru pojezdu válce) zobrazený na obrázku 3-7. Na základě této hodnoty lze odhadnout plochu válce v kontaktu s hutněným materiálem.



Obrázek 3-7 Zatěžovací šířka válce při realizaci

Odhad „zatěžovací šířky“ byl 30 mm a hodnota následně sloužila pro výpočet napětí pod válcem. Výškové zaoblení na obrázku 3-8 v DETAILU A mezi hranou válce a rovinou podkladu je 0,2 mm, což lze považovat za rovinu.



Obrázek 3-8 Schéma kontaktní plochy s hutněným materiálem (kóty v mm)

Předpokládaná plocha válce v kontaktu s podložím:

$$A = b * d = 0,03 * 1,5 = 0,045 \text{ m}^2$$

Výpočet zatížení na nápravu válce:

$$F = m * g = 3,675 * 9,81 = 36,05 \text{ kN}$$

Napětí pod válcem:

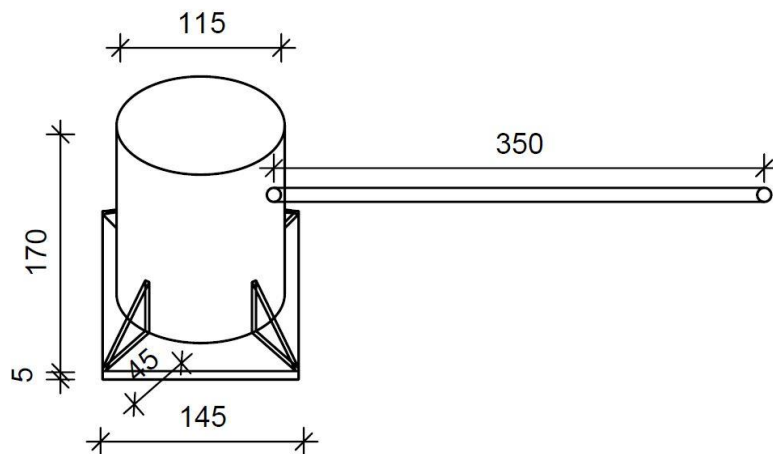
$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{36,05}{0,045} = 802 \text{ kPa}$$

Čtvercový nástavec:

Pro hutnění zkušebních těles v lisu byl zhotoven nástavec, který sloužil k napodobení statického pojezdu válce v laboratoři. Přizpůsobený byl pro formu o hraně 150 mm. Jedná se o ocelový svařenec s tloušťkou desky 5 mm. Pro větší bezpečnost při manipulaci pod lisem byl nástavec opatřen odnímatelným držadlem. Rohové výztuhy slouží jako ochrana proti ohýbání rohů.



Obrázek 3-9 Ocelový nástavec pro formu o hraně 150 mm



Obrázek 3-10 Výrobní schéma ocelového nástavce pro formu o hraně 150 mm(kóty v mm)

Plocha čtvercového nástavce (zkušební forma 150 x 150 mm):

$$A_n = 0,15 * 0,15 = 0,0225 \text{ m}^2$$

Dopočítaná působící síla na čtvercový nástavec, aby napětí pod nástavcem bylo totožné s napětím pod válcem:

$$F = \sigma * A_n = 802 * 0,0225 = 18,045 \text{ kN} \rightarrow 19 \text{ kN}$$

Pro hutnění vzorků určených pro zkoušku objemové hmotnosti byla použita odvozená síla o velikosti 19 kN. Tuto sílu lze označit jako základní (referenční). V dalším průběhu experimentálního programu byla působící síla zvětšována. Detailněji je důvod zvýšení síly popsán v kapitole 5.5.

Válcový nástavec:

Pro hutnění válcových těles určených k tlakové zkoušce byl vyroben druhý nástavec. Aby bylo zachováno stejné napětí pod nástavci, bylo nutné přepočítat působící sílu.

Plocha válcového nástavce (\varnothing 150 mm):

$$A_v = \pi * r^2 = \pi * 0,075^2 = 0,0176 \text{ m}^2$$

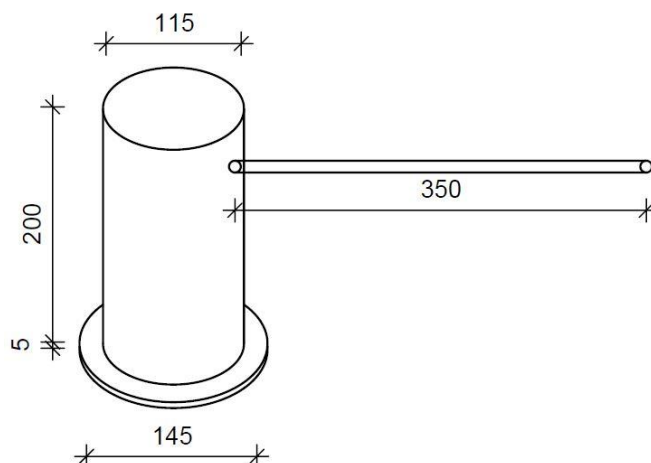
Dopočítaná síla pod válcovým nástavcem, aby bylo podobné napětí pod nástavci:

$$F = \sigma * A_v = 802 * 0,0176 = 14,11 \text{ kN} \rightarrow 15 \text{ kN}$$

Forma pro válcová tělesa má výšku 300 mm, je tedy dvojnásobně vyšší než krychelná forma (výška 150 mm). Pro zachování stejného výrobního procesu (hutnění ve třech vrstvách) a z časových důvodů byla zvětšena působící síla na dvojnásobek, tedy 30 kN. Výsledný postup hutnění tělesa byl ve třech vrstvách při působící síle 30 kN.



Obrázek 3-11 Válcový ocelový nástavec

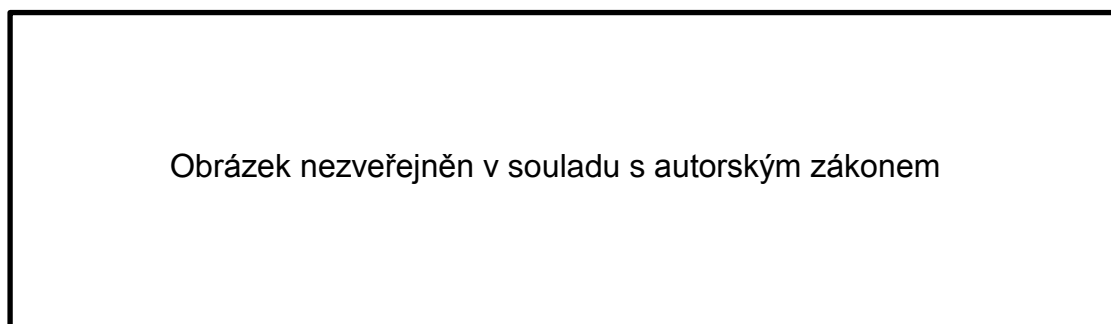


Obrázek 3-12 Výrobní schéma válcového nástavce (kóty v mm)

3.3. Proctorova zkouška

Zhutnitelnost zemin se vyjadřuje maximální objemovou hmotností ρ_{max} , které se dosáhne zhutněním zeminy v normové formě za použití normového pěchu při optimální vlhkosti W_{opt} . Výsledkem Proctorovy zkoušky (standard/modifikovaná) je závislost mezi objemovou hmotností zeminy ρ a vlhkostí w , ze které lze stanovit optimální vlhkost W_{opt} , při které je dosaženo maximální objemové hmotnosti zeminy ρ_{max} .

Standardní Proctorova zkouška používá pěch o hmotnosti 2,5 kg, který dopadá z výšky 305 mm. Hutnění se provádí 56 údery pěchu v každé ze tří vrstev, na které je vzorek rozdělen. Formy se rozdělují na Proctorovu zkoušku A, širokou Proctorovu zkoušku B a velmi širokou Proctorovu zkoušku C. Hodnoty musí odpovídat hodnotám uvedeným v tabulce na obrázku 3-13 [20]. V experimentálním programu byla použita forma B.



Obrázek 3-13 Rozměry normových forem pro Proctorovu zkoušku [20]

4. Výroba zkušebních těles

4.1. Příprava čerstvého betonu

Výchozí receptura betonové směsi válcovaného betonu byla určena na základě konzultací se společností CEMEX Česká republika.

Referenční receptura: kg/m^3

CEM I 42,5 R Prachovice	325
Frakce 0 – 4 (Dobříň)	1019
Frakce 4 – 8 (Dobříň)	631
Frakce 8 – 16 (Dobříň)	386
Voda	105
Provzdušňovací přísada	0,2
Zpomalovač tuhnutí	0,35



Obrázek 4-1 Směs po ukončení míchání

Výsledná teoretická objemová hmotnost směsi by měla být $2466,5 \text{ kg/m}^3$. Tato směs byla označena jako referenční a bylo připraveno 6 dalších směsí s upraveným množstvím vody, aby mohlo proběhnout stanovení křivky zhutnitelnosti a nalezení optimální vlhkosti směsi. V tabulce 4-1 je znázorněné množství přidané/odebrané vody v jednotlivých směsích v kg na m^3 .

Tabulka 4-1 Množství vody rozdělené podle směsi

Směs	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Přidané/odebrané množství vody (kg/m^3)	- 5	referenční směs	+ 5	+ 10	+ 15	+ 20	+ 25

Před začátkem míchání směsi musela proběhnout homogenizace kameniva. Z kapacitních důvodů bylo kamenivo dodáno v pytlích, nebylo zcela vysušené a obsahovalo určité množství vody. Jednalo se především o nejjemnější frakci kameniva 0-4 Dobříň. Kamenivo bylo vždy před výrobou vzorků zhomogenizováno v míchačce na beton a byly odebrány tři vzorky pro určení vlhkosti. Obsah vody v kamenivu se pohyboval kolem 5 ml vody na 100 g kameniva. O tuto vodu bylo sníženo množství přidané vody.

Výroba betonu byla provedena v souladu s normou ČSN EN 206 [19]. Předem navážené a odměřené složky byly umístěny do míchacího zařízení. Postup míchání byl:

- Homogenizace kameniva
- Přidání cementu
- Přidání vody + superplastifikátoru + zpomalovače tuhnutí

Složky byly míchány po dobu $90 \text{ s} \pm 15 \text{ s}$ tak, aby došlo k úplnému promíchání všech složek betonu. Během betonáže nebyla překročena teplota v laboratoři $30 \text{ }^\circ\text{C}$ a zároveň teplota směsi i prostředí byla větší než $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Konzistence čerstvého betonu byla ihned kontrolována testem „sněhová koule“. Jedná se o rychlou a informativní zkoušku určující vlhkost směsi. Princip zkoušky spočívá ve vytvoření „sněhové koule“ a vizuální kontrole. Ze směsi se odebere vzorek, ze kterého se v hrsti vytvoří koule a následně se hrst otevře. Suchá směs nedrží tvar, rozpadá se na prach a na prstech zanechává prachové stopy. Opačným extrémem je příliš vlhká směs, při které neodpadává žádná část ani při upuštění a na prstech zanechává stopy vlhkosti. Podařilo se vytvořit stabilní kouli bez otisků na prstech, což potvrdilo vhodnou konzistenci a mohla být provedena zkouška stupně zhutnitelnosti popsaná v kapitole 7.1.

4.2. Pneumatické kladivo

Krychelná tělesa

Výroba zkušebních krychelných těles probíhala do plastových forem $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$. Celkem bylo vyrobeno 33ks určených pro následující zkoušky:

- | | |
|---------------------|---------------------------|
| • Tlaková zkouška | 6 ks (směs 3) |
| • Objemová hmotnost | 21 ks (3 pro každou směs) |
| • CHRL | 6 ks (směs 3) |



Obrázek 4-2 Vrstva po prvním hutnění



Obrázek 4-3 Vrstva po třetím hutnění

Hutnění probíhalo ve třech vrstvách s vytvořením finální úpravy. Jednotlivé vrstvy byly volně nasypány ve vrstvě 6 cm. Úbytek tloušťky vrstvy při hutnění se pohyboval kolem 1 cm. Doba hutnění byla 10 s a byla stanovena postupem uvedeným v kapitole 5.4.

Po třetí zhutňovací vrstvě nebyla forma zcela vyplněna betonem (obrázek 4-3). Finální úprava spočívala v drobném navýšení vrstvy betonu nad hranu formy a krátkém zhutnění (obrázek 4-4). Doba hutnění byla o jednu třetinu kratší než doba hutnění jednotlivých vrstev. Účelem bylo vytvoření pokud možno jednotné plochy, což se ukázalo jako složité. V několika případech se stalo, že při ukončení hutnění nešel nástavec oddělit od betonu.

Při hutnění se pravděpodobně vyloučila voda společně se vzduchem pod nástavcem a část betonu zůstávala přilnutá na spodní hraně nástavce. Tento problém je zachycen na obrázku 4-5. Zjednodušeně lze konstatovat, že se tento problém zhoršoval s narůstajícím množstvím vody. Pro vytvoření kompaktní finální vrstvy lze chybějící místa dosypat pouze jemnější směsí betonu, která neobsahuje větší frakce kameniva. Jelikož byla vrstva již hutněna, opravné hutnění nevytvořilo kompaktní finální vrstvu. Hlavním důvodem pro vytvoření jednotné finální vrstvy je zkouška CHRL, jelikož zkoušená je právě finální vrstva tělesa.



Obrázek 4-4 Finální vrstva



Obrázek 4-5 Přichycení části betonu na nástavci

Trámce

Pro výrobu těles pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu byla použita forma 100x100x400 mm. Celkem byly vyrobeny tři trámce ze směsi č. 3. Plocha hutnicího nástavce je menší než v případě krychelné formy, bylo tedy nutné upravit dobu hutnění na 7 s, aby byla zachována uložená energie. Podrobný výpočet je uveden v kapitole 5.4.

Čtvercový hutnicí nástavec o straně 100 mm nepokrývá svojí plochou celou formu a je tedy nutné provést čtyři série hutnění pro jednu vrstvu. Při hutnění finální vrstvy se ukázalo, že vlivem dynamického hutnění dochází k narušení již zhutněné části tělesa a k částečnému vytlačování materiálu v okolí pěchu. Následkem toho bylo problematické vytvořit celistvý povrch při zachování spočítané hutnicí energie, jelikož opravy v hutnění znamenají přírůstek hutnicí energie.

Jako vhodnější se ukázala varianta rozdělení doby hutnění na polovinu. První hutnění vrstvy po dobu přibližně 3,5 s částečně zhutnilo vrstvu betonu, ale vzhledem k menšímu stlačení vrstvy bylo možné vytvořit kompaktnější povrch. Druhé hutnění v trvání zbývajících 3,5 s zhutnění dokončilo, ale vzhledem k již částečnému zhutnění okolních ploch nedocházelo k vytlačování betonu.

4.3. Statický lis

Postup výroby zkušebních těles byl podobný jako v případě pneumatického kladiva. Zhutňování probíhalo ve třech vrstvách při dané působící síle a finální vrstvě vytvořené pojezdem lisu. Jednotlivé vrstvy byly volně nasypány v tloušťce 6 cm s tím, že stlačení se po zhutnění pohybovalo kolem 1 cm. Na rozdíl od pneumatického kladiva se nevyskytoval problém s přichycením části betonu na nástavec. Důvodem byl pravděpodobně charakter hutnění, jelikož se jednalo pouze o statické zatěžování.



Obrázek 4-6 Forma při hutnění v lisu

První část vzorků vyrobených s použitím statického lisu byla vyrobena pro zkoušky objemové hmotnosti a stanovení křivky zhutnitelnosti. Pro tyto vzorky byla použita působící síla o velikosti 19 kN (podrobné vysvětlení v kapitole 3.2). V této sérii bylo vyrobeno 21 ks krychlí o rozměru 150x150x150 mm (3 krychle pro každou směs definovanou v tabulce 4-1). Pro výrobu byly použity nerozebíratelné plastové formy.

Jelikož se ukázalo, že hutnicí síla použitá při výrobě první sady vzorků byla nedostatečná, byl dodatečně zkoušen vliv zvětšování působící síly na dosažení míry zhutnění materiálu. Za tímto účelem byly vyrobeny další tři trojice zkušebních krychlí o hraně 150 mm, které byly hutněny silami 40 kN, 60 kN a 80 kN. Kvůli většímu působícímu tlaku byly použity ocelové formy.

