



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

SMĚSNÝ STAVEBNÍ RECYKLÁT PRO ZEMNÍ TĚLESA POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

MIXED BUILDING RECYCLED MATERIAL FOR PAVEMENT SUBGRADES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Daniel Masař

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Daniel Masař
Název	Směsný stavební recyklát pro zemní tělesa pozemních komunikací
Vedoucí práce	doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

bakalářské, diplomové a doktorské práce 2010-2018

odborné a vědecké publikace z českých a zahraničních sborníků z konferencí a seminářů

výzkumné práce řešící podobné téma

odborné a vědecké publikace

on-line informace z internetu

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Rešeršní přehlednou formou zpracovat dostupné informace o využití směsných recyklátů do konstrukce vozovek pozemních komunikací. Zdůraznit problémy některých vlastností směsných recyklátů. V samostatné kapitole se očekává uvedení zahraničních zkušeností s použitím těchto materiálů do podloží vozovek pozemních komunikací a možnosti dalšího vývoje. Např. využití do vrstevnatých násypů, zpevnění podloží vozovky, apod.

Požadované výstupy:

Úvod se specifikací cílů bakalářské práce

Teoretická část zahrnující široké aktuálně dostupné informace na dané téma. (70% náplně bakalářské práce)

Praktická část - zkoušení laboratorních vzorků směsných recyklátů zaměřené na mechanickou úpravu a zpevňování nevhodných zemin v podloží vozovek (20% náplně bakalářské práce)

Zhodnocení výsledků práce

Závěr (odpověď na stanovené cíle práce)

Literatura

Přílohy

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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

doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Práce řeší využití směsného stavebního recyklátu pro zemní tělesa pozemních komunikací. Teoretická část postupně popisuje výrobu a využitelnost stavebních recyklátů a také ekonomické zhodnocení vůči běžně užívaným přírodním materiálům. Hlavním bodem teoretické části je využití směsného recyklátu do podloží vozovek se zvýšenou pozorností na užití do aktivní zóny pozemní komunikace. Dále popisuje laboratorní zkoušky, které jsou důležité pro zhodnocení vlastností recyklátů a problematické vlastnosti, které mohou ovlivnit životnost stavebního díla. V samostatné kapitole uvádí zahraniční zkušenosti s užitím stavebních recyklátů pro budování dopravních staveb. Praktická část ověřuje vhodnost směsného stavebního recyklátu do aktivní zóny pomocí zkoušek Kalifornský poměr únosnosti, míra namrzavosti zemin a odolnost proti drcení metodou Los Angeles.

KLÍČOVÁ SLOVA

Směsný recyklát, stavební a demoliční odpad, podloží vozovky, aktivní zóna, odolnost proti drcení, Proctorova zkouška, Kalifornský poměr únosnosti, zkoušení míry namrzavosti

ABSTRACT

The Bachelor thesis is focused on the use of mixed building recycled material for pavement subgrades. The theoretical part describes the production and usability of recycled building materials and also the economic evaluation against commonly used natural materials. The main point of the theoretical part is the use of mixed recycled material in the subsoil of roads with increased attention to the use in the active zone of road. It also describes laboratory tests that are important for evaluating the qualities of recycled materials and problematic qualities that can affect the life of a construction work. In a separate chapter, it presents foreign experience with the use of recycled building materials for building transport structures. The practical part verifies the suitability of mixed building recycled material to the active zone of road by tests of the California bearing ratio, soil freezing rate and crushing resistance by Los Angeles.

KEYWORDS

Mixed recycled material, construction and demolition waste, subgrade of the pavement, capping layer, crushing resistance, Proctor's test, California bearing ratio, frost heave test

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Daniel Masař *Směsný stavební recyklát pro zemní tělesa pozemních komunikací*. Brno, 2019. 76 s., 3 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Směsný stavební recyklát pro zemní tělesa pozemních komunikací* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 24. 5. 2019

Daniel Masař
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Směsný stavební recyklát pro zemní tělesa pozemních komunikací* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2019

Daniel Masař
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Dušanu Stehlíkovi, Ph.D. za poskytnuté materiály, odborné vedení a cenné rady při vypracovávání práce. Současně bych rád poděkoval také Pavlu Strakovi za ochotu a rady při provádění zkoušek v laboratoři ústavu pozemních komunikací. Rád bych poděkoval také rodině a svým blízkým za podporu při studiu.

OBSAH

1	ÚVOD A CÍLE PRÁCE	10
2	TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1	TERMÍNY A DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ	11
2.2	STAVEBNÍ A DEMOLIČNÍ ODPAD	12
2.3	RECYKLÁTY V POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH	13
2.3.1	Rozdělení recyklovaného stavebního materiálu.....	13
2.3.2	Výroba recyklátů.....	15
2.3.2.1	Typy recyklačních linek.....	16
2.3.2.2	Typy drtičů a jejich vliv na recyklovaný materiál	18
2.3.3	Použití recyklátů v pozemních komunikacích.....	21
2.3.3.1	Použití do nestmelených vrstev	23
2.3.3.2	Použití do stmelených vrstev	23
2.3.4	Ekonomické hledisko.....	24
2.4	SMĚSNÝ RECYKLÁT	25
2.4.1	Zemní těleso pozemních komunikací.....	25
2.4.2	Zkoušky směsných recyklátů	30
2.4.2.1	Zrnitost – síťový rozbor.....	30
2.4.2.2	Odolnost proti drcení metodou otlukového bubnu (Los Angeles).....	31
2.4.2.3	Proctorova zkouška	31
2.4.2.4	Kalifornský poměr únosnosti CBR	32
2.4.2.5	Zkoušení míry namrzavosti – přímá metoda	33
2.4.3	Problematické vlastnosti směsných recyklátů.....	33
2.4.3.1	Obsah škodlivých látek	34
2.4.3.2	Odolnost proti drcení	35
2.4.3.3	Odolnost proti mrazu a vodě	35
2.5	ZAHRANIČNÍ ZKUŠENOSTI	35
2.5.1	Dánsko.....	35

2.5.2	Švédsko	36
2.5.3	Nizozemsko.....	37
2.5.4	Německo	38
2.5.5	Čína	38
3	PRAKTICKÁ ČÁST	40
3.1	POUŽITÉ MATERIÁLY.....	40
3.2	ZKOUŠKY	40
3.2.1	Stanovení zrnitosti	40
3.2.2	Stanovení podílu plovoucích částic.....	45
3.2.3	Proctorova zkouška	47
3.2.4	Zkouška IBI a CBR.....	54
3.2.5	Míra namrzavosti zemin.....	60
3.2.6	Odolnost proti drcení.....	64
4	ZÁVĚR	66
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	69
	SEZNAM TABULEK.....	72
	SEZNAM GRAFŮ	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	74
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	75
	PŘÍLOHY.....	77

1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE

V současné době, kdy se průmysl neustále posouvá vpřed, vzrůstá množství odpadů, které zatěžuje planetu. Největší zastoupení mezi odpady zabírá stavební a demoliční odpad, který tvoří téměř 40 % produkce odpadních materiálů v České republice. Vzhledem k objemu prací a materiálu, které vyžadují stavby v silničním odvětví, je potřeba dbát na jeho využití a tím ušetření omezených zásob surovinových zdrojů. Opětovné využití odpadních materiálů je důležité také z hlediska omezených kapacit sběrných míst, a proto je recyklace v dnešní době prioritou většiny zemí po celém světě. Využití recyklovaného materiálu je výhodné nejen ekonomicky a ekologicky, ale v mnohých případech také technologicky, kdy při správném recyklačním procesu dokáže nahradit běžně užívané materiály. Vzhledem k charakteru recyklovaného stavebního a demoličního odpadu je právě silniční odvětví tím správným směrem, kde lze využít velké množství těchto materiálů pro výstavbu zemního tělesa.

Cílem teoretické části je shrnout dostupné informace o směsném stavebním recyklátu a jeho využití pro zemní tělesa pozemních komunikací. Teoretická část postupně popisuje výrobu, využitelnost a také ekonomické zhodnocení recyklátů vůči běžně užívaným přírodním materiálům. Hlavní pozornost je věnována užití směsných recyklátů do aktivní zóny pozemní komunikace. Dále popisuje laboratorní zkoušky, které jsou důležité pro zhodnocení vlastností recyklátů a problematiku vlastností, které ovlivňují životnost stavebního díla. Posledním bodem teoretické části je seznámení s užíváním recyklovaných materiálů v zahraničí a jejich využitím do liniových staveb.

Praktická část ověřuje možnost použití směsného stavebního recyklátu do aktivní zóny vůči běžně užívaným materiálům. Zkoušení je prováděno se třemi druhy směsných recyklátů, z nichž dva druhy jsou frakce 0/32 a poslední je frakce 32/63. Jeden druh směsného recyklátu frakce 0/32 má větší zastoupení cihelných střepek, mezitímco druhý typ je převážně kamenitý. Cílem praktické části je zhodnotit směsný recyklát z hlediska únosnosti pomocí zkoušky CBR (Kalifornský poměr únosnosti) a porovnat jej s běžně užívaným kamenivem. Dále porovnat jeho míru namrzavosti a určit tak vhodnost použití pro výstavbu zemního tělesa pozemní komunikace. U směsného recyklátu cihelného typu je také cílem určit součinitel odolnosti proti drcení LA, který má významný vliv pro jeho použití do podloží pozemní komunikace.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 TERMÍNY A DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

„**Stavebně demoliční odpad (SDO)** - je ve smyslu vyhlášky č.294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu ve znění vyhlášky č. 61/2010 Sb., §2, písmeno a) inertní odpad, který nemá nebezpečné vlastnosti a u něhož za normálních klimatických podmínek nedochází k žádným významným fyzikálním, chemickým nebo biologickým změnám.“ [1]

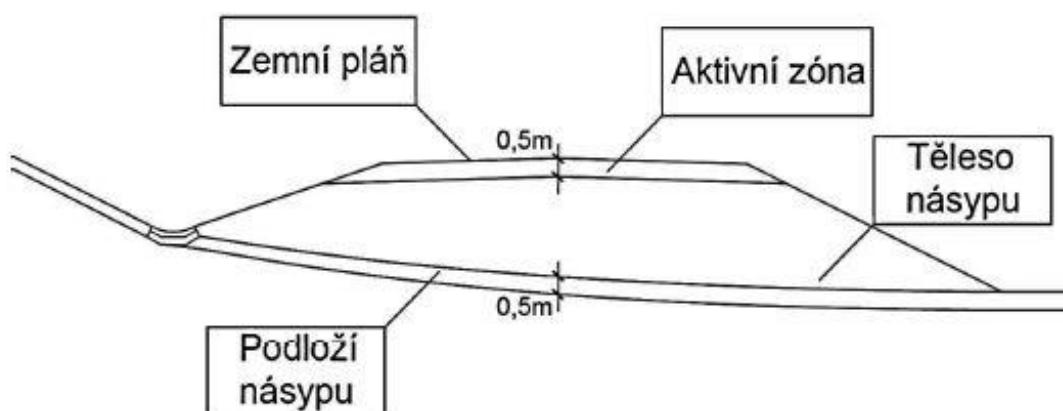
„**Recyklovaný stavební materiál (RSM)** – je materiálový výstup ze zařízení k využívání a úpravě SDO, kategorie ostatní odpad a odpadů podobných SDO, spočívající ve změně zrnitosti a jeho roztřídění na potřebnou velikost frakce v zařízeních k tomu určených.“ [1]

„**Zemní těleso** – je součást pozemní komunikace, která tvoří spodní stavbu vozovky v kontaktu s terénem; zemní těleso může být tvořeno z násypu nebo zářezu (včetně svahů).“ [2]

„**Podloží násypu** – je část terénu pod násypem, zpravidla po odstranění humózní vrstvy; podloží násypu je zpravidla omezeno hloubkou, do níž působí vlivy přitížení násypem; do zemního tělesa se zahrnuje pouze hloubka, do níž zasahují případné stavební úpravy (např. odvodnění, úprava zeminy apod.).“ [2]

„**Aktivní zóna (AZ)** – je horní vrstva zemního tělesa na násypu a zářezu, o tloušťce zpravidla 0,5 m, do níž zasahují vlivy dopravního zatížení a klimatické vlivy.“ [2]

„**Zemní pláň** – je plocha, která uzavírá zemní těleso ve styku s vozovkou; tvoří horní líc aktivní zóny.“ [2]



Obrázek 2.1 – Příčný řez pozemní komunikací [3]

2.2 STAVEBNÍ A DEMOLIČNÍ ODPAD

Produkce stavebních a demoličních odpadů (SDO) je neodlučitelně spjata se stavební činností, výstavbou, rekonstrukcí či demolicí stavebních objektů. Nejedná se pouze o budovy, ale také o liniové stavby či úpravy vodních děl.

V současnosti je podíl stavebních a demoličních odpadů mezi celkovou produkcí odpadů velice výrazný. V České republice a zemích EU se jedná přibližně o 35 – 40%, což ze stavebních a demoličních odpadů vytváří velice významný zdroj druhotných surovin. Konkrétní podíl SDO za rok 2017 lze vidět v grafu 2.1.



Graf 2.1 - Podíl SDO v ČR v roce 2017 z celkového množství odpadů [4]

Za rok 2017 bylo v České republice vyprodukováno 8,99 mil. tun SDO, což tvoří 36% z celkového množství odpadů. [4] Po případné úpravě je možné SDO zařadit mezi běžně užívané stavební materiály se stejnou výslednou kvalitou jakou disponují materiály přírodní, což je jedním z hlavních úkolů ve stavebním oboru v dnešní době. Vzhledem k jeho množství je velmi důležité dbát na jeho opětovné využití. Ukládání SDO na skládky, které byly původně předurčeny k ukládání nebezpečných a znovu nepoužitelných odpadních produktů, je nešetrným způsobem, který nepříznivě ovlivňuje životní prostředí. Mnohem horším způsobem je však nelegální ukládání SDO na místa, která nejsou určena ke skládkování, pod záminkou rekultivace nebo terénní úpravy. [5] Z těchto důvodů je nutné najít pro SDO uplatnění, které bude šetrným řešením pro životní prostředí, ekonomiku, a bude zajišťovat přiměřené využívání přírodních surovinových zdrojů, které jsou omezené a je tak potřeba dbát na jejich čerpání.

Jelikož je pojem stavební a demoliční odpad velmi široký, můžeme jej rozdělit do tří rozsáhlejších skupin, které určují přibližnou vhodnost jeho dalšího možného použití.

- **Bezproblémové materiály vhodné k recyklaci** – např. beton, cihly, tašky, keramika, dřevo, sklo, plasty, asfaltové směsi, štěrk ze železničního svršku neobsahující nebezpečné látky
- **Problematické odpady obsahující nebezpečné látky, které je potřeba odstranit** – např. asfaltové směsi obsahující dehet, vytěžená hlušina obsahující nebezpečné látky, zemina a kamenivo obsahující nebezpečné látky
- **Nebezpečné odpady, které nadále nelze využít** – izolační materiály a stavební materiály obsahující azbest [6,7]

Pevnostní charakteristiky a únosnost SDO je závislá na kvalitě materiálu, ze kterého je výsledný recyklát vyroben. Důležitým aspektem pro zaručení výsledné kvality je třídění SDO, kterým se lze zbavit materiálů, které by degradovaly jeho vlastnosti. Především se jedná o materiály, jako jsou dřevo, cihly, zbytky výztuže, plasty, maltoviny apod. Vzhledem k technologiím, které jsou dnes dostupné, není třídění nevhodných částic problémem, a proto může být prováděno již na stavbě. [8]

2.3 RECYKLÁTY V POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH

Recykláty vznikají jako výsledný výrobek recyklací SDO a jejich využití v pozemních komunikacích je velmi široké. Podmínky a zásady pro návrh, kontrolu a provádění jednotlivých vrstev a zemních těles pozemních komunikací upravují technické podmínky TP 210. Vzhledem k velkému tlaku na opětovné využívání již použitých materiálů existuje velké množství recyklátů, odlišného složení a vlastností, které můžeme rozdělit do jednotlivých kategorií.

2.3.1 Rozdělení recyklovaného stavebního materiálu

„**Recyklát z betonu** – je recyklované kamenivo získané drcením a tříděním betonu a betonových výrobků, obsah složky $R_c \geq 90$ % hm., obsah $(R_u + R_b) \leq 6$ %, maximální obsah složky $R_g \leq 1$ % hm. Maximální obsah jiných ostatních a plovoucích částic $(X+Y+FL)$ je 3% hm. FL se stanovuje objemově podle ČSN EN 933-11. Pozn. Maximální množství plovoucích částic (FL) je 1%.“ [1]

„**Recyklát z vozovek** – je recyklované kamenivo získané drcením a tříděním betonu, vrstev stmelených asfaltem nebo hydraulickým pojivem případně nestmelených vrstev a hrubozrnných zemin s celkovým obsahem složek $R_c + R_a + R_u \geq 90$ % hm. Maximální obsah složky R_a je 30 % hm. Maximální obsah jiných, ostatních a plovoucích částic $(X+Y+FL)$ je 5 % hm.“ [1]

„**Recyklát ze zdiva** – je recyklované kamenivo získané drcením a tříděním pálených a nepálených zdících prvků (např. cihly, obkladačky, vápenopískové prvky, pórobetonové tvárnice) a betonu s celkovým obsahem složek Rb + Rc + Ru \geq 90 % hm. Složka jiných, ostatních a plovoucích částic (X+Y+FL) je maximálně 10 % hm.“ [1]

„**Recyklát směsný** – je recyklát, získaný drcením a tříděním SDO, který se nepovažuje za kamenivo ve smyslu ČSN EN 12620+A1, ČSN EN 13043 nebo ČSN EN 13242+A1. Podíl hlavních složek není určen a obsah jiných, ostatních a plovoucích částic (X+Y+FL) je \leq 10 % hm. Recyklát směsný je určen převážně jako náhrada zemin pro stavbu násypů a úpravy podloží pozemních komunikací podle ČSN EN 73 6133, zásypy rýh, terénní úpravy apod.“ [1]

„**R-materiál** – je asfaltová směs znovuzískaná odfrézováním asfaltových vrstev nebo drcením desek vybouraných z asfaltových vozovek nebo velkých kusů asfaltové směsi a asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby. Jedná se o více jak 95 % asfaltových materiálů (Ra), s max. obsahem 5 % hm. Ostatních recyklovaných materiálů (Rc+Rb+Ru+X+Y+FL).“ [1]

„**Recyklát asfaltový** – je recyklát z vozovek, kde je podíl 30 % $<Ra \leq 95$ % hm.“ [1]

„**Jiné částice (X)** – v souladu s ČSN EN 933-11 se jedná o přilnavé částice (tj. jemnozrnné jílovité zeminy a nečistoty), různorodé částice jako kovy (železné a neželezné), neplovoucí dřevo, stavební plasty a pryž, sádrová omítka apod.“ [1]

„**Ostatní částice (Y)** – jedná se o částice nestavebního charakteru např. papír, polyetylenové obaly, textil, organické materiály (např. humus, rašelina), apod. Z hlediska stanovování obsahu ostatních částic (Y) se tyto přiřazují při zkoušce podle ČSN EN 933-11 ke složce jiných částic (X).“ [1]

„**Plovoucí částice (FL)** – stanoví se v souladu s ČSN EN 933-11. Jedná se o částice, které plovou ve vodě (např. plovoucí dřevo polystyrén apod.).“ [1]

Tabulka 2.1 - Vysvětlivky ke zkratkám [1], vlastní zpracování

Ozn.	Vysvětlení, význam
Rc	beton, betonové výrobky, malta, betonové zdící prvky
Rb	pálené zdící prvky např. cihly a tvárnice, vápenopískové zdící prvky, neplovoucí pórobeton
Ru	nestmelené kamenivo, přírodní kámen, kamenivo ze směsi stmelené hydraulickým pojivem
Rg	sklo
Ra	asfaltové materiály

2.3.2 Výroba recyklátů

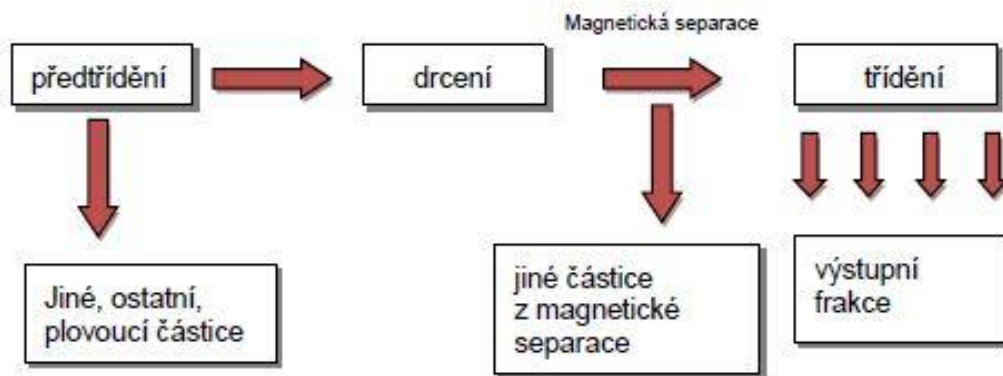
Jak již bylo zmíněno, recyklát je výsledným produktem recyklace SDO. Za předpokladu dostatečné kvality recyklátu, jej lze využít jako náhradu přírodního kameniva do konstrukčních vrstev nebo zemního tělesa pozemních komunikací. [1] Recyklace SDO je v dnešní době velice důležitou součástí stavebního odvětví z důvodu ochrany životního prostředí, minimalizace využití neobnovitelných surovinových zdrojů a také ekonomického hlediska. Příznivé dopady na životní prostředí lze shrnout do pár základních bodů:

- snížení objemu odpadů
- ušetření neobnovitelných přírodních zdrojů a energie
- předcházení znečištění
- snižování nežádoucích vlivů (např. hluk nebo doba výstavby díla)

Výrobní proces má zásadní vliv na výslednou kvalitu produkovaného recyklátu. Z tohoto důvodu se zjistilo, že mnohem účinnější a také levnější je provádět prvotní třídění materiálu přímo na stavbě, než poté u samotného výrobce recyklovaného kameniva. Hlavní výhodou tohoto postupu je snadnější odstranění cizorodého materiálu – především dřeva, plastu, skla, kovu, dehtové lepenky apod. od minerální sutě, který by mohl zapříčinit při využití recyklátu značné problémy. [9] Při třídění během demoličních prací se ukázalo jako účelné klást důraz na:

- oddělení kontaminovaných materiálů od nekontaminovaných
- oddělení cizorodých materiálů od minerální suti určené k recyklaci – jedná se především o dřevo, plast, sklo, kovy, dehtové lepenky apod. Tímto oddělením vznikne určitý logistický systém, kdy jsou jednotlivé materiály rozděleny do několika kontejnerů
- roztřídění inertní minerální suti na:
 - cihelný odpad
 - betonový odpad
 - asfaltový odpad
 - výkopová zemina [10]

Kvalita recyklátu není ovlivněna pouze technologií, ale také organizací práce a logistickým systémem chodu recyklačního zařízení, včetně skladového hospodářství. [10] Z hlediska získání kvalitního recyklátu se za poslední roky v České republice osvědčila uznávaná a používaná konfigurace, naznačená blokovým schématem na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2 - Blokové schéma recyklačního procesu [1]

Dnes jsou již známé i jiné recyklační zařízení, které výše naznačené blokové schéma nedodrží, avšak je nemyslitelné, aby recyklace proběhla bez tří základních technologických operací, kterými jsou předtřídění – drcení – třídění. K těmto základním technologickým krokům by se měla v budoucnu přidat další technologická operace, která se již běžně využívá v recyklačních zařízeních v zemích EU, a to separace lehkých a prachovitých částic. Vzhledem k postupnému zavádění certifikace některých recyklovaných produktů bude zavedení tohoto technologického kroku nezbytné. Bohužel lze dnes najít i spoustu stavebních firem zabývajících se recyklací, které výše uvedený technologický řetězec využívají jen částečně. Jedná se buď o provozování samostatných třídících linek bez drtičů, nebo naopak o samostatný provoz drtičů bez předtřídění i třídění. [9]

Recyklovaný stavební materiál je nutné ukládat odděleně podle druhu a jakosti. Také je důležité zabránit znehodnocení materiálu znečištěním, smícháním, vyplavováním apod. Důležitou součástí při skladování je také pravidelná kontrola homogenity a stejnorodosti recyklovaného materiálu pro kontrolu úrovně jeho kvality. [1]

2.3.2.1 Typy recyklačních linek

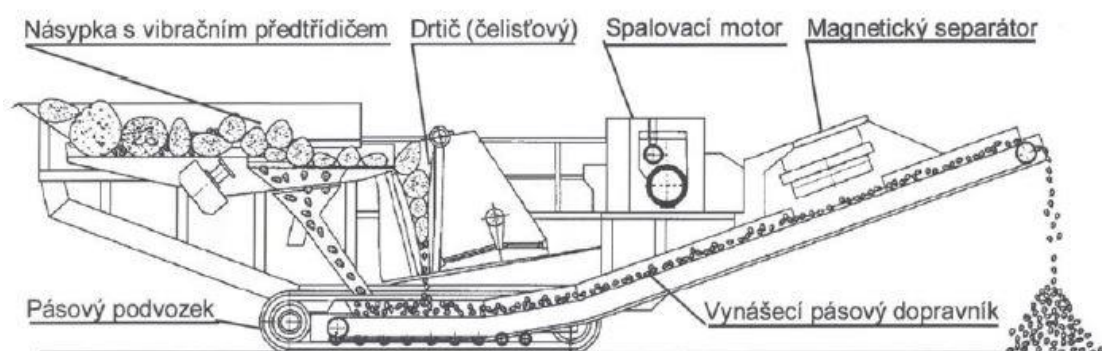
Recyklace SDO je komplikovaný a náročný proces, ve kterém je zapotřebí kvalitních strojů a kvalifikovaných pracovníků. V současnosti, kdy existuje veliké množství techniky určené pro recyklaci, je nejjednodušší variantou rozdělit recyklační linky do tří skupin podle jejich mobility. Jedná se o recyklační linky:

- mobilní
- semimobilní
- stacionární

V České republice zabírají největší podíl mobilní recyklační linky. Těmito zařízeními je recyklováno cca 90% všech materiálů. V dřívější době se jednalo o velice rozměrné stroje, což neumožnilo jednoduchost při přepravě SDO v místě recyklace a dojezdové vzdálenosti nakladačů tak byly příliš dlouhé. V dnešní době je však situace jiná, kdy je možnost využívat mobilní recyklační linky, vybaveny dálkovými ovladači, které může obsluhovat strojník v nakladači či rypadle. [11]

Mobilní recyklační linka

Základní charakteristikou mobilní recyklační linky je možnost jejího pohybu při práci. Obsahuje veškeré zařízení potřebné pro provedení kompletní recyklace, které lze vidět na obrázku 2.3. V dřívější době byla převážně používána kolová verze mobilní recyklační linky, která dnes ovšem neodpovídá zákonu o provozu na pozemních komunikacích, a proto je dnes nahrazena verzí pásovou, jejíž přeprava v terénu je jednodušší. Výkonnost mobilní recyklační linky se pohybuje v rozmezí od 50 – 150 t/h. Hlavní výhodou mobilní recyklační linky je její pohyblivost a nezávislost na přísunu materiálu. Nevýhodou jsou naopak vyšší provozní náklady, omezený sortiment materiálů (frakce recyklátu) a problémy s ohledem na hluk a emise šířící se do okolního prostředí. [12,13]



Obrázek 2.3 - Schéma mobilní recyklační linky s pásovým podvozkem [12]

Semimobilní recyklační linka

Oproti mobilní recyklační lince se liší tím, že při práci stojí, ale není složité ji přemístit pomocí druhého mobilního zařízení. Většina strojů je vybavena samozdvíhým hydraulickým zařízením pro nakládku a vykládku. Po sklopení nasycky částečné demontáži navíc linka nepřesahuje průjezdný profil. Výhody a nevýhody jsou obdobné jako u mobilních recyklačních linek. Výkonnost semimobilních recyklačních linek se pohybuje od 70 – 250 t/h. [12,13]

Stacionární recyklační linka

Stacionární recyklační linka je trvalá a je umístěna ve vhodné lokalitě (např. uzavřené lomy, těžební jámy zrušených cihelen apod.), ve které je zajištěna nižší zátěž pro životní prostředí. Oproti předešlým recyklačním linkám je jejich výhoda ve vyšší zpracovatelské výkonnosti a „čistotě“ výstupního materiálu, který je zbaven nežádoucích částic. Nevýhodou je však nutnost neustálého přísunu SDO, a proto doprava materiálu značně zvyšuje provozní náklady těchto linek. V současné době jsou v ČR v provozu 2 stacionární recyklační linky. [12]

2.3.2.2 Typy drtičů a jejich vliv na recyklovaný materiál

Recyklační linky se skládají z jednotlivých částí (komponentů), které jsou potřeba pro důslednou recyklaci. Nejdůležitější částí je drtící jednotka, která slouží ke zpracování SDO na požadovanou frakci. Volba vhodného drtiče závisí na vlastnostech drceného materiálu, jako jsou fyzikální vlastnosti, účel použití výsledného recyklátu a jeho požadované vlastnosti. Na výkonnosti drtičů závisí výkonnost celé recyklační linky. [12] Podle druhu rozlišujeme drtiče na:

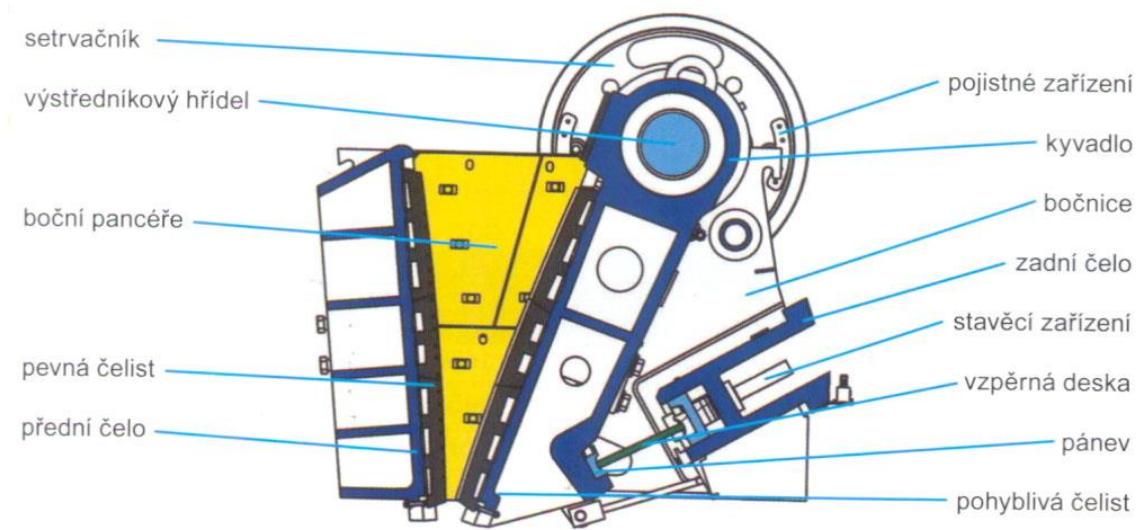
- čelistové
- odrazové
- kuželové
- válcové
- kladivové

Mezi nejčastěji využívané patří drtiče čelistové a odrazové. Ostatní drtiče jsou používány zřídka, některé nejsou dokonce příliš vhodné pro úpravu SDO. Existují také drtiče drobné stavební suti, které jsou však využitelné pouze pro materiály, jejichž vstupní velikost je 10 – 20 cm. [13,14]

Čelistové drtiče

Mohou být jednovzpěrné či dvouvzpěrné. Jednovzpěrné dokáží zpracovat materiál na menší frakci s lepší tvarovou hodnotou zrn, mezitím co dvouvzpěrné dokáží zpracovat především velmi pevný a abrazivní materiál. Funkce drtiče spočívá v drcení materiálu mezi dvěma čelistmi z tvrdé oceli, z nichž jedna je pevná a druhá pohyblivá. Drcený materiál postupně propadá a při určité minimální frakci vypadá z drtiče výpustnou šterbinou. Čelistový drtič je vhodný pro úpravu především tvrdého nelepivého materiálu, s pevností v tlaku do 400 MPa, se vstupní frakcí v rozmezí 50 – 100 cm. Výhodou čelistového drtiče jsou jeho nízké provozní náklady a vyšší životnost čelistí oproti odrazovým deskám u odrazového drtiče. Další výhodou je malá prašnost a nízké zatížení okolí hlukem. Nevýhodou je nemožnost použití čelistového drtiče pro drcení asfaltových materiálů (dochází k ucpání šterbiny) a tenkých betonových desek, kde dochází k nedokonalému rozdrčení na určitou frakci. Tuto nevýhodu lze vyřešit pouze částečným

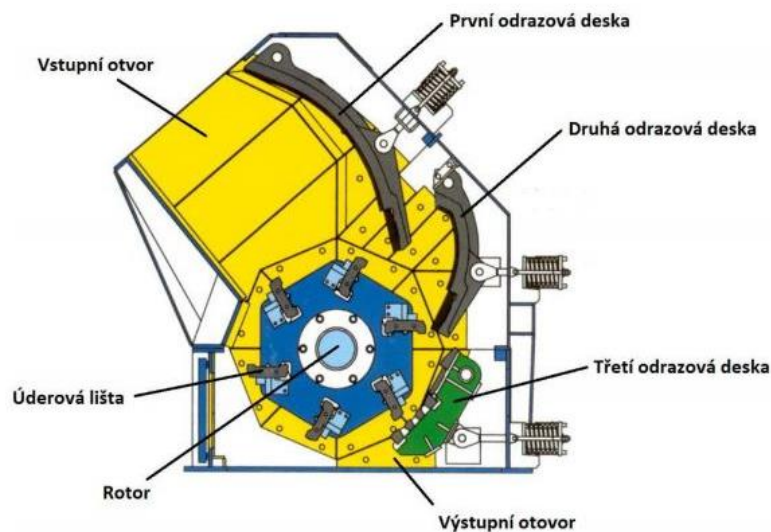
naplněním drtiče. Dále lze také říct, že nejsou vhodné pro úpravu železobetonů, kde může dojít k ucpání drtiče výztuží nebo nedokonalému odstranění výztuže z drceného prvku. [11,13]



Obrázek 2.4 – Řez jednovzpěrným čelistovým drtičem [15]

Odrazové drtiče

Je tvořen otáčejícím se válcem s výčnělky či zuby, na kterých se drcený materiál zachytí a následně je vržen s vysokou kinetickou energií proti nepohyblivé části, která je tvořena z pancéřové desky. Drcený materiál se po nárazu rozštěpí v místě své nejmenší soudržnosti nebo svých puklin a prasklin. Odrazový drtič je vhodný zejména pro zpracování betonu, železobetonu či asfaltových ker. Vstupní velikost materiálu je maximálně 80 cm. U všech drtičů tohoto typu lze lišty otáčet, i přes tuto výhodu však zvládne zpracovat maximálně 15 000 tun materiálu.

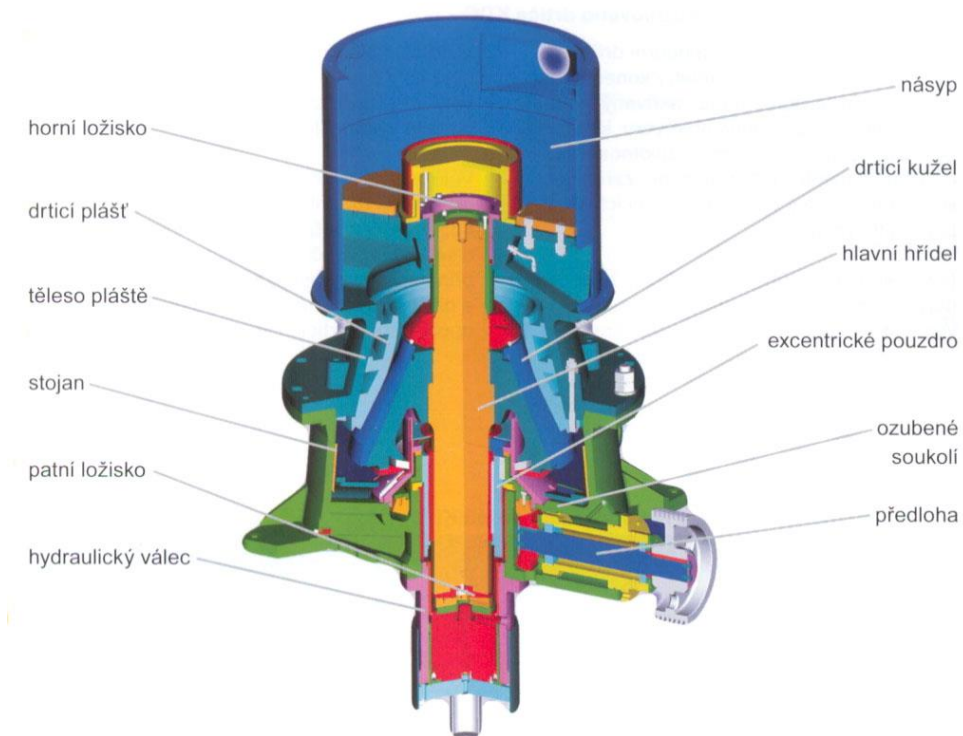


Obrázek 2.5 - Příčný řez odrazovým drtičem [16]

Výhodou odrazových drtičů je jejich vysoký výkon, velká variabilita zdrobnění a jednoduchá obsluha s údržbou. Výstupní kamenivo je také daleko kvalitnější než z drtičů čelistových. Mezi nevýhody patří hluchnost, prašnost a vysoká cena za výměnu náhradních lišt s čímž je spojena nutnost pozastavení práce. [11,13]

Kuželové drtiče

Po odrazových a čelistových drtičích patří k nejpoužívanějším mezi ostatními typy drtičů. Je tvořen pohyblivou částí ve tvaru kužele, která při svém pohybu rozmělnuje drcený materiál o nepohyblivou část drtiče, která současně tvoří plášť. Drcení materiálu probíhá po celém obvodu kužele, přičemž nejúčinnější je v místě s nejmenší štěrbinou. Kuželový drtič je vhodný zejména pro zpracování tvrdých a obtížně drtitelných hornin a nelepivých materiálů jako je např. křemen, pískovec, vápenec, apod. Vstupní velikost materiálu je v rozmezí 5 – 25 cm, a proto je kuželový drtič používán zejména jako sekundární. Výstupní frakce může být hrubá i jemná vzhledem k velké možnosti nastavení polohy kužele.



Obrázek 2.6 - Řez kuželovým drtičem [15]

Výhodou kuželových drtičů je schopnost vysokého stupně zdrobnění a také kvalita výstupní frakce. Mezi další výhody lze zařadit také spolehlivost, mobilitu, nízké náklady na údržbu nebo snadnou obsluhu. Mezi nevýhody patří snadná přilnavost měkkých drcených materiálů na drtičí části, které je nutné v takovém případě z pláště odstranit. [12,13]

2.3.3 Použití recyklátů v pozemních komunikacích

Recykláty lze rozdělit dle procentuálního zastoupení hlavní složky do několika základních tříd, které poté mohou být použity do různých konstrukčních vrstev nebo podloží pozemní komunikace. Orientační možnost použití těchto typů recyklátu upravují technické podmínky TP 210 a lze je shrnout do základní tabulky. [1]

Tabulka 2.2 - Doporučené použití RSM dle procentuálního zastoupení hlavní složky [1]

Typ RSM	Konstrukční vrstvy pozemní komunikace									Podloží, zemní těleso ³⁾
	A B	CB	Nestmelené podkladní vrstvy (NV)				Stmelené podkladní vrstvy (SV)	Prolévané podkladní vrstvy (PV) a VŠ		
			MZK	ŠD _A	ŠD _B	MZ		Kostrá ¹⁾	Výplň ²⁾	
Recyklát z betonu	+	0/-	+	+	+	+/0	+	+/0	+/0	+/0
Recyklát ze zdiva	-	-	-	0/-	+	+/0	+	0/-	+/0	+
Recyklát směsný	-	-	-	-	-	+	+	-	+	+
Recyklát z vozovek	+	+/0	+	+	+	+/0	+	+/0	+/0	+/0
Recyklát asfaltový	+	-	+/0	+	+	0/-	+	0/-	0/-	0/-

Vysvětlivky k tabulce 2.2:

+ doporučuje se používat

- nedoporučuje se používat

0 podmíněčně lze použít (omezené např. z technologických, ekonomických, ekologických důvodů apod.)

AB asfaltové vrstvy vozovek pozemních komunikací

CB cementobetonové kryty vozovek pozemních komunikací

¹⁾ podle ČSN 73 6126-2 lze použít u prolévaných vrstev např. kamenivo frakce 32/63, případně u vibrovaného štěrku VŠ

²⁾ lze použít u prolévaných vrstev jako součást výplňové malty nebo vibrovaného štěrku např. kamenivo frakce 8/11

3) lze použít jako zrnitý materiál do podloží vozovek nebo vrstevnatých násypů jako ztužující vrstvu [1]

Jednoznačné využití recyklovaných materiálů jako kameniva do pozemních komunikací upravují tyto normy:

- **ČSN EN 13 043:2004 Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravní ploch** – tato norma určuje vlastnosti recyklátu jako kameniva, získaného přírodní nebo umělou cestou, nebo také recyklací materiálů pro použití zejména v asfaltových směsích a povrchových vrstvách pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch. Zejména se jedná o betonový recyklát použitelný pro směsi do ložné či podkladní vrstvy.
- **ČSN EN 13 242:2004 Kamenivo pro nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace** – tato norma určuje vlastnosti recyklátu jako kameniva, získaného přírodní nebo umělou cestou, nebo také recyklací materiálů pro použití v nestmelených směsích a směsích stmelených hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace. Oproti předešlé normě jsou zde požadavky na kamenivo nižší, a proto je možnost využít téměř všechny recykláty z SDO. [17]

Pro použití recyklátu je nutné provedení funkčních zkoušek a deklaráce vlastností. Rozsah, ve kterém bude zkoušení provedeno, záleží na použití kameniva případně také na jeho původu. Základní požadavky na prokazování vlastností lze shrnout do třech následujících bodů: [18]

- **Požadavky na geometrické vlastnosti**
 - Zrnitost
 - Tvar zrn hrubého kameniva (index plochosti a tvarový index)
 - Procentní podíl ostrohranných a oblých zrn
 - Obsah jemných částic
- **Požadavky na fyzikální vlastnosti**
 - Odolnost proti drcení hrubého kameniva
 - Odolnost hrubého kameniva proti oděru
 - Objemová hmotnost zrn
 - Nasákavost
- **Trvanlivost [18]**

Kromě sledování fyzikálně mechanických vlastností recyklovaného kameniva je potřeba sledovat také kvalitu vstupního materiálu jako je stáří, pevnost nebo stupeň chemického, fyzikálního a mechanického znečištění. Dále je také nutno určit způsob sekundárního zpracování a zvláštní požadavky na přípravu čerstvých směsí pro zhotovení konstrukčních vrstev. Je také důležité stanovit způsob ošetřování a sledovat chování recyklátů v konstrukci jak běžnými fyzikálně mechanickými metodami, nedestruktivními zkouškami, tak i pomocí moderních laboratorních metod. [19]

2.3.3.1 Použití do nestmelených vrstev

Použití recyklátů bez použití pojiva do konstrukce vozovky je zejména do nestmelených vrstev podle ČSN 73 6126-1 a ČSN 73 6126-2 a je upraveno v technických podmínkách TP 210.

Nestmelené vrstvy se v současnosti dělí na:

- Mechanicky zpevněná zemina **MZ** – nejčastěji je používán směsný recyklát
- Štěrkopísek **ŠP** – nestmelená směs drceného kameniva
- Štěrkodrt **ŠD** – nestmelená směs z těžného kameniva
- Vibrovaný štěrk **VŠ** – vrstva tvořena kostrou z hrubého drceného kameniva s výplňovým zavibrovaným kamenivem
- Mechanicky zpevněné kamenivo **MZK** – vrstva z nestmelené směsi drceného kameniva, která je rozprostřená a zhutněná [3]

Pro použití recyklovaného kameniva do nestmelených směsí musí být taktéž deklarovány vlastnosti dle ČSN EN 13242+A1 a pro vibrovaný štěrk dle ČSN 73 6126-2. [1]

2.3.3.2 Použití do stmelených vrstev

Vlastnosti recyklátů pro stmelené vrstvy jsou deklarovány v ČSN EN 13242+A1 a pro podloží vozovky v normě ČSN 73 6133. [1] Pro směsi stmelené hydraulickým pojivem se nejčastěji používají frakce 0/22, 0/32 nebo 0/45, přičemž pro prolévané vrstvy především frakce 16/32 a 32/63. Důležitým požadavkem při návrhu čáry zrnitosti směsi s hydraulickým pojivem je také obsah jemných částic, který je stanoven maximálně na 15% a maximální nadsítne je 15%. Nejčastěji používané pojivo je cement, případně hydraulické silniční pojivo, jež je specifikováno v ČSN EN 14 227-1 a 5. [20]

2.3.4 Ekonomické hledisko

Vzhledem k tomu, že recyklovaný materiál nahrazuje běžně užívané přírodní kamenivo, je jedním z důležitých aspektů také porovnání cen. Je nutné podotknout, že kalkulace ceny recyklátu je složitá. [18] Výrobce již na začátku celého procesu vybírá poplatek od dovozce materiálu, který je ovlivněn několika aspekty. Prvním aspektem je množství materiálu, který dovozce přiveze. Pokud se jedná o drobný návoz menší než 1 tuna, účtuje si výrobce poplatek zhruba 400 Kč/návoz. Další důležitou součástí ceny je čistota dovezeného materiálu. Podle množství příměsí se příplatek pohybuje zhruba v rozmezí 300 – 600 Kč/t. Maximální kusovitost je 600 mm, při větší kusovitosti se účtuje přibližně 500 Kč/t. Za materiál, jež obsahuje nebezpečné látky ve smyslu azbestu atp. je u většiny výrobců účtována pokuta a při opakovaném návozu nebezpečného materiálu hrozí trvalý zákaz dodávky. [21] V tabulce 2.3 lze vidět orientační porovnání cen jednotlivých materiálů nejčastěji používaných frakcí.