Třetí část zkoušek byla zaměřena na válcová tělesa velikosti 150/300 mm. Šest těles bylo vyrobeno pro tlakovou zkoušku betonu.

4.4. Proctorova zkouška

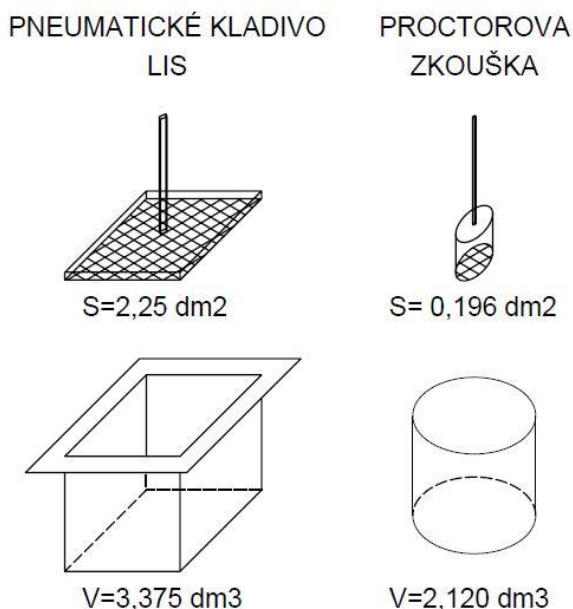
Bylo vyrobeno celkem 21 vzorků Proctorovou zkouškou standardní pro vytvoření křivky zhutnitelnosti. Bylo použito 7 směrů s proměnným množstvím vody (viz tabulka 4-1).

5. Energie hutnění

Numerické vyjádření míry zhutnění lze provést pomocí energie vynaložené při hutnění. Jelikož jednotlivé metody používají různá zkušební tělesa a různé principy hutnění, bylo nutné vyřešit otázku, jak celkovou hutnicí energii aplikovanou na těleso normalizovat.

První možností je vztáhnout energii na objem zkušebního tělesa. Při hutnění pneumatickým kladivem a lisem se používají stejná tělesa o objemu $3,375 \text{ dm}^3$, Proctorova zkouška používá válec o objemu $2,120 \text{ dm}^3$. Při tomto způsobu výpočtu energie však není žádným způsobem zohledněna plocha nástavce.

Druhou možností je vztáhnout energii na plochu nástavce. U jednotlivých metod hutnění (Proctorova zkouška, pneumatické kladivo, statický lis) jsou uvedeny výpočty oběma způsoby.



Obrázek 5-1 Schéma hutnění

5.1. Energie Proctorovy zkoušky

Jedná se o potenciální energii hmotného bodu o hmotnosti m , který padá volným pádem z výšky h . Na hmotný bod působí tíhová síla F_G o velikosti $F_G = mg$, která vykoná na dráze h práci $W = F_G h = mgh$. Ta se rovná tíhové potenciální energii tělesa ve výšce h , tedy $W = E_p$. [8]

Energie vztažená k objemu zkušebního tělesa

$$E_p = \frac{m * g * h * n * i}{V} = \frac{2,5 * 9,81 * 0,305 * 3 * 56}{0,002121} = 0,59 \frac{MJ}{m^3}$$

Energie vztažená k ploše zkušebního pěchu

$$E_p = \frac{m * g * h * n * i}{S} = \frac{2,5 * 9,81 * 0,305 * 3 * 56}{0,00196} = 0,64 \frac{MJ}{m^2}$$

- kde m je hmotnost pěchu [kg] – 2,5 kg
 g tíhové zrychlení [m/s^2] – 9,81 m/s^2
 h výška dopadu pěchu [m] – 0,305 m
 n počet vrstev zhutňované zeminy [ks] – 3 ks
 i počet úderu na jednu vrstvu [ks] – 56 ks
 V objem moždíře (forma Proctorovy zkoušky) [m^3] – 0,002121 m^3
 S dosedací plocha pěchu [m^2] – 0,00196 m^2

5.2. Energie pneumatického kladiva

Energie jednoho nárazu kladiva je vyjádřena výrobcem kladiva a dohledatelná v technických specifikacích. Hodnota se stanoví dle EPTA-Procedure 05/2009. Tato procedura je závazná pro všechny výrobce od 1.1.2011. Před tímto datem měřil energii nárazu každý výrobce podle svých předpisů, a proto porovnání hodnot mezi výrobci nebylo možné.

Energii jednoho nárazu je nutno násobit počtem jmenovitých otáček za minutu [min^{-1}] a dobou hutnění. Výsledkem je energie vyjádřena v joulech [J].

Energie vztažená k objemu zkušebního tělesa

$$E = \frac{w * n * o * t}{V} = \frac{5,9 * 3 * 48 * 10}{0,15 * 0,15 * 0,15} = 2,51 \frac{MJ}{m^3}$$

Energie vztažená k ploše zkušebního pěchu

$$E = \frac{w * n * o * t}{S} = \frac{5,9 * 3 * 48 * 10}{0,15 * 0,15} = 0,37 \frac{MJ}{m^2}$$

- kde w intenzita jednotlivých úderů [J] – 5,9 J
 n počet vrstev zhutňované zeminy [ks] – 3 ks
 o počet úderů [úder/s] – 48 úderů/s
 t doba hutnění na jednu vrstvu [t] – 10 s
 V objem zkušební formy [m^3] – 0,00337 m^3
 S dosedací plocha SDS nástavce [m^2] – 0,0225 m^2

5.3. Energie statického lisu

Jednodušeji lze určit mechanickou práci, jestliže se těleso přemísťuje působením konstantní síly F rovnoběžně s přímou trajektorií tělesa. Urazí-li těleso působením síly o velikosti F dráhu s , je mechanická práce $W = Fs$.

Na hmotný bod působí tíhová síla F_G o velikosti $F_G = mg$, která vykoná na dráze s práci $W = F_G s = mgs$. Ta se rovná tíhové potenciální energii tělesa $W = E_p$. [8]

Při volném nasypání směsi do formy a následném hutnění nástavcem byla dráha s kolem 1 cm. Tato hodnota byla uvažována ve výpočtu energie.

Energie vztažená k objemu zkušební formy

$$E_p = \frac{F * s * n}{V} = \frac{19\,000 * 0,01 * 3}{0,15 * 0,15 * 0,15} = 0,17 \frac{MJ}{m^3}$$

Energie vztažená k ploše zkušební formy

$$E_p = \frac{F * s * n}{S} = \frac{19\,000 * 0,01 * 3}{0,15 * 0,15} = 0,025 \frac{MJ}{m^2}$$

- kde F působící síla lisu [N] – 19 000 N
 s dráha lisu [m] – 0,01 m
 n počet vrstev zhutňované zeminy [ks] – 3 ks
 V objem zkušební formy [m³] – 0,00337 m³
 S dosedací plocha nástavce [m²] – 0,0255 m²

Pro přehlednost jsou jednotlivé výsledky výpočtu seřazeny v tabulce 5-1.

Tabulka 5-1 Množství energie vnesené do vzorku podle metody hutnění

Energie	Proctorova zkouška	Pneumatické kladiwo	Statický lis
E1 [J]	1256	8496	559
E2 [MJ/m ³]	0,59	2,51	0,17
E3 [MJ/m ²]	0,64	0,37	0,025

- kde $E1$ je celková energie vložena do tělesa.
 $E2$ energie vztažená k objemu zkušební formy.
 $E3$ energie vztažená k ploše hutnicího nástavce.

Závěry:

- Pneumatické kladivo má ze všech metod největší vloženou energii hutnění a energii vztaženou k objemu hutněného tělesa.
- Energie vztažená k ploše hutnicího nástavce je pro kladivo poloviční oproti Proctorově zkoušce.
- Energie statického lisu je ve všech porovnávaných parametrech řádově menší.

5.4. Stanovení potřebné doby hutnění pro pneumatické kladivo

V následujících výpočtech je Proctorova zkouška uvažována jako referenční. Cílem je dopočítat dobu hutnění pneumatickým kladivem tak, aby byla do vzorku vložena stejná energie jako při Proctorově zkoušce.

Energie vztažená k objemu zkušebního tělesa – PNEUMATICKÉ KLADIVO

$$E = \frac{w * n * o * t}{V} = \frac{5,9 * 3 * 48 * 2,5}{0,15 * 0,15 * 0,15} = 0,63 \frac{MJ}{m^3}$$

$$(Proctorova zkouška E = 0,59 \frac{MJ}{m^3})$$

Energie vztažená k ploše zkušebního pěchu – PNEUMATICKÉ KLADIVO

$$E = \frac{w * n * o * t}{S} = \frac{5,9 * 3 * 48 * 17}{0,15 * 0,15} = 0,64 \frac{MJ}{m^2}$$

$$(Proctorova zkouška E = 0,64 \frac{MJ}{m^2})$$

kde	<i>w</i>	intenzita jednotlivých úderů [J] – 5,9 J
	<i>n</i>	počet vrstev zhutňované zeminy [ks] – 3 ks
	<i>o</i>	počet úderů [úder/s] – 48 úderů/s
	<i>t</i>	doba hutnění na jednu vrstvu [t] – proměnný parametr
	<i>V</i>	objem zkušební formy [m ³] – 0,00337 m ³
	<i>S</i>	dosedací plocha SDS nástavce [m ²] – 0,0225 m ²

Jediným parametrem, který lze u konkrétně zvoleného pneumatického kladiva měnit, je doba hutnění. Pro energii vztaženou k objemu tělesa vychází potřebná doba hutnění 2,5 s, pro energii vztaženou na plochu nástavce přibližně 17 s. Výsledky se tedy diametrálně liší. Výsledná doba hutnění byla určena na 10 s jako přibližný průměr obou dob hutnění. Hodnoty objemové hmotnosti naměřené u pneumatického kladiva a Proctorovy zkoušky se velice

blížily (viz kapitola 6), což lze považovat za potvrzení správnosti odhadu doby hutnění.

Pro zkoušku tahu za ohybu se používá forma o hraně 100x100x400 mm a hutnicí nástavec o straně 100 mm. Pokud by byla ponechána standardní doba hutnění (10 s), vzorek by byl více zhutněn v poměru ke krychli o hraně 150x150x150 mm. Jelikož hlavním faktorem je změna v ploše hutnicího nástavce (2,25x menší) a změna objemu tělesa je méně podstatná (cca 1,18x větší), řídil se přepočtení doby hutnění energií vztaženou k ploše nástavce.

Energie vztažená k ploše zkušebního pěchu – PNEUMATICKÉ KLADIVO

$$E = \frac{w * n * o * t}{S} = \frac{5,9 * 3 * 48 * 7}{0,1 * 0,1} = 0,59 \frac{MJ}{m^2}$$

$$(Proctorova zkouška, E = 0,64 \frac{MJ}{m^2})$$

kde	<i>w</i>	intenzita jednotlivých úderů [J] – 5,9 J
	<i>n</i>	počet vrstev zhutňované zeminy [ks] – 3 ks
	<i>o</i>	počet úderů [úder/s] – 48 úderů/s
	<i>t</i>	doba hutnění na jednu vrstvu [t] – 7 s
	<i>S</i>	dosedací plocha SDS nástavce [m ²] – 0,01 m ²

Pro tělesa pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu byla tedy stanovena potřebná doba hutnění na 7 s.

5.5. Stanovení potřebné hutnicí síly pro lis

Pro výrobu vzorků v lisu byla použita síla spočtená v kapitole 3.2. Pozdější výsledky zkoušek však ukázaly, že pro dosažení odpovídajícího zhutnění by byla potřebná daleko větší síla. Následující výpočet poskytuje hrubý odhad této síly.

Energie vztažená k ploše zkušebního pěchu – STATICKÝ LIS

$$E_p = \frac{F * s * n}{S} = \frac{240\,000 * 0,020 * 3}{0,15 * 0,15} = 0,64 \frac{MJ}{m^2}$$

$$(Proctorova zkouška E_p = 0,64 \frac{MJ}{m^2})$$

kde	<i>F</i>	působící síla lisu [N] – ZVOLENO 240 000 N
	<i>s</i>	dráha lisu [m] – 0,02 m (pro jednu vrstvu hutnění)

n počet vrstev zhutňované zeminy [ks] – 3 ks

S dosedací plocha nástavce [m^2] – 0,0225 m^2

Z výpočtu je patrné, že statický lis by měl teoreticky vyvinout sílu 240 kN a stlačit vrstvu betonu o 2 cm, aby se parametry vzorků hutněných lisem blížily vzorkům hutněným Proctorovou zkouškou, případně pneumatickým kladivem. Původní použitá síla (20 kN) je tedy 12x zvětšena.

6. Křivka zhutnitelnosti

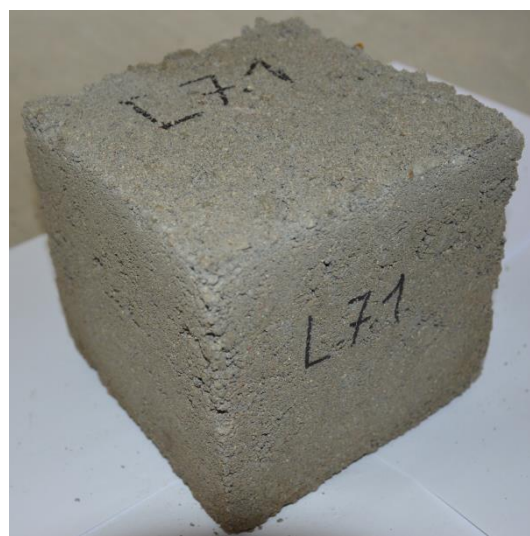
Pro stanovení závislosti mezi vlhkostí a objemovou hmotností slouží křivka zhutnitelnosti. U receptury s pevně daným procentem pojiva jsou zvoleny různé vlhkosti receptury, viz. tabulka 4-1. Vzorky zhotovené pomocí lisu byly zatěžovány silou 19 kN, vysvětlení v kapitole 3.2.

Hutnění vzorků probíhalo do plastových forem, které byly opatřeny separačním nátěrem zabraňujícím spojení vzorku a formy. Odbednění zkušebních těles probíhalo za pomoci stlačeného vzduchu, který je vpuštěn dnem formy. V případě vzorků hutněných lisem docházelo k nedostatečnému zhutnění, vzduch pronikal mezerovitou strukturou a tím nevytvořil se tedy dostatečný tlak, který by tlačil na vzorek a pomohl k jeho odbednění.

Pro odbednění bylo zapotřebí použít hrubší sílu, a to v podobě klepání formou o zem. Vlivem nárazu došlo k odpadu jemných částic po stranách vzorku (obrázek 6-1). Jelikož při nárazu nebylo možné vždy uhlídat rovnoměrný pád ocelového svařence, na kterém byla držena forma, vlivem pádu na jednu stojku došlo k uštípání rohu vzorku. Obrovský vliv na vzhled mělo množství obsažené vody, jelikož se stoupajícím množstvím vody rostlo zhutnění a zlepšoval se vzhled vzorků (obrázek 6-2).



Obrázek 6-1 Lis -5 kg/m³



Obrázek 6-2 Lis +25 kg/m³

Nejhorší výsledek byl u tělesa z 1. směsi (-5kg vody na m³) zobrazeno vlevo na obrázku 6-1. Pro porovnání je na obrázku 6-2 těleso z nejvlhčí směsi (+25kg vody na m³)

Přestože tímto způsobem probíhalo také odbedňování vzorků zhutněných pomocí pneumatického kladiva, vlivem dostatečného zhutnění nedocházelo k porušení vzorku, případně v omezené míře. Pro srovnání obrázek 6-3

zachycuje vzorek nejsušší směsi (-5kg vody na m³) a obrázek 6-4 nejvlhčí směsi (+25kg vody na m³). Vzorky měly vesměs neporušené hrany a rohy a vliv proměnné vlhkosti na vzhled byl výrazně menší, než u vzorků vyrobených statickým hutněním. Objem bylo proto možno stanovit jednoduše pomocí změřených délek hran vzorků.