Tabulka 2.3 - Orientační srovnání cen jednotlivých materiálů [21]

Materiál	Frakce [mm]	Cena [Kč/t]
Betonový recyklát	0 - 16	100 ,-
	0 - 32	80 - 90 ,-
	0 - 63	80 - 95 ,-
	32 - 63	100 ,-
Směsný recyklát	0 - 16	20 ,-
	0 - 32	20 ,-
	0 - 63	20 ,-
	32 - 63	20 ,-
Přírodní kamenivo	0 - 4	170 ,-
	8 - 16	270 ,-
	0 - 32	210 ,-
	0 - 63	245 ,-
	32 - 63	225 ,-

Poznámka: Uvedené ceny jsou bez DPH a jsou získány z internetového zdroje výrobce recyklátů DUFONEV R.C., ceník je platný od 1. 1. 2019.

2.4 SMĚSNÝ RECYKLÁT

Jelikož složení směsného recyklátu není přesně specifikováno a podíl hlavních složek není určen, je velmi složité zajistit jednotnou kvalitu. Z tohoto důvodu lze směsný recyklát roztřídit, podle dosažené čáry zrnitosti, obsahu prachových částic a plnění technických požadavků na zeminy, do čtyř kvalitativních tříd. [22] Jednotlivé kvalitativní třídy lze shrnout do tabulky 2. 4., která specifikuje třídu směsného recyklátu a jeho využití v konstrukci.

Tabulka 2.4 - Použití směsného recyklátu v konstrukci pozemní komunikace [22]

Druh recyklátu	Konstrukce	
Směsný recyklát I - SR I	podkladní vrstvy vozovky	v ochranné vrstvě jako zpevněná zemina
Směsný recyklát II - SR II	stabilizované podkladní vrstvy, podloží vozovky	zejména v aktivní zóně
Směsný recyklát III - SR III	stabilizované podkladní vrstvy, zemní těleso	ztužující vrstvy, zásypy a obsypy
Směsný recyklát IV - SR IV	zemní těleso	náhradní zemina do zásypů a obsypů

2.4.1 Zemní těleso pozemních komunikací

Použití recyklátů do zemního tělesa a podloží vozovky pozemní komunikace upravuje norma ČSN 73 6133. Recyklované materiály z vozovek, pozemních komunikací a inženýrských staveb se smějí pro stavbu zemního tělesa použít stejně, jako každá jiná zemina nebo kamenitá sypanina. Předpokladem pro použití je zbavit recyklát nežádoucích organických a minerálních látek s negativním vlivem na životní prostředí a látek, které mohou působením klimatických jevů měnit svůj objem, pevnost a tvar, což jsou látky jako ocelový odpad, dřevo, sádra apod. [2]

Do zemního tělesa a především do aktivní zóny, jako náhradu nebo mechanickou úpravu nevhodné zeminy, je vhodné použít zejména směsný recyklát. [1] Frakce směsného recyklátu 0/16 je se svými vlastnostmi vhodná především pro budování násypů těles komunikace nebo obsypů inženýrských sítí. Střední frakce 0/32, 16/32 je naopak vhodná zejména pro použití do aktivní zóny komunikace. Větší, široké směsné frakce 0/63, 32/63 jsou vhodné pro výstavbu obslužných lesních a polních cest, nebo také pro dočasné či trvalé zpevnění a odvodnění do spodních vrstev. Výhodně se používá jako mezerovitý recyklát pro tvorbu drenážních vrstev. [21]

Orientačně lze zeminy rozdělit do čtyř skupin:

- nepoužitelné
- nevhodné
- podmíněčně vhodné
- vhodné

Použitelnost zemin lze přehledně zobrazit do tabulky 2.5. [2]

Tabulka 2.5 - Použitelnost zemin pro stavbu zemního tělesa [2]

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

^{a)} Netýká se podloží násypu a svahů zářezu.
^{b)} Obsah 6 % je hranice pro středně organické zeminy dle ČSN EN ISO 14688-2.
^{c)} Neplatí pro poddajnou vrstvu vrstevnatého násypu.

Kromě klasifikace zeminy podle tabulky 2.5 je nutné vyhodnotit použitelnost zemin pro stavbu zemního tělesa dle skutečných vlastností následujícím postupem:

1. Jestliže je mez tekutosti $w_l > 50 \%$, $I_c \leq 0,5$ nebo $\rho_{d \max. PS} < 1500 \text{ kg/m}^3$ (pro násyp), $\rho_{d \max. PS} < 1600 \text{ kg/m}^3$ (pro aktivní zónu), musí se zemina upravit.
2. Je nutné upravit objemově nestabilní zeminy a horniny jako např. bobtnavé jíly a jílovité břidlice. Vzhledem k tomu, že jsou nestabilní, bude i za běžných klimatických podmínek docházet v zemním tělese k objemovým změnám větším než 3 %.
3. Jestliže zeminu není možné zpracovat, protože přirozená vlhkost w_n není v intervalu přípustné vlhkosti a nelze ji ovlivnit, nebo se jedná o zeminu stejnozrnnou, musí se zemina upravit.

Poznámka: „Optimální vlhkost stanovená při zkoušce proctor standard je v některých případech z hlediska reálné hutnicí práce na stavbě příliš vysoká, proto se může interval přípustné vlhkosti přiměřeně upravit.“ [2]

4. Další posouzení se provádí podle účelu použití, a to do násypu nebo do aktivní zóny:
 - a. Pokud se má zemina použít do aktivní zóny, je nutné ji posoudit dle zkoušky únosnosti CBR (Kalifornský poměr únosnosti). Zeminu lze použít i bez úpravy za předpokladu, že hodnota CBR (po sycení vzorku ve vodě po dobu 96 hodin) je rovna minimálně 15 % pro podloží P III, 30 % pro podloží P II a 50 % pro podloží P I. Typy podloží lze určit dle návrhového modulu pružnosti, minimálního modulu přetvárnosti a namrzavosti podloží viz tabulka 2.6.
 - b. Pokud se má zemina použít do násypu, je nutné ji posoudit dle zkoušky IBI (okamžitý index únosnosti), v případě ztužující vrstvy vrstevnatého násypu se provede posouzení dle zkoušky CBR. Zeminu lze použít i bez úpravy za předpokladu, že hodnota IBI je rovna minimálně 10 % pro násyp a 5 % pro podloží násypu. Pokud se má zemina použít do ztužující vrstvy vrstevnatého násypu, musí být hodnota CBR (po sycení vzorku ve vodě po dobu 96 hodin) minimálně 10 %. [2]

K posouzení je také nutné doplnit vhodnost použití zemin ve vzájemném kontaktu vrstev s výrazně odlišnou granulometrií. Použití musí vyhovovat tzv. filtračnímu kritériu, které je stanoveno vztahem:

$$\frac{D_{15} \text{ hrubší zeminy}}{D_{85} \text{ jemnější zeminy}} < 5$$

Jestliže zeminy v kontaktu filtračnímu kritériu nevyhovují, je nutné zrnitost zeminy jedné vrstvy upravit do přijatelných mezí (např. přimísením jemnější frakce do vrstvy kamenité sypaniny) nebo musí být pronikání jemné zeminy zabráněno pomocí separační geotextilie. [2]

Tabulka 2.6 - Typy podloží vozovky [23]

Typ podloží	Návrhový modul pružnosti ¹⁾	Minimální modul přetvárnosti ²⁾	Namrzavost podloží (orientační rozdělení)
P I	120 MPa	90 MPa	nenamrzavé
P II	80 MPa	60 MPa, 45 MPa ³⁾	mírně namrzavé
P III	50 MPa	45 MPa, 30 MPa ³⁾	nebezpečně namrzavé

Vysvětlivky k tabulce 2.6:

- 1) Návrhový modul pružnosti pro výpočet vozovky zastupuje chování podloží pod vozovkou za vlhkosti blízké návrhovému vodnímu režimu při krátkodobém zatížení. Modul přetvárnosti, stanoven dle ČSN 72 1006, charakterizuje chování podloží vozovky pod statickým zatížením po dokončení stavebního díla. Představuje kontrolní zkoušku, která dokumentuje vhodnost použitého materiálu a jeho dostatečné zhutnění při zpracování za optimální vlhkosti. Z tohoto důvodu neexistuje mezi jednotlivými moduly matematický vztah a za stejných podmínek bude modul pružnosti vždy vyšší než modul přetvárnosti, jenž zahrnuje nepružnou složku přetváření.
- 2) Modul přetvárnosti při použití zemin zlepšených vápnem se provádí vždy minimálně po 3 dnech od provedení, při zlepšení cementem vždy minimálně po 7 dnech od provedení. Pokud se požadovaného modulu přetvárnosti dosáhne dříve než po předepsané době, lze brát podmínky jako splněné.
- 3) Platí pro návrhovou úroveň porušení vozovky D1 v případě dopravního zatížení VI a D2. Udávaná hodnota minimálního modulu přetvárnosti 45 MPa u podloží P II platí pro zeminy S (písky) a G (šterky). Tato hodnota neplatí pro zeminy zlepšené. [23]

Pokud zeminy splňují požadavky uvedené ve výše zmíněných podmínkách, lze je použít pro stavbu zemního tělesa bez úpravy. Zeminy, které však podmínky nesplňují, je nutné před použitím do násypu nebo aktivní zóny upravit. Běžně se úprava provádí pomocí pojiva nebo smísením nevhodné zeminy s jinou granulometricky odlišnou zeminou. Mechanická úprava je vhodná pro stejnozrné šterky, písky a zeminy bez velkého podílu plastických příměsí. Výsledkem je zlepšení zpracovatelnosti, snížení vlhkosti, namrzavosti a zvýšení pevnosti. Úprava zemin se provádí dle ČSN EN 14227-15.

Požadavky na únosnost upravených zemin v aktivní zóně lze shrnout přehledně to tabulky 2.7.

Tabulka 2.7 - Požadované hodnoty únosnosti CBR pro upravené zeminy v aktivní zóně [2]

Způsob použití		Požadované hodnoty ^{a)}		
		CBR ^{c)}	Minimální vlhkost směsi	Okamžitý index únosnosti
Aktivní zóna ^{b)}	Podloží P III	CBR ₁₅	W _{0,9}	IBI _{DV}
	Podloží P II	CBR ₃₀	W _{0,9}	IBI _{DV}
	Podloží P I	CBR ₅₀	W _{0,9}	IBI _{DV}
^{a)} Kategorie podle ČSN EN 14227-15 ^{b)} P I, P II, P III jsou typy podloží dle technických podmínek TP 170 ^{c)} Zhotovení a zrání zkušebního tělesa se provádí podle příslušné ČSN EN 14227-15				

Požadavky na únosnost upravených zemin v násypu lze shrnout přehledně to tabulky 2.8.

Tabulka 2.8 - Požadované hodnoty únosnosti CBR, IBI pro upravené zeminy v násypu [2]

Způsob použití	Požadované hodnoty ^{a)}	
	Okamžitý index únosnosti	CBR
Podloží násypu	min. IBI ₁₀	
Každá technologická vrstva násypu	min. IBI ₁₀	-
Ztužující vrstva vrstevnatého násypu z materiálu upraveného pojivy	-	min. CBR ₁₅ ^{b)}
^{a)} Podle ČSN EN 14227-15, stanovené při vlhkosti W _{opt} ^{c)} Zhotovení a zrání zkušebního tělesa se provádí podle příslušné ČSN EN 14227-15		

Pro stavbu zemního tělesa, především horní vrstvu násypu nebo podloží vozovky, je možné použít směsný recyklát se zvýšeným obsahem cihelných částic. Je však nutné dodržet požadavky na zrnitost dle ČSN EN 13 285, kde je specifikován horní a dolní interval přípustné zrnitosti. Tyto intervaly jsou podle evropské normy rozšířeny a posunuty také do oblasti hrubozrnných částic. Obecně je cihelný materiál vhodný k úpravě nevhodných vlastností jemnozrnných zemin v podloží pozemní komunikace. Jeho přítomnost způsobí snížení vlhkosti zeminy v podloží a po promíchání upraví nevhodnou zrnitost použité zeminy do přijatelných mezí. Je však potřeba dbát na množství těchto částic z důvodu vysoké náchylnosti k drčení a namrzavosti, případně odolnosti proti mrazu a vodě, která souvisí s nasákavostí recyklovaného

kameniva. Namrzavost ve stavu přirozené vlhkosti SDO je dobrá, avšak při nasycení vodou, nejhůře s obsahem soli, klesá.[8]

Přibližná návrhová hodnota modulu pružnosti pro štěrkodrt (ŠD_A, ŠD_B) je 400 MPa. Pro nejkvalitněji provedenou nestmelenou podkladní vrstvu, mechanicky zpevněné kamenivo (MZK), je návrhová hodnota modulu pružnosti stanovena na 600 MPa. [24] Porovnání modulů pružnosti přírodního kameniva a recyklovaných materiálů ukázalo možnost využití směsného recyklátu do konstrukčních vrstev pozemních komunikací. Výsledky modulů pružnosti v tabulce 2.5 ukazují, že lze použít recyklované kamenivo do spodních podkladních vrstev, navrhovaných běžně jako mechanicky zpevněná zemina nebo štěrkodrt podle ČSN EN 13285 (NA). Při použití směsného recyklátu do konstrukce vozovky pozemní komunikace je vhodné doplnit funkční zkoušení především ověřením zrnitosti, odolností proti drcení materiálu a odolností proti zmrazování a rozmrazování, případně namrzavostí. [8]

Tabulka 2.9 - Výsledky stanovených modulů pružnosti nestmelených směsí [8]

Modul pružnosti [MPa]	Frakce (0/32) MZK	Frakce (0/22) ŠD	Frakce (0/32) směsný recyklát
$E_r = \frac{\sigma_I}{\varepsilon_I}$	150 - 715	120 - 380	60 - 225
	130 - 670	60 - 270	60 - 230
	120 - 740	115 - 420	80 - 240
Poznámka: hodnoty naměřených modulů pružnosti pro jednotlivé nestmelené směsi jsou uvedeny v intervalu, který závisí především na vlhkosti zkušebních vzorků			

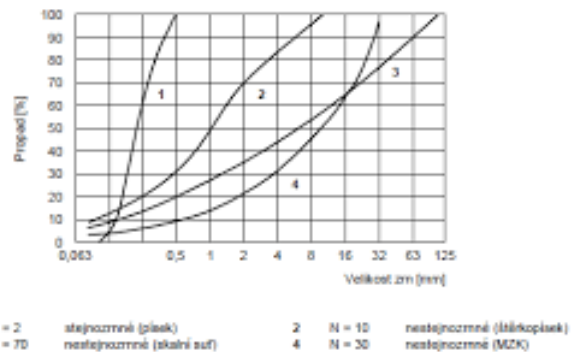
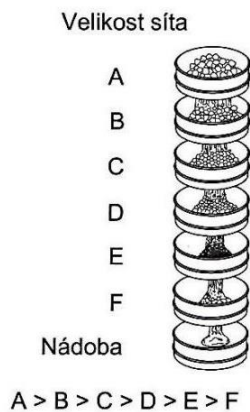
2.4.2 Zkoušky směsných recyklátů

Před použitím směsného recyklátu do konstrukce vozovky je potřeba provést funkční zkoušky, které ověří vhodnost a kvalitu měřeného materiálu. Zkoušky recyklátů se provádí stejně jako u běžně užívaných přírodních materiálů. Níže jsou popsány nejdůležitější zkoušky pro směsný recyklát.

2.4.2.1 Zrnitost – síťový rozbor

Zrnitost kameniva se stanovuje dle normy ČSN EN ISO 17892-4. Zkouška slouží k určení procentuálního zastoupení jednotlivých frakcí v měřené navážce. Pro měření se připraví navážka o hmotnosti cca 2 kg, která se vloží do vody. Poté se síto o velikosti ok 0,063 mm navlhčí vodou a na něj se nasadí ochranné síto o velikosti ok 2 mm. Navážka se sype na horní síto za neustálého

promývání, dokud nepoteče čirá voda. Zůstatek na sítu velikosti 0,063 mm se vysuší při 110 ± 5 °C do ustálené hmotnosti a zváží se. Vysušený materiál se poté přesype na síta, která jsou sestavena do sloupce dle frakce od nejmenší po největší. Po nasypání se horní víko uzavře, přitíží přítlačnou deskou a nechá se mechanicky prosévat. Poté se jednotlivá síta odeberou a stanoví se hmotnost zůstatku navážky na jednotlivých sítích. Na konci se jednotlivé číselné hodnoty vynesou do grafu. [25]



Obrázek 2.7 - Sítový rozbor [26]

Obrázek 2.8 - Křivky zrnitosti [26]

2.4.2.2 Odolnost proti drcení metodou otlukového bubnu (Los Angeles)

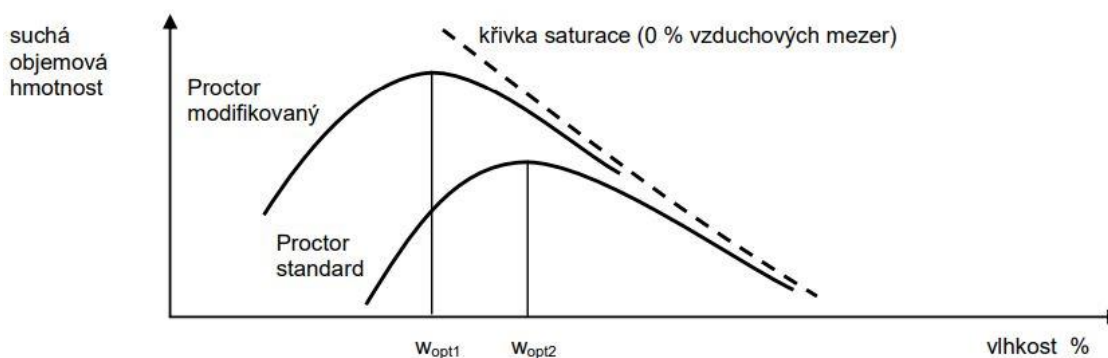
Zkouška stanovuje procentuální propad navážky sítím velikosti 1,6 mm. Měření probíhá v otlukovém bubnu Los Angeles, do kterého se vloží 11 ocelových koulí s průměrem 45 – 49 mm a hmotností 400 – 445 g. Jako navážka se použije 15 kg kameniva frakce 10/14 kde je propad sítím 12,5 mezi 60 – 70 % a sítím 11,2 mezi 30 – 40 %. Po vložení navážky se buben uvede do chodu s rychlostí zhruba 31 – 33 otáček za minutu. Měření končí po 500 otáčkách. Navážka se vyjme z bubnu a stanoví se zbytek na sítu velikosti oka 1,6 mm značený m. Součinitel Los Angeles se zaokrouhlí na celé číslo a stanoví dle vzorce: [27]

$$LA = \frac{5000 - m}{50} [\%]$$

2.4.2.3 Proctorova zkouška

Zkouška slouží ke stanovení zhutnitelnosti zeminy za stavu maximální objemové hmotnosti $\rho_{d \max}$, která se zjistí zhutněním zeminy v normové formě za optimální vlhkosti w_{opt} . Podstatou zkoušky je hutnění materiálu v několika vrstvách, čímž dochází k vyplňování pórů mezi zrný a postupnému zvyšování objemové hmotnosti. Míra zhutnění závisí na množství přidané vody. Ve chvíli, kdy je ve vzorku přebytek vody, dochází k vyplňování pórů vodou a

účinek hutnění tak klesá. Na začátku měření je nutné zvážit samotnou formu s připevněnou základní deskou s přesností na 1 g. Měřená zemina musí být důkladně vysušena a před začátkem měření navlhčena vodou. Při modifikované zkoušce se používá pěch o hmotnosti 4,5 kg, který na směs ve formě dopadá z výšky 457 mm. Směs je hutněna v 5 vrstvách s 56 údery pěchu na každou vrstvu. Poslední hutněná vrstva by neměla přesahovat horní okraj formy o více než 10 mm. Nástavec se sejme a zhutněná zemina se zarovná pravítkem s okrajem formy. Poté se stanoví hmotnost opět s přesností na 1 g. Po zvážení se stanoví vlhkost zeminy. Stejným postupem se změří nejméně další 4 vzorky, aby zkouška byla co nejpřesnější. Výsledek se zaznamená do grafu, kde se na vodorovné ose vyznačí vlhkost a na svislé ose objemová hmotnost zeminy. Přes vynesené body v grafu se proloží křivka, z jejíhož vrcholu lze poté odečíst maximální objemovou hmotnost suché zeminy $\rho_{d \max}$. [28]



Obrázek 2.9 - Výsledný graf Proctorovy zkoušky [26]

2.4.2.4 Kalifornský poměr únosnosti CBR

Kalifornský poměr únosnosti je zkouška určená ke kontrole únosnosti jednotlivých vrstev podloží při výstavbě silnic a je prováděna dle ČSN EN 13286-47. Zkouška je založena na pronikání válcového pístu při dané rychlosti do zkušební tělesa, čímž se zjistí vztah mezi silou a penetrací neboli zatlačením. CBR se vypočte vyjádřením síly působící na píst pro určitou penetraci jako procento standardní síly následujícím vztahem:

$$\text{CBR} = \frac{F}{F_s} \times 100 [\%]$$

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

F_s Standartní síla potřebná k zatlačení do stanovené hloubky dle ČSN EN 13286-47 [kN]

Zkouška CBR se provádí vždy se zatěžovacím prstencem. Zkušební těleso pro zkoušku je připraveno pomocí Proctorovy zkoušky standardní nebo modifikované. Po provedení zkoušky se

vzorky nechávají zrát podle toho, jestli se jedná o vzorek neupravený nebo upravený. Neupravené vzorky se nechají saturovat 4 dny pod vodou, mezitím co upravené vzorky musí před uložením do vody zrát 3 dny na vzduchu. [29]

2.4.2.5 Zkoušení míry namrzavosti – přímá metoda

Zkouška se používá pro měření namrzavosti zemin, recyklovaných materiálů a vedlejších produktů a je prováděna dle ČSN 72 1191. Provádí se na zeminách, jejichž obsah částic menších než 0,125 mm je více než 5 %. Zkouška napodobuje účinky mrazu na podloží vozovky, kde nárůst hodnot zdvihu odpovídá nárůstu tloušťek ledových vrstev. Měření začíná uložením zkušebních buněk do chladicí skříně, kde dochází k ochlazení za stálého přísunu vody zdola po dobu min. 17 hodin. Po této době začíná zmrazování vzorku shora při teplotě $-4 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, které se udržuje po dobu 5 dní neboli 120 hodin. V průběhu zkoušky se zaznamenává zdvih v milimetrech měřený uprostřed zkoušeného vzorku. Míra namrzavosti se vyhodnotí z lineární části závislosti zdvihu na druhé odmocnině indexu mrazu. Výsledkem je hodnota β , která je dána vztahem: [30]

$$\beta = \frac{\Delta h}{\Delta\sqrt{I_m}}$$

Δh naměřený zdvih zkoušeného vzorku v milimetrech odpovídající $\Delta\sqrt{I_m}$

I_m index mrazu v $^\circ\text{C}$

Kritérium míry namrzavosti dle ČSN 72 1191 je uvedeno v níže přiložené tabulce. [30]

Tabulka 2.10 - Kritérium míry namrzavosti [30]

Míra namrzavosti zemin a materiálů	Průměrná hodnota β
Nenamrzavé	< 0,25
Mírně namrzavé a namrzavé	0,25 až 0,50
Nebezpečně namrzavé	> 0,50

2.4.3 Problematické vlastnosti směsných recyklátů

Vzhledem k tomu, že složení směsného stavebního recyklátu není přesně určeno, může se do oběhu dostat velmi různorodých směsí s různými vlastnostmi. Kvalita se liší již podle způsobu získání recyklátu, jeho demolice, skladování a také přepravy. Největší problém způsobují cizorodé částice, které mohou rapidně snížit výslednou kvalitu, a proto je potřeba dbát zejména na část demolice a následného třídění. Podle vlastností se poté směsné recykláty rozdělují do určitých kategorií, které určují jejich vhodnost použití do pozemních komunikací.

2.4.3.1 Obsah škodlivých látek

Problematická vlastnost, týkající se veškerých recyklátů, která rozhoduje o jejich použití do pozemní komunikace. Vhodnost se posuzuje chemickým složením z hlediska obsahu nebezpečných a škodlivých látek, které se mohou uvolňovat do okolí. Obsah těchto látek se stanovuje v sušině a ve výluhu, přičemž limitní hodnoty jsou předepsány vyhláškou 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu. Maximální povolené limity obsahu škodlivých látek jsou také rozděleny podle výsledného použití recyklovaného materiálu. Hodnocení environmentálních vlivů a zkoušek recyklovaného materiálu není v EU sjednoceno. Srovnání legislativních limitů a srovnání České republiky s ostatními státy lze přehledně shrnout do tabulky 2.11, kde je viditelné, že limitní hodnoty jsou diametrálně odlišné. [31]

Tabulka 2.11 - Srovnání legislativních limitů ve stavebních odpadech v zahraničí [31]

	Česká republika	Belgie	Finsko	Dánsko		Rakousko			Švédsko
Sušina				CAT 1	CAT 2 a 3	A+	A	B	
Jednotka	mg/kg								
Kovy									
Arsen	10		50	0-20	>20	20	30	30	10
Chrom	200	1250	400	0-500	>500	40	90	90	40
Kadmium	1	10	10	0-0,5	>20	0,5	1,1	1,1	0,2
Měď		375	400	0-500	>500	30	90	90	40
Nikl	80	250		0-30	>30	30	55	55	35
Olovo	100	1250	300	0-40	>40	30	100	100	20
Rtuť	0,8	5		0-1	>1	0,2	0,7	0,7	0,1
Vanad	180	1250	700	0-500	>500	100	450	450	
Zinek		450	700	0-500	>500	100	450	450	120
Ostatní									
PAU	6		20			4	12	20	
PCB	0,2	0,5	1						

Podle provedených zkoušek bylo zjištěno, že nejrizikovějšími látkami jsou arsen, ropné uhlovodíky C10-C40 a aromatické uhlovodíky (PAU). Zkoušení bylo provedeno na 40 vzorcích, přičemž 15 vzorků betonového recyklátu, 13 vzorků cihelného recyklátu a 12 vzorků zeminy a kameniva. Ze zmíněných 40 vzorků hned 85% nevyhovělo některému ze stanovených

maximálních limitů, čímž se materiál stává nepoužitelný a měl by skončit na skládce. Je proto potřeba limitní hodnoty nastavit tak, aby byly odpovídající hodnotám v našem životním prostředí a pomohlo se tak využívání recyklovaných materiálů. [31]

2.4.3.2 Odolnost proti drcení

Problematická vlastnost týkající se zejména recyklátů, které obsahují vyšší množství cihelných střepů a jemnozrnných částic. Přítomnost těchto materiálů významně ovlivňuje výslednou odolnost proti drcení neboli otluku. Mezitím co u běžně užívaného přírodního kameniva se odolnost proti drcení metodou Los Angeles (LA) pohybuje okolo 40%, výjimečně až 50%, tak u směsných recyklátů se výsledná hodnota posouvá na 60-70%, což nám omezuje použití recyklátu do podkladních vrstev. [8]

2.4.3.3 Odolnost proti mrazu a vodě

Důležitý faktor, který je potřeba zhodnotit především u recyklátů s vysokým obsahem cihelných střepů. Ve stavu přirozené vlhkosti je odolnost recyklátu poměrně dobrá, avšak pokud dojde k nasycení recyklátu vodou s obsahem soli tak dojde k rapidnímu snížení. Vzhledem k problémům a poruchám, které může voda a mráz způsobit, je důležité na zkoušku zmrazování a rozmrazování dbát. Zkoušení je také vhodné doplnit o odolnost proti solím, tzv. zkouška síranem hořečnatým. [8]

2.5 ZAHRANIČNÍ ZKUŠENOSTI

Možnost použití recyklovaného materiálu se v různých státech liší a je proto velmi složité sepsat jednotné podmínky jeho využití či množství produkce. V mnoha státech je stavební a demoliční odpad většinovým odpadním produktem a jeho zastoupení mezi odpady může dosahovat až 70%. Níže jsou uvedeny požadavky na recyklovaný materiál, míra produkce stavebně demoličního odpadu a orientační využití odpadních a recyklovaných materiálů ve vybraných státech.

2.5.1 Dánsko

Roční produkce SDO se v Dánsku pohybuje okolo 5 milionů tun. [32] Cílem bylo dosáhnout 90 % míry recyklace do roku 2004, což se Dánsku bezesbytku povedlo. V dnešní době je míra recyklace téměř 94 % a mezi evropskými státy se řadí ke špičce. Tyto výsledky vychází z přísné kontroly a pravidelných konzultací společnosti Dafoka se zainteresovanými stranami. Pravidelně se za účasti všech firem zapojených do recyklace konají workshopy, konference a semináře, kde jsou vysvětlovány principy a nové poznatky, které jsou uváděny do praxe za

účelem zvýšení efektivnosti recyklace. Důvodem proč se také v Dánsku dbá na recyklaci, je důvod, že za nerecyklovaný odpad se ukládá vysoká daňová sazba. [33]

Recyklovaný materiál dělí v Dánsku do 3 kategorií, z nichž každá má určeny podmínky kdy a v jakých místech může být použita. Složení materiálu se posuzuje z hlediska budoucího umístění vzhledem k pramenům pitné vody, nádrží pitné vody, sladké a mořské vody. Obsah škodlivých látek se zjišťuje pomocí výluhu, který vzniká kontaktem materiálu s roztokem CaCl_2 nebo HNO_3 . Výluh z materiálu v kategorii 1 nesmí překročit stanovené hodnoty předepsaných škodlivých prvků, mezi které patří např. baryum, olovo, kadmium, měď, rtuť, mangan atd. Pokud jsou hodnoty výluhu mírně překročeny, spadají materiály do kategorie 2 a v případě výrazného překročení povolené hranice jsou zařazeny do kategorie 3. Kategorie potřebují navíc schválení k použití, což se však netýká kategorie 1. Materiály kategorie 2 potřebují povolení kromě těch, které obsahují povolené materiály, jako jsou asfalt, drcený beton, popel a létavý popílek nebo popel z WTE. Dále mohou být použity nejméně 20 metrů od zdroje pitné vody a nesmí být použity v nezpevněné vrstvě tloušťky větší než 0,3 metru. Materiály kategorie 3 musí být přezkoumány a podle výsledků se určí jejich možnost využití. [22]

2.5.2 Švédsko

Roční produkce SDO se ve Švédsku pohybuje okolo 10 milionů tun. [32] Míra recyklace SDO ve Švédsku se pohybuje v rozmezí 50 – 60 %, což je vzhledem k objemu značný rozdíl v porovnání s ostatními severskými státy. Vzhledem k tomu, že SDO zabírá ve Švédsku značné množství ze všech odpadů, je hlavním cílem míru recyklace v co nejrychlejším čase zvýšit. Předpokládá se, že míra recyklace by se měla do roku 2020 zvýšit na 70 %. Tato hranice, platná i pro ostatní evropské státy, vešla v platnost v roce 2008 na zasedání evropského parlamentu a je uvedena v rámcové směrnici EU o odpadech. [33]

V roce 2007 byly ve Švédsku vypracovány pokyny pro zdroje a odpady během výstavby, aby se snížil počet skládek. V roce 2013 vyšly nové pokyny, které si na starost vzala švédská stavební federace. Cílem bylo zvýšit efektivnost řízení zdrojů ve stavebním a demoličním průmyslu, aby byly splněny požadavky na životní prostředí. Pokyny obsahují také normativní texty, kterými jsou audit před demolicí, plán nakládání s odpady a také úrovně třídění. [33]

Během snahy zvýšit míru recyklace bylo provedeno také několik studií, které se zabývají tříděním a náklady potřebnými na recyklaci. Bylo potvrzeno, že třídění na stavbě vede k lepší míře recyklace a především ke snížení potřebných nákladů na likvidaci. Výhoda třídění na stavbě byla zjištěna porovnáním různých situací, při kterých byl proveden rozdílný stupeň třídění odpadu. Pozorováním bylo zjištěno, že při 90 % třídění na stavbě jsou náklady téměř poloviční

oproti tomu, pokud třídění na stavbě neprobíhá. [33] Nejčastěji je však recyklovaný materiál v silničním stavitelství využíván jako zásypový materiál nebo jako materiál do podloží vozovky na testovacích úsecích. [34]

2.5.3 Nizozemsko

Roční produkce SDO se v Nizozemsku pohybuje okolo 25 milionů tun. [32] Cílem bylo dosáhnout míry recyklace SDO 90 % do roku 2000, čehož podle ministerstva bydlení, územního plánování a životního prostředí bylo dosaženo již v roce 1999. Pro demoliční procesy je v Nizozemsku vytvořeno certifikační schéma, které je tvořeno čtyřmi kroky:

- **Plán před demolicí** – před demolicí se provede soupis odpadů, který bude vytvořen spolu s možnými riziky při práci a bezpečnostními riziky pro okolí.
- **Plán odpadového hospodářství** – Zhotovitel demolice je povinen vypracovat plán odpadového hospodářství, který popisuje způsob demolice a způsob odstranění vzniklého odpadu
- **Provedení** – odkazuje se na plán odpadového hospodářství a sleduje jeho důsledné dodržování. Zhotovitelé demolice spolupracují s odborníky na ekologickou demolici.
- **Závěrečná zpráva** – po dokončení zhotovitel provede soupis vzniklého odpadu a tato zpráva je poté předána zákazníkovi.

Kromě certifikačního schéma se v Nizozemsku dodržují zásady pro rozdělování materiálu do kategorií dle jeho složení a také na základě emisí. Hodnoty emisí se stanovují na základě množství určitých anorganických složek, které se mohou rozptýlit do půdy a povrchových vod bez působení zátěže. Maximální hodnoty se stanovují z výluhů, pomocí kterých však nelze zjistit množství organických složek. Ty je potřebné zjistit pomocí složení materiálu. Pomocí těchto zkoušek se určí, zda je materiál vhodný pro recyklaci a použití ke stavebním účelům.

Pro rozdělení se používají 2 kategorie. Do 1 kategorie se řadí materiály, které nepřekračují povolené limity a lze je tak použít bez dalších opatření. Materiály kategorie 2 nesplňují limitní hodnoty obsahu anorganických složek a mohou být použity jen v případě, že jsou izolovány a konečné hodnoty nepřekračují limitní hodnoty. Lze najít i materiály, které nelze zařadit ani do jedné z kategorií. Například popel z WTE může překračovat stanovené limitní hodnoty, ale pouze za předpokladu že na stavbě budou použita speciální izolační opatření. [22]

2.5.4 Německo

Německo patří mezi největší producenty SDO v Evropě. Roční produkce se pohybuje okolo 70 milionů tun a tvoří téměř 60 % produkce všech odpadních materiálů. [32] I přesto však Německo dosahuje míry recyklace přibližně 85 %. [33]

Německá směrnice klade důraz především na odlišení materiálu, který bude vystavený statickému zatížení nebo převážně dynamickému zatížení. Pokud bude zatížení statické, stačí posoudit materiál z hlediska vnitřního úhlu tření, soudržnosti a stlačitelnosti. V závislosti na druhu zeminy je možné posuzovat také koeficient propustnosti. Materiál musí mít jednotnou kvalitu a nesmí obsahovat škodlivé látky. Je kladen také důraz na pH zeminy, které musí být v rozmezí pH 4 – 9. Pokud tomu tak není, je materiál podroben doplňujícími zkouškami. Pro převážně dynamicky namáhané zeminy je krom výše uvedených podmínek nutno splnit ještě další kritéria. Jedná se zejména o složení, kdy je předepsáno, že zrna průměru menšího než 0,063 mm mohou mít zastoupení maximálně 7 %, zrna průměru menšího než 100 mm maximálně 25 %. Dále je taky omezena maximální velikost zrna, která je stanovena na 150 mm. [32]

K výše uvedeným podmínkám, je kladen důraz také na ochranu spodních vod, a proto je důležité vyhotovení recyklačních schémat, určení kvality materiálu a jeho emisí nebo vhodného nakládání s materiálem jako je tomu například v Dánsku nebo Nizozemsku. Emise jsou určovány pomocí výluhových testů. Výjimkou oproti ostatním státům je, že nové materiály nemusí být podrobeny zkouškám. Společnost, která se recyklací zabývá, musí mít kompletní dokumentaci, která obsahuje původ odpadu, jeho charakteristiku a průběh zpracování. [22]

2.5.5 Čína

Patří mezi největší producenty SDO na světě, přičemž produkce mezi lety 2003 až 2013 byla 2,36 miliard tun. Z demolice 1 m² budovy vznikne cca 0,5 – 1,0 m³ SDO, z čehož plyne, že demolice 10 000 m² budovy poskytne přibližně 500 – 600 tun SDO. SDO se skládá především z kovu, betonu, malty, cihel, dřeva a plastů. Ve srovnání s ostatními odpady má SDO vysoký potenciál pro následné využití a ekonomickou hodnotu, z čehož může být využito až 80 %. Donedávna byla většina SDO v Číně zlikvidován skládkováním, což mělo za následek, že míra recyklace byla pouhých 9,5 %. [35]

Za účelem zvýšit míru recyklace a povědomí a využitelnosti SDO byl v Číně vybudován silniční projekt, který využívá odpadní materiál v co největší míře. Jedná se o silnici s obousměrným provozem na okraji městské části, která je napojena na rychlostní silnici a dálnici. SDO ze kterého je úsek v areálu skládky vybudován pochází z demoličního místa poblíž

silnice a byl použit v celém úseku jako výplňový materiál do násypu. Z výsledných laboratorních testů a terénních zkoušek bylo zjištěno, že optimální zhutnění bylo nejlepší, když vlhkost SDO byla přibližně 15 %. Na zkoušku pevnosti v tlaku bylo použito 6 vzorků, ze kterých byla zjištěna průměrná pevnost 0,74 MPa a průměrná hodnota CBR byla 34,7 %, což splňovalo místní podmínky pro použití materiálu do podloží vozovky. Dále byla provedena zkouška deformace násypu, kde byl zjištěn modul pružnosti přibližně 163 MPa, což splňuje požadavky a ukazuje tak, že výstavba podloží z SDO je realizovatelná. V této době je úsek v provozu a podrobně se sleduje jeho chování. [35]

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část bakalářské práce se věnuje zkoušení směsného recyklátu a ověření, zda může zastoupit běžně užívané přírodní materiály do podloží vozovky pozemní komunikace, především poté do aktivní zóny. V první řadě se ověřují geometrické vlastnosti kameniva pomocí zkoušky zrnitosti dle ČSN EN ISO 17892-4 a klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva dle ČSN EN 933-11. Dále byly provedeny zkoušky stmelěných a nestmelěných směsí, přičemž byly zkoušeny tři různé vzorky ze směsného recyklátu. První vzorek byl ze směsného recyklátu cihelného typu, druhý vzorek z recyklátu kamenitého (štěrkového) typu a třetí vzorek z recyklátu kamenitého (štěrkového) typu stmelěný 2 % cementu CEM V/A (S-V) 32,5 R. Na těchto vytvořených vzorcích byly provedeny zkoušky pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti pomocí Proctorovy zkoušky dle ČSN EN 13286-2, stanovení kalifornského poměru únosnosti CBR a okamžitého indexu únosnosti IBI dle ČSN EN 13286-47. Po vyhodnocení výsledků byla na jednotlivých vzorcích, vyrobených při optimální vlhkosti, provedena zkouška stanovení míry namrzavosti zemin dle ČSN 72 1191. V neposlední řadě byly zkoušeny mechanické a fyzikální vlastnosti kameniva pomocí zkoušky stanovení odolnosti proti drcení metodou Los Angeles dle ČSN EN 1097-2.

3.1 POUŽITÉ MATERIÁLY

Pro zkoušení byly zvoleny dva směsné recykláty frakce 0/32 a jeden směsný recyklát frakce 32/63, získané z recyklační linky DUFONEV R. C., a. s. v Brně. Recykláty frakce 0/32 byly odlišné svým složením, přičemž jeden typ byl převážně cihelný a druhý kamenitý. Recyklát frakce 32/63 byl použit pouze pro zkoušku síťového rozboru pro zjištění, jak pečlivě byl na recyklační lince roztříděn a určení jeho namrzavosti nepřímou metodou dle Scheibleho kritéria.

3.2 ZKOUŠKY

3.2.1 Stanovení zrnitosti

Zkoušení bylo prováděno podle platné normy ČSN EN ISO 17892-4 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Stanovení zrnitosti. Podstatou této zkoušky je prosévání materiálu za účelem zjištění zastoupení jednotlivých frakcí.

Na začátku byly odebrány od každého recyklátu dílčí vzorky o hmotnosti předepsané normou a zjistila se sušením do ustálené hmotnosti jejich vlhkost. Pro stanovení zrnitosti byla sestavena sada 9 sít od velikosti 0,063 mm po 16 mm. Následovalo promývání přes sadu sít, aby

mohlo být stanoveno množství částic menších než 0,063 mm. Promývání materiálu bylo ukončeno, jakmile protékala spodním sítím čirá voda. Po promývání následovalo sušení materiálu do ustálené hmotnosti při teplotě 70 ± 5 °C. Jakmile byl materiál vysušený, přešlo se k mechanickému prosévání materiálu, které bylo doplněno ručním proséváním z důvodu snížení možné chyby výsledku. Po dokončení se zvážily jednotlivé zůstatky na sítích, a následně byl stanoven procentuální podíl jednotlivých frakcí, a vyhodnocena křivka zrnitosti.