Obrázek 6-3 Pneumatické kladivo -5kg/m³

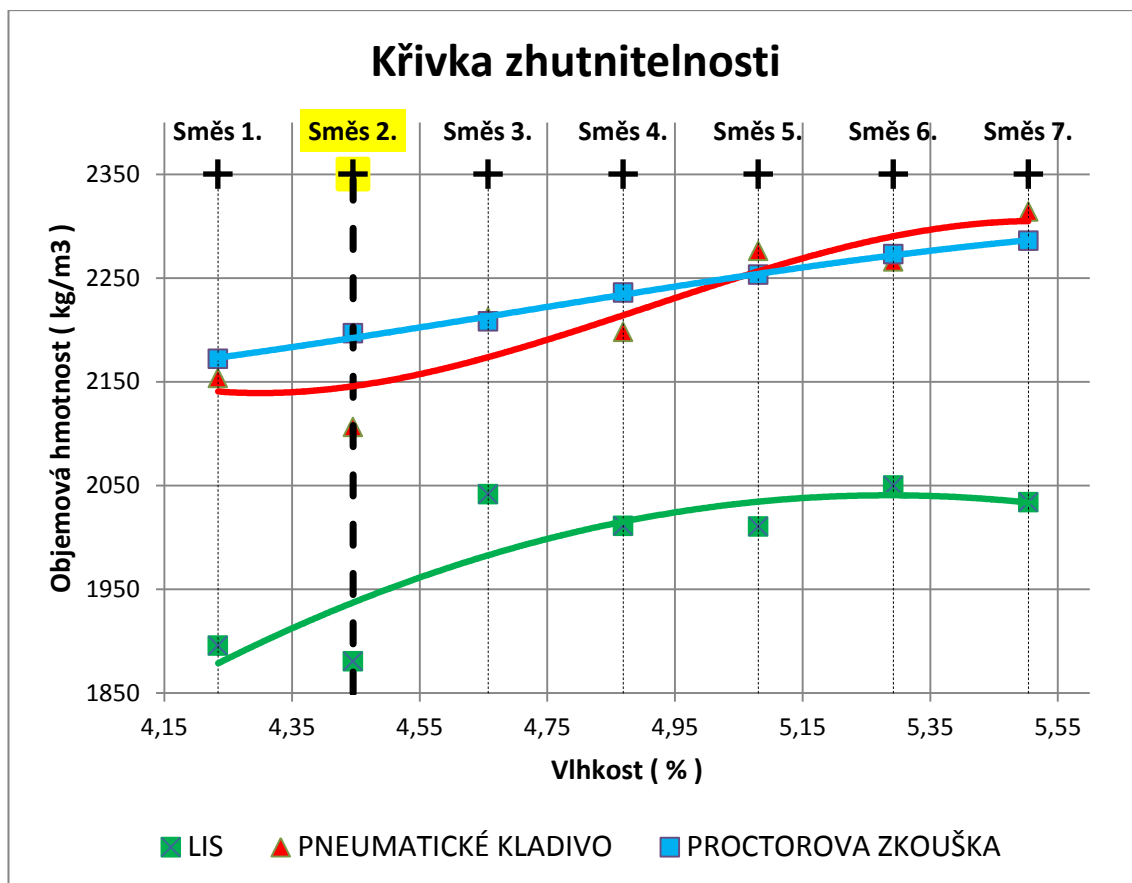
Obrázek 6-4 Pneumatické kladivo +25kg/m³

Naměřené hodnoty objemové hmotnosti pro jednotlivé metody hutnění rozdělené podle množství přidané vody jsou uvedeny v tabulce 6-1. Podrobné protokoly z měření jsou uvedeny v přílohách A, B, C.

Tabulka 6-1 Objemová hmotnost rozdělena podle metody hutnění a směsi

Směs	Přidané/odebrané množství vody	Vlhkost	Lis	Kladivo	Proctorova zk.	
		(%)	Objemová hmotnost (kg/m ³)			Směr.odch.
1.	- 5 kg / m ³	4,23	1896	2154	2172	4
2.	referenční směs	4,45	1880	2106	2197	3
3.	+ 5 kg / m ³	4,66	2042	2212	2208	3
4.	+ 10 kg / m ³	4,87	2011	2198	2236	4
5.	+ 15 kg / m ³	5,08	2010	2276	2253	6
6.	+ 20 kg / m ³	5,29	2050	2266	2273	4
7.	+ 25 kg / m ³	5,50	2034	2314	2286	3

Výsledky Proctorovy zkoušky ukazují téměř lineární nárůst objemové hmotnosti se vzrůstajícím množstvím vody. V provedeném experimentu ani po přidání 25kg/m³ vody není vidět vrchol křivky zhutnitelnosti. V uvedeném případě byla vlhkost směsi 5,5% a vodní součinitel 0,4. Jedná se o metodu s rovnoměrnými výsledky hutnění se směrodatnou odchylkou pro jednotlivé směsi pohybující se okolo 3-4 kg/m³.



Obrázek 6-5 Křivka zhutnitelnosti

Hutnění pneumatickým kladivem probíhalo ve třech vrstvách vždy po dobu 10 s (výpočet doby hutnění je popsán v kapitole 5.4). Předběžně lze říci, že se zvolenou dobou hutnění vzorky odpovídají s drobnými odchylkami vzorkům Proctorovy zkoušky, což bylo zvoleno jako cíl pro ověření vhodnosti postupu hutnění. Ve druhé směsi byl diametrální rozdíl pravděpodobně způsoben lidskou chybou, a to nedostatečnou dobou hutnění (obrázek 6-5).

Naměřené výsledky vzorků zhutněných pomocí lisu nevykazují žádnou jednoznačnou tendenci, proložená regresní křivka má však vrchol pro směs č. 6. Stanovené objemové hmotnosti jsou výrazně menší, což naznačuje, že by bylo vhodné hutnit vzorky v lisu větší silou. Tato hypotéza je dále sledována v kapitole 7.6.

Pro další zkoušky byla vybrána směs číslo 3 (+5kg/m³ vody vůči referenční směsi). Pokud by byla vybrána směs s větším obsahem vody, bylo by dosaženo pravděpodobně lepších výsledků, ovšem při výběru byly zohledněny také faktory související s realizací na stavbě.

U směsi číslo 3 nenastával tak velký problém s přilnutím betonu na hutnicím nástavci. Vzhledem k zachovanému nízkému vodnímu součiniteli je pro tuto recepturu uvažována realizace. Venkovní teplota se může blížit k bodu mrazu, přesto lze provádět betonáž.

7. Zkoušky

7.1. Stupeň zhutnitelnosti

Do čisté a navlhčené nádoby se naplní betonová směs bez zhutňování po horní okraj. Přebytný beton se odstraní pomocí srovnávací lišty, aby se zamezilo zhutňování horní vrstvy betonu. Pomocí vibračního stolu se beton zhutní do té míry, že není patrné zmenšování objemu. Po zhutnění se stanoví hodnota s , tedy průměrná hodnota mezi horní hranou formy a povrchem zhutněného betonu, s přesností na 1 mm. Výsledná hodnota je dána průměrem stanoveným ze čtyř měření provedených uprostřed každé strany. [10]

Stupeň zhutnitelnosti c je dán vztahem:

$$c = \frac{h}{h - s}$$

kde h je vnitřní výška nádoby v [mm]

s průměrná hodnota ze čtyř změřených vzdáleností mezi horní hranou formy a povrchem zhutněného betonu, zaokrouhlená na milimetry.

Tabulka 7-1 Klasifikace podle zhutnitelnosti

Stupeň	Stupeň zhutnitelnosti
C0 - směs velmi tuhá	>1,46
C1 - směs tuhá	1,45 až 1,26
C2 - směs plastická	1,25 až 1,11
C3 - směs měkká	1,10 až 1,04

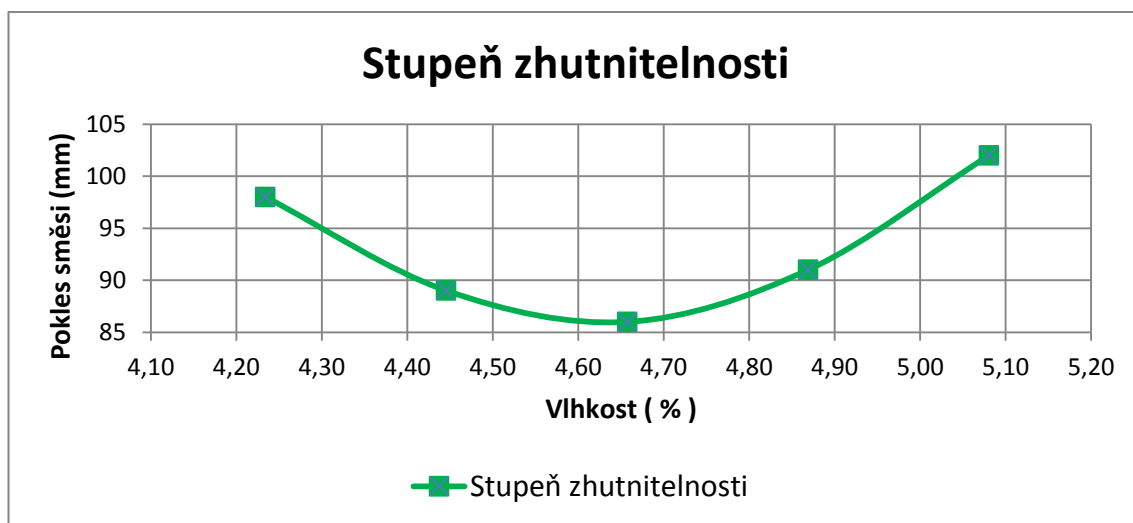
Obrázek nezveřejněn v souladu
s autorským zákonem

Obrázek 7-1 Stupeň zhutnitelnosti - princip zkoušky [11]

Stupeň zhutnitelnosti byl zkoušen na 1. – 5. směsi. Všechny se dle výsledků zařadily do kategorie C1 – směs tuhá (tabulka 7-2).

Tabulka 7-2 Stupeň zhutnitelnosti - vyhodnocení zkoušky

Směs	s (mm)	C - Stupeň zhutnitelnosti	
Směs 1. (-5kg vody na m ³)	98	1,32	C1 - směs tuhá
Směs 2. (referenční)	89	1,29	C1 - směs tuhá
Směs 3. (+5kg vody na m ³)	86	1,27	C1 - směs tuhá
Směs 4. (+10kg vody na m ³)	91	1,29	C1 - směs tuhá
Směs 5. (+15kg vody na m ³)	102	1,34	C1 - směs tuhá



Obrázek 7-2 Křivka stupně zhutnitelnosti z provedených zkoušek

Při vynesení výsledků stupně zhutnitelnosti do grafu na obrázku 7-2, křivka má tvar paraboly. Vrchol křivky se tedy neshoduje s vrcholem křivky vykresleným pro výsledky Proctorovy zkoušky.



Obrázek 7-3 Stupeň zhutnitelnosti před a po vibraci

7.2. Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena v souladu s normou ČSN EN 12390-3 [12]. Zkušební lis vyhovuje ČSN EN 12390-4[13]. Rozměry zkušebních těles s tolerancí odpovídaly normě ČSN EN 12390-1[14]. Tělesa byla zkoušena po min. 28 dnech od jejich vybetonování. Každé těleso bylo před začátkem zkoušky změřeno, zváženo a byla určena příslušná objemová hmotnost. Rychlost zatěžování zkušebních vzorků byla konstantní o velikosti 4 až 6 kN/s. Zatěžování probíhalo plynule, bez nárazu až do porušení tělesa, kdy byla zaznamenána maximální hodnota působícího zatížení. Pevnost v tlaku byla zaokrouhlena na hodnotu 0,1 MPa.

Výsledná pevnost v tlaku:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

kde f_c je pevnost v tlaku [MPa]

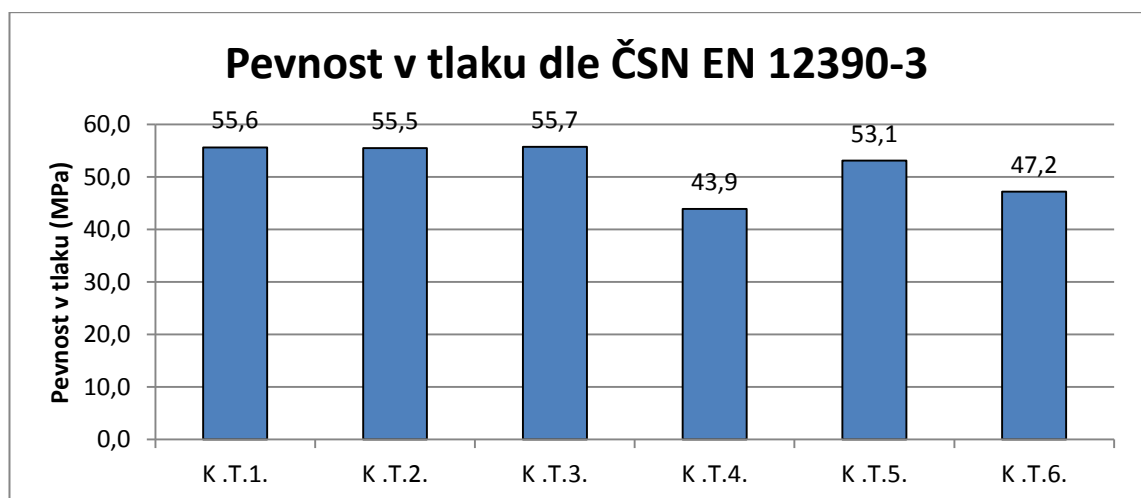
F maximální působící síla při porušení tělesa [N]

A_c průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení, vypočtená ze jmenovité velikosti tělesa dle ČSN EN 12390-1[14] [mm²]

Zkoušky pro zvolenou směs č.3 (pneumatické kladivo):

Pro zkoušku v tlaku bylo vyrobeno šest těles pomocí pneumatického kladiva postupem popsáním v kapitole 4.2, za použití 3. směsi (+5kg vody na m³).

Výsledné pevnosti jsou vykresleny na obrázku 7-4. Protokol ke zkoušce je uveden v příloze D.



Obrázek 7-4 Pevnost v tlaku na zkušebních krychlich 150x150x150 mm

Průměrná hodnota pevnosti v tlaku byla 51,8 MPa. Byla dopočítána také charakteristická pevnost v tlaku X_n dle ČSN EN 1990 [17].

$$X_n = m_x \{1 - k_n V_x\}$$

kde m_x je aritmetický průměr hodnot [MPa] = 51,8 MPa

k_n součinitel stanovený dle ČSN EN 1990 pro 5% charakteristickou hodnotu [-], (pro $n=6$ a neznámý V_x) = 2,18

V_x variační koeficient určen jako neznámý = 0,098

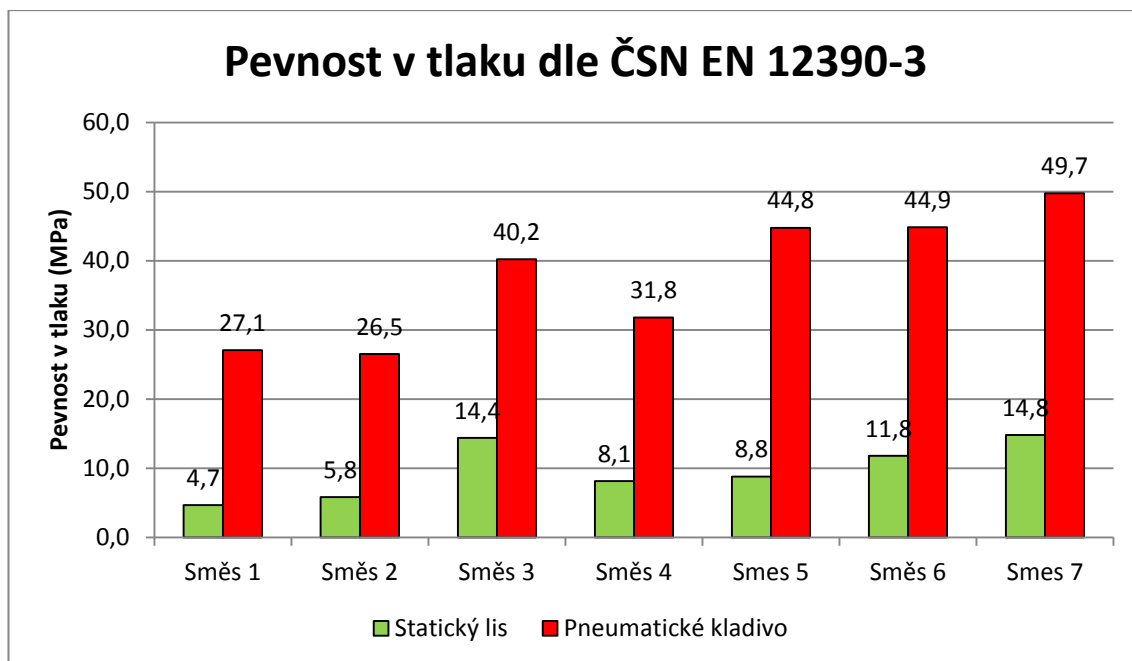
V případě neznámého variačního koeficientu se výběrová směrodatná odchylka musí vydělit aritmetickým průměrem. Charakteristická hodnota pevnosti válcovaného betonu v tlaku je 40,8 MPa.