Obrázek 3.1 - Sada zkušebních sít



Obrázek 3.2 - Horkovzdušná sušárna

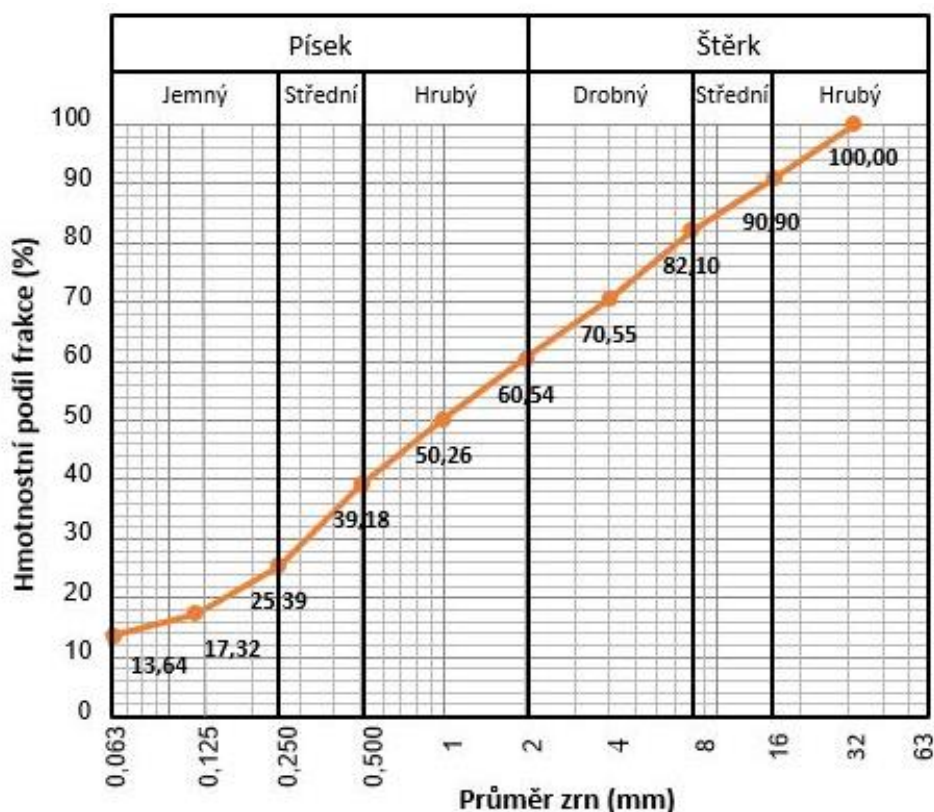


Obrázek 3.3 - Směsný recyklát kamenitý



Obrázek 3.4 - Směsný recyklát cihelný

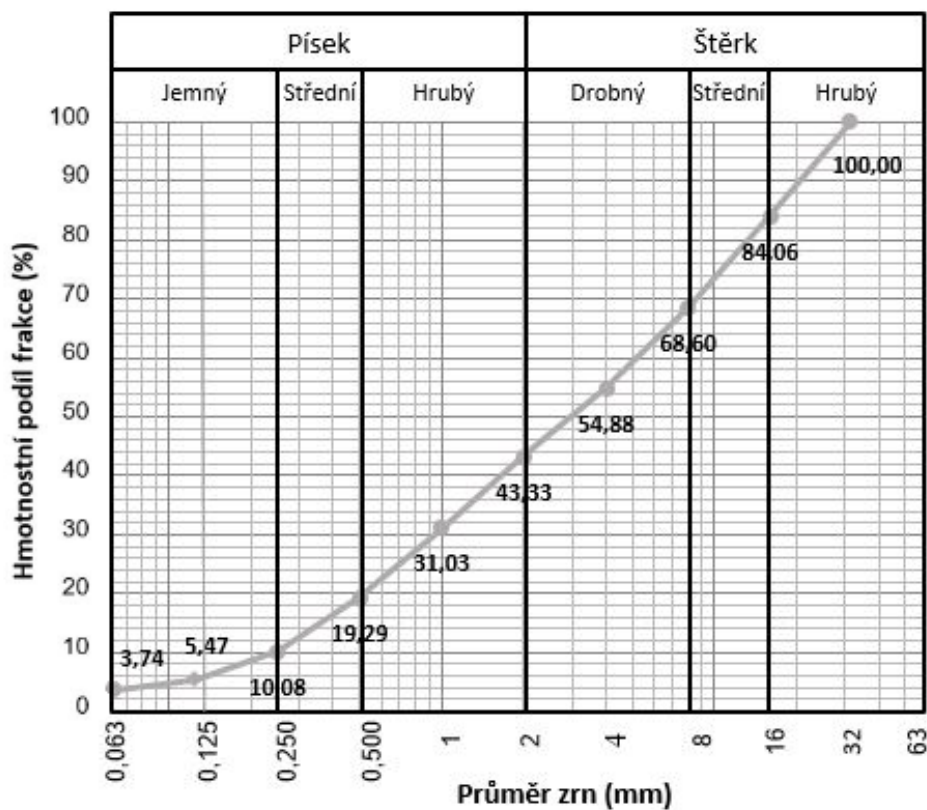
Vyhodnocení zkoušky



Graf 3.1 - Křivka zrnitosti směsného recyklátu cihelného, frakce 0/32

Tabulka 3.1 - Tabulka zrnitosti směsného recyklátu cihelného, frakce 0/32

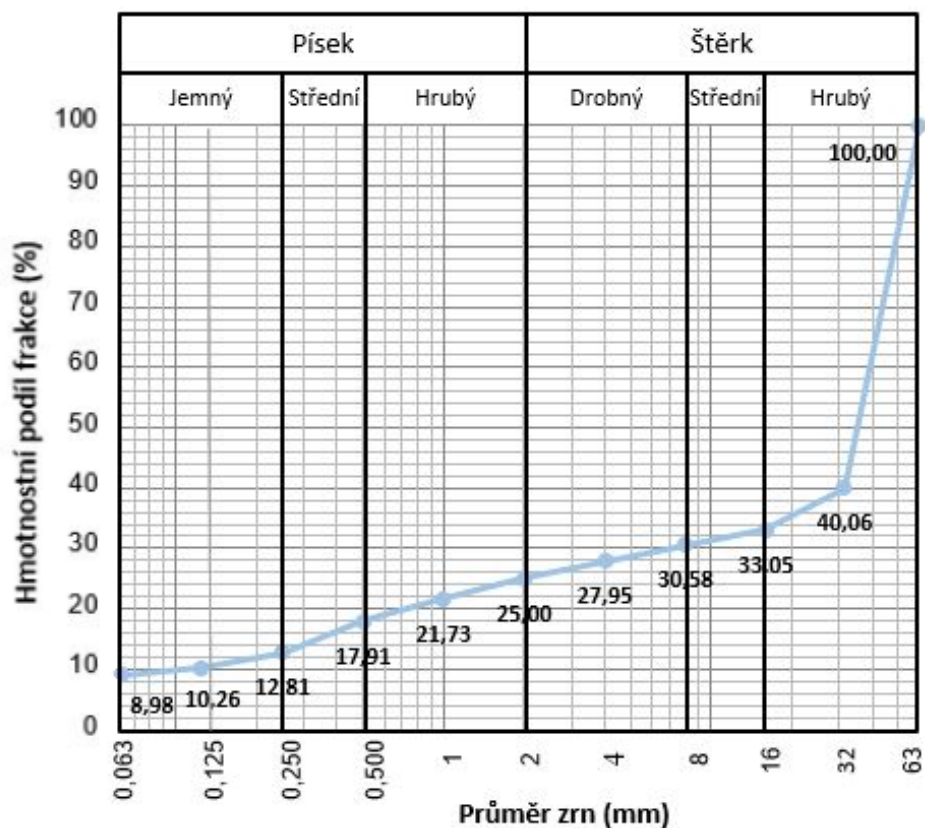
Hmotnost zkušební navážky M = 464,8g				
Rozměry ok normového síta [mm]	Hmotnost dílčího zbytku na síti [g]	Zastoupení frakce na síti [%]	Celkové zastoupení frakce na síti [%]	Celkový propad sítem [%]
31,5	0,0	0,00	0,00	100,00
16	42,3	9,10	9,10	90,90
8	40,9	8,80	17,90	82,10
4	53,7	11,55	29,45	70,55
2	46,5	10,00	39,46	60,54
1	47,8	10,28	49,74	50,26
0,5	51,5	11,08	60,82	39,18
0,25	64,1	13,79	74,61	25,39
0,125	37,5	8,07	82,68	17,32
0,063	17,1	3,68	86,36	13,64
Dno	63,4	13,64	100,00	0,00
Suma	464,8	100,00	-	-



Graf 3.2 - Křivka zrnitosti směsného recyklátu kamenitého, frakce 0/32

Tabulka 3.2 - Tabulka zrnitosti směsného recyklátu kamenitého, frakce 0/32

Hmotnost zkušební navážky M = 481,2g				
Rozměry ok normového síta [mm]	Hmotnost dílčího zbytku na síti [g]	Zastoupení frakce na síti [%]	Celkové zastoupení frakce na síti [%]	Celkový propad sítem [%]
31,5	0,0	0,00	0,00	100,00
16	76,7	15,94	15,94	84,06
8	74,4	15,46	31,40	68,60
4	66,0	13,72	45,12	54,88
2	55,6	11,55	56,67	43,33
1	59,2	12,30	68,97	31,03
0,5	56,5	11,74	80,71	19,29
0,25	44,3	9,21	89,92	10,08
0,125	22,2	4,61	94,53	5,47
0,063	8,3	1,72	96,26	3,74
Dno	18,0	3,74	100,00	0,00
Suma	481,2	100,00	-	-



Graf 3.3 - Křivka zrnitosti směsného recyklátu, frakce 32/63

Tabulka 3.3 - Tabulka zrnitosti směsného recyklátu, frakce 32/63

Hmotnost zkušební navážky M = 1254,8g				
Rozměry ok normového síta [mm]	Hmotnost dílčího zbytku na síti [g]	Zastoupení frakce na síti [%]	Celkové zastoupení frakce na síti [%]	Celkový propad sítem [%]
63	0,0	0,00	0,00	100,00
31,5	752,1	59,94	59,94	40,06
16	88,0	7,01	66,95	33,05
8	31,0	2,47	69,42	30,58
4	33,0	2,63	72,05	27,95
2	37,0	2,95	75,00	25,00
1	41,0	3,27	78,27	21,73
0,5	48,0	3,83	82,09	17,91
0,25	64,0	5,10	87,19	12,81
0,125	32,0	2,55	89,74	10,26
0,063	16,0	1,28	91,02	8,98
Dno	112,7	8,98	100,00	0,00
Suma	1254,8	100,00	-	-

3.2.2 Stanovení podílu plovoucích částic

Zkoušení bylo prováděno podle platné normy ČSN EN 933-11 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniva. Podstatou zkoušky bylo stanovit podíl plovoucích částic z recyklovaného kameniva. [36]

Na začátku byly připraveny od každého směsného recyklátu frakce 0/32 zkušební navážky. Zkušební navážka byla ponořena do nádoby naplněné vodou a důkladně rozmíchána. Po přibližně 20 minutách došlo k omytí kameniva, které se usadilo u dna nádoby, a na povrchu zůstaly plovoucí částice, které se sesbíraly do síta. Plovoucí částice byly osušeny a předělány do odměrného válce, který byl naplněn známým objemem vody. Pomocí pístu byly ponořeny všechny částice a po jeho vynoření bylo změřeno na odměrném válci zvýšení objemu V_{FL} v cm^3 . Výsledek podílu plovoucích částic byl poté zaznamenán jako objem hmotnosti v cm^3/kg .



Obrázek 3.5 - Ponořená zkušební navážka



Obrázek 3.6 - Vybrané plovoucí částice



Obrázek 3.7 - Plovoucí částice v odměrném válci

Vyhodnocení zkoušky

M_1 ... Hmotnost zkušební navážky [g]

V_{FL} ... Objem plovoucích částic [cm^3]

FL ... Podíl plovoucích částic [cm^3/kg]

V ... objem vody v odměrném válci [cm^3]

V_{celkem} ... objem vody v odměrném válci + objem plovoucích částic [cm^3] [36]

$$FL = \frac{1000 \times V_{FL}}{M_1} \text{ [cm}^3/\text{kg]}$$

Tabulka 3.4 - Podíl plovoucích částic

Typ recyklátu	Směsný recyklát cihelný 0/32	Směsný recyklát kamenitý 0/32
Hmotnost zkušební navážky M_1 [g]	4019	4092
Objem vody v odměrném válci V [cm^3]	500	500
Objem vody + objem plovoucích částic V_{celkem} [cm^3]	520	510
Objem plovoucích částic V_{FL} [cm^3]	20	10
Podíl plovoucích částic FL [cm^3/kg]	4,976	2,444

3.2.3 Proctorova zkouška

Zkoušení bylo prováděno podle platné normy ČSN EN 13286-2 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška. Podstatou této zkoušky je stanovení optimální vlhkosti zkoušeného materiálu při současném dosažení jeho maximální objemové hmotnosti suché směsi.

Měření bylo provedeno Proctorovou modifikovanou zkouškou v 5 vrstvách s hutnicím pěchem typu B o hmotnosti 4,5 kg dopadajícím z výšky 457 mm a s Proctorovou formou typu A o průměru formy 100 mm a výšky 120 mm. Pro ověření vlastností byly zkoušeny tři druhy směsí:

- Směsný recyklát cihelný
- Směsný recyklát kamenitý
- Směsný recyklát kamenitý s 2 % cementu

Od každého druhu materiálu bylo přichystáno 5 vzorků o hmotnosti 2500 g, z nichž se do každého přidalo jiné množství vody. Vzhledem k charakteru materiálu a vlhkosti na začátku zkoušení byla zvolena vlhkost od 2 % do 10 % hmotnosti vzorku. Vlhkost je nutné zvolit tak, aby na každé straně křivky zhutnitelnosti ležely nejméně dvě hodnoty od optimální vlhkosti, při které je dosaženo maximální objemové hmotnosti suché směsi. V případě zkoušeného materiálu s cementem je nutné příměs cementu přidat ještě před přidáním vody a materiál důkladně promíchat. Po přípravě vzorků je důležité zvážit sestavenou formu připevněnou na základní desku s přesností na 1 g. Po sestavení byl změřen vnitřní rozměr formy pro stanovení objemu, který poté vstupuje do výpočtu. Na formu byl osazen nástavec a takto hotová sestava byla umístěna do hutnicího zařízení. Poté byla přidána první vrstva navlhčené směsi v takovém množství, aby po zhutnění byla naplněna přibližně pětina formy. Každá vrstva byla hutněna 25 údery, které byly rozmístěny rovnoměrně po obvodu celé formy. Tento postup byl opakován ještě čtyřikrát, aby bylo dosaženo 5 zhutněných vrstev a forma tak byla naplněna po horní okraj. Je důležité klást pozornost na rovnoměrnost jednotlivých vrstev, aby nedošlo k přeplnění formy a následného odstranění velkého množství směsi. Směs by neměla přesahovat horní okraj formy o více než 10 mm. Po odstranění nástavce byla zemina zarovnána ocelovým pravítkem a vypadnutá místa nahrazena jemnozrnnou zeminou, která byla zahlazena. Takto připravená forma se vzorkem byla zvážena s přesností na 1 g. Poté byl vzorek z formy vyjmut a odebrán vzorek na změření přesné vlhkosti materiálu. Tento postup byl opakován pro další čtyři vzorky a výsledné hodnoty poté vyneseny do grafu, proloženy křivkou a byla vyhodnocena maximální vlhkost s příslušnou maximální objemovou hmotností.



Obrázek 3.8 – Sestava moždíře s nástavcem



Obrázek 3.9 - Hutnicí zařízení Proctor



Obrázek 3.10 - Připravené směsi s různou vlhkostí



Obrázek 3.11 - Detail rozebrané formy se zhutněným vzorkem



Obrázek 3.12 - Zhutněný vzorek – pohled z vrchu



Obrázek 3.13 - Váženky s odebranou zemínou na měření vlhkosti

Vyhodnocení zkoušky

Objem moždíře typu A: $V = 942 \text{ cm}^3$

Hmotnost moždíře se základní deskou: $m_1 = 6389 \text{ g}$

Objemová hmotnost zhutněné vlhké směsi

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \times 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

V ... Objem moždíře [cm^3]

m_1 ... hmotnost moždíře se základní deskou [g]

m_2 ... hmotnost moždíře se základní deskou a zeminou [g]

Vlhkost směsi

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

m_w ... hmotnost vlhkého vzorku [g]

m_d ... hmotnost suchého vzorku [g]

Objemová hmotnost zhutněné suché směsi

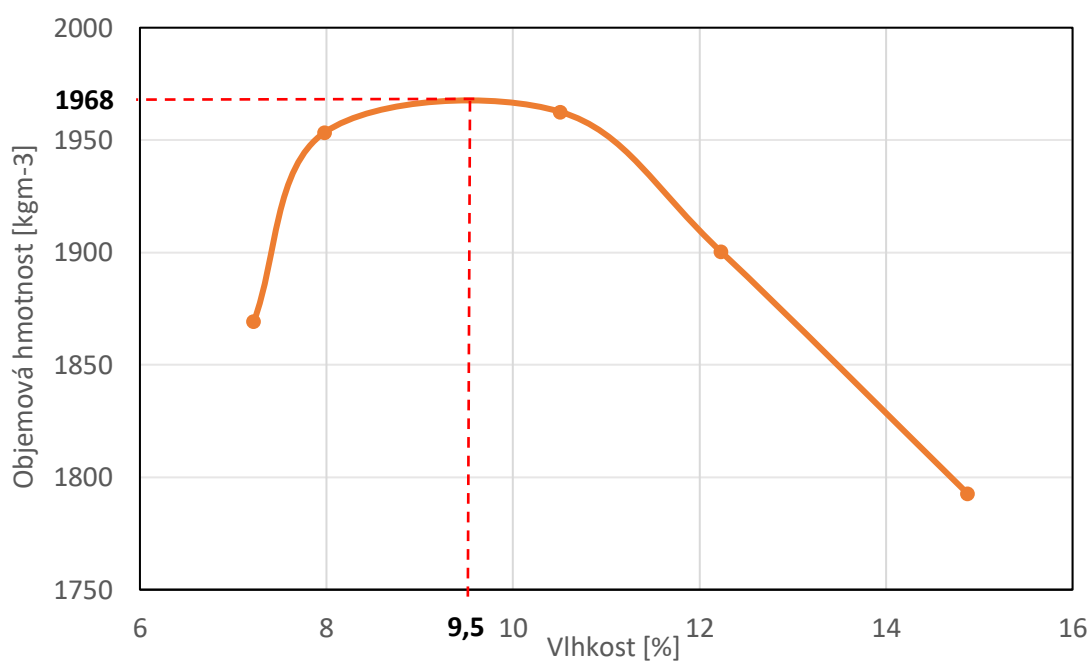
$$\rho_d = \frac{(100 \times \rho)}{(100 + w)} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

P ... objemová hmotnost zhutněné vlhké směsi [kg/m^3]

W ... vlhkost směsi [%]

Tabulka 3.5 - Vyhodnocení výsledků - směsný recyklát cihelný

Směsný recyklát 0/32 - cihelný						
Hmotnost zeminy v moždíři	Hmotnost váženky	Hmotnost vlhké zeminy	Hmotnost suché zeminy	Vlhkost	Objemová hmotnost vlhké zeminy	Objemová hmotnost suché zeminy
[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[kgm ⁻³]	[kgm ⁻³]
1888	29	98,0	91,4	7,22	2004	1869
1987	28	92,0	85,2	7,98	2109	1953
2043	29	102,0	92,3	10,51	2169	1963
2009	29	100,0	89,1	12,23	2133	1900
1940	29	95,0	82,7	14,87	2059	1793



Graf 3.4 - Proctorova křivka - směsný recyklát cihelný

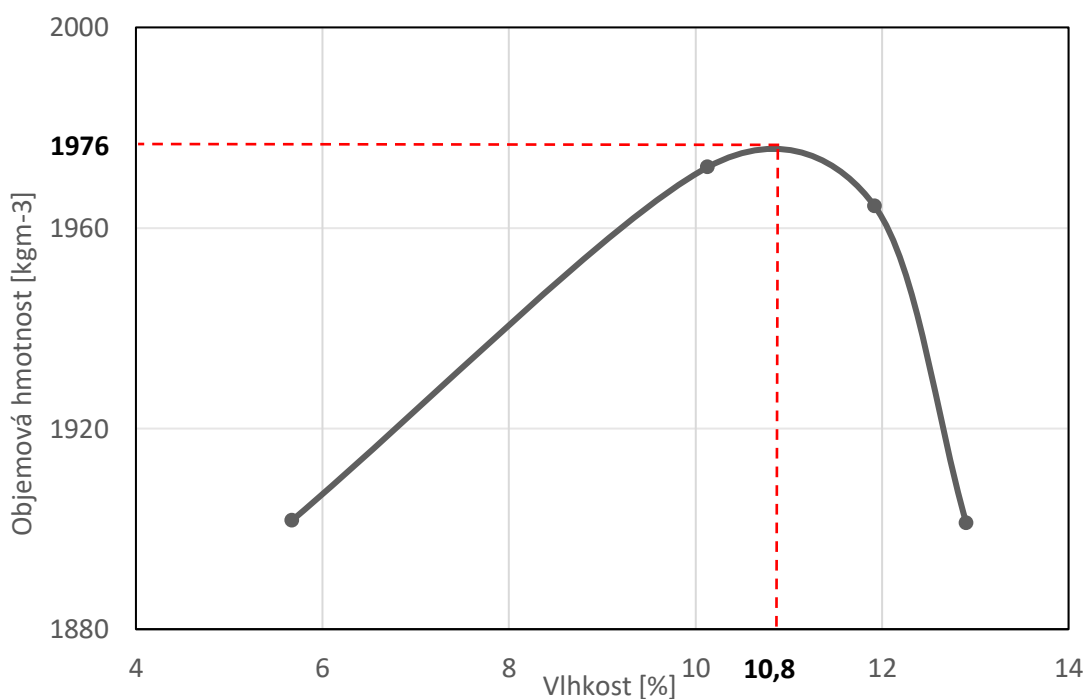
Maximální objemová hmotnost směsného cihelného recyklátu $\rho_{d,max} = 1968 \text{ kg/m}^3$

Optimální vlhkost směsného cihelného recyklátu $w_{opt} = 9,5 \%$

Tabulka 3.6 - Vyhodnocení výsledků - směsný recyklát kamenitý

Směsný recyklát 0/32 - kamenitý						
Hmotnost zeminy v moždíři	Hmotnost váženky	Hmotnost vlhké zeminy	Hmotnost suché zeminy	Vlhkost	Objemová hmotnost vlhké zeminy	Objemová hmotnost suché zeminy
[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[kgm ⁻³]	[kgm ⁻³]
1893	29	95,0	89,9	5,67	2010	1902
2046	29	100,0	90,8	10,13	2172	1972
2071	29	92,0	82,2	11,92	2199	1964
2022	29	98,0	86,8	12,90	2146	1901
1996	30	95,0	85,0	11,76	2119	1896

Poznámka: poslední měření bylo vynecháno z důvodu špatného výsledku. Problém mohl nastat při hutnění, když směs byla příliš vlhká nebo při odběru vzorku k sušení, kdy mohl být odebrán nevhodný vzorek zeminy.



Graf 3.5 - Proctorova křivka - směsný recyklát kamenitý (šterkovitý)

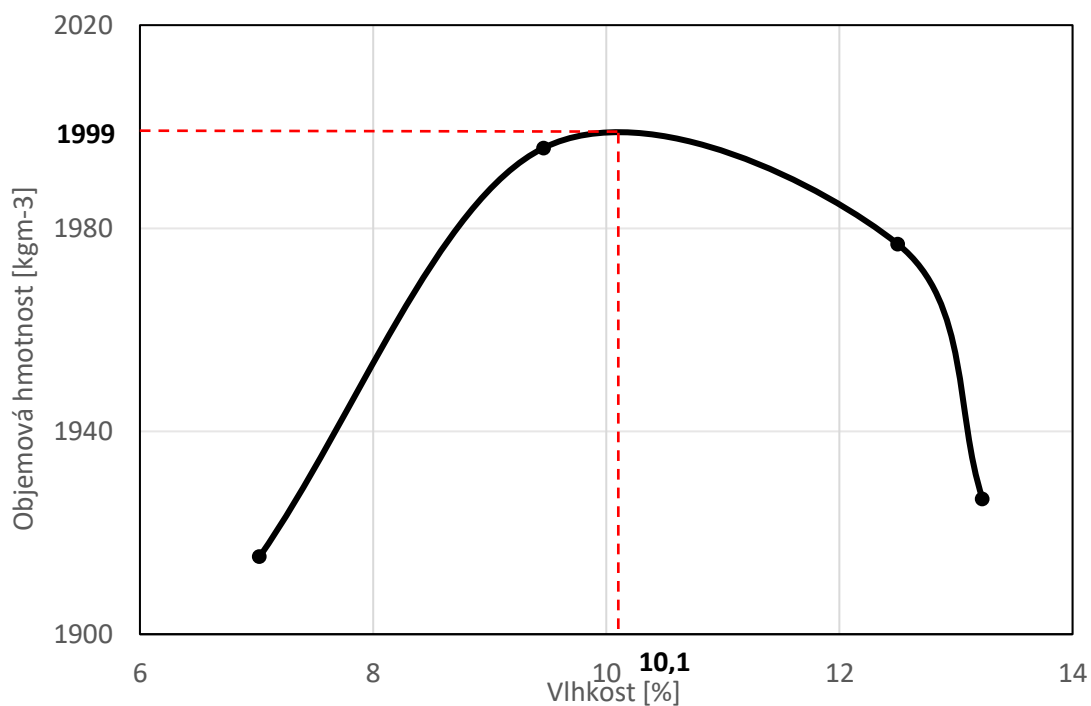
Maximální objemová hmotnost směsného kamenitého recyklátu $\rho_{d,max} = 1976 \text{ kg/m}^3$

Optimální vlhkost směsného kamenitého recyklátu $w_{opt} = 10,8 \%$

Tabulka 3.7 - Vyhodnocení výsledků - směsný recyklát kamenitý s cementem

Směsný recyklát 0/32 - kamenitý s CEM						
Hmotnost zeminy v moždíři	Hmotnost váženky	Hmotnost vlhké zeminy	Hmotnost suché zeminy	Vlhkost	Objemová hmotnost vlhké zeminy	Objemová hmotnost suché zeminy
[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[kgm ⁻³]	[kgm ⁻³]
1931	29	99,0	92,5	7,03	2050	1915
2058	29	96,0	87,7	9,46	2185	1996
2095	29	99,0	88,0	12,50	2224	1977
2066	29	95,0	86,2	10,21	2193	1990
2055	28	101,0	89,2	13,23	2182	1927

Poznámka: předposlední měření bylo vynecháno z důvodu špatného výsledku. Problém mohl nastat při odběru vzorku k sušení, kdy mohl být odebrán nevhodný vzorek zeminy.