Obrázek 7-5 Porušení zkušebního tělesa při zkoušce pevnosti v tlaku

Orientační zkoušky pevnosti na vzorcích pro stanovení křivky zhutnitelnosti

Pro stanovení křivky zhutnitelnosti bylo použito 7 směsí s rozdílným množstvím vody (viz. tabulka 6-1). Pro každou směs byly vyrobeny tři vzorky pomocí statického lisu s působící silou 19 kN a tři vzorky pneumatickým kladivem. Tyto vzorky byly uskladněny, aby bylo možné provést tlakové zkoušky. Na obrázku 7-6 jsou výsledky průměrných pevností v tlaku jednotlivých směsí.



Obrázek 7-6 Pevnost v tlaku na krychlích 150x150x150 mm

Výsledné průměrné pevnosti vzorků hutněné pneumatickým kladivem byly větší 6x (pro 1. směs) po 3x (pro 7. směs) oproti vzorkům hutněným pomocí statického lisu. U obou metod lze pozorovat trend narůstající pevnosti v tlaku se vzrůstajícím množstvím vody. Podrobné výsledky jsou shrnuty v příloze E.

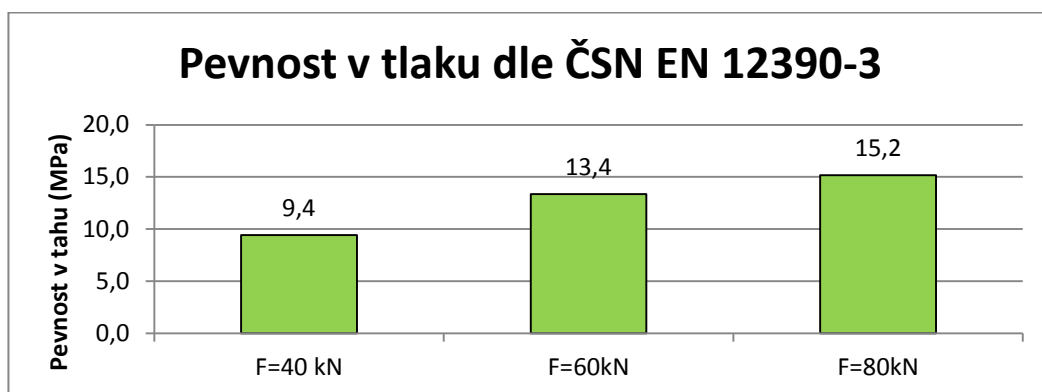
Třetí směs vykazuje nadprůměrné hodnoty pevnosti v tlaku pro statický lis i pneumatické kladivo. Možné vysvětlení je ve větší vlhkosti směsi, ovšem Proctorova zkouška žádný výkyv pro třetí směs nevykazuje.

Změna tlakové pevnosti při změně hutnicí síly (statický lis):

Jelikož podle výpočtu v kapitole 5.5 by pro hutnění vzorku v lisu měla být použita výrazně vyšší hutnicí síla, pro dosažení stejného zhutnění jako pomocí pneumatického kladiva, byla na zvolené směsi č. 3 sledována také závislost tlakové pevnosti vzorku na aplikované hutnicí síle. Výsledky jsou zobrazeny na obrázku 7-7 a jedná se o průměrné hodnoty pevností ze tří vzorků pro každou sílu. Ve výsledcích je jasně patrný rostoucí trend pevnosti, ovšem pevnosti vzorků hutněných pneumatickým kladivem zdaleka nebylo dosaženo. Podrobné výsledky jsou shrnuty v příloze F.

Obrázek 7-6 ukazuje i skutečnost, že vyšší pevnosti lze dosáhnout zvýšením obsahu vody, nebo větším zhutněním (obrázek 7-7). **Pevnosti 15,2 MPa** bylo dosaženo zvýšením základní působící síly o čtyřnásobek (20 kN -> 80 kN). **Pevnosti 14,8 MPa** platící pro 7.záměs (na obrázku 7-6) bylo dosaženo nárůstem přidané vody zhruba o 20% vůči referenční směsi (110 kg/m³ -> 135 kg/m³), při působící referenční síly 20 kN.

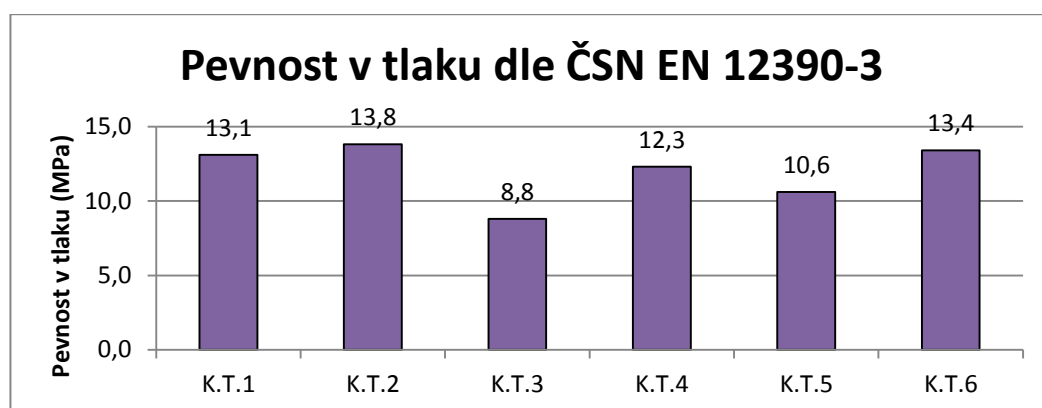
Menší míru zhutnění, a tedy nižší pevnost v tlaku lze kompenzovat větším množstvím vody.



Obrázek 7-7 Pevnost v tlaku pro zvětšené působící síly-lis

Zkoušky pro zvolenou směs č.3 (válcová tělesa-statický lis):

Pro zkoušku v tlaku bylo vyrobeno šest těles pomocí statického lisu postupem popsaným v kapitole 3.2, za použití 3. směsi (+5kg vody na m³). Průměrná hodnota pevnosti v tlaku byla 12 MPa.

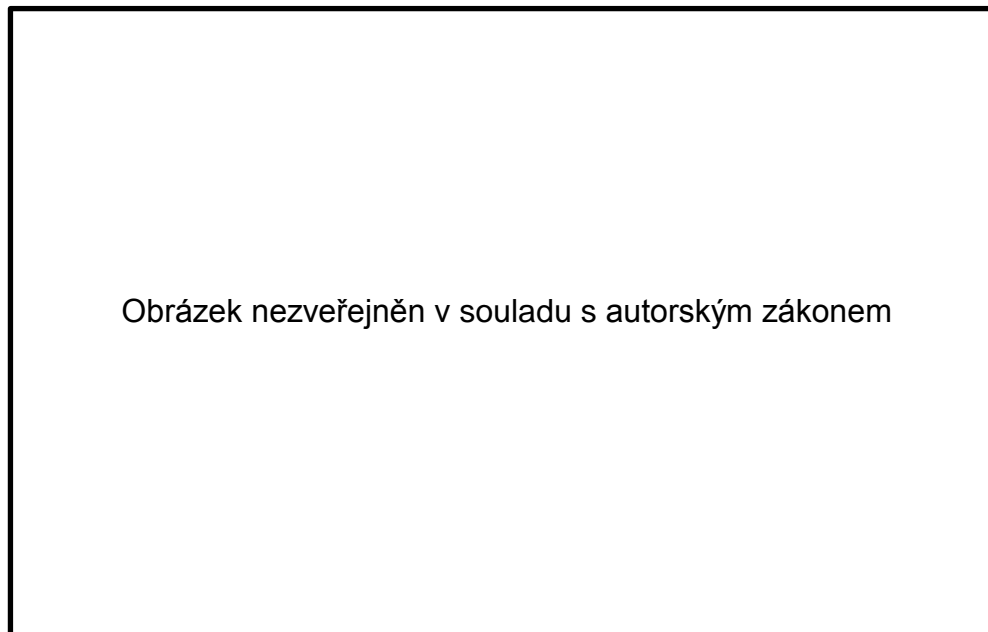


Obrázek 7-8 Pevnost v tlaku pro válcová tělesa - statický lis



Obrázek 7-9 Porušení válcového tělesa při tlakové zkoušce

7.3. Pevnost v tahu ohybem



Obrázek 7-10 Pevnost v tahu ohybem – schéma zatěžování[18]

Zkouška pevnosti v tahu ohybem byla provedena v souladu s normou ČSN EN 12390-5[18].

Zkušební lis vyhovuje ČSN EN 12390-4[13]. Rozměry zkušebních těles s tolerancí odpovídaly normě ČSN EN 12390-1[14]. Podobně jako u zkoušky pevnosti v tlaku byla tělesa zkoušena po min. 28 dnech od jejich vybetonování. Každé těleso bylo před začátkem zkoušky změřeno, zváženo a byla určena příslušná objemová hmotnost. Rychlost zatěžování zkušebních vzorků byla konstantní o velikosti 4 až 6 kN/s. Zatěžování probíhalo plynule až do porušení tělesa, kdy byla zaznamenána maximální hodnota působícího zatížení. Pevnost v tahu byla zaokrouhlena na hodnotu 0,1 MPa.

Výsledná pevnost v tahu ohybem:

$$f_{cf} = \frac{F * l}{d_1 * d_2^2}$$

kde f_{cf} je pevnost v tahu ohybem [MPa]

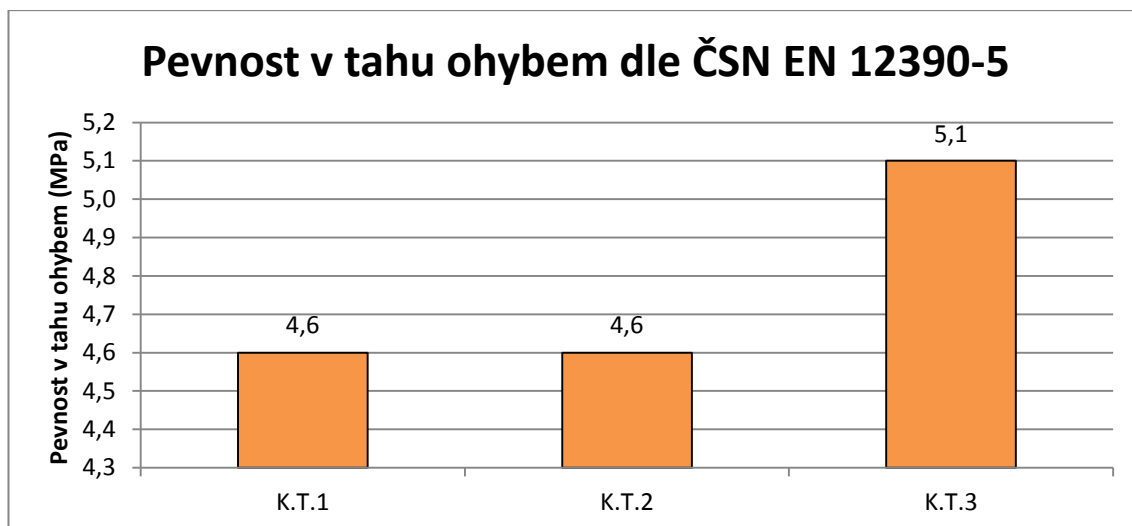
F je maximální působící zatížení [N]

l vzdálenost mezi podporujícími válečky [mm]

d_1, d_2 jsou rozměry příčného řezu tělesem [mm]

Vyhodnocení zkoušky:

Zkouška tahu za ohybu byla provedena na třech zkušebních trácích ze zvolené směsi č. 3 vyrobených pneumatickým kladivem. Postup výroby zkušebních těles je popsán v kapitole 4.2. Protokol ke zkoušce je uveden v příloze D.



Obrázek 7-11 Pevnost v tahu ohybem na trácích 100x100x400 mm

Pro kontrolu byla dopočítána také charakteristická pevnost v tahu X_n dle ČSN EN 1990[17].

$$X_n = m_x \{1 - k_n V_x\}$$

kde m_x aritmetický průměr hodnot [MPa] = 4,8 MPa

k_n součinitel stanovený dle ČSN EN 1990 pro 5% charakteristickou hodnotu [-], (pro $n=3$ a neznámý V_x) = 3,37

V_x variační koeficient určen jako neznámý = 0,061

V případě neznámého variačního koeficientu se výběrová směrodatná odchylka musí vydělit aritmetickým průměrem. Charakteristická hodnota pevnosti válcovaného betonu v tahu je 3,8 MPa.

U vzorků hutněných pneumatickým kladivem byla naměřena charakteristická pevnost v tlaku na krychli hodnotou 40,8 MPa a charakteristická pevnost v tahu 3,8 MPa. Norma ČSN EN 1992-1-1 udává tabulku pevnostních tříd betonu. Beton lze zařadit do kategorie C30/37, ovšem naměřená hodnota pevnosti v tahu dosáhla vyšší hodnoty (pro beton C30/37 je pevnost v tahu 2,9 MPa)

7.4. Odolnost proti působení CHRL

Válcovaný beton je schopný odolávat klimatickým podmínkám. V roce 1999 provedl Pigott [21] vizuální studii realizací válcovaného betonu v Kanadě a USA, se stářím posuzovaných povrchů od 4 – 20 let. Výsledkem studie byl závěr, že ve struktuře chybí nejjemnější částice a porušení zasahuje do hloubky 2 mm. Struktura je ovšem kompaktní a nejsou patrná větší poškození. Větší frakce kameniva je pevně ukotvena v matici válcovaného betonu.

Vyhodnocení zkoušky CHRL:

Zkouška CHRL proběhla podle normy ČSN 73 1326 [22], metoda C. Povrch zkušebního tělesa je z kladné teploty ochlazen na zápornou teplotu a předepsanou dobu teplota udržována. Následně je povrch zahřátý na kladnou teplotu a teplota je udržována.

Pro stanovení odolnosti betonu vůči CHRL bylo připraveno 6 zkušebních krychlí o rozměrech 150x150x150 mm ze směsi č. 3. Hutnění probíhalo pomocí pneumatického kladiva postupem popsáním v kapitole 4.2. Účelem zkoušky je určení odolnosti povrchu vozovky proti mrazu v kombinaci s chemickými rozmrazovacími látkami používanými v zimním období. Jako chemická rozmrazovací látka se používá 3% roztok chloridu sodného (NaCl).

Ke zkoušce bylo použito automaticky programovatelné zmrazovací zařízení KD 20 s automaticky měnitelnou teplotou prostředí. Vzorky byly umístěny do 3% roztoku NaCl nacházejícího se v miskách z korozi-vzdorného materiálu. Ve zkušebním prostoru byly vzorky podrobeny střídavému zmrazování a rozmrazování. Cyklus započal zchlazením zkušební plochy vzorku na teplotu - 15 °C a na této teplotě byl udržován po dobu 15 minut. Následoval ohřev zkušební vzorku na teplotu 20 °C a na této hodnotě byl opět udržován po dobu 15 minut. Tímto byl dokončen jeden cyklus a mohl započít další. Po dokončení 25. cyklu bylo zkoušení přerušeno a zkoumány výsledky.