Graf 3.6 - Proctorova křivka - směsný recyklát kamenitý s cementem

Maximální objemová hmotnost směsného kamenitého recyklátu s cementem $\rho_{d,max} = 1999 \text{ kg/m}^3$

Optimální vlhkost směsného kamenitého recyklátu s cementem $w_{opt} = 10,1 \%$

3.2.4 Zkouška IBI a CBR

Zkoušení bylo prováděno podle platné normy ČSN EN 13286-47 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání. Podstatou této zkoušky je zatlačování válcového pístu při určité rychlosti do zkušební vzorku, provedeného Proctorovou metodou při optimální vlhkosti, přičemž se zaznamenávají hodnoty síly při dané penetraci.

Na začátku byl do váženky odebrán od každého materiálu vzorek pro změření jeho vlhkosti. V průběhu sušení bylo od každého materiálu připraveno 6000 g na vyhotovení zkušebních vzorků. Po vysušení materiálu ve váženkách byla stanovena vlhkost materiálu a množství vody, které je nutné přidat, aby vznikly směsi s optimální vlhkostí. Následně byl z každé směsi připraven zkušební vzorek, který byl vyhotoven hutněním dle ČSN EN 13286-2. Na hutnění byla použita Proctorova forma typu B, jejíž průměr je 150 mm a výška 120 mm a hutnicí pěch typu B o hmotnosti 4,5 kg, který dopadal do formy z výšky 457 mm. Hutnění probíhalo v 5 vrstvách po 56 úderech, dohromady tedy 280 úderů na jeden vzorek. Po dokončení hutnění byl sejmut z formy nástavec a povrch zarovnan ocelovým pravítkem. Vypadnutá zrna byla nahrazena jemnozrnnou zeminou a důkladně zahlazena. Takto připravené válcové zkušební vzorky v ocelových formách byly připraveny na zkoušení. Vzorek byl vložen do zatěžovacího zařízení a nastaven tak aby válcový píst byl přibližně uprostřed vzorku. Poté byl válcový píst o průměru $50 \pm 0,5$ mm zatlačován rychlostí $1,27 \pm 0,20$ mm/min. do vloženého vzorku. Během měření byly zaznamenávány hodnoty síly při dané penetraci, které na konci měření slouží pro vyhodnocení zkoušky IBI. Po dokončení měření byl každý vzorek odejmut ze základní desky a otočen tak, aby již zkoušená strana byla dole. Následně byly vzorky vloženy do nádoby s vodou, kde byly nechány 4 dny / 96 hodin k saturaci. Vzorek vyhotovený ze směsného kamenitého recyklátu s cementem byl ještě před saturací umístěn na 3 dny / 72 hodin na místo, kde je bráněno odpařování a případné ztrátě hmotnosti vysušením. Po dokončení saturace a zrání byly vzorky připraveny na zkoušku CBR. Před započítáním zkoušky je nutné vzorky vytáhnout z vody a nechat 15 ± 1 minuta okapat. Poté byly jednotlivé vzorky opět vloženy do zatěžovacího zařízení. Rozdíl oproti zkoušce IBI je pouze v přidání závaží na zkoušený vzorek, které simuluje účinek přitížení nadložními vrstvami. Dále je postup zatěžování stejný jako při zkoušce IBI.

Výsledkem bylo vynesení hodnot sil na osu Y a příslušné penetrace na osu X. Těmito body se proložila křivka a provedla případná korekce dle platné normy ČSN EN 13286-47. Z grafu poté byly odečteny hodnoty síly při penetraci v 2,5 a 5,0 mm a provedeno porovnání vzhledem ke standartní síle, kde výsledek je uveden jako její procento.



Obrázek 3.14 - Proctorova forma typu B



Obrázek 3.15 - Zkouška IBI



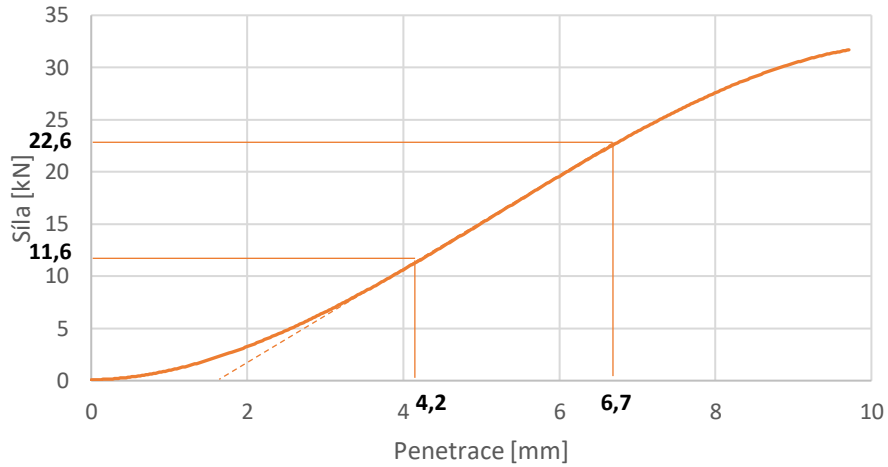
Obrázek 3.16 - Zkušební vzorek po saturaci



Obrázek 3.17 - Zkouška CBR

Vyhodnocení zkoušky

IBI - RSM cihelný

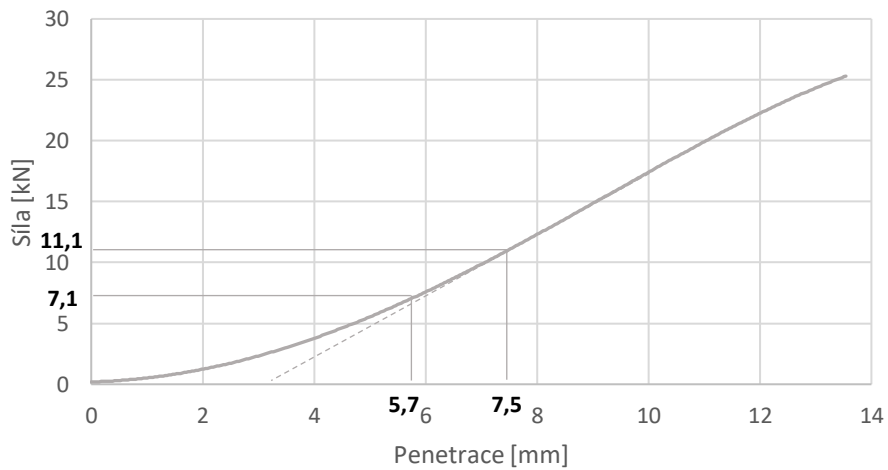


Graf 3.7 - Křivka IBI - směsný recyklát cihelný

Tabulka 3.8 - Výsledky IBI - směsný recyklát cihelný

Penetrace [mm]	Síla [kN]	Standardní síla [kN]	IBI [%]
2,5	11,6	13,2	88%
5	22,6	20	113%

IBI - RSM kamenitý

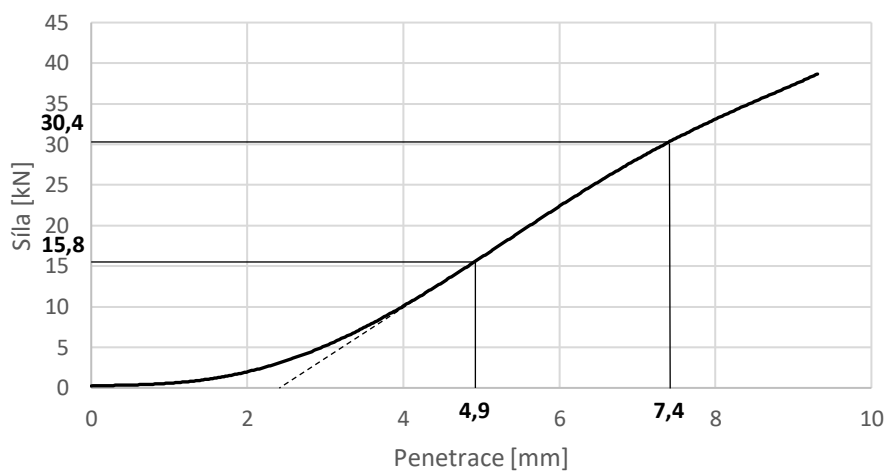


Graf 3.8 - Křivka IBI - směsný recyklát kamenitý

Tabulka 3.9 - Výsledky IBI - směsný recyklát kamenitý

Penetrace [mm]	Síla [kN]	Standardní síla [kN]	IBI [%]
2,5	7,1	13,2	54%
5	11,1	20	56%

IBI - RSM kamenitý s CEM

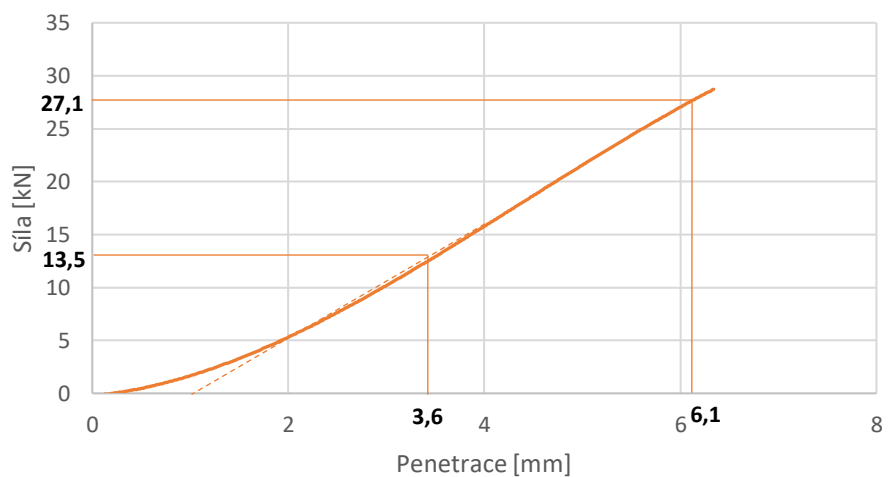


Graf 3.9 - Křivka IBI - směsný recyklát kamenitý s cementem

Tabulka 3.10 - Výsledky IBI - směsný recyklát kamenitý s cementem

Penetrace [mm]	Síla [kN]	Standardní síla [kN]	IBI [%]
2,5	15,8	13,2	120%
5	30,4	20	152%

CBR - RSM cihelný

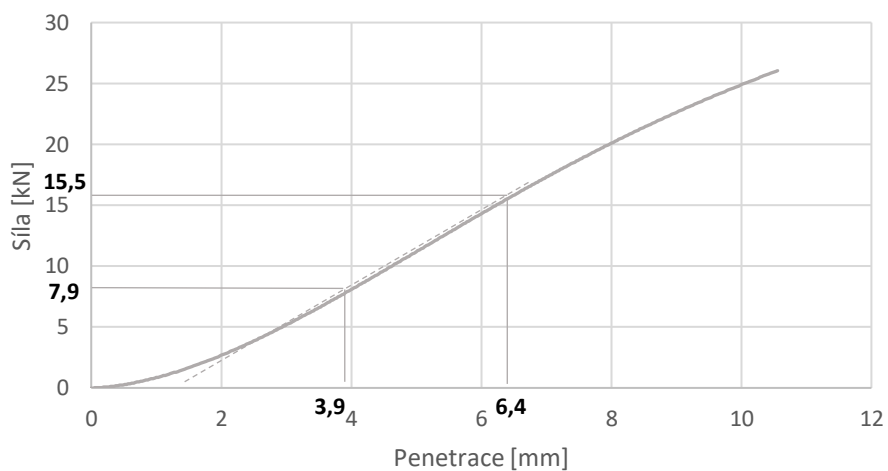


Graf 3.10 - Křivka CBR - směsný recyklát cihelný

Tabulka 3.11 - Výsledky CBR - směsný recyklát cihelný

Penetrace [mm]	Síla [kN]	Standardní síla [kN]	CBR [%]
2,5	13,5	13,2	102%
5	27,1	20	136%

CBR - RSM kamenitý

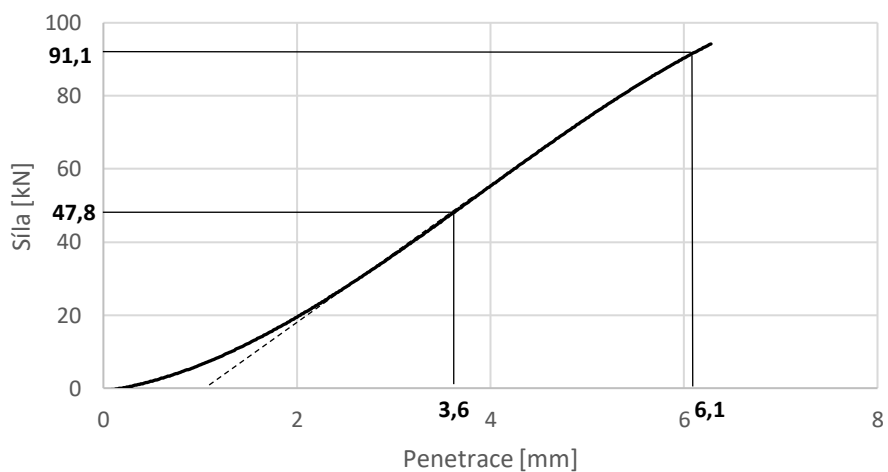


Graf 3.11 - Křivka CBR - směsný recyklát kamenitý

Tabulka 3.12 - Výsledky CBR - směsný recyklát kamenitý

Penetrace [mm]	Síla [kN]	Standardní síla [kN]	CBR [%]
2,5	7,9	13,2	60%
5	15,5	20	78%

CBR - kamenitý s CEM



Graf 3.12 - Křivka CBR - směsný recyklát kamenitý s cementem

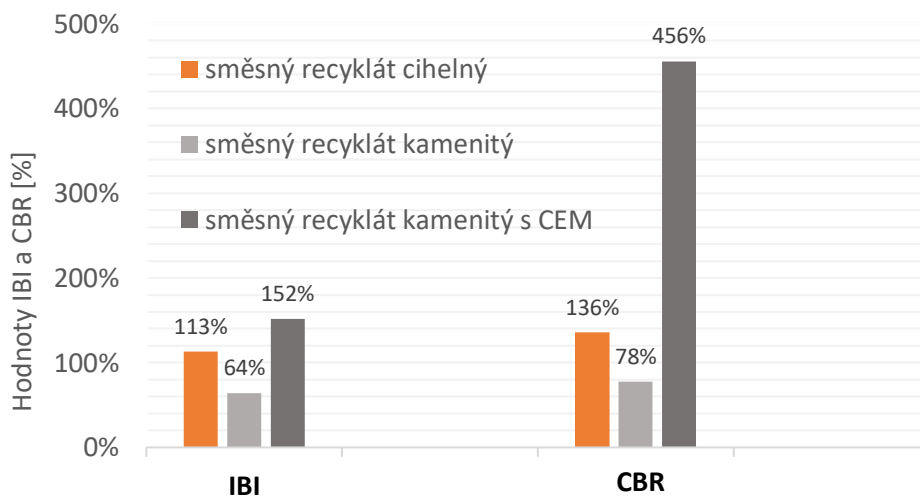
Tabulka 3.13 - Výsledky CBR - směsný recyklát kamenitý s cementem

Penetrace [mm]	Síla [kN]	Standardní síla [kN]	CBR [%]
2,5	47,8	13,2	362%
5	91,1	20	456%

Celkové shrnutí výsledků

Tabulka 3.14 - Celkové shrnutí výsledků

Recyklát	Penetrace [mm]	Standardní síla [kN]	IBI		CBR	
			Síla [kN]	IBI [%]	Síla [kN]	CBR [%]
Cihelný	2,5	13,2	11,6	88%	13,5	102%
	5,0	20,0	22,6	113%	27,1	136%
Kamenitý	2,5	13,2	7,1	54%	7,9	60%
	5,0	20,0	12,8	64%	15,5	78%
Kamenitý s CEM	2,5	13,2	15,8	120%	47,8	362%
	5,0	20,0	30,4	152%	91,1	456%



Graf 3.13 - Výsledný graf s hodnotami IBI a CBR

3.2.5 Míra namrzavosti zemin

Zkoušení bylo prováděno podle platné normy ČSN 72 1191 Zkoušení míry namrzavosti zemin. Jedná se o přímou metodu, jejíž podstatou je napodobit účinky mrazu na saturované podloží vozovky, kdy jsou vzorky syceny vodou a dochází k postupnému mrazovému zdvihu způsobenému vytvářením ledových vrstviček. Přímé měření je doplněno o nepřímou metodu, která je uvedena v normě ČSN 73 6133 Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací. Namrzavost se podle ní určuje tzv. Scheibleho kritériem.

Zkoušení začalo přípravou zkušebních vzorků, s optimální vlhkostí, hutněním do Proctorovy formy typu A dle normy ČSN EN 13286-2. K měření byly použity celkem čtyři vzorky, z nichž dva byly ze směsného recyklátu cihelného a dva ze směsného recyklátu kamenitého. Na přípravu byla použita Proctorova modifikovaná metoda, tedy příprava vzorku hutněním v 5 vrstvách. Po dokončení hutnění byl sejmут nástavec, povrch upraven ocelovým hladítkem a takto připravený vzorek byl opatrně vyjmut z moždíře, aby nedošlo k jeho poškození. Připravené vzorky byly postupně vloženy do mrazicí skříně a opatřeny zkušebními buňkami. Na tyto buňky byla osazena mrazicí deska, závaží a zařízení, které snímalo mrazový zdvih. Jakmile byly všechny vzorky připraveny, mohl začít zkušební proces. Prvních nejméně 17 hodin byly vzorky saturovány a ochlazovány při teplotě 4 – 8 °C za neustálého nasávání vody zdola. V této době nebyla mrazicí deska aktivní. Po uplynutí minimálně 17 hodin byla zapnuta mrazicí deska a začalo zmrazování při teplotě -4 ± 1 °C po dobu 120 hodin. Po celý průběh byly snímány časové průběhy zdvihu v milimetrech. Měření zdvihu probíhalo ve středu horní plochy vzorku, automatickým zaznamenáváním do počítače.



Obrázek 3.18 - Vzorky z RSM cihelného

Obrázek 3.19 - Vzorky z RSM kamenitého



Obrázek 3.20 - Chladicí skříň

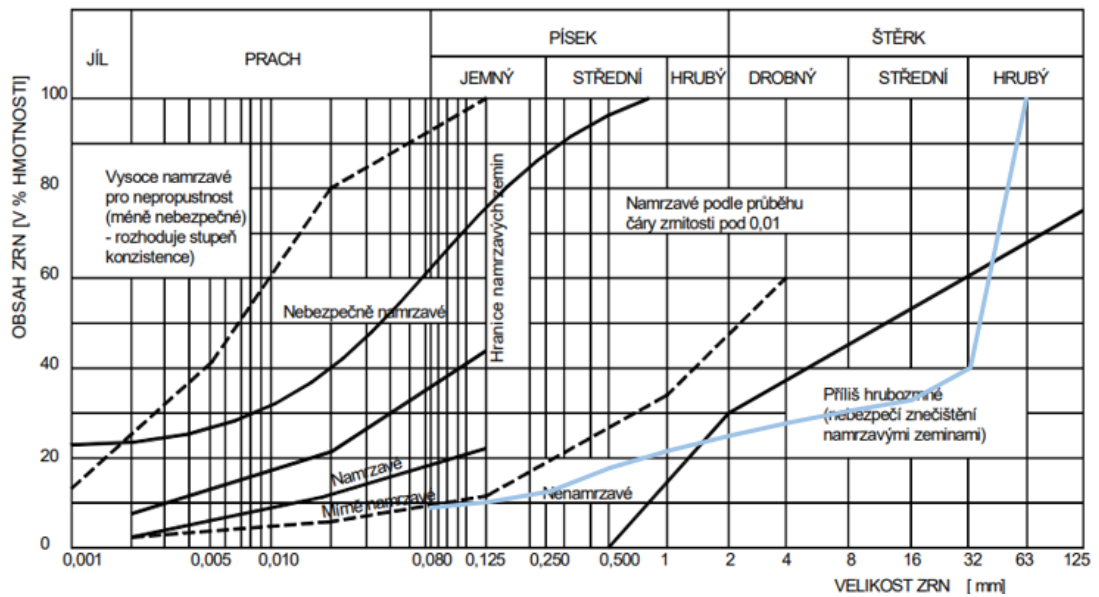


Obrázek 3.22 - Vzorek z RSM cihelného po zkoušce

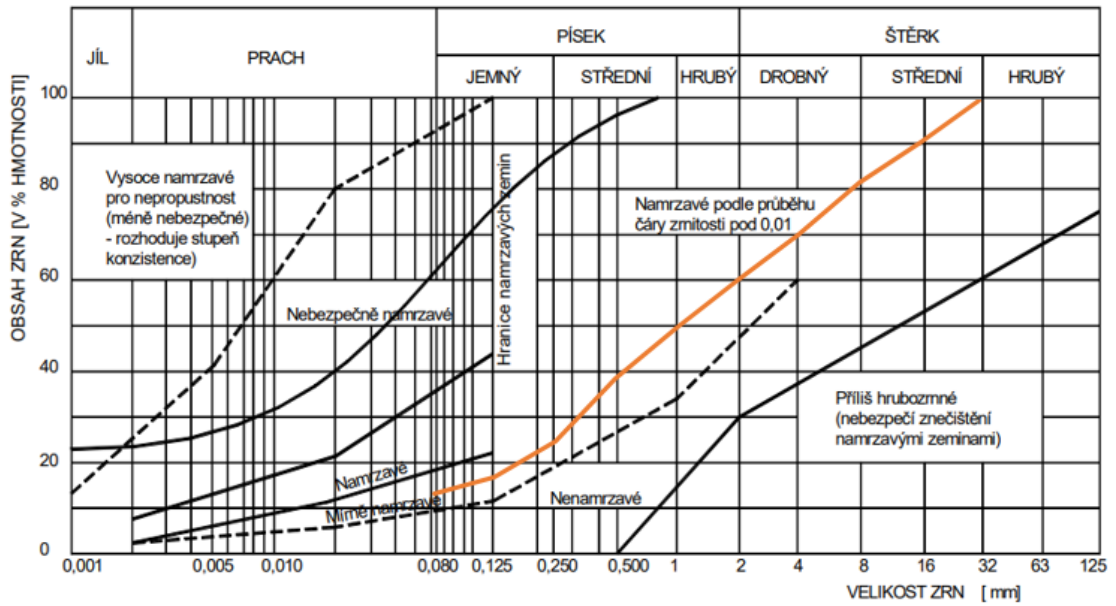


Obrázek 3.21 - Vzorek z RSM kamenitého po zkoušce

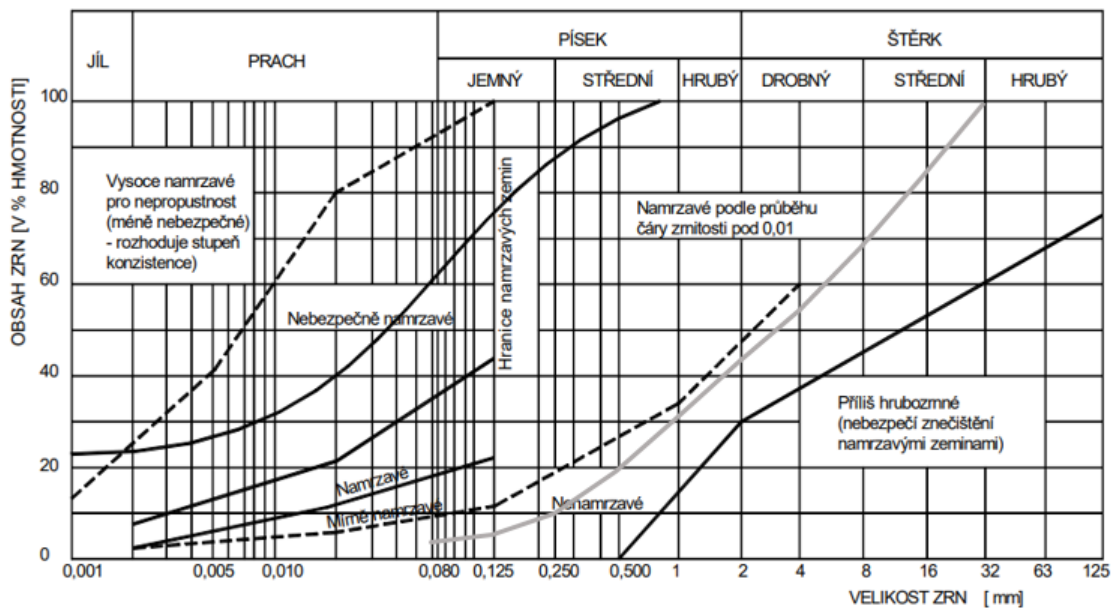
Vyhodnocení zkoušky pomocí nepřímé metody