Obrázek 7-12 Odpad ze zkušební vzorku po ukončení 25. cyklu

Uvolněné částice (včetně částic okartáčovaných z povrchu) byly splaveny do misky a odstraněna přebytečná voda (obrázek 7-12). Misky byly vloženy do sušárny, ve které byla teplota vzduchu 105 °C.



Obrázek 7-13 Povrch po 25 cyklu



Obrázek 7-14 Povrch po 50 cyklu

Po vysušení byla stanovena hmotnost uvolněných částic a přepočítána na 1 m² povrchu zkušebního tělesa. Odpad byl stanoven v g/m². Tělesa byla vrácena do zkušebního přístroje a zkouška pokračovala do provedení 50. cyklu. Uvolněné částice po 50. cyklu byly splavovány do stejných misek, výsledné odpady jsou tedy součtové hodnoty odpadu k příslušnému cyklu.

Odolnost povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek byla určena ze vzorce:

$$\rho_a = \frac{\Sigma m}{A}$$

kde Σm je součet všech hmotností odpadů od prvního do n-tého cyklu v g

A velikost zkušební povrchu v m², rozměry se stanoví s přesností na 1%

Výsledky přepočítaných odpadů jsou ukázány v tabulce 7-3 podle příslušných cyklů.

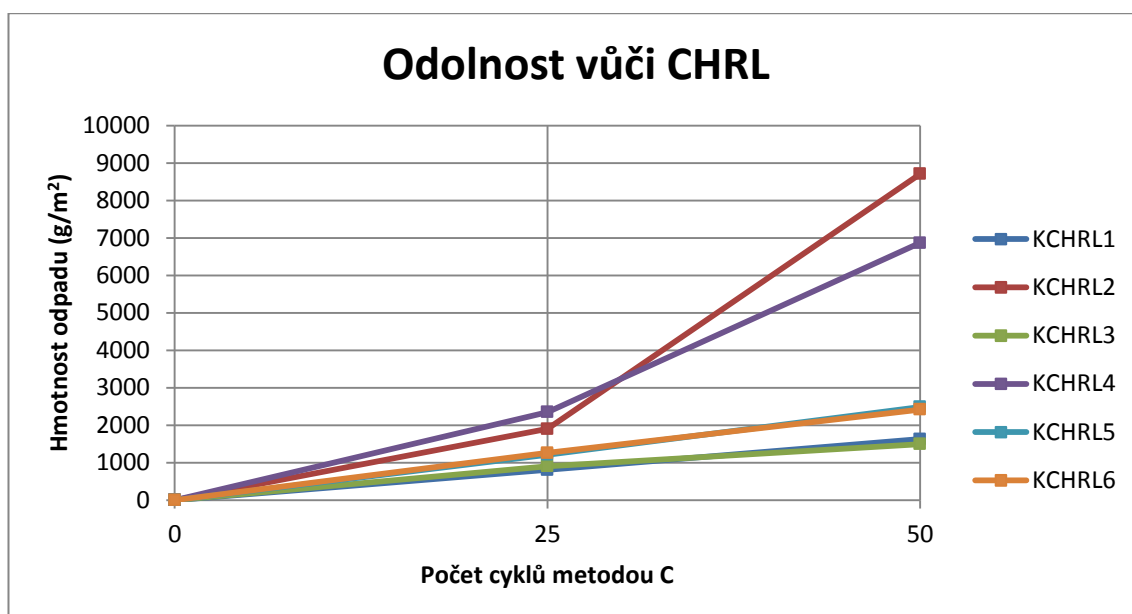
Tabulka 7-3 Hmotnost odpadů testovaných těles po 25 a 50 cyklech

Těleso	Výsledek po 25 cyklech vysušené (g/m ²)	Výsledek po 50 cyklech vysušené (g/m ²)
KCHRL1	807	1629
KCHRL2	1901	8709
KCHRL3	906	1494
KCHRL4	2352	6867
KCHRL5	1213	2488
KCHRL6	1260	2419

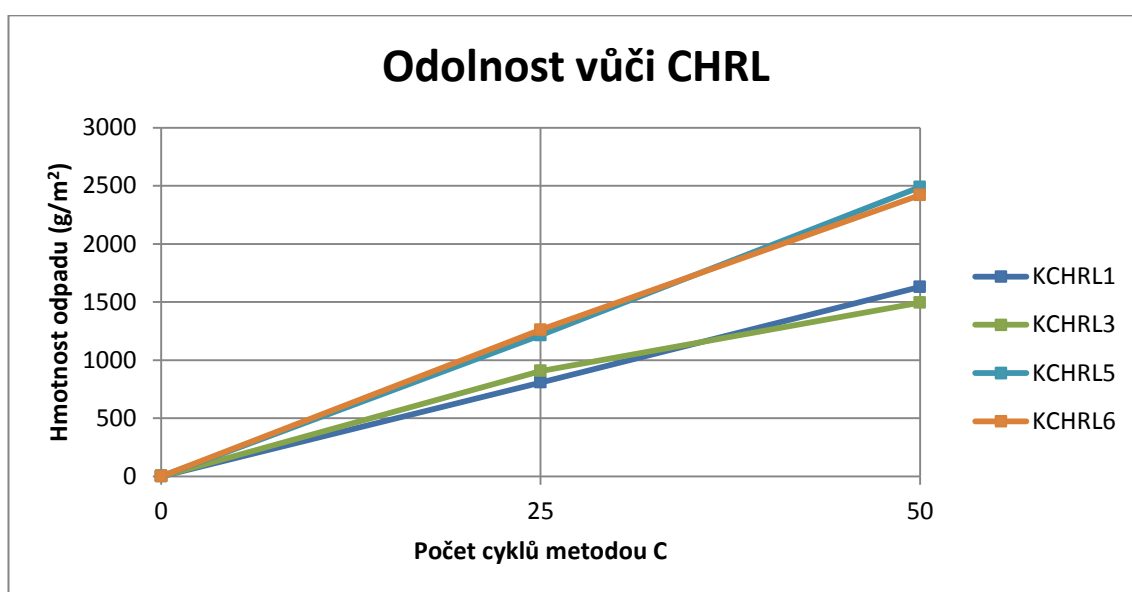
Pozn: hnědě označené hodnoty nevyhovují požadavku maximálně 50% odchylky od průměrného odpadu

Zatřídění povrchu bylo provedeno dle ČSN 73 1326 [23]. Hodnoty ρ_a jsou odstupňovány od nejmenšího stupně porušení 50 g/m² (stupeň 1 – nenarušený) do maximálního stupně porušení přesahující 3000 g/m² (stupeň 5 – rozpadlý). Protokol ke zkoušce CHRL je v příloze G.

Hodnoty odpadu byly vyneseny do grafu na obrázku 7-15. Jedná se o spojnici vyjadřující vztah mezi počtem cyklů a velikostí odpadu. Byly vyneseny všechny hodnoty odpadů včetně nevyhovujících hodnot. V grafu na obrázku 7-16 jsou znázorněny pouze vyhovující hodnoty odpadů s lineárním nárůstem.



Obrázek 7-15 Všechny hodnoty hmotnosti odpadu po 25 a 50 cyklech



Obrázek 7-16 Hmotnosti odpadu po 25 a 50 cyklech po odebrání nevyhovujících hodnot

Aritmetický průměr odpadů z měření po 25 cyklech byl 1217 g/m² po vyřazení hodnot nesplňující požadovanou odchylku od průměru. Jako kritérium odolnosti povrchu betonu proti působení vody a roztoku NaCl se obvykle uvádí součinitel odolnosti D1, přičemž D1 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu 1000 g/m².

Tabulka 7-4 Výsledky pro určení součinitele D1

Vzorek	Rovnice trendu	součinitel D1		TKP 18	
		Cyklus	Odpad (g/m ²)	Cyklus	Odpad (g/m ²)
CHRL1	32,578 x -2,4444	30,8	1001	38,4	1249
CHRL2	Vzorek vyřazen				
CHRL3	29,876 x +52,396	31,7	999	40,1	1250
CHRL4	Vzorek vyřazen				
CHRL5	48,516 x	20,6	999	25,8	1252
CHRL6	50,4 x	19,9	1003	24,8	1250
Průměr		25,8	1001	32	1250

Hodnota D1 byla určena po zaokrouhlení na 26 cyklů, při kterých je hodnota odpadu 1000 g/m². Vzorek s označením č.2 (CHRL2) byl vyřazen, protože nesplňoval požadavek na maximálně 20% odchylku od průměrné hodnoty D1. Vzorek č. 4 (CHRL4) byl vyřazen úplně, protože nesplnil základní požadavek na množství odpadů a překročil 50% odchylku od průměrného odpadu.

Zkouška CHRL poukázala na problém finální vrstvy (obrázek 7-17). U vzorků určených pro zkoušku CHRL byla vytvořena finální vrstva (tloušťka vrstvy okolo 1 cm pro zarovnání formy). U dvou testovaných vzorků po 50. cyklu odpadla část této vrstvy, což se projevilo ve vyřazení těchto těles z výsledků. Je na zvážení, jestli pro zkoušku CHRL vytvářet a testovat tuto vrstvu. Lepší výsledky by pravděpodobně vykazala třetí hutněná vrstva.



Obrázek 7-17 Výrazně porušená finální vrstva

Válcovaný beton této receptury by mohl být určený pro silnice III. třídy, místní obslužné komunikace, účelové komunikace, cyklistické stezky, parkoviště jako nekonstrukční beton (podkladní beton, který není bezprostředně v kontaktu s přímým vlivem prostředí a je překryt minimálně 80 mm tlustou konstrukcí). Jedná se o pozemní komunikace s občasným použitím CHRL nebo bez použití CHRL. Minimální třída betonu a vliv prostředí po tyto komunikace je C16/20nXF1, kde „n“ znamená nekonstrukční beton dle TKP 18 [24].

Pro nekonstrukční beton pro pozemní komunikace požaduje předpis TKP 18 [24] dle tabulky 18-3 pro třídu odolnosti betonu vůči zmrazování a rozmrazování XF1 pro cyklovací metodu odpad 1250 g/m² po 25 cyklech. Při zkouškách bylo dosaženo odpadu 1250 g/m² při 32 cyklu. Tato receptura vyhověla požadavku pro nekonstrukční beton a je možné ji použít jako podkladní vrstvu. Válcovaný beton této receptury nespĺňuje požadavky na vrchní vrstvu vozovky.

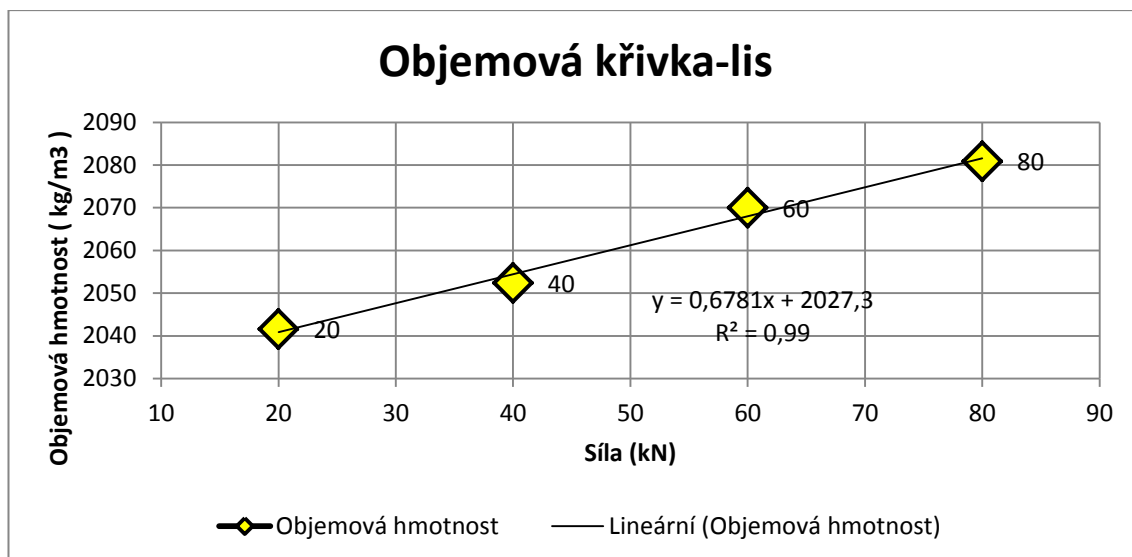
7.5. Statický lis – vliv zvětšení působící síly na objemovou hmotnost vzorků

Z křivky zhutnitelnosti popsané v kapitole 6 je patrné, že základní použitá síla $F=19$ kN je nedostatečná pro vytvoření vzorku, jehož parametry odpovídají vzorkům zhutněným pomocí pneumatického kladiva. Vzorky byly vyráběny podle postupu popsaného v kapitole 3.2 s rozdílem v působící síle. Pro získání grafu závislosti mezi působící silou a objemovou hmotností byla působící síla zvětšována v násobcích 20 kN. Pro každou řadu vzorků byla vyrobena tři zkušební tělesa ze směsi č. 3 s použitou silou $F=40$ kN, $F=60$ kN a $F=80$ kN.

Tabulka 7-5 Objemová hmotnost při zvětšené působící síle (lis)

MĚŘENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI							
Vzorek	Hmotnost vzorku (g)	Délka (mm)	Šířka (mm)	Výška (mm)	Objemová hmotnost (kg/m ³)	Ø O.H. (kg/m ³)	Směrodatná odchylka (kg/m ³)
F = 19kN	6699	150,4	150,1	145,8	2036	2042	9
	6821	150,8	150,1	146,7	2054		
	6731	150,3	150,3	146,4	2035		
F = 40kN	6895	150,0	150,0	148,9	2058	2052	5
	6895	150,0	150,0	149,8	2046		
	6930	150,0	150,0	150,0	2053		
F = 60kN	6975	150,0	150,0	149,8	2069	2070	13
	7035	150,0	150,0	149,9	2086		
	6935	150,0	150,0	150,0	2055		
F = 80kN	7055	150,0	150,0	149,7	2095	2081	11
	6975	150,0	150,0	149,9	2068		
	7020	150,0	150,0	150,0	2080		

Výsledky vzorků pro sílu F=20 kN byly převzaty z křivky zhutnitelnosti, kde se jednalo o totožnou směs. Po vynesení výsledků objemové hmotnosti vztažené k působící síle do grafu lze body proložit lineární závislost viz. obrázek 7-18.



Obrázek 7-18 Trend objemové hmotnosti při zvýšení působící síly (lis)

Lze předpokládat lineární závislost objemové hmotnosti se zvětšující se silou. Průměrná objemová hmotnost vzorků hutněných pneumatickým kladiva byla 2212 kg/m^3 . Po proložení lineární závislosti vychází objemová hmotnost vzorků hutněných statickým lisem 2217 kg/m^3 pro působící sílu 280 kN (tabulka 7-6).

Tabulka 7-6 Předpokládaná objemová hmotnost pro působící sílu

Použitá síla (kN)		Předpokládaná objemová hmotnost (kg/m ³)
F=	260	2204
F=	280	2217
F=	300	2231

Plocha nástavce (zkušební forma 150 x 150 mm):

$$A_n = 0,15 * 0,15 = 0,0225m^2$$

Výpočet napětí pod nástavcem při síle F=280 kN

$$\sigma_N = \frac{F}{A} = \frac{280}{0,0225} = 12444 \text{ kPa} = 12,44 \text{ MPa}$$

Napětí pod nástavcem by bylo 12,44 MPa. Následující výpočet dopočítává zatěžovací šířku válce znázorněnou a vysvětlenou v kapitole 3.2, aby bylo napětí pod válcem srovnatelné s napětím pod nástavcem.

$$b = \frac{F}{\sigma_N * h} = \frac{36,05}{12444 * 1,5} = 1,93 \text{ mm}$$

- Kde σ_N je napětí pod nástavcem [MPa]
 F statická síla válce na nápravu [kN]
 h délka válce [m]
 b zatěžovací šířka [m]

Dle výpočtu by zatěžovací šířka měla být 1,93 mm, aby válec při statickém pojezdu dosáhl stejné míry zhutnění, jako vzorky zhotovené pomocí pneumatického kladiva. Přesný rozměr není znám, ovšem hodnota 1,93 mm je nereálná a s jistotou lze říci, že tento rozměr musí být větší. Použitý válec by tedy při statickém pojezdu nemohl dosáhnout zhutnění na objemovou hmotnost odpovídající pneumatickému kladivu.