Graf 3.14 - Scheibleho kritérium - směsný stavební recyklát frakce 32/63



Graf 3.15 - Scheibleho kritérium - směsný stavební recyklát cihelný, frakce 0/32



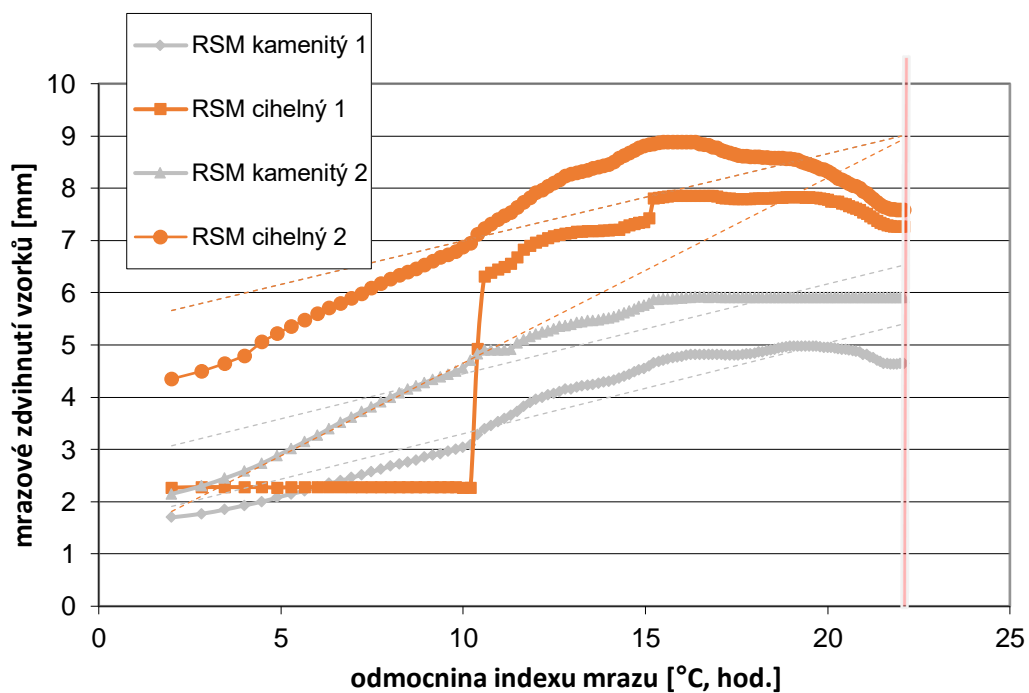
Graf 3.16 - Scheibleho kritérium - směsný stavební recyklát kamenitý, frakce 0/32

Vyhodnocení zkoušky pomocí přímé metody

Tabulka 3.15 - Výsledky namrzavosti směsných recyklátů

	RSM kamenitý		RSM cihelný	
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 1	Vzorek 2
Počáteční hodnota zdvihu [mm]	1,70	2,15	2,27	4,35
Konečná hodnota zdvihu [mm]	4,64	5,91	7,27	7,59
Mrazový zdvih během zkoušení [mm]	2,94	3,76	5,00	3,24
Průměrná hodnota β jednotlivých vzorků	0,11	0,13	0,21	0,06
Celkový průměr β	0,12		0,14*	

*) Vzhledem k průběhu křivky RSM cihelného u vzorku 2 lze vidět, že výsledná hodnota β je vzhledem ke klesajícímu průběhu křivky přibližně od 90. hodiny namrzání zkrácena. Proto lze předpokládat, že výsledná průměrná hodnota RSM cihelného se posune na hodnotu podobnou výsledku vzorku 1 a poté lze klasifikovat RSM cihelný ke spodní hranici mírně namrzavé a namrzavé zeminy, což by potvrdilo výsledky Scheibleho kritéria.



Graf 3.17 - Grafické znázornění mrazových zdvihů

3.2.6 Odolnost proti drcení

Zkoušení bylo prováděno podle platné normy ČSN EN 1097-2 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Metody pro stanovení odolnosti proti drcení. Podstatou zkoušky je zjistit součinitel LA, který vyjadřuje míru drcení kameniva.

Odolnost proti drcení byla prováděna pouze na směsném recyklátu cihelném frakce 0/32, protože se předpokládá, že jeho výsledný součinitel LA bude vyšší, než u směsného recyklátu kamenitého. Na začátku měření byl připraven zkušební vzorek frakce 8 – 16 mm. Příprava vzorku byla provedena mechanickým proséváním přes síta velikosti 8 mm, 10 mm, 11,2 mm, 14 mm a 16 mm. Po prosetí byl vzorek promyt, aby byl zbaven nečistot, a důkladně vysušen při teplotě 70 ± 5 °C. Z takto připravené navážky byl připraven zkušební vzorek o hmotnosti 5000 ± 5 g. Před započítím zkoušky je nutné zkontrolovat čistotu bubnu, aby nedošlo ke zkreslení výsledku případnými nečistotami. Po vyčištění bylo do bubnu vloženo 11 ocelových koulí a poté připravený zkušební vzorek. Buben byl pečlivě uzavřen víkem, aby nedocházelo při zkoušce k úniku jemných prachových částic, a bylo spuštěno otáčení. Otlukový buben se musí během zkoušky otočit 500 krát, při rychlosti mezi 31 otáček – 33 otáček/minutu. Po dokončení otáčení se počká přibližně 10 minut, aby došlo k sednutí jemných částic. Poté bylo odejmuto víko a obsah bubnu opatrně vysypán do připraveného sběrného plechu. Poté byl smetáčkem vymeten vnitřek bubnu, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Ze vzorku byly vydělány ocelové koule a očištěny od jemného prachu. Poté byl proveden síťový rozbor zkušebního vzorku s použitím síta velikosti 1,6 mm. Mechanické prosévání bylo doplněno ručním, aby se zamezilo možnosti vzniku chyby. Po dokončení prosévání byl zvážen zbytek na síti 1,6 mm a zaznamenán jako hmotnost m.



Obrázek 3.23 - Promytý a vysušený zkušební vzorek



Obrázek 3.24 - Ocelové koule



Obrázek 3.25 - Otlukový buben



Obrázek 3.26 - Zkušební vzorek po zkoušce

Vyhodnocení zkoušky

Součinitel Los Angeles:

$$LA = \frac{5000 - m}{50} [\%]$$

m ... hmotnost zkušebního vzorku zachycená na síť 1,6 mm

m = 3 191,3 g

$$LA = \frac{5000 - m}{50} = \frac{5000 - 3191,3}{50} = \mathbf{36,17 \%}$$

4 ZÁVĚR

Cílem teoretické části bakalářské práce bylo shrnout dostupné informace o směsném stavebním recyklátu a jeho možným využitím do zemního tělesa pozemní komunikace. Bylo zjištěno, že stavební a demoliční odpad tvoří velké procentuální zastoupení ze všech odpadů a proto je důležité dbát a významně zvyšovat objemy recyklovaného SDO. Složení směsného stavebního recyklátu není pevně stanoveno a výsledná kvalita je velmi různorodá. Technickými podmínkami je pouze upraveno množství cizorodých částic, které mohou výslednou kvalitu ovlivnit. Mezi tyto částice patří zbytky výztuže, dřevo, plast apod. Pro zaručení nepsané kvality recyklátu se osvědčilo dodržování tzv. blokového schématu, které však není všemi recyklačními linkami dodržováno a výsledek recyklace se tak velmi liší. V této oblasti je potřeba zapracovat a klást důraz, aby se tyto postupy ustálily a dodržovaly pro zaručení výsledné kvality recyklátů. Důležitým faktorem je také procentuální zastoupení hlavní složky recyklátu, podle čehož se posuzuje vhodnost použití pro jednotlivé vrstvy pozemní komunikace. Směsný recyklát je v tomto ohledu klasifikován jako výhodný pro použití do zemního tělesa. Kromě této klasifikace je však také důležité provést funkční zkoušky a deklarovat tak celkové vlastnosti recyklátu jako je například stáří vstupního materiálu k recyklaci, původ kameniva nebo jeho pevnost. Pro výstavbu horní vrstvy násypu nebo podloží vozovky je vhodný také směsný recyklát se zvýšeným obsahem cihelného střepu, je však nutné dodržet zrnitost, která je předepsaná horním a dolním intervalem. Je však důležité dbát na obsah cihelných částic, jelikož z toho vyplývá také problematická vlastnost recyklátů, kterou je odolnost proti drcení a míra namrzavosti zemin. Další problematickou vlastností je obsah škodlivých látek. Ze zahraničních zdrojů, které se zabývají využitím recyklátů ze stavební výroby, bylo zjištěno, že recyklace je prioritou většiny států. V některých státech je míra recyklace větší než 90 % a velká většina z recyklovaných materiálů je opětovně využita. Dobrou zprávou je také hranice míry recyklace, kterou stanovilo zasedání evropského parlamentu v roce 2008, která je stanovena na 70 % do konce roku 2020 a podle odhadů vypadá, že se jí velká většina států přiblíží.

Cílem praktické části bylo zkoušení směsného recyklátu a ověření, zda může zastoupit běžně užívané přírodní materiály. V první řadě byly recykláty posouzeny na základě zrnitosti. Hlavním cílem bylo zhodnotit směsný recyklát pro použití do aktivní zóny pomocí zkoušek IBI a CBR, zhodnotit míru namrzavosti a posoudit odolnost proti drcení. Ke zkoušení byly použity primárně směsné recykláty frakce 0/32 z nichž jeden měl větší zastoupení cihelných střepů a

druhý měl převážné zastoupení kamenité složky. Dále byl zkoušen také směsný recyklát frakce 32/63.

Podle zkoušky zrnitosti je směsný stavební recyklát převážně s cihelným střepem klasifikován podle ČSN 73 6133 jako S3 S-F, což je písek s příměsí jemnozrné zeminy, který je podmíněčně vhodný pro provedení aktivní zóny. Směsný stavební recyklát převážně kamenitý byl klasifikován jako G1 G-W, což je štěrk dobře zrněný, který je vhodný jak pro provedení aktivní zóny tak také násypu. Podle křivky zrnitosti nejhrubšího recyklátu jej lze považovat spíše za recyklát frakce 0/63 i přesto, že dodavatel jej označuje jako frakci 32/63. Sítem velikosti 32 mm propadlo 40 % zeminy, což může být způsobeno špatně provedenou recyklací nebo nevhodně uloženým materiálem na odběrném místě. I přesto je materiál klasifikován jako G3 G-F, což znamená, že je pro provádění aktivní zóny a násypů také vhodný.

Další zkouškou byl stanoven objem plovoucích částic, kde bylo vyhodnoceno, že směsný recyklát cihelný obsahuje 4,976 cm³/kg a směsný recyklát kamenitý 2,444 cm³/kg plovoucích částic. Vzhledem k tomu, že technické podmínky TP 210 předepisují maximální obsah cizorodých částic na 10 % hmotnosti, jedná se o zanedbatelné množství, které nemá na výslednou kvalitu recyklátu velký vliv.

Dalším bodem bylo provedení Proctorovy zkoušky. Zde byla vyhodnocena maximální objemová hmotnost při optimální vlhkosti. Objemová hmotnost se u tří vzorků příliš nelišila, když největší objemovou hmotnost suché směsi měl vzorek směsného recyklátu kamenitého s 2 % cementu a to 1999 kg/m³. Samotný směsný kamenitý recyklát měl objemovou hmotnost 1976 kg/m³ a směsný recyklát cihelný 1968 kg/m³. Tímto všechny vzorky splňují požadavky na objemovou hmotnost předepsané ČSN 73 6133 pro použití do aktivní zóny a násypu. Optimální vlhkost byla v daném pořadí 10,1 % u recyklátu kamenitého s cementem, 10,8 % u recyklátu směsného kamenitého a 9,5 % u recyklátu směsného cihelného. Je důležité podotknout, že cement značným rozdílem zlepšil zhutnitelnost namíchaných směsí. Optimální vlhkost u směsného recyklátu kamenitého je potřeba pečlivě kontrolovat vzhledem k malému obsahu jemných částic. V případě nevhodného vzorku, kdy je obsažen převážně hrubší materiál, se předpokládá, že se jeho vlhkost přibližně o 0,5 % sníží.

Hlavním cílem bylo zhodnotit únosnost daných vzorků pomocí zkoušek IBI a CBR a míry namrzavosti recyklovaných směsí. U okamžitého indexu únosnosti IBI bylo zjištěno, že provádění násypů je možné ze všech tří typů směsí, přičemž největší únosnost zaznamenal směsný stavební recyklát s cementem s hodnotou IBI 152 %. Největší hodnotu CBR zaznamenal taktéž směsný stavební recyklát s cementem při hodnotě CBR 456 %. Mezitím co u ostatních recyklátů se

výsledky IBI a CBR prakticky nelišily, u tohoto typu stmelené směsi došlo k čtyřnásobnému zvětšení, což je nejspíše výsledkem několikanásobného zrání a tvrdnutí hydraulického pojiva. Hodnoty CBR vypovídají o tom, že lze z těchto materiálů provádět všechny typy podloží, tedy P I – P III. Co se týče míry namrzavosti, dopadl nejlépe směsný stavební recyklát kamenitý s výsledným součinitelem $\beta = 0,12$. Můžeme jej zařadit do kategorie nenamrzavé, což bylo potvrzeno také nepřímou metodou, tzv. Scheibleho kritériem. Směsný stavební recyklát s cementem na míru namrzavosti zkoušen nebyl, dá se však předpokládat, že přidáním hydraulického pojiva se jeho odolnost vůči mrazu zlepší. Směsný stavební recyklát cihelný je s výsledkem $\beta = 0,14$ hodnocen také jako nenamrzavý, avšak v důsledku výkyvu při měření ho lze vyhodnotit spíše jako mírně namrzavý až namrzavý, což potvrzuje také Scheibleho kritérium. Z tohoto hlediska je poté směsný stavební recyklát cihelný nevhodný pro typ podloží P I, kde je požadavkem aby byla zemina nenamrzavá. Směsný recyklát frakce 32/63 lze zařadit do kategorie hrubozrnné, kde hrozí znečištění namrzavými zeminami.

Poslední zkouškou byla odolnost proti drčení, která byla provedena na směsném recyklátu cihelného typu. Výsledný součinitel vyšel $LA = 36,17 \%$, což lze brát za velmi dobrý výsledek, jelikož běžně se otlukovost u směsných recyklátů pohybuje od 50 % nahoru. Směsná recyklát kamenitého typu zkoušen nebyl, protože se dá předpokládat, že jeho výsledný součinitel LA bude nižší.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] TP 210, *Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací*. Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, obor pozemních komunikací, 2011.
- [2] ČSN 73 6133. *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. Únor 2010.
- [3] STEHLÍK, Dušan. *Praktické aplikace v pozemních komunikacích*; Skriptum k přednáškám. 2006. vyd. VUT v Brně: Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací
- [4] *Produkce odpadů* [online]. Český statistický úřad, 2017 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/index.jsf?page=vystup-objekt&z=T&f=TABULKA&katalog=30842&pvo=ZPR05&str=v86#w=>
- [5] *Stavební a demoliční odpad v novém metodickém pokynu* [online]. 2003 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/45033>
- [6] BROŽOVÁ, Lucie a Kamila KUNTOVÁ. *Recyklace stavebního demoličního odpadu a jeho využití u pozemních staveb* [online]. 2016, 32-54 [cit. 2019-05-20]. DOI: <https://doi.org/10.14311/bit.2016.02.05>. ISSN 2570-7434.
- [7] *Vyhláška č. 93/2016 Sb.: o Katalogu odpadů* [online]. 2016 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-93>
- [8] STEHLÍK, Dušan. Stavební a demoliční odpad v konstrukci pozemních komunikací. In: *Časopis stavebnictví* [online]. 2008 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.casopisstavebnictvi.cz/stavebni-a-demolicni-odpad-v-konstrukci-pozemnich-komunikaci_A718_I18
- [9] STEHLÍK, Dušan. *Technické podmínky pro užití recyklovaných stavebních materiálů do pozemních komunikací*. In: RECYCLING 2011: Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin. Brno, 17. -18. 3. 2011, s. 26-33, ISBN 978-80-214-4253-5
- [10] ARSM: *Asociace pro rozvoj recyklace stavebních materiálů v České republice* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.arsm.cz/>
- [11] ŠKOPÁN, Miroslav. *Vývojové trendy v technologiích pro recyklaci stavebních a demoličních odpadů* [online]. 2007 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.stavebnitechnika.cz/clanky/trendy-v-technologiich-pro-recyklaci-odpadu>
- [12] JUNGA, Petr, Tomáš VÍTĚZ a Petr TRÁVNÍČEK. *Technika pro zpracování odpadů I*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, 2015. ISBN 978-80-7509-207-6.

- [13] TURČINEK, Andrej. *Mobilní zařízení pro drčení kameniva a recyklátů ze stavebních odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.
- [14] NOVOTNÝ, Miloslav. *Recyklace vzniklé stavební suti s možností jejího využití* [online]. In: časopis SILNICE ŽELEZNICE, 2013 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/recyklace-vznikle-stavebni-suti-s-moznosti-jejeho-vyuziti/>
- [15] HENKOVÁ, Svatava. *Stavební stroje* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: http://tstsw.cz/stavebni_stroj/predmet-bw03
- [16] LIMBERGER, Jakub. *Drčení stavebního odpadu*. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2016. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Hlava, PhD.
- [17] KRUTIL, Karel. *Posuzování shody výrobků ze stavebních a demoličních odpadů* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: http://arasm.cz/dok/sbor_rec_2005/035_Krutil.pdf
- [18] ŠKOPÁN, Miroslav. *Možnosti zvyšování jakosti recyklátů ze stavebních a demoličních odpadů* [online]. 2008 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/moznosti-zvysovani-jakosti-recyklatu-ze-stavebnich-a-demolicnich-odpadu>
- [19] SOKOLOVÁ, Veronika. *Vlastnosti recyklovaných kameniv používaných do pozemních komunikací*. Brno, 2012. 60 s., 68 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
- [20] STEHLÍK, D. a V. ADAMEC. *Využití recyklátů při výstavbě, opravách a rekonstrukcích vozovek pozemních komunikací*. In: Acta environmentalica universitatis comenianae. Bratislava, 2012, s. 109-114. ISSN 1335-0285.
- [21] DUFONEV R. C. *Akciová společnost* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.dufonev.cz/index.php>
- [22] POSPÍŠIL, Karel a Radka RÁKOSNÍKOVÁ. *Podmínky použití recyklovaných materiálů* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.cdv.cz/file/clanek-podminky-pouziti-recyklovanych-materialu/>
- [23] TP 170, *Navrhování vozovek pozemních komunikací*. Ministerstvo dopravy ČR, 2004.
- [24] Dodatek TP 170, *Navrhování vozovek pozemních komunikací*. Ministerstvo dopravy ČR, 2010.
- [25] ČSN EN ISO 17894-4: *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti*. 2017.

- [26] ZAJÍČEK, Jan. *Technologie stavby vozovek*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě a Sdružení pro výstavbu silnic Praha vydalo Informační centrum ČKAIT, 2014. Technická knihovna. ISBN 978-80-87438-59-6.
- [27] ČSN EN 1097-2: *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 2: Metody pro stanovení odolnosti proti drcení*. 2010.
- [28] 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*. 2011.
- [29] ČSN EN 13286-47: *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání*. 2005.
- [30] ČSN 72 1191. *Zkoušení míry namrzavosti zemin*. 2013.
- [31] STEHLÍK, Dušan. *Recykláty do stmelených podkladních vrstev vozovek pozemních komunikací*. In: RECYCLING 2013: Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin. Brno, 21. – 22. 3. 2013, s. 45-50. ISBN 978-80-214-4688-5.
- [32] VIEIRA, Castorina Silva; PEREIRA, Paulo M. *Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review*. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 103: 192-204.
- [33] FRASHOGAR, UMRIGAR a MANJUNATH CHANDAN. *Improving the recycling rate of construction and demolition waste in Sweden – A reverse logistics perspective*. Sweden, 2017. Department of Technology Management and Economics CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg.
- [34] SCHIMMOLLER, Vincent E. *Recycled materials in European highway environments uses, technologies, and policies*. DIANE Publishing, 2000.
- [35] LI, Youyun, et al. *Investigation into the Application of Construction and Demolition Waste in Urban Roads*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.
- [36] ČSN EN 933-11: *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 11: Klasifikace složek hrubého recyklovaného kameniv*. 2009.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 - Vysvětlivky ke zkratkám [1], vlastní zpracování.....	14
Tabulka 2.2 - Doporučené použití RSM dle procentuálního zastoupení hlavní složky [1]	21
Tabulka 2.3 - Orientační srovnání cen jednotlivých materiálů [21]	24
Tabulka 2.4 - Použití směsného recyklátu v konstrukci pozemní komunikace [22]	25
Tabulka 2.5 - Použitelnost zemin pro stavbu zemního tělesa [2]	26
Tabulka 2.6 - Typy podloží vozovky [23]	28
Tabulka 2.7 - Požadované hodnoty únosnosti CBR pro upravené zeminy v aktivní zóně [2].....	29
Tabulka 2.8 - Požadované hodnoty únosnosti CBR, IBI pro upravené zeminy v násypu [2]	29
Tabulka 2.9 - Výsledky stanovených modulů pružnosti nestmelených směsí [8].....	30
Tabulka 2.10 - Kritérium míry namrzavosti [30]	33
Tabulka 2.11 - Srovnání legislativních limitů ve stavebních odpadech v zahraničí [31]	34
Tabulka 3.1 - Tabulka zrnitosti směsného recyklátu cihelného, frakce 0/32	42
Tabulka 3.2 - Tabulka zrnitosti směsného recyklátu kamenitého, frakce 0/32	43
Tabulka 3.3 - Tabulka zrnitosti směsného recyklátu, frakce 32/63	44
Tabulka 3.4 - Podíl plovoucích částic	46
Tabulka 3.5 - Vyhodnocení výsledků - směsný recyklát cihelný	51
Tabulka 3.6 - Vyhodnocení výsledků - směsný recyklát kamenitý.....	52
Tabulka 3.7 - Vyhodnocení výsledků - směsný recyklát kamenitý s cementem.....	53
Tabulka 3.8 - Výsledky IBI - směsný recyklát cihelný	56
Tabulka 3.9 - Výsledky IBI - směsný recyklát kamenitý.....	56
Tabulka 3.10 - Výsledky IBI - směsný recyklát kamenitý s cementem	57
Tabulka 3.11 - Výsledky CBR - směsný recyklát cihelný	57
Tabulka 3.12 - Výsledky CBR - směsný recyklát kamenitý.....	58
Tabulka 3.13 - Výsledky CBR - směsný recyklát kamenitý s cementem.....	58
Tabulka 3.14 - Celkové shrnutí výsledků	59
Tabulka 3.15 - Výsledky namrzavosti směsných recyklátů.....	63

SEZNAM GRAFŮ

Graf 2.1 - Podíl SDO v ČR v roce 2017 z celkového množství odpadů [4]	12
Graf 3.1 - Křivka zrnitosti směsného recyklátu cihelného, frakce 0/32	42
Graf 3.2 - Křivka zrnitosti směsného recyklátu kamenitého, frakce 0/32	43
Graf 3.3 - Křivka zrnitosti směsného recyklátu, frakce 32/63	44
Graf 3.4 - Proctorova křivka - směsný recyklát cihelný	51
Graf 3.5 - Proctorova křivka - směsný recyklát kamenitý	52
Graf 3.6 - Proctorova křivka - směsný recyklát kamenitý s cementem	53
Graf 3.7 - Křivka IBI - směsný recyklát cihelný	56
Graf 3.8 - Křivka IBI - směsný recyklát kamenitý	56
Graf 3.9 - Křivka IBI - směsný recyklát kamenitý s cementem	57
Graf 3.10 - Křivka CBR - směsný recyklát cihelný	57
Graf 3.11 - Křivka CBR - směsný recyklát kamenitý	58
Graf 3.12 - Křivka CBR - směsný recyklát kamenitý s cementem	58
Graf 3.13 - Výsledný graf s hodnotami IBI a CBR	59
Graf 3.14 - Scheibleho kritérium - směsný stavební recyklát frakce 32/63	61
Graf 3.15 - Scheibleho kritérium - směsný stavební recyklát cihelný, frakce 0/32	62
Graf 3.16 - Scheibleho kritérium - směsný stavební recyklát kamenitý, frakce 0/32	62
Graf 3.17 - Grafické znázornění mrazových zdvihů	63

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1 - Příčný řez pozemní komunikací [3]	11
Obrázek 2.2 - Blokové schéma recyklačního procesu [1].....	16
Obrázek 2.3 - Schéma mobilní recyklační linky s pásovým podvozkem [12]	17
Obrázek 2.4 - Řez jednovzpěrným čelistovým drtičem [15].....	19
Obrázek 2.5 - Příčný řez odrazovým drtičem [16]	19
Obrázek 2.6 - Řez kuželovým drtičem [15].....	20
Obrázek 2.7 - Sítový rozbor [26]	31
Obrázek 2.8 - Křivky zrnitosti [26]	31
Obrázek 2.9 - Výsledný graf Proctorovy zkoušky [26].....	32
Obrázek 3.1 - Sada zkušebních sít.....	41
Obrázek 3.2 - Horkovzdušná sušárna.....	41
Obrázek 3.3 - Směsný recyklát kamenitý	41
Obrázek 3.4 - Směsný recyklát cihelný.....	41
Obrázek 3.5 - Ponořená zkušební navážka.....	45
Obrázek 3.6 - Vybrané plovoucí částice	45
Obrázek 3.7 - Plovoucí částice v odměrném válci.....	46
Obrázek 3.8 - Sestava moždíře s nástavcem	48
Obrázek 3.9 - Hutnicí zařízení Proctor	48
Obrázek 3.10 - Připravené směsi s různou vlhkostí	48
Obrázek 3.11- Detail rozebrané formy se zhutněným vzorkem.....	49
Obrázek 3.12 - Zhutněný vzorek - pohled z vrchu	49
Obrázek 3.13 - Váženky s odebranou zeminou na měření vlhkosti.....	49
Obrázek 3.14 - Proctorova forma typu B	54
Obrázek 3.15 - Zkouška IBI	54
Obrázek 3.16 - Zkušební vzorek po saturaci.....	54
Obrázek 3.17 - Zkouška CBR	54
Obrázek 3.18 - Vzorky z RSM cihelného.....	60
Obrázek 3.19 - Vzorky z RSM kamenitého	60
Obrázek 3.20 - Chladicí skříň	61
Obrázek 3.21 - Vzorek z RSM cihelného po zkoušce.....	61
Obrázek 3.22 - Vzorek z RSM kamenitého po zkoušce	61

Obrázek 3.23 - Promytý a vysušený zkušební vzorek	64
Obrázek 3.24 - Ocelové koule.....	64
Obrázek 3.25 - Otlukový buben	65
Obrázek 3.26 - Zkušební vzorek po zkoušce	65

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

SDO	stavební a demoliční odpad
RSM	recyklovaný stavební materiál
AZ	aktivní zóna
Rc	beton, betonové výrobky, malta, betonové zdící prvky
Ra	asfaltové materiály
Ru	nestmelené kamenivo, přírodní kámen, kamenivo ze směsi stmelené hydraulickým pojivem
Rb	pálené zdící prvky např. cihly a tvárnice, vápenopískovcové zdící prvky, neplovoucí pórobeton
Rg	sklo
X	jiné částice (% hm.) jako jíla a další přilnavé nečistoty, kovy (železné a neželezné), neplovoucí dřevo, stavební plasty a pryž, sádrová omítka
Y	ostatní částice (% hm.) jako papír, polyetylenové obaly, textil, organické materiály, atd.
FL	plovoucí částice (cm ³ /kg) podle ČSN EN 933-11 – plovoucí dřevo, polystyrén, apod.
V _{FL}	objem plovoucích částic
AB	asfaltové (asfaltobetonové) vrstvy
CB	cementobetonový kryt
NV	nestmelená vrstva
MZK	mechanicky zpevněné kamenivo podle ČSN EN 13285
ŠD _A	šterkodrt podle ČSN EN 13285, kvalitativní kategorie A
ŠD _B	šterkodrt podle ČSN EN 13285, kvalitativní kategorie B
MZ	mechanicky zpevněná zemina podle ČSN EN 13285 NA
SV	stmelená vrstva
PV	prolévaná vrstva
VŠ	vibrovaný šterk

ŠP	štěrkopísek
SR	směsný recyklát
W _l	mez tekutosti
I _c	číslo (stupeň) konzistence
$\rho_{d \max. PS}$	maximální objemová hmotnost zeminy Proctor standard (laboratorní srovnávací suchá objemová hmotnost)
w _p	mez plasticity
CBR	Kalifornský poměr únosnosti
IBI	okamžitý index únosnosti
E _r	modul pružnosti
LA	odolnost proti drcení kameniva metodou Los Angeles hodnotí drtitelnost materiálů, zejména při hutnění technologických vrstev násypu a konstrukce vozovky podle ČSN EN 1097-2
$\rho_{d \max}$	maximální objemová hmotnost zeminy
w _{opt}	optimální vlhkost stanovená zkouškou Proctor standard
F	Síla potřebná k zatlačení trnu do stanovené hloubky ve zkoušené zemině při zkoušce CBR (Kalifornský poměr únosnosti)
F _s	Standartní síla potřebná k zatlačení do stanovené hloubky dle ČSN EN 13286-47
Δh	naměřený zdvih zkoušeného vzorku (mm) odpovídající $\Delta\sqrt{I_m}$
I _m	index mrazu [°C]
PAU	Polycyklické aromatické uhlovodíky (suma antracenu, benzo(a)antracenu, benzo(a)pyrenu, benzo(b)fluoranthenu, benzo(ghi)perylenu, benzo(k)fluoranthenu, fluoranthenu, fenantrenu, chrysenu, indeno(1,2,3 cd)pyrenu)
PCB	polychlorované bifenyly
CAT	Dánská klasifikace recyklovaných materiálů
WTE	energetické využití odpadů

PŘÍLOHY

STANOVENÍ MÍRY NAMRZAVOSTI DLE ČSN 72 1191

Provedl: Daniel Masař
Místo: Laboratoř ústavu pozemních komunikací, FAST VUT v Brně
Datum: 6. 5. 2019
Vzorek: Směsný stavební recyklát kamenitý
 Směsný stavební recyklát cihelný
Počet zk. vzorků: 4
Doba saturace: 17 hodin
Doba namrzání: 120 hodin
Naměřené hodnoty:

čas	lm	\sqrt{Im}	mrazové zdvihy				součinitel namrzavosti β			
			kam	cih	kam	cih	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	$\beta 4$
0	4	2,00	1,70	2,27	2,15	4,35	0,08	0,01	0,18	0,18
1	8	2,83	1,77	2,28	2,30	4,50	0,13	0,00	0,24	0,22
2	12	3,46	1,85	2,28	2,45	4,64	0,15	0,00	0,26	0,28
3	16	4,00	1,93	2,28	2,59	4,79	0,15	0,00	0,30	0,57
4	20	4,47	2,00	2,28	2,73	5,06	0,19	-0,02	0,35	0,37
5	24	4,90	2,08	2,27	2,88	5,22	0,18	0,03	0,36	0,33
6	28	5,29	2,15	2,28	3,02	5,35	0,16	0,00	0,36	0,36
7	32	5,66	2,21	2,28	3,15	5,48	0,20	0,00	0,35	0,35
8	36	6,00	2,28	2,28	3,27	5,60	0,22	0,00	0,40	0,34
9	40	6,32	2,35	2,28	3,40	5,71	0,16	0,00	0,39	0,29
10	44	6,63	2,40	2,28	3,52	5,80	0,20	0,00	0,34	0,31
11	48	6,93	2,46	2,28	3,62	5,89	0,18	0,00	0,35	0,32
12	52	7,21	2,51	2,28	3,72	5,98	0,22	0,00	0,33	0,40
13	56	7,48	2,57	2,28	3,81	6,09	0,19	0,00	0,38	0,34
14	60	7,75	2,62	2,28	3,91	6,18	0,24	0,00	0,35	0,31
15	64	8,00	2,68	2,28	4,00	6,26	0,16	0,00	0,32	0,28
16	68	8,25	2,72	2,28	4,08	6,33	0,17	0,00	0,29	0,29
17	72	8,49	2,76	2,28	4,15	6,40	0,17	0,00	0,30	0,26
18	76	8,72	2,80	2,28	4,22	6,46	0,22	0,00	0,26	0,31
19	80	8,94	2,85	2,28	4,28	6,53	0,18	0,00	0,27	0,36
20	84	9,17	2,89	2,28	4,34	6,61	0,14	0,00	0,23	0,32
21	88	9,38	2,92	2,28	4,39	6,68	0,19	0,00	0,24	0,24
22	92	9,59	2,96	2,28	4,44	6,73	0,19	0,00	0,29	0,29
23	96	9,80	3,00	2,28	4,50	6,79	0,20	-0,05	0,30	0,40
24	100	10,00	3,04	2,27	4,56	6,87	0,25	0,00	0,71	0,40
25	104	10,20	3,09	2,27	4,70	6,95	1,03	13,69	0,67	0,88
26	108	10,39	3,29	4,93	4,83	7,12	0,58	7,24	0,37	0,58
27	112	10,58	3,40	6,31	4,90	7,23	0,32	0,37	0,00	0,48
28	116	10,77	3,46	6,38	4,90	7,32	0,38	0,33	0,00	0,43
29	120	10,95	3,53	6,44	4,90	7,40	0,33	0,33	0,00	0,39

30	124	11,14	3,59	6,50	4,90	7,47	0,34	0,34	0,11	0,39
31	128	11,31	3,65	6,56	4,92	7,54	0,40	0,68	0,68	0,51
32	132	11,49	3,72	6,68	5,04	7,63	0,58	0,81	0,35	0,58
33	136	11,66	3,82	6,82	5,10	7,73	0,47	0,47	0,35	0,53
34	140	11,83	3,90	6,90	5,16	7,82	0,36	0,36	0,30	0,54
35	144	12,00	3,96	6,96	5,21	7,91	0,24	0,24	0,18	0,36
36	148	12,17	4,00	7,00	5,24	7,97	0,24	0,24	0,18	0,43
37	152	12,33	4,04	7,04	5,27	8,04	0,19	0,25	0,25	0,37
38	156	12,49	4,07	7,08	5,31	8,10	0,25	0,19	0,25	0,38
39	160	12,65	4,11	7,11	5,35	8,16	0,25	0,13	0,13	0,45
40	164	12,81	4,15	7,13	5,37	8,23	0,06	0,13	0,13	0,26
41	168	12,96	4,16	7,15	5,39	8,27	0,20	0,13	0,26	0,20
42	172	13,11	4,19	7,17	5,43	8,30	0,13	0,00	0,07	0,13
43	176	13,27	4,21	7,17	5,44	8,32	0,13	0,07	0,13	0,20
44	180	13,42	4,23	7,18	5,46	8,35	0,07	0,00	0,07	0,20
45	184	13,56	4,24	7,18	5,47	8,38	0,14	0,00	0,07	0,20
46	188	13,71	4,26	7,18	5,48	8,41	0,21	0,07	0,14	0,14
47	192	13,86	4,29	7,19	5,50	8,43	0,07	0,00	0,07	0,21
48	196	14,00	4,30	7,19	5,51	8,46	0,21	0,07	0,21	0,35
49	200	14,14	4,33	7,20	5,54	8,51	0,21	0,07	0,21	0,50
50	204	14,28	4,36	7,21	5,57	8,58	0,29	0,29	0,29	0,36
51	208	14,42	4,40	7,25	5,61	8,63	0,29	0,29	0,29	0,36
52	212	14,56	4,44	7,29	5,65	8,68	0,29	0,15	0,29	0,37
53	216	14,70	4,48	7,31	5,69	8,73	0,30	0,22	0,30	0,30
54	220	14,83	4,52	7,34	5,73	8,77	0,22	0,07	0,22	0,30
55	224	14,97	4,55	7,35	5,76	8,81	0,38	0,53	0,30	0,23
56	228	15,10	4,60	7,42	5,80	8,84	0,45	2,88	0,53	0,08
57	232	15,23	4,66	7,80	5,87	8,85	0,15	0,15	0,00	0,15
58	236	15,36	4,68	7,82	5,87	8,87	0,23	0,08	0,08	0,08
59	240	15,49	4,71	7,83	5,88	8,88	0,16	0,08	0,00	0,08
60	244	15,62	4,73	7,84	5,88	8,89	0,24	0,08	0,00	0,00
61	248	15,75	4,76	7,85	5,88	8,89	0,08	0,00	0,08	0,00
62	252	15,87	4,77	7,85	5,89	8,89	0,08	0,08	0,08	0,00
63	256	16,00	4,78	7,86	5,90	8,89	0,16	0,00	0,08	0,00
64	260	16,12	4,80	7,86	5,91	8,89	0,08	0,00	0,00	0,00
65	264	16,25	4,81	7,86	5,91	8,89	0,08	0,00	0,08	-0,08
66	268	16,37	4,82	7,86	5,92	8,88	0,00	0,00	0,00	-0,25
67	272	16,49	4,82	7,86	5,92	8,85	0,00	0,00	0,00	-0,08
68	276	16,61	4,82	7,86	5,92	8,84	0,00	-0,08	-0,08	-0,17
69	280	16,73	4,82	7,85	5,91	8,82	0,00	0,00	0,08	-0,34
70	284	16,85	4,82	7,85	5,92	8,78	0,00	-0,08	0,00	-0,08
71	288	16,97	4,82	7,84	5,92	8,77	-0,09	-0,17	-0,09	-0,43
72	292	17,09	4,81	7,82	5,91	8,72	-0,09	-0,09	0,00	-0,17
73	296	17,20	4,80	7,81	5,91	8,70	0,00	-0,09	0,00	-0,26
74	300	17,32	4,80	7,80	5,91	8,67	0,00	-0,09	0,00	-0,17
75	304	17,44	4,80	7,79	5,91	8,65	0,00	0,00	0,00	-0,17
76	308	17,55	4,80	7,79	5,91	8,63	0,09	0,00	0,00	-0,09
77	312	17,66	4,81	7,79	5,91	8,62	0,18	0,00	0,00	-0,09
78	316	17,78	4,83	7,79	5,91	8,61	0,00	0,00	0,00	-0,09
79	320	17,89	4,83	7,79	5,91	8,60	0,09	0,09	0,00	0,00

80	324	18,00	4,84	7,80	5,91	8,60	0,18	0,00	0,00	0,00
81	328	18,11	4,86	7,80	5,91	8,60	0,09	0,00	0,00	-0,09
82	332	18,22	4,87	7,80	5,91	8,59	0,18	0,00	0,00	0,00
83	336	18,33	4,89	7,80	5,91	8,59	0,09	0,09	0,00	-0,09
84	340	18,44	4,90	7,81	5,91	8,58	0,18	0,09	0,00	0,00
85	344	18,55	4,92	7,82	5,91	8,58	0,19	0,00	0,00	0,00
86	348	18,65	4,94	7,82	5,91	8,58	0,09	0,00	0,00	0,00
87	352	18,76	4,95	7,82	5,91	8,58	0,09	0,09	0,00	-0,09
88	356	18,87	4,96	7,83	5,91	8,57	0,09	0,00	0,00	-0,09
89	360	18,97	4,97	7,83	5,91	8,56	0,00	0,00	0,00	-0,10
90	364	19,08	4,97	7,83	5,91	8,55	0,00	0,00	0,00	-0,10
91	368	19,18	4,97	7,83	5,91	8,54	0,00	0,00	0,00	-0,29
92	372	19,29	4,97	7,83	5,91	8,51	0,00	-0,10	0,00	-0,29
93	376	19,39	4,97	7,82	5,91	8,48	0,00	0,10	0,00	-0,19
94	380	19,49	4,97	7,83	5,91	8,46	0,00	-0,10	0,00	-0,29
95	384	19,60	4,97	7,82	5,91	8,43	0,00	0,00	0,00	-0,20
96	388	19,70	4,97	7,82	5,91	8,41	-0,10	-0,10	0,00	-0,39
97	392	19,80	4,96	7,81	5,91	8,37	-0,10	-0,20	0,00	-0,10
98	396	19,90	4,95	7,79	5,91	8,36	0,00	-0,10	0,00	-0,40
99	400	20,00	4,95	7,78	5,91	8,32	0,00	-0,30	0,00	-0,40
100	404	20,10	4,95	7,75	5,91	8,28	-0,10	-0,10	0,00	-0,40
101	408	20,20	4,94	7,74	5,91	8,24	-0,10	0,00	0,00	-0,51
102	412	20,30	4,93	7,74	5,91	8,19	-0,10	-0,31	0,00	-0,31
103	416	20,40	4,92	7,71	5,91	8,16	0,00	-0,20	0,00	-0,41
104	420	20,49	4,92	7,69	5,91	8,12	-0,21	-0,31	0,00	-0,31
105	424	20,59	4,90	7,66	5,91	8,09	-0,10	-0,21	0,00	-0,41
106	428	20,69	4,89	7,64	5,91	8,05	-0,10	-0,31	0,00	-0,10
107	432	20,78	4,88	7,61	5,91	8,04	-0,21	-0,31	0,00	-0,42
108	436	20,88	4,86	7,58	5,91	8,00	-0,42	-0,42	0,00	-0,63
109	440	20,98	4,82	7,54	5,91	7,94	-0,11	-0,32	0,00	-0,42
110	444	21,07	4,81	7,51	5,91	7,90	-0,42	-0,53	0,00	-0,63
111	448	21,17	4,77	7,46	5,91	7,84	-0,21	-0,32	0,00	-0,53
112	452	21,26	4,75	7,43	5,91	7,79	-0,43	-0,53	0,00	-0,64
113	456	21,35	4,71	7,38	5,91	7,73	-0,32	-0,43	0,00	-0,54
114	460	21,45	4,68	7,34	5,91	7,68	-0,32	-0,32	0,00	-0,32
115	464	21,54	4,65	7,31	5,91	7,65	-0,11	-0,22	0,00	-0,32
116	468	21,63	4,64	7,29	5,91	7,62	-0,11	-0,11	0,00	-0,22
117	472	21,73	4,63	7,28	5,91	7,60	0,00	-0,11	0,00	0,00
118	476	21,82	4,63	7,27	5,91	7,60	0,00	0,00	0,00	-0,11
119	480	21,91	4,63	7,27	5,91	7,59	0,11	0,00	0,00	0,00
120	484	22,00	4,64	7,27	5,91	7,59	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabulka vyhodnocení součinitelů β po 120 hodinách namrzání

	RSM kamenitý		RSM cihelný	
	Vzorek 1	Vzorek 3	Vzorek 2	Vzorek 4
Průměrná hodnota β jednotlivých vzorků	0,11	0,13	0,21	0,06
Celkový průměr β	0,12		0,14	