Obrázek 7-19 Znárodnění zatěžovací šířky

7.6. Porovnání krychelných a válcových vzorků zhotovených pomocí statického lisu

Porovnáváné výsledky objemových hmotností krychelných a válcových těles jsou ze stejné směsi č. 3 (+5kg vody na m³), hutněny statickým lisem. Podrobný výpočet je uveden v kapitole 3.2. Krychelná tělesa byla hutněna silou 19 kN s normálovým napětím 845 kPa pod nástavcem. Válcová tělesa mají menší kontaktní plochu, přepočítaná působící síla byla 15 kN s normálovým napětím 852 kPa pod nástavcem.

Krychelná tělesa (výška formy 15 cm) byla hutněna předepsanou silou ve třech vrstvách po 5 cm. Válcová tělesa (výška formy 30 cm) by měla být hutněna silou 15 kN (kapitola 3.2) v šesti vrstvách po 5 cm. Z časových důvodů hutnění byla dvojnásobně zvětšena působící síla i hutněná tloušťka, aby bylo zachováno množství uložené energie. Válcová tělesa byla hutněna silou 30 kN

ve třech vrstvách s tloušťkou hutněné vrstvy 10 cm. Množství uložené energie je stejné u krychelných i válcových těles.

Tabulka 7-7 Objemová hmotnost krychelných těles

MĚŘENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI – KRYCHELNÁ TĚLĚSA							
Vzorek	Hmotnost vzorku (g)	Délka (mm)	Šířka (mm)	Výška (mm)	Objemová hmotnost (kg/m ³)	∅ O.H. (kg/m ³)	Směrodatná odchylka (kg/m ³)
F = 19kN	6699	150,4	150,1	145,8	2036	2042	9
	6821	150,8	150,1	146,7	2054		
	6731	150,3	150,3	146,4	2035		

Průměrná hodnota objemové hmotnosti u krychelných těles je 2042 kg/m³. Průměrná objemová hmotnost u válcových těles je o 56 kg/m³ větší a má hodnotu 2098 kg/m³. Rozdíl je tedy výrazný.

Tabulka 7-8 Objemová hmotnost válcových těles

MĚŘENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOST - VÁLCOVÁ TĚLESA						
Vzorek	Hmotnost vzorku (g)	Průměr (mm)	Výška (mm)	Objemová hmotnost (kg/m ³)	∅ O.H. (kg/m ³)	Směrodatná odchylka (kg/m ³)
1	11200	150	300	2113	2098	15
2	11110	150	300	2096		
3	11040	150	300	2082		
4	11195	150	300	2112		
5	11000	150	300	2075		
6	11180	150	300	2109		

Distribuce napětí pod válcovým nástavcem je rovnoměrnější než u čtvercového nástavce a lepší hodnotě objemové hmotnosti pravděpodobně napomáhá i kulatý tvar formy. Pro pneumatické kladivo nebyl válcový nástavec k dispozici, a tedy stejné porovnání různých tvarů těles nebylo možné realizovat.

7.7. Porovnání krychelných a trámcových těles hutněných pneumatickým kladivem

Vzorky hutněné pneumatickým kladivem určené pro tlakové zkoušky směsi č. 3 (krychelná tělesa) měly průměrnou objemovou hmotnost 2323 kg/m³. Vzorky byly hutněny spočítanou dobou 10 s. Vzorky určené pro zkoušku tah za ohybu (trámcová tělesa) měly průměrnou dobu hutnění 7 s a objemovou hmotnost 2325 kg/m³. Korekce v době hutnění byla určena na základě uložené energie ukázané v kapitole 5.4. Testy prokázaly správnost výpočtu a výsledky objemových hmotností jsou v příloze D.

7.8. IBI – Okamžitý index únosnosti

IBI (Immediate Bearing index) je okamžitá hodnota Kalifornského poměru CBR (California Bearing Ratio). Vyjadřuje poměr síly potřebné k zatlačení penetračního trnu předepsanou konstantní rychlostí do stanovené hloubky zkušební vzorku vůči síle potřebné k zatlačení trnu do referenčního materiálu. Jedná se tedy o porovnávací metodu. Zkouška slouží pro měření únosnosti podkladních vrstev při výstavbě silnic.

IBI nepoužívá zatěžovací prstenec a zjišťuje se krátce po hutnění, pro zeminy upravené hydraulickými pojivy do 90 min od smíchání směsi. Průměr penetračního trnu je $50 \pm 0,5$ mm. Do zkušební vzorku je trn zatlačován konstantní rychlostí $1,27 \pm 0,2$ mm/min. Jako referenční materiál je zvolen drcený vápenec nacházející se v Kalifornii (CBR = 100%).

První srovnávací hodnota referenčního materiálu (drcený vápenec) je při penetraci (zatlačení) trnu 2,5 mm, odpovídá síle 13,2 kN. Druhá srovnávací hodnota nastává při penetraci trnu 5 mm, odpovídá síle 20 kN.

Výpočet pro stanovení hodnoty CBR:

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100$$

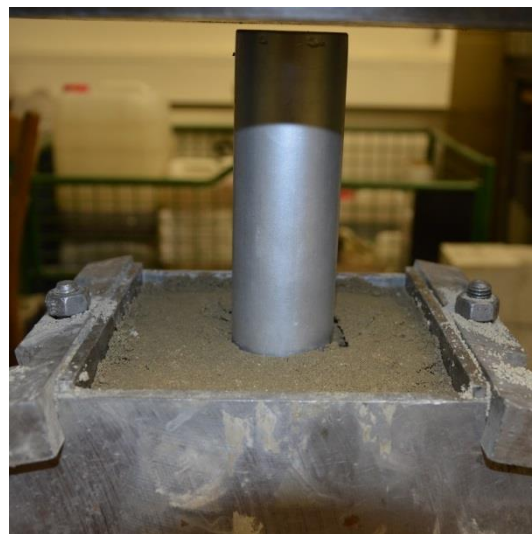
kde F síla potřebná k zatlačení penetračního trnu do stanovené hloubky ve zkušebním materiálu [kN]

F_s síla potřebná k zatlačení penetračního trnu do stanovené hloubky referenčního materiálu (drcený vápenec) [kN]

Vyhodnocení zkoušky:

Zkouška probíhala na třech zkušebních tělesech ze směsi č. 3 hutněných různými metodami. První těleso bylo hutněno statickým lisem s působící silou $F = 20 \text{ kN}$. Stejná síla byla použita při tvorbě vzorků pro objemovou hmotnost. Druhé těleso bylo hutněno silou $F = 80 \text{ kN}$, tedy nejvyšší silou vyvozenou statickým lisem. Poslední těleso bylo hutněno pneumatickým kladivem.

Účelem zkoušky bylo stanovit index hutnění pro všechny metody hutnění, ale hlavně kvalitu hutnění po výšce vzorku, kterou objemová hmotnost není schopna postihnout.

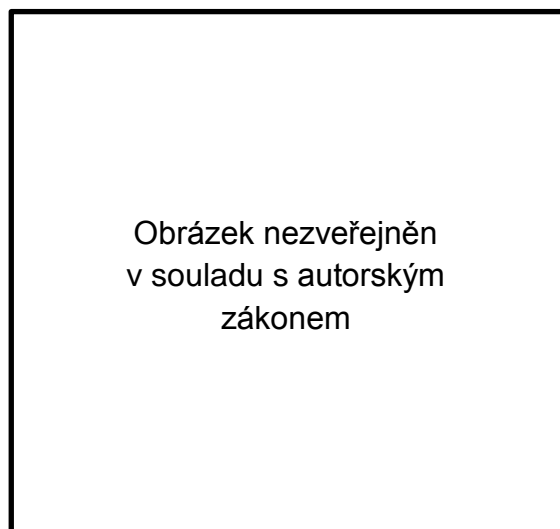


Obrázek 7-20 Zkouška IBI před a po penetraci ocelového trnu

Byl zachován postup výroby vzorků, tedy hutnění ve třech vrstvách a použití forem $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$. Zkouška IBI byla provedena po třetí vrstvě hutnění. Nebyla tedy vytvořena finální vrstva, protože ta již není hutněna plnou silou a mohlo by dojít ke zkreslení výsledků.

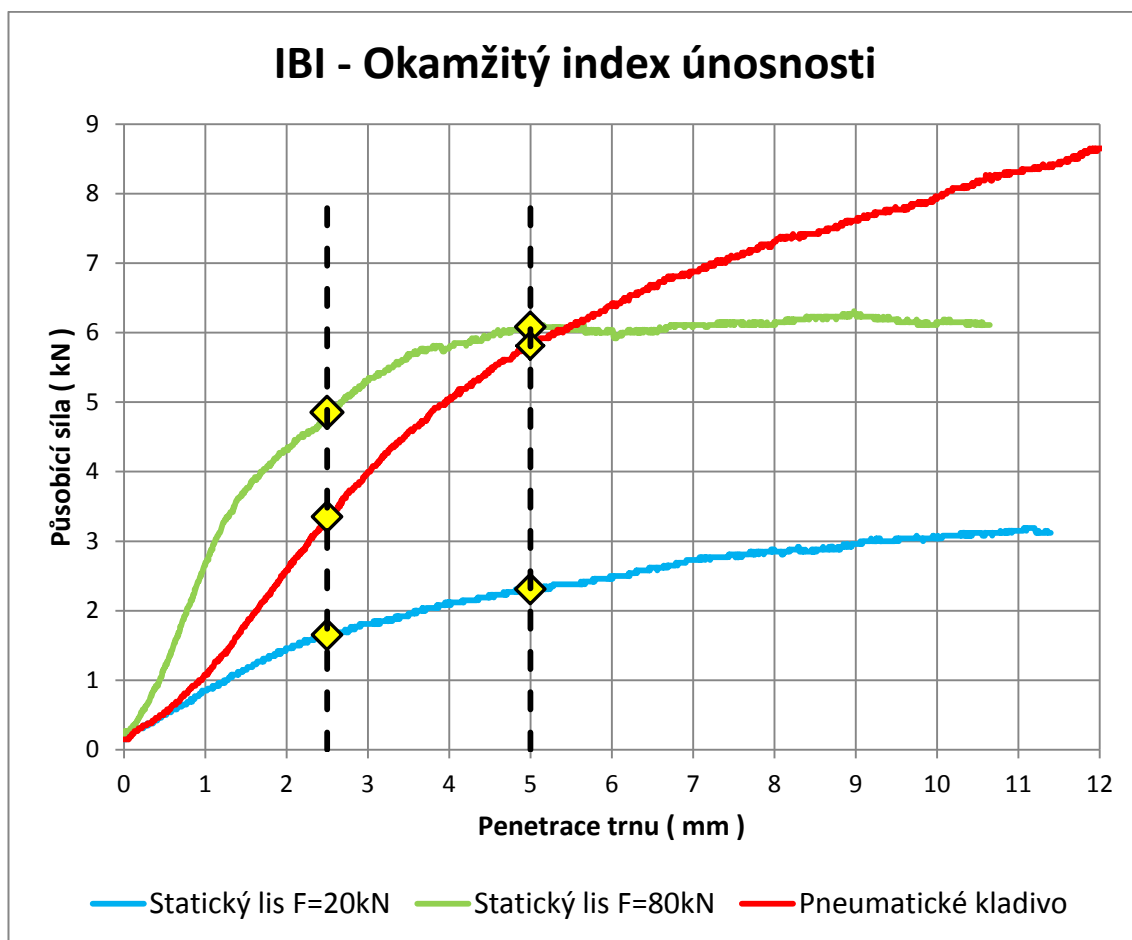


Obrázek 7-21 Vytvoření smykových ploch



Obrázek 7-22 Schéma smykových ploch[16]

Během zkoušky došlo k vytvoření smykových ploch znázorněných na obrázku 7-21 a schématickém řezu na obrázku 7-22. Naměřené hodnoty IBI jsou v tabulkách 7-9 až 7-11, podrobné průběhy změřených sil pak v příloze H.



Obrázek 7-23 Zkouška IBI

Graf na obrázku 7-23 znázorňuje závislost mezi penetrací trnu na ose X a působící silou na ose Y. Podle předpokladu nejhůře vzdoroval průniku trnu vzorek vytvořený statickým lisem silou F=20 kN, na obrázku 7-23 znázorněný modrou křivkou.

Poměrně velkým překvapením je vzorek hutněný statickým lisem silou F=80 kN. V obou vyhodnocovacích bodech bylo dosaženo lepšího indexu hutnění než u vzorku zhotoveného pomocí pneumatického kladiva. Po překročení druhého bodu (penetrace 5mm) již vzorek vykazoval konstantní odpor proti vnikání trnu. Toto chování vzorku lze vysvětlit velkým zhutněním těsně pod hranou nástavce, kde se nachází kompaktní zhutněná vrstva. Na toto poukazuje i rychlejší nárůst trendu křivky pro tento vzorek (zelená). Po porušení povrchu vzorku a vzniku smykových ploch není vzorek s narůstající hloubkou kompaktně zhutněn a penetraci trnu je bráněno jen v omezené míře.

Testované těleso vytvořené za pomoci pneumatického kladiva (v grafu znázorněné červenou křivkou) nedosáhlo v porovnávaných bodech nejlepších výsledků indexu hutnění, ovšem nejlépe a nejdéle vzdorovalo pronikání trnu. Ukazuje to na kompaktní zhutnění celého vzorku. I po porušení vzorku a vzniku smykových ploch je těleso schopné účinně vzdorovat pronikání trnu a se zvětšující se penetrací roste také odporová síla. Ani po 12 mm průniku trnu není dosaženo vrcholu křivky.

Tabulka 7-9 Vyhodnocení zkoušky IBI - statická síla F=20kN

Penetrace (mm)	Statický lis F = 20 kN Působící síla (kN)	Standardní síla Působící síla (kN)	IBI (%)
2,5	1,65	13,2	12,5
5	2,31	20,0	11,6

Tabulka 7-10 Vyhodnocení zkoušky IBI - statická síla F=80kN

Penetrace (mm)	Statický lis F = 80 kN Působící síla (kN)	Standardní síla Působící síla (kN)	IBI (%)
2,5	4,85	13,2	36,7
5	6,08	20,0	30,4

Tabulka 7-11 Vyhodnocení zkoušky IBI - pneumatické kladivo

Penetrace (mm)	Pneumatické kladivo Působící síla (kN)	Standardní síla Působící síla (kN)	IBI (%)
2,5	3,35	13,2	25,4
5	5,81	20,0	29,1

Všechny předložené výsledky jsou po korekci, kterou bylo nutné provést při nedostatečném dosednutí trnu. Hodnoty byly započítávány, jakmile se velikost síly zvýšila o 50% oproti původní hodnotě.

8. Závěr

Byl realizován rozsáhlý experimentální program, při kterém bylo vyrobeno a odzkoušeno celkem 105 těles. Provedeny byly zkoušky objemové hmotnosti pro křivku zhutnitelnosti, tlakové zkoušky, CHRL, okamžitý index únosnosti, zkoušky tahu za ohybu. Z průběhu výroby vzorků, z výsledků a z jejich vyhodnocení lze učinit celou řadu zajímavých závěrů.

Ze srovnání různých receptur válcovaného betonu vyplývá, že použitá receptura s vodním součinitelem 0,34 je výrazně sušší ve srovnání se zahraničními, kde vodní součinitel dosahuje v průměru 0,48. Důvodem je, že pro vyrovnání křivky zrnitosti kameniva se v našich podmínkách přidává větší množství cementu, u kterého nedojde k celkové hydrataci zrn. Část cementu tak má funkci mikroplniva a zároveň napomáhá k zatažení struktury povrchu při válcování. Z této úvahy plyne námět pro další výzkum, který by mohl směřovat k optimalizaci složení směsi – snížení množství cementu a jeho náhradě vhodným inertním (případně i latentně hydraulickým) mikroplnivem.

Při výrobě vzorků se jasně ukázalo, že i velmi malá změna množství vody ve směsi má zcela zásadní význam pro výsledné vlastnosti betonu. I přes snahu dodržet stanovená množství vody se toto u dvou záměsí nepodařilo, což mělo velký vliv na naměřené objemové hmotnosti a pevnosti betonu. Domnívám se, že příčinou byl nevyrovnaný obsah vody v kamenivu. U dvou problematických záměsí bylo z důvodu chybné navážky přidáno malé množství nezhomogenizovaného kameniva s jinou vlhkostí, čímž byly ovlivněny výsledky. Z toho lze vyvodit závěr s výrazným dopadem pro praxi. Při výrobě válcovaného betonu je vždy nutné stanovit vlhkost zejména jemného kameniva a provést korekci množství vody přidávané do betonu, jinak mohou být skutečné vlastnosti vyrobeného materiálu výrazně odlišné od vlastností požadovaných a mohou se značně lišit od vlastností stanovených na zkušebních tělesech.

Správná míra zhutnění je důležitým parametrem v realizačním procesu. Při nízké míře zhutnění nemusí mít realizovaná konstrukce vlastnosti deklarované na vzorcích vytvořených v laboratoři. Při velké míře zhutnění naopak může nastat problém s nerovnoměrnou deformací položené vrstvy betonu pod tíhou válce, případně i nejednotnou strukturou povrchu.

Jedním z hlavních úkolů práce bylo srovnání statických a dynamických metod hutnění vzorků. Kromě zavedené metody dynamického hutnění pomocí pneumatického kladiva byla testována i nová metoda statického hutnění pomocí zatěžovacího lisu, která měla simulovat statický pojezd hutnicího válce. Tato metoda se ukázala jako nevhodná pro praktické využití, zejména z toho důvodu, že nebylo možné vytvořit vzorky, které by byly homogenní v celém objemu. Rozdíl zhutnění po výšce vzorku mezi statickým lisem a dynamickým

pneumatickým kladivem nejlépe ukázala zkouška okamžitého indexu únosnosti. Vzorky vyrobené v lisu mají výborně zhutněnou vrstvu těsně pod hranou hutnění, ale s narůstající hloubkou se zhutnitelnost zmenšuje. To ukazuje na problém, že nelze zaručit plné zhutnění v celé tloušťce vzorku. Naopak vzorky hutněné pneumatickým kladivem jsou kompaktní v celé tloušťce vzorku. Horní vrstva však nevykazuje tak velkou odolnost pronikání trnu v porovnání s lisem. Celková kompaktnost vzorku je velice důležitý parametr, protože jakékoliv nehomogenity materiálu výrazně ovlivňují celkové chování vzorku i reálné konstrukce.

I přes nevhodnost metody hutnění pomocí statického lisu vedly výsledky laboratorních experimentů k velmi cennému poznatku. Existuje naprosto zásadní rozdíl mezi statickým a dynamickým hutněním válcovaného betonu a tedy není vhodné prokazovat vlastnosti konstrukce hutněné pouze staticky na laboratorních vzorcích hutněných dynamicky. Důsledkem nedostatečného, pouze statického zhutnění může být při realizaci dosažena menší objemová hmotnost materiálu oproti laboratorním vzorkům, dále nižší pevnosti, rychlejší a častější vznik trhlin od tahových napětí ve spodní části položené vrstvy betonu, horší odolnost vůči klimatickým zatížením atd. Pneumatické kladivo představuje velice účinnou metodu hutnění s časově rychlou výrobou vzorku, jehož vlastnosti ale nemusejí odpovídat vlastnostem staticky hutněného povrchu.

Dalším úkolem práce bylo modifikovat vlhkost výchozí směsi a nalézt optimální vlhkost s nejvyšší mírou zhutnění. Míra zhutnění se vyjadřuje pomocí objemové hmotnosti a standardně se testuje Proctorovou zkouškou. V rámci výzkumu byly objemové hmotnosti jednotlivých záměsí stanoveny i pomocí pneumatického kladiva a statického lisu, aby bylo možno posoudit korelaci jednotlivých metod. Porovnání získaných křivek zhutnitelnosti ukázalo rámcovou shodu mezi Proctorovou zkouškou a pneumatickým kladivem, objemové hmotnosti stanovené pomocí lisu byly systematicky cca o 10 % nižší. Pro statický lis byl vrchol křivky zhutnitelnosti dosažen u šesté směsi (+20 kg/m³ vody), ale neshodoval se s vrcholem křivky pro Proctorovu zkoušku a pneumatické kladivo, kde se vrchol nezobrazil. Vrcholu by u těchto metod bylo dosaženo po dalším přidání vody, ke kterému však nebylo přistoupeno s ohledem na realizační důvody. Již po přidání +10 kg/m³ vody se betonová směs lepila k hutnicí ploše pneumatického kladiva, takže by pravděpodobně nebyla vhodná pro praktické použití. Jako nejvhodnější proto byla stanovena směs číslo 3 obsahující +5 kg/m³ vody oproti referenční směsi.

Pro stanovení doby hutnění vzorku byly provedeny výpočty srovnávající množství uložené energie. K dispozici byly dva čtvercové hutnicí nástavce pro hutnění krychelných a trámčových těles. Pro zvolené pneumatické kladivo byla určena doba hutnění krychelných těles na 10 s. Shoda výsledné hodnoty objemové hmotnosti vzorku s Proctorovou zkouškou potvrdila správnost vypočítané doby hutnění. Pro trámčová tělesa byla provedena korekce času

hutnění. Správnost korekce se potvrdila shodou hodnot objemových hmotností u krychelných a trámcových těles.

Vzorky vyrobené ze zvolené směsi č. 3 dosahovaly velmi dobrých pevností v tlaku (charakteristická pevnost 40,8 MPa) a v tahu za ohybu (charakteristická pevnost 3,8 MPa). Podle výsledků CHRL došlo k odpadu 1250 g/m² při 32. cyklu. Na základě těchto výsledků lze doporučit tuto směs k praktickému použití jako nekonstrukční beton. Nekonstrukčním betonem se má na mysli podkladní beton, který není v bezprostředním kontaktu s přímými vlivy prostředí a je překryt minimálně 80 mm tlustou konstrukcí. Nelze doporučit tuto směs jako vrchní část vozovky z důvodu klimatických podmínek v České republice, kdy je vozovka vystavena rozmrazovacím prostředkům společně s mrazem.

Vzorky hutněné statickým lisem podle očekávání nedosahovaly pevnostních charakteristik srovnatelných s pneumatickým kladivem. Užití statického lisu také ukázalo rozdíl v hutnění mezi krychelnými a válcovými tělesy, přestože působící síla byla upravena podle plochy hutnicího nástavce a výšky tělesa. Válcová tělesa vykazovala větší objemovou hmotnost i větší přepočítanou pevnost v tlaku oproti krychelným tělesům. Srovnávaná hutnicí metoda pomocí statického lisu vykazuje velké působící síly, což je limitující faktor s ohledem na stabilitu forem.

Výsledky diplomové práce potvrzují skutečnost, že stanovení přesných podmínek hutnění pneumatickým kladivem má zcela zásadní vliv na výsledné vlastnosti vzorku. Bylo by vhodné se parametry hutnění dále zabývat a poznatky shrnuté v této práci rozvíjet, což je podnět pro další výzkum. Z experimentu vyplývá, že limitujícím faktorem válcovaného betonu je odolnost vůči mrazu v kombinaci s rozmrazovacími prostředky používanými v klimatických podmínkách České republiky. Po zvýšení odolnosti vůči těmto faktorům může být válcovaný beton adekvátní náhradou asfaltu u méně náročných aplikací.

Literatura

- [1] GBH Professional: 5-38 D | 500. Elektrické nářadí Bosch pro řemeslo a průmysl [online]. Německo: Robert Bosch GmbH, 2013 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: http://www.bosch-professional.com/cz/cs/user_manuals/downloads/rotary-hammer-with-sds-max-gbh-5-38-d-0611240008.pdf
- [2] HD 70 / HD 70K. Wwww.metacrust.com [online]. Tirschenreuth, 2016 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: https://www.metacrust.com/product_files/74/HD%2070/HD70_TD2011L04W_HD70K_TD2011L04W_W_V10_en-GB.pdf
- [3] ASTM C1435/C1435M-07 (2007). Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer.
- [4] ČSN EN 13286-4. Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 4: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Vibrační pěch. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004
- [5] BY SERVICE D'EXPERTISE EN MATÉRIAUX INC. Frost durability of roller-compacted concrete pavements. Skokie, Ill: Portland Cement Association, 2004. ISBN 0893122378.
- [6] *Guide Specification for Construction of Roller-Compacted Concrete Pavements* [online]. Portland Cement Association, 2004, , 9 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: www.cement.org
- [7] *Roller-Compacted Concrete: Design and Construction Considerations for Hydraulic Structures* [online]. Denver, Colorado, 2005 [cit. 2016-12-04]. Dostupné z: <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/mands-pdfs/RCC.pdf>
- [8] SVOBODA, Emanuel. Přehled středoškolské fyziky. 4. uprav. vyd. Praha: Prometheus, c2006. ISBN 80-7196-307-0.
- [9] ČSN EN 197-1. Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001
- [10] ČSN EN 12350-4. Zkoušení čerstvého betonu - Část 4: Stupeň zhutnitelnosti. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009

- [11] Zkoušení čerstvého betonu. Ecentrum.fsv.cvut.cz [online]. 2010 [cit. 2016-12-07]. Dostupné z: http://ecentrum.fsv.cvut.cz/fotogalerie/2010/rp2010_2/pouster12.pdf
- [12] ČSN EN 12390-3. Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [13] ČSN EN 12390-4. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001
- [14] ČSN EN 12390-1. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001
- [15] Dale Harrington, Fares Abdo, Wayne Adaska, Chetan V. Hazaree, et al.. "Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements" (2010) Available at: http://works.bepress.com/halil_ceylan/116/
- [16] Ing. Jaroslav Hauser, CSc, Ing. Lenka Ševelová a Ing. Alice Kozumplíková. ZKOUŠKY CBR A IBI PODLOŽÍ A NESTMELENÝCH PODKLADNÍCH VRSTEV VOZOVEK [online]. 2011 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: http://www.asfaltove-vozovky.cz/av2011/data/tema2_mondschein.pdf
- [17] ČSN EN 1990. Zásady navrhování konstrukcí. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004
- [18] ČSN EN 12390-5. Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [19] ČSN EN 206. Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014
- [20] 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. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005
- [21] Robert W. Piggott, P.Eng. Roller Compacted Concrete Pavements: A Study of Long Term Performance. 1999, , 62 [cit. 2016-11-19].
- [22] ČSN 73 1326. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1985

[23] ČSN 73 1326. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003

[24] BETONOVÉ KONSTRUKCE A MOSTY Kapitola 18: TECHNICKÉ KVALITATIVNÍ PODMÍNKY STAVEB POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ [online]. Praha: MINISTERSTVO DOPRAVY Odbor pozemních komunikací, 2016 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/TKP_18.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 1-1 Porovnání poměrného obsahu složek v běžném a válcovaném betonu..... [15]	10
Obrázek 2-1 Pokládka válcovaného betonu - navázání na stávající vrstvu	14
Obrázek 2-2 Povrch válcovaného betonu po pokládce	15
Obrázek 2-3 Válcování tandemovým válcem ve statickém pojezdu	15
Obrázek 2-4 Hrana hutněné a nehutněné vrstvy.....	16
Obrázek 2-5 Pokládka sousední vrstvy válcovaného betonu	16
Obrázek 2-6 Nezhutněná vrstva u kraje betonového obrubníku.....	17
Obrázek 2-7 Konečná krajnice ve směru pokládky musí být zaříznuta a odstraněna ..	17
Obrázek 2-8 Povrch válcovaného betonu 7 dní od pokládky.....	17
Obrázek 3-1 Čtvercový hutnící nástavec o straně 145 mm s upnutím SDS MAX.....	19
Obrázek 3-2 Čtvercový hutnící nástavec o straně 95 mm s upnutím SDS MAX.....	19
Obrázek 3-3 Technická specifikace[1]	
Obrázek 3-4 Kladivo GBH 5-38 D	20
Obrázek 3-5 Zatížení na nápravu válce (static linear load) [2].....	21
Obrázek 3-6 Technický rozkres použitého válce [2]	21
Obrázek 3-7 Zatěžovací šířka válce při realizaci	22
Obrázek 3-8 Schéma kontaktní plochy s hutněným materiálem (kóty v mm)	22
Obrázek 3-9 Ocelový nástavec pro formu o hraně 150 mm	23
Obrázek 3-10 Výrobní schéma ocelového nástavce pro formu o hraně 150 mm(kóty v mm)	23
Obrázek 3-11 Válcový ocelový nástavec	24
Obrázek 3-12 Výrobní schéma válcového nástavce (kóty v mm)	25
Obrázek 3-13 Rozměry normových forem pro Proctorovu zkoušku [20].....	25
Obrázek 4-1 Směs po ukončení míchání	26
Obrázek 4-2 Vrstva po prvním hutnění	
Obrázek 4-3 Vrstva po třetím hutnění	27
Obrázek 4-4 Finální vrstva	
Obrázek 4-5 Přichycení části betonu na nástavci.....	28
Obrázek 4-6 Forma při hutnění v lisu	29
Obrázek 5-1 Schéma hutnění	31
Obrázek 6-1 Lis -5 kg/m ³	
Obrázek 6-2 Lis +25 kg/m ³	37
Obrázek 6-3 Pneumatické kladivo -5kg/m ³	
Obrázek 6-4 Pneumatické kladivo +25kg/m ³	38
Obrázek 6-5 Křivka zhutnitelnosti	39
Obrázek 7-1 Stupeň zhutnitelnosti - princip zkoušky [11].....	40
Obrázek 7-2 Křivka stupně zhutnitelnosti z provedených zkoušek	41
Obrázek 7-3 Stupeň zhutnitelnosti před a po vibraci	41
Obrázek 7-4 Pevnost v tlaku na zkušebních krychlích 150x150x150 mm	42
Obrázek 7-5 Porušení zkušebního tělesa při zkoušce pevnosti v tlaku	43
Obrázek 7-6 Pevnost v tlaku na krychlích 150x150x150 mm	44
Obrázek 7-7 Pevnost v tlaku pro zvětšené působící síly-lis.....	45
Obrázek 7-8 Pevnost v tlaku pro válcová tělesa - statický lis	45

Obrázek 7-9 Porušení válcového tělesa při tlakové zkoušce	45
Obrázek 7-10 Pevnost v tahu ohybem – schéma zatěžování[18].....	46
Obrázek 7-11 Pevnost v tahu ohybem na trámcích 100x100x400 mm.....	47
Obrázek 7-12 Odpad ze zkušební vzorku po ukončení 25 cyklu	48
Obrázek 7-13 Povrch po 25 cyklu	
Obrázek 7-14 Povrch po 50 cyklu	49
Obrázek 7-15 Všechny hodnoty hmotnosti odpadu po 25 a 50 cyklech	50
Obrázek 7-16 Hmotnosti odpadu po 25 a 50 cyklech po odebrání nevyhovujících hodnot	50
Obrázek 7-17 Výrazně porušená finální vrstva	51
Obrázek 7-18 Trend objemové hmotnosti při zvýšení působící síly (lis)	53
Obrázek 7-19 Znázornění zatěžovací šířky.....	54
Obrázek 7-20 Zkouška IBI před a po penetraci ocelového trnu.....	57
Obrázek 7-21 Vytvoření smykových ploch	
Obrázek 7-22 Schéma smykových ploch[16]	57
Obrázek 7-23 Zkouška IBI	58

Seznam tabulek

Tabulka 1-1 Příklady použitých receptur ve světě	12
Tabulka 4-1 Množství vody rozdělené podle směsi.....	26
Tabulka 5-1 Množství energie vnesené do vzorku podle metody hutnění	33
Tabulka 6-1 Objemová hmotnost rozdělena podle metody hutnění a směsi.....	38
Tabulka 7-1 Klasifikace podle zhutnitelnosti.....	40
Tabulka 7-2 Stupeň zhutnitelnosti - vyhodnocení zkoušky	41
Tabulka 7-3 Hmotnost odpadů testovaných těles po 25 a 50 cyklech	49
Tabulka 7-4 Výsledky pro určení součinitele D1	51
Tabulka 7-5 Objemová hmotnost při zvětšené působící síle (lis).....	52
Tabulka 7-6 Předpokládaná objemová hmotnost pro působící sílu	53
Tabulka 7-7 Objemová hmotnost krychelných těles	55
Tabulka 7-8 Objemová hmotnost válcových těles	55
Tabulka 7-9 Vyhodnocení zkoušky IBI - statická síla F=20kN	59
Tabulka 7-10 Vyhodnocení zkoušky IBI - statická síla F=80kN	59
Tabulka 7-11 Vyhodnocení zkoušky IBI - pneumatické kladivo	59

PŘÍLOHY

Příloha A

Měření objemové hmotnosti – statický lis

MĚŘENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOST POMOCÍ METRU							
Vzorek	Hmotnost vzorku (g)	Délka (mm)	Šířka (mm)	Výška (mm)	Objemová hmotnost (kg/m ³)	Ø O.H. (kg/m ³)	Směrodatná odchylka (kg/m ³)
L .1.1.	6082,00	150,50	150,70	144,40	1857	1896	32
L .1.2.	6374,30	150,45	150,43	148,58	1896		
L .1.3.	6512,10	150,39	150,28	148,96	1934		
L .2.1.	6346,35	150,71	150,27	147,84	1895	1880	11
L .2.2.	6271,80	150,37	150,31	147,94	1876		
L .2.3.	6155,40	149,79	149,94	146,55	1870		
L .3.1.	6699,20	150,40	150,06	145,80	2036	2042	9
L .3.2.	6820,85	150,80	150,13	146,68	2054		
L .3.3.	6731,15	150,28	150,33	146,43	2035		
L .4.1.	6835,00	151,12	150,49	150,04	2003	2011	8
L .4.2.	6975,00	150,20	150,46	152,62	2022		
L .4.3.	6890,00	150,67	150,60	151,28	2007		
L .5.1.	6892,80	150,14	150,23	151,51	2017	2010	27
L .5.2.	6727,40	150,00	150,01	151,37	1975		
L .5.3.	7040,55	150,76	151,05	151,62	2039		
L .6.1.	6865,00	149,86	149,84	150,96	2025	2050	18
L .6.2.	7170,00	151,13	150,53	152,62	2065		
L .6.3.	7120,00	150,80	150,85	151,93	2060		
L .7.1.	6845,00	150,27	150,23	150,23	2018	2034	12
L .7.2.	6860,00	150,27	150,38	148,92	2038		
L .7.3.	6945,00	150,55	150,33	150,02	2045		

Označení

L.1.2

L -> Označení metody hutnění LIS

1. -> Označení směsi

2. -> Označení tělesa v dané směsi

* Původní hodnoty 4. směsi (před opravou)

* L .4.1.	6472,70	150,19	150,05	151,10	1901	1925	28
* L .4.2.	6457,60	150,36	150,48	149,44	1910		
* L .4.3.	6658,55	149,81	150,24	150,66	1964		

Příloha B

Měření objemové hmotnosti – pneumatické kladivo

PNEUMATICKÉ KLADIVO							
Vzorek	Hmotnost vzorku (g)	Délka (mm)	Šířka (mm)	Výška (mm)	Objemová hmotnost (kg/m ³)	Ø O.H. (kg/m ³)	Směrodatná odchylka (kg/m ³)
K .1.1.	7370,95	150,22	150,20	149,02	2192	2154	28
K .1.2.	7285,05	150,80	150,30	150,92	2130		
K .1.3.	7302,80	150,33	150,21	151,22	2139		
K .2.1.	7136,85	150,40	150,38	151,65	2081	2106	18
K .2.2.	7155,05	149,87	150,63	149,36	2122		
K .2.3.	7109,35	149,90	149,93	149,45	2117		
K .3.1.	7342,95	149,95	149,87	147,80	2211	2212	23
K .3.2.	7395,45	150,06	150,02	150,38	2185		
K .3.3.	7690,55	150,81	150,46	151,22	2241		
K .4.1.	7440,00	149,43	149,46	150,22	2218	2198	40
K .4.2.	7570,00	149,73	149,78	151,08	2234		
K .4.3.	7360,00	149,52	150,57	152,65	2142		
K .5.1.	7896,05	150,16	149,61	152,10	2311	2276	25
K .5.2.	7776,05	150,04	150,10	152,98	2257		
K .5.3.	7581,90	149,58	149,70	149,80	2260		
K .6.1.	7765,00	149,60	149,79	152,96	2265	2266	19
K .6.2.	7583,45	149,46	149,58	151,23	2243		
K .6.3.	7690,00	150,19	150,23	148,92	2289		
K .7.1.	7766,75	149,53	150,31	149,18	2316	2314	9
K .7.2.	7798,15	149,76	149,88	150,92	2302		
K .7.3.	7804,90	150,48	149,82	148,91	2325		

Označení

K.1.2

K -> Označení metody hutnění PNEUMATICKÉ KLADIVO

1. -> Označení směsi

2. -> Označení tělesa v dané směsi

* Původní hodnoty 4. směsi (před opravou)

* K .4.1.	7481,90	149,82	150,00	152,28	2186	2156	22
* K .4.2.	7267,90	150,46	150,49	149,63	2145		
* K .4.3.	7287,45	150,32	150,21	151,15	2135		

Příloha C

Měření objemové hmotnosti – Proctorova zkouška

PROCTOROVA ZKOUŠKA							
Vzorek	Celková hmotnost (g)	Hmotnost (g)	Šířka (mm)	Výška (mm)	Objemová hmotnost (kg/m ³)	Ø O.H. (kg/m ³)	Směrodatná odchylka (kg/m ³)
P .1.1.	14820,0	4610,7	150	120	2174	2172	4
P .1.2.	14804,2	4594,9	150	120	2167		
P .1.3.	14821,5	4612,3	150	120	2175		
P .2.1.	14873,4	4664,1	150	120	2199	2197	3
P .2.2.	14859,8	4650,5	150	120	2193		
P .2.3.	14869,5	4660,2	150	120	2198		
P .3.1.	14884,0	4674,7	150	120	2204	2208	3
P .3.2.	14896,1	4686,8	150	120	2210		
P .3.3.	14895,5	4686,3	150	120	2210		
P .4.1.	15012,0	4753,1	150	120	2241	2236	4
P .4.2.	14945,5	4739,1	150	120	2235		
P .4.3.	14992,5	4733,6	150	120	2232		
P .5.1.	14999,5	4790,2	150	120	2259	2253	6
P .5.2.	14990,3	4785	150	120	2256		
P .5.3.	14969,1	4759,8	150	120	2245		
P .6.1.	15091,8	4832,9	150	120	2279	2273	4
P .6.2.	15022,6	4816,2	150	120	2271		
P .6.3.	15070,1	4811,2	150	120	2269		
P .7.1.	15116,5	4857,6	150	120	2291	2286	3
P .7.2.	15048,8	4842,4	150	120	2284		
P .7.3.	15104,1	4845,2	150	120	2285		

Označení

P.1.2

P -> Označení metody hutnění PROCTOROVA ZKOUŠKA

1. -> Označení směsi

2. -> Označení tělesa v dané směsi

* Původní hodnoty 4. směsi (před opravou)

P .4.1.	14860,6	4651,3	150	120	2193	2188	4
P .4.2.	14845,1	4635,8	150	120	2186		
P .4.3.	14842,3	4633	150	120	2185		

Příloha D

Zpráva o zkoušce - Pevnost v tlaku

Zkouška: Pevnost v tlaku

Zkušební těleso: Krychle 150x150x150

Počet těles: 6

Den výroby tělesa: 26.10.2016

Den zkoušky: 23.11.2016 **Pevnost po 28 dnech**

Označení	Rozměr A1 (mm)	Rozměr A2 (mm)	Rozměr A3 (mm)	Hmotnost (kg)	Objm.hmot. (kg/m ³)	Max. síla (kN)	Napětí (Mpa)
K.T.1.	149,6	149,4	149,5	7775	2326	1240	55,6
K.T.2.	149,4	149,4	149,8	7780	2326	1241	55,5
K.T.3.	150,3	150,0	148,9	7720	2301	1243	55,7
K.T.4.	149,0	149,2	151,4	7920	2352	992	43,9
K.T.5.	150,3	150,4	149,6	7850	2322	1194	53,1
K.T.6.	149,6	149,4	150,6	7790	2313	1061	47,2
Průměr				7806	2323		51,8

Charakteristická hodnota
vyhodnocená dle ČSN EN 1990

f _{ck} =	40,8	MPa
f _{cd} =	27,2	MPa

Zpráva o zkoušce – Pevnost v tahu

Zkouška: Pevnost v tahu

Zkušební těleso: Trámce 100x100x400

Počet těles: 3

Den výroby tělesa: 26.10.2016

Den zkoušky: 23.11.2016 **Pevnost po 28 dnech**

Označení	Rozměr A1 (mm)	Rozměr A2 (mm)	Rozměr A3 (mm)	Hmotnost (kg)	Objm.hmot. (kg/m ³)	Max. síla (kN)	Napětí (Mpa)
K.T.1.	102,6	99,8	149,5	9440	2305	17,5	4,6
K.T.2.	100,1	101	149,8	9487	2345	15,84	4,6
K.T.3.	100,2	100,9	148,9	9410	2326	17,52	5,1
Průměr				9446	2325		4,8

Charakteristická hodnota
vyhodnocená dle ČSN EN 1990

f _{ck} =	3,8	MPa
f _{cd} =	2,5	MPa

Příloha E

Pevnost v tlaku na vzorcích pro stanovení křivky zhutnitelnosti

Zpráva o zkoušce

Zkouška: Pevnost v tlaku

Zkušební těleso: Krychle 150x150x150

Počet těles: 42

Pevnost po min. 28 dnech

Statický lis			
Záměs	Označení	Napětí (Mpa)	Ø Napětí (Mpa)
1.	L .1.1.	3,0	4,7
	L .1.2.	6,6	
	L .1.3.	4,4	
2.	L .2.1.	7,0	5,8
	L .2.2.	5,3	
	L .2.3.	5,2	
3.	L .3.1.	15,0	14,4
	L .3.2.	15,4	
	L .3.3.	12,8	
4.	L .4.1.	10,2	8,1
	L .4.2.	8,2	
	L .4.3.	6,0	
5.	L .5.1.	10,7	8,8
	L .5.2.	8,4	
	L .5.3.	7,2	
6.	L .6.1.	12,1	11,8
	L .6.2.	10,8	
	L .6.3.	12,5	
7.	L .7.1.	13,5	14,8
	L .7.2.	15,9	
	L .7.3.	15,0	

Pneumatické kladivo			
Záměs	Označení	Napětí (Mpa)	Ø Napětí (Mpa)
1.	K .1.1.	31,1	27,1
	K .1.2.	26,2	
	K .1.3.	23,9	
2.	K .2.1.	22,2	26,5
	K .2.2.	27,6	
	K .2.3.	29,7	
3.	K .3.1.	38,6	40,2
	K .3.2.	36,2	
	K .3.3.	45,9	
4.	K .4.1.	33,9	31,8
	K .4.2.	36,4	
	K .4.3.	25,1	
5.	K .5.1.	48,3	44,8
	K .5.2.	44,0	
	K .5.3.	42,1	
6.	K .6.1.	45,6	44,9
	K .6.2.	37,9	
	K .6.3.	51,1	
7.	K .7.1.	49,8	49,7
	K .7.2.	40,2	
	K .7.3.	59,2	

Příloha F

Pevnost v tlaku při zvětšené hutnící síle – statický lis

Zpráva o zkoušce

Zkouška: Pevnost v tlaku

Zkušební těleso: Krychle 150x150x150

Počet těles: 9

Den výroby tělesa: 7.11.2016

Den zkoušky: 5.12.2016

Pevnost po 28 dnech

Označení	Působící síla	F max (kN)	Napětí (MPa)	∅ Napětí (Mpa)
40.1	F = 40 kN	241	10,8	9,4
40.2	F = 40 kN	220	9,8	
40.3	F = 40 kN	171	7,7	
60.1	F = 60 kN	248	11,1	13,4
60.2	F = 60 kN	363	16,3	
60.3	F = 60 kN	283	12,7	
80.1	F = 80 kN	345	15,8	15,2
80.2	F = 80 kN	321	15,6	
80.3	F = 80 kN	307	14,1	

Zpráva o zkoušce – statický lis

Zkouška: Pevnost v tlaku

Zkušební těleso: Válce Ø150/300

Počet těles: 6

Pevnost po 28 dnech

Označení	Rozměr Ø (mm)	Rozměr A2 (mm)	Objem (m ³)	Hmotnost (kg)	Objm.hmot. (kg/m ³)	Max. síla (kN)	Napětí (Mpa)
K.T.1	150	300	5,301	11200	2113	230,86	13,1
K.T.2	150	300	5,301	11110	2096	244,56	13,8
K.T.3	150	300	5,301	11040	2082	155,22	8,8
K.T.4	150	300	5,301	11195	2112	216,87	12,3
K.T.5	150	300	5,301	11000	2075	187,1	10,6
K.T.6	150	300	5,301	11180	2109	236,9	13,4
Průměr				11121	2098		12,0

Charakteristická hodnota
vyhodnocená dle ČSN EN 1990

f _{ck} =	7,8	MPa
f _{cd} =	5,2	MPa

Příloha G

Zpráva o zkoušce - CHRL

Zkouška: CHRL
Zkušební těleso: Krychle 150x150x150
Počet těles: 6
Den výroby tělesa: 7.11.2016
Den zkoušky: 5.12.2016

Vzorek	Rozměr (mm)	Odpady po 25 cyklech vysušené (g)	Výsledek po 25 cyklech vysušené (g/m ²)	Hodnocení
1	150x150x150	18,2	807	Narušený
2	150x150x150	**42,8	**1901	Silně narušený
3	150x150x150	20,4	906	Narušený
4	150x150x150	*52,9	*2352	Silně narušený
5	150x150x150	27,3	1213	Silně narušený
6	150x150x150	28,4	1260	Silně narušený
Průměr		27	1217	

Vzorek	Rozměr (mm)	Odpady po 50 cyklech vysušené (g)	Výsledek po 50 cyklech vysušené (g/m ²)	Hodnocení
1	150x150x150	18,5	1629	Silně narušený
2	150x150x150	*153,2	*8709	Rozpadlý
3	150x150x150	13,2	1494	Silně narušený
4	150x150x150	*101,6	*6867	Rozpadlý
5	150x150x150	28,7	2488	Silně narušený
6	150x150x150	26,1	2419	Silně narušený
Průměr		57	3934	

*Hodnota výsledku odpadu se lišila o více jak 50% od průměru a vzorek byl vyloučen

**Hodnota odpadu součinitele D1 se lišila o více jak 20% od průměru a vzorek byl vyloučen

Zatřídění podle porušení	
Stupeň porušení	(g/m ²)
Nenarušený	do 50
Slabě narušený	do 500
Narušený	do 1000
Silně narušený	do 3000
Rozpadlý	přes 3000

Příloha H

Okamžitý index únosnosti IBI – průběhy působících sil

Penetrace (mm)	Statický lis F = 20 kN Působící síla (kN)	Statický lis F = 80 kN Působící síla (kN)	Pneumatické kladivo Působící síla (kN)
0	0	0	0
0,5	0,5	1,19	0,54
1	0,85	2,69	1,08
1,5	1,15	3,73	1,81
2	1,46	4,31	2,58
2,5	1,65	4,85	3,35
3	1,81	5,31	4
3,5	1,96	5,69	4,58
4	2,12	5,77	5,04
4,5	2,19	5,96	5,46
5	2,31	6,08	5,81
5,5	2,38	6,04	6,08
6	2,46	6,04	6,42
6,5	2,62	6	6,65
7	2,73	6,08	6,88
7,5	2,81	6,15	7,08
8	2,88	6,15	7,31
8,5	2,85	6,23	7,42
9	2,96	6,27	7,61
9,5	3	6,19	7,77
10	3,04	6,11	7,92
10,5	3,12	6,11	8,15

